

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

**DURABILITÉ ET VIEILLISSEMENT DES MATÉRIAUX COMPOSITES A BASE DE
FIBRES ET DE MARBRE RECYCLÉS**

Par

Nadia BENTLEMSAN

Devant le jury composé de :

MENADI Belkacem	Professeur	Université Saad Dahlab Blida	Président
HADJ SADOK Ahmed	Professeur	ENSH Blida	Examineur
BELLA Nabil	Professeur	Université Tahri Mohamed de Béchar	Examineur
ABDESSAMED Mouloud	Professeur	Université Saad Dahlab Blida	Examineur
HEBBOUCHE Abdelhamid	MCA	ENSH Blida	Examineur
KENAI Said	Professeur	Université Saad Dahlab Blida	Rapporteur

Blida, 2024

RESUME

La demande croissante en infrastructures a entraîné une utilisation excessive des ressources naturelles dont le sable qui est une ressource non renouvelable. D'un autre côté, l'industrie moderne génère de grandes quantités de déchets dont les déchets de marbre et les déchets liés à l'industrie des composites qui sont nocifs pour l'environnement. Afin de préserver les ressources naturelles, diverses méthodes peuvent être utilisées, notamment le recyclage des déchets en matériaux pouvant remplacer le ciment ou les agrégats ou utilisé comme ajout afin d'améliorer les performances du béton.

Ce travail étudie le comportement d'un mortier autoplaçant (MAP) à l'état frais et à l'état durci en premier lieu sous l'effet de la substitution de différentes proportions en poids du sable naturel (0%, 15%, 30%, 75% et 100%) par des particules fines de déchets de marbre, ensuite sous l'effet de l'ajout des fibres de verre recyclées (0 kg/m³, 0.25 kg/m³, 0.5 kg/m³, 0.75 kg/m³, 1 kg/m³, 1.25 kg/m³ et 1.5 kg/m³) et finalement la combinaison du marbre et des fibres de verre. Les mortiers à base de marbre de sable ont été particulièrement étudié par rapport à la durabilité (effet des attaques sulfatiques externes) et par rapport au vieillissement en appliquant les techniques de séchage mouillage afin d'accélérer le vieillissement naturel.

Les résultats montrent que pour une quantité de substitution de sable naturel par des déchets de marbre ne dépassant pas la proportion de 50% en poids, une bonne ouvrabilité et un temps d'écoulement sont obtenus à l'état frais. Une augmentation de la résistance à la compression et à la flexion est évidente à 90 jours de cure pour 30% et 50% de substitution du sable naturel par des déchets de marbre. Une diminution de la porosité est observée pour une substitution de 30%. De même pour les fibres de verre recyclés, les résultats obtenus montrent une amélioration de la résistance particulièrement la résistance à la flexion.

La combinaison des déchets de marbre et des fibres de verre recyclé a montré une augmentation des performances mécaniques notamment la résistance à la flexion.

La durabilité contre les attaques de sulfate a été améliorée vu que les mortiers avec 0% de marbre ont présenté une diminution de la résistance, tandis que ceux avec 15%, 30% et 50% de substitution de marbre ont présenté une augmentation de la résistance à 180 jours d'immersion.

Les échantillons ont été examinés par Microscope électronique à balayage (MEB-EDX) pour détecter la présence éventuelle d'ettringite.

Les essais de vieillissement accéléré ont montré que les mortiers à 30% et 50% présentaient une meilleure résistance au vieillissement par séchage mouillage que ce soit par rapport à la résistance à la compression, à la flexion et à l'amélioration de la porosité

Mots-clés : Mortier autoplaçant, marbre, résistance, microstructure, vieillissement, fibre de verre.

ABSTRACT

The growing demand for infrastructure has led to excessive use of natural resources, including sand, which is a non-renewable resource. On the other hand, modern industry generates large quantities of waste, including marble waste and composites industry waste, which is harmful to the environment. To preserve natural resources, various methods can be used, including recycling waste into materials that can replace cement or aggregates, or used as an additive to improve concrete performance.

This work studies the behavior of a self-compacting mortar (MAP) in the fresh and hardened states. Firstly, under the effect of the substitution of different proportions by weight of natural sand (0%, 15%, 30%, 75% and 100%) by fine particles of marble waste. Secondly, under the effect of the addition of recycled glass fibers (0 kg/m³, 0.25 kg/m³, 0.5 kg/m³, 0.75 kg/m³, 1 kg/m³, 1.25 kg/m³ and 1.5 kg/m³) and finally the combination of marble and glass fibers. Sand-marble mortars were studied in particular with regard to durability (effect of external sulfate attack) and aging, applying wet-drying techniques to accelerate natural aging.

The results show that for an amount of substitution of natural sand by marble waste not exceeding 50% by weight, good workability and flow time are obtained in the fresh state. An increase in compressive and flexural strength is evident at 90 days of curing for 30% and 50% substitution of natural sand by marble waste. A reduction in porosity is observed for 30% substitution.

Similarly, for recycled glass fibers, the results obtained show an improvement in strength, particularly flexural strength.

The combination of marble waste and recycled glass fibers has shown an increase in mechanical performance, particularly bending strength.

Durability against sulfate attack was improved as mortars with 0% marble substitution showed a decrease in strength, while those with 15%, 30% and 50% marble substitution showed an increase in strength at 180 days immersion. Samples were examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX) to detect the presence of ettringite.

Accelerated ageing tests showed that the 30% and 50% mortars showed better resistance to ageing by wet drying in terms of compressive strength, flexural strength and improved porosity.

Key words: Self-compacting mortar, marble, strength, microstructure, aging, glass fiber.

الملخص

إن الطلب المتزايد في ميدان البناء قد أدى إلى الاستخدام المفرط للموارد الطبيعية، بما في ذلك الرمال، وهو مورد غير متجدد. من ناحية أخرى، تولد الصناعات الحديثة كميات كبيرة من النفايات، بما في ذلك نفايات الرخام والنفايات الناتجة عن صناعة المواد المركبة، والتي تضر بالبيئة. ومن أجل الحفاظ على الموارد الطبيعية، يمكن استخدام طرق مختلفة، بما في ذلك إعادة تدوير النفايات إلى مواد يمكن أن تحل محل الإسمنت أو الرمال، أو استخدامها كمادة مضافة لتحسين أداء الخرسانة.

يتطرق هذا العمل إلى دراسة سلوك الملاط المرصوص ذاتياً، أولاً تحت تأثير استبدال نسب مختلفة من حيث الوزن من الرمل الطبيعي (0، 15، 30، 75، 100، 100٪) بجزيئات دقيقة من نفايات الرخام، ثم تحت تأثير إضافة ألياف زجاجية معاد تدويرها (0 كغ/م³، 0.25 كغ/م³، 0.5 كغ/م³، 0.75 كغ/م³، 1 كغ/م³، 1.25 كغ/م³ و 1.5 كغ/م³) وأخيراً تأثير مزيج من الرخام والألياف الزجاجية. تمت دراسة الملاط المصنوع بالرخام على وجه الخصوص فيما يتعلق بالمتانة (تأثير الكبريتات الخارجية) والإستدامة من خلال تطبيق تقنيات التجفيف والترطيب لتسريع الإستدامة الطبيعية.

أظهرت النتائج أنه بالنسبة لكمية من استبدال الرمل الطبيعي بمخلفات الرخام لا تتجاوز 50% من الوزن، يتم الحصول على انسيابية جيدة ووقت تدفق جيد في الحالة الطازجة. تتضح زيادة في المتانة عند 90 يوماً من المعالجة عند استبدال 30% و 50% من الرمل الطبيعي بمخلفات الرخام. ولوحظ انخفاض في المسامية عند استبدال 30%. وبالمثل بالنسبة للألياف الزجاجية المعاد تدويرها، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تحسناً في المقاومة، وخاصةً قوة الانحناء.

وقد أظهر الجمع بين نفايات الرخام والألياف الزجاجية المعاد تدويرها زيادة في الأداء الميكانيكي، وخاصةً قوة الانحناء.

تم تحسين المتانة ضد تأثير الكبريتات الخارجي حيث أظهرت النتائج انخفاض في المتانة في حالة عدم استعمال الرخام، بينما لوحظ زيادة في المتانة في حالة استعمال 15% و 30% و 50% من الرخام وخاصة بعد غمر العينات لمدة 180 يوماً. تم فحص العينات بواسطة الفحص المجهر الإلكتروني بالمسح الضوئي مع تقنية اختبار تحليل الأشعة السينية المشتتة للطاقة للكشف عن إمكانية وجود الإترينجيت. أظهرت اختبارات الإستدامة المعجلة أن عينات الملاط ذات نسبة 30% و 50% من الرخام أعطت نتائج حسنة من حيث تحسين المتانة والمسامية.

الكلمات المفتاحية: ملاط مرصوص ذاتياً، الرخام، المتانة، البنية المجهرية، الإستدامة، الألياف الزجاجية.

REMERCIEMENTS

La partie la plus difficile à exprimer à la fin de tout travail sont les remerciements, il faut remercier tous ceux qui le méritent avec les mots qui conviennent.

Je remercie mon encadreur, Professeur KENAI, pour sa disponibilité, ses encouragements et sa confiance indéfectible, merci de m'avoir supporté toutes ces années.

Professeur MENADI, vous avez toujours cru en moi, quand moi-même, je ne croyais plus en la possibilité de mener ce travail à terme, je vous en suis très reconnaissante.

Que dire de mon « Grand » petit frère, Docteur YAHIAOUI, toujours disponible, serviable, il a su me pousser au-delà de ce que je pensais être mes limites. Merci à toi.

Mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail :

Professeur MENADI Belkacem

Professeur HADJ SADOK Ahmed

Professeur BELLA Nabil

Professeur ABDESSAMED Mouloud

Dr HEBBOUCHE Abdelhamid

Mes remerciements vont aussi à ma famille et particulièrement mon fils Lotfi, il m'a toujours encouragé à terminer ce travail, il attendait le jour de ma soutenance avec impatience.

Je remercie toute l'équipe du laboratoire Géo matériaux et Génie civil enseignants, techniciens, doctorants pour leur aide et leur disponibilité : Bensaci, Abdelkader, Yassine, Rabea, Amina, Ahlam, Chahrazed, Ines et si je n'ai pas cité tout le monde je m'en excuse.

Merci ma chère ami Karima d'avoir toujours été à mes côtés, je te souhaite tout le bonheur du monde.

Je n'oublie pas de remercier l'équipe de Granitex qui nous toujours aidé en mettant à notre disposition les produits nécessaires pour les essais de laboratoire.

SOMMAIRE

RESUME	1
ABSTRACT.....	3
الملخص.....	5
REMERCIEMENTS.....	6
SOMMAIRE	7
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTES DES TABLEAUX.....	9
LISTES DES ABREVIATIONS.....	19
INTRODUCTION GENERALE	23
1. CHAPITRE 1 : DURABILITE ET VIEILLISSEMENT DES MATERIAUX CIMENTAIRES.....	27
1.1. Introduction.....	27
1.2. Durabilité des matériaux	27
1.3. Durabilité et vieillissement	28
1.4. Dégradation physique du béton	32
1.5. Dégradation chimique du béton.....	36
1.6. Vieillissement accéléré	47
1.7. Conclusion	60
2. CHAPITRE 2 : BIBLIOGRAPHIE : VALORISATION ET REEUTILISATION DES DECHETS DANS LA CONFECTION DU BETON, LE CHEMIN VERS UNE ECONOMIE CIRCULAIRE	62
2.1. Introduction.....	62
2.2. Valorisation des déchets	65
2.3. Marbre.....	77
2.4. Fibres de verre	93
2.5. Conclusion	98
3. CHAPITRE3 : MATERIAUX ET ESSAIS	101
3.1. Introduction.....	101
3.2. Matériaux utilisés.....	101
3.3. Procédure expérimentale.....	107

Les essais réalisés sont récapitulés dans les Figures 3.18 à 3.23.....	118
4. CHAPITRE 4 : INTERPRETATION DES RESULTATS	126
4.1. Introduction.....	126
4.2. Optimisation du superplastifiant.....	126
4.3. Effet de la substitution du sable naturel par le sable de marbre	127
4.4. Effet de l'ajout des fibres.....	154
4.5. Effet de la combinaison du sable de marbre et des fibres de verre.....	159
4.6. Essais de vieillissement	163
4.7. Conclusion	186
CONCLUSION GENERALE.....	188
BIBLIOGRAPHIE.....	190

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma représentatif des différents types de porosité.....	28
Figure 1. 2 : Détérioration du barrage de Foug El Gherza à Biskra.	30
Figure 1.3 : Construction annuelle de grands barrages entre 1900 et 2020.....	31
Figure 1.4 : Effet du cycle gel dégel sur la résistance à la compression pour des bétons de différentes compositions	34
Figure 1.5 : Effet du cycle gel dégel sur la résistance à la flexion pour des bétons de différentes compositions	35
Figure 1.6 : Evolution de la résistance à la compression des échantillons immergés dans des solutions à différents taux de Na_2SO_4	40
Figure 1.7 : Etat des mortiers après 12 mois d'exposition à une solution de MgSO_4 à 5° C. ...	41
Figure 1.8 : Résultats des essais de porosité à différentes températures	41
Figure 1.9 : Résistance à la compression des échantillons immergés pendant 24 mois dans 5% de MgSO_4 à 5°C.....	42
Figure 1.10 : Résistance à la compression des échantillons immergés pendant 24 mois dans 5% de MgSO_4 à 20°C.....	42
Figure 1.11 : Résistance à la compression des échantillons immergés pendant 24 mois dans 5% de MgSO_4 à 50°C.....	43
Figure 1.12 : Expansion de mortiers contenant des ciments différents soumis à une attaque sulfatique externe.....	44
Figure 1.13 : Expansion de mortiers de différents rapports E/C soumis à une attaque sulfatique externe.....	45
Figure 1.14 : Perte de masse et de résistance d'un mortier exposé à une solution de MgSO_4 .	47
Figure 1.15 : La résistance à la compression avec différents ratios séchages mouillages.....	48
Figure 1.16 : La résistance à la flexion avec différents ratios séchages mouillages.....	49
Figure 1.17 : Distribution du chlorure libre après 12 cycles de séchage mouillage	49
Figure 1.18 : Distribution du chlorure libre après 72 cycles de séchage mouillage	50
Figure 1.19 : Résistance à la résistance à la compression d'échantillons soumis à différents cycles séchages mouillages.....	51
Figure 1.20 : distribution des pores à différents cycles séchage mouillages	51

Figure 1.21 : Résistance à la compression des échantillons soumis à des environnements différents (cas de l'eau).....	52
Figure 1.22 : Résistance à la compression des échantillons soumis à des environnements différents (cas de la solution de sulfates).....	53
Figure 1.23 : Echantillon n'ayant subi aucun cycle de séchage mouillage	53
Figure 1.24 : Echantillon ayant subi 36 cycles de séchage mouillage.....	53
Figure 1.25 : Echantillon ayant subi 72 cycles de séchage mouillage.....	54
Figure 1.26 : Présence de microfissures à 90 cycles de séchage- mouillage.....	54
Figure 1.27 : Présence de gypse à 90 cycles de séchage- mouillage	55
Figure 1.28 : Présence d'ettringite à 90 cycles de séchage- mouillage	55
Figure 1.29 : Evolution de l'aspect extérieur des échantillons soumis au séchage mouillage (eau distillée)	56
Figure 1.30 : Evolution de l'aspect extérieur des échantillons soumis au séchage mouillage (eau de mer).	57
Figure 1.31 : résultats des essais de compression pour des échantillons soumis à différents milieux	58
Figure 2.1 : Production du sable dans quelques pays du monde.	64
Figure 2.2 : Effet de la cendre volante sur la résistance à la compression	66
Figure 2.3 : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression.....	66
Figure 2.4 : Résistance à la compression des échantillons soumis à une solution de $MgSO_4$..	67
Figure 2.5 : Résistance à la compression des échantillons soumis à l'eau de mer.	68
Figure 2.6 : Résistance à la compression des échantillons soumis à l'eau de robinet	68
Figure 2.7 : Résistance à la flexion des échantillons soumis à l'eau de robinet	69
Figure 2.8 : Résistance à la flexion des échantillons soumis à l'eau de mer	70
Figure 2.9 : Résistance à la flexion des échantillons soumis à une solution de $MgSO_4$	70
Figure 2.10 : Résistance à la compression de mortiers à base de déchets de verre.	71
Figure 2.11 : Résistance à la flexion de mortiers à base de déchets de verre	71
Figure 2.12 : Résultats de l'ouvrabilité pour les différents mortiers	73
Figure 2.13 : Résultats de résistance à la compression pour les différents mortiers	73
Figure 2.14 : Résultats de la résistance à la flexion pour les différents mortiers	74
Figure 2.15 : Résultats de l'absorption pour les différents mortiers.....	74

Figure 2.16 : Résultats d'étalements des différents mélanges	75
Figure 2.17 : Résistance à la compression des bétons à base d'agrégats issus des pierres.....	76
Figure 2.18 : Résistance à la compression des bétons à base d'agrégats issus des déchets de brique	76
Figure 2.19 : Résistance à la compression des bétons à base d'agrégats issus des déchets de béton de démolition	77
Figure 2.20 : Production du marbre en Algérie	78
Figure 2.21 : Résultats d'ouvrabilité du béton en fonction du taux de substitution	79
Figure 2.22 : Résultats de l'ouvrabilité pour différents rapports E/C.....	80
Figure 2.23 : Effets des déchets de marbre sur la teneur en air.	81
Figure 2.25 : Valeurs de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du taux de marbre	82
Figure 2.26 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre et de la période de cure.....	83
Figure 2.27 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre utilisé comme substitut du ciment	83
Figure 2.28 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre utilisé comme substitut du sable.....	84
Figure 2.29 : Résistance à la flexion à 28 jours des échantillons de différentes compositions	85
Figure 2.30 : Résistance à la flexion en fonction du taux de substitution du marbre (E/C=0.35)	85
Figure 2.31 : Résistance à la flexion en fonction du taux de substitution du marbre (E/C=0.45)	86
Figure 2.32 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du taux de marbre et du taux de fibres d'acier	86
Figure 2.33 : Résultats de l'essai de flexion	87
Figure 2.34 : Evolution de l'absorption capillaire d'éprouvettes de béton de différentes compositions	88
Figure 2.35 : Diminution de la sorptivité en fonction du taux de marbre.....	88
Figure 2.36 : Diminution de la porosité en fonction du taux de marbre.....	89
Figure 2.37 : Perméabilité en fonction du taux de marbre.....	90

Figure 2.38 : Evolution des mortiers à base de marbre en fonction de la période d'immersion dans la solution de $MgSO_4$	90
Figure 2.39 : Résultats de la résistance à la compression des mortiers placés dans l'eau (en gris) et placés dans un solution de $MgSO_4$ (en noir)	91
Figure 2. 40 : Utilisation des matrices et des fibres	93
Figure 2.41 : Déchets de production et de fin de vie en Europe	94
Figure 2.42 : Effet de l'incorporation des fibres de verre sur la résistance à la compression ..	95
Figure 2.43 : Effet de l'incorporation des fibres de verre sur la résistance à la flexion	96
Figure 3.1 : Spectre par fluorescence du ciment.....	101
Figure 3.2 : Sable grossier de Baghlia et Sable fin de Boughezoul.....	102
Figure 3. 3 : Courbe granulométrique du sable naturel	103
Figure 3.4 : Procédure de préparation du sable de marbre	104
Figure 3.5 : Comparaison entre les courbes granulométriques du marbre et du sable naturel	104
Figure 3.6 : Spectrométrie par fluorescence du marbre	105
Figure 3.7 : Tissu composite (époxy + fibres de verres)	106
Figure 3.8 : Séparation des fibres de verre de l'époxy	107
Figure 3.9 : Dimensions des fibres de verre utilisées	107
Figure 3.10 : Essai d'étalement.....	109
Figure 3.11 : Dispositif de l'essai d'écoulement	109
Figure 3.12 : Dispositif pour l'essai de l'air occlus	112
Figure 3.13 : Préparation du mortier pour l'essai de l'air occlus	112
Figure 3.14 : Essai de porosité.....	115
Figure 3.15 : Dispositif pour la pesée dans l'eau.....	115
Figure 3.16 : Cycle de mouillage (bac d'eau de robinet).....	117
Figure 3.17 : Cycle de séchage (dans l'étuve).....	117
Figure 3.18 : Optimisation du superplastifiant	119
Figure 3.19 : Essais sur mortiers à base de déchets de marbre	120
Figure 3.20 : Protocole de l'essai de résistance aux attaques sulfatiques	121
Figure 3.21 : Protocole de l'essai de vieillissement accéléré	122
Figure 3.22 : Essais sur mortiers à base de fibres de verre recyclées	123

Figure 3.23 : Essais sur mortiers à base de déchets de marbre et de fibres de verre recyclées	124
Figure 4.1 : Valeurs de l'étalement en fonction du dosage en superplastifiant	126
Figure 4.2 : Valeurs du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant	127
Figure 4.3 : Valeurs de l'étalement en fonction du taux de substitution du marbre	128
Figure 4.4 : Valeurs du temps d'écoulement en fonction du taux de substitution du marbre	129
Figure 4.5 : Concordance des résultats d'étalement et du temps d'écoulement	129
Figure 4.6 : Variation de l'air occlus et de l'étalement en fonction du taux de substitution du marbre	131
Figure 4.7 : corrélation entre les valeurs de l'étalement et les valeurs de l'air occlus	131
Figure 4.8 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre à différents âges	132
Figure 4.9 : Pertes et gains de résistance à la compression pour différents âges.....	133
Figure 4.10 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de marbre à différents âges	134
Figure 4.11 : Gains de résistance à la flexion pour différents âges	135
Figure 4.12 : Effet du taux de marbre sur la porosité à 28, 56 et 90 jours.....	136
Figure 4.13 : Image microscopique des grains du sable de marbre	136
Figure 4.14 : Image microscopique des grains du sable naturel	136
Figure 4.15 : Absorption capillaire des grands pores des mortiers à 28 jours	137
Figure 4.16 : Effet du sable de marbre sur l'absorption capillaire à 56 jours.....	137
Figure 4.17 : Effet du sable de marbre sur l'absorption capillaire à 90 jours.....	138
Figure 4.18 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 0% de marbre	139
Figure 4.19 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 15% de marbre	139
Figure 4.20 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 30% de marbre	140
Figure 4.21 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 50% de marbre	140
Figure 4.22 : Image microscopique d'échantillons avec et sans marbre	141
Figure 4.23 : La sorptivité jusqu'à 6h à 28, 56 et 90 jours	142
Figure 4.24 : Evolution de la sorptivité pour les différents mortiers	142
Figure 4.25 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps d'immersion dans la solution de MgSO ₄	143

Figure 4.26 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps d’immersion dans la solution de MgSO ₄	144
Figure 4.27 : Absorption capillaire à 30 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	145
Figure 4.28 : Sorptivité à 30 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	145
Figure 4.29 : Absorption capillaire à 60 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	146
Figure 4.30 : Sorptivité à 60 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	146
Figure 4.31 : Absorption capillaire à 120 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	147
Figure 4.32 : Sorptivité à 120 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	147
Figure 4.33 : Absorption capillaire à 180 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	148
Figure 4.34 : Sorptivité à 180 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	148
Figure 4.35 : Sorptivité à 30 jours et 180 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	149
Figure 4.36 : Etat des mortiers à 180 jours d’immersion dans Mg SO ₄	150
Figure 4.37 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 0% de marbre immergés 30 jours dans la solution de MgSO ₄	151
Figure 4.38 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 30% de marbre immergés 30 jours dans la solution de MgSO ₄	151
Figure 4.39 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 0% de marbre immergés 180 jours dans la solution de MgSO ₄	152
Figure 4.40 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 30% de marbre immergés 180 jours dans la solution de MgSO ₄	152
Figure 4.41 : Porosité à 30 jours et 180 jours d’immersion dans la solution de MgSO ₄	153
Figure 4.42 : Valeurs de l’étalement en fonction du dosage en fibres de verre.....	154
Figure 4.43 : Valeurs du temps d’écoulement en fonction du dosage en fibres de verre.....	155
Figure 4.44 : Concordance des résultats d’étalement et du temps d’écoulement.....	156
Figure 4.45 : Variation de l’air occlus et de l’étalement en fonction du dosage en fibres de verre.....	157
Figure 4.46 : Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en fibres de verre à différents âges.....	158
Figure 4.47 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du dosage en fibres de verre à différents âges.....	158
Figure 4.48 : Variation de l’étalement en fonction du taux de marbre et du dosage en fibres	160

Figure 4.49 : Variation du temps d'écoulement en fonction du taux de marbre et du dosage en fibres	160
Figure 4.51 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de fibres avec 30% de marbre à différents âges	162
Figure 4.52 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de fibres avec 30% avec marbre à différents âges	162
Figure 4.53 : Résistance à la flexion à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage.....	164
Figure 4.54 : Gain de résistance à la flexion à 58 jours par rapport au mortier témoin après 15 cycles de séchage-mouillage.....	165
Figure 4.55 : Résistance à la flexion à 88 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage	165
Figure 4.56 : Gain de résistance à la flexion à 88 jours par rapport au mortier témoin après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage.....	166
Figure 4.57 : Résistance à la flexion à 118 jours après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage	166
Figure 4.58 : Gains et pertes de résistance à la flexion à 118 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage	167
Figure 4.59 : Résistance à la flexion à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage	167
Figure 4.60 : Gains et pertes de résistance à la flexion à 148 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage	168
Figure 4.61 : Comparaison des valeurs de la résistance à la flexion des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges	168
Figure 4.62 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 0% de marbre.....	169
Figure 4.63 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 15% de marbre.....	170
Figure 4.64 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 30% de marbre.....	170
Figure 4.65 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 50% de marbre.....	171
Figure 4.66 : Résistance à la compression à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage	172
Figure 4.67 : Gain de la résistance à la compression à 58 jours par rapport au mortier témoin après 15 cycles de séchage-mouillage	173

Figure 4.68 : Résistance à la compression à 88 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage	173
Figure 4.69 : Gain et pertes de la résistance à la compression à 88 jours par rapport au mortier témoin après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage	174
Figure 4.70 : Résistance à la compression à 118 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, et 45 cycles de séchage-mouillage.....	174
Figure 4.71 : Gain et pertes de la résistance à la compression à 118 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, et 45 cycles de séchage-mouillage	175
Figure 4.72 : Résistance à la compression à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage	175
Figure 4.73 : Gain et pertes de la résistance à la compression à 148 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage	176
Figure 4.74 : Comparaison des valeurs de la résistance à la compression des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges.	177
Figure 4.75 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 0% de marbre.....	178
Figure 4.76 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 15% de marbre.....	178
Figure 4.77 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 30% de marbre.....	179
Figure 4.78 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 50% de marbre.....	179
Figure 4.79 : Sorptivité initiale à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage	180
Figure 4.80 : Sorptivité initiale à 88 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage	181
Figure 4.81 : Sorptivité initiale à 118 jours après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage	181
Figure 4.82 : Sorptivité initiale à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage	182
Figure 4.83 : Sorptivité secondaire à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage	182
Figure 4.84 : Sorptivité secondaire à 118 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage	183
Figure 4.85 : Sorptivité secondaire à 118 jours après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage	183
Figure 4.86 : Sorptivité secondaire à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage	184

Figure 4.87 : Comparaison des valeurs de la sorptivité initiale des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges 185

Figure 4.88 : Comparaison des valeurs de la sorptivité secondaire des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges 185

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Coefficient de dilatation thermique de quelques granulats et du béton formulé avec ces granulats.....	33
Tableau 1.2 : La solubilité des minéraux sulfatiques les plus communs	39
Tableau 1.3 : Les composants essentiels du clinker	46
Tableau 1.4 : Différents protocoles de séchage-mouillage.....	59
Tableau 2. 1 : Quelques études résumant l'utilisation du marbre comme ciment ou agrégats .	92
Tableau 2. 2 : Quelques études résumant l'utilisation des fibres de verre issus des déchets ...	97
Tableau 3.1 : Composition chimique du ciment CEMII B	102
Tableau 3. 2 : Composition minéralogique du ciment CEMII B.....	102
Tableau 3.3 : Propriétés physiques et mécaniques du ciment.....	102
Tableau 3.4 : Propriétés physiques du sable naturel.....	103
Tableau 3.5 : Propriétés physiques du sable naturel et du marbre.....	104
Tableau 3.6 : Composition chimique du marbre.....	105
Tableau 3.7 : Compositions des mortiers (données pour 1.7 litre de mortier) .	110
Tableau 4. 1 : Valeurs de l'air occlus en fonction du taux de substitution du marbre.....	130
Tableau 4. 2 : Eléments chimiques à l'intérieur et à l'extérieur des échantillons à 180 jours d'immersion dans la solution de $MgSO_4$	154
Tableau 4.3 : Valeurs de l'air occlus en fonction du taux de substitution du marbre.....	156
Tableau 4.4 : Différentes combinaisons du marbre et des fibres.....	159

LISTES DES ABREVIATIONS

Al_2O_3 : Alumine.

ACR : Réaction alcali-carbonate.

C0 : Nomination des éprouvettes non soumises aux cycles séchages-mouillages.

C15 : Nomination des éprouvettes soumises à 15 cycles séchages-mouillages.

C30 : Nomination des éprouvettes soumises à 30cycles séchages-mouillages.

C45 : Nomination des éprouvettes soumises à 45cycles séchages-mouillages.

C60 : Nomination des éprouvettes soumises à 60 cycles séchages-mouillages.

C_2S : Bélite.

C_3A : Aluminat de calcium.

C_3S : Alite.

C_4AF : Aluminoferrite tétracalcique.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: Hydroxyde de calcium.

CaCO_3 : Calcite

CaMgCO_3 : Dolomite.

CaO : Oxyde de calcium.

CaSO_4 : Gypse.

CO : Monoxyde de carbone.

CO_2 : Dioxyde de carbone.

CSH : Silicate de calcium hydraté.

CuO : Oxyde de cuivre.

DM : Déchets de marbre

E/C : Rapport de la quantité d'eau à la quantité de ciment.

E/L : Rapport de la quantité d'eau à la quantité de liant.

F(0) : Nomination des mortiers à 0 kg/m³ de fibres de verre.

F(0.25) : Nomination des mortiers à 0.25 kg/m³ de fibres de verre.

F(0.5) : Nomination des mortiers à 0.5 kg/m³ de fibres de verre.

F(0.75) : Nomination des mortiers à 0.75 kg/m³ de fibres de verre.

F(1) : Nomination des mortiers à 1 kg/m³ de fibres de verre.

F(1.5) : Nomination des mortiers à 1.5 kg/m³ de fibres de verre.

Fe₂O₃ : Oxyde de fer hydraté.

FeO₃ : Oxyde de fer hydraté

H₃PO₄ : Acide phosphorique.

H₂SO₄ : Acide sulfurique.

HNO₃ : Acide nitrique.

K₂O : Oxyde de potassium

M0 : Mortier à 0% de sable de marbre.

M15 : Mortier à 15% de sable de marbre.

M30 : Mortier à 30% de sable de marbre.

M50 : Mortier à 50% de sable de marbre.

M100 : Mortier à 100% de sable de marbre.

M15 F0.5 : Nomination des mortiers à 15% de marbre et 0.5 kg/m³ de fibres de verre.

M30 F0.5 : Nomination des mortiers à 30% de marbre et 0.5 kg/m³ de fibres de verre.

M15 F1 : Nomination des mortiers à 15% de marbre et 1 kg/m³ de fibres de verre.

M30 F1 : Nomination des mortiers à 30% de marbre et 1 kg/m³ de fibres de verre.

M15 F1.5 : Nomination des mortiers à 15% de marbre et 1.5 kg/m³ de fibres de verre.

M15 F1.5 : Nomination des mortiers à 30% de marbre et 1.5 kg/m³ de fibres de verre.

MEB : Microscopie électronique à balayage.

MgO : Oxyde de magnésium.

Mg (OH)₂: Brucite..

MgSO₄ : Sulfate de magnésium.

MnO : Oxyde de magnésium.

Na₂O : Oxyde de sodium.

Na₂SO₄: Sulfate de sodium.

RAS : Réaction alcali-silicate ou alcali-silice.

SiO₂ : Silice.

SO₃ : Trioxyde de soufre.

SO₃ : Trioxyde de soufre

S/M : Rapport de la quantité de sable à la quantité de mortier.

Sp/L : Rapport de la quantité du super plastifiant à la quantité de liant.

TiO₂ : Dioxyde de titane.

XRF : Analyse par fluorescence X.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton fait partie des matériaux les plus utilisés dans le monde, il est utilisé dans des constructions classiques tel que les bâtiments, comme il est utilisé dans des constructions plus importantes comme les ponts, les barrages et les centrales nucléaires, il faut savoir que 190 m³ de béton est coulé chaque seconde dans le monde [1].

Le béton est constitué de plusieurs matériaux dont le sable. Le sable utilisé dans la confection peut être un sable concassé issu de gisements, un sable de rivière ou de plage. Le sable bien sûr, a des utilisations autres que la confection du béton. Le sable n'est pas une ressource renouvelable est on assiste à l'épuisement des ressources d'où, dans certains pays, le recours aux sables des fonds marins qui a un effet néfaste sur la faune et la flore.

D'un autre côté, nous avons le problème des déchets inertes issus des industries, qui bien qu'ils ne soient pas nocifs, ne sont pas respectueux de l'environnement par leur accumulation et nécessite leur recyclage comme par exemple le béton de démolition, les déchets de brique de porcelaine, de marbre, de fibres de verres.

La protection de l'environnement par le recyclage des déchets et la préservation des ressources naturelles sont l'un des problèmes majeurs de ce siècle. Selon une étude établie par le ministère de l'environnement et des ressources naturelles, le volume des déchets a été estimé en 2018 à 34 millions de tonnes dont 21 millions de tonnes sont des déchets non ménagers [2]. Afin de préserver l'environnement, une tendance à recycler les déchets en les utilisant dans la confection des bétons a vu le jour. Ainsi, des études sur le l'utilisation de la fumée de silice, des cendres volantes ou bien du verre ont été menés et leurs effets bénéfiques ont été démontrés [3], [4] et plus récemment l'utilisation du granite, de la porcelaine, de la brique ou bien du marbre a été étudié [5], [6]. Les déchets de marbre font partie des déchets issus de l'industrie, que ce soit par sciage et tranchage dans les carrières ou par la transformation du marbre en produits finis. L'extraction du marbre peut générer jusqu'à 80% de déchets dans les carrières [7], Ils représentent donc une partie non négligeable des déchets inertes qui nuisent à l'environnement

et qui nécessitent un recyclage qui sera bénéfique sur le plan écologique et économique à long terme.

Le béton est constitué essentiellement de ciment et d'agrégats, la production du ciment relève d'un procédé qui nécessite des températures élevées, causant ainsi un dégagement important de CO₂ [8], le sable par contre ne nécessite aucune fabrication, mais la prospection et l'exploitation des carrières ou du sable marin a des effets néfastes sur la faune et la flore et peut causer un déséquilibre des écosystèmes [9]. L'augmentation de la population mondiale fait que l'urbanisation augmente en entraînant une extraction massive des agrégats. En Algérie l'extraction des agrégats a atteint 39. 9 millions de mètre cube dont 3.4 millions de mètre cube de sable [10].

C'est pour cela que ces dernières années des études sur l'utilisation des déchets de marbre dans différents domaines principalement dans la confection des bétons ordinaires [11]–[13] ou les bétons autoplaçants [14]–[16], en tant que substitution du ciment [13], [17] ou substitution des agrégats [18], [19].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude de mortiers autoplaçants à base de déchets de marbre récupérés auprès des marbreries locales et de déchets de fibres de verre issus des pare chocs des voitures, le travail sera subdivisé en 4 chapitres

Dans le premier chapitre la durabilité et le vieillissement des matériaux cimentaires seront définis ainsi que les paramètres qui y sont liés en détaillant les processus de dégradation physique et chimique, les méthodes de vieillissement accélérés sont aussi développés dans ce chapitre.

Dans le deuxième chapitre, une étude bibliographique sur l'utilisation des agrégats recyclés dans les bétons et les mortiers et plus particulièrement l'utilisation des déchets de marbre en tant que substitut du sable naturel et son impact sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers autoplaçants. L'utilisation des fibres de verre issus des déchets est développée dans ce chapitre.

Le troisième chapitre met en évidence les procédures expérimentales des différents essais menés dans ce travail ainsi que les différents matériaux utilisés.

Dans le quatrième chapitre, nous analysons les résultats liés aux différents essais à l'état frais et durci pour différents cas de figures, à savoir, dans le cas de substitution du sable naturel par les déchets de marbre, dans le cas de l'ajout des déchets de fibres de verre et enfin la combinaison du sable de marbre et fibres de verre est analysée.

Les résultats de vieillissement accéléré sont aussi présentés dans ce chapitre dans le cas de l'utilisation des déchets de marbre seulement.

À la fin des conclusions du travail ainsi que des perspectives sont présentées.

**DURABILITE ET
VIEILLISSEMENT DES
MATERIAUX
CIMENTAIRES**

1. CHAPITRE 1 : DURABILITE ET VIEILLISSEMENT DES MATERIAUX CIMENTAIRES

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude de la durabilité et du vieillissement des matériaux cimentaires, les dégradations chimiques et physiques qui altèrent la durabilité ainsi que les paramètres qui y sont liés.

1.2. Durabilité des matériaux

Le béton fait partie des matériaux d'ingénierie et de structure les plus anciens. Il existe différents types de béton (ordinaire, autoplaçant, haute performance...), ils sont obtenus en faisant varier les proportions des principaux composants, de cette manière, le produit fini peut être adapté à l'application visée. Cependant, les structures en béton armé peuvent être endommagées par de nombreux processus, tels que l'expansion, la corrosion des armatures, le phénomène de gel-dégel ou séchage- mouillage, la chaleur, l'eau de mer, le lessivage...etc.

La détérioration des structures en béton armé peut être liée à la détérioration du renforcement et/ou la détérioration du béton qu'elle soit physique ou chimique. Les conséquences de cette détérioration peuvent être plus ou moins importante, il peut s'agir d'un endommagement de la surface ou plus grave encore une diminution de la résistance et de la durée de vie des structures.

L'endommagement des structures en raison de l'agressivité environnementale se produit fréquemment, la durabilité du béton peut être influencée par les facteurs environnementaux comme la température, l'humidité ou des facteurs physiques, chimiques ou biologiques, ces facteurs peuvent être attribués à des conditions météorologiques telles qu'un changement radical de température ou d'humidité, ou à une abrasion, une exposition à de liquides ou des gaz nocifs qu'ils soient naturels ou industriels.

Les structures en béton exposées à des milieux aqueux agressifs (eaux usées, eau douce, eau de mer), en raison de leur nature poreuse, sont sensibles à une variété de dégradations. Ce processus résulte de la pénétration d'eau et/ou de produits chimiques. En effet le béton contient des pores qui sont de différentes tailles, ces pores peuvent être fermés ou ouverts. Les pores ouverts

peuvent être en relation direct avec l'extérieur ou liés avec d'autres pores ouvert par de chemins direct ou tortueux. Donc, dans un matériau, il existe différents types de porosité [20] :

- Porosité totale ; ou l'ensemble des pores est soit fermé et ouvert.
- Porosité résiduelle ; ou l'ensemble des pores est fermé.
- Porosité accessible ; ou l'ensemble des pores est ouvert.
- Porosité libre ; c'est le cas de la porosité accessible et où les fluides peuvent circuler librement.
- Porosité piégée ; c'est le cas de la porosité accessible mais où les fluides sont piégés.

On parle aussi de porosité primaire qui représente l'ensemble des pores présents dès la mise en place du matériau (air occlus), et de porosité secondaire qui représente l'ensemble des pores formés après la mise en place du matériau.

Dans le cas où les pores ne sont pas complètement remplis d'eau, le matériau gagne ou libère de l'eau à travers le phénomène de sorption (absorption, désorption). Par définition, la sorption est l'accumulation des molécules d'eau sur les parois des pores dû à l'humidité environnante [21].

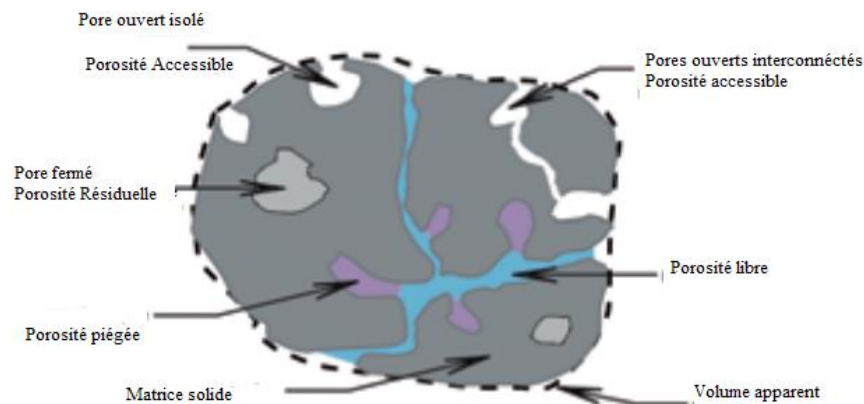


Figure 1.1 : Schéma représentatif des différentes types de porosité [20].

1.3. Durabilité et vieillissement

Le vieillissement du béton fait référence aux changements qui se produisent dans les structures en béton au fil du temps en raison de divers facteurs environnementaux. Le béton est un matériau

de construction très répandu, connu pour sa durabilité et sa résistance, mais il n'est pas totalement immunisé contre les effets du vieillissement.

Le vieillissement des structures en béton armé est un phénomène naturel qui fait partie du processus du cycle de vie de ces structures, mais ces dernières années, ce problème est devenue une urgence surtout par rapport aux structures importantes se trouvant dans des environnements agressifs comme les centrales nucléaires, les barrages et les ponts.

La durabilité du béton et son vieillissement sont étroitement liée. La durabilité fait référence à la capacité d'une structure en béton à résister aux effets du temps, aux conditions environnementales et aux facteurs externes sans détérioration significative. Le vieillissement, quant à lui, fait référence aux changements et à la dégradation qui se produisent dans le béton au fil du temps en raison d'une combinaison de facteurs.

La durabilité est un objectif fondamental lors de la conception et de la construction de structures en béton. Les ingénieurs cherchent à créer un béton capable de conserver sa résistance, sa fonctionnalité et son attrait esthétique sur une longue période. La durabilité garantit qu'une structure en béton peut continuer à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue sans subir de détérioration prématurée ni nécessiter de réparations fréquentes.

Le vieillissement du béton fait référence aux changements qui se produisent naturellement dans le matériau au fil du temps en raison de divers facteurs, notamment l'exposition à l'environnement, les réactions chimiques, les contraintes physiques et l'utilisation. Ces processus de vieillissement peuvent entraîner une réduction progressive de la résistance, de l'aspect et des performances générales du béton. Le vieillissement implique souvent l'apparition de fissures, la détérioration de la surface, la corrosion des armatures et des changements dans la microstructure du béton.

Le processus de vieillissement peut avoir un impact direct sur la durabilité des structures en béton. À mesure que le béton vieillit, il devient plus sensible à diverses formes de détérioration, ce qui peut compromettre ses performances à long terme.

Par exemple, les fissures qui se développent en raison du retrait de séchage, des cycles thermiques ou des charges externes permettent à l'humidité et aux produits chimiques agressifs de s'infiltrer dans le béton. Ces infiltrations peuvent accélérer le processus de détérioration.

Les structures en béton armé ne sont pas exposées aux mêmes conditions et ne sont pas appelées à avoir la même durée de vie. Parler de vieillissement et de durabilité c'est parler des grandes structures comme les barrages, les ponts, les centrales nucléaires par exemple.

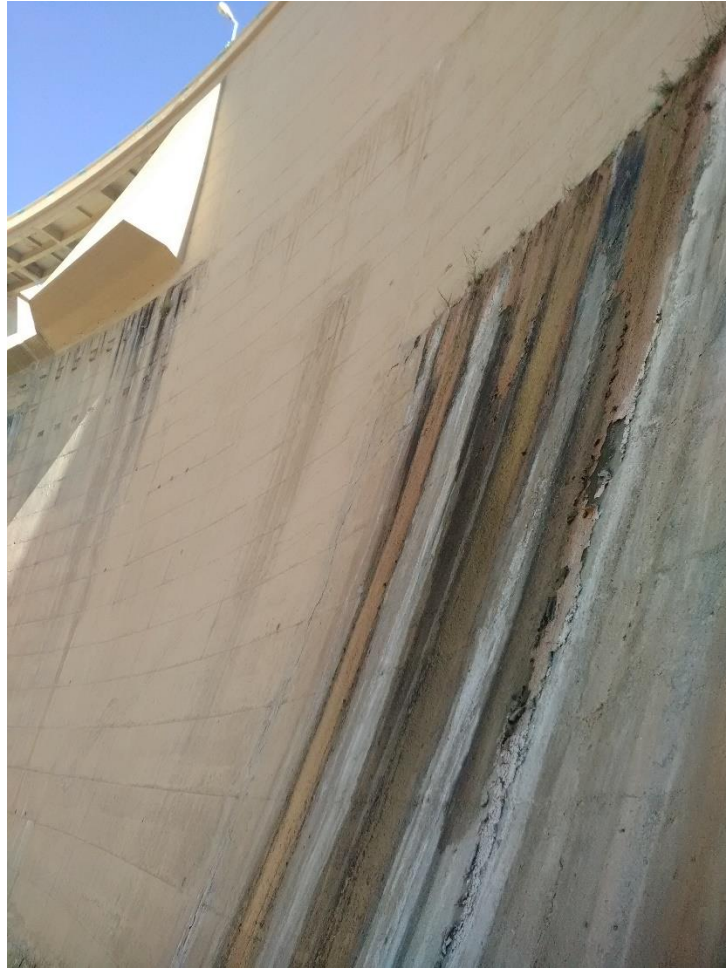


Figure 1. 2 : Détérioration du barrage de Foug El Gherza à Biskra.

Concernant les barrages par exemple, il faut savoir que les plus grands barrages dans le monde ont été construits entre 1930 et 1970 avec une durée de vie de 50 à 100 ans. Au-delà de 50 ans de service, un barrage en béton armé peut présenter des signes de vieillissement et nécessite donc une réhabilitation.

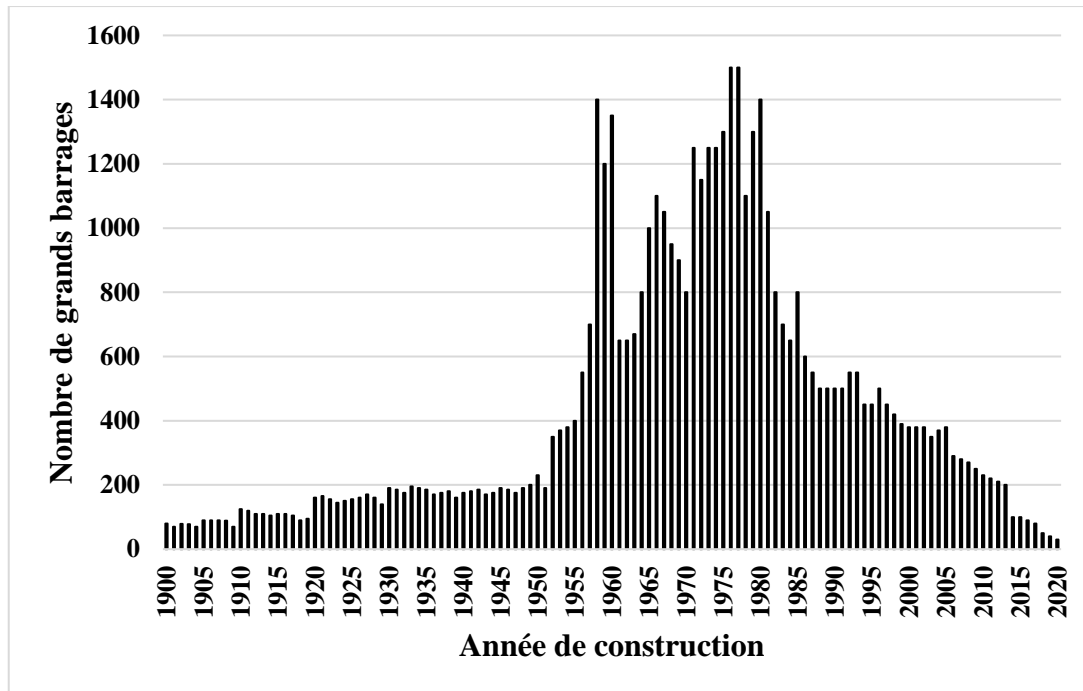


Figure 1.3 : Construction annuelle de grands barrages entre 1900 et 2020 [22].

Le vieillissement des ponts est lié à la corrosion des éléments en acier, à la fatigue due au chargement cyclique, à la détérioration dû à l'exposition à différents phénomènes ainsi que le vieillissement de l'infrastructure.

Les centrales nucléaires ne sont pas en reste, hormis le vieillissement lié à la dégradation des mécanismes et des réacteurs, le vieillissement des structures et l'étude de l'environnement auquel ils sont exposés est tout aussi important [23].

Selon un rapport établi par l'agence internationale de l'énergie atomique, le vieillissement des centrales nucléaires est lié à plusieurs paramètres dont la détérioration du béton, ceci est dû à :

- Des attaques chimiques par des chlorures et des sulfates.
- Fatigue des structures dus aux vibrations, aux chargements thermiques.
- Retrait, abrasion cycle gel dégel.
- La lixiviation.
- Les alkalis- réactions [24].

La dégradation du béton est liée à plusieurs phénomènes qui sont classés en deux grandes catégories :

1.4. Dégradation physique du béton

1.4.1. Retrait :

Le retrait fait référence à la contraction du béton frais ou durci suite à une perte d'eau. Lorsque cette perte d'eau se produit dans le béton frais, le retrait qui en résulte est appelé retrait plastique ; lorsqu'elle se produit dans le béton durci, il est appelé retrait de séchage. Dans les deux cas, l'eau est généralement perdue par évaporation dans l'atmosphère, mais la perte peut également résulter de la succion d'un béton ou d'un sol sec sous-jacent, ou de coffrages secs. Ces deux types de retrait et les déformations qui en résultent sont bien connus et bien traités dans la littérature. Ils ont la même origine physique : lorsque l'eau s'évapore du béton, des ménisques se créent dans le système de pores capillaires et ce sont les contraintes de traction générées au niveau des ménisques qui entraînent une contraction de la pâte. En fonction de la sévérité et de la rapidité de cette perte d'eau, de la distribution de la taille des pores capillaires et de leur degré de connectivité, la surface du béton peut se fissurer plus ou moins sévèrement. Bien entendu, toute contrainte à la contraction du béton concentre la fissuration autour de cette contrainte.

Le troisième type de retrait est le retrait thermique. Les réactions d'hydratation du ciment sont exothermiques. La température du béton augmente d'abord jusqu'à ce que la chaleur perdue à travers les coffrages et les surfaces inférieure et supérieure soit égale à la chaleur générée à l'intérieur du béton par l'hydratation, ensuite, la température du béton diminue. Comme pour la grande majorité des matériaux, une baisse de température engendre une contraction appelée "retrait thermique"[25].

1.4.2. Fissuration due à la température

Les réactions d'hydratation induites par le mélange ciment-eau pendant la prise et le durcissement sont exothermiques, c'est-à-dire qu'elles dégagent de la chaleur. Cela a pour effet d'augmenter la température du béton, ce qui entraîne une expansion. Le refroidissement qui s'ensuit entraîne un retrait qui, s'il est limité, provoquera des fissures de la même manière que le retrait de séchage.

La plupart des matériaux se dilatent lorsque leur température augmente, ceci est valable autant pour les composants du béton à l'état frais que pour le béton durci. En effet, l'augmentation de la température entraîne une augmentation du volume et donc des contraintes de traction. Une fois la phase exothermique dépassée, il y a une diminution de la chaleur et donc une contraction du béton, ce qui conduit à une possible fissuration du béton.

Il existe plusieurs facteurs qui causent ce phénomène, en premier lieu, la température ambiante, les méthodes de construction, les matériaux utilisés dont les coefficients de dilatation thermique diffèrent (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Coefficient de dilatation thermique de quelques granulats et du béton formulé avec ces granulats [26].

	Coefficient de dilatation thermique $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
	Granulats	Béton
Silex	7.4-13.0	11.4-12.2
Quartz	7.0-13.2	11.7-14.6
Grés	4.3-12.1	9.2-13.3
Granite	1.8-11.9	8.1-10.3
Basalte	4.0-9.7	7.9-10.4
Calcaire	1.8-11.7	4.3-10.3

D'après Chen et al. [27], les bétons exposés à des températures élevées à jeune âge, peuvent recouvrer une partie de la résistance perdue si l'exposition n'est pas durable, toutefois ils ont remarqué que la diminution en traction est plus importante que la diminution en compression à cause de la formation de microfissures.

En comparant des éprouvettes exposées à un climat chaud à jeune âge avec des éprouvettes laissées en cure jusqu'à 28 jours avant d'être exposées au même climat, Yahiaoui [28] a démontré que l'exposition du béton à jeune âge à des températures élevées, avait un effet négatif sur la résistance à la compression qui pouvait toutefois être corrigée par l'ajout du laitier.

1.4.3. Gel dégel

L'eau est une substance qui subit une augmentation lorsqu'elle passe de l'état liquide à l'état solide, ce changement de phase induit une augmentation du volume qui n'est pas sans conséquence sur le béton. Cette expansion peut entraîner des dommages dans le cas de gel dégel.

La masse volumique de l'eau liquide à 0°C est d'environ 1000 kg/m³, alors que la masse volumique de la glace à la même température est de 917 kg/m³, ce qui se traduit par une augmentation du volume lors de la congélation d'environ 9%.

L'eau libre dans le béton est confinée dans les pores. Le gel de cette eau entraîne une dilatation qui, dans l'espace confiné des pores, provoque l'apparition de contraintes pouvant conduire à la fissuration [26].

En étudiant l'effet du gel dégel sur la résistance à la compression et à la flexion de bétons de compositions différentes, Wu et al. [29] ont remarqué que les résistances diminuaient sous l'effet du gel dégel, ceci quel que soit la composition du béton.

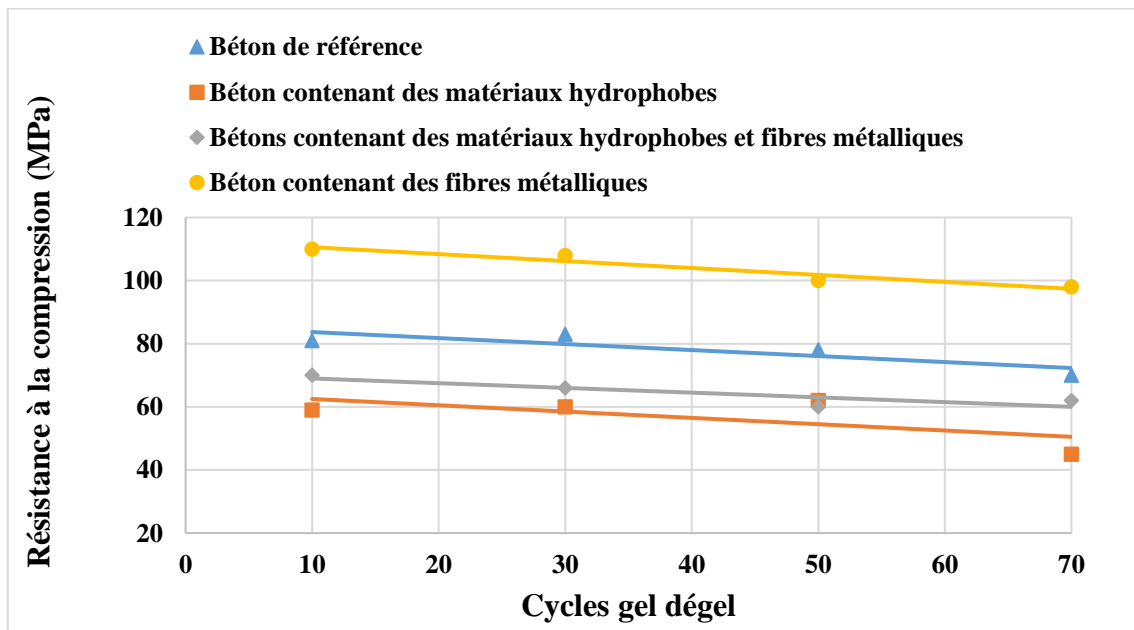


Figure 1.4 : Effet du cycle gel dégel sur la résistance à la compression pour des bétons de différentes compositions [29].

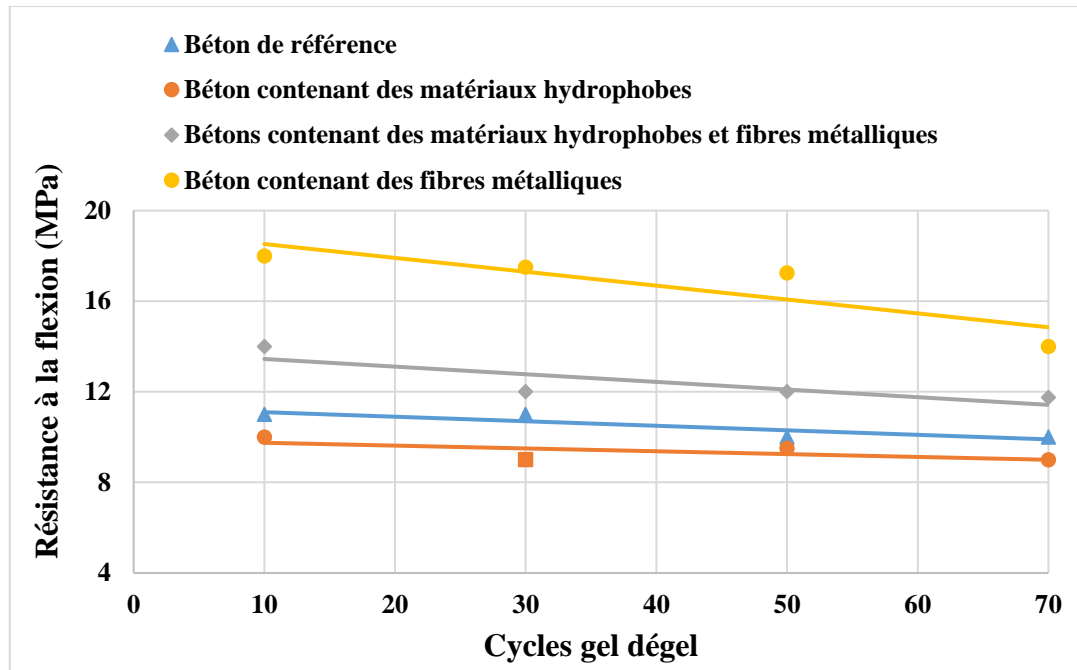


Figure 1.5 : Effet du cycle gel dégel sur la résistance à la flexion pour des bétons de différentes compositions [29].

1.4.4. Abrasion, érosion et cavitation

L'abrasion du béton se réfère à l'action sur les surfaces en béton, qui peut conduire à une perte progressive des caractéristiques physiques du matériau, entraînant potentiellement un problème de durabilité. Parmi les phénomènes les plus connus causant l'abrasion du béton est la chute de débris.

La chute de débris est un type courant de catastrophe naturelle qui entraîne de grandes quantités de sédiments et endommage les vallées dans les régions montagneuses, les particules solides entraînées dans les chutes de débris vont de l'argile au gravier, leurs force d'abrasion peut être importante sur les structures. Les défaillances dues à l'abrasion exposent les gros granulats et l'acier, ce qui nuit gravement à leur pérennité et donc à leur performance à long terme.

D'après Wu et al. [29], le taux d'abrasion est proportionnel à la vitesse de chute des débris, en effet, en passant d'une vitesse de 2,5 m/s à une vitesse de 3,5 m/s, le taux d'abrasion augmente d'environ 30%.

On parle aussi de l'érosion qui est un cas particulier de l'abrasion, il s'agit de l'usure de la surface du béton par l'eau et les particules en suspension dans l'air ou dans l'eau. Concernant la cavitation, elle se produit dans le cas où il y a un changement inattendu et soudain dans la vitesse ou bien dans la direction de l'eau qui se trouve en contact avec la surface du béton, d'où la formation d'une poche de vapeur qui dans le cas où elle implose entraîne des dommages mécaniques [30].

1.5. Dégradation chimique du béton

Les altérations chimiques sont causées essentiellement par les acides et les bases, ces altérations seront à l'origine de la formation de nouveaux composés qui auront comme conséquences principales : une chute de la résistance et une augmentation de la porosité et des propriétés de transfert.

1.5.1. Lixiviation du béton

Le béton exposé à l'eau mobile pendant des périodes prolongées finit par subir une perte de résistance, des essais en laboratoire ont permis d'établir que cette perte de résistance à la compression du béton est lié principalement à la lixiviation de la portlandite Ca(OH)_2 à partir de la surface de la pâte de ciment et une perte de calcium (décalcification) [31]. A fur et à mesure que la lixiviation progresse, une zone dégradée se développe dont la profondeur augmente progressivement.

L'épaisseur de la zone dégradée est directement proportionnelle à la perte de masse du béton. Quant à la perte de résistance, elle peut être liée principalement à la dissolution de la portlandite. La portlandite est en effet présente sous forme de gros cristaux dont la dissolution laisse une macroporosité. La décalcification des CSH entraîne la formation de microporosité dont l'influence sur la résistance est beaucoup moins importante [32].

1.5.2. Les alkalis-granulats

L'eau contenue dans les pores du béton durci contient des quantités d'ions dissous provenant en grande partie de la matrice cimentaire. Lors de l'hydratation du ciment, les ions sulfate sont éliminés de la solution par leur incorporation dans les produits d'hydratation tels que l'ettringite et le monosulfate, ce qui signifie que les anions équilibrant les cations dans la solution sont bientôt exclusivement des ions hydroxydes, par conséquent, le milieu devient alcalin.

Dans ces conditions fortement alcalines, des problèmes de durabilité peuvent survenir à la suite de réactions entre les minéraux des agrégats et les ions hydroxydes. Les produits de ces réactions sont capables d'absorber l'eau, ce qui entraîne l'expansion et la fissuration du béton. Ces réactions alcali-granulats peuvent être divisées en trois : la réaction alcali-carbonate (ACR), la réaction alcali-silicate et la réaction alcali-silice (RAS) [26].

1.5.3. Attaques des acides

Lorsque le béton entre en contact avec des solutions acides, les constituants du ciment et parfois les granulats sont dissous, ce qui conduit à une augmentation de la porosité, avec diverses implications sur les propriétés mécaniques et les propriétés de perméabilité.

Le béton peut se trouver en contact avec des solutions acides pour de nombreuses raisons, ça peut être lié à des procédés de fabrication industriels qui utilisent ou produisent un large éventail d'acides minéraux, ou bien la fabrication d'engrais qui nécessite l'utilisation de l'acide nitrique HNO_3 , de l'acide sulfurique H_2SO_4 ou bien de l'acide phosphorique H_3PO_4 .

L'effet initial de l'attaque acide sur le béton est le développement d'une couche corrodée, lorsque le calcium, l'aluminium et le fer sont éliminés, la porosité de cette couche devient plus élevée. La couche corrodée peut subir un retrait, d'où des fissurations qui augmentent encore plus la porosité [32].

1.5.4. Attaques des sulfates

Le terme « attaque au sulfate » concerne l'ensemble des processus chimiques et physiques complexes et qui se chevauchent provoqués par les réactions des composants du ciment des sulfates provenant de sources externes ou internes. L'attaque du béton par les sulfates est connue depuis plusieurs décennies, et ses conséquences ont été étudiées par de nombreux experts scientifiques et techniques [33]–[36], ils se sont intéressés aux phénomènes macro et micro. Les dommages dus aux attaques sulfatiques peuvent être visibles comme l'écaillage, la délamination, la macrofissuration et, éventuellement, la perte de cohésion, comme ils peuvent la conséquence de processus chimiques invisibles à l'œil nu, notamment les phénomènes

d'adsorption-désorption, de dissolution-précipitation de phases colloïdales et cristallines, recristallisation, etc.

L'attaque par les sulfates est une série de réactions chimiques entre les ions sulfates et les composants du béton durci (principalement la pâte de ciment), elle peut être interne ou externe. L'attaque sulfatique interne fait référence aux situations où la source de sulfate est interne au béton, la source de sulfate peut être le ciment, les matériaux supplémentaires comme les cendres volantes ou le laitier, les granulats, les adjuvants chimiques ou l'eau.

L'attaque externe est causée par une source extérieure au béton, ces sulfates peuvent provenir de deux sources principales dans l'environnement - l'eau de mer et les sols (eaux souterraines). Ces sources sont discutées ci-dessous

a) Eau de mer

L'eau de mer contient des concentrations relativement importantes d'ions sulfate, entre 2500 et 3000 mg/l, selon la salinité de l'eau. L'anion est associé aux cations sodium et magnésium et, dans une moindre mesure, les ions potassium et calcium [37]. Les sulfates de magnésium ($MgSO_4$) sont présents à des concentrations entre 2400 et 2900 mg/l et les sulfates de sodium (Na_2SO_4) à des concentrations entre 4800 et 5800 mg/l. Les concentrations élevées de sulfate de magnésium et sodium signifient que l'eau de mer peut potentiellement être un environnement agressif [32].

b) Sols et eaux souterraines

Dans le cas où les sulfates sont présents dans le sol, leur pénétration dans le béton dépend de la solubilité des minéraux présents, de la présence ou non d'eau souterraine ainsi que la mobilité de cette eau. Le sol peut potentiellement contenir un certain nombre de minéraux sulfuriques, certains d'entre eux sont de faible solubilité. Les minéraux sulfuriques les plus courants sont présentés dans le tableau 1.2, les plus solubles sont les sulfates de sodium et de magnésium.

Dans les sols riches en minéraux sulfuriques, le sulfate ne sera présent en quantités significatives que dans les premiers mètres du sol, ces quantités peuvent être relativement faibles dus à la lixiviation par l'infiltration de l'eau de pluie.

La perturbation du sol pendant la construction peut potentiellement mettre les minéraux sulfurés en contact avec l'air, ce qui permet aux minéraux d'être oxydés en minéraux sulfatés à un taux relativement élevé [32].

Tableau 1.2 : La solubilité des minéraux sulfatiques les plus communs [32].

Minéraux	Formule chimique	Solubilité à 25° C (mg/L)
Barite	BaSO ₄	2
Anhydrite	CaSO ₄	3178
Gypse	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2692
Epsomite	MgSO ₄ ·7H ₂ O	1481658
Jarosite	KFe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	5
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	340561
Glauberite	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	78146
Pyrite	FeS ₂	En dessous de 0
Pyrrhotite	FeS	En dessous de 0

Des études ont démontré que les sulfates peuvent réagir avec les constituants du ciment ou avec les composants formés après l'hydratation, pour donner de nouvelles phases telle que l'ettringite et le gypse [38] . C'est pourquoi l'attaque sulfatique est considérée comme une réaction chimique. Toutefois l'expansion volumétrique et l'apparition des fissures, qui sont des dégradations physiques, sont aisément observables.

Les dégradations dus aux attaques sulfatiques sont liés à certains paramètres et qui sont : la concentration des sulfates, la température, la composition du ciment et la perméabilité du béton.

1.5.4.1. Paramètres influençant les dégradations liées aux attaques sulfatiques

a) Effet de la concentration des sulfates

Le taux de dégradation par attaques sulfatiques dépend de la concentration des sulfates dans la solution. D'après Li et al. [39], les échantillons placés dans des solutions à concentrations

différentes, présentent des différences de la résistance à la compression au-delà de 4 mois d'exposition, et la diminution de la résistance est très visible à 12 mois d'exposition (Figure 1.6).

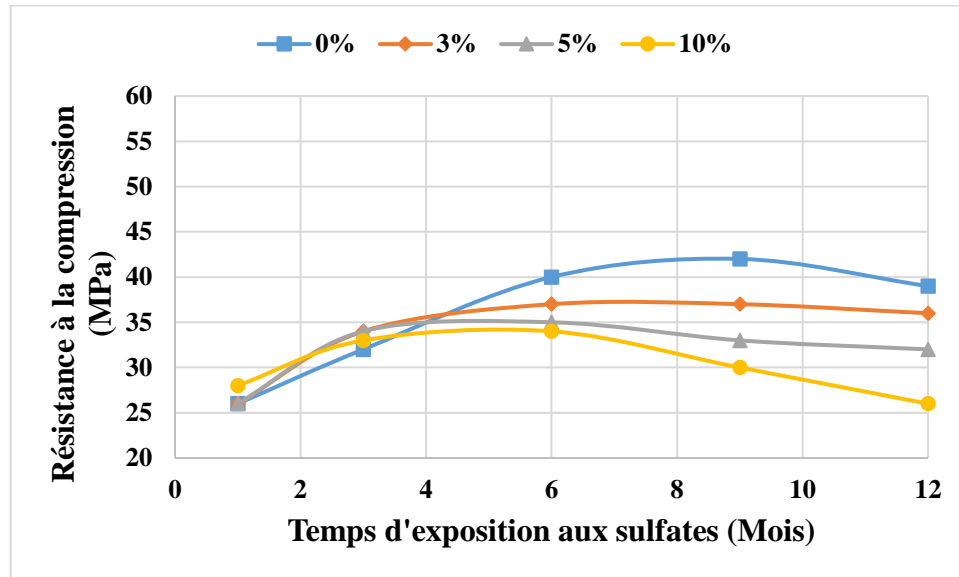


Figure 1.6 : Evolution de la résistance à la compression des échantillons immergés dans des solutions à différents taux de Na_2SO_4 [39].

b) Effet de la température

Des températures élevées ou basses peuvent entraîner une augmentation de la vitesse des réactions chimiques. Dans le cas des attaques sulfatiques, ces températures peuvent accélérer les réactions entre les ions sulfates et les matériaux cimentaires du béton. Cela signifie que l'expansion et la détérioration associées à l'attaque par les sulfates peuvent se produire plus rapidement dans des environnements où les températures ne sont pas dans la norme.

Aziez et Aziez et al. [40], [41] ont étudié l'effet des sulfates de magnésium sur des échantillons de béton de composition différentes et sous différentes températures 5°C, 20°C et 50°C, ils ont remarqué une dégradation totale de certains échantillons après 12 mois d'immersion dans la solution de MgSO_4 à 5°C. Cette constatation a été faite visuellement et par la comparaison des résultats des essais de la résistance à la compression et de la porosité accessible à l'eau pour les

trois températures. Ils ont constaté une détérioration visible des mortiers après 12 mois d'exposition à une solution de $MgSO_4$ à $5^\circ C$ (Figure 1.7), cette détérioration était totale dans certains cas (Figure 1.8). Les résultats donnés par l'essai de compression montrent une détérioration importante des échantillons immergés à $5^\circ C$ par rapport à ceux immergés à $20^\circ C$ et $50^\circ C$ (Figures 1.9 à 1.11).



Figure 1.7 : Etat des mortiers après 12 mois d'exposition à une solution de $MgSO_4$ à $5^\circ C$ [41].

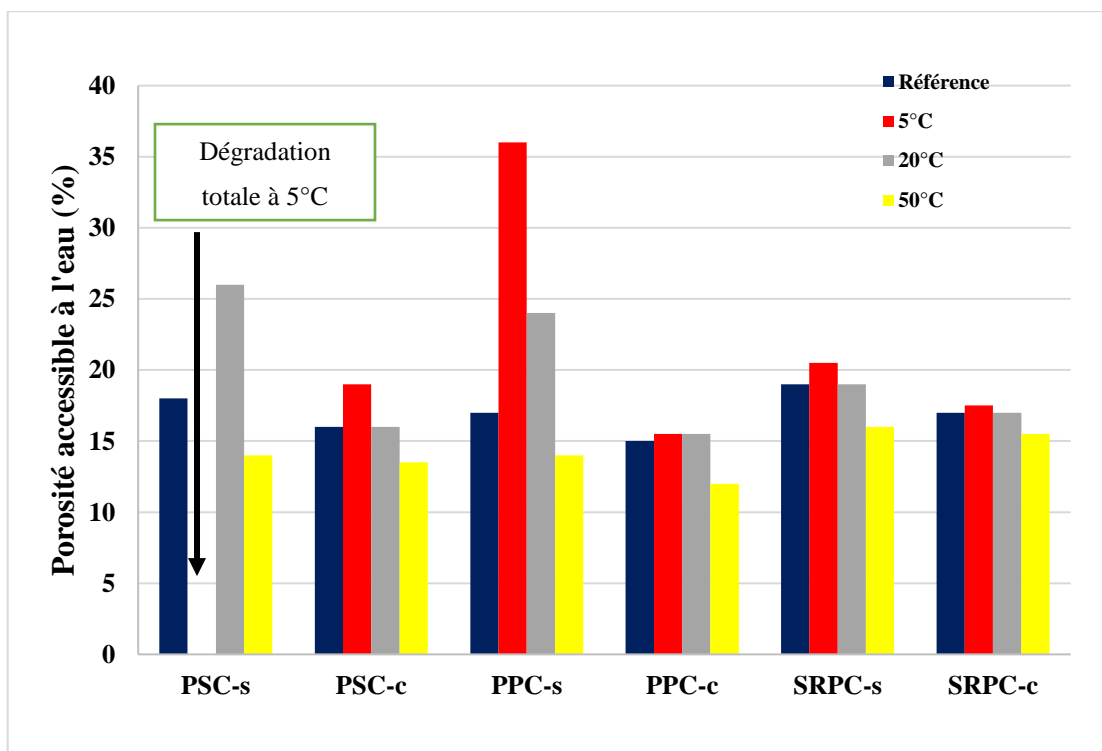


Figure 1.8 : Résultats des essais de porosité à différentes températures [40].

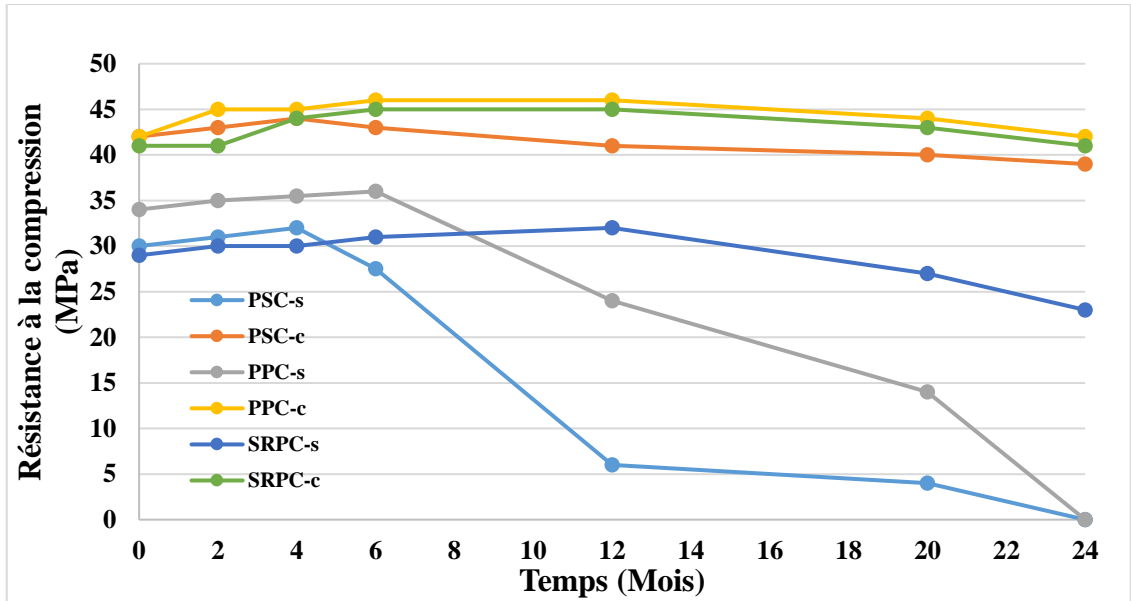


Figure 1.9 : Résistance à la compression des échantillons immergés pendant 24 mois dans 5% de $MgSO_4$ à 5°C [40].

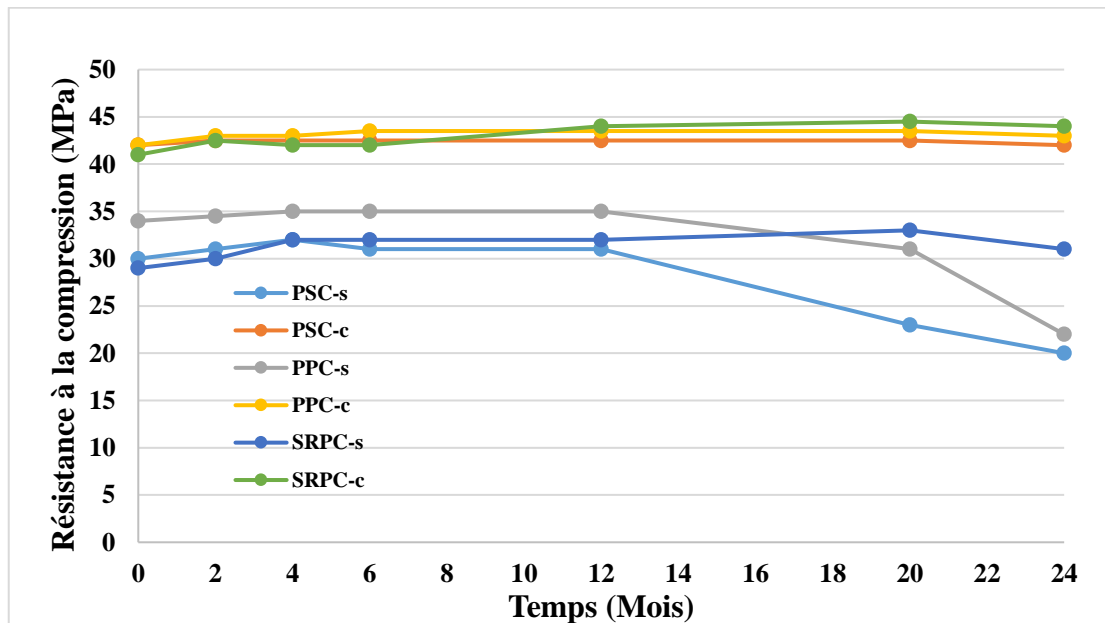


Figure 1.10 : Résistance à la compression des échantillons immergés pendant 24 mois dans 5% de $MgSO_4$ à 20°C [40].

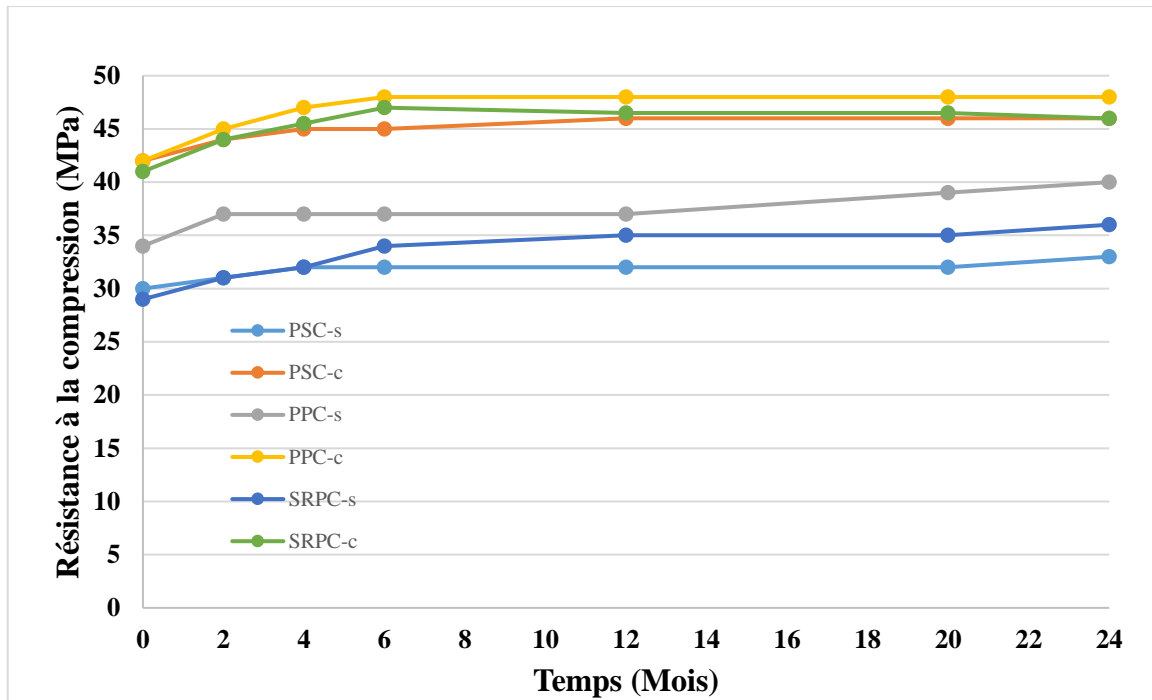


Figure 1.11 : Résistance à la compression des échantillons immergés pendant 24 mois dans 5% de $MgSO_4$ à $50^\circ C$ [40].

c) Effet de la composition du ciment

La composition du ciment a une influence importante sur la susceptibilité du béton à l'attaque des sulfates. Les différents types de ciment ont des compositions minéralogiques variées, ce qui affecte directement la façon dont les phases cimentaires réagissent avec les ions sulfates. La composition du ciment détermine la concentration et la réactivité des composés vulnérables aux attaques des sulfates. En effet, l'aluminate de calcium (C_3A) est l'un des principaux responsables de l'attaque par les sulfates, car il réagit rapidement avec les ions sulfates pour former des composés expansifs. Les ciments riches en C_3A sont plus sensibles à l'attaque des sulfates que les ciments à faible teneur en C_3A . Les ions sulfates se combinent avec le C_3A pour former de l'ettringite, un composé cristallin qui peut provoquer une expansion interne et des fissures dans le béton

L'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) contribue également à l'attaque des sulfates, bien que sa réactivité soit généralement inférieure à celle du C_3A . Les ciments riches en C_4AF peuvent subir

des réactions aux sulfates plus lentes que les ciments riches en C_3A , mais ils peuvent toujours être sensibles, en particulier dans des conditions d'exposition aux sulfates sévères.

Ouyang et al. [42] ont étudié l'expansion de quatre mortiers soumis à une attaque sulfatique externe, les quatre mortiers ont été confectionné avec quatre ciments ayant des taux de C_3A différents. Ils ont remarqué que plus le taux de C_3A augmentait, plus l'expansion des mortiers augmentait, ce qui leur a permis de déduire que dans le cas où les bétons étaient utilisés dans des milieux agressifs, le taux de C_3A ne doit pas dépasser 7%.

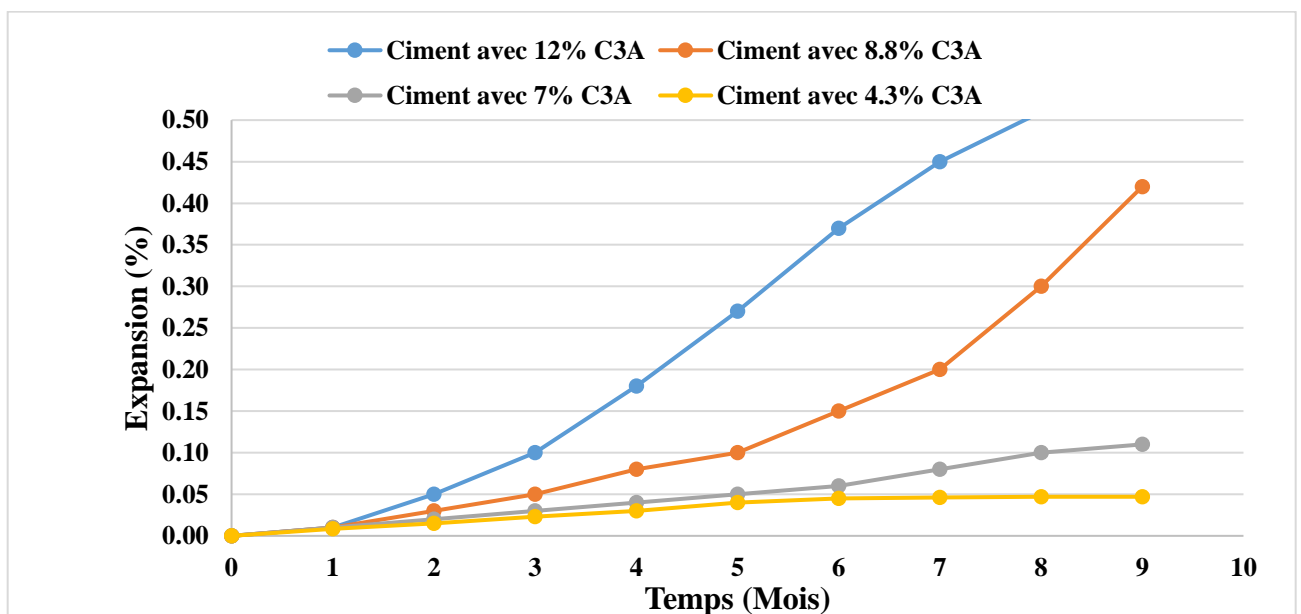


Figure 1.12 : Expansion de mortiers contenant des ciments différents soumis à une attaque sulfatique externe [42].

El hachem et al. [43] ont comparé deux mortiers formulés à partir de deux ciments avec une teneur de C_3A différentes, 10.5% de C_3A pour le premier mortier et 2.2% pour le deuxième mortier. Ils ont remarqué que la formation de l'ettringite au niveau du premier mortier, qui a un taux de C_3A élevé est plus rapide par rapport au deuxième mortier.

d) Effet de la perméabilité du béton

La perméabilité du béton est un paramètre important dans la résistance aux attaques sulfatiques, il dépend du rapport E/C [44]. Plus le rapport E/C est faible, plus la porosité est interconnectée, plus la perméabilité est faible (Figure 1.13).

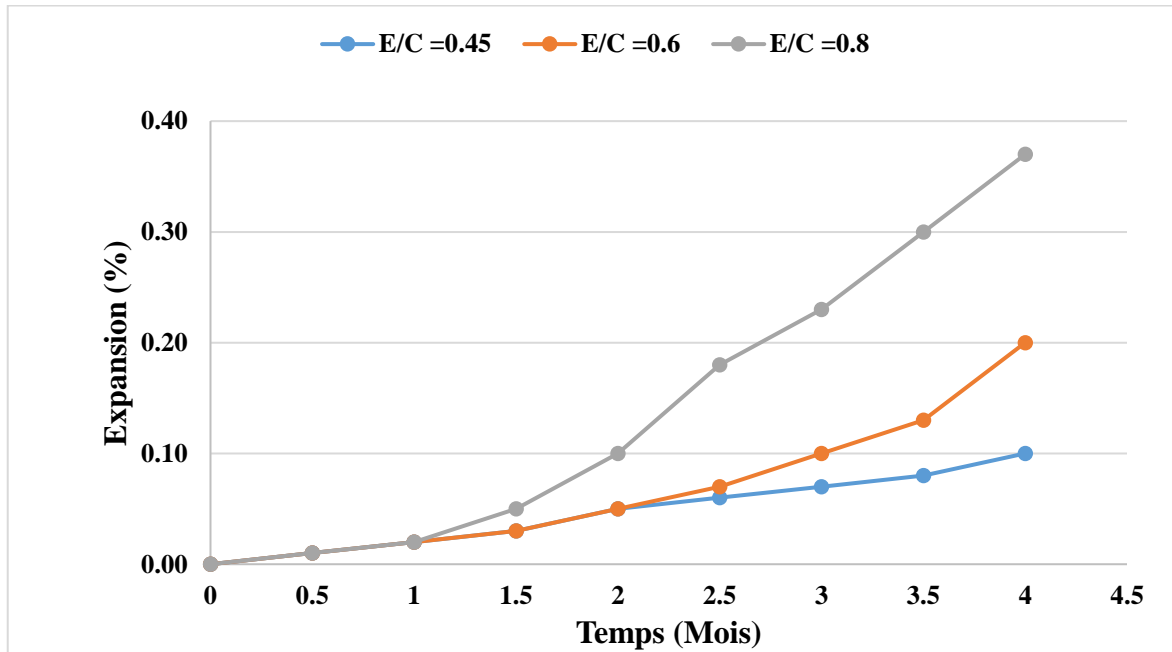


Figure 1.13 : Expansion de mortiers de différents rapports E/C soumis à une attaque sulfatique externe [42].

1.5.4.2. Processus des attaques sulfatiques

Le béton est un matériau composé essentiellement de ciment, d'eau et d'agréats, le béton durci obtenu dépend de réactions chimiques entre les différents éléments qui le composent ainsi que des conditions environnementales (température, humidité).

Le clinker est composé essentiellement d'alite (C_3S), de bélite (C_2S), ainsi que des phases contenant du l'aluminium C_3A et du fer C_4AF , chaque composant, en présence d'eau et selon les conditions environnementales réagit selon un système de réactions chimiques complexes. Ces réactions chimiques produisent essentiellement du silicate de calcium hydraté, de la portlandite, du gypse, des monosulfates, de l'ettringite ainsi que de la thaumasite (Tableau 1.3).

Tableau 1.3 : Les composants essentiels du clinker [30].

Composants	Formules chimiques	Abréviations
Alite	Ca_3SiO_5	C_3S
Belite, dicalcium silicate	Ca_2SiO_4	C_2S
Tricalcium aluminate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A
Tetracalcium alumino ferrite	$\text{Ca}_2(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_5$	C_4AF
Chaux libre	CaO	C
Periclase	MgO	M
Arcanite	K_2SO_4	KS
Thenardite	Na_2SO_4	NS
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2

Le sulfate de magnésium est généralement le plus agressif, en effet, le magnésium, en participant aux réactions, donne comme résultats de la brucite et du gypse.

La réaction des aluminates avec le gypse donne en résultat de l'ettringite qui peut mener au gonflement et à l'expansion. La précipitation de la brucite induit une diminution du PH, d'où une décalcification plus importante du béton. Ceci peut se traduire par une perte de résistance, une perte de masse, une expansion dans le béton (Figure 1.14).

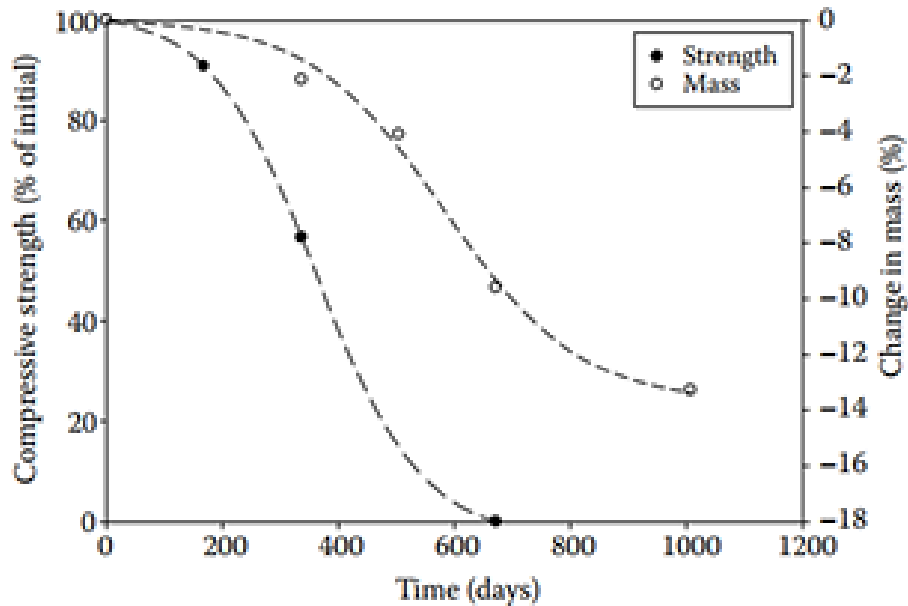


Figure 1.14 : Perte de masse et de résistance d'un mortier exposé à une solution de $MgSO_4$ [30]

1.6. Vieillissement accéléré

Le vieillissement des structures en béton armé est un phénomène naturel qui est difficile à suivre, il demande beaucoup de temps, c'est pour cela que des techniques de vieillissement accélérées ont été développées. Ces méthodes donnent des résultats qui permettent de développer un modèle afin de prédire le comportement du matériau à long terme.

Le vieillissement accéléré est le processus dans lequel un ou plusieurs mécanismes de développement et/ou de dégradation d'un matériau sont intentionnellement accélérés.

Il existe plusieurs techniques d'accélération du vieillissement, parmi ces méthodes, nous avons la technique de séchage – mouillage. Cette technique consiste à exposer les échantillons à une certaine humidité pendant un laps de temps défini, ensuite à les sécher pendant un autre laps de temps qui peut être le même ou différent. Pour cela, il est important de définir :

- Le temps du mouillage.
- La technique de mouillage
- Le temps du séchage

- La température du séchage (séchage à température ambiante, séchage dans l'étuve à une température donnée).
- Le nombre de cycles de séchage-mouillage.

Plusieurs paramètres peuvent être suivis dans ces essais, à savoir, la résistance, la porosité, l'absorption capillaire, la résistance aux éléments agressifs.

1.6.1. Le ratio séchage mouillage

Le ratio séchage mouillage est un paramètre important dans l'essai de vieillissement, le temps de séchage peut être équivalent au temps de mouillage [45], il peut aller de quelques heures à plusieurs jours [46], comme on peut avoir un temps de séchage différent du temps de mouillage [47], [48].

Ce ratio dépend du phénomène à représenter que ce soit l'érosion côtière, la durabilité des revêtements extérieurs, le changement de température et d'humidité entre la nuit et le jour ou bien le vieillissement des matériaux dans des zones désertiques ou humides.

Chen et al. [49] ont étudié l'effet du ration séchage mouillage sur plusieurs paramètres dont la résistance, ils ont comparé trois ratios de séchage/mouillage : 1/3, 1/1 et 3/1, ils ont démontré que les échantillons ayant subi un temps de séchage plus important que le temps de mouillage montraient une diminution de la résistance à la compression et à la flexion (Figures 1.15 et 1.16).

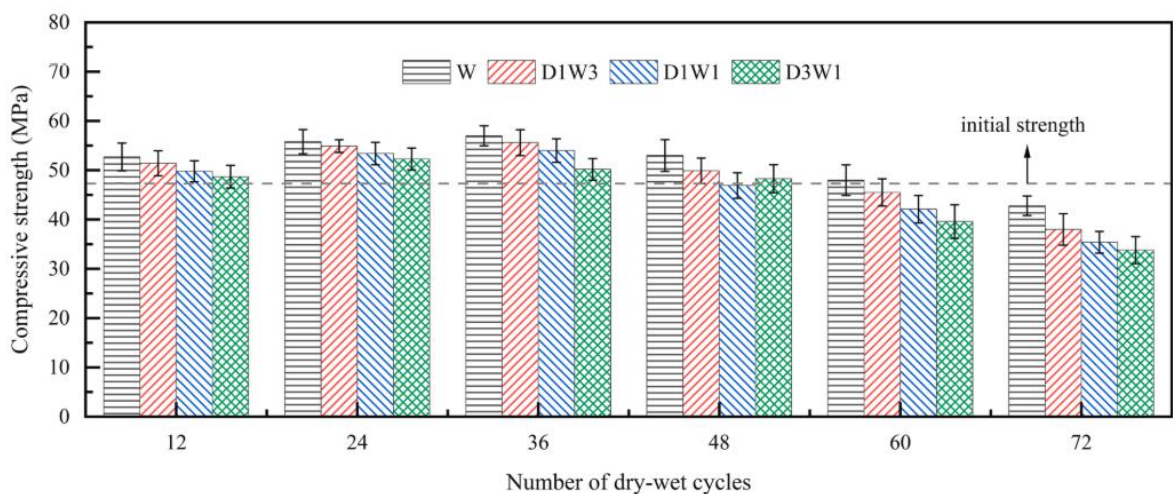


Figure 1.15 : La résistance à la compression avec différents ratios séchages mouillages [49].

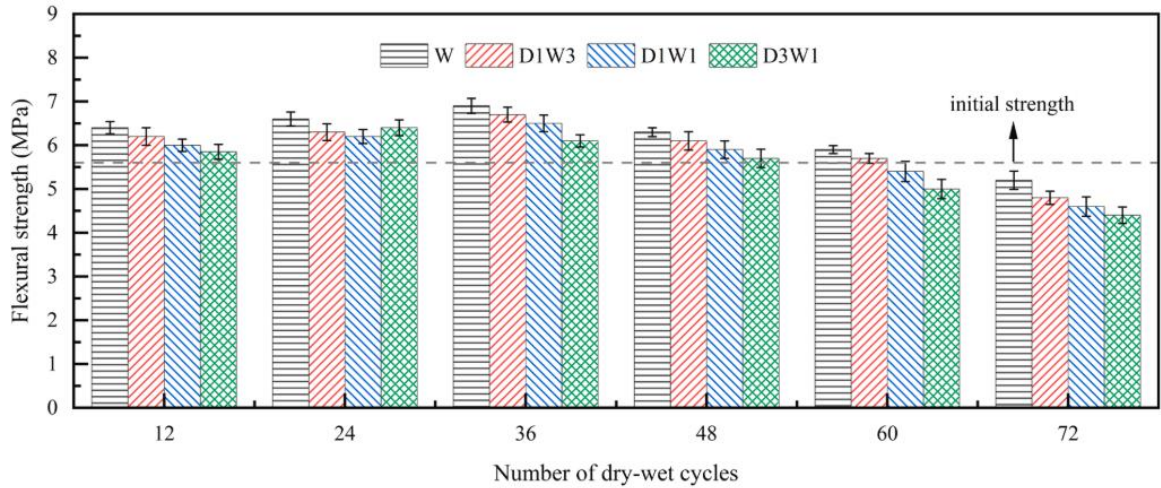


Figure 1.16 : La résistance à la flexion avec différents ratios séchages mouillages [49].

Chen et al. [49] ont examiné en outre la distribution de la teneur en chlorure libre sous différents cycles. Les résultats indiquent que la teneur en chlorure libre a d'abord augmenté, puis diminué avec l'augmentation de la profondeur d'érosion. Ils ont constaté que la teneur en chlorure libre à la même profondeur augmente avec l'augmentation des cycles de séchage-mouillage (Figures 1.17 et 1.18).

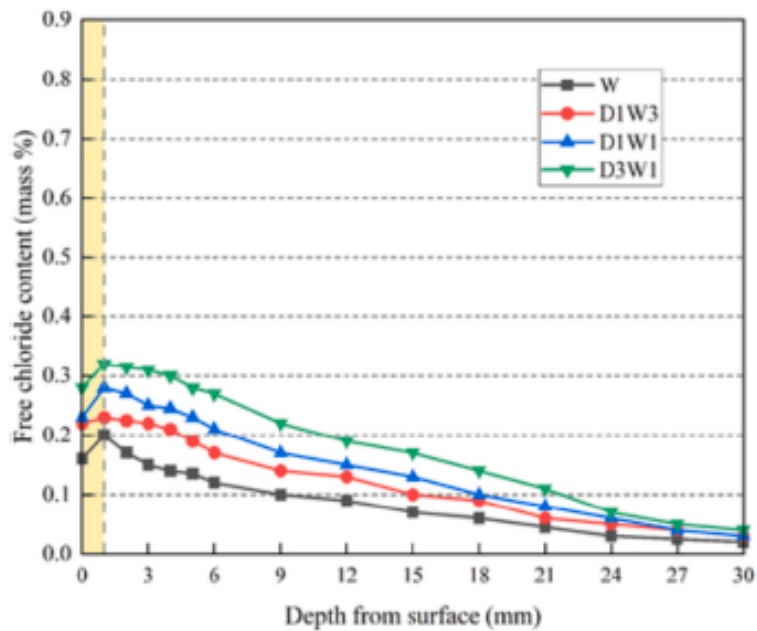


Figure 1.17 : Distribution du chlorure libre après 12 cycles de séchage mouillage [49].

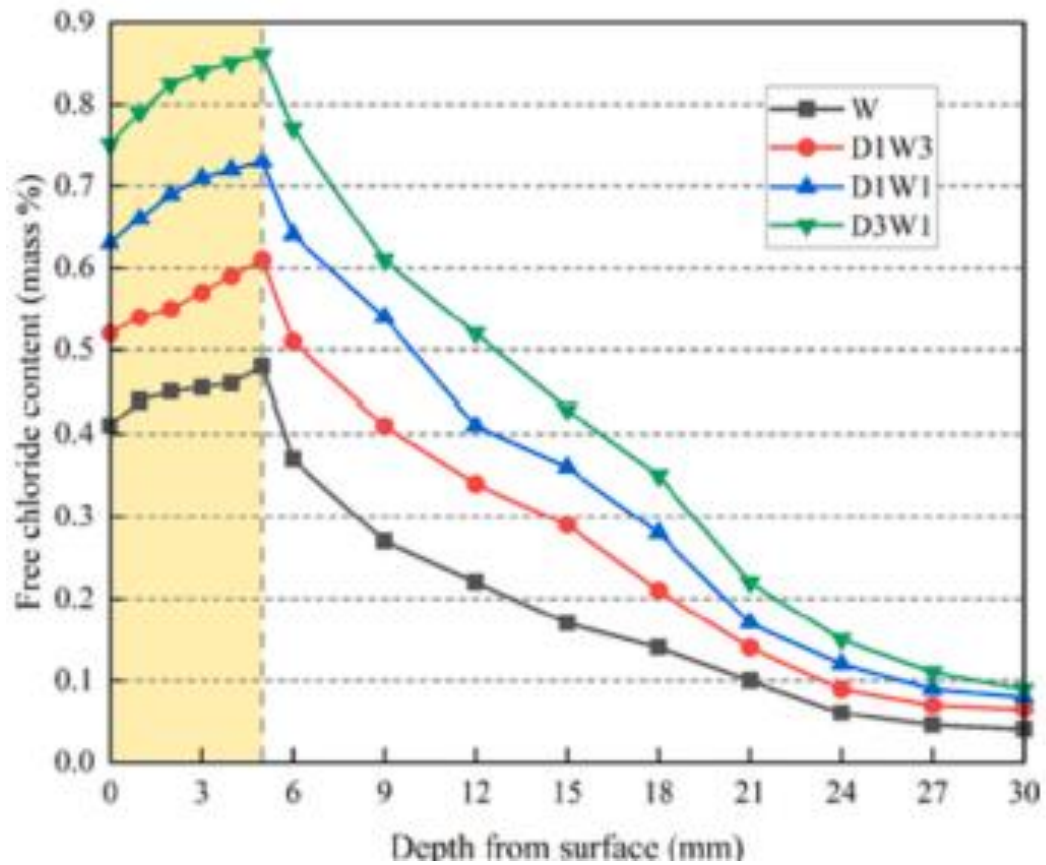


Figure 1.18 : Distribution du chlorure libre après 72 cycles de séchage mouillage [49].

1.6.2. Le nombre de cycles

La durée du cycle est un paramètre tout aussi important que le ratio séchage mouillage, les diverses recherches effectuées sont unanimes sur le fait que la résistance augmente avec les premiers cycles puis diminue lorsque le nombre de cycles augmente. Weil et al. [47] ont remarqué que cette diminution était remarquable au-delà de 60 cycles (Figures 1.19 et 1.20).

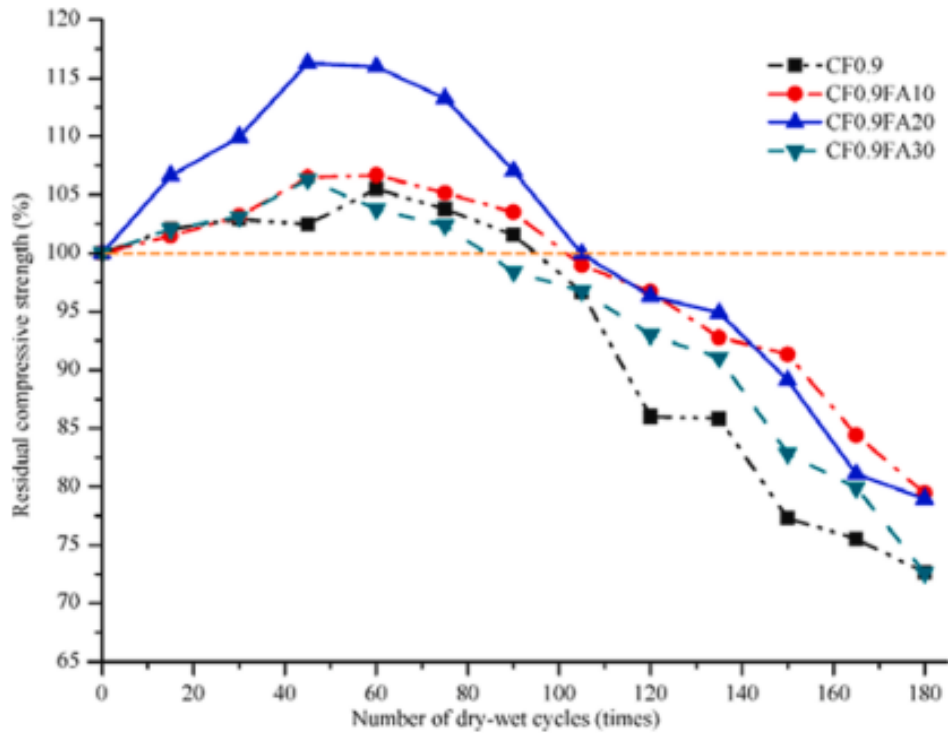


Figure 1.19 : Résistance à la compression d'échantillons soumis à différents cycles séchages mouillages [47].

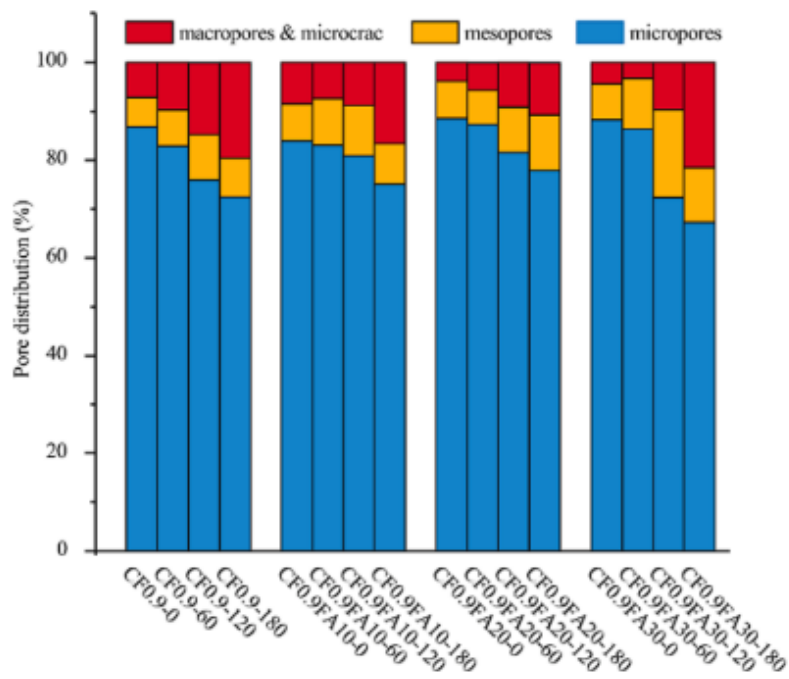


Figure 1.20 : distribution des pores à différents cycles séchage mouillages [47].

En se basant sur l'analyse microstructurale, ils ont remarqué que les macropores augmentaient avec l'augmentation des cycles séchage mouillages.

Xie et al. [50] ont comparé des échantillons soumis à des environnements différents :

- Des échantillons immergés dans l'eau dénommés ZW.
- Des échantillons immergés dans la solution de sulfates dénommés ZS.
- Des échantillons soumis aux cycles de séchage mouillage en utilisant l'eau pour le mouillage dénommés ZGW.
- Des échantillons soumis aux cycles de séchage mouillage en utilisant la solution de sulfate pour le mouillage dénommés ZGS.

Quel que soit la solution utilisée, les échantillons soumis au séchage mouillage affiche de meilleurs résultats de la résistance à la compression par rapport aux échantillons immergés complètement dans l'eau. A remarquer que tous les résultats pour chaque cas ont la même tendance (Figures 1.21 et 1.22).

En examinant la microstructure des échantillons, Chen et al. [49] ont remarqué que les échantillons n'ayant subi aucun cycle de séchage mouillage ne présentaient aucune fissure (Figure 1.23). Concernant les échantillons ayant subi 36 cycles (Figure1.24), ils ont remarqué la présence de porosités et de fissures qui étaient plus importantes à 72 cycles (Figure1.25).

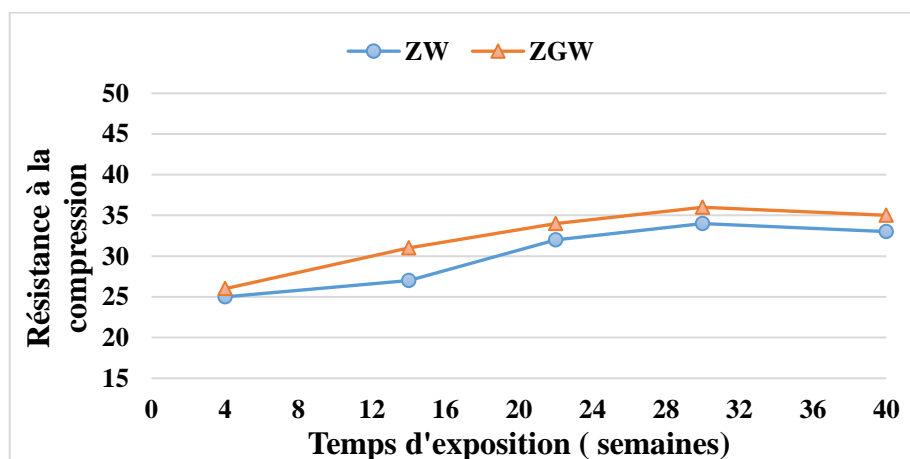


Figure 1.21 : Résistance à la compression des échantillons soumis à des environnements différents (cas de l'eau) [50].

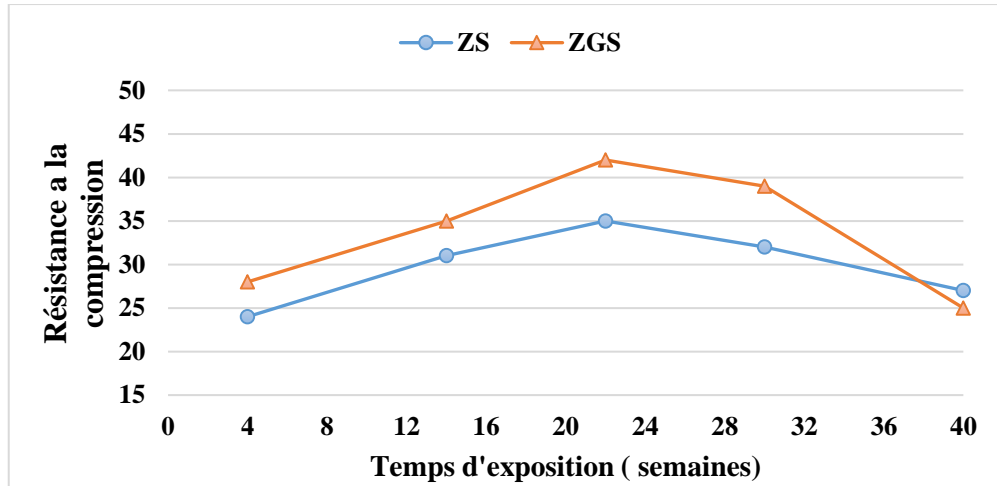


Figure 1.22 : Résistance à la compression des échantillons soumis à des environnements différents (cas de la solution de sulfates) [50].

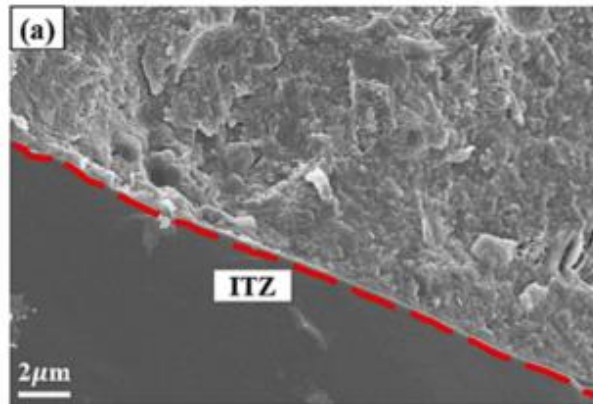


Figure 1.23 : Echantillon n'ayant subi aucun cycle de séchage mouillage [49].

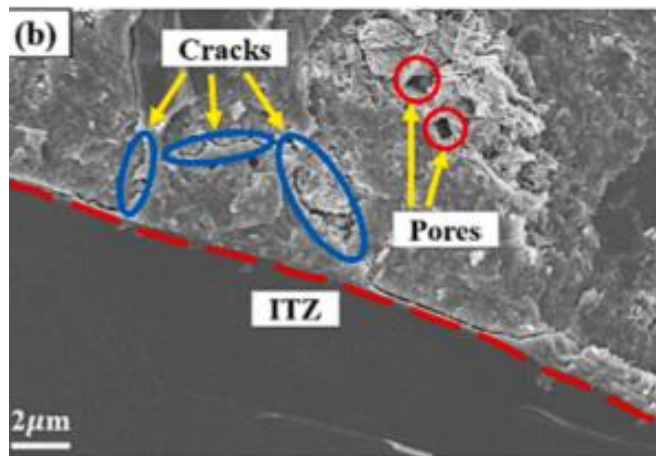


Figure 1.24 : Echantillon ayant subi 36 cycles de séchage mouillage [49].

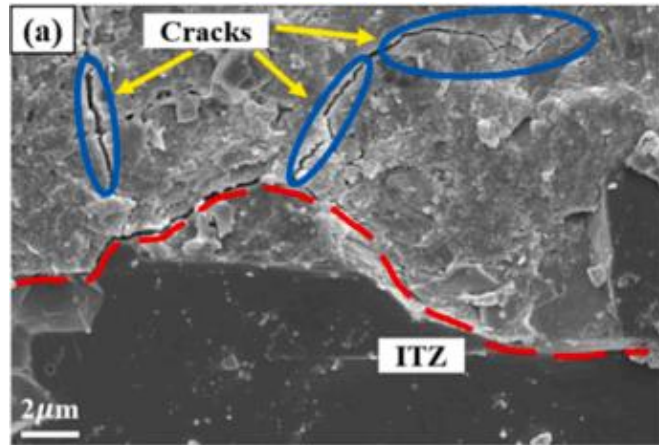


Figure 1.25 : Echantillon ayant subi 72 cycles de séchage mouillage [49].

Wang et al. [51] ont étudié la durabilité des mortiers à base d'agrégats recyclés soumis à l'action combinée des sulfates et des cycles de séchage mouillage. En étudiant les images MEB des échantillons exposés à 90 cycles de séchage mouillage, ils ont remarqué la formation des microfissures (Figure 1.26), formation de gypse en forme d'haltère (Figure 1.27), ainsi que la présence d'ettringite en forme de bâtonnets formé sur la surface exposée (Figure 1.28).

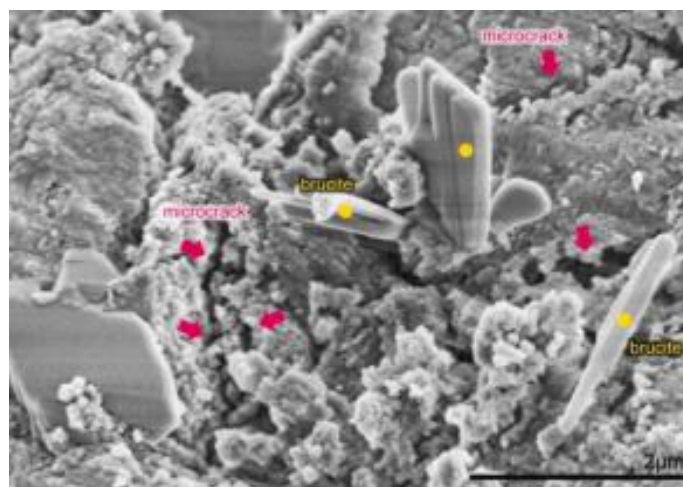


Figure 1.26 : Présence de microfissures à 90 cycles de séchage- mouillage [51].

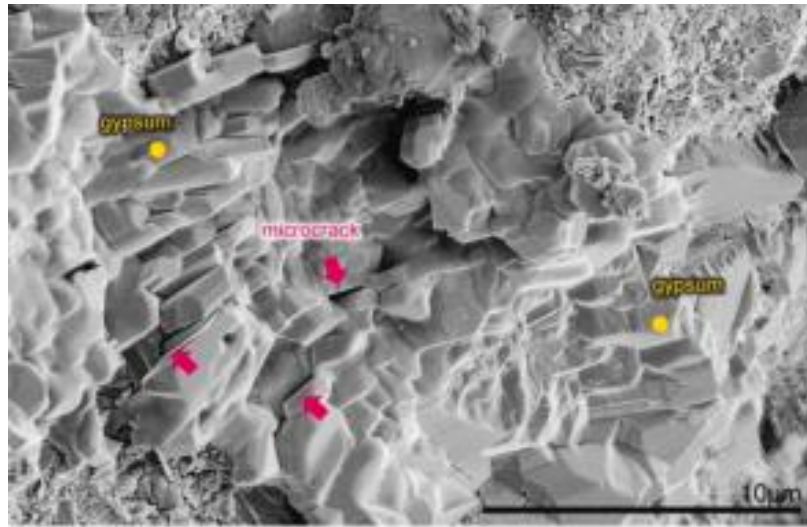


Figure 1.27 : Présence de gypse à 90 cycles de séchage- mouillage [51].

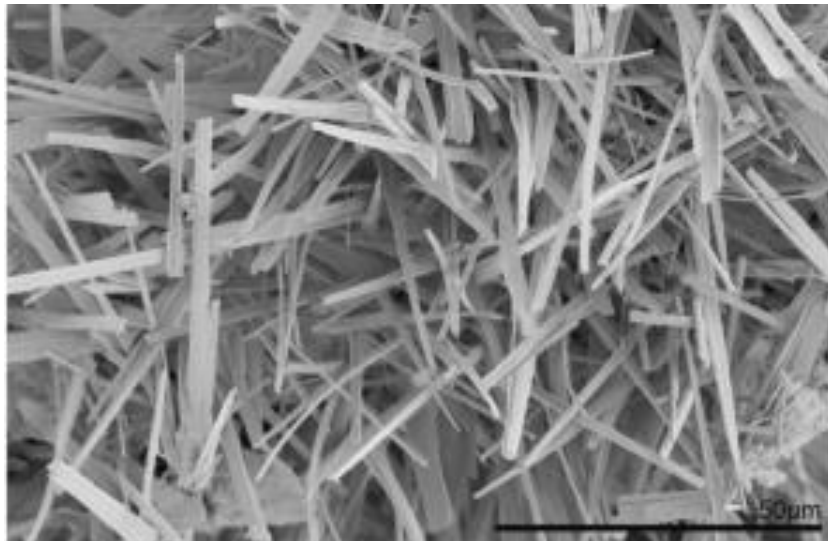


Figure 1.28 : Présence d'ettringite à 90 cycles de séchage- mouillage [51].

Les échantillons soumis aux cycles de séchage mouillage montrent des signes de dégradation à un certain nombre de cycles, ce nombre est dépendant du milieu de mouillage (eau distillée, eau de mer, sulfates, chlorures...), ainsi que de la composition des échantillons étudiés (Figures 1.29 et 1.30).

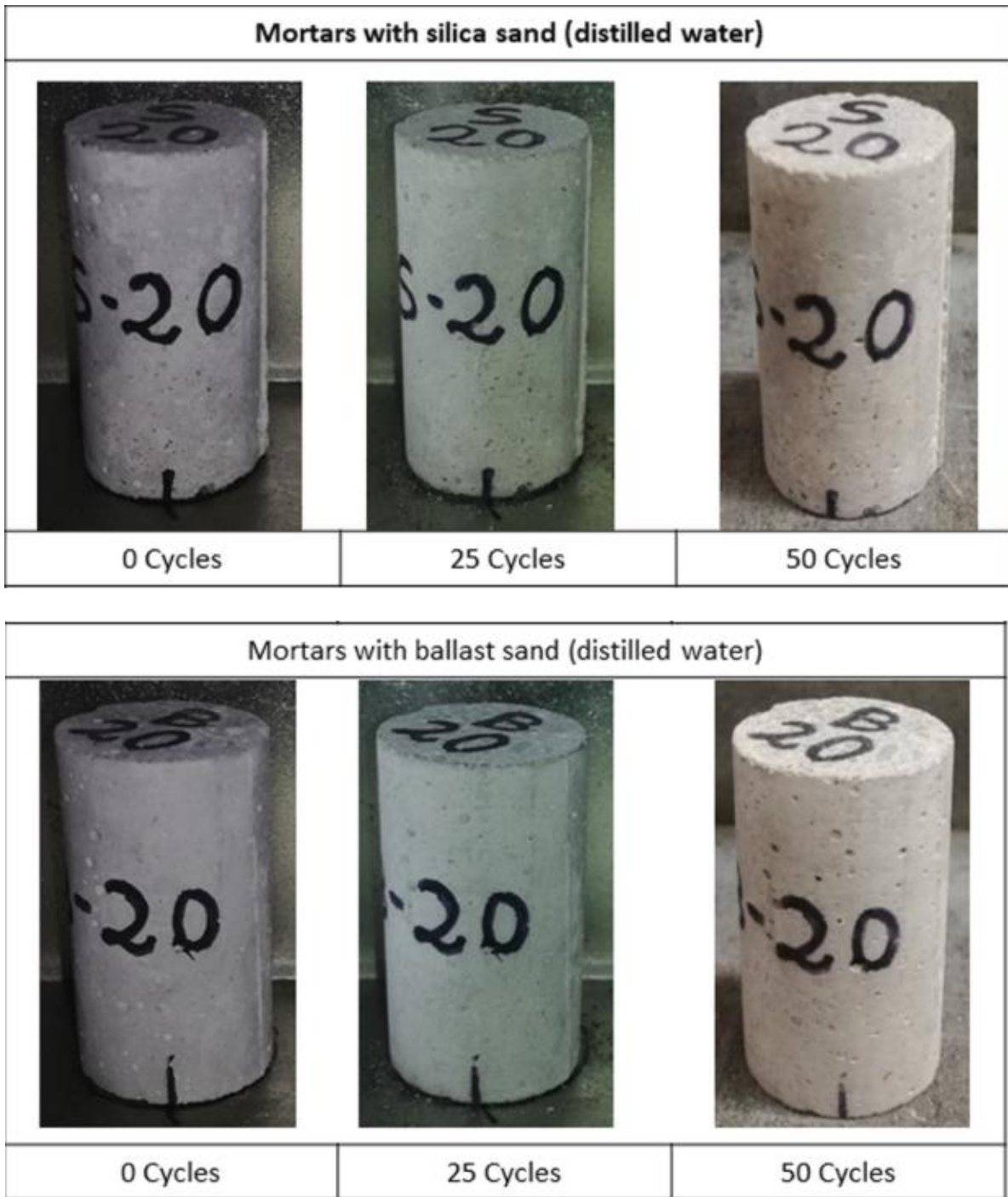


Figure 1.29 : Evolution de l'aspect extérieur des échantillons soumis au séchage mouillage (eau distillée) [52].

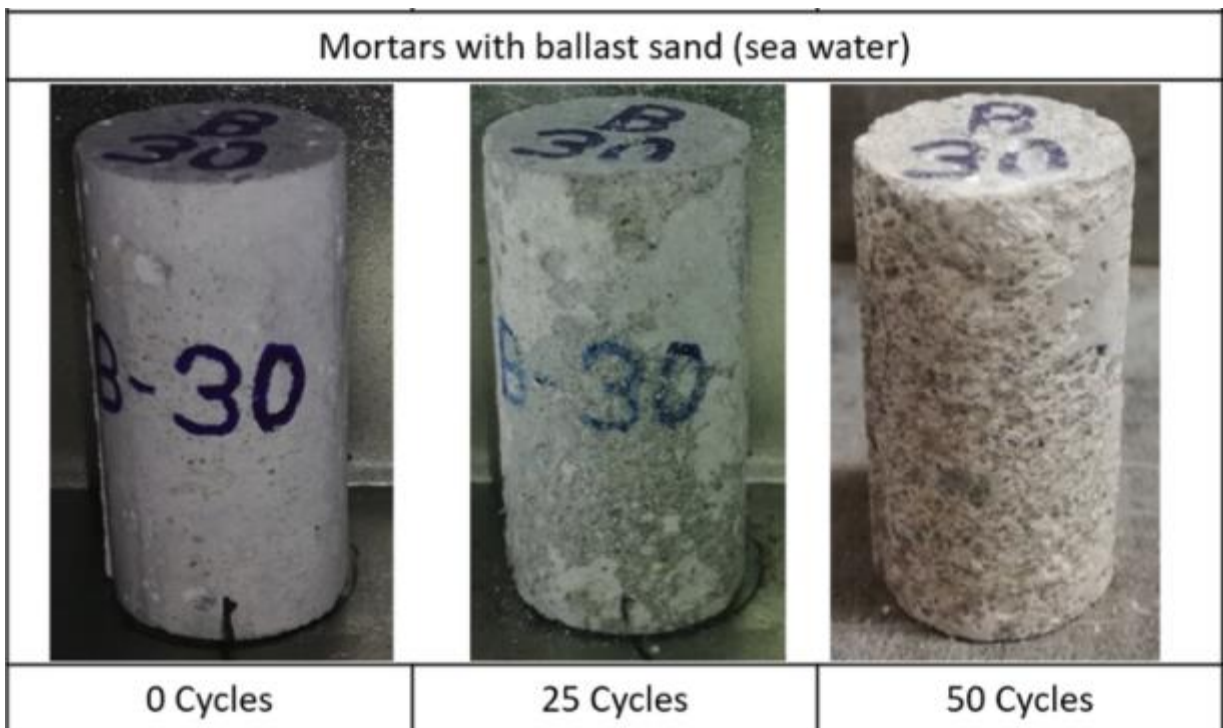
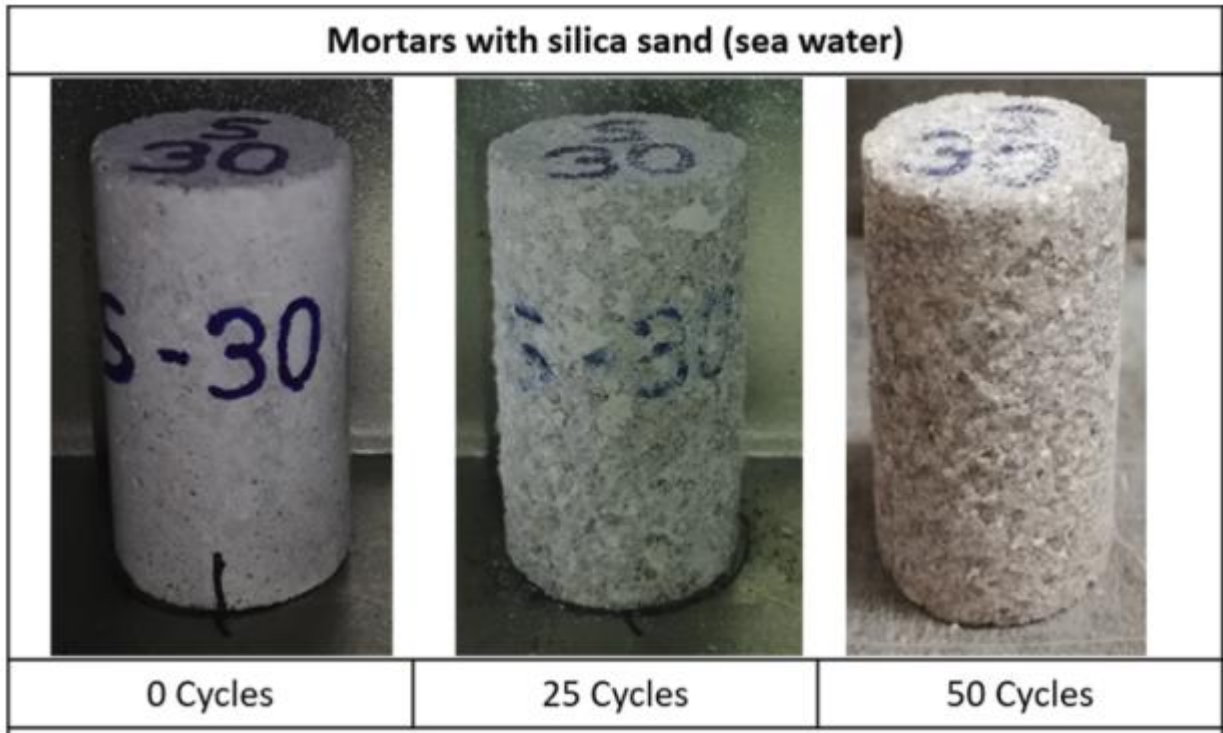


Figure 1.30 : Evolution de l'aspect extérieur des échantillons soumis au séchage mouillage (eau de mer) [52].

1.6.3. La température

La température est un paramètre important à prendre en compte dans toute recherche concernant le comportement des bétons que ce soit vis à vis de la résistance ou de la durabilité [53]. Son effet sur le vieillissement du béton est assez complexe, il dépend de certains paramètres dont la composition du béton, le degré de la température et le temps d'exposition [54], [55]. Mathews et al. [56] ont constaté que les températures élevées avaient un effet négatif sur la résistance et la durabilité des bétons.

Zhang et al. [57] ont suivi le comportement des éprouvettes de béton soumise à des cycles de séchage mouillage à des températures différentes : 25°, 45° et 60°. Ils ont remarqué qu'avec l'augmentation de la température, le nombre de microfissures dans le béton augmentait et les échantillons montraient divers degrés de détérioration.

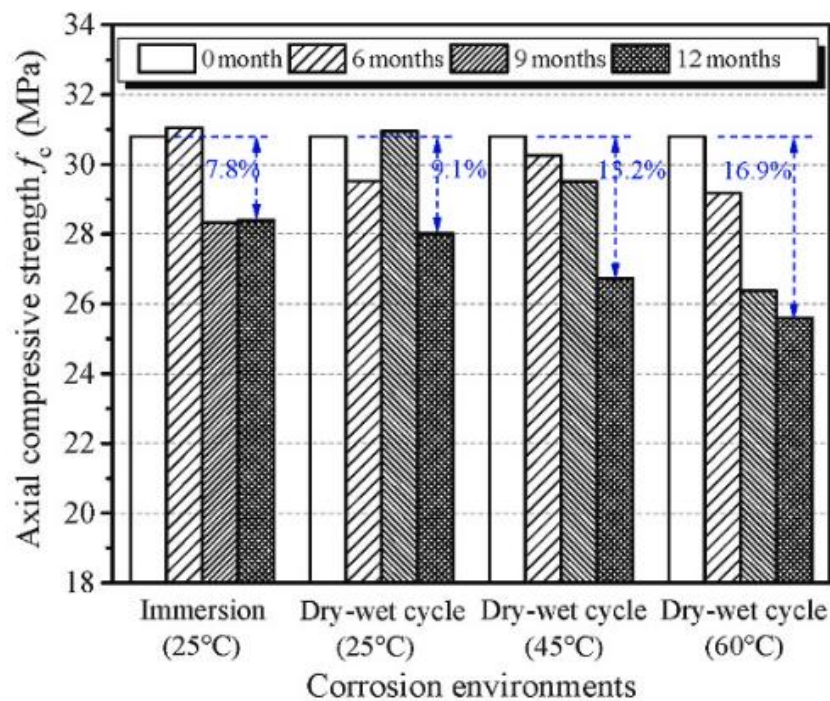


Figure 1.31 : résultats des essais de compression pour des échantillons soumis à différents milieux [57].

D'après Muller [58], la température idéale de séchage est de 10° ou plus, afin que le béton garde une certaine humidité lors des cycles séchage mouillage. Thomas et al. [59] ont étudié l'effet de la température de cure sur le béton, ils ont constaté qu'à 105°, le béton gardait une certaine

intégrité structurale, toutefois, au-delà de cette température, la résistance à la compression diminuait avec l'augmentation de la température. Dans la majorité des recherches effectuées, les auteurs préconisent de ne pas dépasser 65° afin de ne pas altérer la composition du béton [60], [61], [52], [62].

Le tableau 1.4 récapitule quelques protocoles de séchages- mouillages adoptés par différents chercheurs.

Tableau 1.4 : Différents protocoles de séchage-mouillage.

Auteurs	Période de cure	Protocole adopté	Nombre de cycles
Thomas et al.[59]	28	Séchage : 16h à 105° Immersion : 8h	15
Huang et al.[63]	28	Séchage : 24h à 50° Immersion : 24h	15, 30, 45, 60, 90
Xu et al.[62]	56	Séchage : 24h à 65° Immersion : 24h	75
He et al.[64]	60	Immersion : 24h Séchage : 21h à 60°	Jusqu'à l'âge requis
Wang et al.[65]	28	Immersion : 10h Séchage : 14h à 40°	90, 180, 270, 360
Delannoy et al.[66]	90	Immersion : 5j Séchage : 2j	Sur 2 ans
Gao et al.[61]	60	Immersion : 21h Séchage : 45h à 60°	Jusqu'à l'âge visé
Qi et al.[67]	60	Immersion : 21h Séchage : 45h à 60° Air libre : 3h	Jusqu'à une perte de masse supérieure à 5%
Wang et al.[60]	28	4 protocoles de séchage mouillage (1:1), (3 :1), (5 :1), (7 :1) Séchage à 60°	150

1.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vue d'ensemble de la durabilité et le vieillissement des matériaux cimentaires, ceci, en développant les concepts clés liés à la porosité du béton, à la sorption, aux mécanismes de dégradation physique tels que le retrait, la fissuration thermique, les dommages causés par le gel et le dégel, et l'abrasion, ainsi que la dégradation chimique par lixiviation, l'attaque par les sulfates et l'attaque par les acides.

Nous avons essayé de mettre en avant la durabilité des structures en béton, essentiellement les barrages, les ponts, les centrales nucléaires et d'autres infrastructures dont la durée de vie prévue est de 50 à 100 ans. En effet, la dégradation physique et chimique qui se produit au fil du temps, réduit progressivement la résistance et la perméabilité du béton. L'attaque sulfatique a été mise en avant en expliquant les paramètres liés à ce phénomène.

Les méthodes d'essai de vieillissement accéléré sont un moyen de simuler et de prévoir rapidement la détérioration à long terme du béton. L'exposition cyclique au mouillage-séchage est une technique courante, le rapport séchage/mouillage, le nombre de cycles, la composition de la solution et la température étant des variables clés du test qui dictent la vitesse de dégradation.

Nous avons constaté qu'il existe peu d'études sur le vieillissement accéléré des bétons à base de granulats recyclés notamment, les granulats issus des déchets de marbre.

Nous avons constaté qu'il existe peu d'études sur le vieillissement accéléré des bétons à base de granulats recyclés notamment les granulats issus du marbre

**VALORISATION ET
REUTILISATION DES
DECHETS DANS LA
CONFECTION DU BETON,
LE CHEMIN VERS UNE
ECONOMIE CIRCULAIRE**

2. CHAPITRE 2 : BIBLIOGRAPHIE : VALORISATION ET REEUTILISATION DES DECHETS DANS LA CONFECTION DU BETON, LE CHEMIN VERS UNE ECONOMIE CIRCULAIRE

2.1. Introduction

La croissance économique rapide de certains pays dans le monde et principalement en Asie, en plus de la transition mondiale vers une économie à faible émission de carbone exige le développement d'infrastructures à grande échelle et à faible impact sur l'environnement, ces infrastructures nécessitent beaucoup de matériaux, dont les matériaux de construction (ciment, agrégats) et les matériaux composites.

Une croissance économique implique obligatoirement des constructions que ce soit de bâtiments, d'usine, ou toute autre infrastructure, la rénovation ou carrément de la démolition ; dans ce scénario, deux problèmes majeures se posent :

- Les matériaux utilisés ; qu'ils soient fabriqués et dont la fabrication peut être nuisible à l'environnement ou issus de ressources naturelles qui risquent de se tarir dans le cas d'exploitation excessive.
- Les déchets accumulés que ce soit lors de la construction (déchets de brique, de carrelage), ou dû à la fin d'exploitation de la construction, comme par exemple les déchets de béton dans le cas de démolition d'un bâtiment ou les déchets de matériaux composites dans le cas de démontage d'un parc d'éoliennes ou même des déchets issus de diverses usines qu'ils soient inertes ou dangereux nuisent à l'environnement par leur accumulation.

Dans la construction, le matériau le plus utilisé est le béton qui est constitué principalement de ciment, d'agrégat et d'eau, et afin de répondre aux exigences établies par la protection de l'environnement, il est nécessaire de :

- a) Minimiser les émissions du CO₂ et l'énergie dans le processus de fabrication du ciment :

L'industrie de fabrication du ciment est responsable de 7% des émissions de CO₂, en effet, la fabrication du ciment Portland nécessite une grande température et beaucoup d'énergie, ce qui

entraîne une production de CO₂ et de CO. Ces gaz sont non toxiques et ils sont, donc, libérés dans l'atmosphère [8]. L'empreinte carbone du béton peut être abaissée en utilisant des ajouts comme substitut du ciment telle que le laitier, la pouzzolane, les cendres volantes. Il a été estimé que 5-10% de remplacement du ciment entraîne une réduction de 12% des émissions de CO₂ [68], [69].

b) Minimiser la quantité d'eau utilisé.

Les ressources en eau s'épuisent de jour en jour en raison de son utilisation dans différents domaines. La pénurie de l'eau est peut-être le problème environnemental le plus critique dans le monde [70]. L'eau douce ne représente que 2,5% de la totalité de l'eau existant sur terre, la plus grande partie est gelée dans les glaciers et les calottes glaciaires, une autre partie est souterraine, une petite fraction seulement est présente au-dessus du sol. La population mondiale étant en augmentation, il faut s'attendre à ce que la demande en eau ait une tendance à la hausse aussi.

L'eau est très utilisée dans le domaine de la construction, que ce soit pour la préparation du béton, le lavage des granulats, le nettoyage des camions et des équipements. Afin de réduire l'utilisation de l'eau du robinet, des études portant sur l'utilisation de l'eau recyclé dans la confection du béton et son effet sur son comportement à l'état frais et durci ont été menés [71]–[73].

c) Minimiser l'utilisation des ressources naturelles

Les sables et graviers (agrégats) sont les matériaux de base exploités dans le monde entier, ils représentent le plus grand volume de matériaux solides extraits à l'échelle mondiale. Au niveau mondial, entre 47 et 59 milliards de tonnes de matériaux sont extraits chaque année dont 68% à 85% sont des granulats [74].

Le sable naturel est largement utilisé dans la construction, on estime qu'à chaque seconde 190 m³ de béton sont coulés ; donc 6 milliards de m³/an, ce qui implique l'utilisation d'un peu plus de 5 milliards de tonnes de sable [1].

Le sable naturel est généralement considéré comme abondant, cependant, des recherches récentes ont souligné le risque croissant de pénurie d'approvisionnement dans un certain nombre de régions du monde [75],[76], en effet, les quantités de sable extraites augmentent de façon exponentielle. Jusqu'à tout récemment, le sable était extrait dans les carrières et les rivières ;

mais en raison de l'épuisement des ressources naturelles, une évolution vers l'extraction de granulats marins et côtiers s'est produite. Les effets négatifs sur l'environnement sont sans équivoque et se produisent dans le monde entier. Cette extraction massive a un impact majeur sur l'environnement, en effet, l'extraction du sable à un rythme supérieur à son renouvellement, entraîne la perturbation des écosystèmes côtiers et marins, la perte de terres, l'abaissement ou même la disparition de nappes phréatiques et la diminution de la quantité de sédiments disponibles [77],[78].

Les projets titanesques lancés dans le monde augmentent la consommation du sable (Figure 2.1), comme dans le cas de la construction d'un ensemble d'îles artificielles à Dubaï , ce projet a nécessité pas moins de 385 millions de tonnes de sables, dont une bonne partie a été importé de l'Australie [75].

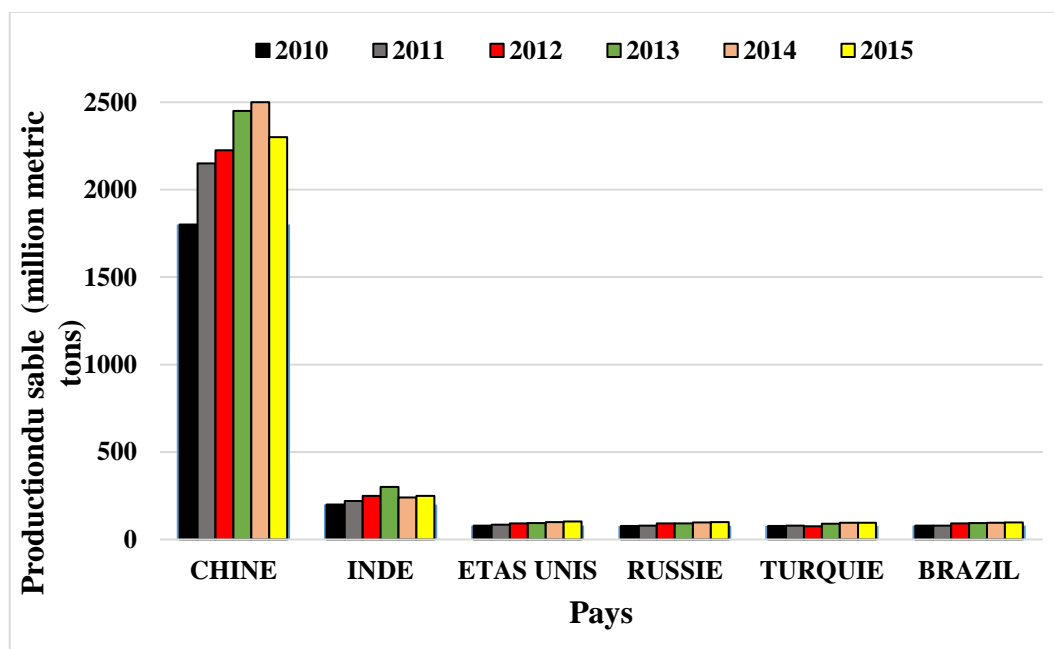


Figure 2.1 : Production du sable dans quelques pays du monde [79].

En Algérie, et vu la croissance démographique et les projets économiques programmés dans le plan de développement du pays, beaucoup de réalisations sont en cours ou en vue d'être réalisées, dont :

- a) La nouvelle ville de Hassi Messaoud, avec vingt mille cinq cents quatre-vingt-quatre (20584) logements.
- b) La nouvelle ville de Sidi Abdellah, avec 90000 logements, 159 équipements publics et 06 pôles d'investissement.
- c) La nouvelle ville de Bouinan, avec 3600 logements, 204 équipements publics, 05 pôles d'investissement.
- d) La nouvelle ville de Boughezoul, avec 70000 logements et 06 pôles d'investissement.
- e) La nouvelle ville d'El Ménéa, avec 10000 logements, un hôpital, une gare routière, un stade, un musée, une bibliothèque, des cinémas et une université [80].

En 2017, la quantité de sable extraite pour le domaine de la construction a été estimé à 1 911 023 m³, et en 2018, elle était de 3 639 122 m³, soit une augmentation de 90.4%.

Morley et al. [79] ont examiné les implications de la demande future du sable d'ici 2030. Leurs résultats indiquent que certains pays comme la Chine et l'Inde seront confrontés à une forte demande de sable, suivi de l'Asie du sud-est et de l'Afrique. Ils estiment que si les taux d'extraction de sable et les pratiques de construction actuels sont maintenus, les pays en développement seront exposés à un risque important d'approvisionnement en sable de construction.

Afin de préserver l'environnement et de limiter l'utilisation des ressources naturelles, des études ont été menés ces dernières années sur l'utilisation des déchets en en les recyclant en matériaux susceptibles d'être utilisés dans la dans la confection des bétons ordinaires [11]–[13] ou les bétons autoplaçants [14]–[16], en tant que substitution du ciment [13], [17], [54] ou substitution des agrégats [18], [19].

2.2. Valorisation des déchets

Le recyclage des déchets et leurs utilisations dans la confection du béton est une approche innovante et respectueuse de l'environnement, elle permet de détourner les déchets des décharges en les transformant en poudre en remplacement du ciment, en agrégats en remplacement du sable ou des graviers ou en ajout, ceci afin de préserver les ressources naturelles et de réduire l'empreinte carbone de l'industrie de la construction [7], [81]–[83].

Ainsi, des études sur l'utilisation de la fumée de silice, des cendres volantes ou bien du verre ont été menés afin de déterminer si leurs effets sont bénéfiques sur les paramètres liés à la résistance et à la durabilité. Wongkeo et al. [84] ont utilisé la fumée de silice et les cendres volantes comme substitution du ciment, les essais de la résistance à la compression n'étaient pas probants pour les bétons à base de cendres volantes (Figure 2.2). Par contre, les valeurs de la résistance à la compression pour les bétons à base de fumée de silice étaient équivalentes ou supérieures aux valeurs de la résistance à la compression du mortier de référence (Figure 2.3)

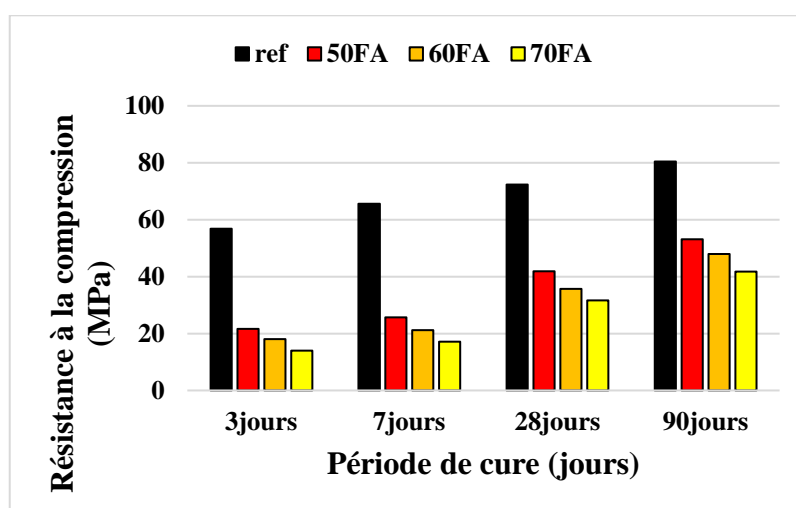


Figure 2.2 : Effet de la cendre volante sur la résistance à la compression [84].

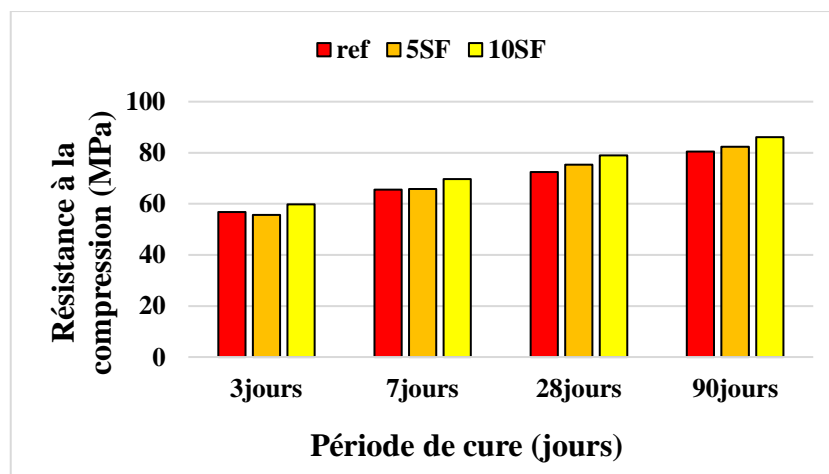


Figure 2.3 : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression [84].

L'utilisation des cendres volantes et de la fumée de silice a été étudié aussi par Benli et al. [85], en effet ils ont soumis des mortiers confectionnés à base de fumée de silice et de cendres volantes à 3 environnement différents : l'eau de robinet, l'eau de mer et une solution de $MgSO_4$.

Ils ont remarqué que dans le cas de la solution de $MgSO_4$ et de l'eau de mer, les échantillons à base de 10% de cendres volantes donnaient des résultats de la résistance à la compression assez comparables avec les échantillons de référence. Dans le cas où la solution utilisé est l'eau de robinet, les résultats de la résistance à la compression sont légèrement en dessous ou comparables avec les échantillons de référence.

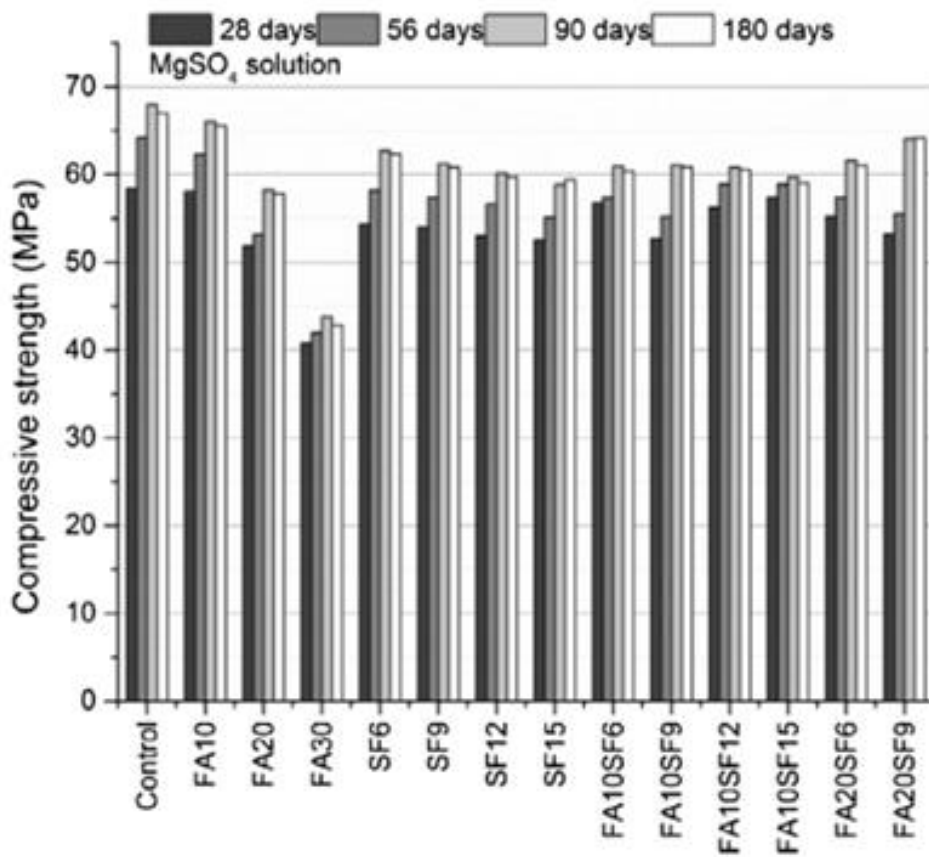


Figure 2.4 : Résistance à la compression des échantillons soumis à une solution de $MgSO_4$ [85].

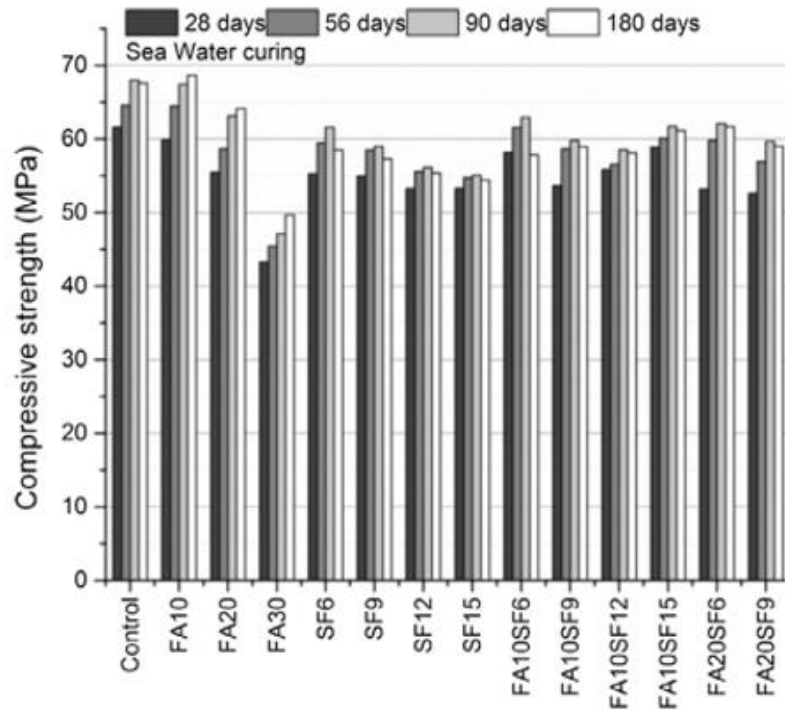


Figure 2.5 : Résistance à la compression des échantillons soumis à l'eau de mer [85].

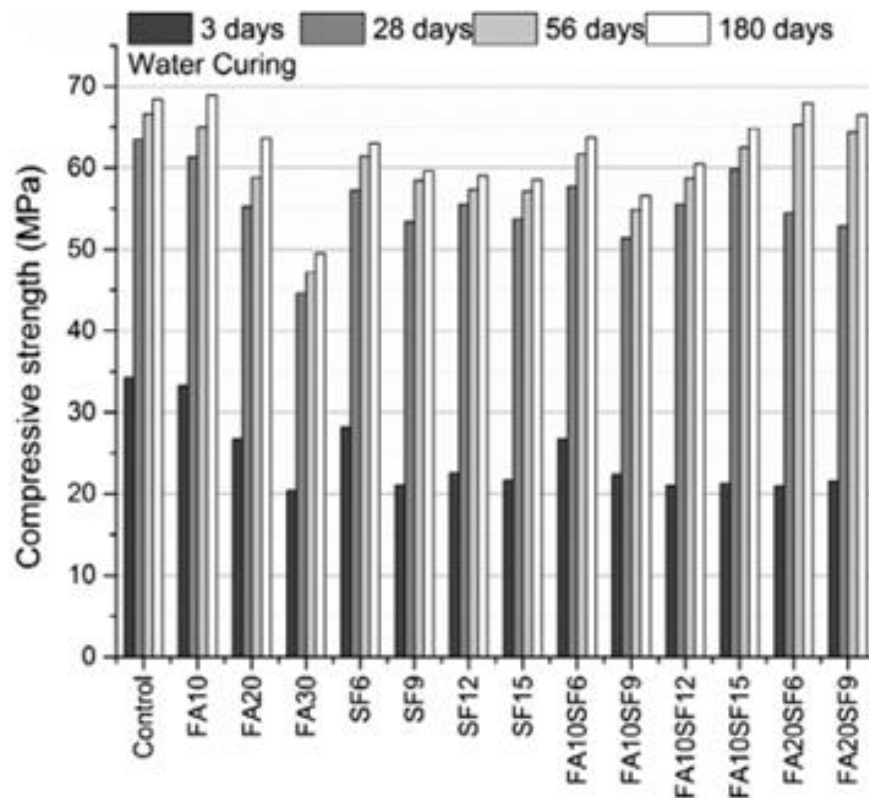


Figure 2.6 : Résistance à la compression des échantillons soumis à l'eau de robinet [85].

En ce qui concerne la résistance à la flexion, les résultats donnés dans le cas de l'utilisation de l'eau de robinet sont en dessous des résultats donnés par les échantillons de référence. Dans le cas de l'eau de mer et des sulfates, les résultats sont comparables ou supérieurs aux résultats donnés par les échantillons de référence sauf dans le cas des échantillons avec 30% de cendres volantes.

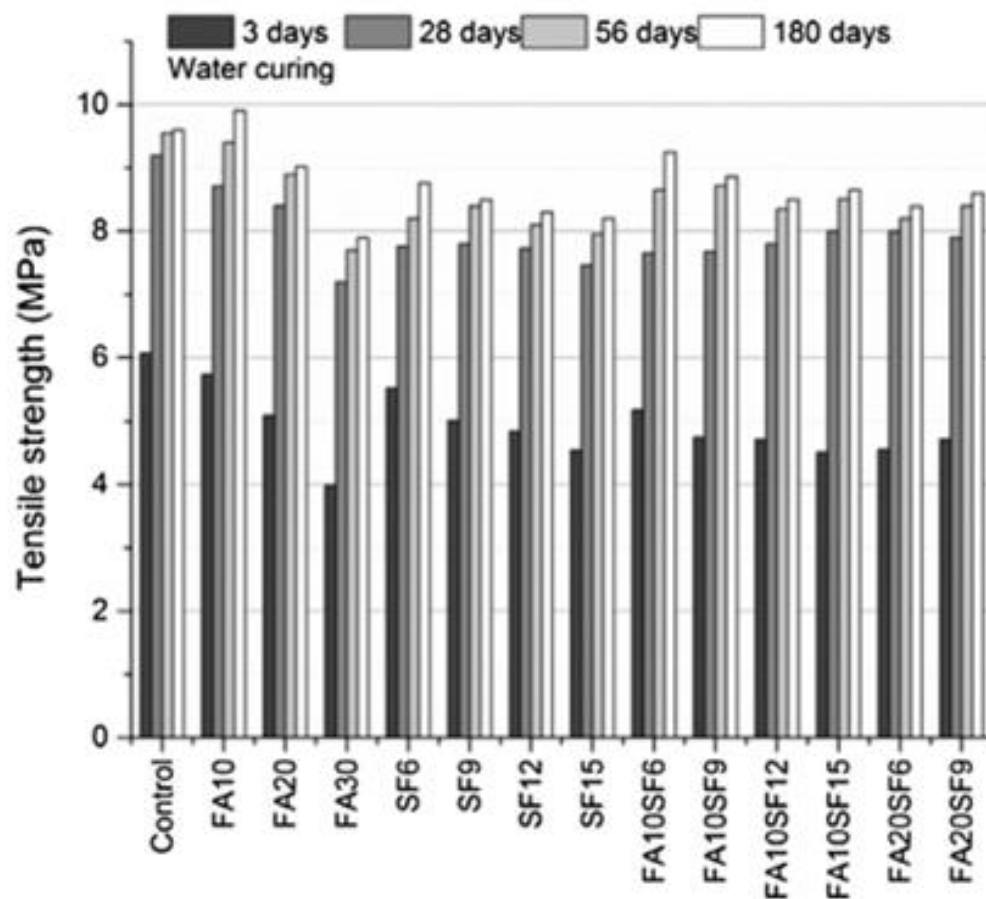


Figure 2.7 : Résistance à la flexion des échantillons soumis à l'eau de robinet [85].

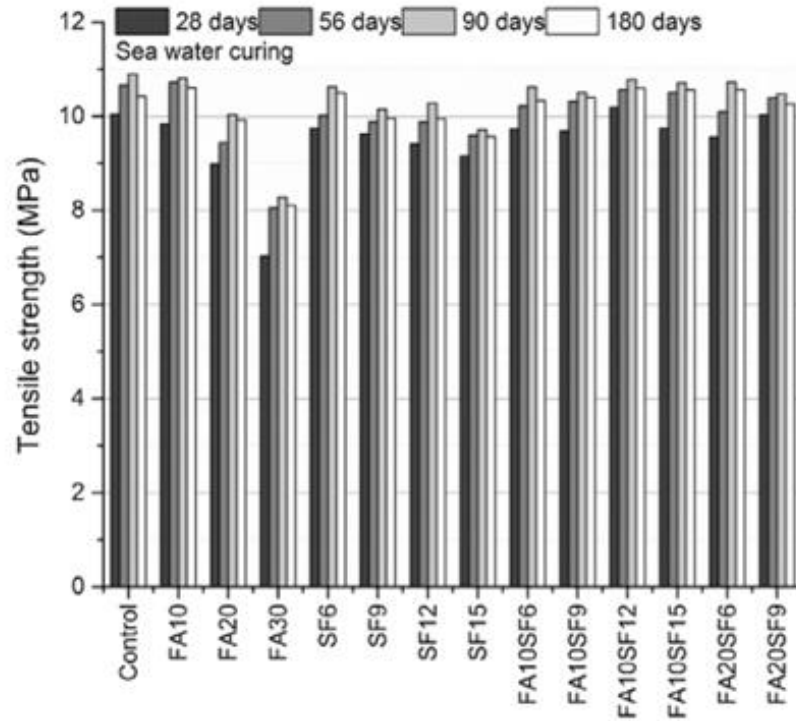


Figure 2.8 : Résistance à la flexion des échantillons soumis à l'eau de mer [85].

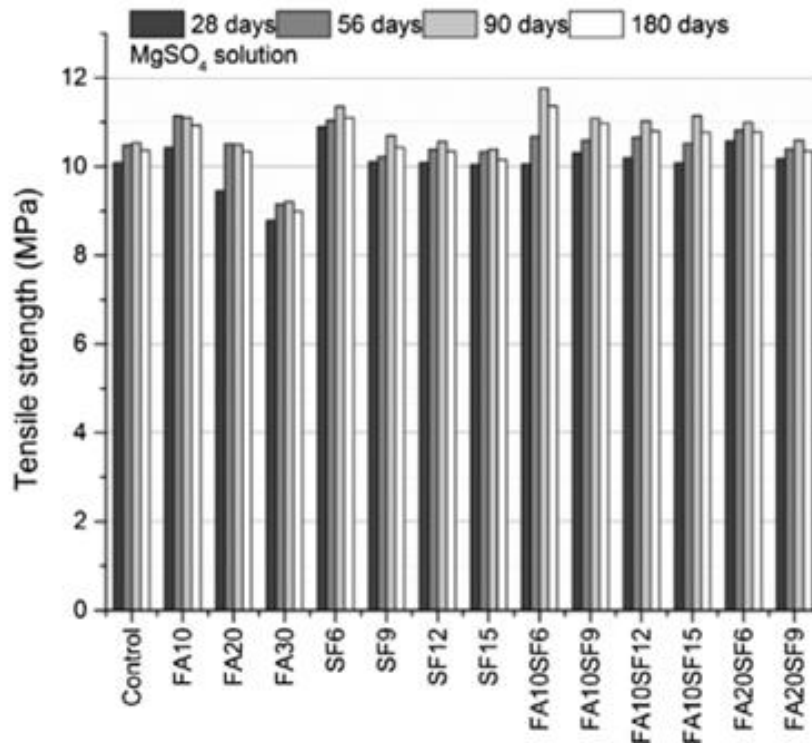


Figure 2.9 : Résistance à la flexion des échantillons soumis à une solution de MgSO₄ [85].

Penacho et al. [4] ont étudié la performance des mortiers à base de déchets de verre utilisés en tant qu'agrégats, ils ont remarqué une amélioration de la résistance à la compression et à la flexion pour un taux de substitution de 50% (Figure 2.10 et 2.11).

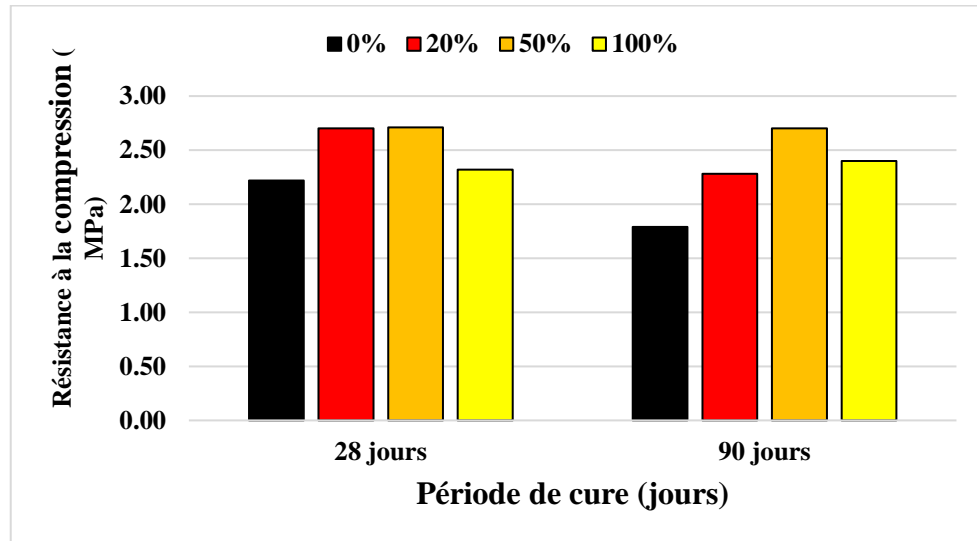


Figure 2.10 : Résistance à la compression de mortiers à base de déchets de verre [4].

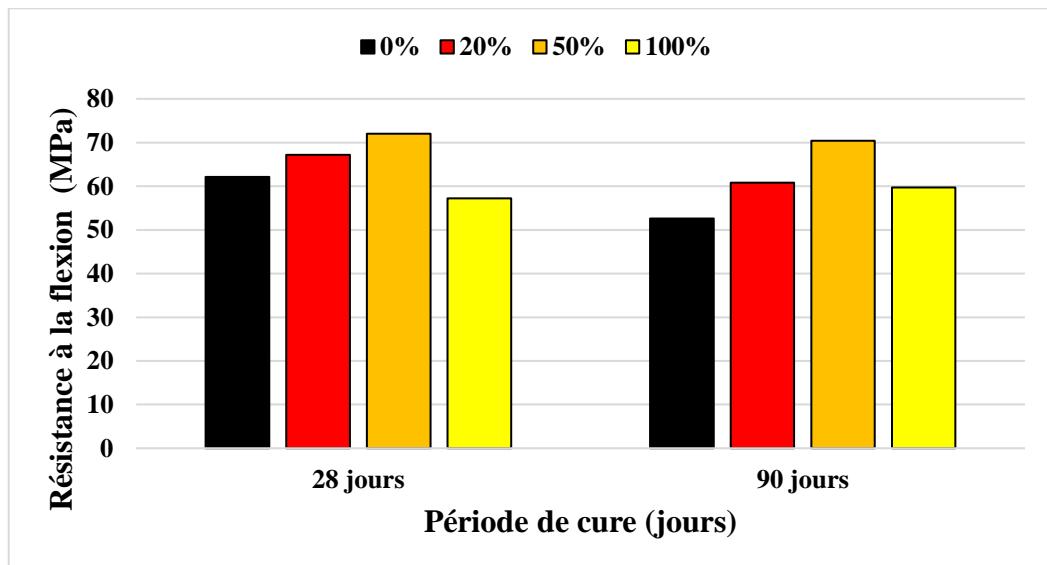


Figure 2.11 : Résistance à la flexion de mortiers à base de déchets de verre [4].

Nasr et al. [5] ont étudié les propriétés des mortiers à base de matériaux recyclés de différentes sources, ils ont étudié en premier lieu la substitution du ciment par la poudre de marbre, de granite de porcelaine et de la brique à des taux de 5%, 10% et 15%. En deuxième lieu, ils ont étudié le remplacement des agrégats naturels par du marbre, du granite et de la porcelaine à un taux de 100%.

En comparant les différents mortiers avec le mortier de référence, ils ont constaté que l'ouvrabilité des mortiers à base de poudre de marbre (M) et de poudre de porcelaine (P) augmentait, celle des mortiers à base de poudre de granite (G) était constante et celle des mortiers à base de poudre de brique (B) diminuait (Figure 2.12).

Pour la résistance à la compression et à la flexion, tous les mortiers dont le ciment a été substitué par des déchets présentaient une diminution par rapport au mortier de référence (Figures 2.13 et 2.14).

Concernant les mortiers à base d'agrégats recyclés, les résultats d'ouvrabilité des mortiers à base d'agrégats de marbre (MA) montrent une augmentation de 5%, alors que les mortiers à base d'agrégats de granite (GA) et de porcelaine (PA) montrent une diminution de 13% et de 49% respectivement. Ils ont remarqué une augmentation de la résistance pour tous les mortiers à base de sable recyclé.

La porosité présentait des résultats pratiquement similaires pour tous les mortiers sauf pour le mortier à 10% de substitution du ciment par la poudre de marbre (Figure 2.15).

Nasr et al. [5] ont conclu que le remplacement du sable par le sable de marbre, de granite et de porcelaine donnait de meilleurs résultats que le remplacement du ciment par la poudre de marbre, de granite, de porcelaine et de brique.

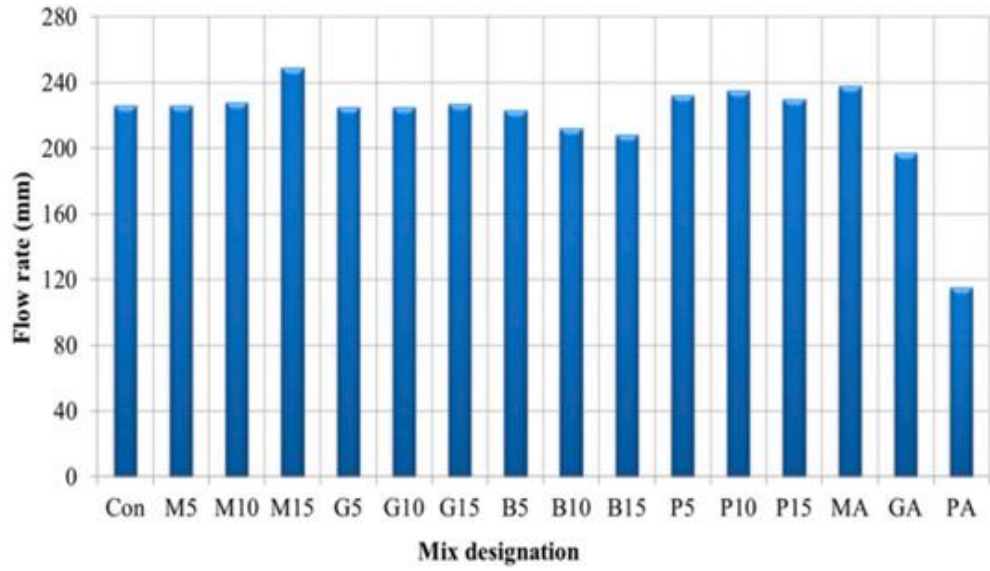


Figure 2.12 : Résultats de l'ouvrabilité pour les différents mortiers [5].

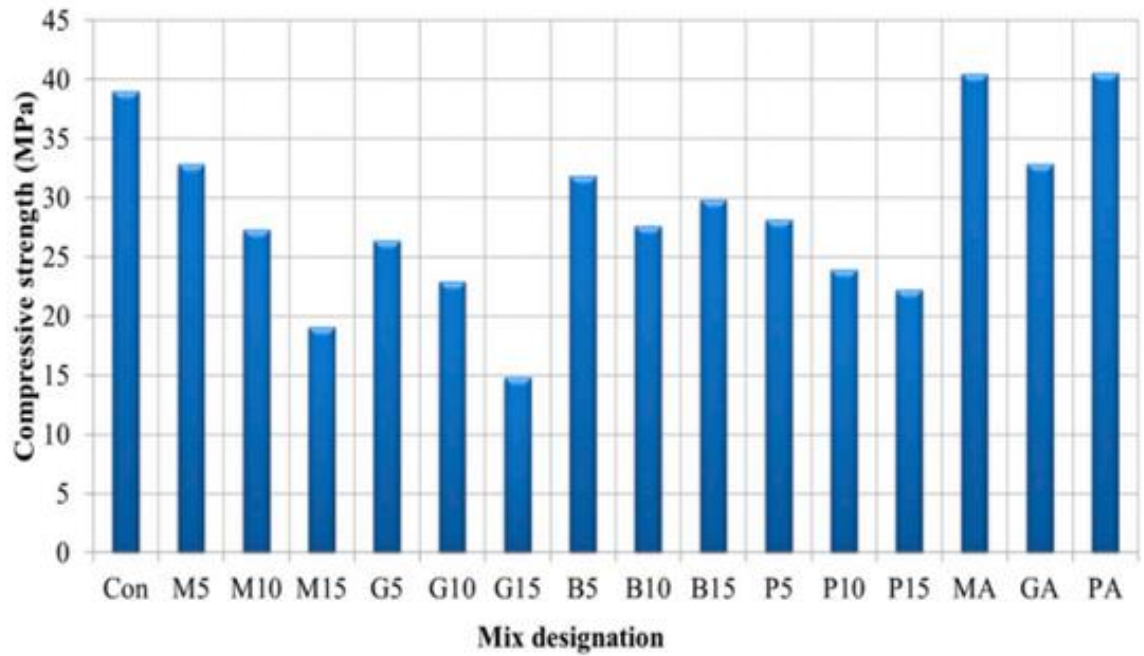


Figure 2.13 : Résultats de résistance à la compression pour les différents mortiers [5].

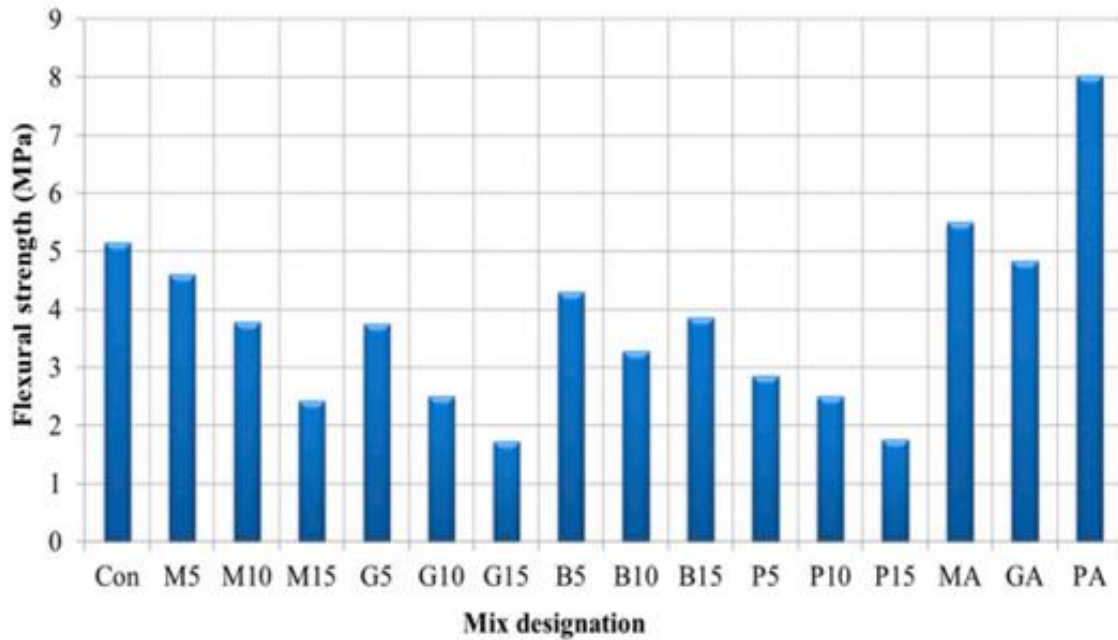


Figure 2.14 : Résultats de la résistance à la flexion pour les différents mortiers [5].

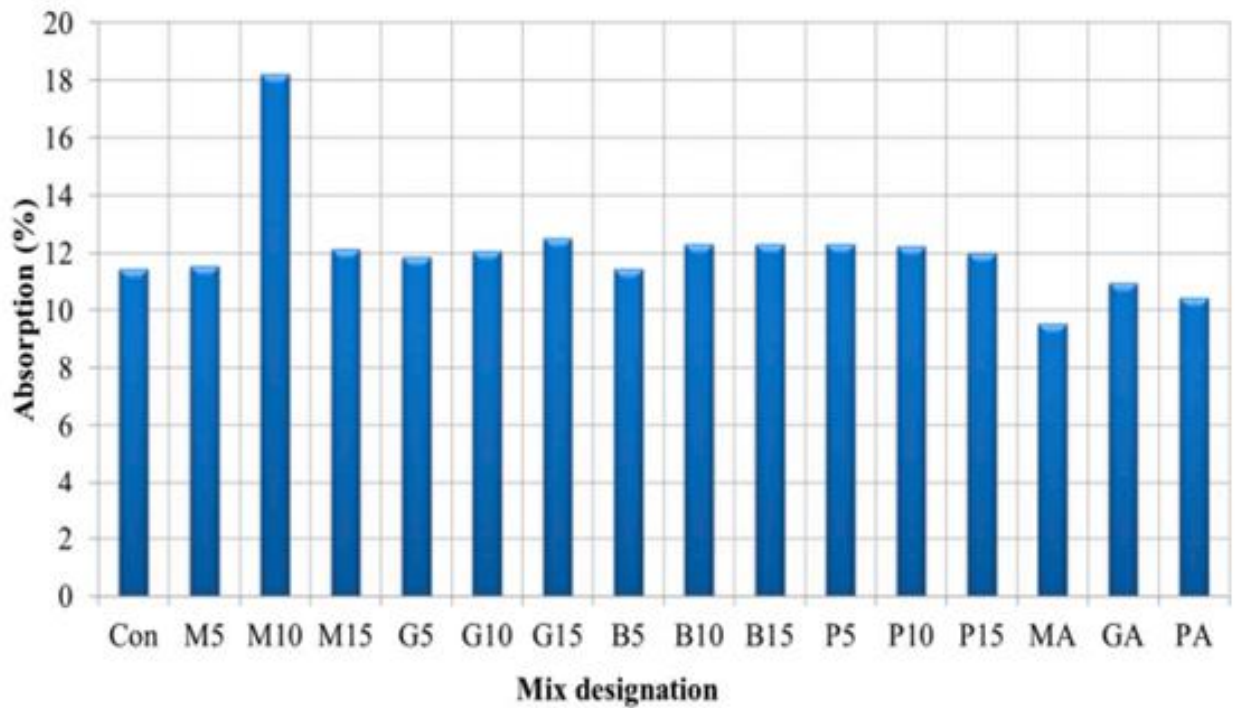


Figure 2.15 : Résultats de l'absorption pour les différents mortiers [5].

Hormis l'utilisation des déchets comme remplacement du ciment ou du sable, ces derniers peuvent être utilisés en remplacement du gravier, comme c'est le cas de l'étude menée par Abdul Basit et al. [86].

En étudiant la résistance du béton formulé à partir de trois différents graviers recyclés, ils ont remarqué que l'utilisation des déchets de béton en tant que graviers présentait de meilleurs résultats que l'utilisation des déchets de brique.

D'autres recherches ont été menées sur l'utilisation des déchets comme substitut du ciment, du sable ou du gravier, comme les déchets de brique [66], les déchets des fonderies [87], le granite [88] ou les déchets de verre [89].

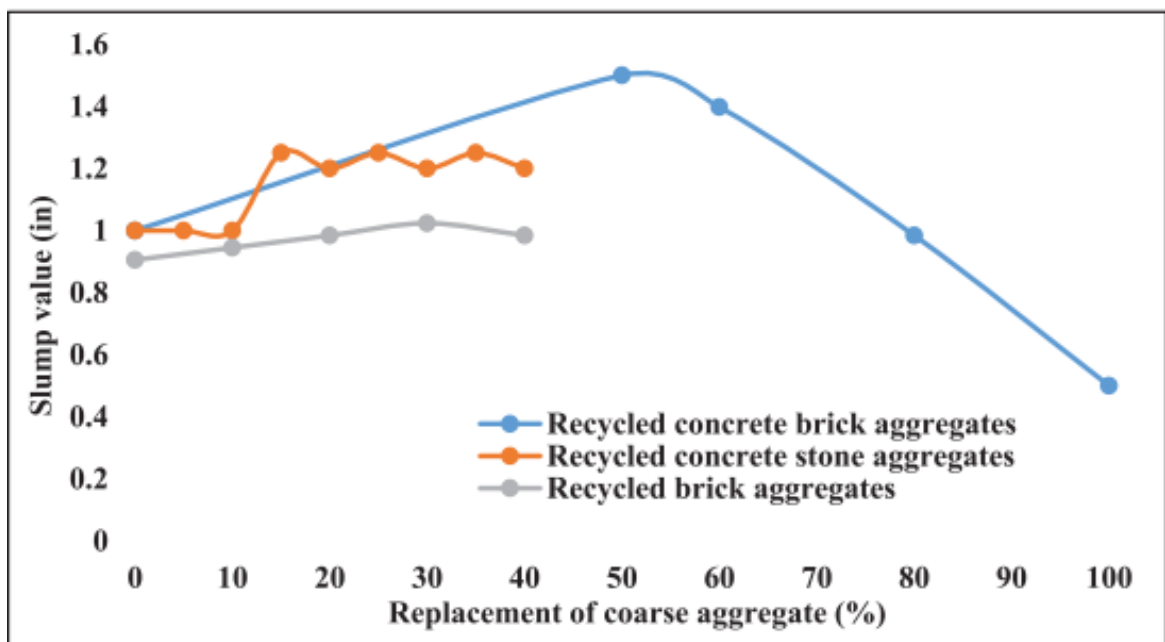
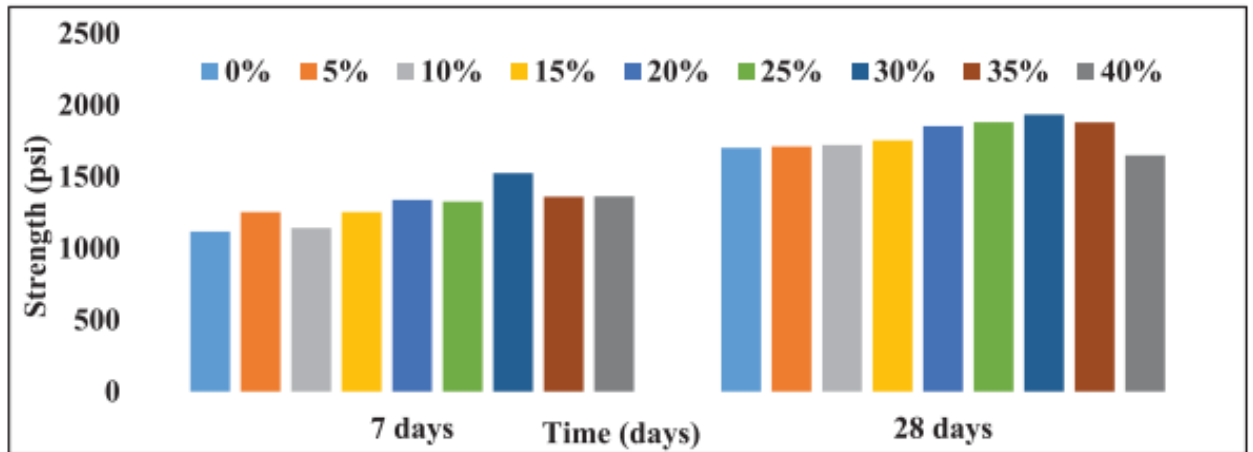
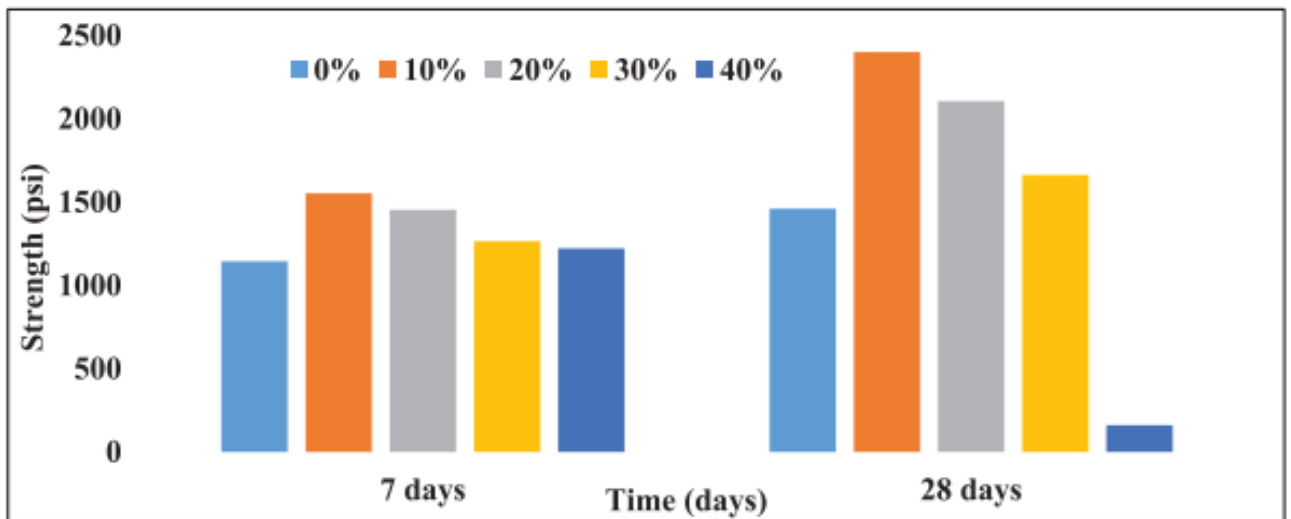


Figure 2.16 : Résultats d'étalements des différents mélanges [86].



(a)

Figure 2.17 : Résistance à la compression des bétons à base d'agrégats issus des pierres [86].



(b)

Figure 2.18 : Résistance à la compression des bétons à base d'agrégats issus des déchets de brique [86].

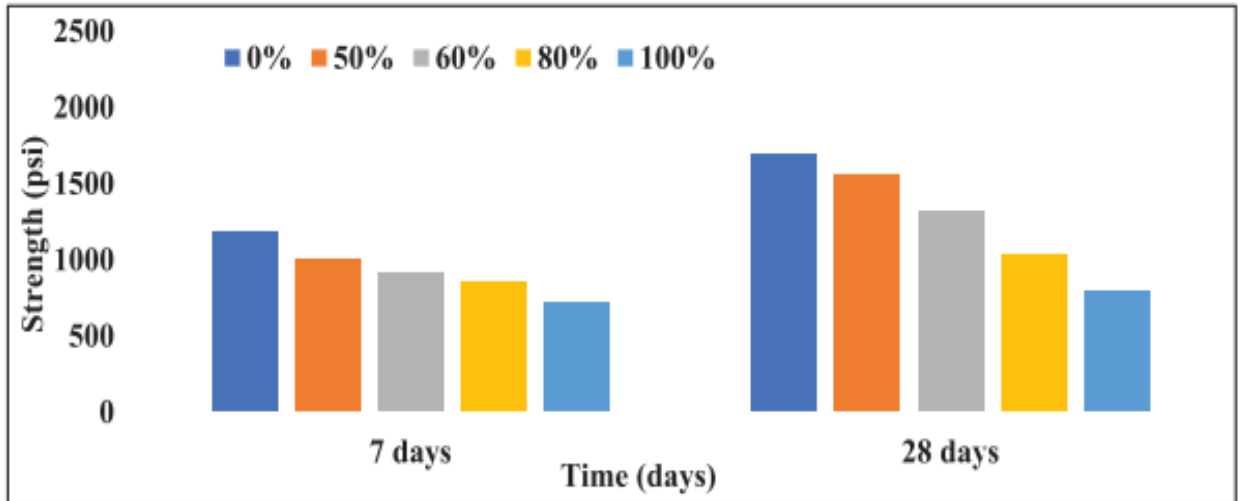


Figure 2.19 : Résistance à la compression des bétons à base d'agrégats issus des déchets de béton de démolition [86].

2.3. Marbre

Le marbre est une pierre métamorphique, c'est un calcaire ou une dolomie, qui a été recristallisé par la chaleur et la pression. On parle de marbre calcitique dans le cas où il est composé exclusivement de calcite (CaCO_3) et ce sera un marbre dolomitique s'il est de composition dolomitique (CaMgCO_3).

La réalisation des premiers objets en marbre remonte à l'ère néolithique. Actuellement, il est exploité de façon intensive dans certains pays comme la chine, la Turquie, et la Tunisie. En Algérie, les carrières étaient déjà exploitées pendant le colonialisme, Après l'indépendance, l'exploitation des carrières a commencé à connaitre des pics à partir de 1983 (Figure 2.20).

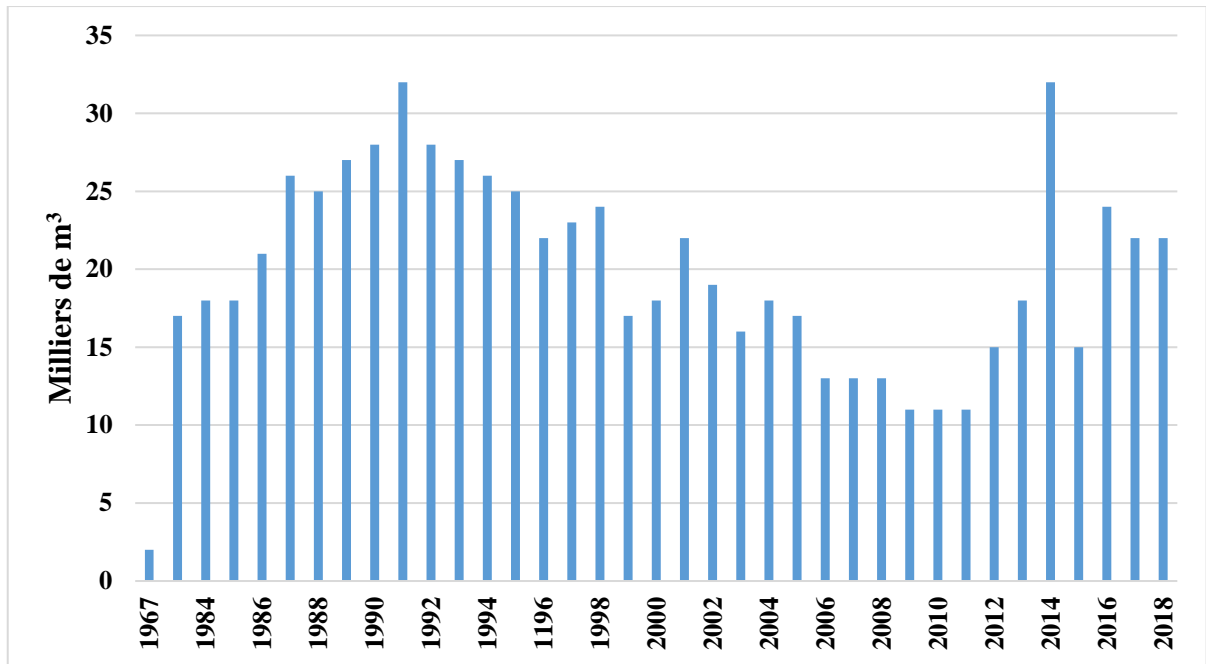


Figure 2.20 : Production du marbre en Algérie [90],[91].

La production du marbre a connu une évolution irrégulière ces dernières décennies, son extraction peut générer une quantité importante de déchets dus au sciage et tranchage dans les carrières, en plus des déchets accumulés par la transformation du marbre en produits finis [7]. Ces déchets sont certes inertes mais leur accumulation nuit à l'environnement, ce qui nécessite leur recyclage qui sera bénéfique sur le plan écologique et économique à long terme.

Afin d'apporter une solution à ce problème, les chercheurs se sont intéressés à l'utilisation des déchets de marbre en tant que substitution du ciment [13], [17] ou substitution des agrégats [18],[19], dans la confection des bétons ordinaires [7], [11]–[13] ou autoplaçants [14]–[16]. Ils se sont intéressés à l'influence sur le béton à l'état frais et durci ainsi qu'à certains paramètres liés à la durabilité.

2.3.1. Influence du marbre sur le béton à l'état frais

L'ouvrabilité du béton est un paramètre important, elle caractérise la capacité du béton à se mettre en place facilement. D'après les travaux de Singh et al. [88], l'ouvrabilité diminue en fonction du taux de substitution du sable par le marbre, ils ont remarqué qu'à 40% de substitution du sable par le marbre, le béton perdait son ouvrabilité et ne pouvait être mixé

correctement, des résultats similaires ont été reportés par Hebhoub et al. [7], que ce soit en utilisant le marbre en remplacement du sable, ou en l'utilisant comme remplacement du gravier ou le mélange des deux (Figure 2.21).

Binici et al. [35] ont remarqué une perte d'ouvrabilité importante 1heure après le mélange du béton, estimé à 46%. Selon Singh et al. [88], un ajustement du rapport eau/liant selon la proportion du sable remplacé par la marbre est nécessaire pour garder une ouvrabilité dans les limites normatives. Gencel et al. [92] estiment qu'on plus de l'ajustement du rapport eau/liant, l'utilisation d'un superplastifiant permet de corriger ce problème.

La quantité d'air emprisonnée dans le béton ou le mortier pendant le malaxage est un paramètre tout aussi important que l'ouvrabilité. L'influence du marbre sur la teneur en air a été étudiée par certains chercheurs avec des résultats des fois contradictoires.

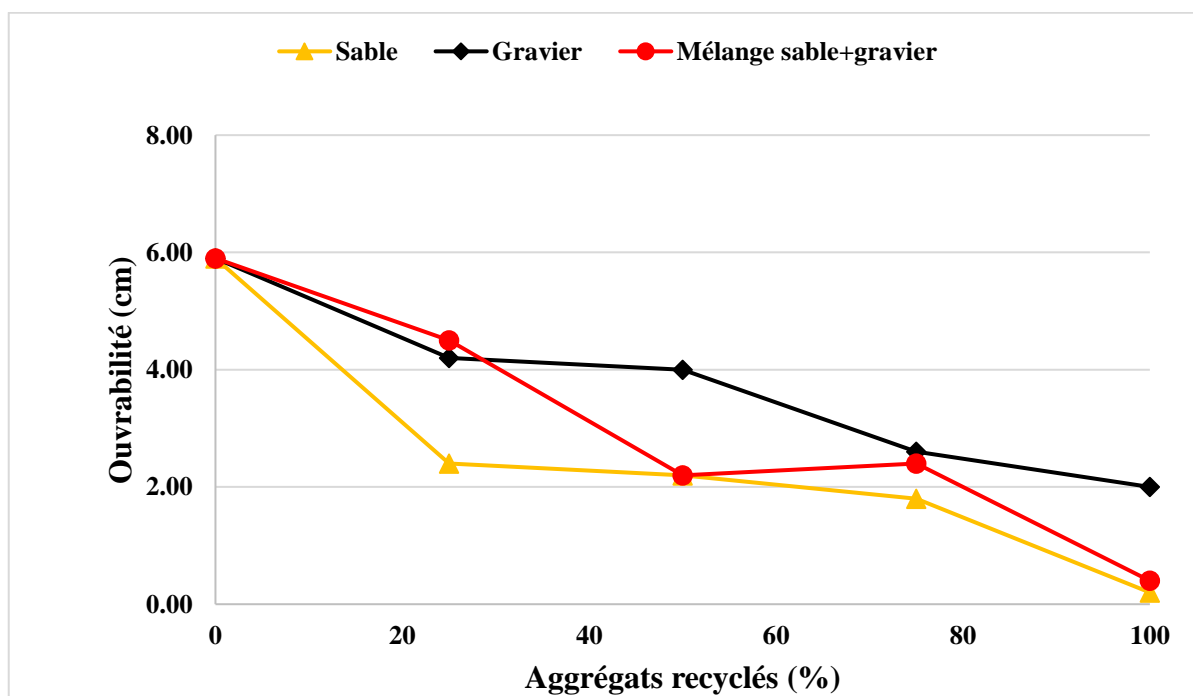


Figure 2.21 : Résultats d'ouvrabilité du béton en fonction du taux de substitution [7].

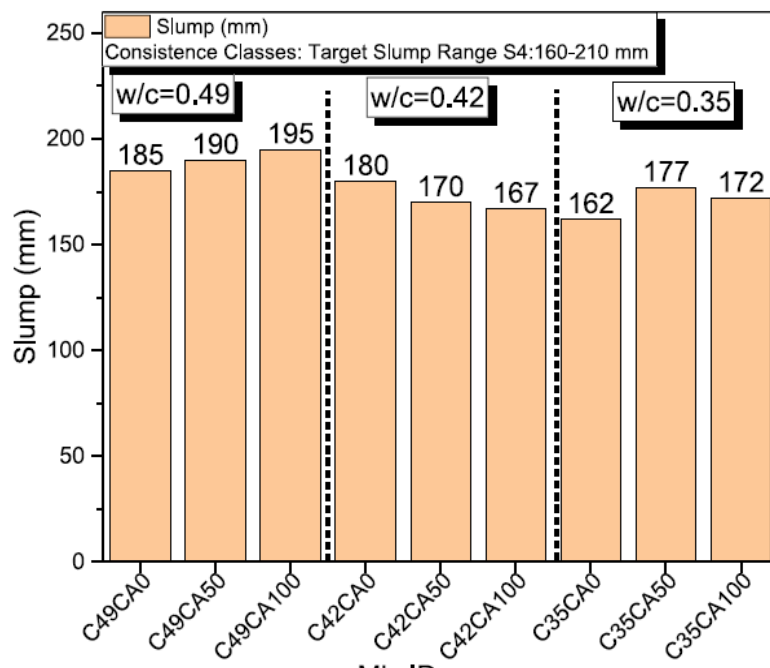
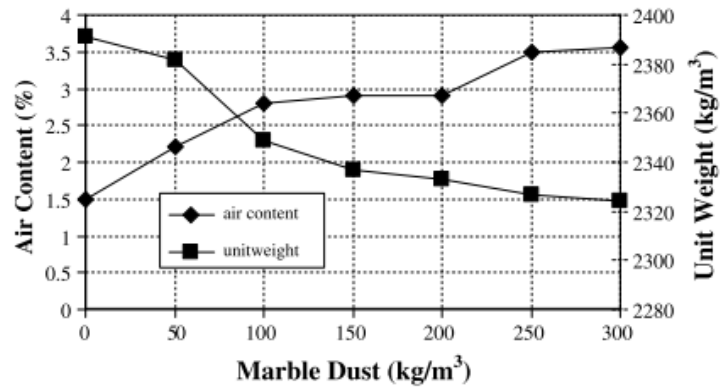


Figure 2.22 : Résultats de l'ouvrabilité pour différents rapports E/C [92].

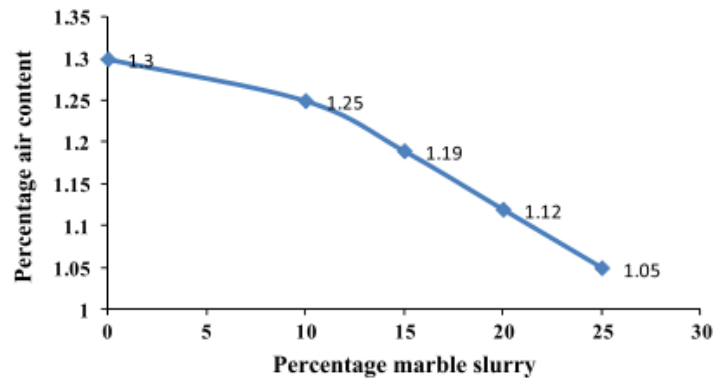
Topcu et al. [93] ont constaté une augmentation du pourcentage de l'air occlus en fonction de l'augmentation du taux de marbre (Figure 2.23 (a)), alors que Singh et al. [94] ont constaté une diminution de l'air occlus (Figure 2.23 (b)), les deux ayant utilisés la poudre de marbre comme substitut du ciment.

Hebhoub et al. [7], qui ont utilisé les déchets de marbre comme substitut du sable et du gravier, ont remarqué une diminution de l'air occlus pour un taux de substitution en dessous de 75% (Figure 2.23 (c)).

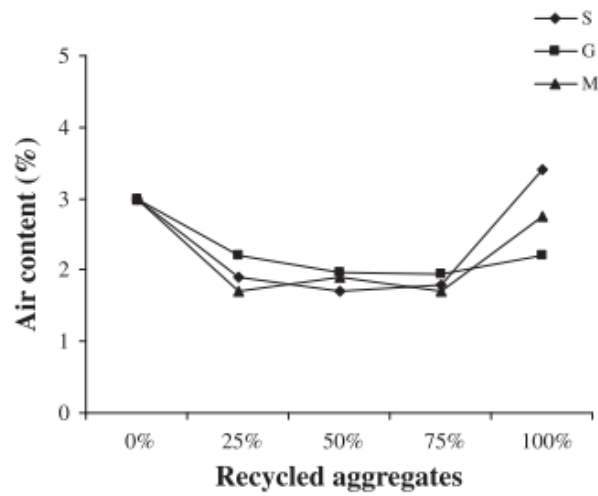
Singh et al. [94] ont examiné deux échantillons sous le MEB, le premier ne contenant pas de marbre et le deuxième contenant 15% de marbre, ils ont remarqué que la structure de l'échantillon contenant du marbre était plus dense et présentait moins de vides que l'échantillon sans marbre.



(a) [93]



(b) [94]



(c) [7]

Figure 2.23 : Effets des déchets de marbre sur la teneur en air.

2.3.2. Influence du marbre sur la résistance

Les récentes recherches sur l'utilisation des déchets de marbre dans la confection des bétons et des mortiers montrent qu'il a un effet positif sur la résistance que ce soit en l'utilisant comme ciment [15], [94], [95], ou comme agrégats [11], [88], [96]–[98]. D'après Baga et Senol [99], la résistance augmente avec l'augmentation du taux de marbre dans le béton, selon Essam et al. [100], l'utilisation du marbre comme substitut du ciment permet d'avoir des valeurs optimales à des taux de substitution ne dépassant pas 10%.

Kabeer et Vyas [96] ont substitué le sable avec le marbre à des taux variant de 0 à 100%, ils ont étudié plusieurs paramètres, dont l'absorption capillaire, la porosité et la résistance à la compression. Ils ont remarqué que la résistance à la compression à 28 jours était optimale à 20% de substitution, ceci pour différents rapports ciment : sable (Figure 2.24). Hebhoub et al. [7] ont remarqué qu'à 90 jours, la résistance présentait les meilleurs résultats à 90% du taux de substitution du taux de marbre (Figure 2.25).

D'après l'étude bibliographique de Tunc [101] qui a comparé les résultats de plusieurs travaux (Figures 2.26 et 2.27), il serait plus avantageux d'utiliser les déchets de marbre en tant que sable que de les utiliser en tant que ciment.

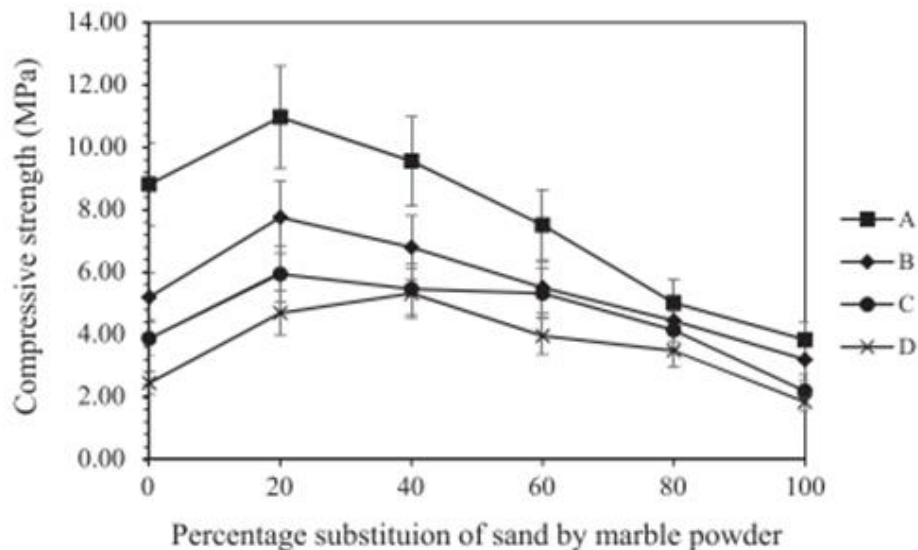


Figure 2.24 : Valeurs de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du taux de marbre [96].

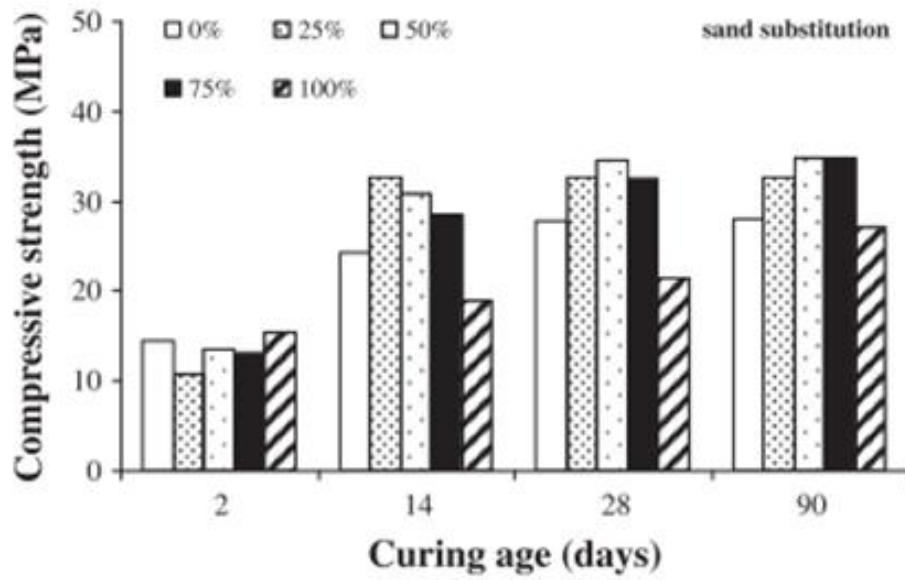


Figure 2.25 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre et de la période de cure [7].

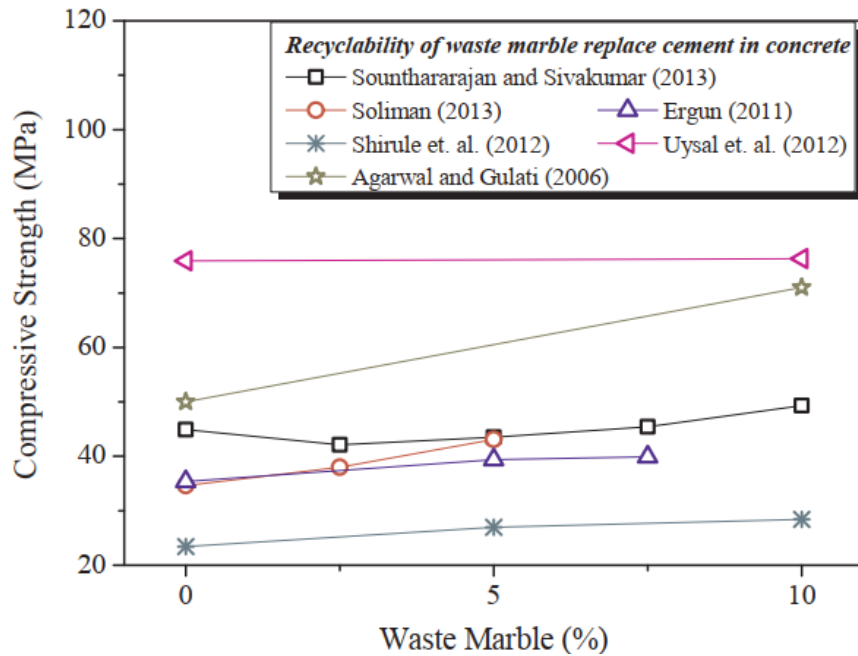


Figure 2.26 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre utilisé comme substitut du ciment [101].

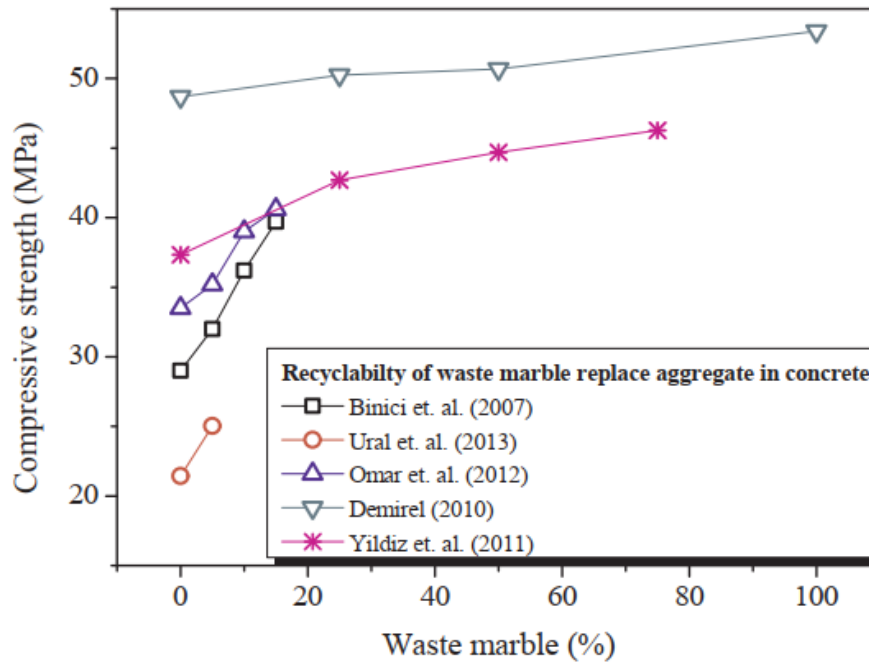


Figure 2.27 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre utilisé comme substitut du sable [101].

Selon Gameiro et al. [11], l'incorporation du marbre en tant que gravier est bénéfique à certains paramètres liés à la durabilité, et même si ça n'apporte pas beaucoup d'amélioration, ça n'altère pas les propriétés du béton.

Pour Demirel [97], les déchets de marbre utilisés comme substitution du sable améliorent nettement la résistance à la compression.

En ce qui concerne la résistance à la flexion, l'utilisation des déchets de marbre comme substitut du ciment ou des agrégats a un impact positif dans l'amélioration de la résistance à certains taux de substitution [17], [73], [94], [102]. .

Sadek [36] a étudié l'effet de la substitution du ciment par certains éléments dont le marbre, il a remarqué une diminution de la résistance au-delà de 10% de substitution sans toutefois être en dessous de la valeur de référence (Figure 2.28).

D'après Singh [94], la résistance à la flexion maximale est obtenue à un taux de substitution de 15%, toutefois, il a remarqué qu'en augmentant le rapport E/C de 0.35 à 0.45, une diminution de la résistance est constaté (Figures 2.29 et 2.30).

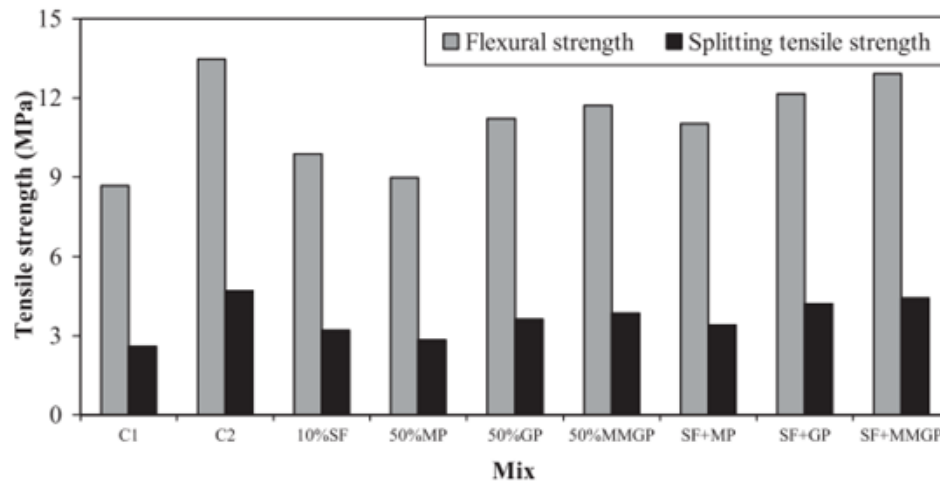


Figure 2.28 : Résistance à la flexion à 28 jours des échantillons de différentes compositions [73].

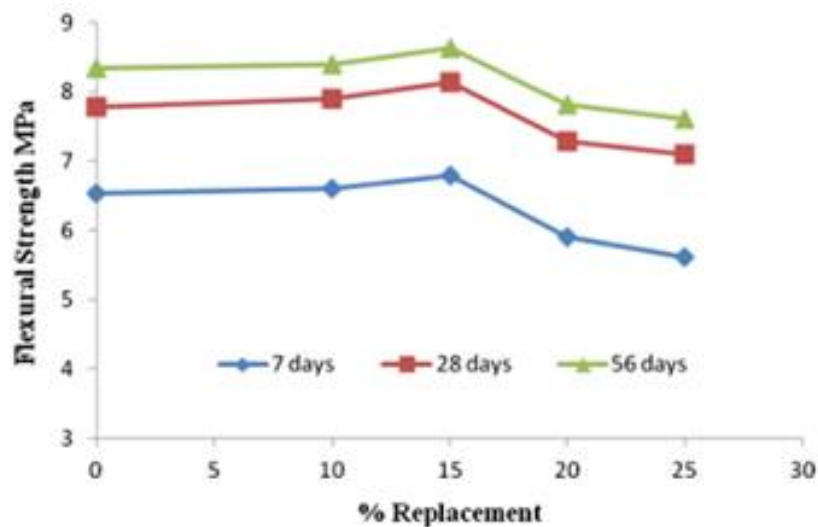


Figure 2.29 : Résistance à la flexion en fonction du taux de substitution du marbre (E/C=0.35) [94].

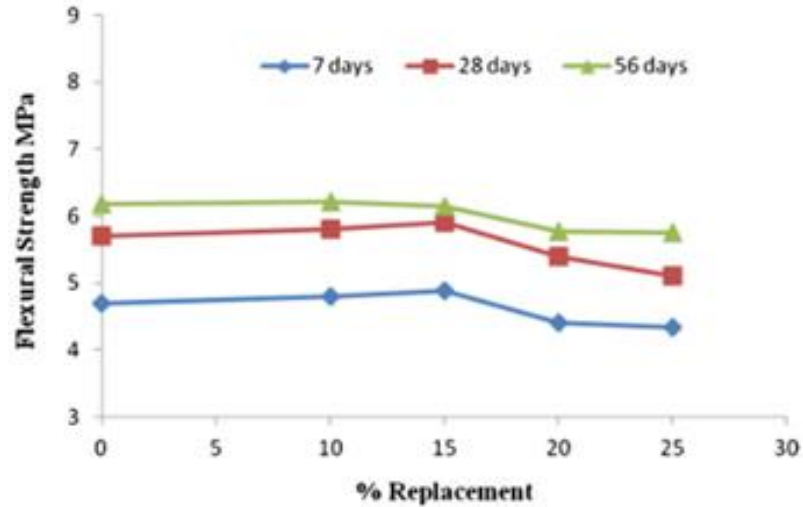


Figure 2.30 : Résistance à la flexion en fonction du taux de substitution du marbre (E/C=0.45) [94].

Varadharajan [102] a utilisé les déchets de marbre comme substitut du sable, il a remarqué que la résistance augmentait avec le taux de substitution. A un taux de substitution de 30% une augmentation de 30% est constaté (Figure 2.31).

D'après Ahmadi et al.[103] , même si les meilleurs résultats étaient obtenus à un taux de substitution de 20%, les échantillons à 40% de marbre donnaient des résultats de la résistance à la flexion supérieures aux échantillons de référence (Figure 2.32).

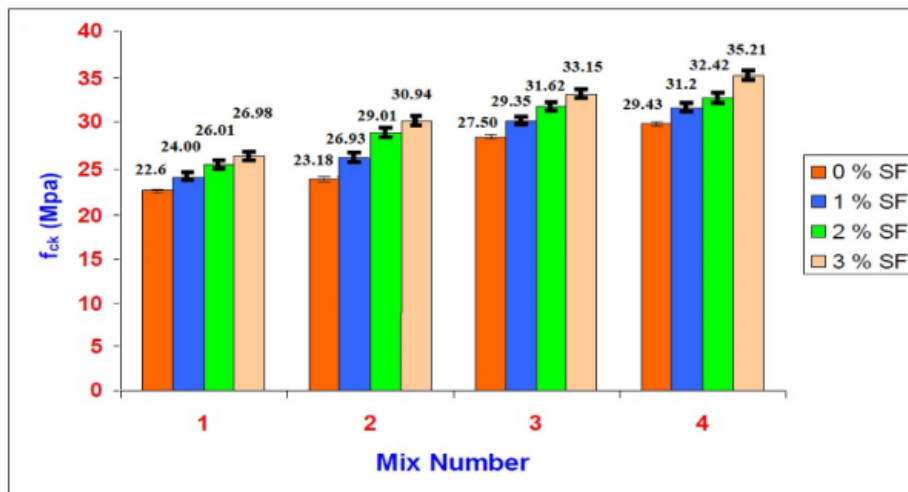


Figure 2.31 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du taux de marbre et du taux de fibres d'acier [102].

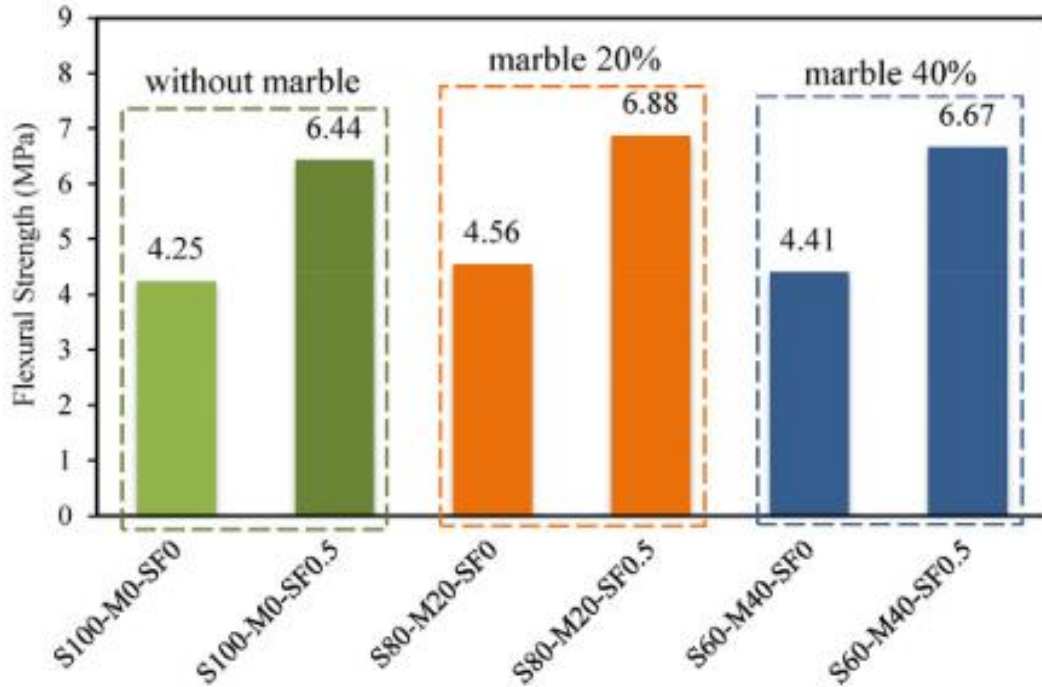


Figure 2.32 : Résultats de l'essai de flexion [103].

2.3.3. Influence du marbre sur la durabilité

L'étude de la durabilité est aussi importante que l'étude de la résistance, les deux paramètres étant intrinsèquement liés. La durabilité est liée à des paramètres dont l'absorption, la porosité, la résistance aux attaques d'éléments agressifs. Les différentes études menées sur les bétons à base de marbre ont montré dans la plupart des cas une amélioration de la durabilité [102], [104]–[106].

Gameiro et al. [11] ont étudié l'absorption capillaire d'éprouvettes de béton à base de sable issus de différentes sources dont le marbre, ils ont remarqué une diminution de l'absorption capillaire pour un taux de substitution de 20%, au-delà, l'absorption capillaire augmente (Figure 2.33).

D'après Varadharajan [102], l'incorporation du marbre en tant que sable permet de réduire la sorptivité et la porosité même à des taux de substitution de 30% (Figures 2.34 et 2.35).

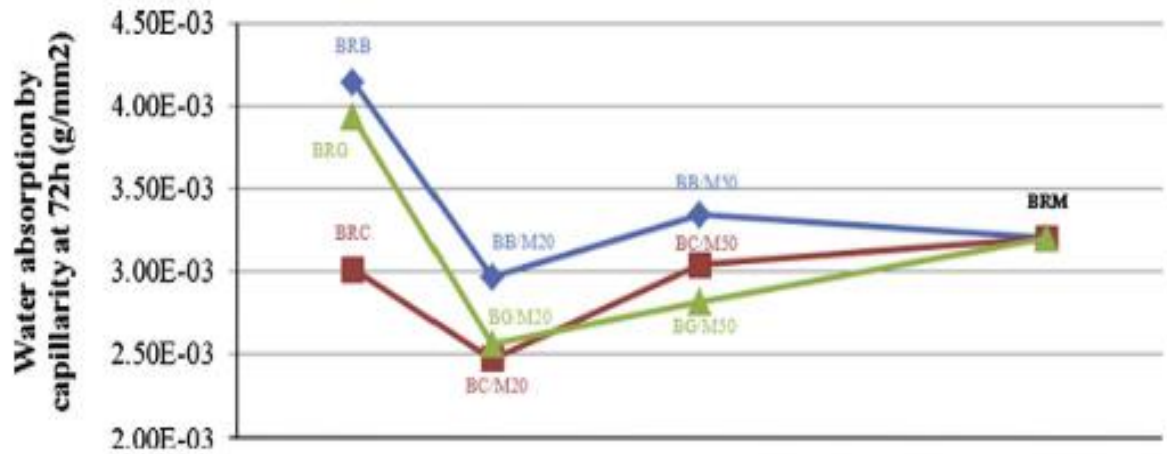


Figure 2.33 : Evolution de l'absorption capillaire d'éprouvettes de béton de différentes compositions [11].

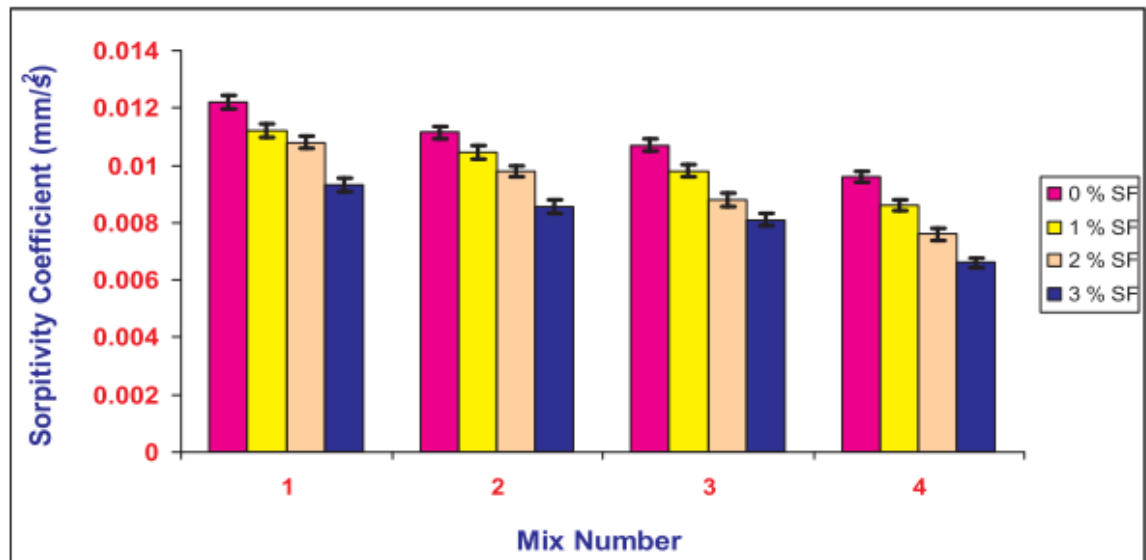


Figure 2.34 : Diminution de la sorptivité en fonction du taux de marbre [102].

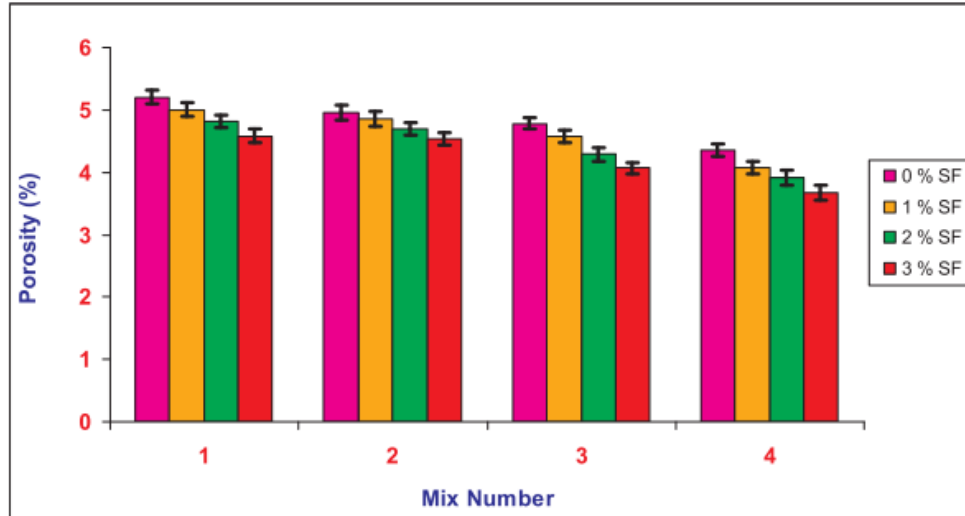


Figure 2.35 : Diminution de la porosité en fonction du taux de marbre [102].

Selon Singh et al. [88] et Vaidevi et al [104]., la perméabilité du béton diminue avec l'augmentation du taux de substitution, Singh et al. [88] ont remarqué qu'au-delà de 30% la perméabilité se stabilise (Figure 2.36).

Boukhelkhal et al. [15] ont étudié le comportement des mortiers à base de déchets de marbre vis à vis des attaques sulfatiques, ils ont remarqué une diminution de l'expansion à fur et à mesure que la teneur en marbre augmente. Cette diminution est de 40% à 20% de substitution (Figure 2.37).

Binici et Aksogan [35] ont placé des mortiers dans une solution de $MgSO_4$ ou le sable fin était substitué avec un taux de 0 à 100%, ils ont remarqué que les mortiers à base de sable de marbre montraient une meilleure résistance à la compression que les mortiers de référence (Figure 2.38).

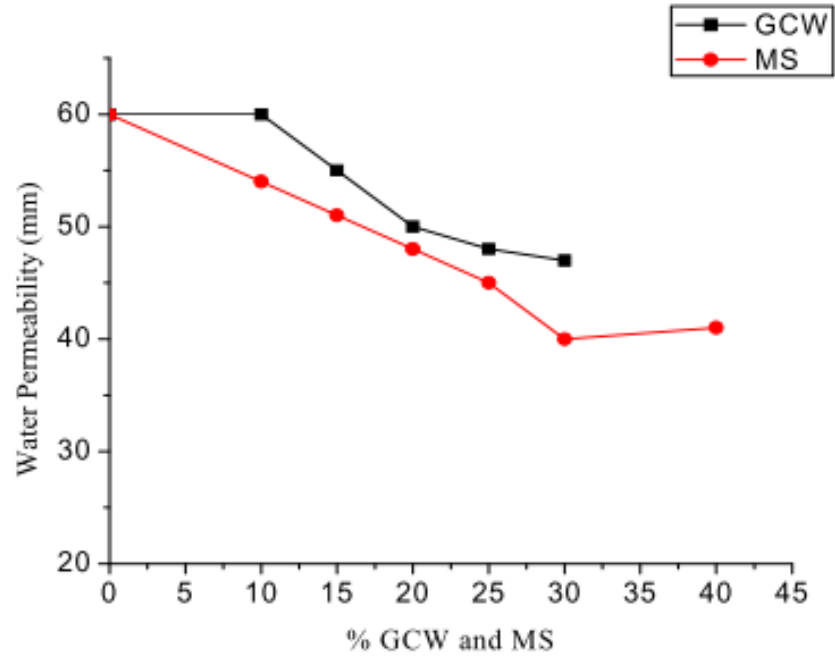


Figure 2.36 : Perméabilité en fonction du taux de marbre [88].

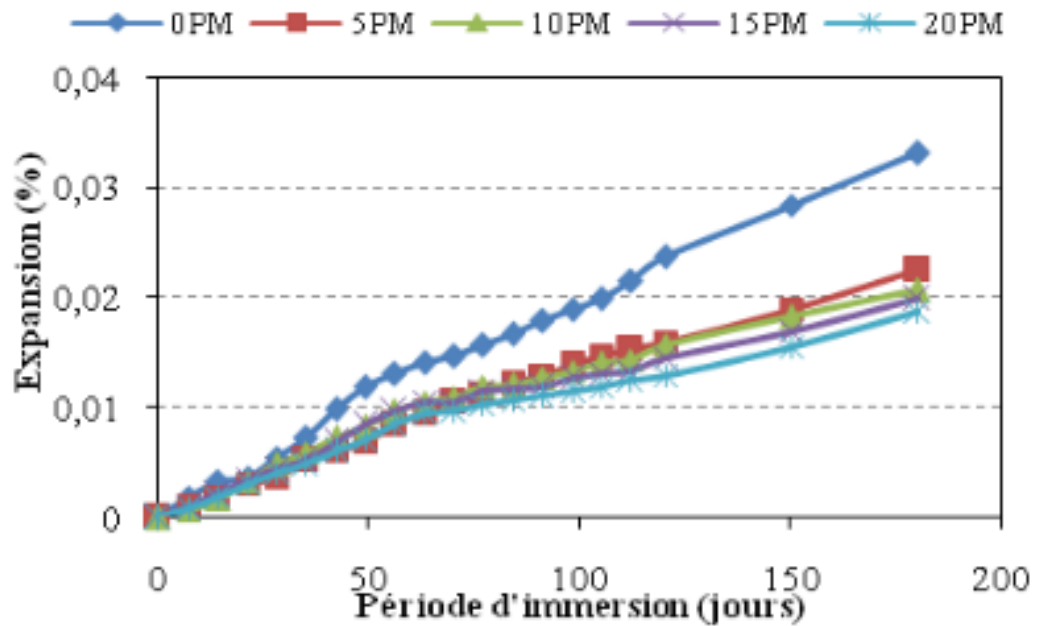


Figure 2.37 : Evolution des mortiers à base de marbre en fonction de la période d'immersion dans la solution de $MgSO_4$ [15].

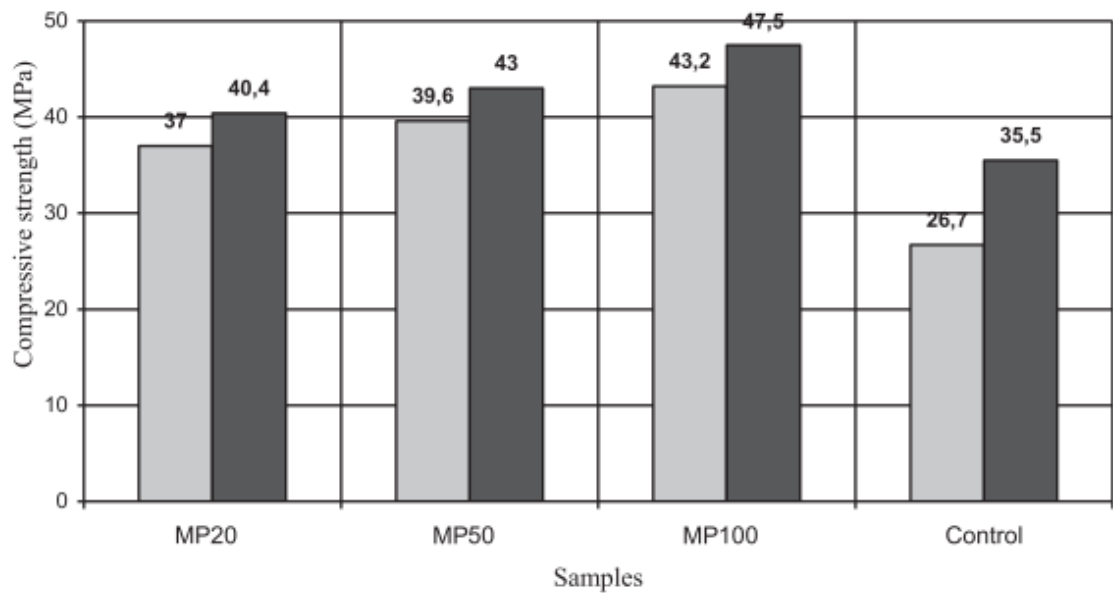


Figure 2.38 : Résultats de la résistance à la compression des mortiers placés dans l'eau (en gris) et placés dans un solution de MgSO₄ (en noir) [35].

Le tableau 2.1 récapitule quelques études sur l'utilisation des déchets de marbre.

Tableau 2. 1 : Quelques études résumant l'utilisation du marbre comme ciment ou agrégats.

Auteurs et taux de substitution	Matériau de substitution	Taux optimal	Les paramètres modifiés par rapport au taux optimal	
Singh et al.[94] 0%, 10%, 15%, 20%, 25%	Ciment	15%	Air occlus.	↘
			Ouvrabilité	↘
			Résistance à la compression	↗
			Résistance à la flexion	↗
			Résistance à la traction	↗
Boukhelkhal et al.[15] 0%, 10%, 15%, 20%, 25%	Ciment	20%	Absorption.	↗
			Expansion due aux attaques sulfatiques	↘
Gesoglu et al.[95] 0%, 5%, 10%, 20%	Ciment	10%	Résistance à la compression	↗
			Résistance à la traction	↗
			Pénétration des chlorides	↘
Khodabakhsian et al. [98] 0%, 5%, 10%, 20%	Ciment	10%	Résistance à la compression	↗
			Résistance à la traction	↗
Sadinha et al.[107] 0%, 5%, 10%, 20%	Ciment	20%	Résistance à la compression	↗
			Absorption.	↘
Kabber et Vvas [96] 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%	Sable	20%	Résistance à la compression	↗
			Résistance à la traction	↗
			Absorption.	↘
Demirel [97] 0%, 25%, 50%, 100%	Sable	100%	Résistance à la compression	↗
			Sorptivité	↘
			Porosité	↘
Singh et al. [88] 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%	Sable	25%	Ouvrabilité	↘
			Résistance à la flexion	↗
			Résistance à la compression	↗
Khyalia et al.[105] 0%, 25%, 50%, 100%	Sable	25%	Résistance à la compression	↗
			Absorption.	↗

2.4. Fibres de verre

Le matériau composite est un matériau, constitué par définition de deux composants, une matrice et un renfort. Les caractéristiques mécaniques qui en résultent sont liés à la nature de la matrice (thermodurcissable ou thermoplastique) et à celle des fibres.

Les fibres utilisées sont de différentes nature et de différentes dimensions, elles peuvent être naturelle ou synthétiques, courtes ou longues [108], [109]. 61% des matrices utilisées sont des matrices thermodurcissables et 88% des fibres utilisées sont des fibres de verre [110].

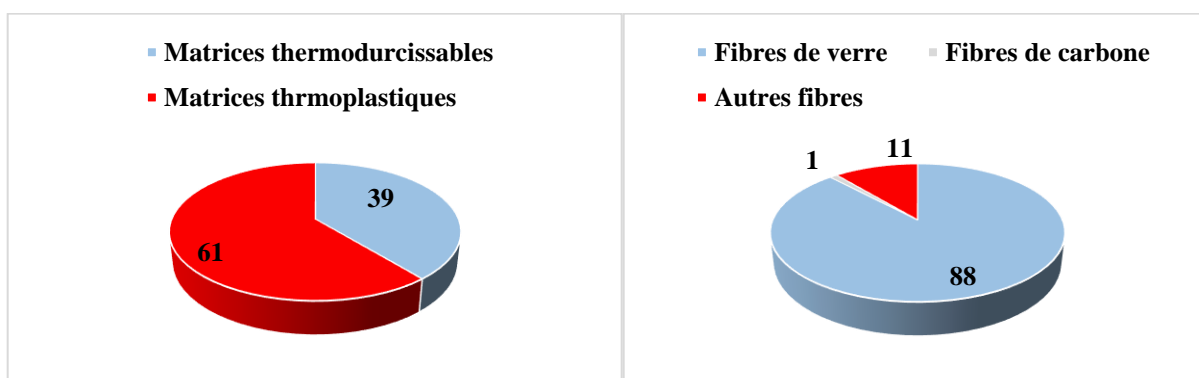


Figure 2.39 : Utilisation des matrices et des fibres [110].

La production des matériaux composites induit une certaine quantité de déchets, ces déchets peuvent être un sous-produit industriel issu de la fabrication de composites [111] [112], ou des déchets issus de fin de vie des produits, la quantité des déchets estimée en 2015 en Europe était de 300000 tonnes (Figure 2.40).

Recycler ce type de matériaux est devenue une question importante et préoccupante, surtout que dans le cas de matrices thermodurcissables, leur recyclage est plus difficile contrairement aux matrices thermoplastiques.

Les composites renforcés de fibres de verres sont des matériaux composites constitués de fibres de verre dispersés dans une résine, généralement du polyester ou époxy, utilisés dans différents domaines notamment l'aéronautique, la construction des éoliennes, l'industrie navale et automobile [113], ceci en raison de leurs propriétés mécaniques élevées, leur légèreté et leur

durabilité. Selon Tittarelli et Shah [112], 1 million de tonnes de composites renforcés de fibres de verre est produit chaque année.

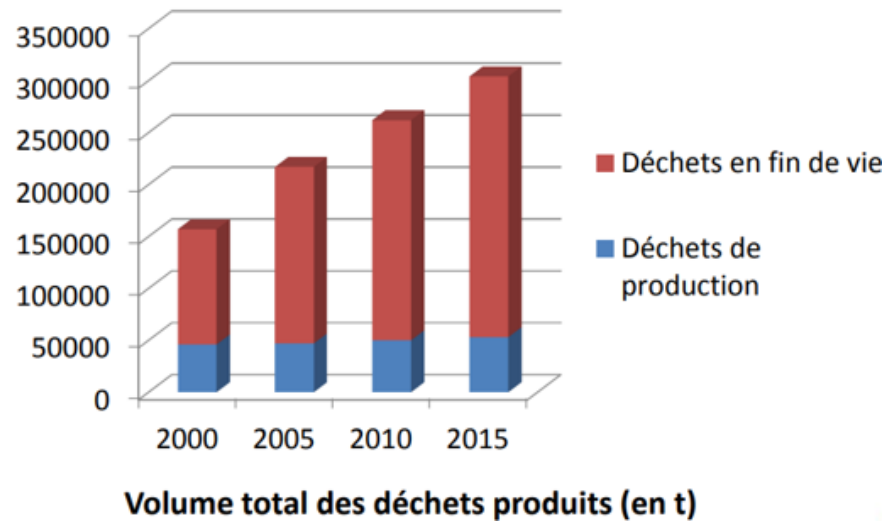


Figure 2.40 : Déchets de production et de fin de vie en Europe [110].

L'utilisation des fibres de verre en tant que renforcement dans le béton a été examinée par divers auteurs [108], [114]. D'après les différentes études, leur incorporation au béton, confère à ce dernier de meilleures caractéristiques [115]–[117].

Les différentes études sur le recyclage des fibres de verre montrent le potentiel de valoriser les déchets des composites à base de ces fibres [111], [112], [118], [119]. Ces études montrent que, bien que la résistance à la compression ne présente d'amélioration dans tous les cas d'étude, une réduction de l'absorption capillaire est constatée [111], [112].

Ainsi Kumar et al. [114], ils ont incorporé les fibres de verre avec des taux de 0.5%, 0.75% et 1%, ils ont remarqué une amélioration de la résistance à la compression et à la flexion (Figures 2.41 et 2.432).

Tittarelli et Tittarelli et Shah [111], [112] ont constaté une amélioration des paramètres liés à la durabilité en utilisant un sous-produit industriel issu de la fabrication de composites à fibre de

verre comme substitution du sable, alors que Garcia et al. [119] ont recyclé par un procédé mécanique des matériaux composites a fibres de verre sous forme de fibres courtes.

D'après Garcia et al. [119], l'augmentation de la résistance est non seulement liée au fait d'utiliser les fibres courtes, mais c'est aussi à la technique de recyclage mécanique qui a été optimisé de telle façon à obtenir un concentré de fibres de verre recyclés adéquat à l'étude. En effet en broyant les déchets en poudre susceptible de remplacer le sable fin, ils ont remarqué une réduction de la résistance à la flexion. Par contre, en recyclant les déchets des composites par un procédé mécanique qui permet de séparer les fibres de la résine, une amélioration de la résistance a été remarqué

L'augmentation de la résistance en utilisant les recyclât comme fibres courtes a été confirmée par Ribeiro et al. [120], en effet, ils ont remarqué une augmentation de la résistance à la compression de 22%.

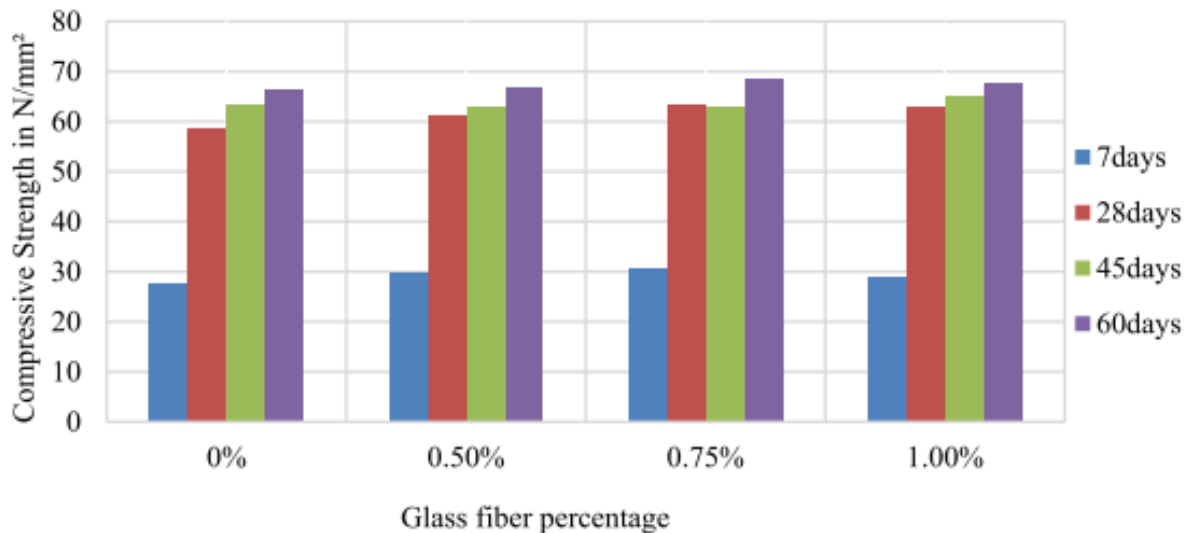


Figure 2.41 : Effet de l'incorporation des fibres de verre sur la résistance à la compression [114].

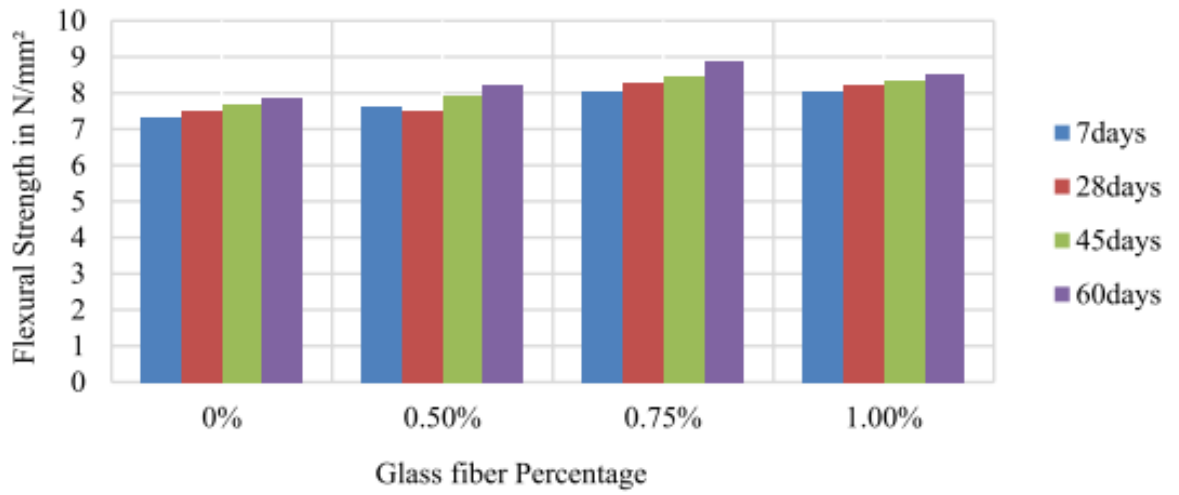


Figure 2.42 : Effet de l'incorporation des fibres de verre sur la résistance à la flexion [114].

Tableau 2. 2 : Quelques études résumant l'utilisation des fibres de verre issus des déchets.

Auteurs et taux de substitution	Type de recyclât	Utilisé en tant que :	Effet sur la résistance à la compression	Effet sur la résistance à la flexion	Effet sur l'absorption	Conclusion principale
Tittarelli [111] 0%, 2.5% et 5% du volume	Poudre	sable	Légère diminution	Non étudié	Diminution significative	Amélioration de la durabilité
Tittarelli et Shah [112] 5% et 10% du volume	Poudre	Sable	Non étudié	Non étudié	Diminution significative	Amélioration de la durabilité
Tittarelli et Moriconi [118] 25% et 50% du volume	Poudre	filler	Diminution significative	Légère augmentation	Diminution significative	Amélioration de la durabilité
Garcia et al. [119] 1% et 2% de la masse	Fibres courtes		Augmentation de 16 à 22%	Augmentation de 16%	Non étudié	Amélioration des propriétés mécaniques
Ribeiro et al. [120] 0% et 12% de la masse	Poudre + fibres courtes	Sable	Augmentation de 14%	Augmentation de 4%	Non étudié	Amélioration des propriétés mécaniques
Mastali et al. [121] 0.25%, 0.75% et 1.25% du volume	Fibres courtes	Ajout	Augmentation de 37%	Augmentation de 42%	Non étudié	Amélioration des propriétés mécaniques
Zhou et al. [122] 0% et 5% de la masse	Fibres courtes	Ajout	Légère augmentation	Augmentation de 48%	Diminution significative	Amélioration des propriétés mécaniques

2.5. Conclusion

La croissance économique mondiale entraîne une demande accrue en matériaux de construction, notamment le béton dont les composants principaux sont le ciment, les agrégats et l'eau. Cependant, la production de ces matières premières a un impact négatif significatif sur l'environnement.

De nombreuses études récentes se sont penchées sur la valorisation des déchets industriels inertes dans la fabrication de bétons, en remplacement partiel du ciment ou des agrégats. L'incorporation de poudre de marbre, de fibres de verre recyclées, de cendres volantes ou d'autres sous-produits industriels dans la matrice cimentaire apporte même dans certains cas des améliorations en termes de résistance mécanique et de durabilité.

L'utilisation des déchets de marbre en tant que substitut du sable présente un avantage significatif par rapport à son utilisation en tant que ciment. En effet, les divers travaux sont unanimes sur le fait que la substitution du ciment par les déchets de marbre ne peut dépasser les 10%, alors que, en utilisant les déchets en tant que substitut du sable, nous pouvons aller jusqu'à 50% du taux de substitution.

L'utilisation des fibres issus des déchets des composites peut être bénéfique en optimisant la technique de récupération des fibres et en privilégiant l'utilisation des déchets en tant que fibres plutôt que de les utiliser en tant que poudre.

Bien que prometteuses, les conclusions de ces travaux sont parfois contradictoires et dépendent beaucoup des procédés de concassage et de la granulométrie des ajouts utilisés. Des études supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les formulations de bétons intégrant des déchets industriels, notamment en termes de rhéologie à l'état frais et de stabilité volumétrique. Néanmoins, le recyclage à grande échelle de ces sous-produits représente une piste prometteuse pour développer des bétons plus écoresponsables et économiques.

Cette synthèse bibliographique a montré le manque des études qui ont combiné les granulats fins de marbre recyclé avec les fibres essentiellement les fibres de verre qui feront l'objet de cette étude.

Cette synthèse bibliographique a montré le manque des études qui ont consigné les granulats fins de marbre avec les fibres, notamment les fibres de verre qui feront l'objet de notre étude.

MATERIAUX ET ESSAIS

3. CHAPITRE3 : MATERIAUX ET ESSAIS

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents matériaux utilisés, ainsi que la méthodologie des différents essais effectués dans ce travail.

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Ciment

Le ciment que nous avons utilisé dans cette étude est un ciment CEM II/B de la cimenterie de Meftah, ayant une résistance à la compression à 28 jours de 47MPa, ce résultat a été obtenu en réalisant l'essai de compression normalisé selon la norme EN 196-1 [123]. La figure 3.1 présente le spectre de fluorescence du ciment obtenu par XRF.

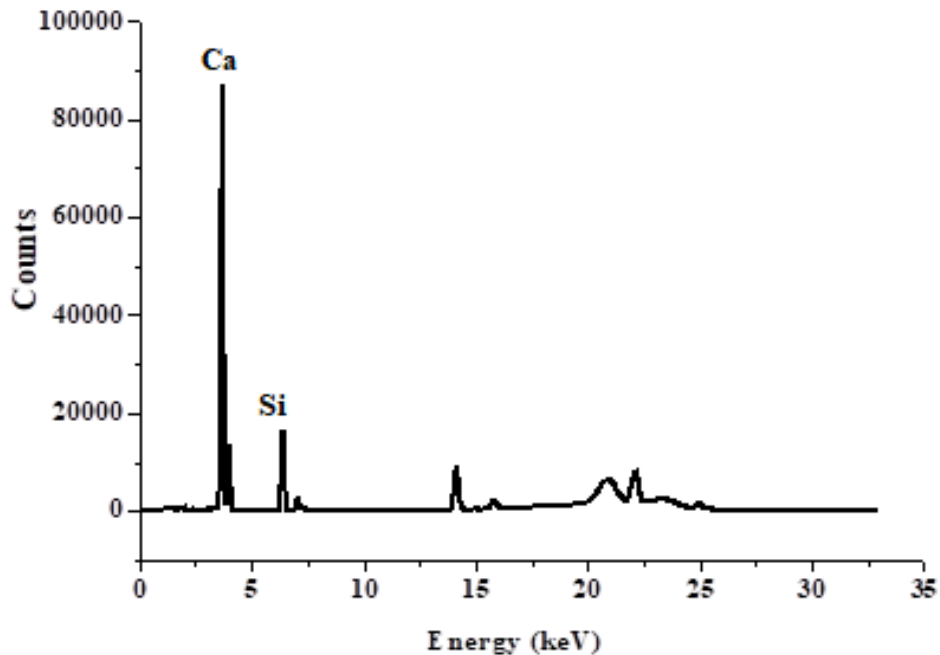


Figure 3.1 : Spectre par fluorescence du ciment.

La composition chimique et minéralogique ainsi que les caractéristiques mécaniques du ciment utilisé dans cette étude sont présentées dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 respectivement.

Tableau 3.1 : Composition chimique du ciment CEMII B.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CaO libre	Cl	PaF
%	17.14	4.8	2.82	59.31	1.65	0.67	0.48	2.61	1.42	0.024	10.14

Tableau 3. 2 : Composition minéralogique du ciment CEMII B.

Elément	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	55.85	21.02	8.80	11.53

Tableau 3.3 : Propriétés physiques et mécaniques du ciment.

Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)	Finesse (cm ² /g)	Début de prise Temps (h)	Fin de prise Temps (h)
47	2800	2960	1:45	2:30

3.2.2. Sable

Le sable utilisé est un sable composé de 70% de sable grossier de classe 0/5 (sable de Baghlia) et de 30% de sable fin de classe 0/2.5 (sable de Boughezoul). La figure 3.3 présente la courbe granulométrique du sable obtenu, ses caractéristiques sont données dans le tableau 3.4.



Figure 3.2 : Sable grossier de Baghlia et Sable fin de Boughezoul.

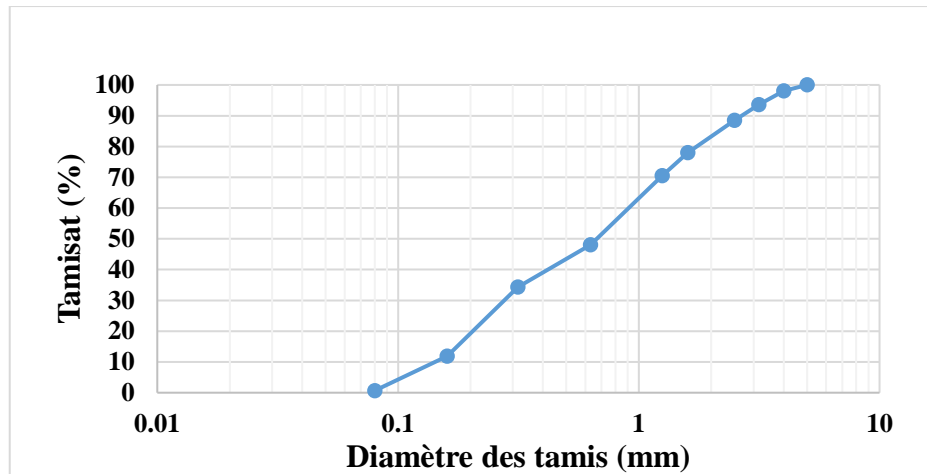


Figure 3. 3 : Courbe granulométrique du sable naturel.

Tableau 3.4 : Propriétés physiques du sable naturel.

Masse volumique (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)	Module de finesse
2500	1.2	2.5

3.2.3. Marbre

Le marbre dont fait l'objet notre travail est un marbre blanc. Des déchets de marbre (DM) ont été récupérés auprès des marbreries locales, ces déchets résultent du sciage et du façonnage des pierres de marbre, ils ont été concassé puis passé au tamis de 5 mm pour obtenir un sable de classe 0/5. La figure 3.5 présente les courbes granulométriques du sable naturel et du sable de marbre. Les caractéristiques du marbre sont données dans le tableau 3.5 avec ceux du sable de naturel à titre de comparaison.



Figure 3.4 : Procédure de préparation du sable de marbre.

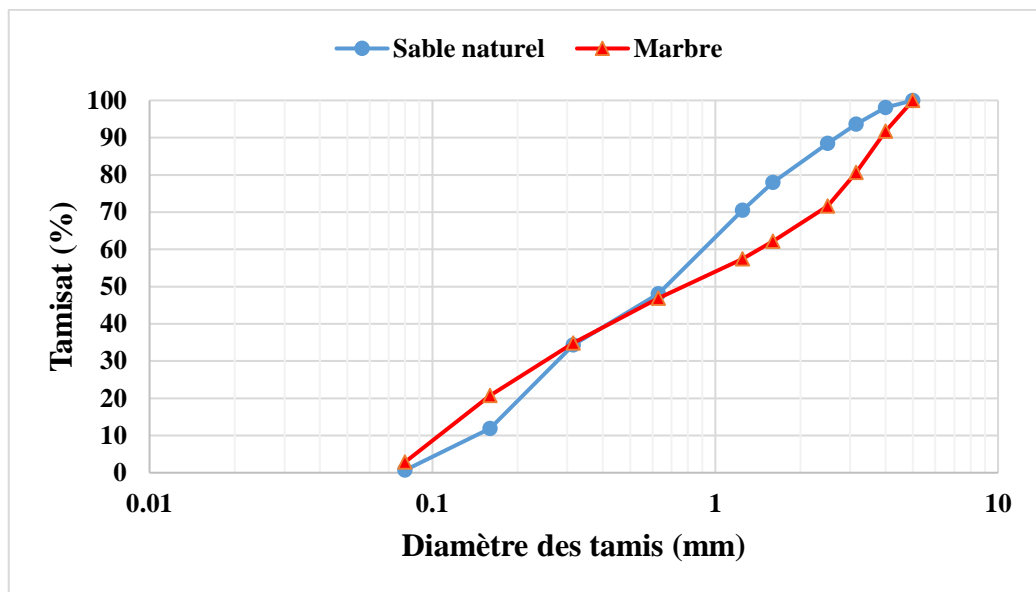


Figure 3.5 : Comparaison entre les courbes granulométriques du marbre et du sable naturel

Tableau 3.5 : Propriétés physiques du sable naturel et du marbre

Propriétés physiques	Sable naturel	Marbre
Masse volumique (kg/m ³)	2500	2556
Coefficient d'absorption (%)	1.2	0.5
Module de finesse	2.5	2.7

La spectrométrie par fluorescence permet de déterminer les différentes phases présentes dans le marbre, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3.6 et la figure 3.6. Nous remarquons que le marbre est composé essentiellement de calcaire avec des traces de quelques éléments comme le fer, le manganèse, le cuivre, l'aluminium et le silicium.

Tableau 3.6 : Composition chimique du marbre.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MnO	CuO	TiO ₂	SO ₃	Cl
%	15.3	5.8	2.9	63.75	0.3	0.11	0.81	1.25	0.08

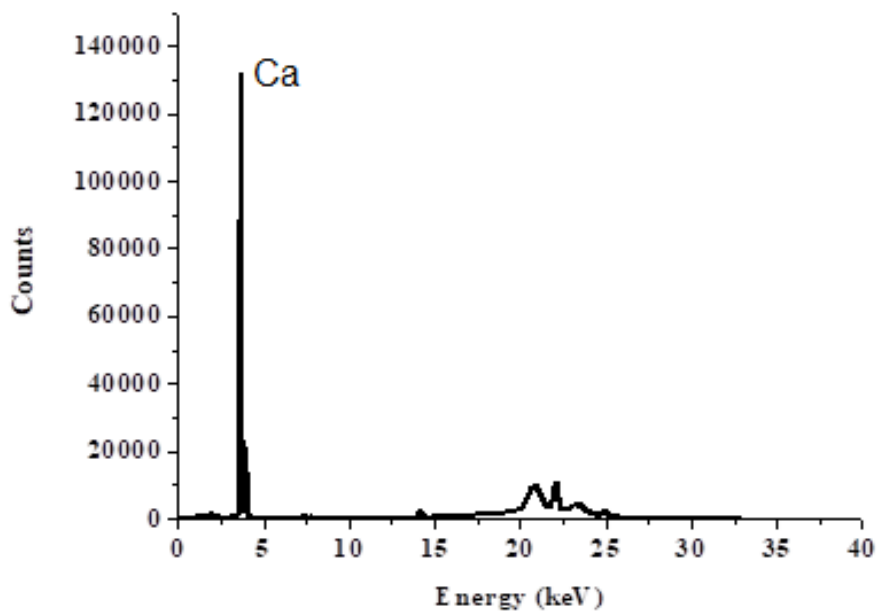


Figure 3.6 : Spectrométrie par fluorescence du marbre.

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau est un composant nécessaire dans la confection du béton, il doit être exempt de toutes impuretés pouvant altérer ses. L'eau utilisé dans la confection des mortiers est l'eau du robinet du laboratoire [124], [125].

3.2.5. Superplastifiant

Un superplastifiant réducteur d'eau à base de polycarboxylate, confectionné par la société Granitex a été utilisé dans notre travail, il porte la dénomination sur le marché de MEDAFLOW30.

3.2.6. Fibres

Une partie de l'étude menée consiste à renforcer les mortiers de fibres et évaluer l'influence de ce renfort sur le comportement de ces mortiers. Dans cette optique, et afin de rester dans la valorisation des déchets, nous avons opté pour l'utilisation des fibres de verre issus des déchets. Des restes de tissus composés de résine époxy et fibres de verres ont été récupérés auprès d'un constructeur de pare-chocs. Ce tissu a été découpé avec des ciseaux en petits morceaux, les fibres ont été séparées manuellement. A la fin on se retrouve avec des fibres de longueur variant entre 1.5 cm et 3.5 cm (Figures 3.7 à 3.9).



Figure 3.7 : Tissu composite (époxy + fibres de verres).



Figure 3.8 : Séparation des fibres de verre de l'époxy.

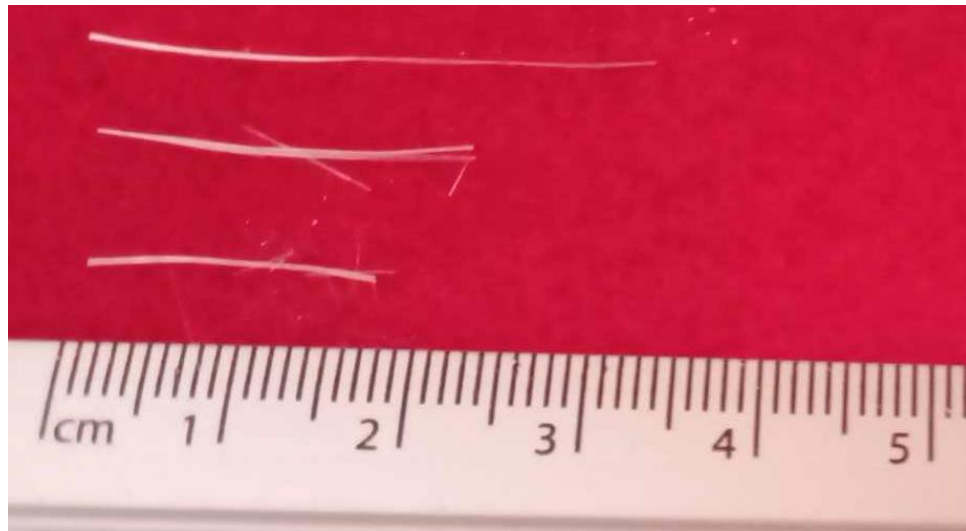


Figure 3.9 : Dimensions des fibres de verre utilisées.

3.3. Procédure expérimentale

La confection des mortiers autoplaçants passe nécessairement en premier lieu par l'optimisation du superplastifiant afin de déterminer les quantités nécessaires de ciment, sable, eau et

superplastifiant avec un étalement et un temps d'écoulement dans les normes. Le rapport E/C a été fixé à 0.38. Le dosage en superplastifiant a été fixé dans un intervalle de 0.6% à 1.2% en se basant sur des travaux antérieures [28].

3.3.1. Formulation des mortiers autoplaçants

Le but de cette procédure est de formuler un mortier autoplaçant avec un temps d'écoulement et un étalement optimaux. Le rapport E/C étant fixe, il s'agit de varier le pourcentage du superplastifiant de telle façon à obtenir un étalement de 270 à 330 mm et un temps d'écoulement entre 2 et 10 s [126], calcul des proportions a été fait en se basant sur la feuille de calcul Excel établi par Boukendakdji [127].

La préparation des gâchées de mortiers se fait suivant les étapes suivantes :

Etape 1 (de 0 à 1 mn) : malaxage des éléments secs, le ciment et le sable dans notre cas, jusqu'à ce que le mélange soit homogène, puis rajouter 70% de la quantité d'eau nécessaire.

Etape 2 (de 1 à 2 mn) : ajouter le reste d'eau mélangée avec la quantité du superplastifiant.

Etape 3 (de 2 à 5 mn) : malaxage du mélange pendant le temps restant.

3.3.1.1. Essai d'étalement au mini cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une plaque lisse. Une fois le moule levé, le mortier s'écoule dans deux directions formant une forme cercle. Il s'agit alors de mesurer les diamètres dans deux directions différentes et d'en calculer la moyenne pour avoir la valeur de l'étalement. A signaler, que le mortier, une fois étalé, il y a lieu de vérifier visuellement l'absence de ségrégation et de ressuage.



Figure 3.10 : Essai d'étalement.

3.3.1.2. Essai d'écoulement (V-funnel)

L'essai de l'écoulement par l'entonnoir consiste à évaluer la vitesse d'écoulement d'un mortier à travers un entonnoir. L'essai consiste à remplir l'entonnoir de mortier, l'entonnoir étant fermé, donc le mortier ne peut pas s'écouler. Il s'agit après de mesurer le temps entre l'instant où l'orifice de l'entonnoir est ouvert et l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas.



Figure 3.11 : Dispositif de l'essai d'écoulement.

3.3.2. Confection des mortiers autoplaçants à base de sable de marbre

Les mortiers autoplaçants ont été formulés en remplaçant le sable naturel par le sable issu des déchets de marbre en variant le taux de substitution (0%, 15%, 30%, 50%, 75% et 100%), et en fixant les rapports E/L, S/M et Sp/L. Ces valeurs ont été ajustées en se basant sur l'essai d'étalement et l'essai de V-funnel. La quantité d'eau étant dépendante du coefficient d'absorption du sable et du marbre, cette quantité ainsi que la quantité de sable sont réajustés de telle façon à garder les rapports E/L et S/M constants. Le tableau 3.7 donne les différentes compositions des mortiers.

Tableau 3.7 : Compositions des mortiers (données pour 1.7 litre de mortier) .

Mélanges	Taux de substitution %	Coefficient d'absorption %	Ciment (kg)	Sable naturel (kg)	Marbre (kg)	Eau (kg)	Superplastifiant (kg)
M0	0	1.20	1.184	2.100	0	0.467	0.011
M15	15	1.09	1.184	1.792	0.316	0.465	0.011
M30	30	1.00	1.184	1.483	0.635	0.463	0.011
M50	50	0.85	1.184	1.065	1.065	0.460	0.011
M75	75	0.68	1.184	0.537	1.610	0.456	0.011
M100	100	0.50	1.184	0	2.162	0.452	0.011

Les différents mortiers seront testés par rapport à l'essai d'écoulement et l'essai d'étalement, afin de vérifier si la substitution du sable naturel par le sable de marbre donne des résultats dans les limites normatives établis par Domone [126].

La préparation des gâchées de mortiers se fait comme mentionné dans le paragraphe 3.3.1., à la seule différence dans l'étape1 du malaxage des éléments secs, il s'agit de mélanger le sable, le ciment et la marbre selon les quantités mentionnées dans le tableau 3.7.

3.3.3. Confection des mortiers autoplaçants renforcé de fibres

Pour la préparation des mortiers renforcés de fibres, les mêmes étapes que pour la préparation des mortiers de références ont été utilisés. Pour l'ajout des fibres, nous avons testé 2 approches :

- La première approche consiste à ajouter les fibres dans la première phase, cela veut dire avec les éléments secs (sable+ciment), cette approche a été utilisée par Garcia et al. [119]. Nous avons remarqué que, bien que le malaxage se faisait à vitesse lente, les fibres de verre, vu leur légèreté, étaient éjectées du bol de malaxage, en plus, lors de l'ajout de la première quantité d'eau, les fibres s'aggloméraient en pelote, de ce fait, cette approche a été rejetée.
- La deuxième approche consiste à ajouter les fibres à la fin, en rajoutant une minute de malaxage supplémentaire d'eau, cette technique, qui a été utilisée par Ribeiro et al. [120], a donné de meilleurs résultats.

3.3.4. Mesure de l'air occlus

Cet essai consiste à mesurer le pourcentage d'air dans le mortier frais, il est mené conformément à la norme NF EN 12350 [128] en utilisant le dispositif utilisé dans la figure 3.12. Pour cela, il faut remplir le récipient à ras et nettoyer soigneusement les rebords (Figures 3.13), fixer le couvercle et ouvrir les 2 robinets. Ensuite, injecter l'eau par l'un des deux robinets jusqu'à ce qu'il ressorte de l'autre robinet B. A la fin, fermer les deux robinets, pomper l'air, ajuster avec le bouton correcteur, presser le bouton du piston et lire la valeur.



Figure 3.12 : Dispositif pour l'essai de l'air occlus.



Figure 3.13 : Préparation du mortier pour l'essai de l'air occlus.

3.3.5. Résistance à la compression et à la traction par flexion

La résistance du béton est un paramètre important à prendre en compte, étant lié étroitement avec la composition du béton. La résistance à la compression et à la flexion sont déterminées à partir d'éprouvettes de mortiers de dimensions 40x40x160 mm³ conformément à la norme NF EN 196-1 [123]. Les éprouvettes ont été testées à différents âges, la valeur de la résistance obtenue représente la moyenne des résultats d'essais sur trois éprouvettes, elle est calculée par la formule donnée par l'équation 3.1 :

$$R_f = \frac{1.5 \times F \times l}{b^3} \quad (3.1)$$

Avec

R_f : La résistance à la flexion (MPa),

F : La charge appliquée (kN),

b : Le coté de la section carrée transversale de l'éprouvette (mm),

l : Distance entre les appuis.

Les demis-prismes obtenus sont testés ensuite en compression, de même, le résultat obtenu représente la moyenne des mortiers de la même composition et testés au même âge, la résistance à la compression sera donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F}{b^2} \quad (3.2)$$

R_c : La résistance à la compression (MPa),

F : La charge appliquée (kN),

b : Le coté de la section carrée transversale de l'éprouvette (mm),

3.3.6. Absorption capillaire

Les essais d'absorption capillaire ont été menés conformément à la norme ASTM C1585-13 [129], les éprouvettes ont été séchées jusqu'à obtenir un poids constant entre 2 pesées successives. Ensuite, les surfaces latérales sont enduites de résine pour assurer une absorption

unidirectionnelle. Elles sont pesées puis émergées dans un bac où la hauteur d'eau ne dépasse pas 5 mm. Les éprouvettes sont pesées à nouveau à des temps précis : 1mn, 5mn, 10mn, 20mn, 30mn, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h et 6h.

L'absorption est obtenue par la formule

$$I = \frac{m_t}{a \cdot d} \quad (3.3)$$

Avec

I : Absorption (mm),

m_t : Différence de masse de l'éprouvette à un temps t (g),

a : Surface en contact avec l'eau (mm²),

d : Densité de l'eau (g/mm³).

La courbe de tendance liant les différents points est de la forme $ax+b$, le paramètre 'a' de l'équation représente la sorptivité.

3.3.7. Porosité

La porosité accessible à l'eau est déterminée selon la norme NFP18-459 [130], les échantillons sont séchés dans l'étuve jusqu'à obtention d'une masse constante, ils sont pesés, la valeur obtenue pour chaque échantillon représente la masse sèche (M_{sec}). Ils sont placés ensuite dans une enceinte fermée sous une pression constante pendant quatre heures (Figure 3.14). Puis, de l'eau est ajouté graduellement jusqu'à ce que les échantillons soient complètement couverts, ils y seront maintenus pendant 18 heures. Arrivé à cette échéance, les échantillons sont pesés à l'air (M_{air}) et dans l'eau (M_{eau}) (Figure 3.15).

La porosité est obtenue par la formule :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (3.4)$$

Avec

M_{air} : La masse dans l'air de l'échantillon saturé,

M_{eau} : La masse dans l'eau de l'échantillon saturé,

M_{sec} : La masse de l'échantillon séché.



Figure 3.14 : Essai de porosité.



Figure 3.15 : Dispositif pour la pesée dans l'eau.

3.3.8. Résistance aux sulfates

Concernant les attaques sulfatiques externes, la procédure utilisée est conforme à la norme ASTM C1012-95a [131]. L'essai consiste à préparer des éprouvettes 4x4x16 cm³, après 24h, les éprouvettes sont démoulées et placées en cure jusqu'à atteindre une résistance à la compression de 20 MPa. Ensuite, elles sont placées dans un bac dans lequel une solution de sulfate de magnésium a été préparée avec une concentration de 50g/l, cette solution est changée une fois par mois. La résistance à la compression et à la flexion ainsi que l'absorption capillaire ont été déterminées à 30, 60, 120, et 180 jours d'immersion.

Des images MEB ont été prises sur des échantillons à 0% et 30% de DM à 30 jours et 180 jours d'immersion dans la solution de sulfates afin d'analyser l'interface et observer une éventuelle formation d'ettringite. Ces images sont accompagnés d'une analyse EDX afin de déterminer les différents éléments présents.

3.3.9. Essais de vieillissement accéléré

Les essais de vieillissement accéléré sont basés sur la technique de séchage mouillage, les éprouvettes ont été préparés et placés dans les bacs de conservation jusqu'à 28 jours.

A partir de 28 jours, les éprouvettes ont été soumis à des cycles de séchage mouillage de 48 heures (24 heures de séchage, 24 heures de mouillage) à une température de 60°C, cette température a été préconisée par la majorité des chercheurs (Figures 3.16 et 3.17).

. Parallèlement à cela, des éprouvettes ont été placés dans la bac de conservation et testés au même âge que les éprouvettes soumises au cycle séchage mouillage. Les éprouvettes seront testés à 15 cycles, 30 cycles, 45 cycles et 60 cycles.



Figure 3.16 : Cycle de mouillage (bac d'eau de robinet).



Figure 3.17 : Cycle de séchage (dans l'étuve).

Les éprouvettes témoins sont placés dans le bac pour être testé au même âge que les éprouvettes ayant subi les cycles séchage mouillage, nommé C0

Les éprouvettes ayant subi 15 cycles de séchage mouillage (nommé C15) seront divisés en deux parties : une partie qui sera testé par rapport à la résistance, la porosité et l'absorption capillaire, le reste des éprouvettes seront placés dans le bac de conservation pour être testé au même âge que les éprouvettes ayant subi 30 cycles, 45 cycles et 60 cycles.

Les éprouvettes ayant subi 30 cycles de séchage mouillage (nommé C30) seront divisés en deux parties : une partie qui sera testé par rapport à la résistance, la porosité et l'absorption capillaire, le reste des éprouvettes seront placés dans le bac de conservation pour être testé au même âge que les éprouvettes ayant subi 45 cycles et 60 cycles.

Les éprouvettes ayant subi 45 cycles de séchage mouillage (nommé C45) seront divisés en deux parties : une partie qui sera testé par rapport à la résistance, la porosité et l'absorption capillaire, le reste des éprouvettes seront placés dans le bac de conservation pour être testé au même âge que les éprouvettes ayant subi 60 cycles.

Les éprouvettes ayant subi 60 cycles de séchage mouillage (nommé C60) seront testées par rapport à la résistance, la porosité et l'absorption capillaire.

Les essais réalisés sont récapitulés dans les Figures 3.18 à 3.23.

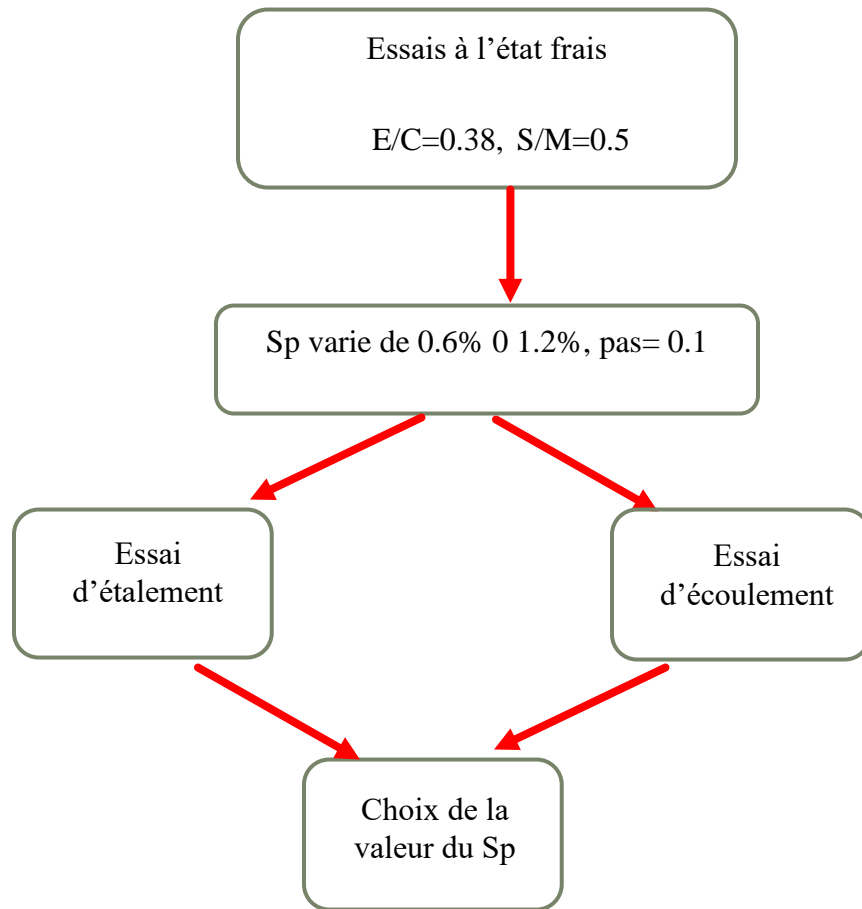


Figure 3.18 : Optimisation du superplastifiant.

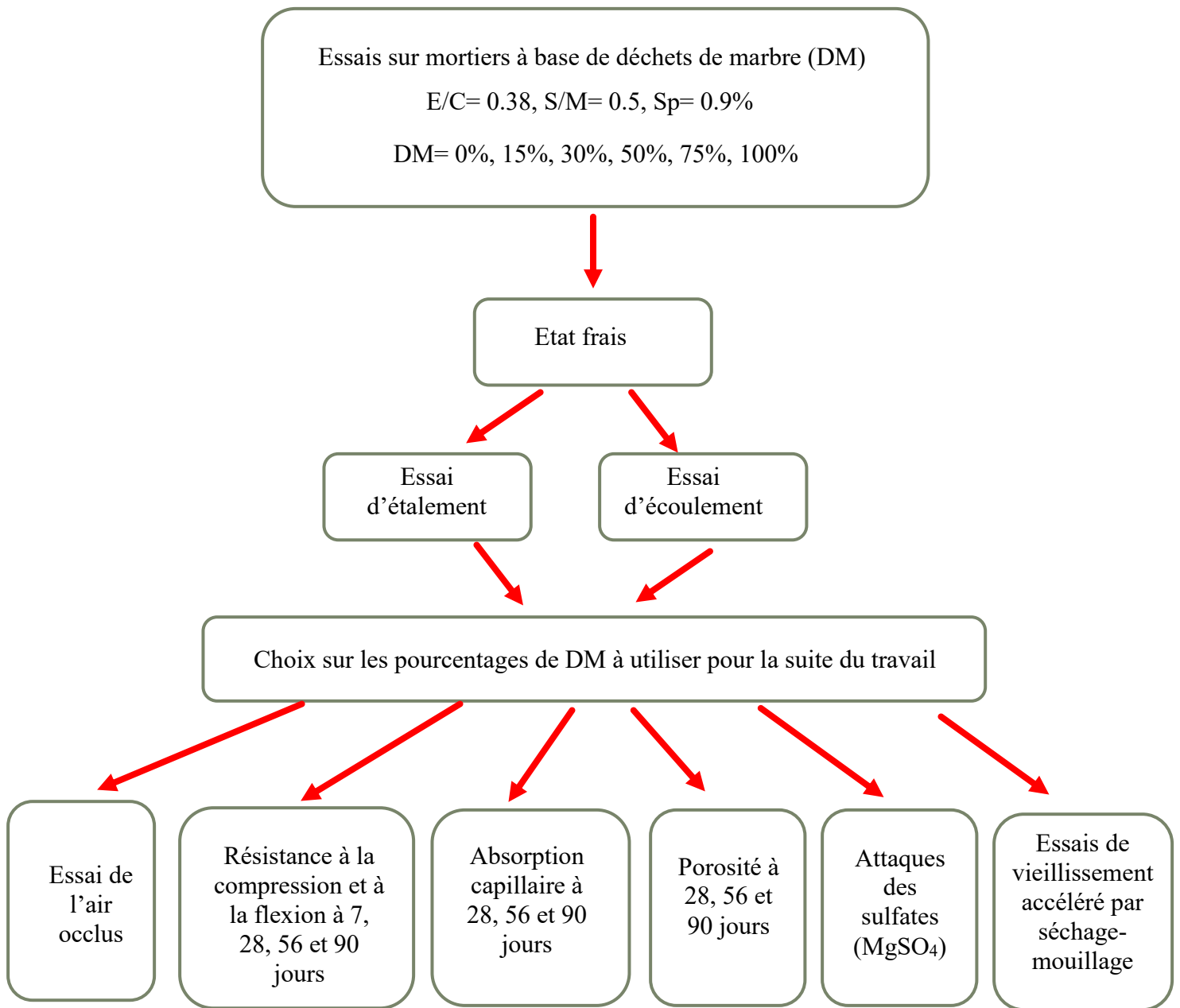


Figure 3.19 : Essais sur mortiers à base de déchets de marbre.

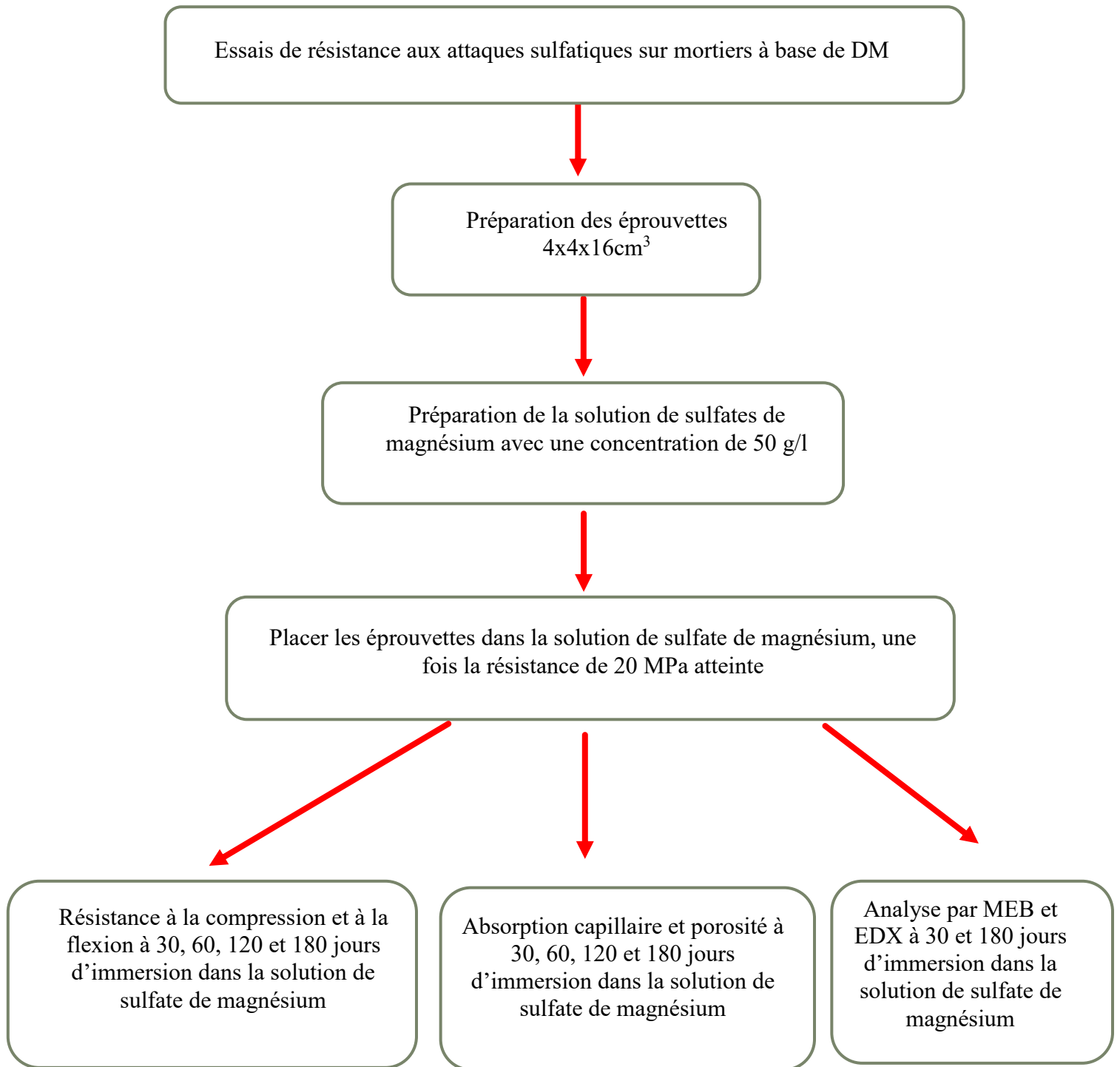


Figure 3.20 : Protocole de l'essai de résistance aux attaques sulfatiques.

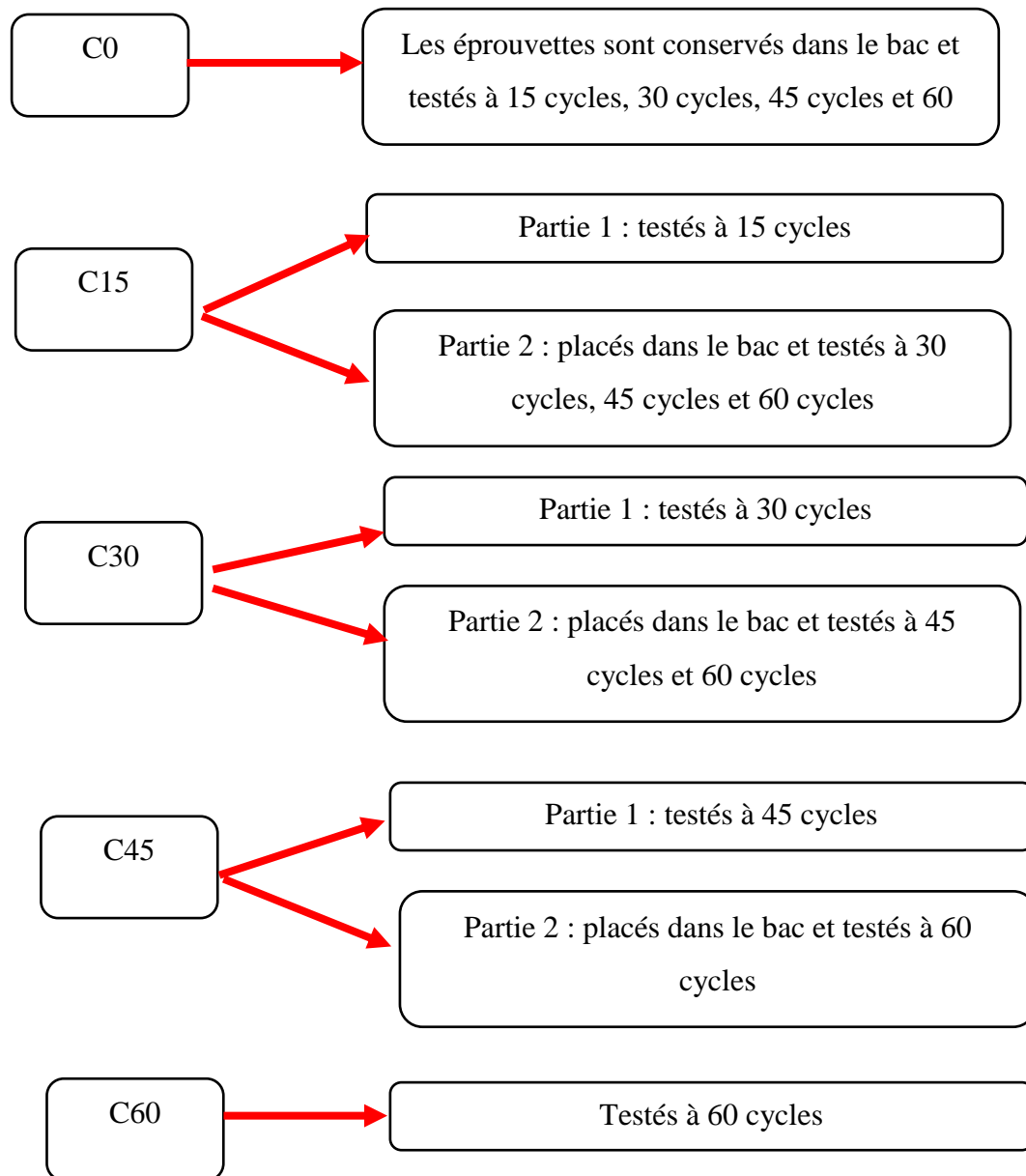


Figure 3.21 : Protocole de l'essai de vieillissement accéléré.

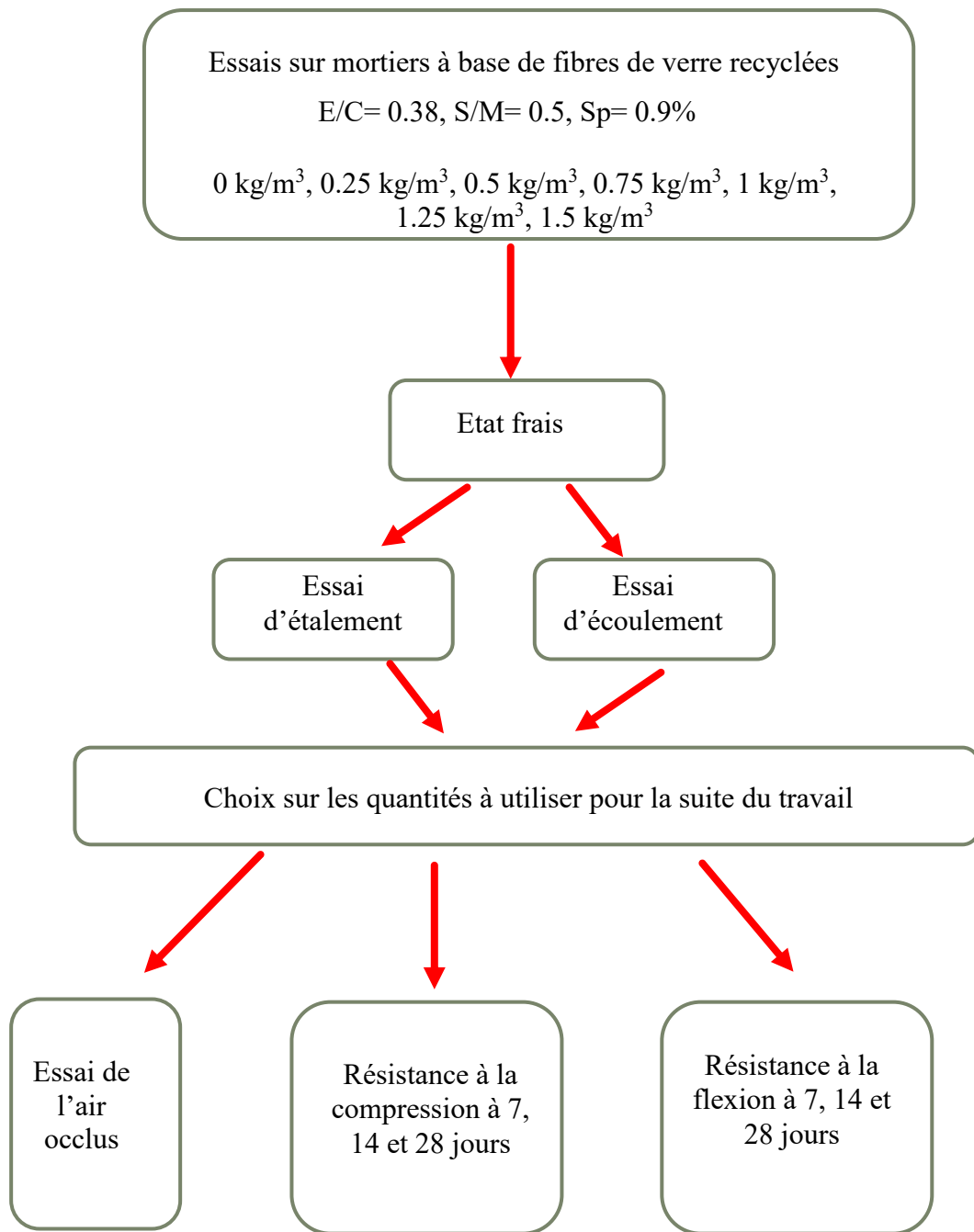


Figure 3.22 : Essais sur mortiers à base de fibres de verre recyclées.

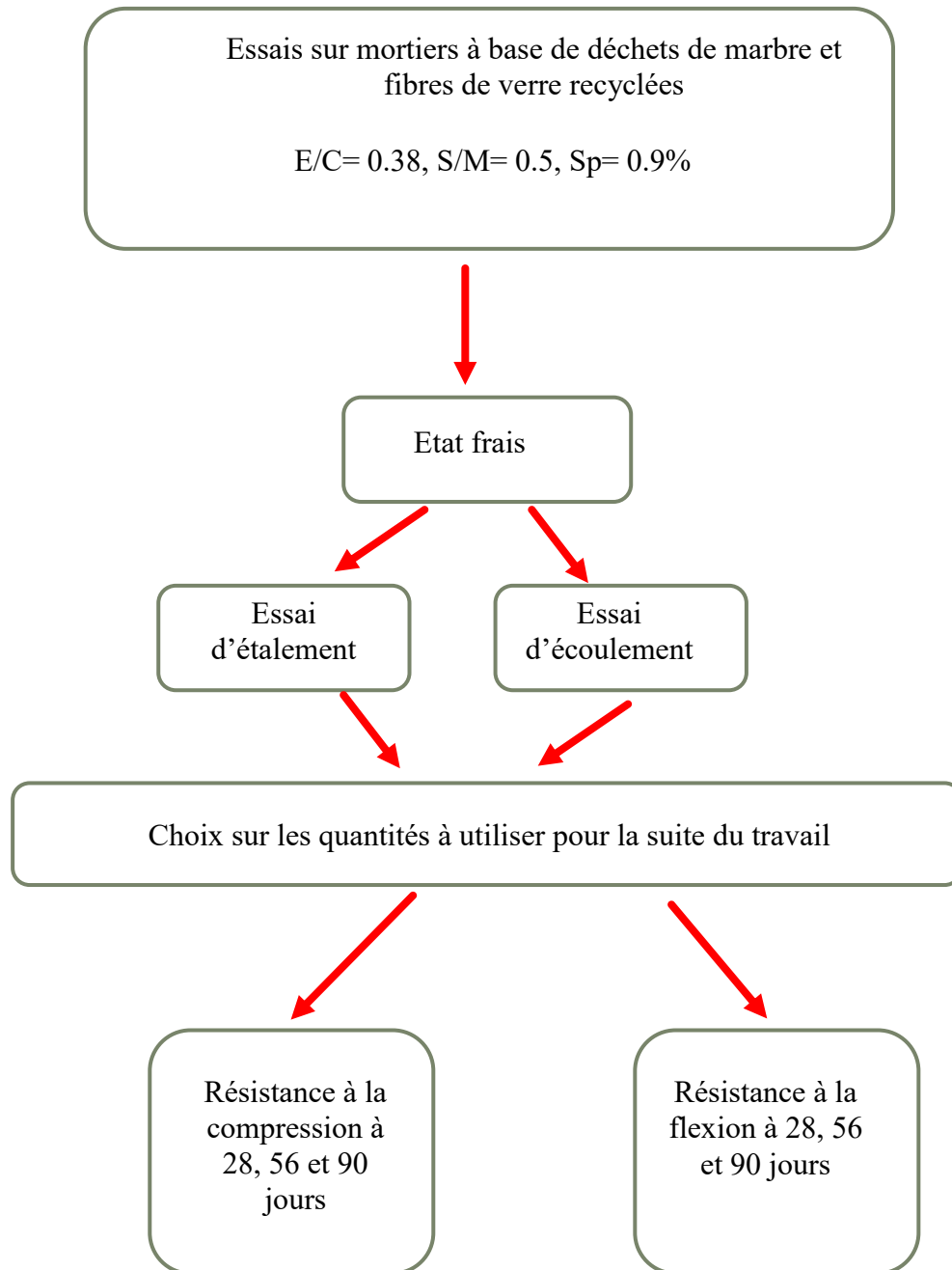


Figure 3.23 : Essais sur mortiers à base de déchets de marbre et de fibres de verre recyclées.

INTERPRETATION DES RESULTATS

4. CHAPITRE 4 : INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré aux résultats expérimentaux obtenus à l'état frais et durci, nous présenterons l'effet de la substitution du sable naturel par la sable de marbre, l'effet de l'ajout des fibres de verre ainsi que leur combinaison.

4.2. Optimisation du superplastifiant

La confection des mortiers ou des bétons autoplaçants est liée à l'essai d'étalement et l'essai de V-funnel qui doivent donner des résultats dans les limites établis par Domone [132], c'est pour cela que l'optimisation du superplastifiant est importante. En se basant sur des travaux antérieurs, le dosage du superplastifiant a été varié de 0.8% à 1.1% et en fixant les rapports E/L et S/M.

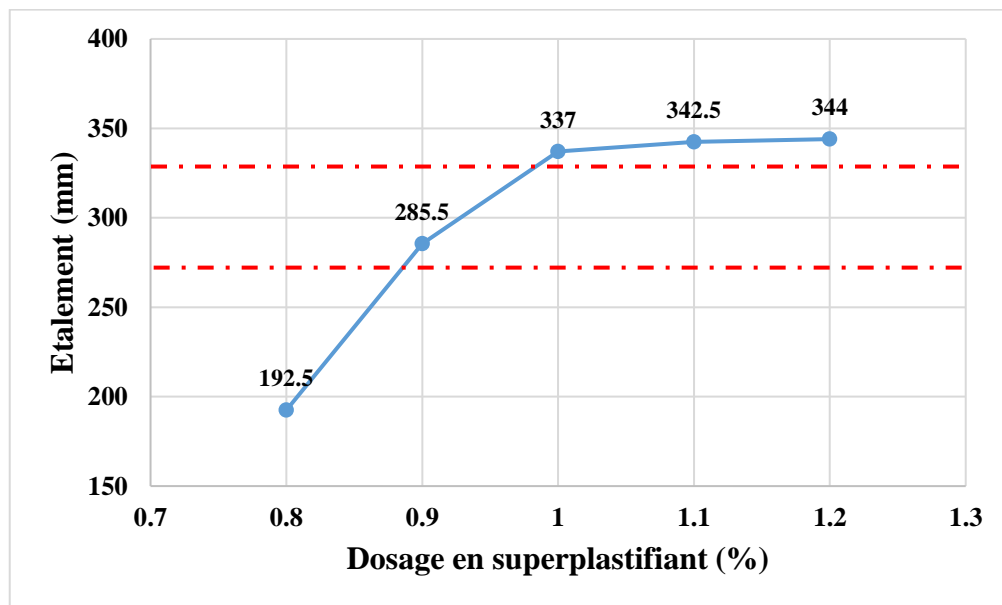


Figure 4.1 : Valeurs de l'étalement en fonction du dosage en superplastifiant.

Les résultats de l'essai d'étalement et de l'essai d'écoulement par V-funnel sont présentés dans les figures 4.1 et 4.2. Nous remarquons que certaines des valeurs obtenues sont en dehors des limites établis par Domone [132], le dosage de 0.9% , nous donne un étalement et un temps d'écoulement acceptable. En effet la valeur de l'étalement pour le dosage de 0.9% est de 285.5

mm et le temps d'écoulement est de 9 s. Au-delà du dosage de 1%, les valeurs de l'étalement et du temps d'écoulement se stabilisent.

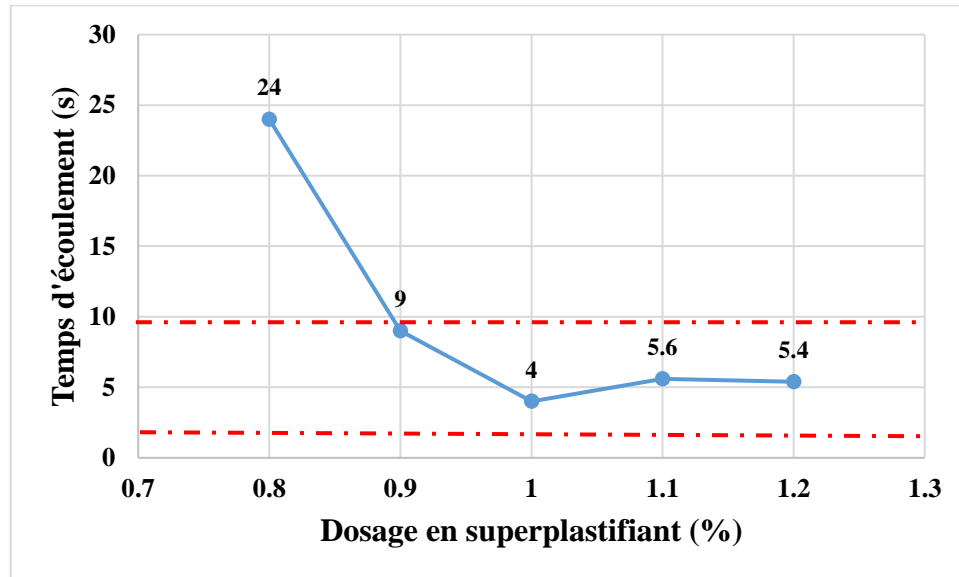


Figure 4.2 : Valeurs du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.

4.3. Effet de la substitution du sable naturel par le sable de marbre

4.3.1. Essai d'étalement

En se basant sur les données citées dans le tableau 3.7 du chapitre 3, nous constatons que l'étalement se situe entre 285.5 et 322.5 mm (Figure 4.3) pour les taux de DM de 0%, 15%, 30% et 50%. De même, il y'a lieu de noter d'après nos observations visuelles, l'absence de ressuage et de ségrégation au niveau des galettes.

Nous remarquons que l'ouvrabilité augmente légèrement en fonction du taux de DM, ceci est dû au fait que le sable naturel a tendance à absorber l'eau plus que le sable de marbre. Ces résultats sont en contradiction avec ceux trouvés par Binici et al. [34] et Hebhouh et al. [7]. D'après Khyalia et al. [105], l'augmentation de l'étalement est dû au fait que la demande en eau des mortiers diminue lorsque le taux de marbre augmente. En comparant un mortier à 50% de marbre avec le mortier de référence, ils ont remarqué que la demande en eau diminue de 6%,

ils expliquent cela par la propriété thixotropique du marbre qui fait que le mortier à base de marbre a besoin de moins d'énergie pour s'étaler que le mortier de référence.

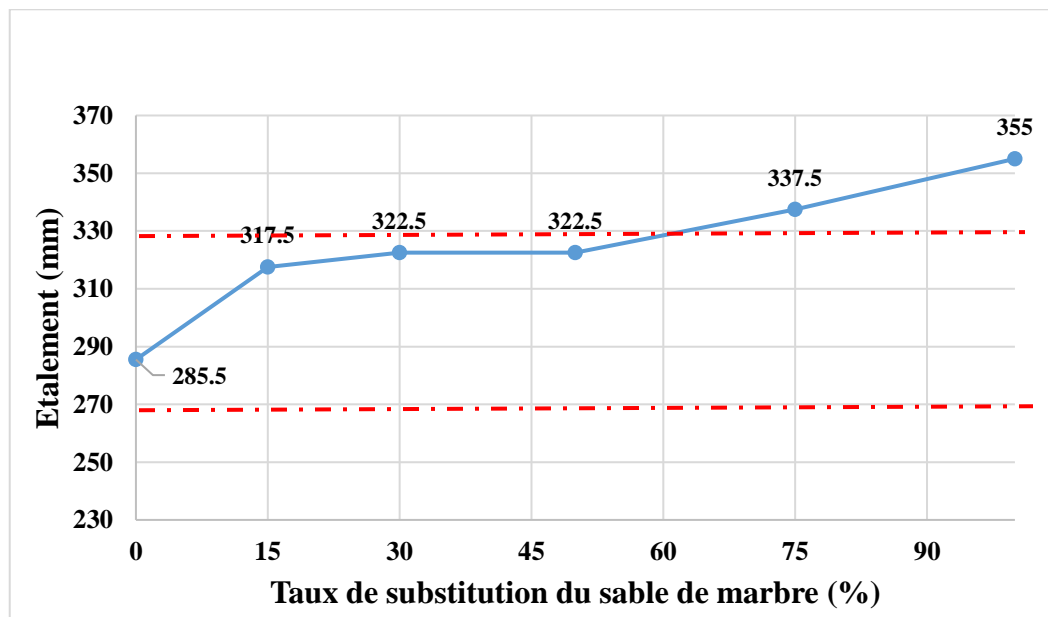


Figure 4.3 : Valeurs de l'étalement en fonction du taux de substitution du marbre.

4.3.2. Essai d'écoulement

Les figures 4.4 et 4.5 montrent les résultats du temps d'écoulement et la concordance avec les résultats obtenus par l'essai de V-funnel respectivement. Nous remarquons qu'ils indiquent la même tendance d'ouvrabilité pour les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50%, ceci se traduit par des valeurs comparables du temps d'écoulement pour 0% ,15% et 30%. Cependant, pour un taux de substitution de 50% de DM, nous avons le temps d'écoulement le plus faible, ceci peut être expliqué par le pouvoir filler du marbre qui engendre un effet de roulement entre les grains.

Au-delà d'une teneur de DM de 50%, on constate une augmentation du temps d'écoulement et de l'étalement avec l'augmentation du taux de dosage du DM, ainsi que la présence de ségrégation et de ressuage. Ceci est dû à la modification de la matrice cimentaire, en effet au-delà de 50% de substitution ; le sable de déchets de marbre augmente la viscosité en raison de

l'augmentation des interactions entre les particules fines ce qui rend le mélange collant. Pour rester dans les valeurs normatives, des ajustements du rapport E/L peuvent être apportés selon les quantités du sable de marbre utilisées [105].

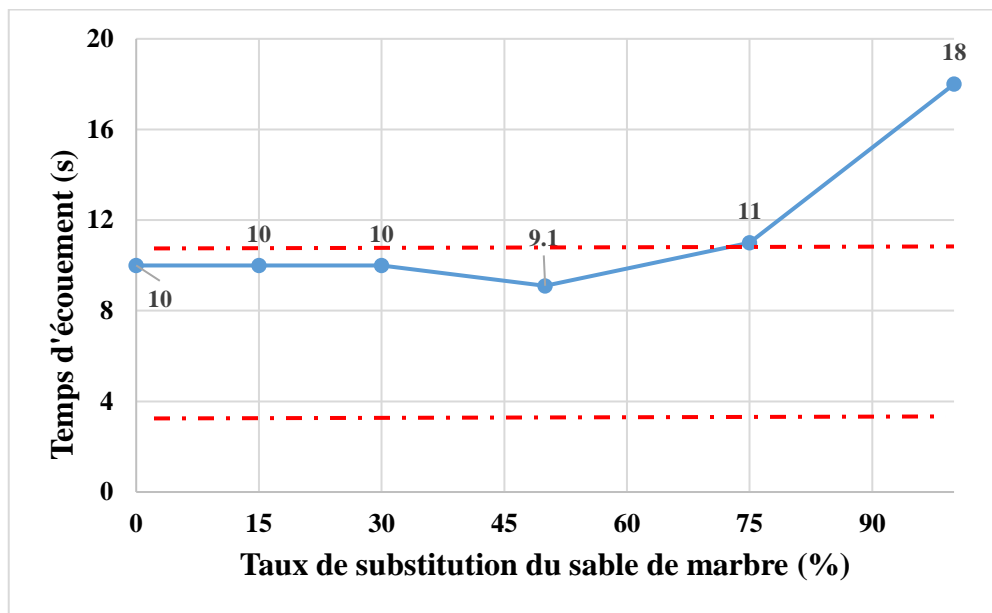


Figure 4.4 : Valeurs du temps d'écouement en fonction du taux de substitution du marbre.

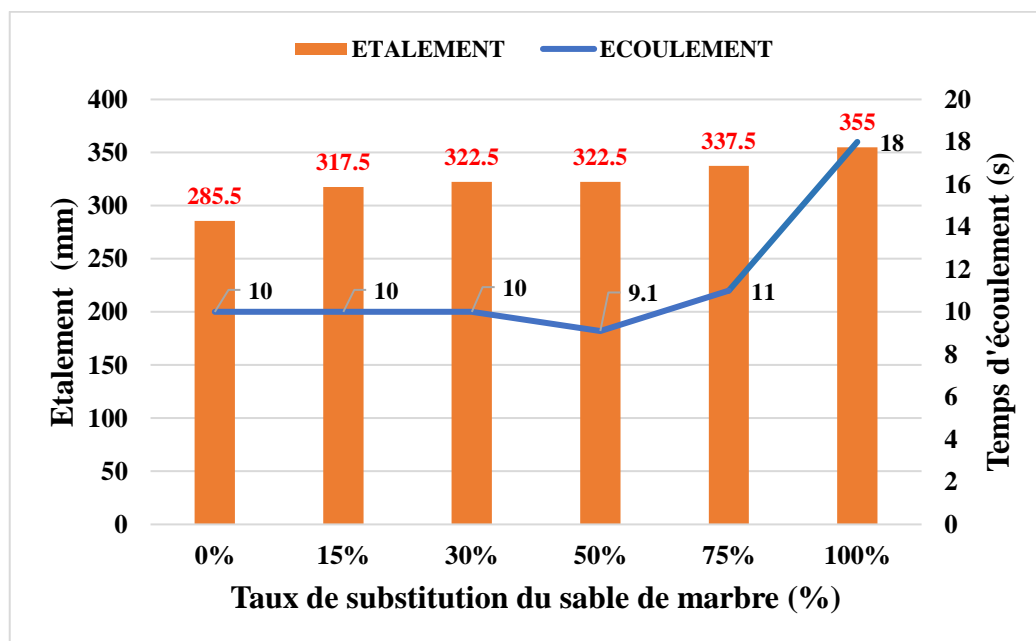


Figure 4.5 : Concordance des résultats d'étalement et du temps d'écouement.

En vue des résultats obtenus, seuls les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% seront gardés pour la suite des essais.

4.3.3. Essai de l'air occlus

L'essai de l'air occlus (Tableau 4.1) montre une légère augmentation des valeurs en fonction du taux de substitution du marbre, ceci est dû à la géométrie angulaire et allongée des grains du sable de marbre qui facilite l'emprisonnement de l'air, ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Topçu et al [93] dans leur étude.

Tableau 4. 1 : Valeurs de l'air occlus en fonction du taux de substitution du marbre.

Mortiers	M0	M15	M30	M50
Air occlus %	2.3	2.9	3.1	3.2

La figure 4.6 regroupe les résultats de l'air occlus et de l'étalement, nous remarquons une augmentation du pourcentage de l'air occlus et de l'étalement parallèlement à l'augmentation du taux de substitution du marbre. Le pourcentage de l'air occlus augmente de 26%, 34% et 39% pour des taux de substitution de 15%, 30% et 50% respectivement, concernant l'étalement, il augmente pratiquement de 12% pour tous les mortiers.

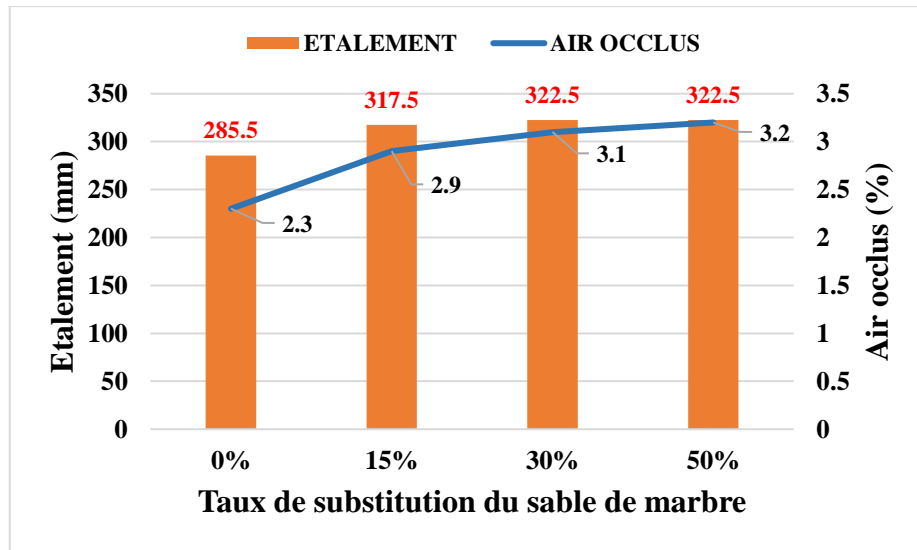


Figure 4.6 : Variation de l'air occlus et de l'étalement en fonction du taux de substitution du marbre.

D'après la figure 4.7, nous remarquons que l'étalement est proportionnel au pourcentage d'air occlus, la relation entre ces deux paramètres est donnée par l'équation $y = 43.38x + 187.27$ avec $R^2 = 0.96$. Cette proportionnalité est remarquée dans les résultats de Habhoub et al. [7] et Binici et al. [34].

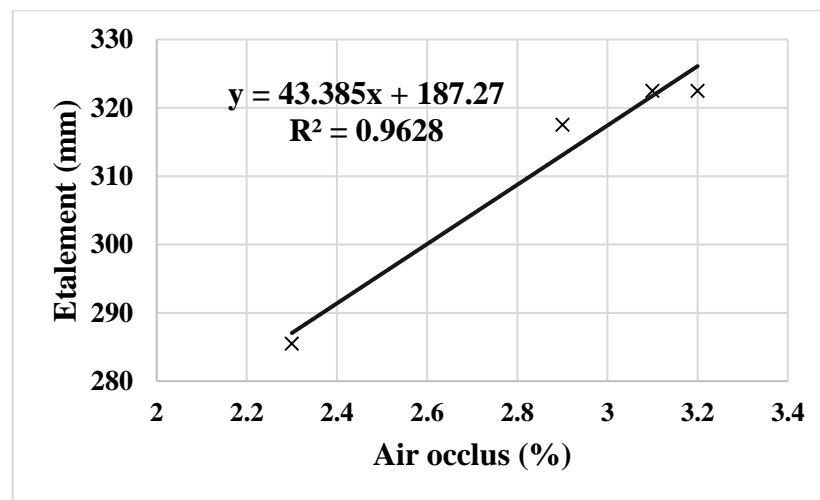


Figure 4.7 : corrélation entre les valeurs de l'étalement et les valeurs de l'air occlus.

4.3.4. Résistance à la compression

Les résultats des essais de compression simple pour les différents mortiers sont donnés dans la figure 4.8. Nous remarquons une légère augmentation de la résistance à la compression dans le temps par rapport au taux de substitution de 15% et 30% mais une diminution pour 50% de substitution. A 30% de DM nous avons un gain de 8% à 56 et 90 jours et pour 50% de DM nous avons une perte de 10% à 28 jours par rapport au mortier témoin. Pour le reste des valeurs nous avons des pertes ou des gains de moins de 5% (Figure 4.9). L'augmentation de la résistance à la compression peut être attribuée à la présence de fines en plus grandes quantités dans le marbre que dans le sable, ce qui permet de remplir les vides et d'augmenter la compacité. D'après Vardhan [133], la calcite présente dans le marbre réagit avec le C_3A du ciment ce qui confère au mortier une structure plus dense. Selon Munir et al. [13] la réaction entre la calcite et le ciment améliore la liaison du mortier ce qui permet d'avoir une meilleure résistance à la compression. Des résultats similaires ont été observés par différents auteurs [11], [15], [17], [19], [88], [96], [98].

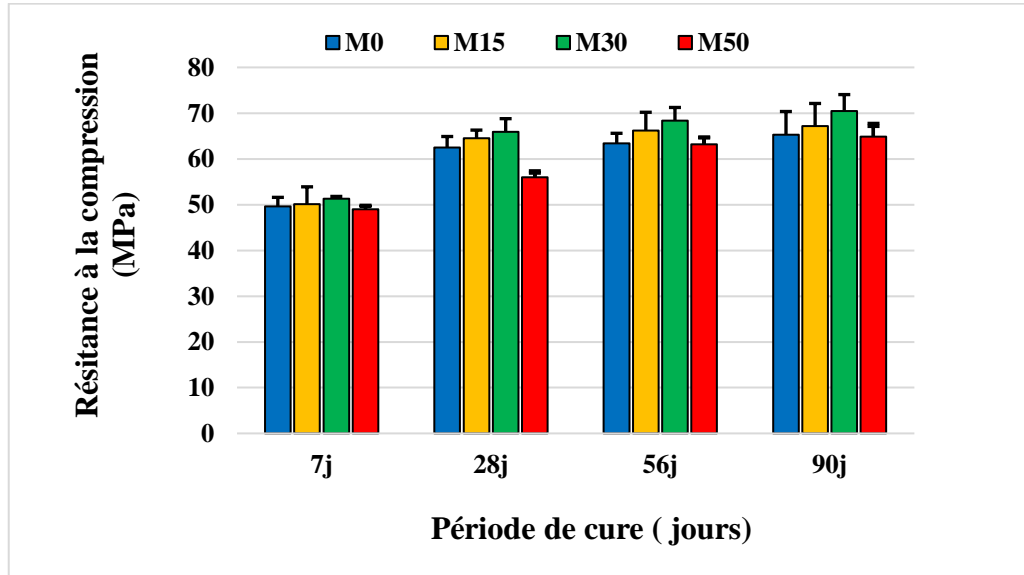


Figure 4.8 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de marbre à différents âges.

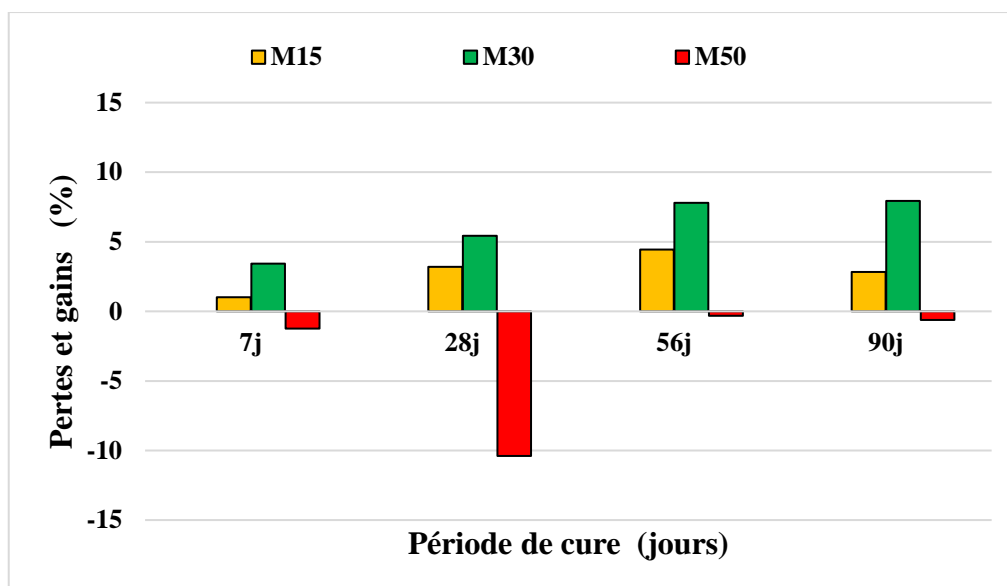


Figure 4.9 : Pertes et gains de résistance à la compression pour différents âges.

Au-delà de 30% de substitution, une diminution de la résistance est observée, ceci peut être dû à la présence d'une quantité plus importante de fines. D'après Danish et al. [134], une très grande présence de fines de marbre (comme pour le cas de 50% de substitution du sable par les déchets de marbre), qui peuvent être plus petites que les particules de ciment, influent sur la surface spécifique de ce dernier et sur le rapport E/L. Selon certains auteurs [17], [88], [96], les meilleurs résultats pour la résistance à la compression sont obtenus pour des taux de substitution entre 15 et 25% . En revanche, Demirel [97] a obtenu les meilleurs résultats à 100% de substitution.

4.3.5. Résistance à la flexion

La figure 4.10 présente les résultats des essais de flexion pour les différents mortiers. Nous pouvons remarquer une augmentation de la résistance pour tous les taux de substitution et à presque tous les âges. Pour 15% de DM, nous avons des gains de 8% et 13% à 56 et 90 jours respectivement. Pour 30% de DM nous avons des gains de 21%, 44%, 19% et 17% à 7, 28, 56 et 90 jours respectivement et pour 50% de DM nous avons des gains de 135%, 72%, 32% et 15% à 7, 28, 56 et 90 jours respectivement par rapport au mortier de référence (Figure 4.11).

En comparant tous les résultats, nous constatons que la résistance à la flexion est optimale à 90 jours pour un taux de substitution de 30%, des résultats similaires ont été observés par Varadharajan [102] et Vaidevi et al. [104]. Varadharajan [102] explique cette augmentation par l'hydratation continue et le remplissage des vides par les fines de marbre, ce qui améliore l'interface marbre-ciment et densifie la structure.

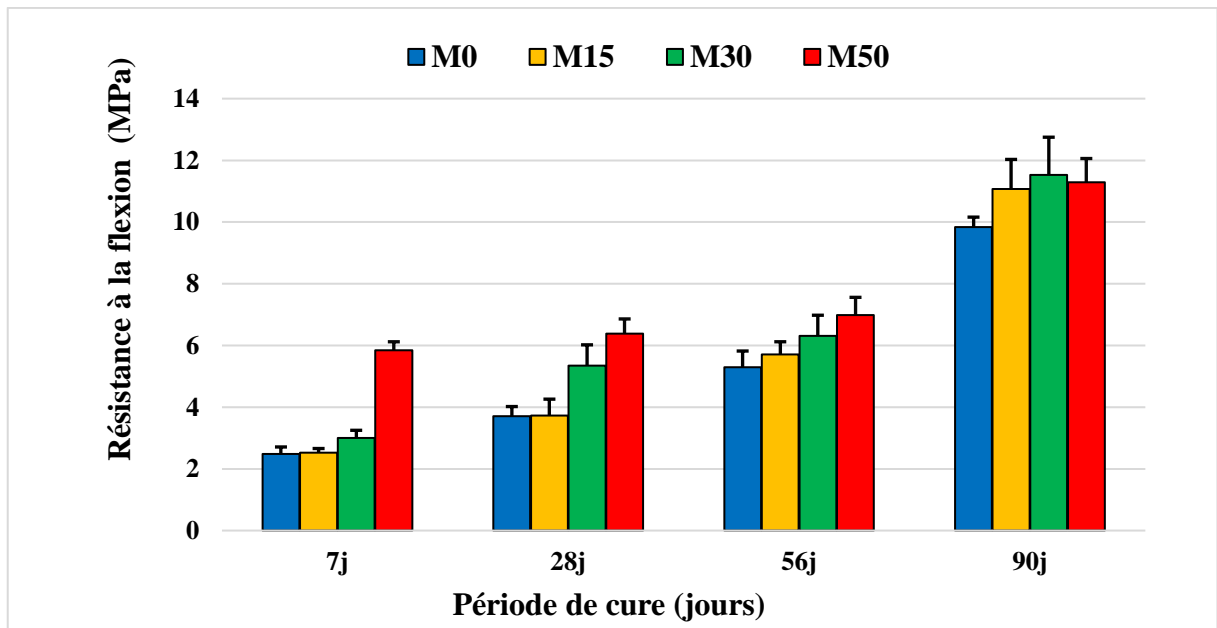


Figure 4.10 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de marbre à différents âges.

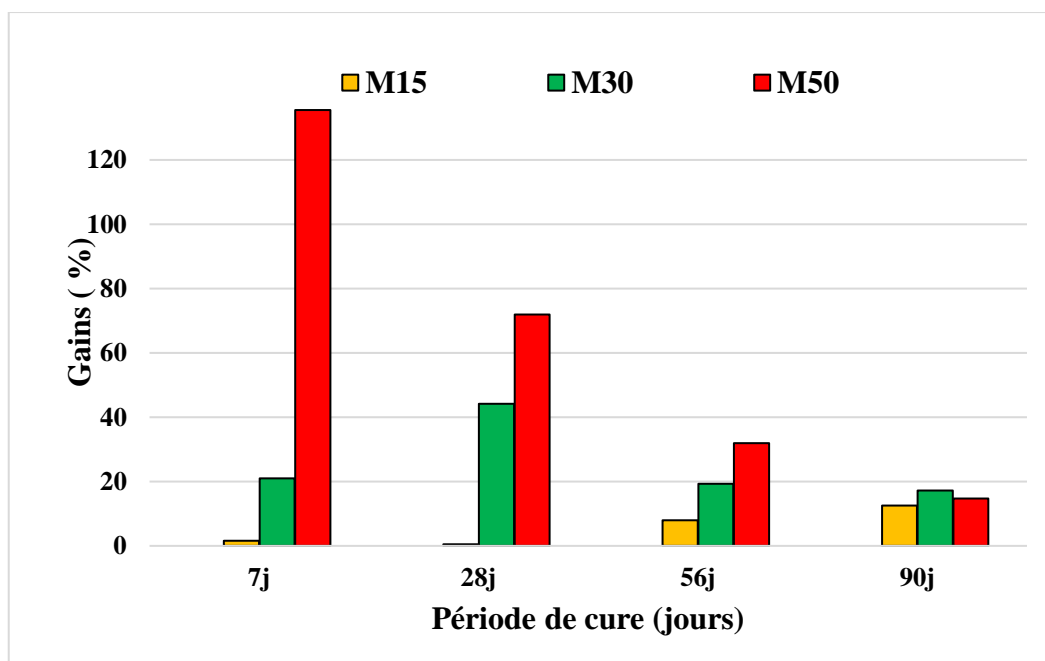


Figure 4.11 : Gains de résistance à la flexion pour différents âges.

4.3.6. Porosité

La figure 4.12 illustre les résultats de la porosité pour différents âges. Nous remarquons que la porosité diminue en fonction du taux de DM et en fonction de la période de cure. A titre d'exemple, si nous comparons le mortier à 30% de DM par rapport au mortier de référence, nous avons une diminution de 15%. En ce qui concerne la période de cure, si nous comparons le même mortier (30% de substitution) à 28 jours et à 90 jours, nous avons une diminution de 28%, ceci est lié à la réduction du diamètre moyen des pores qui sont raffinés, ce qui conduit à une microstructure plus dense en fonction de l'augmentation de taux de DM avec un pourcentage optimal de 30%.

Des comportements similaires ont été observés par Gameiro et al. [11], Demirel [97] et Topçu et al. [93]. D'après Gameiro et al. [11] des taux élevés de substitution ont tendance à augmenter la porosité à cause de la rugosité des grains de sable de marbre qui nuisent à la compacité du mortier (Figures 4.13 et 4.14), il en résulte une rétention d'air plus élevée, l'air retenu génère un réseau poreux plus ouvert et donc une absorption d'eau plus élevée.

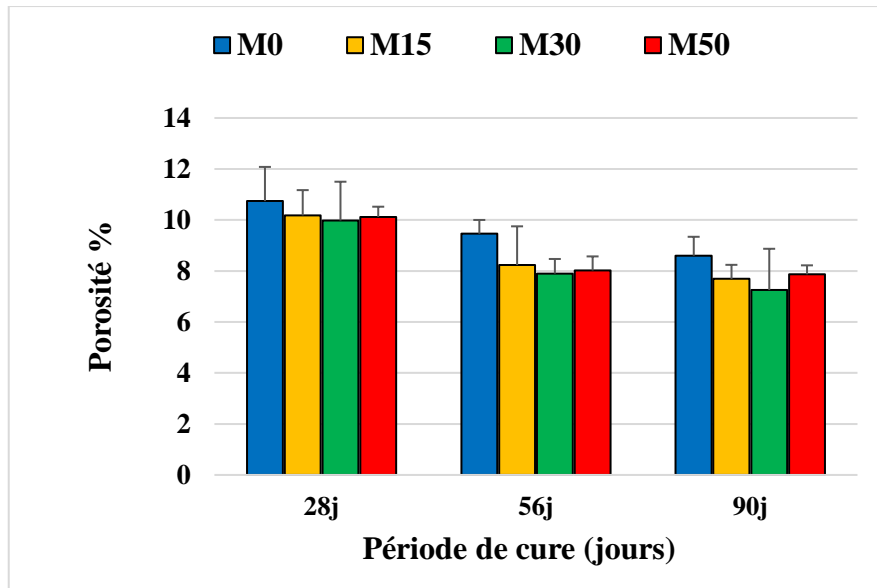


Figure 4.12 : Effet du taux de marbre sur la porosité à 28, 56 et 90 jours.

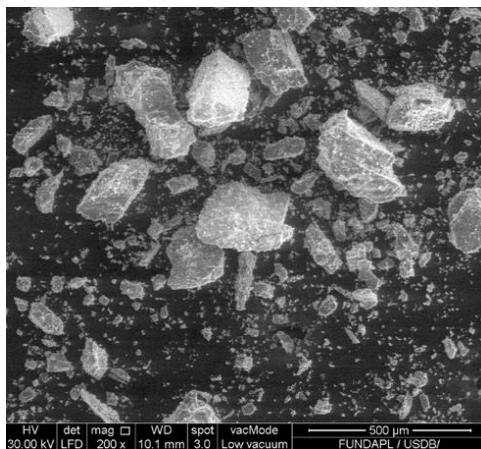


Figure 4.13 : Image microscopique des grains du sable de marbre.

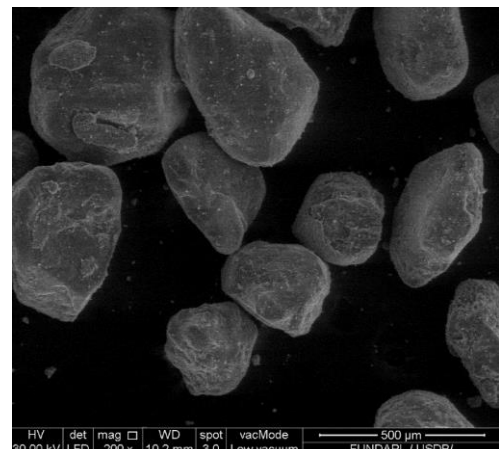


Figure 4.14 : Image microscopique des grains du sable naturel.

4.3.7. Absorption capillaire

Le taux d'absorption est un indicateur important de durabilité qui renseigne sur la possibilité de la pénétration de l'eau dans le mortier ou tout autre élément agressif. Les figures 4.15, 4.16 et 4.17 présentent les résultats de l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité jusqu'à 6h à 28, 56 et 90 jours respectivement, pour les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50%.

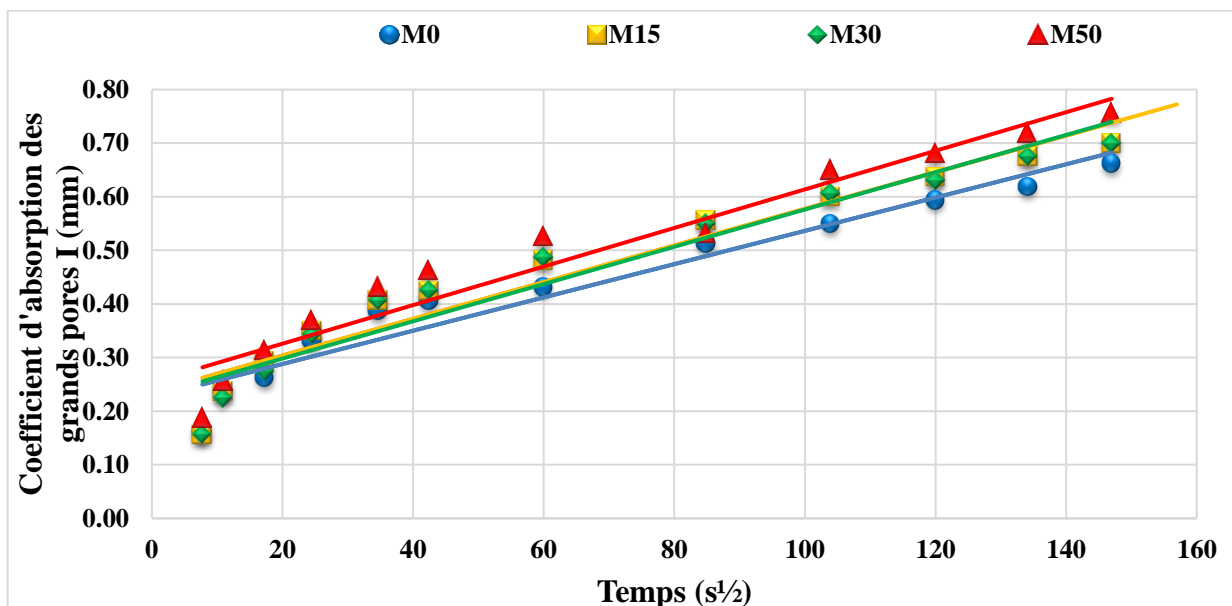


Figure 4.15 : Absorption capillaire des grands pores des mortiers à 28 jours.

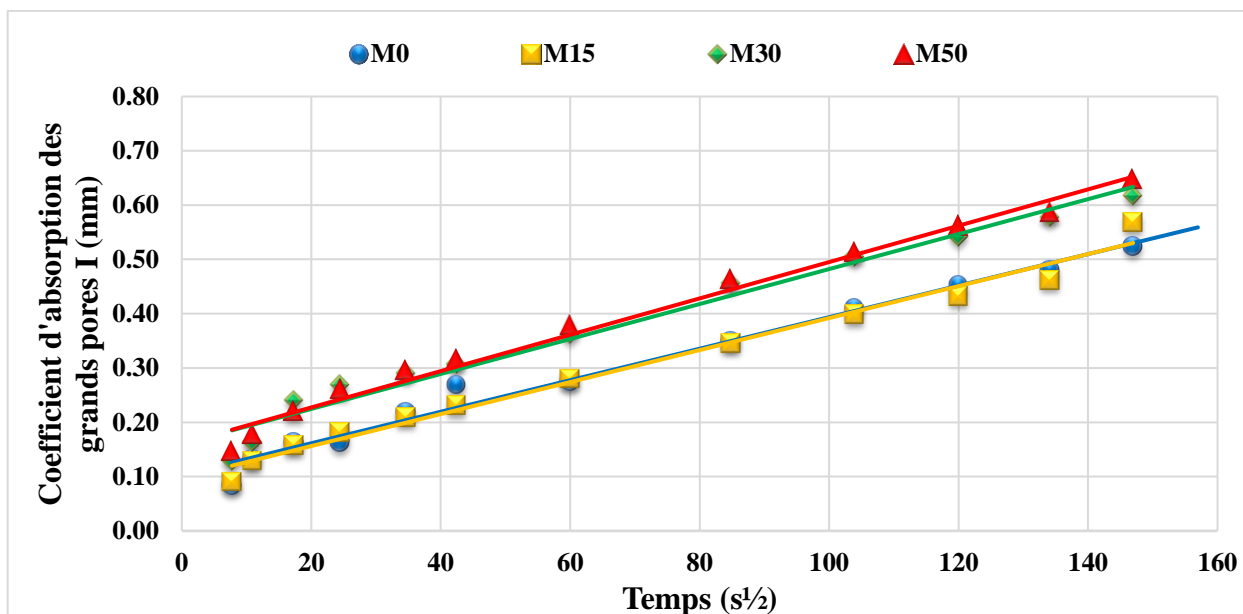


Figure 4.16 : Effet du sable de marbre sur l'absorption capillaire à 56 jours.

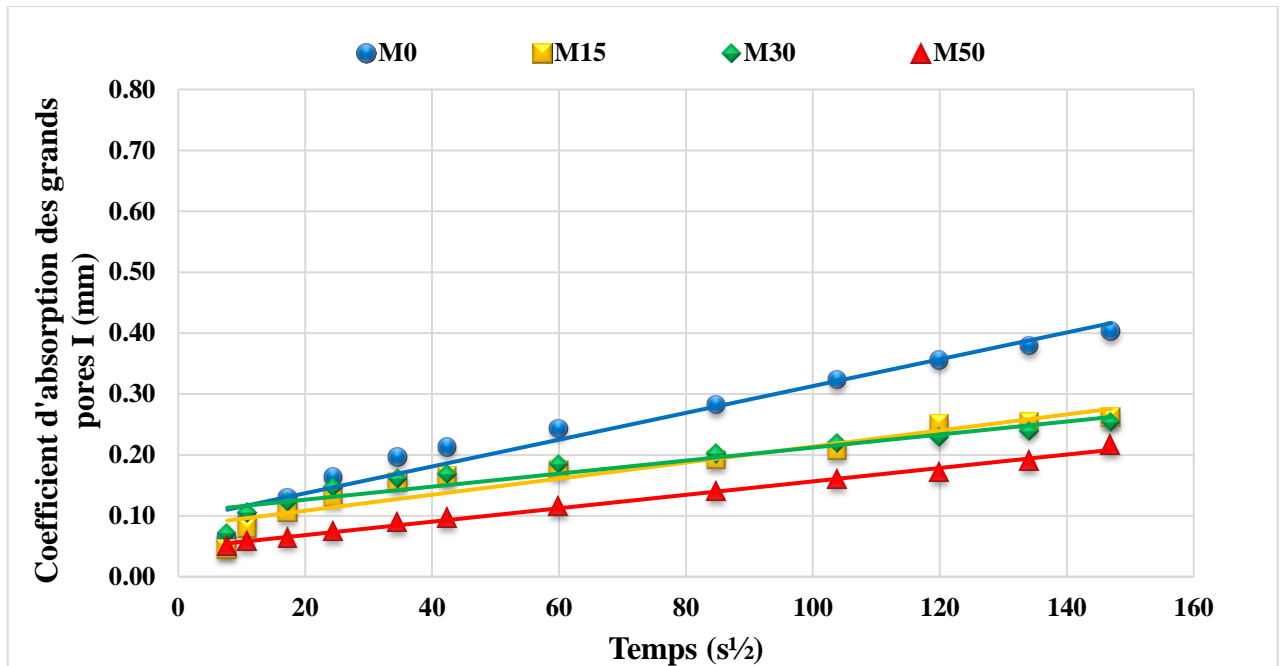


Figure 4.17 : Effet du sable de marbre sur l'absorption capillaire à 90 jours.

Quel que soit le taux de substitution, nous pouvons remarquer une diminution de la quantité d'eau absorbée entre les différents âges, cette diminution est plus significative à 30% et 50% de substitution.

En comparant la quantité d'eau absorbée entre des mortiers contenant des taux différents de marbre au même âge, nous remarquons que les résultats sont comparables à 28 et 56 jours, quel que soit le taux de substitution, cependant à 90 jours, la différence avec le mortier de référence devient plus visible. Nous avons des diminutions par rapport au mortier de référence de 35%, 37% et 46% pour des taux de substitution de 15%, 30% et 50% respectivement, ce qui signifie que la compacité des mélanges augmente avec le temps et en fonction du taux de substitution.

Les figures 4.18, 4.19, 4.20 et 4.21 permettent de comparer les résultats de l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité après 6h pour les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement, et ceci à 28, 56 et 90 jours. Quel que soit le taux de substitution, nous pouvons remarquer une diminution de la quantité d'eau absorbée entre les différents âges, cette diminution est plus significative à 30% et 50% de substitution.

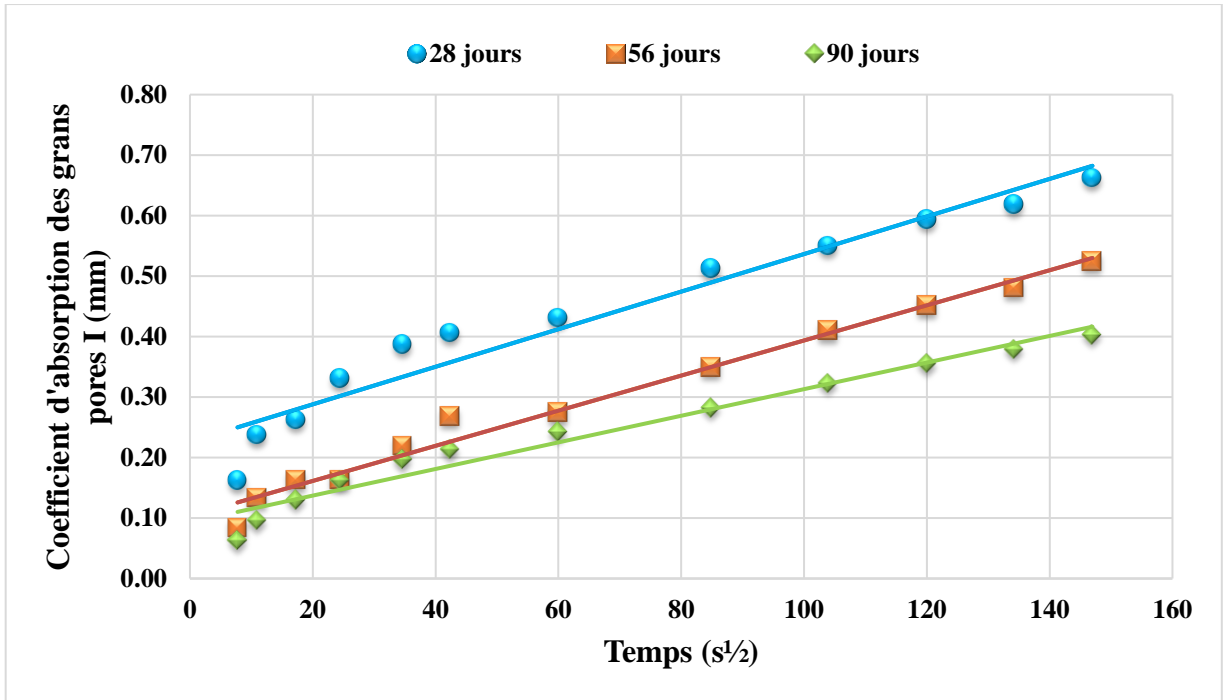


Figure 4.18 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 0% de marbre.

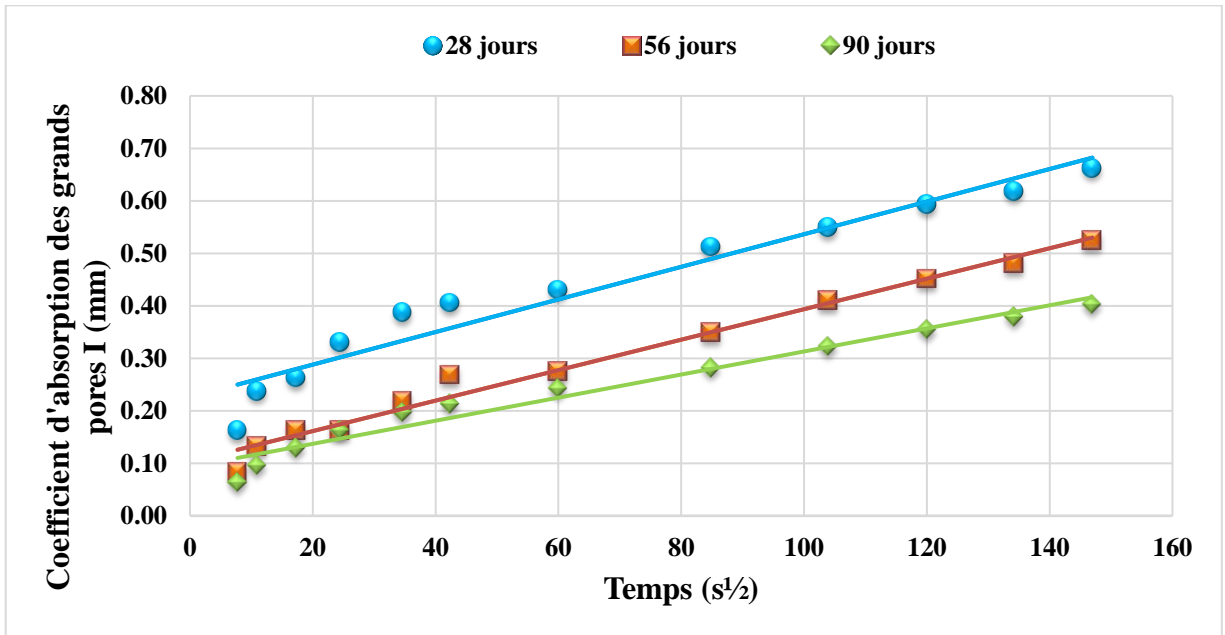


Figure 4.19 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 15% de marbre.

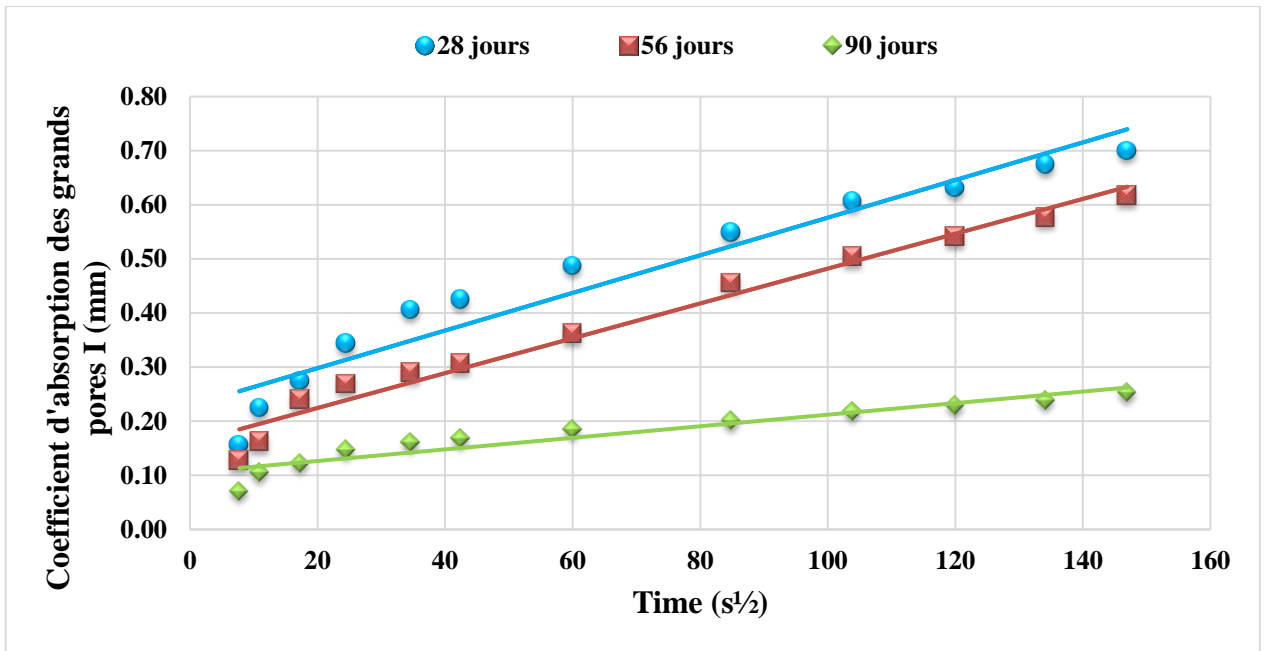


Figure 4.20 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 30% de marbre.

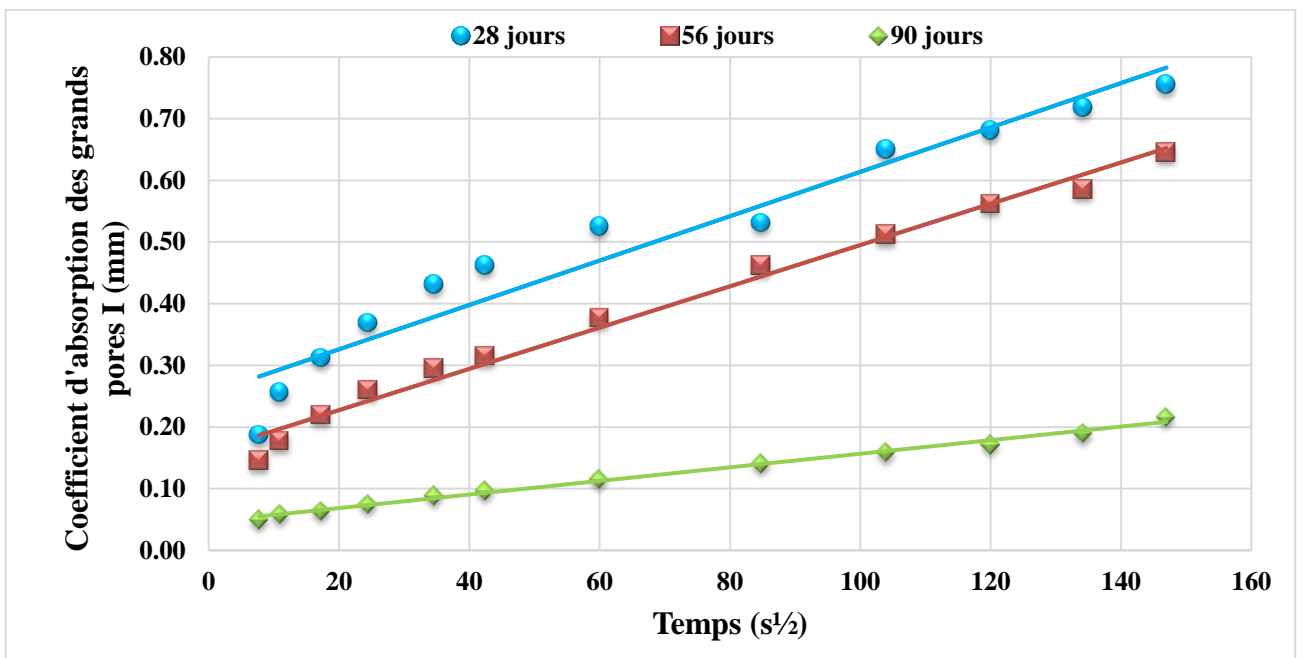


Figure 4.21 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 50% de marbre.

D'après Gameiro et al. [11], l'incorporation des fines de marbre induit une réduction de l'absorption capillaire en raison de l'amélioration de l'adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats de marbre du à leurs forme angulaire et allongée. André et al. [19] ont remarqué que l'incorporation du marbre réduisait l'absorption capillaire pour des taux de substitution entre 15% et 30%.

En observant des échantillons au microscope électronique, Singh et al. [94] ont remarqué que le béton contenant du marbre était plus dense et présentait moins de pores que le béton de référence (Figure 4.22), ce qui explique la diminution du taux d'absorption. Pour Kaplan [135], les résultats optimaux sont obtenus à 15% de DM.

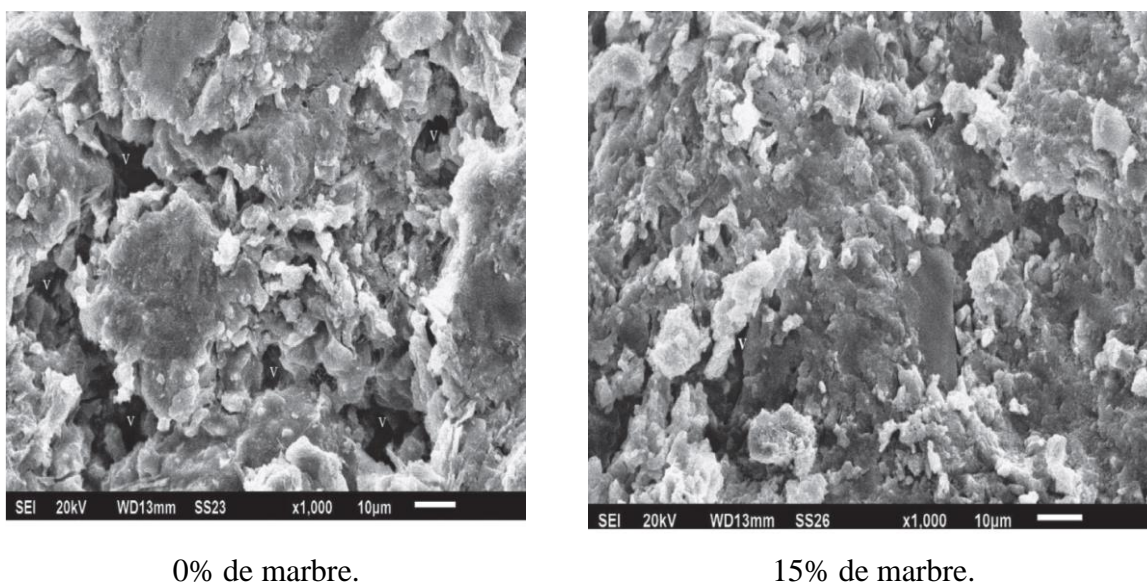


Figure 4.22 : Image microscopique d'échantillons avec et sans marbre [94].

Les figures 4.23 et 4.24 regroupent les résultats de la sorptivité pour 28, 56 et 90 jours. Nous remarquons une légère augmentation en fonction du taux de marbre à 28 et 56 jours, par contre, nous avons une diminution en fonction du taux de marbre à 90 jours. Cette diminution a été observé par Demirel [97] et Topcu et al. [93]. La plus grande quantité d'eau est absorbée dans la première heure, après l'absorption devient plus lente.

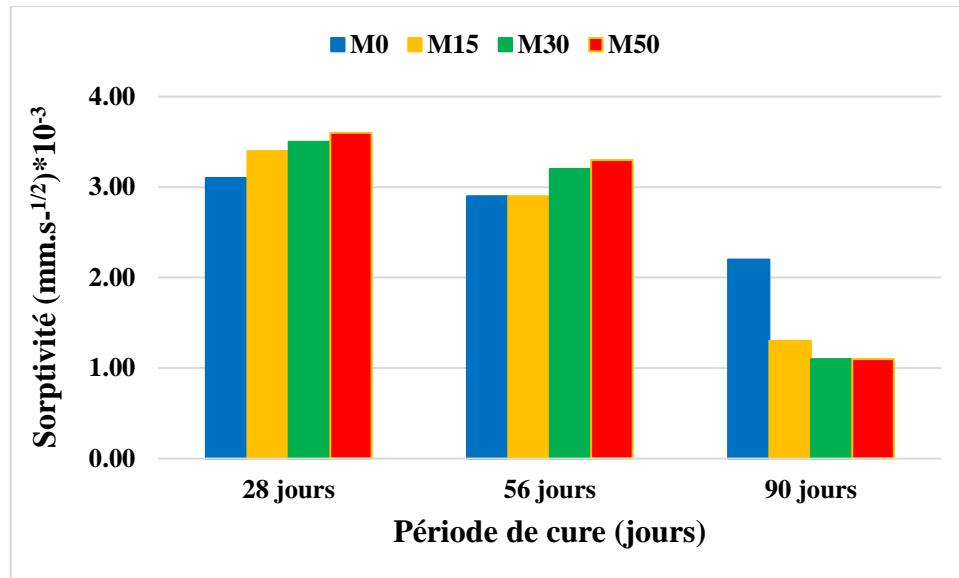


Figure 4.23 : La sorptivité jusqu'à 6h à 28, 56 et 90 jours.

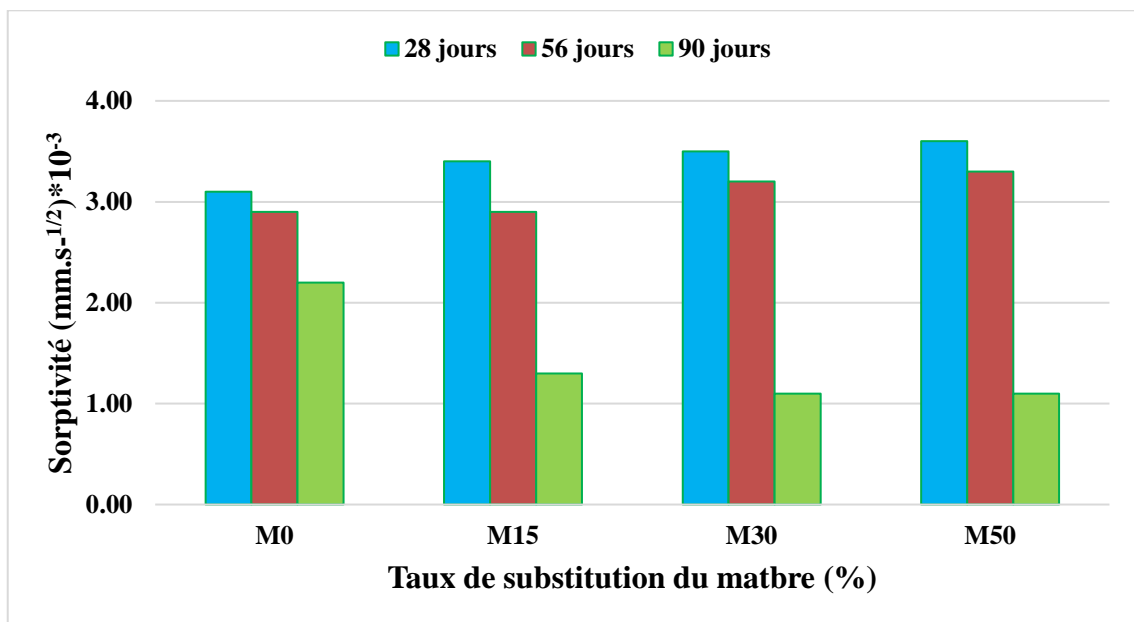


Figure 4.24 : Evolution de la sorptivité pour les différents mortiers.

4.3.8. Résistance aux sulfates

La figure 4.25 présente les résultats de la résistance à la compression en fonction du temps d'immersion des échantillons dans la solution de $MgSO_4$, nous remarquons une augmentation

de la résistance à 60 jours d'immersion. A partir de 120 jours d'immersion, une diminution de la résistance par rapport à 60 jours d'immersion est observée.

En considérant les résultats à 30 jours d'immersion comme référence, nous avons des augmentations de : 20%, 25%, 39% et 43% pour les taux de substitution du marbre de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement, ceci à 60 jours. A 180 jours d'immersion, nous avons une diminution de 13% pour le taux de substitution de 0%, pour les taux de substitution de 15%, 30% et 50%, la résistance à la compression augmente de 10%, 14% et 12% respectivement.

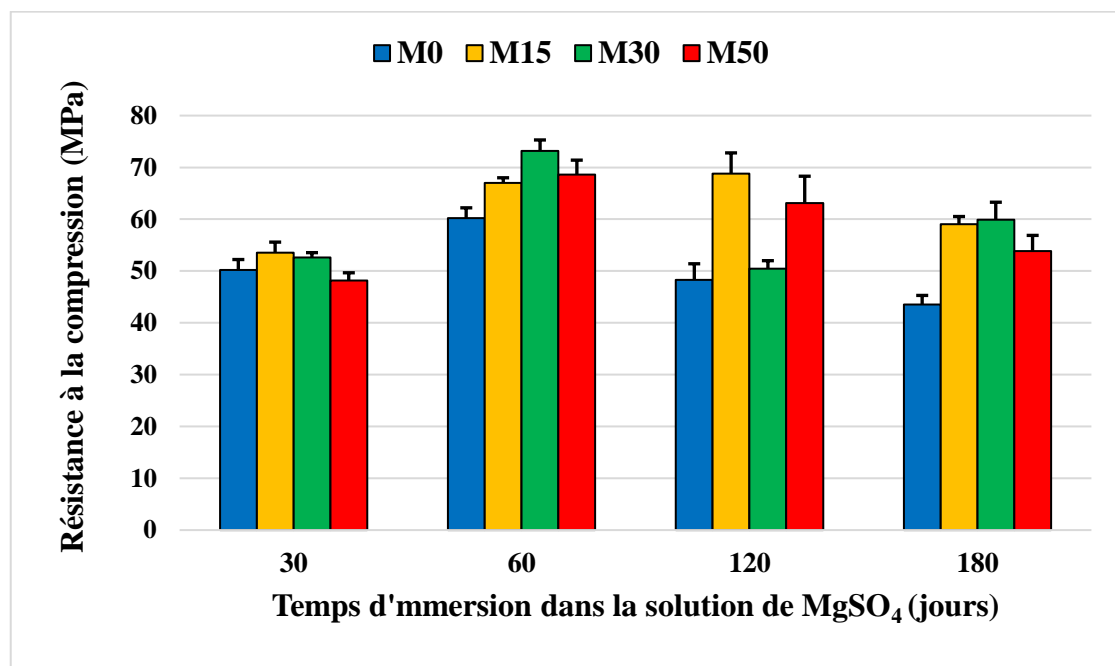


Figure 4.25 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps d'immersion dans la solution de $MgSO_4$.

Ces résultats peuvent être expliqués par le raffinement des pores dû à la présence des particules fines du marbre, ce qui empêche la pénétration des sulfates. Des résultats similaires ont été observés par différents chercheurs [34]–[36], ils expliquent ces résultats par l'effet filler du marbre qui densifie la structure. Selon Sadek et al. [36], la diminution de la résistance en présence des sulfates n'est observée qu'au-delà de 7 mois.

D'après la figure 4.26, nous remarquons que la résistance à la flexion augmente en fonction de la période d'immersion dans la solution de $MgSO_4$.

En effet, nous remarquons qu'à 180 jours d'immersion nous avons une augmentation de 54%, 60%, 54% et 63% pour les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement par rapport à 30 jours d'immersion. Toutefois, en comparant les résultats au même âge, les valeurs restent comparables quel que soit le taux de substitution du marbre.

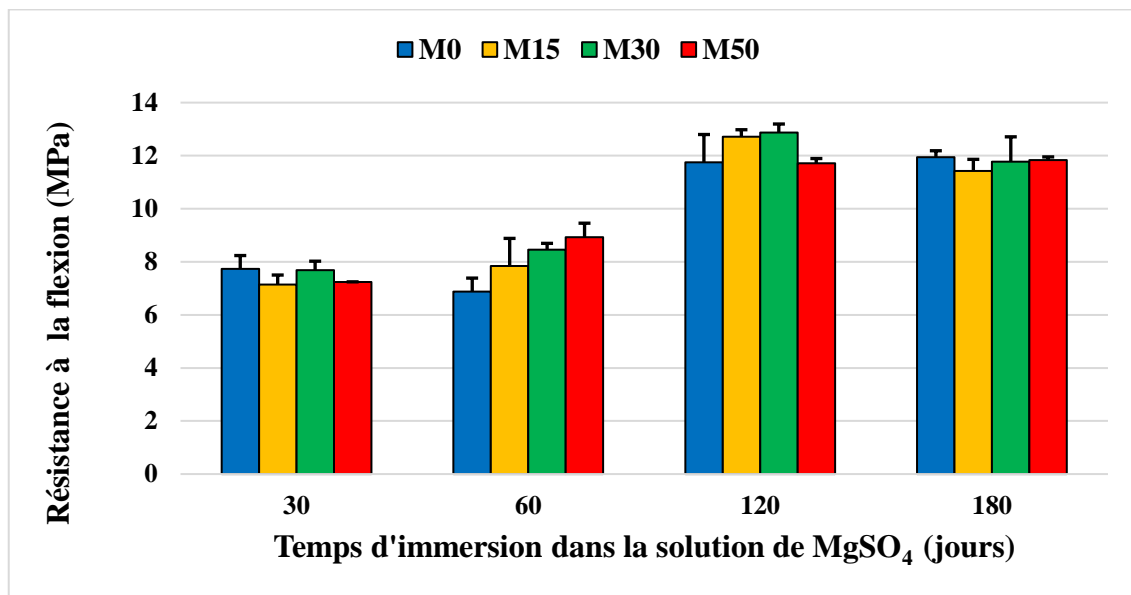


Figure 4.26 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps d'immersion dans la solution de $MgSO_4$.

Les résultats de l'absorption capillaire et de la sorptivité sont donnés dans les figures de 4.27 à 4.34. Nous remarquons que l'absorption augmente avec la période d'immersion dans la solution de $MgSO_4$. En effet, le taux d'absorption des mélanges M0, M15, M30 et M50 est de 2.89 mm, 2.97 mm, 2.99 mm et 2.43 mm respectivement à 30 jours d'immersion et il est de 5.62 mm, 6.14 mm, 5.30 mm et 4.42 mm respectivement à 180 jours d'immersion. Soit une augmentation de 95%, 107%, 77% et 94% pour les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement.

En comparant les résultats par rapport au taux de substitution sable par les déchets de marbre, nous remarquons qu'à 180 jours d'immersion, l'absorption capillaire diminue pour les mélanges M30 et M50 par rapport à M0, ce qui permet de dire que le marbre induit un raffinement des pores et donc une diminution de l'absorption.

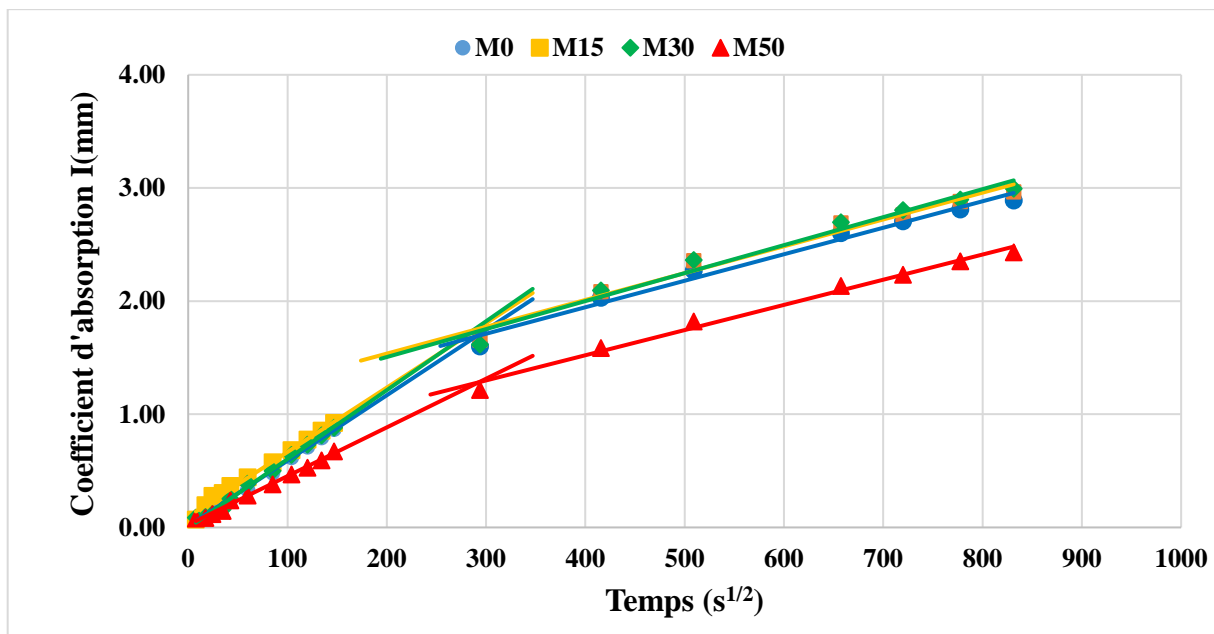


Figure 4.27 : Absorption capillaire à 30 jours d'immersion dans la solution de MgSO₄.

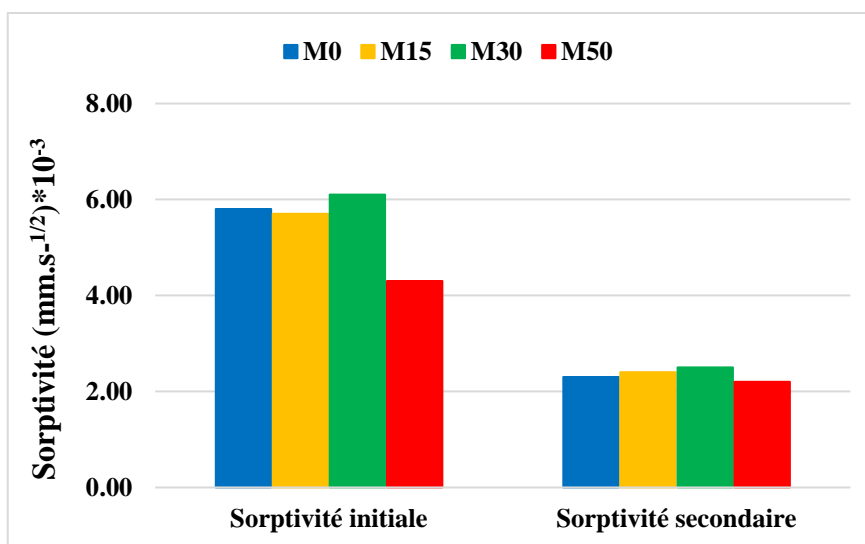


Figure 4.28 : Sorptivité à 30 jours d'immersion dans la solution de MgSO₄.

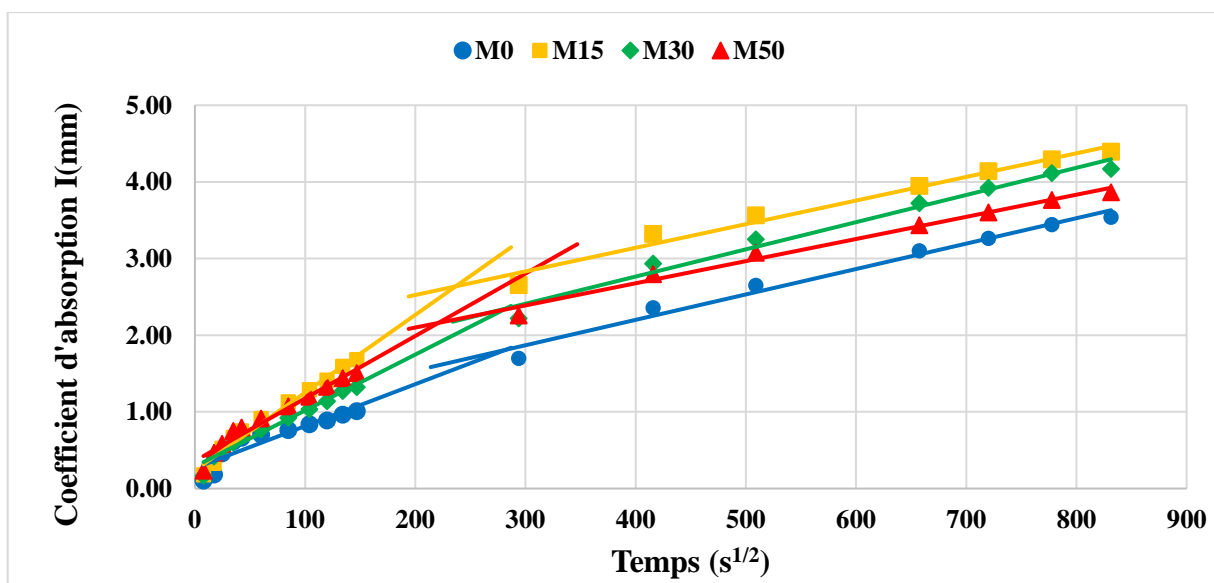


Figure 4.29 : Absorption capillaire à 60 jours d’immersion dans la solution de MgSO₄.

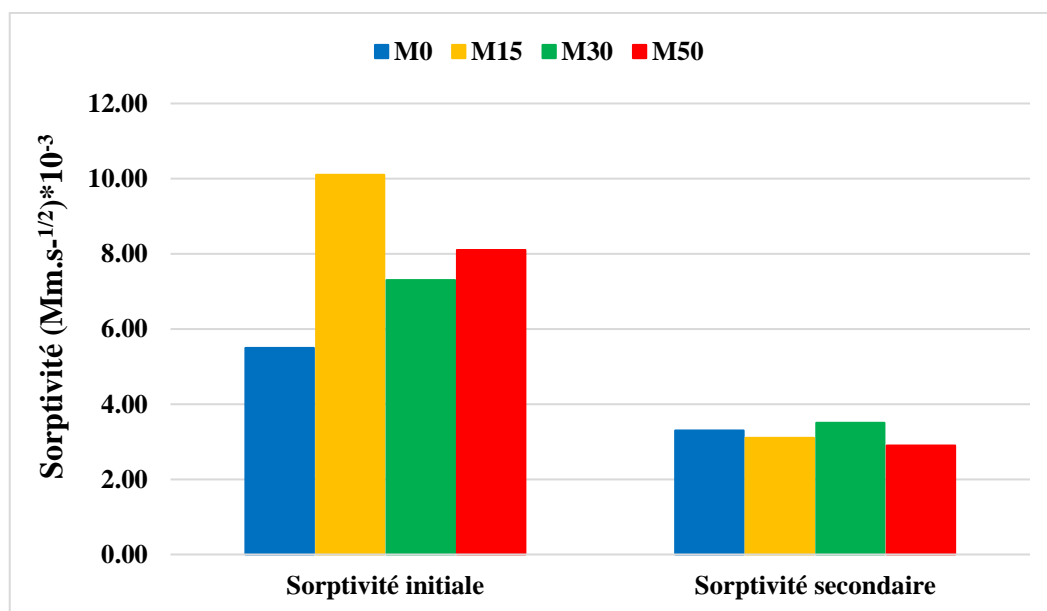


Figure 4.30 : Sorptivité à 60 jours d’immersion dans la solution de MgSO₄.

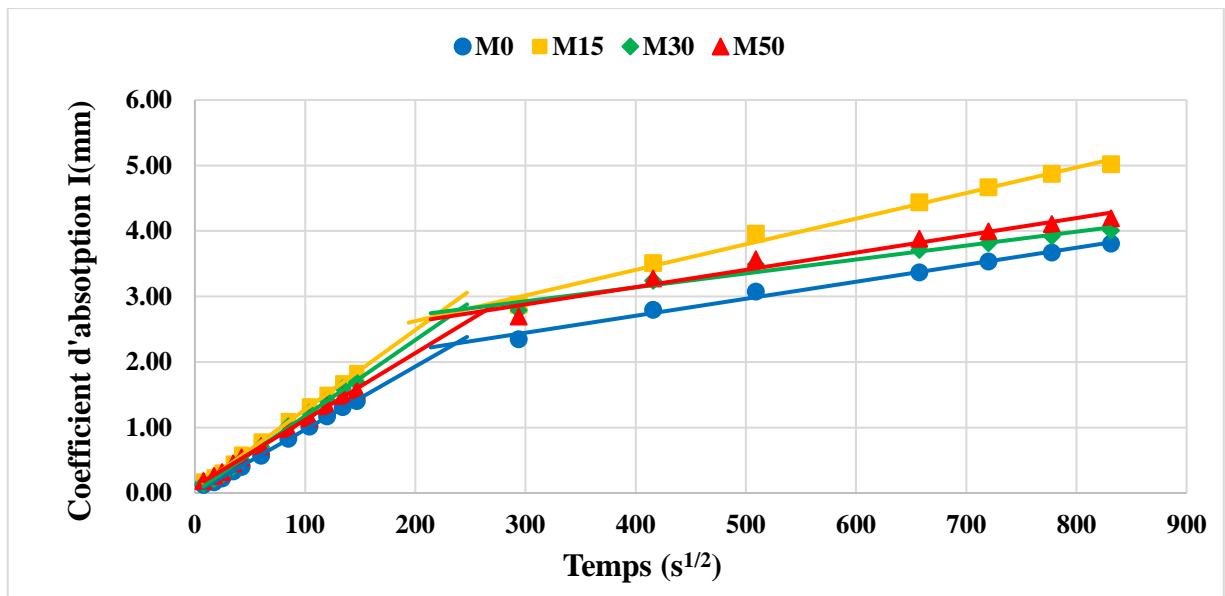


Figure 4.31 : Absorption capillaire à 120 jours d’immersion dans la solution de MgSO₄.

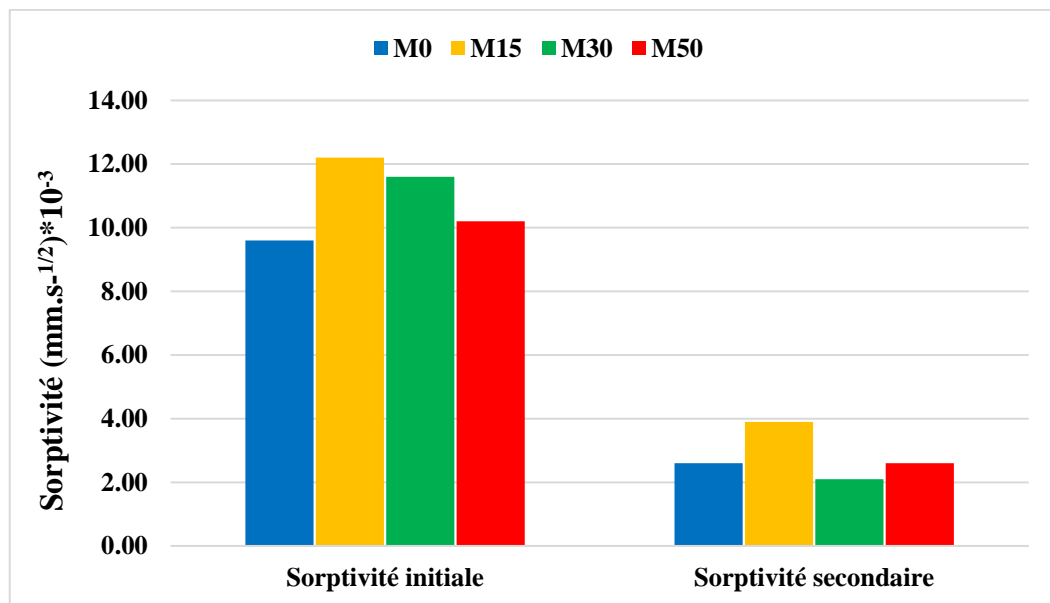


Figure 4.32 : Sorptivité à 120 jours d’immersion dans la solution de MgSO₄.

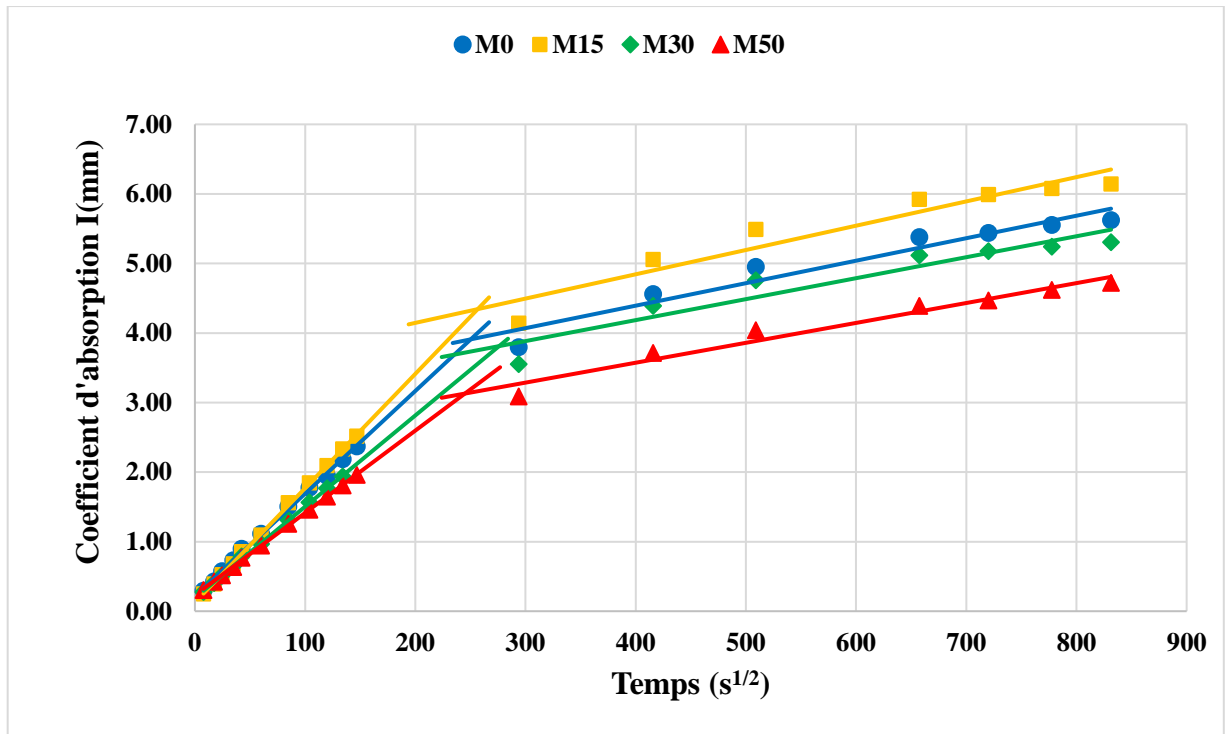


Figure 4.33 : Absorption capillaire à 180 jours d’immersion dans la solution de MgSO₄.

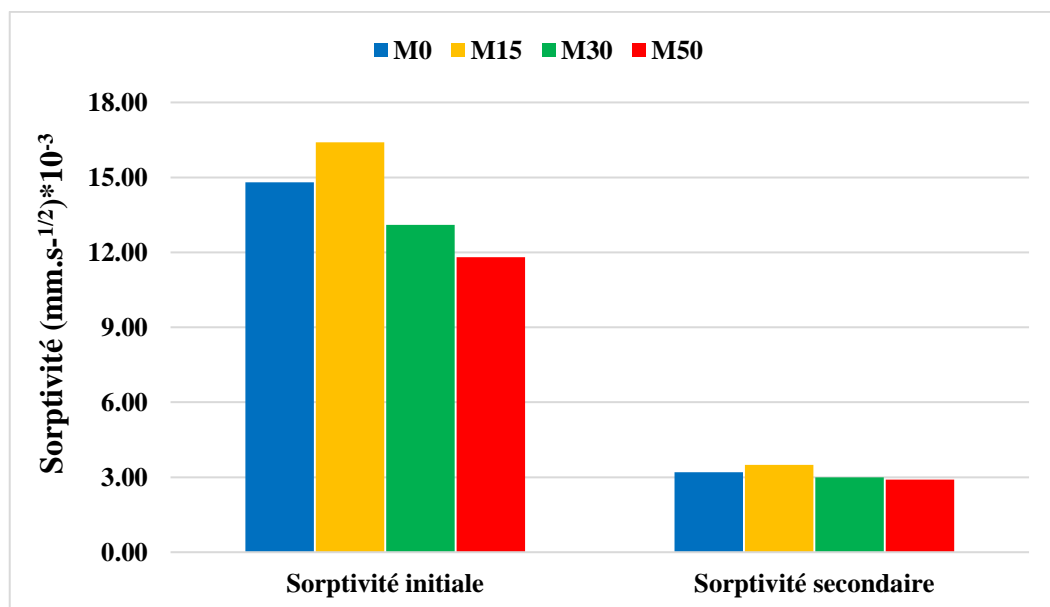


Figure 4.34 : Sorptivité à 180 jours d’immersion dans la solution de MgSO₄.

D'après les résultats de la figure 4.35, nous remarquons qu'à 30 jours d'immersion la sorptivité initiale qui caractérise la cinétique des gros pores affiche des valeurs comparables pour les mélanges M0, M15, M30, mais une diminution de 24% pour les mélanges M50 par rapport à M0.

A 180 jours d'immersion, une diminution de 10% et de 19% pour les taux de substitution de 30% et 50% respectivement est remarquée, ceci par rapport à M0.

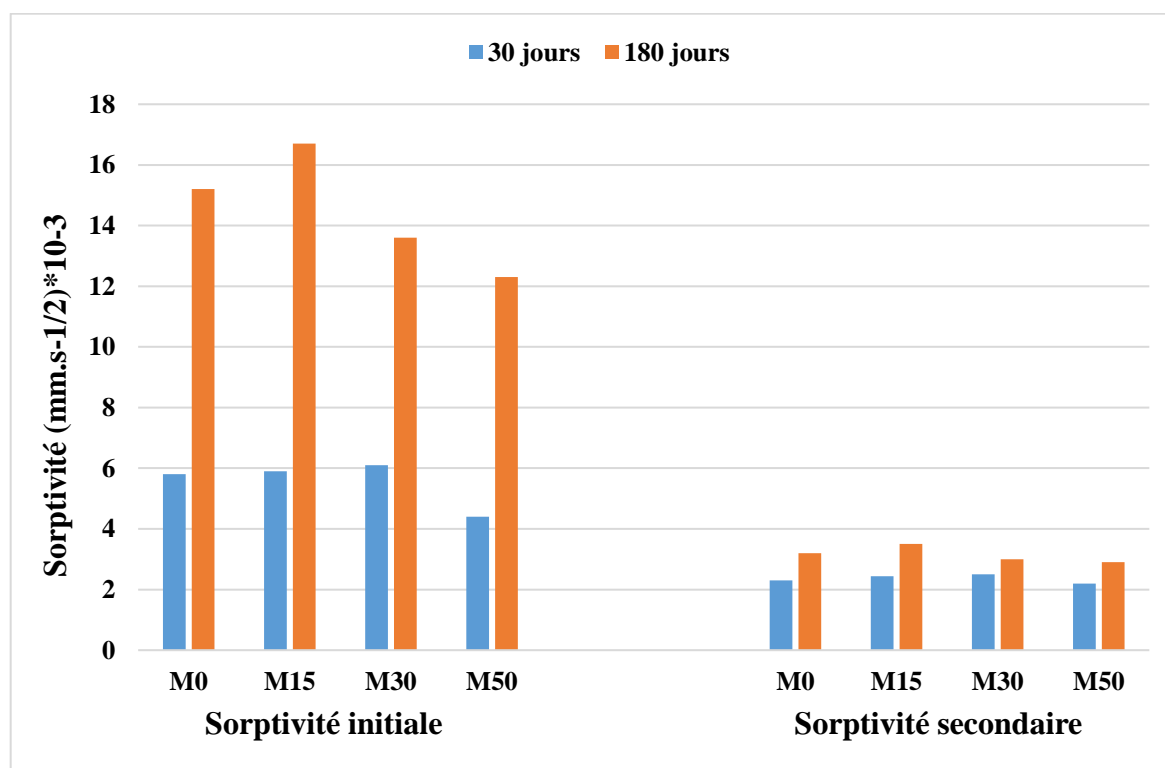


Figure 4.35 : Sorptivité à 30 jours et 180 jours d'immersion dans la solution de MgSO_4 .

Il est à noter que la sportivité augmente de façon significative à 180 jours d'immersion par rapport à 30 jours d'immersion, ceci pour tous les mortiers. Cette augmentation est de 162%, 183%, 123% et 179% pour des taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement.

L'augmentation de la sorptivité initiale s'explique par un volume plus important de gros pores dus à la présence de la solution de MgSO_4 . Nous remarquons dans la figure 4.36 que l'éprouvette à 0% de marbre est plus dégradée que l'éprouvette à 30% de marbre. Cette différence

d'apparence peut être attribué à la différence des mécanismes associées aux sulfates par rapport à la présence ou non du marbre.

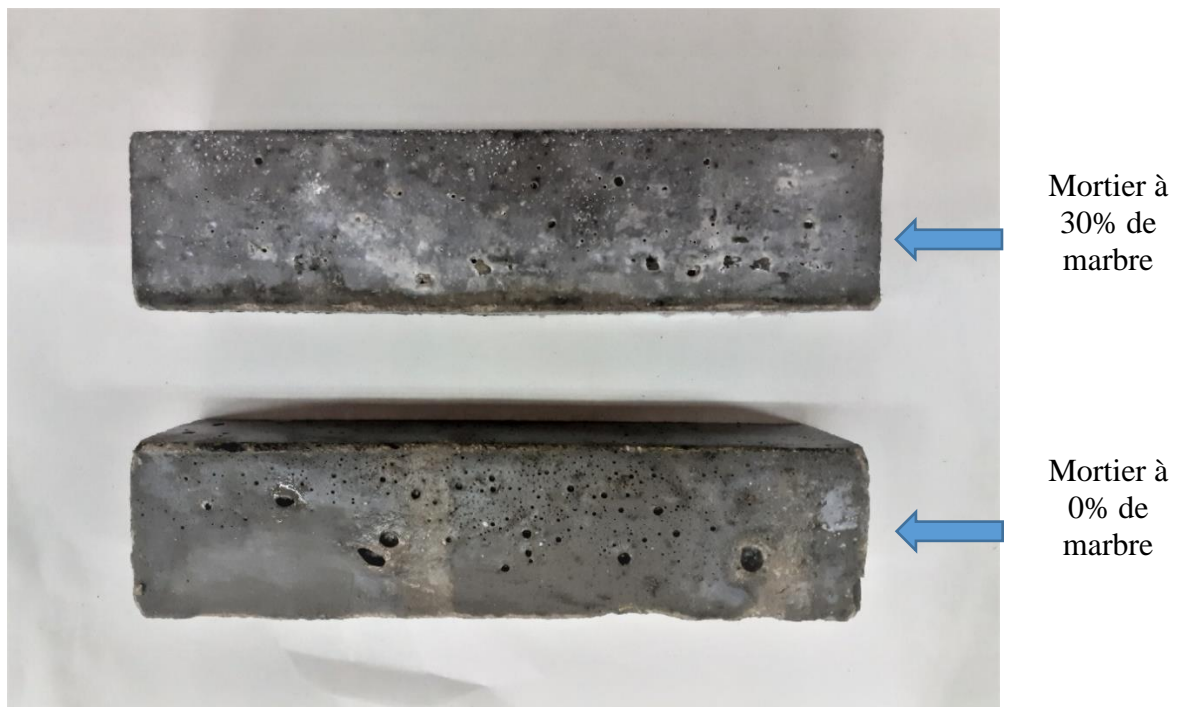


Figure 4.36 : Etat des mortiers à 180 jours d'immersion dans $MgSO_4$.

Concernant la sorptivité secondaire des petits pores, elle est moins importante que la sorptivité initiale, cette augmentation est de l'ordre de 39%, 43%, 20% et 32% pour des taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement.

Des échantillons à 0% et 30% de marbre ont été examinés par MEB et EDX. Concernant les échantillons immergés pendant 30 jours dans la solution de $MgSO_4$, nous remarquons la même structure quel que soit le taux de substitution de marbre (figures 4.37 et 4.38), nous pouvons observer la présence de monosulfates et aucune présence de bâtonnets d'ettringite.

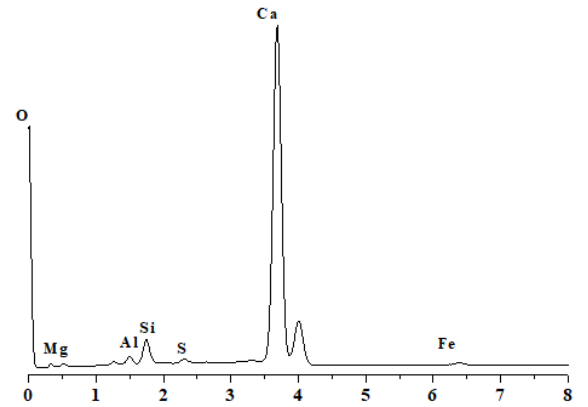
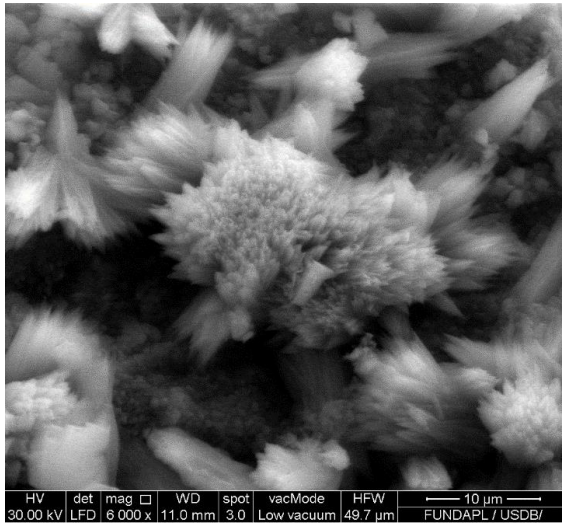


Figure 4.37 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 0% de marbre immergés 30 jours dans la solution de $MgSO_4$.

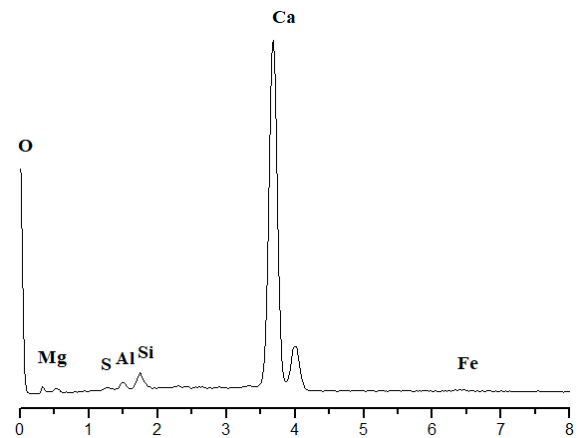
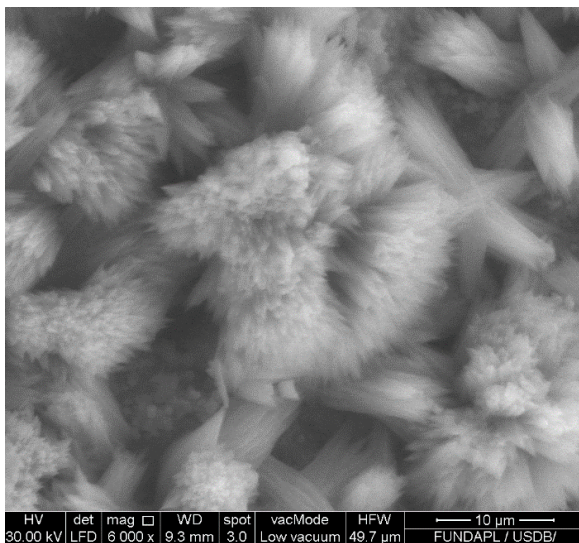


Figure 4.38 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 30% de marbre immergés 30 jours dans la solution de $MgSO_4$.

Par contre dans les échantillons conservés pendant 180 jours dans la solution de $MgSO_4$ (Figures 4.39 et 4.40), la présence d'ettringite est observé dans l'échantillon à 0% de marbre mais pas dans l'échantillon à 30% de marbre. Donc, les éprouvettes à 0% de marbre ont été plus affectés par la solution de sulfates que les éprouvettes à 30% de marbre. Ceci s'explique par la structure

plus dense des éprouvettes à 30% de marbre par rapport à ceux à 0% de marbre, donc moins de pores et donc un matériau moins perméable au passage des sulfates.

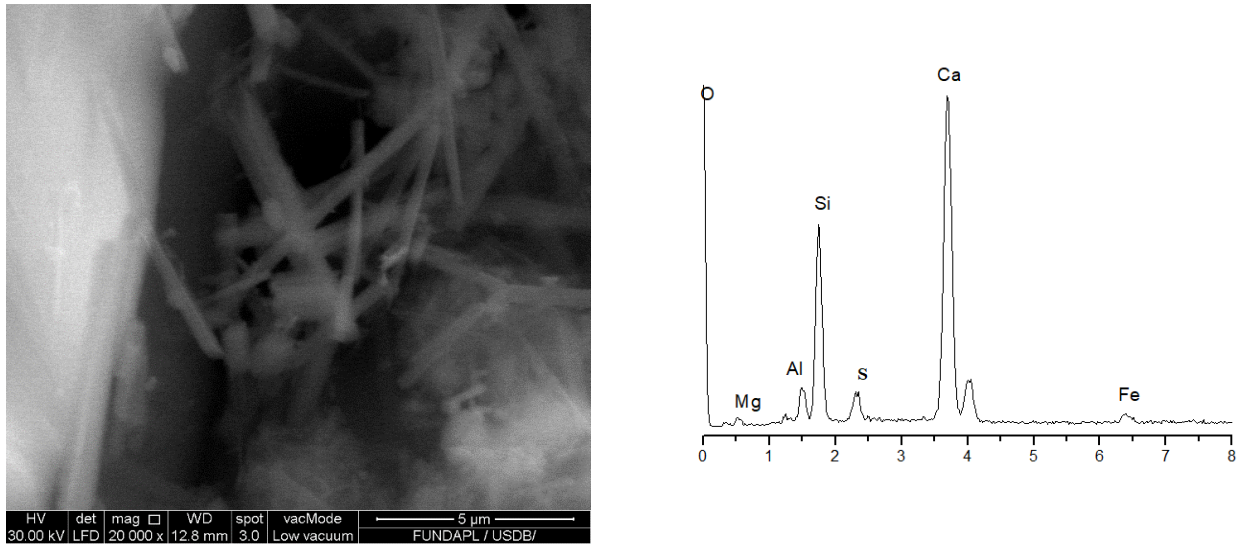


Figure 4.39 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 0% de marbre immergés 180 jours dans la solution de $MgSO_4$.

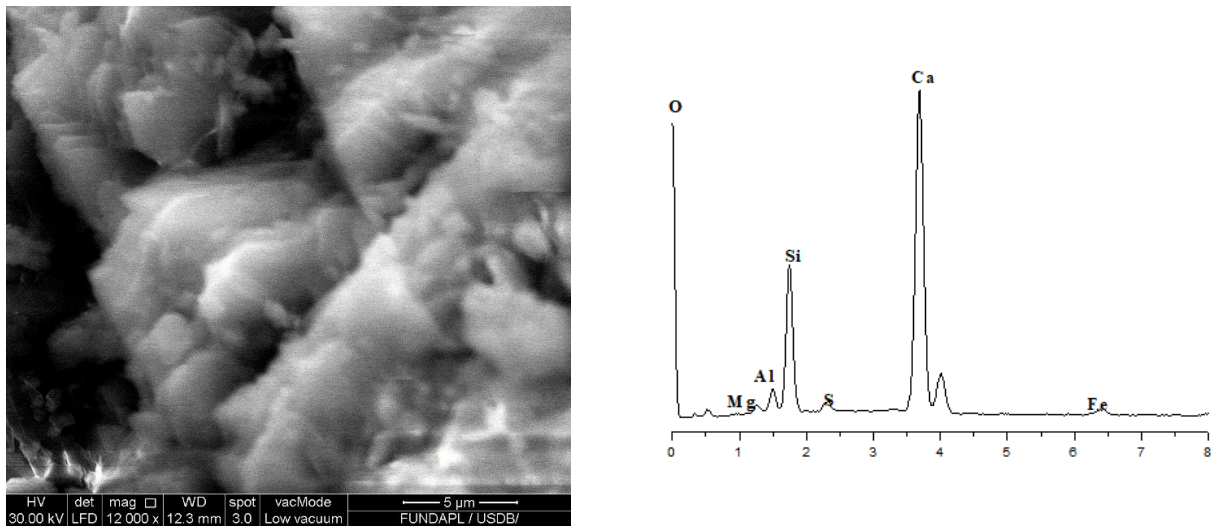


Figure 4.40 : Image MEB et analyse EDX des mortiers à 30% de marbre immergés 180 jours dans la solution de $MgSO_4$.

En observant des échantillons avec et sans marbre par MEB, Singh et al. [94] ont remarqué que les échantillons à base de marbre présentaient une structure plus dense et moins poreuse que l'échantillon sans marbre.

En effet, nous pouvons observer dans la figure 4.41, les résultats de l'essai de la porosité à 30 et 180 jours d'immersion dans la solution de $MgSO_4$, nous remarquons que la porosité augmente de 34% et de 16% à 180 jours d'immersion pour les éprouvettes à 0% et 30% de marbre respectivement. Cette densification de la structure due à la présence du marbre a été observée par Ince et al. [44] en examinant des échantillons par MEB et en les comparant avec le mortier témoin.

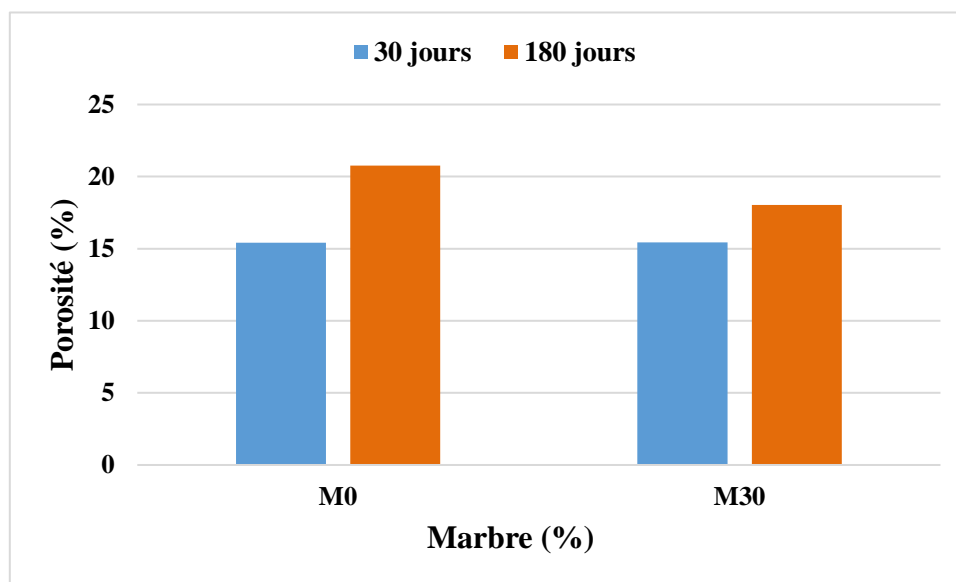


Figure 4.41 : Porosité à 30 jours et 180 jours d'immersion dans la solution de $MgSO_4$.

En examinant les échantillons par EDX, nous remarquons que les quantités de soufre sont plus élevées dans les bords par rapport à la section interne, elle varie de (1.37 ± 0.24) à (0.50 ± 0.14) pour les échantillons à 30% et de (3.41 ± 0.73) à (0.98 ± 0.19) pour les échantillons à 0% (Tableau 9), ce qui signifie que la détérioration due aux sulfates n'a pas affecté l'intérieur de l'éprouvette. Il est à remarquer que les valeurs du calcium (Ca) et du magnésium (Mg) sont plus importantes à l'extérieur alors que le silicium (Si) augmente à l'intérieur.

Tableau 4. 2 : Eléments chimiques à l'intérieur et à l'extérieur des échantillons à 180 jours d'immersion dans la solution de MgSO₄.

Marbre (%)	Section	Eléments						
		Ca (%)	Si (%)	Al (%)	Fe (%)	O (%)	Mg (%)	S (%)
0	Section Externe	32.25	27.44	6.21	0.56	28.08	1.96	3.41
	Section interne	10.75	40.81	11.58	6.28	25.53	1.25	0.98
30	Section Externe	55.04	19.76	2.32	2.20	16.74	1.44	1.49
	Section interne	12.69	63.83	1.01	0.73	19.84	1.26	0.63

4.4. Effet de l'ajout des fibres

4.4.1. Résultats à l'état frais

Les résultats présentés dans les figures 4.42 et 4.43 montrent les essais d'étalement et d'écoulement sur des mortiers avec ajout des déchets de fibres de verre.

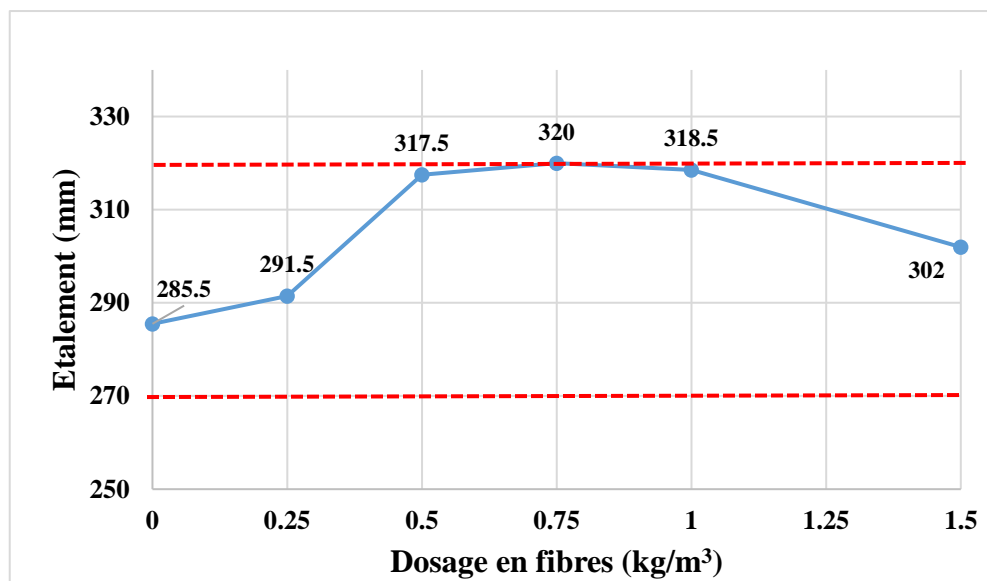


Figure 4.42 : Valeurs de l'étalement en fonction du dosage en fibres de verre.

Nous remarquons une augmentation de l'étalement parallèlement à une diminution du temps d'écoulement en fonction de l'augmentation de la quantité des déchets de fibres de verre ajouté. L'augmentation de l'étalement est de 2.1%, 11.2%, 12.08%, 11.56% et 5.78% pour les dosages de 0.25, 0.5, 0.75, 1 et 1.5 kg/m³ respectivement.

Pour le temps d'écoulement, la diminution est 1.2%, 23.9%, 27.2%, 27% et 25% pour les mêmes dosages. Cette diminution peut s'expliquer par le fait que les fibres ayant un faible diamètre, les fibres ont tendance à remplir les vides entre les agrégats, réduisant ainsi le volume d'eau nécessaire. Toutefois, au-delà du dosage de 0.75 kg/m³, nous remarquons une diminution de l'étalement, cette diminution est de 5.78% pour un dosage en fibres de 1.5 kg/m³. En effet, à un certain dosage des fibres, ces derniers ont tendance à s'agglomérer avec les granulats ce qui augmente la demande en eau.

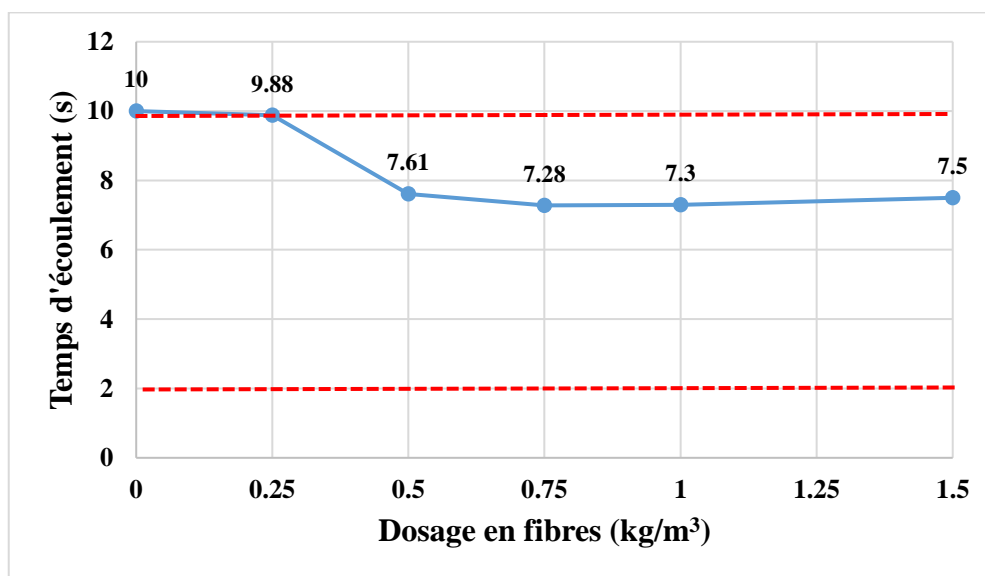


Figure 4.43 : Valeurs du temps d'écoulement en fonction du dosage en fibres de verre.

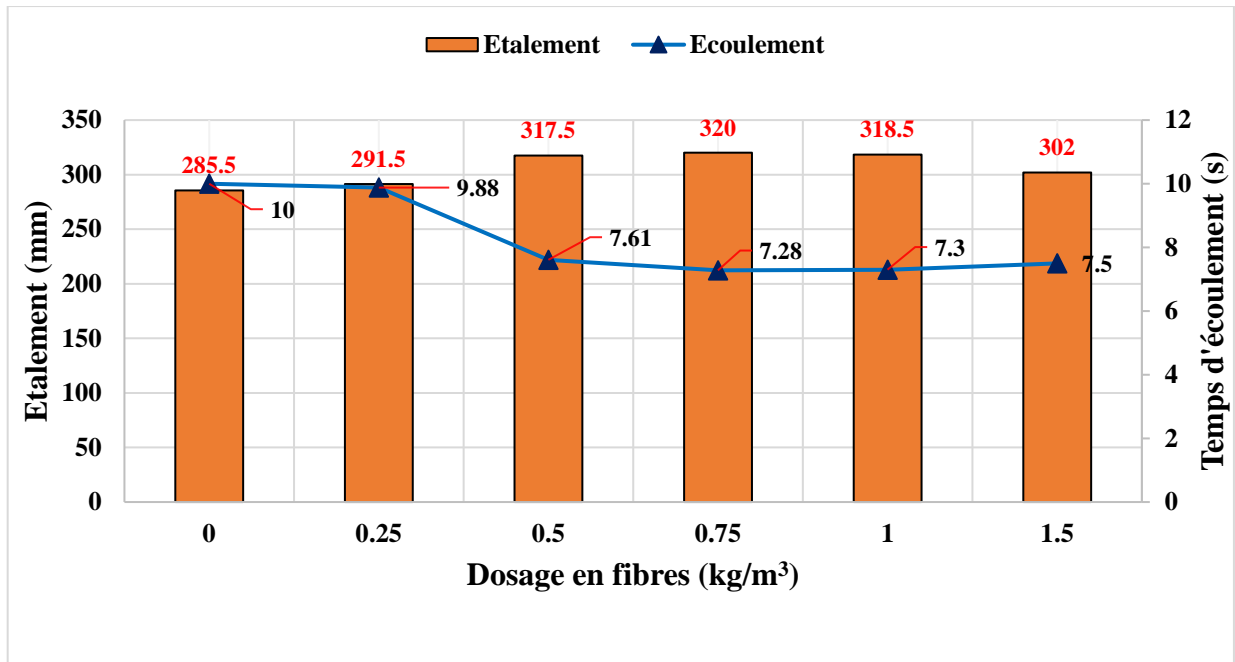


Figure 4.44 : Concordance des résultats d'étalement et du temps d'écoulement.

D'après Mastali et al. [121] et Zhou et al. [122], la matrice polyester présente avec les déchets de fibre de verre, ayant une grande surface spécifique à tendance à augmenter la demande en eau, d'où la diminution de l'étalement.

Le tableau 4.3 et la figure 4.45 présentent les résultats de l'air occlus en fonction du taux de déchets de fibre, nous remarquons une diminution du taux de l'air occlus.

Tableau 4.3 : Valeurs de l'air occlus en fonction du taux de substitution du marbre.

Dosage en déchets de fibre de verre (kg/m ³)	0	0.25	0.5	0.75	1	1.5
Air occlus (%)	2.3	2.2	2.0	2.0	1.9	1.8

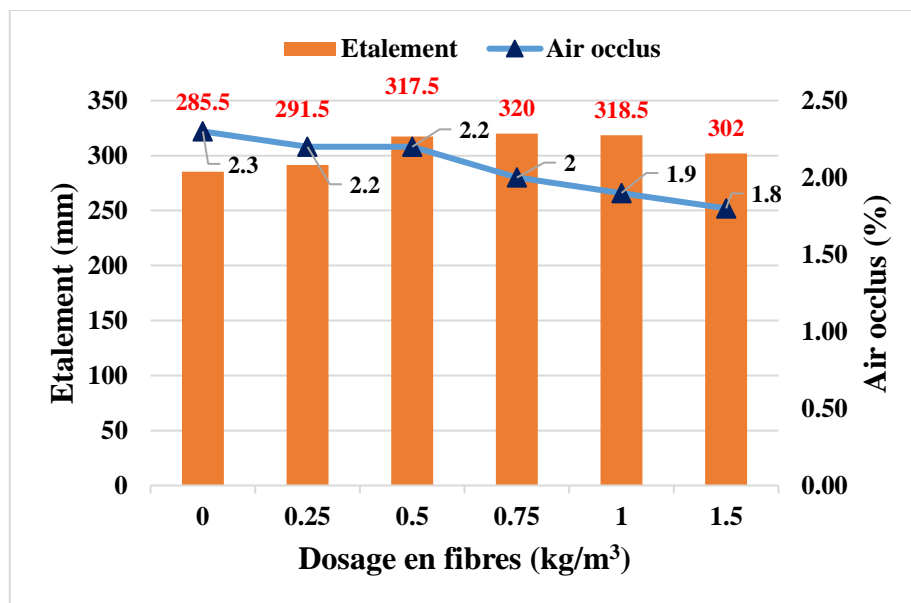


Figure 4.45 : Variation de l'air occlus et de l'étalement en fonction du dosage en fibres de verre.

4.4.2. Résultats à l'état durci

Pour les résultats à l'état durci, 3 ajouts en fibres de verre ont été étudiés : 0.5, 1 et 1.5 kg/m³. Les résultats sont donnés dans les figures 4.46 et 4.47. Nous remarquons une amélioration de la résistance à la compression par rapport à l'âge et par rapport à la quantité de fibres de verre ajoutée.

A 7 jours, nous avons une augmentation de 8.9%, 4% et 16.6% pour les ajouts de 0.5, 1 et 1.5 kg/m³ respectivement, à 14 jours, l'augmentation est de 7.5%, 4% et 3.4% pour les ajouts de 0.5, 1 et 1.5 kg/m³ respectivement et à 28 jours, nous avons une augmentation de 3.9%, 2.3% et 6.4% pour les ajouts de 0.5, 1 et 1.5 kg/m³ respectivement.

De même pour la flexion, une augmentation significative est constatée principalement à 28 jours, où nous avons des augmentations de 20.7%, 33.1% et 40.2% pour les ajouts de 0.5, 1 et 1.5 kg/m³ respectivement. Cette augmentation des performances mécaniques a été remarqué par Mastali et al. et Garcia et al. [119], [121]. D'après Garcia et al. [119], l'augmentation de la résistance est liée à la bonne adhérence des fibres avec la pâte cimentaire, cette adhérence a été constaté grâce aux images MEB qui montrent peu de vides autour des fibres de verre recyclés,

il a aussi remarqué dans son étude que la résistance pouvait être améliorée par l'optimisation du processus du recyclage qui permet de récupérer sélectivement les fibres de verre. Cependant, au-delà de 2% d'ajout, une réduction des performances mécaniques a été constaté.

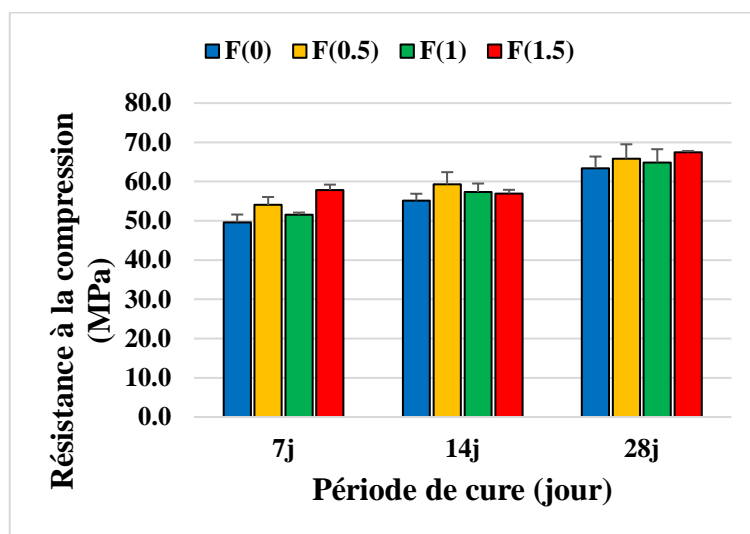


Figure 4.46 : Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en fibres de verre à différents âges.

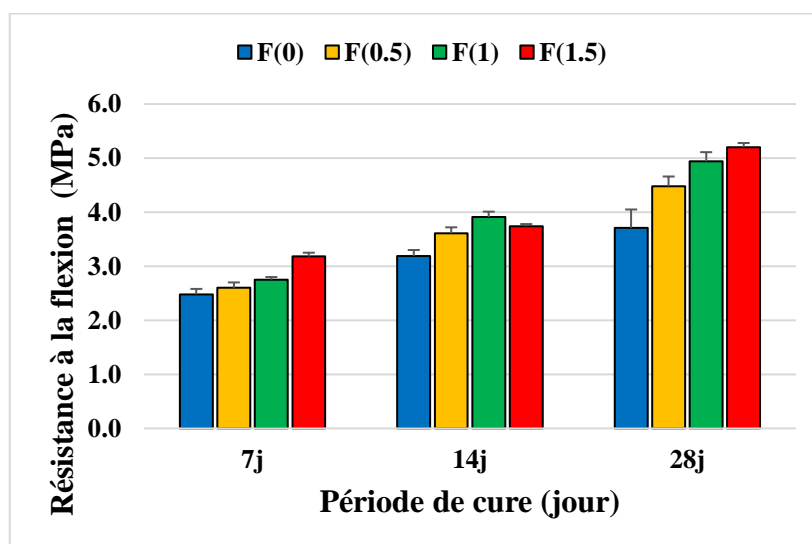


Figure 4.47 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du dosage en fibres de verre à différents âges.

4.5. Effet de la combinaison du sable de marbre et des fibres de verre

4.5.1. Résultats à l'état frais

En se basant sur les données citées dans le tableau 3.4 du chapitre 3, et en se basant sur les résultats des sous-chapitres 4.3 et 4.4, il a été décidé dans cette partie d'étudier six combinaisons entre le taux de marbre et le dosage en fibres de verre. M étant le taux de marbre et F le taux de fibres, nous aurons les combinaisons données dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Différentes combinaisons du marbre et des fibres.

M (%) \ F (kg/m ³)	15	30
0.5	(15, 0.5)	(30, 0.5)
1	(15, 1)	(30, 1)
1.5	(15, 1.5)	(30, 1.5)

Les résultats de l'étalement et du temps d'écoulement sont donnés dans les figures 4.48 et 4.49, nous constatons que l'étalement augmente en fonction du taux de marbre, ce qui est en adéquation avec les résultats trouvés dans le sous-chapitre 4.3.1. Pour les fibres, nous remarquons une légère diminution puis une augmentation de l'étalement en fonction du taux de fibres, ce qui est aussi en adéquation avec les résultats du sous-chapitre 4.4.1, toutes les valeurs sont situées dans les limites de Domone avec absence de ressuage et de ségrégation au niveau des galettes sauf pour le cas du dosage en fibres de 1.5 kg/m³ en combinaison avec le marbre où l'étalement dépasse 330 mm.

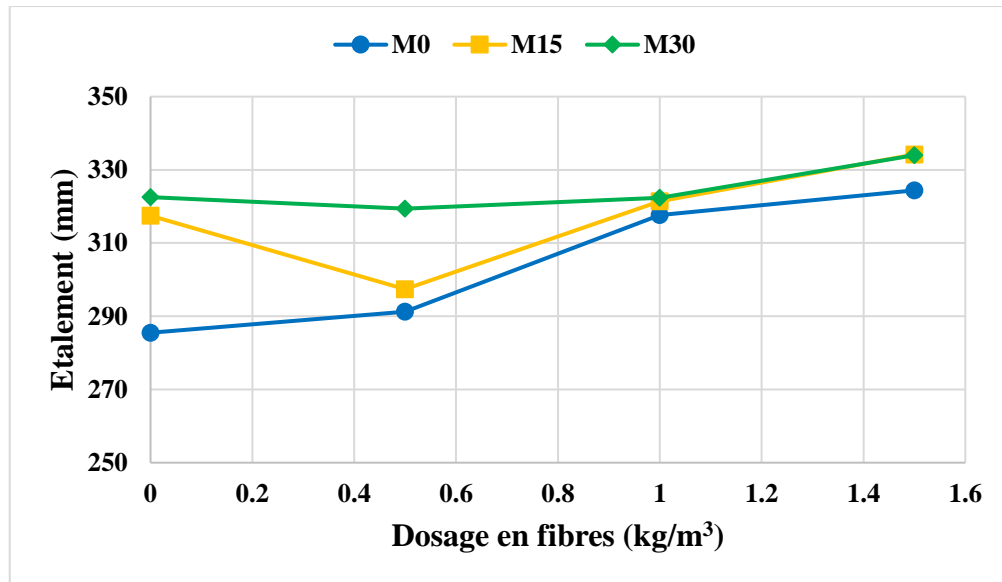


Figure 4.48 : Variation de l'étalement en fonction du taux de marbre et du dosage en fibres

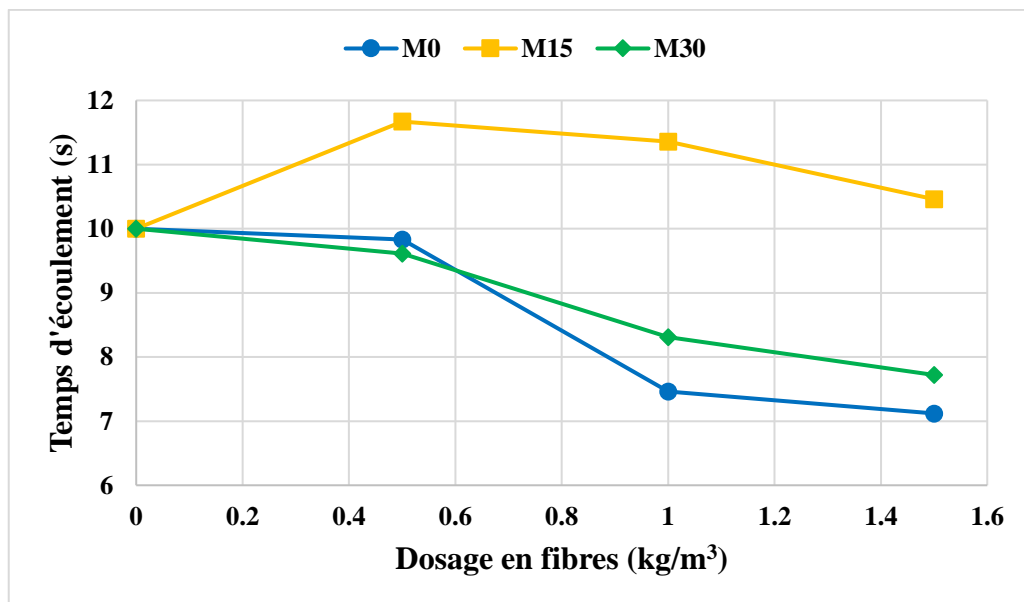


Figure 4.49 : Variation du temps d'écoulement en fonction du taux de marbre et du dosage en fibres.

Les résultats du temps d'écoulement sont en concordance avec les résultats de l'étalement puisque nous remarquons une diminution du temps d'écoulement comme nous l'avons précédemment constaté dans les sous-chapitres 4.3.2 et 4.4.2.

Cette augmentation de l'étalement a été constaté par d'autres chercheurs qui expliquent ceci par le fait que les fibres ainsi que les fines du marbre ont tendance à occuper les vides, de ce fait la demande en eau diminue [136].

D'après Wang et al. [137], au-delà de 2% d'ajout des fibres, l'inclusion de ces derniers dans le béton peut réduire la plasticité et la fluidité du mélange, ce qui rend le béton plus difficile à manipuler et à couler, cela est dû à la surface rugueuse des fibres de verres qui nécessitent plus d'eau pour lubrifier les particules du ciment réduisant ainsi la quantité d'eau libre. De plus la présence des fibres peut augmenter la viscosité du béton, rendant le mélange moins fluide et plus difficile à travailler.

En vue de tous les résultats obtenus, deux dosages en fibres de verre seront étudiés pour l'état durci à savoir, 0.5 kg/m^3 et 1 kg/m^3 pour un seul pourcentage de marbre qui est de 30%.

4.5.2. Résultats à l'état durci

En ce qui concerne la résistance à la compression et en comparant les résultats obtenus avec ceux des mortiers de référence, nous remarquons une augmentation de 21,7% et 23,82% pour les mortiers à 0.5 et 1 kg/m^3 de fibres de verre respectivement, ceci à 28 jours. A 56 jours, nous avons une augmentation de 10,17% et 9,14% pour les mortiers à 0.5 et 1 kg/m^3 de fibres de verre respectivement. A 90 jours, nous constatons une augmentation de 5,85% pour les mortiers à 0.5 kg/m^3 de fibres de verre et une diminution de 3,1% pour les mortiers à 1 kg/m^3 de fibres.

Concernant les résultats à la flexion, nous avons constaté que quel que soit l'âge des éprouvettes et quel que soit le taux de fibres ajoutées, nous avons des augmentations de la résistance, la valeur optimale a été constatée à 56 jours pour les mortiers à 1 kg/m^3 de fibres de verre où nous avons une augmentation de 65,45% par rapport aux mortiers de référence.

Des résultats similaires ont été trouvés par Wani et Ganesh [138], ils estiment que l'ajout des fibres de verre permet d'améliorer la résistance en empêchant la formation des fissures.

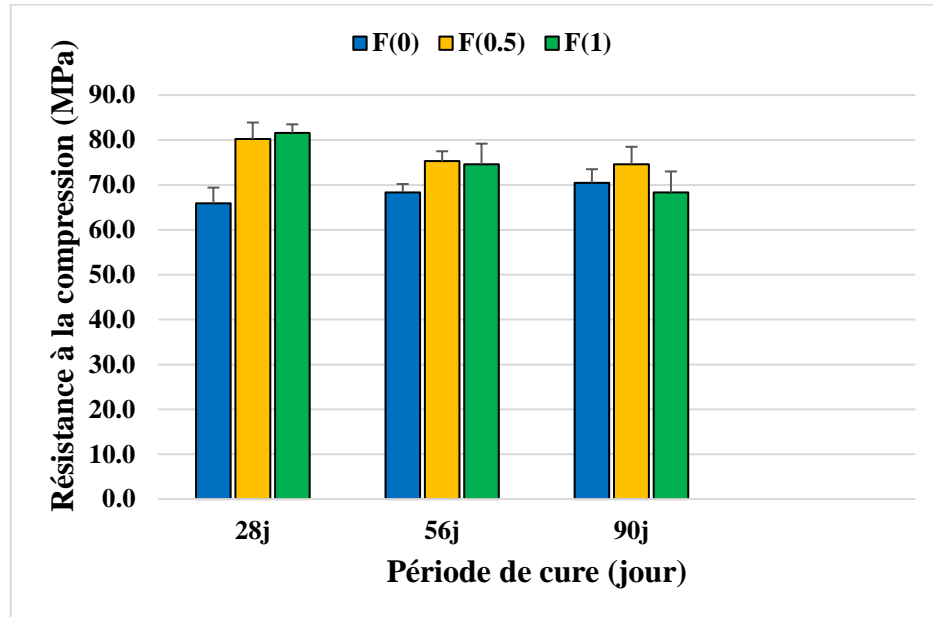


Figure 4.50 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de fibres avec 30% de marbre à différents âges.

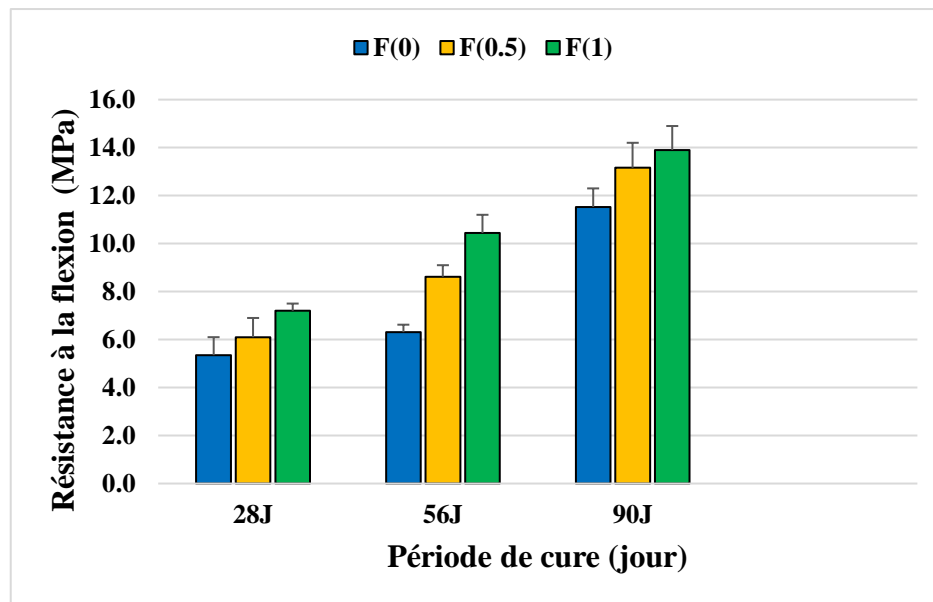


Figure 4.51 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de fibres avec 30% avec marbre à différents âges.

4.6. Essais de vieillissement

4.6.1. Résistance à la flexion

Les figures de 4.52 à 4.59 présentent les résultats de la résistance à la flexion des mortiers soumis aux différents cycles de séchage mouillage pour les différents taux de substitution du marbre.

A 58 jours, les échantillons ayant subi 15 cycles de séchage mouillage, affichent une augmentation de la résistance à la flexion, ceci quel que soit le taux de substitution du marbre, nous avons une augmentation de 65.88%, 35.34%, 21.18% et 16.22% pour M0, M15, M30 et M50 respectivement. Donc, à 15 cycles le mortier témoin affiche les meilleurs résultats.

A 88 jours, les échantillons ayant subi 15 cycles de séchage mouillage montrent toujours une augmentation de la résistance par rapport aux échantillons n'ayant pas subi de séchage mouillage, cette augmentation est de 49.75%, 58%, 23.27% et 16.83% pour M0, M15, M30 et M50 respectivement. A 30 cycles de séchage, l'augmentation est de 38.51%, 57.83%, 4.57% et 14.16% pour M0, M15, M30 et M50 respectivement, ce qui implique une diminution par rapport à 15 cycles de séchage mouillage.

A 118 jours, Nous remarquons une augmentation de la résistance à 15 cycles de séchage mouillage ensuite une diminution est remarquée qui reste toutefois supérieure aux échantillons n'ayant pas subi de cycle de séchage mouillage sauf pour les mortiers M0 dont la résistance à C30 et C45 est inférieure à celle de C0.

A 148 jours, une baisse de la résistance à la flexion est remarquée pour tous les échantillons, quel que soit le taux de substitution du marbre, à fur et à mesure que le nombre de cycles augmentent. Pour le mortier M0, nous avons une diminution de 8.14%, 10.10%, 21.76% et 44.80% pour 15 cycles, 30 cycles, 45 cycles et 60 cycles respectivement. Pour le mortier M15, nous avons une diminution de 14.87%, 21.98%, 17.67% et 22.09% pour 15 cycles, 30 cycles, 45 cycles et 60 cycles respectivement. Pour le mortier M50, nous avons une diminution de 9.92%, 9.92%, 11.63% et 13% pour 15 cycles, 30 cycles, 45 cycles et 60 cycles respectivement.

Le mortier M30 est le seul à présenter des résultats différents, en effet à 15 cycles, nous avons une légère augmentation de la résistance de l'ordre de 3%, ensuite une diminution de 9%, 14.27% et 15.5% pour 30 cycles, 45 cycles et 60 cycles respectivement.

Dans tous ces résultats la valeur optimale a été donnée par l'échantillon à 30% de marbre et ayant subi 15 cycles de séchage mouillage. L'échantillon à 0% a été le plus affecté par les cycles de séchage- mouillage avec une perte de résistance de plus de 40% à 60 cycles.

Chen et al. et Xi et al. ont observé le même comportement des échantillons soumis aux cycles de séchage-mouillage. En effet, ils ont remarqué une augmentation des résistances mécaniques, ensuite une diminution au-delà de 72 cycles. Chen et al. expliquent cette diminution par l'augmentation du volume des pores, l'élargissement des micro fissures et la formation de nouvelles fissures au-delà d'un certain nombre de cycles [49], [50].

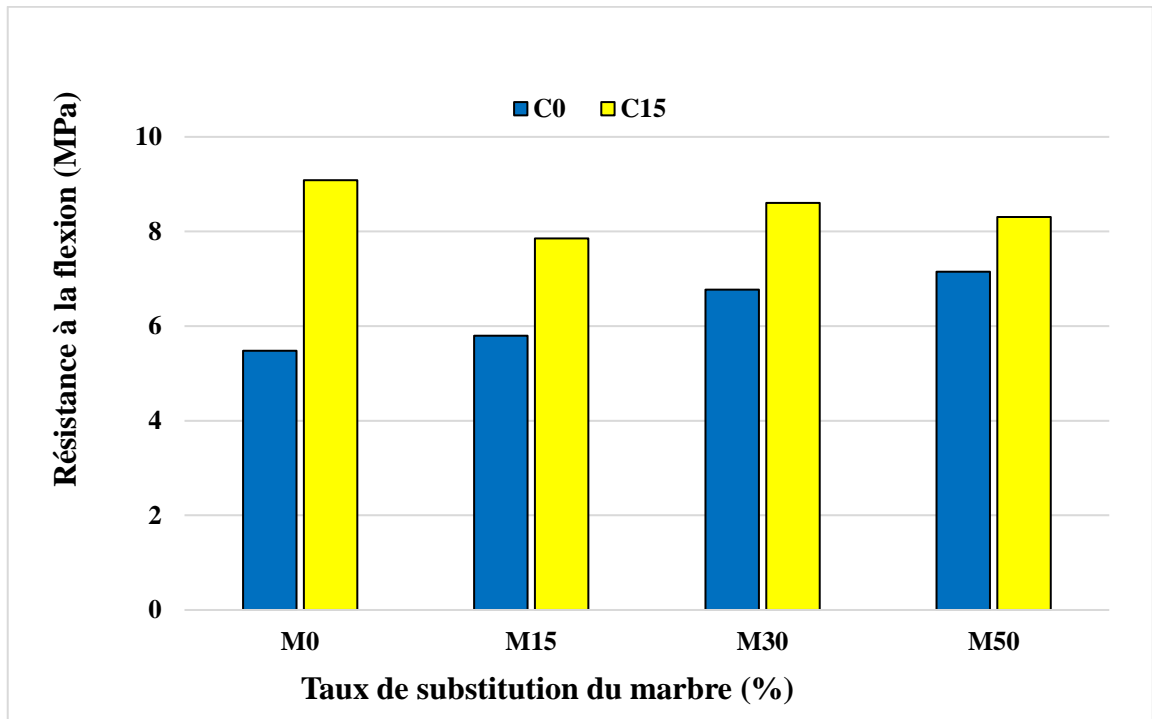


Figure 4.52 : Résistance à la flexion à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage.

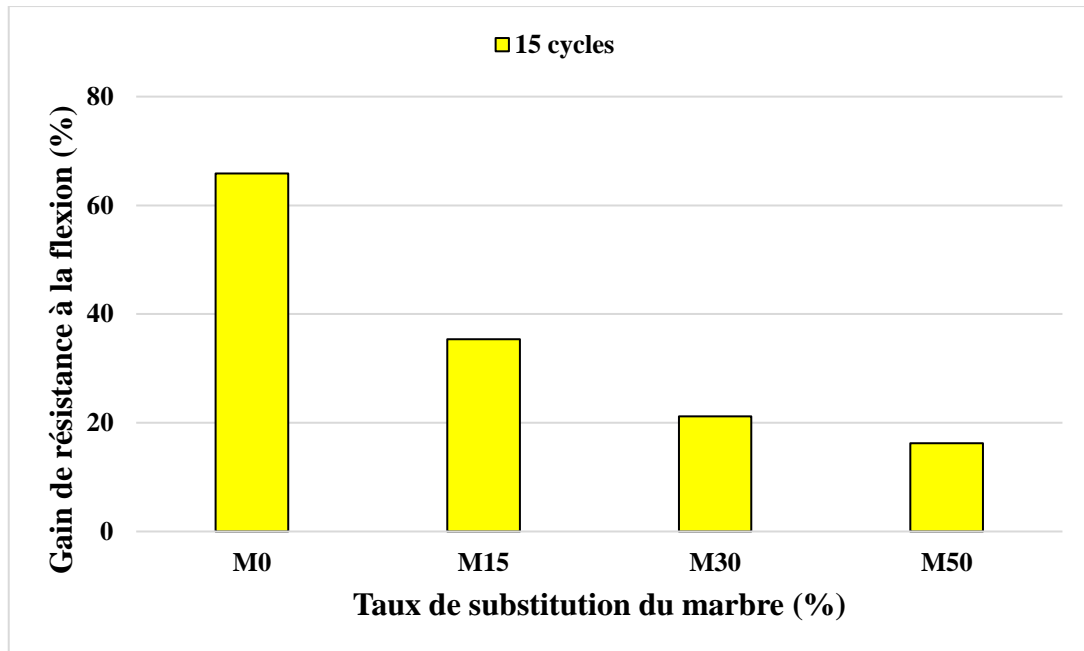


Figure 4.53 : Gain de résistance à la flexion à 58 jours par rapport au mortier témoin après 15 cycles de séchage-mouillage.

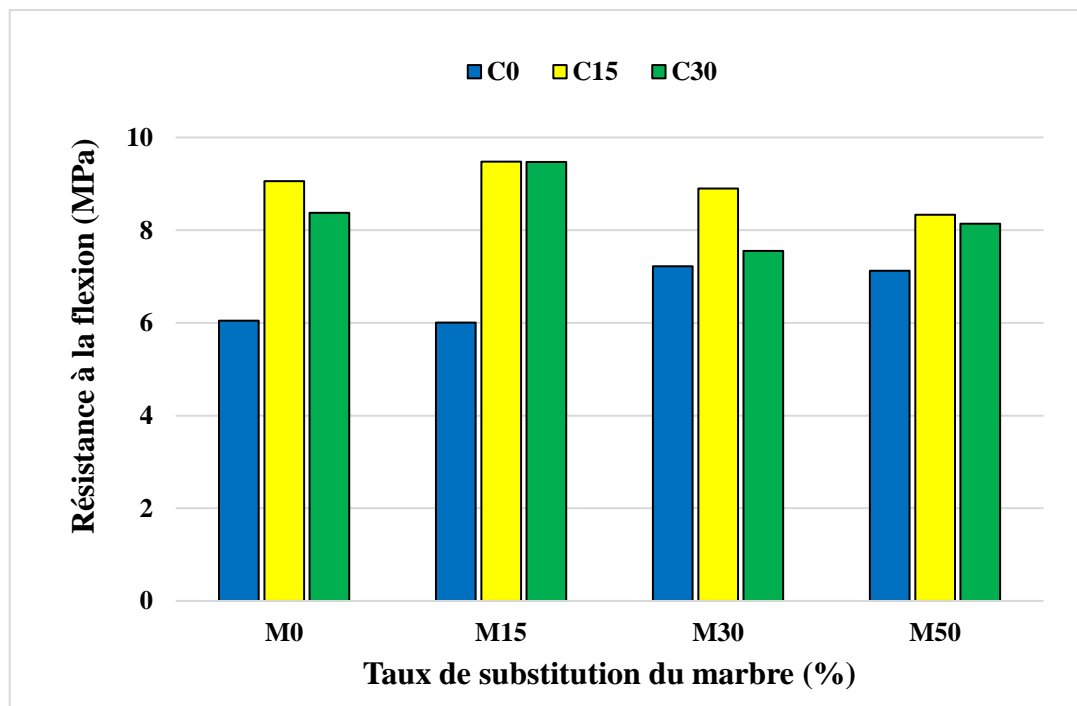


Figure 4.54 : Résistance à la flexion à 88 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage.

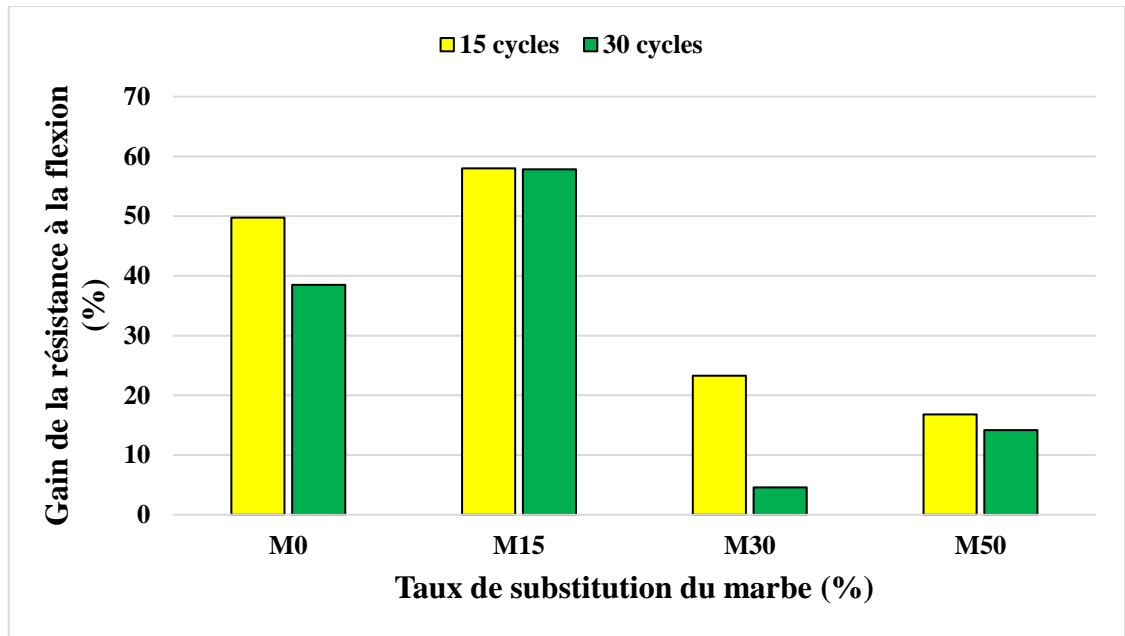


Figure 4.55 : Gain de résistance à la flexion à 88 jours par rapport au mortier témoin après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage.

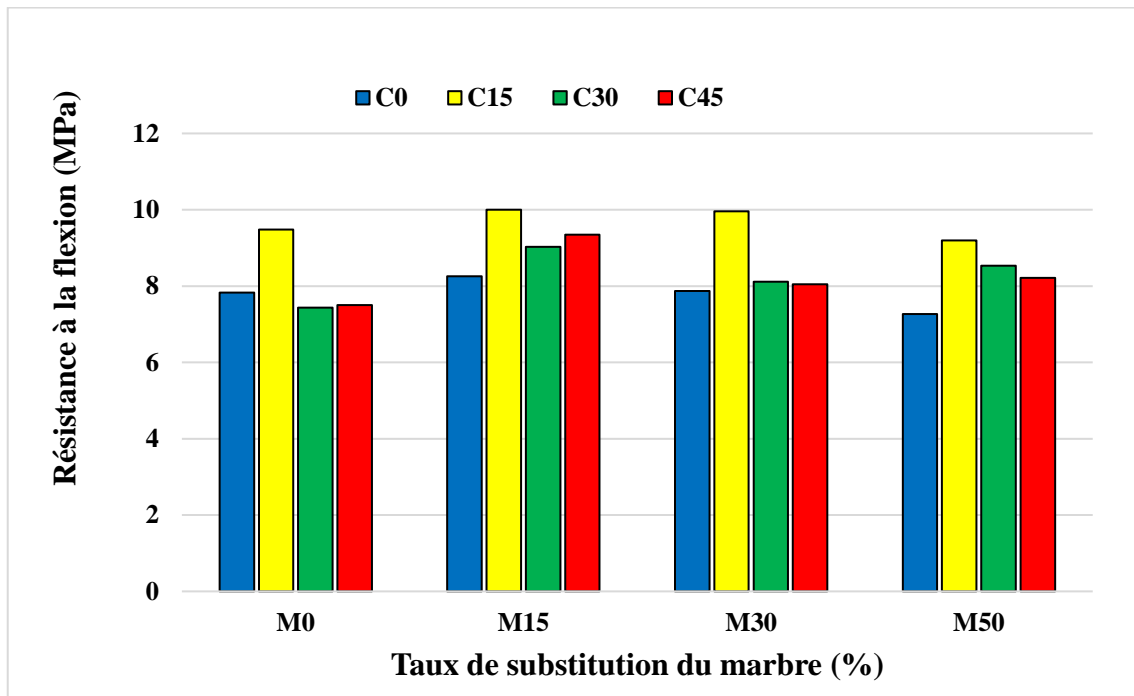


Figure 4.56 : Résistance à la flexion à 118 jours après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage.

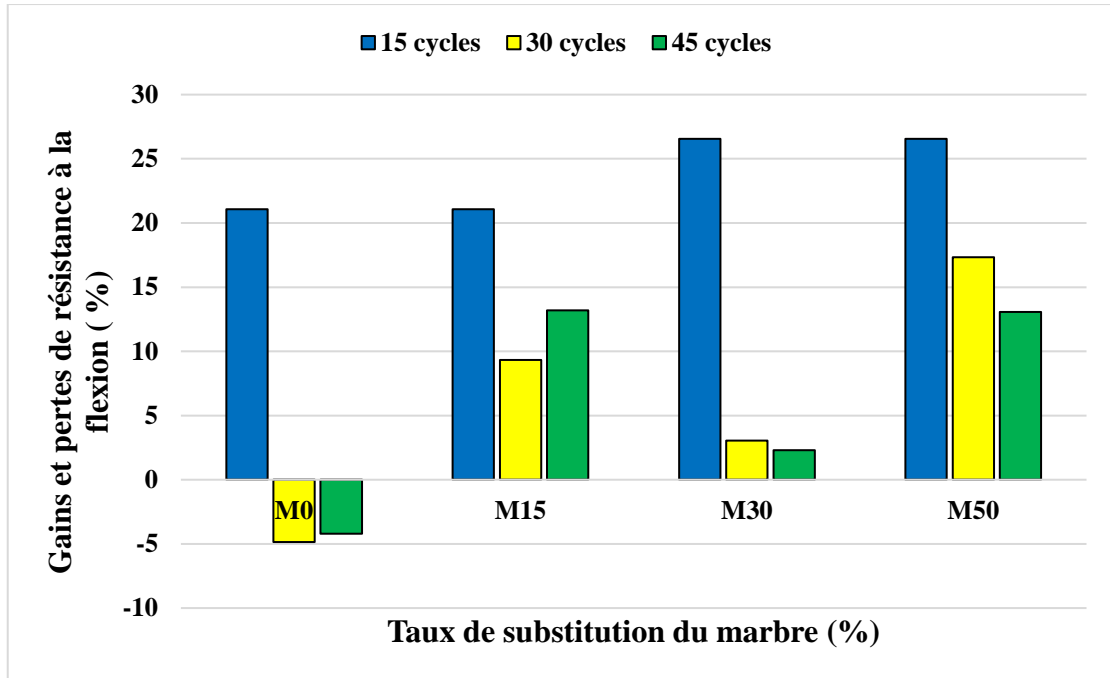


Figure 4.57 : Gains et pertes de résistance à la flexion à 118 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage.

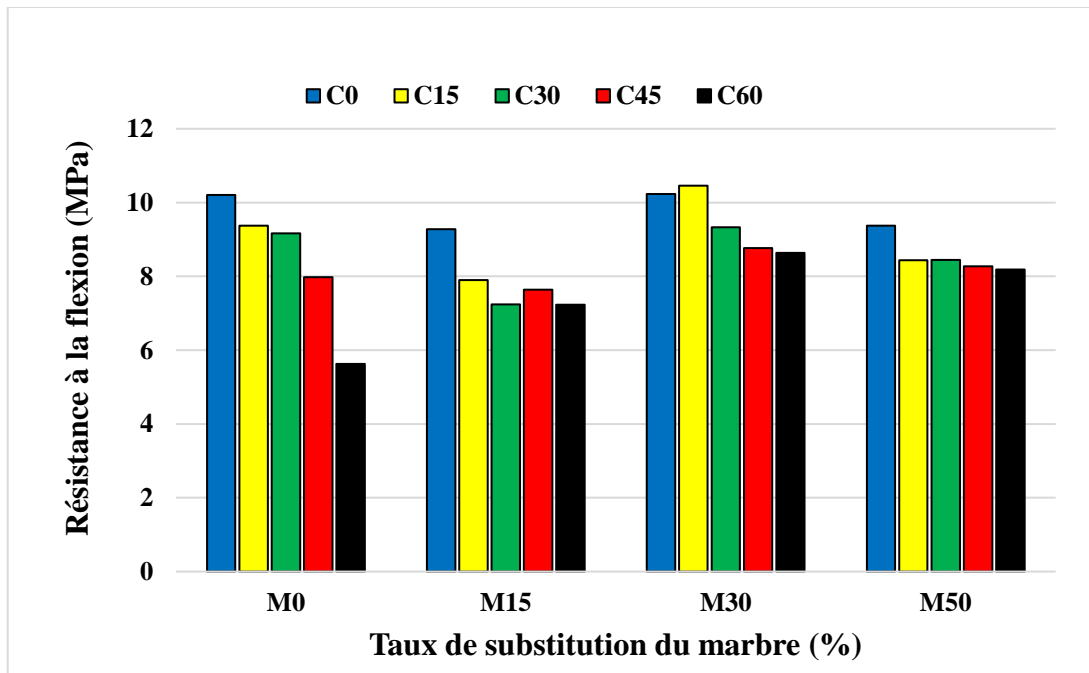


Figure 4.58 : Résistance à la flexion à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage.

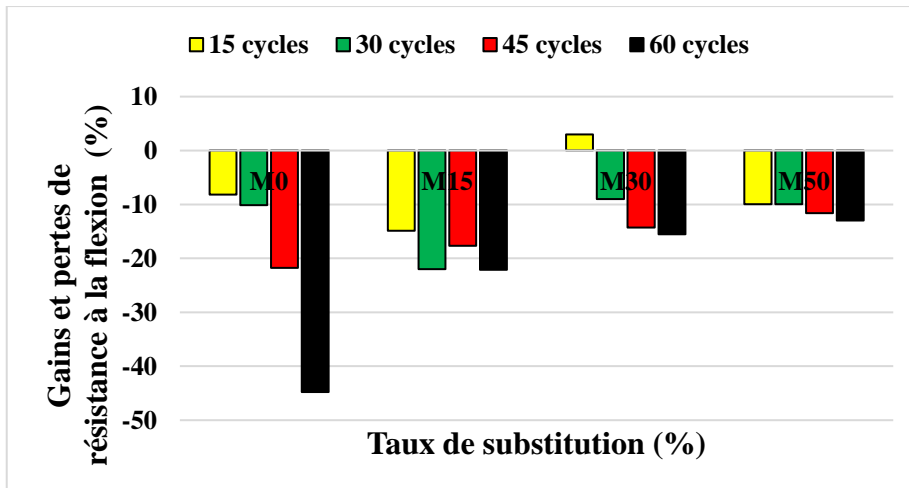


Figure 4.59 : Gains et pertes de résistance à la flexion à 148 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage.

La figure 4.60 résume l'effet des cycles de séchage- mouillage pour les différents mélanges de mortiers sur la résistance à la flexion, ou nous remarquons que le taux de 30% de marbre donne les valeurs les plus optimales.

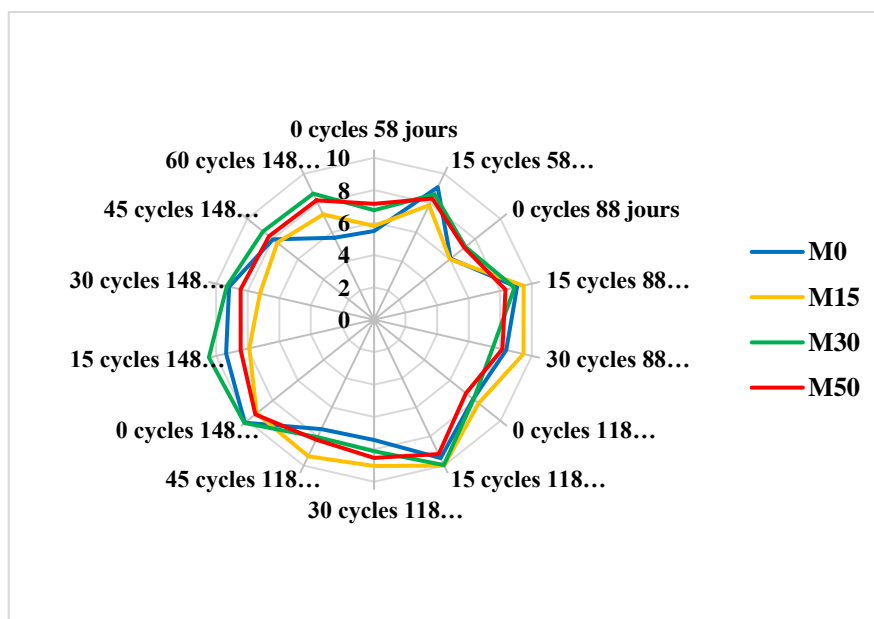


Figure 4.60 : Comparaison des valeurs de la résistance à la flexion des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges.

Les figures 4.61, 4.62, 4.63 et 4.64 nous permettent d'établir une relation entre les résultats de la résistance à la flexion des mortiers ayant subi un vieillissement naturel et les mortiers ayant subi 15 cycles de séchage mouillage pour les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement.

Nous remarquons que la résistance à la flexion augmente avec le temps pour le vieillissement naturel et le vieillissement accéléré mais cette augmentation est plus significative en vieillissement naturel. Après 90 jours les 2 courbes se stabilisent au même pallier, ceci quel que soit le taux de substitution du marbre.

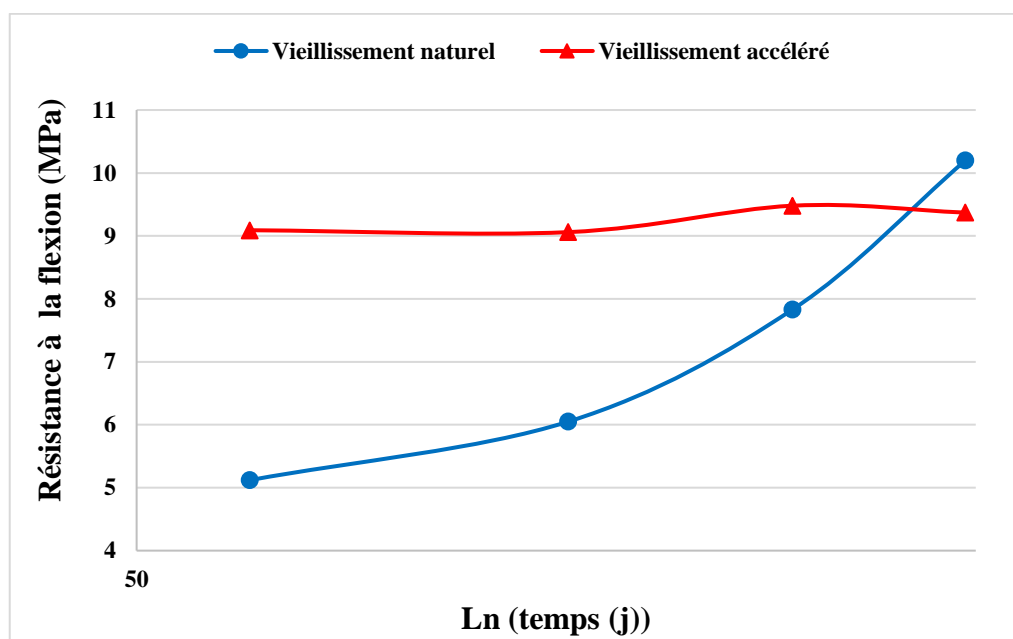


Figure 4.61 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 0% de marbre.

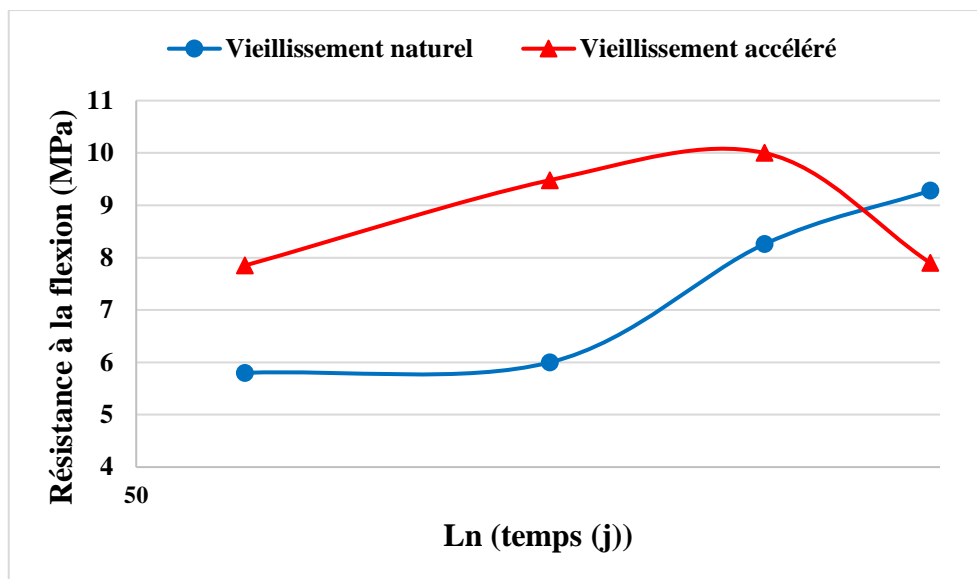


Figure 4.62 : Vieillessement naturel et accéléré des mortiers à 15% de marbre.

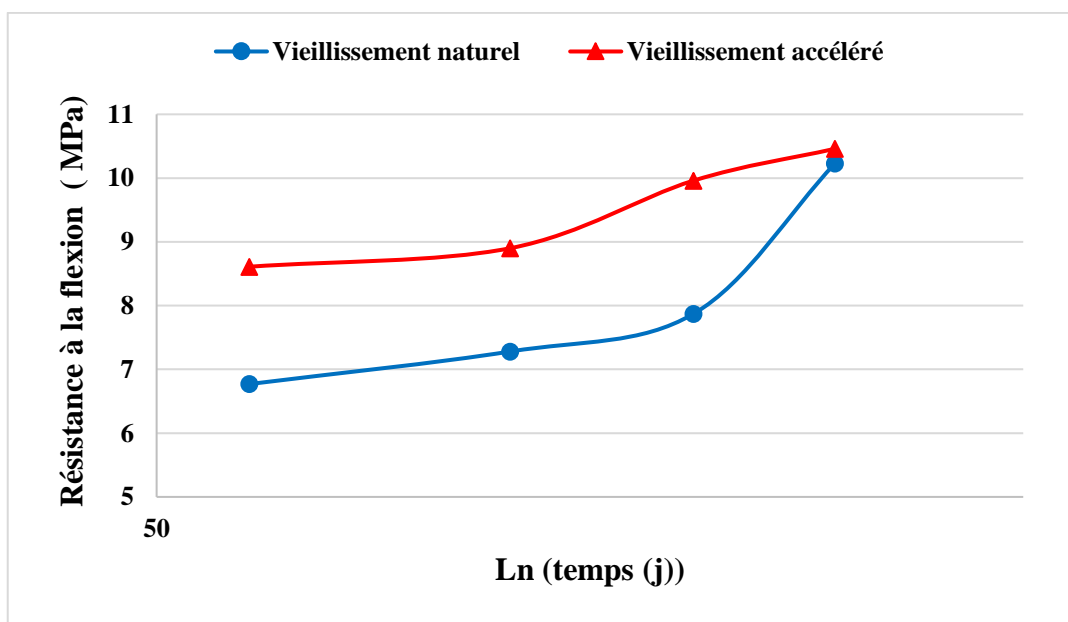


Figure 4.63 : Vieillessement naturel et accéléré des mortiers à 30% de marbre.

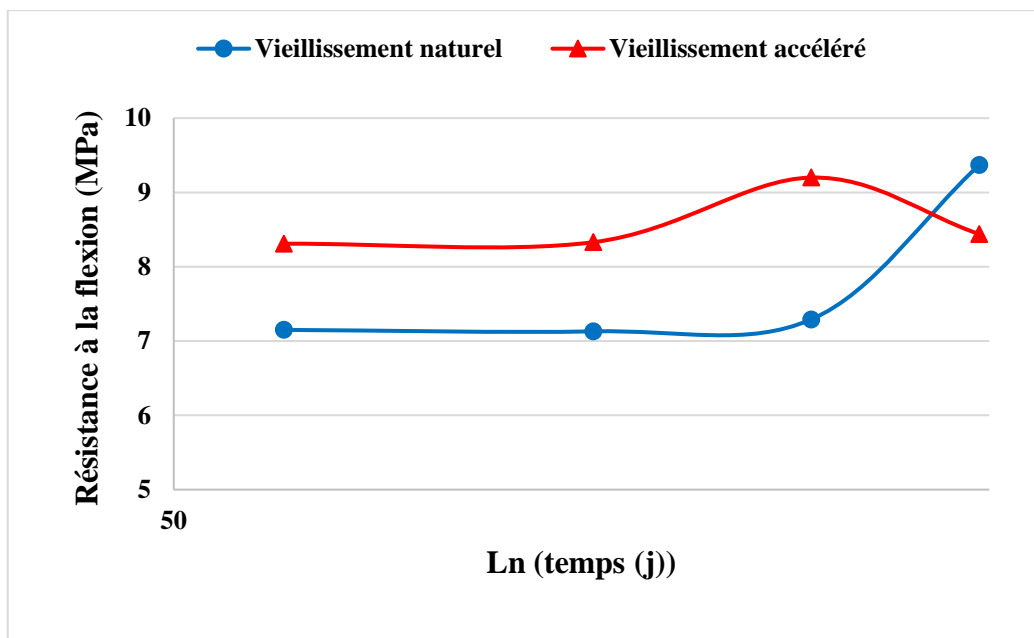


Figure 4.64 : Vieillessement naturel et accéléré des mortiers à 50% de marbre.

L'analyse de ces résultats par régression est nécessaire pour développer une relation entre le vieillissement naturel et le vieillissement accéléré en liant les différents paramètres afin de pouvoir prédire le comportement des matériaux à long terme.

4.6.2. Résistance à la compression

Les figures de 4.65 à 4.72 présentent les résultats de la résistance à la compression des mortiers soumis aux différents cycles de séchage mouillage pour les différents taux de substitution du marbre.

Comme pour la résistance à la flexion, nous remarquons qu'à 58 jours, les échantillons ayant subi 15 cycles de séchage mouillage, affichent une augmentation de la résistance pour tous les taux de substitution du marbre. En effet, nous avons une augmentation de 22%, 13.84%, 19.60% et 27.86 pour M0, M15, M30 et M50 respectivement. Donc, à 15 cycles le mortier M50 affiche les meilleurs résultats.

A partir de 88 jours, nous remarquons une certaine disparité dans les résultats. Pour les mortiers à 0% et 15% de marbre, nous avons des diminutions de la résistance, cette diminution est entre

5% et 7% que ce soit pour 15 et 30 cycles. Pour les mortiers à 30% et 50% de marbre, nous avons des augmentations de 15% et de 21.5 % respectivement, ceci à 15 cycles. A 30 cycles, nous avons des diminutions de 5%.

A 118 jours, nous avons pour presque tous les échantillons des diminutions, ces diminutions varient de 2% pour M50 à 30 cycles à 16% pour le même le mortier à 45 cycles. De légères augmentations sont observé pour M15 à 15 cycles et pour M30 à 45 cycles.

A 148 jours, nous remarquons des augmentations à 15 cycles pour tous les mortiers puis des diminutions qui restent toutefois supérieure aux valeurs données par les mortiers n'ayant subi aucun cycle de séchage mouillage. La plus grande valeur est donnée par M50 à 15 cycles, elle est de 59.35 MPa et la valeur la plus basse est donnée par M0 à 60 cycles, cette valeur est égale à 51.05 MPa.

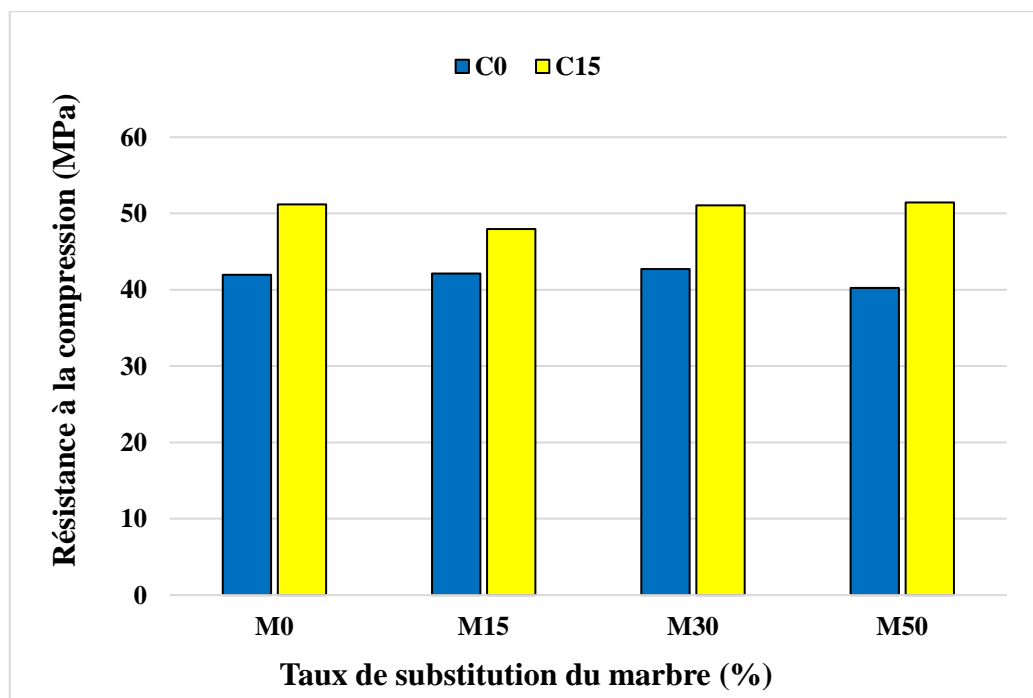


Figure 4.65 : Résistance à la compression à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage.

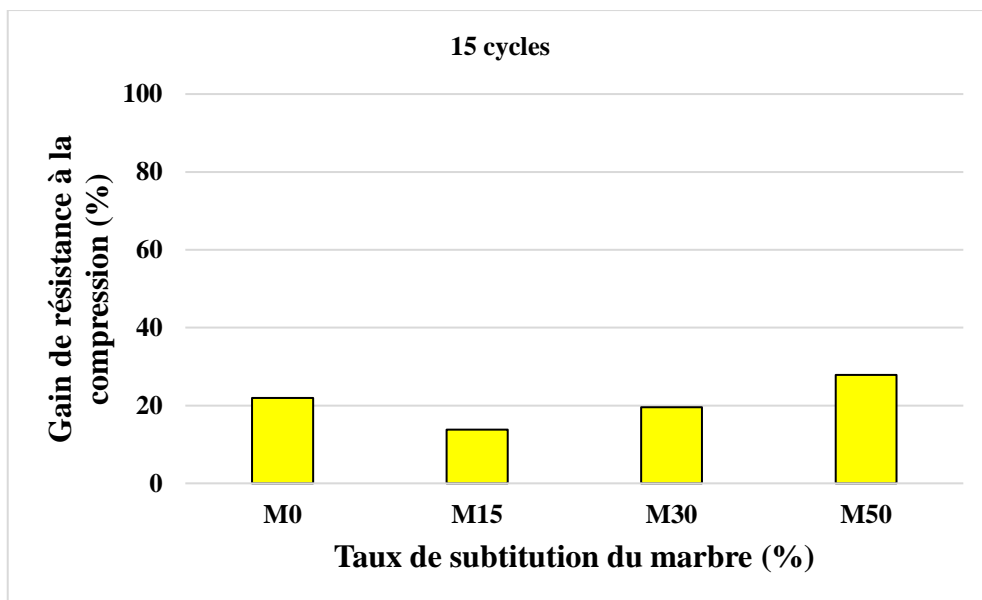


Figure 4.66 : Gain de la résistance à la compression à 58 jours par rapport au mortier témoin après 15 cycles de séchage-mouillage.

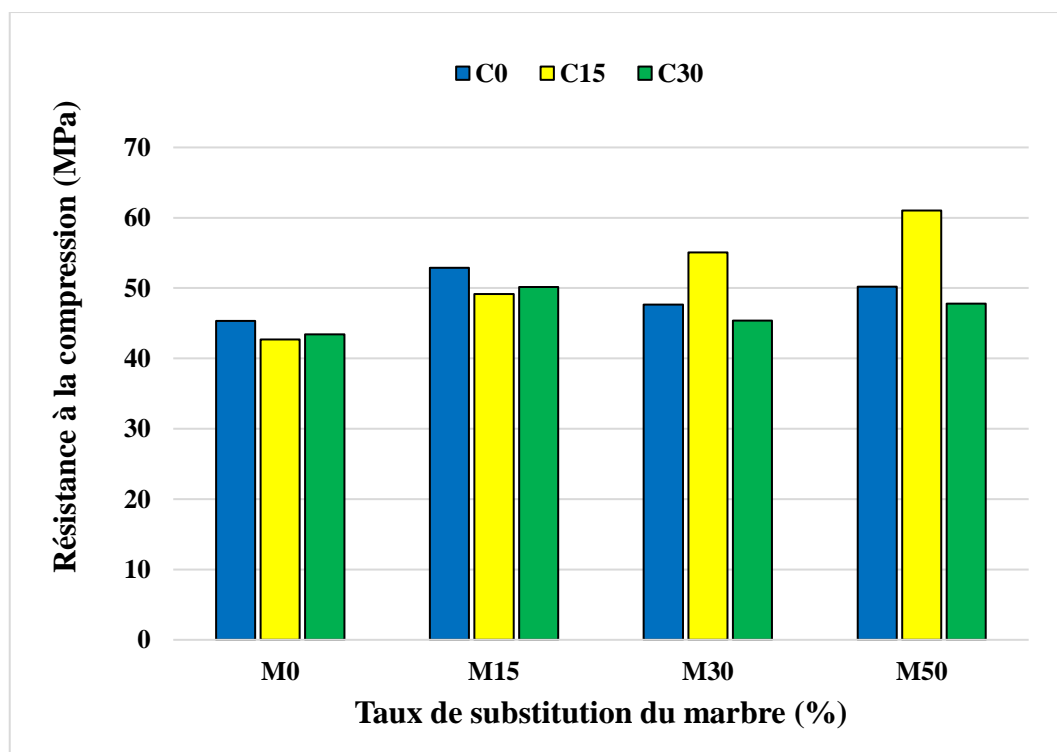


Figure 4.67 : Résistance à la compression à 88 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage.

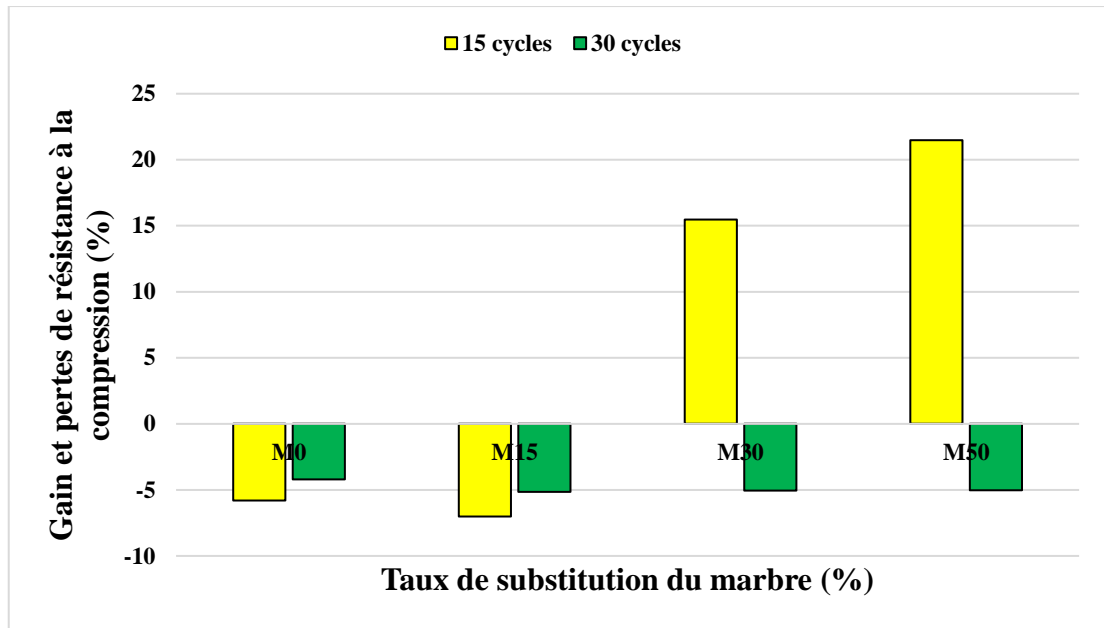


Figure 4.68 : Gain et pertes de la résistance à la compression à 88 jours par rapport au mortier témoin après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage.

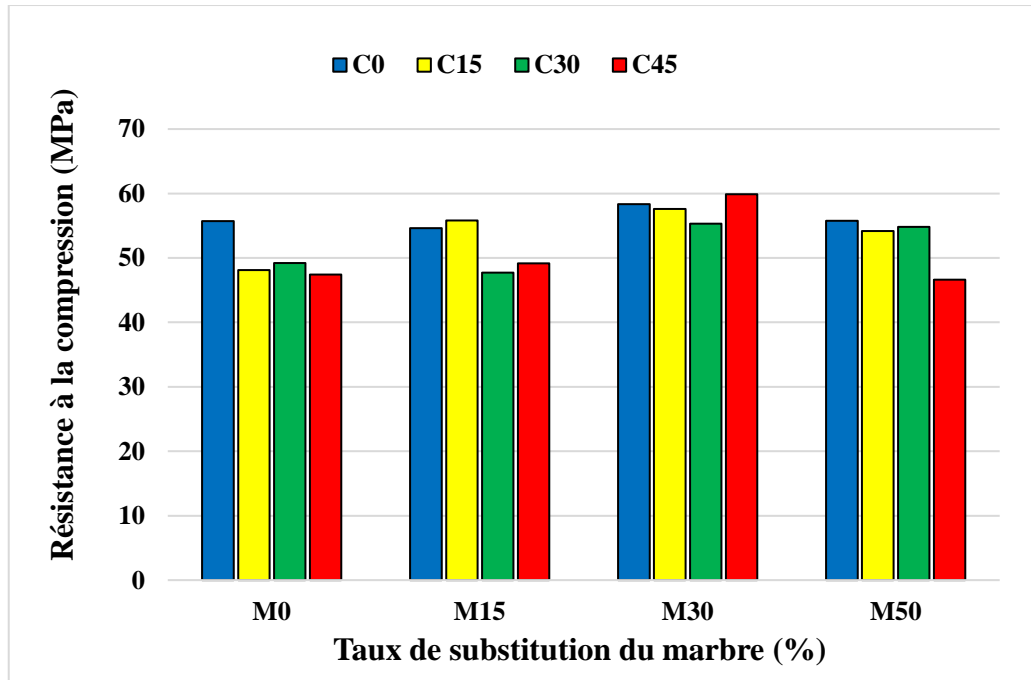


Figure 4.69 : Résistance à la compression à 118 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, et 45 cycles de séchage-mouillage.

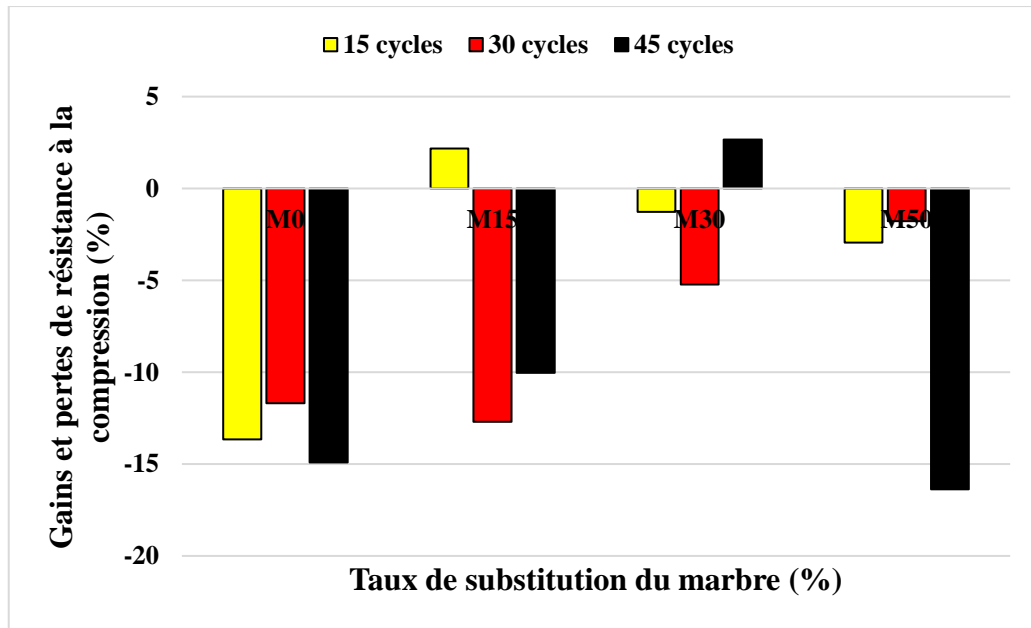


Figure 4.70 : Gain et pertes de la résistance à la compression à 118 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, et 45 cycles de séchage-mouillage.

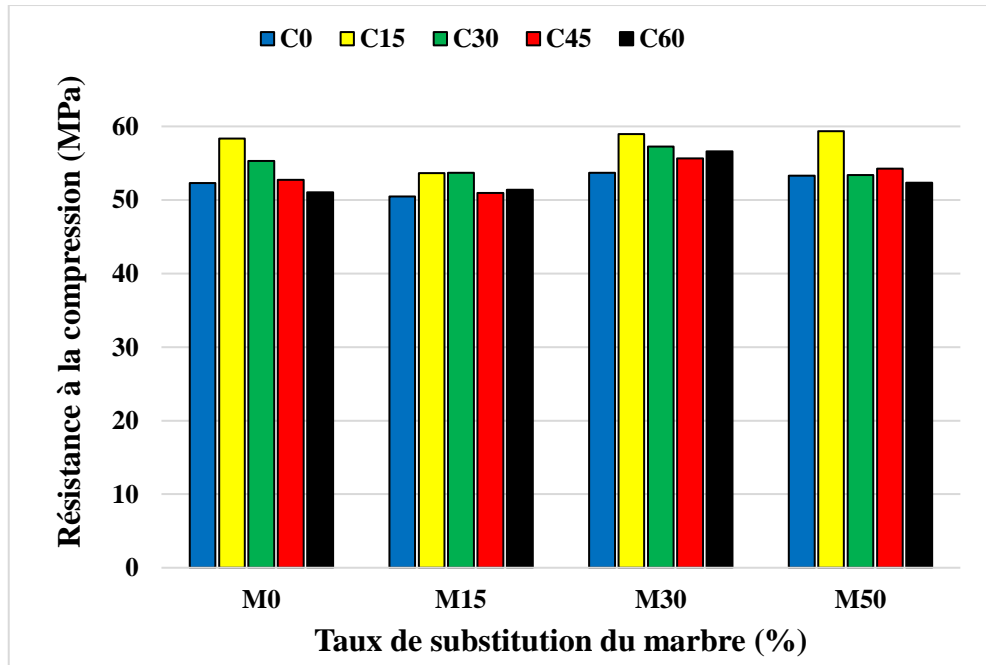


Figure 4.71 : Résistance à la compression à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage.

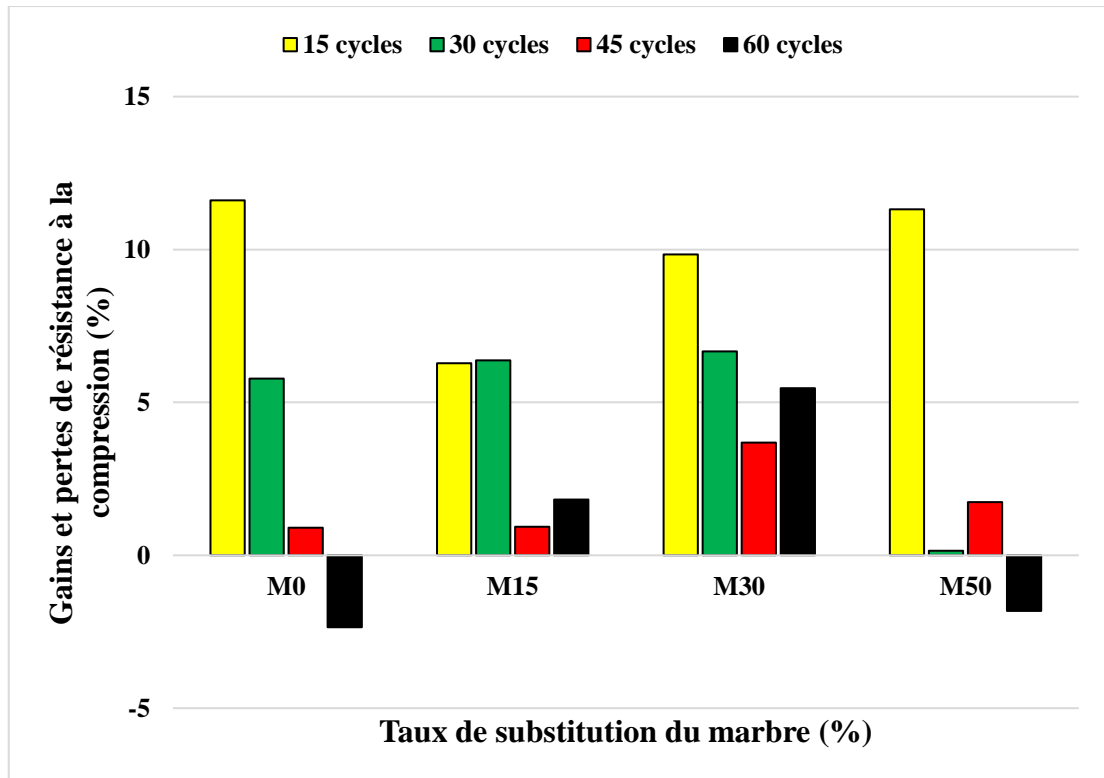


Figure 4.72 : Gain et pertes de la résistance à la compression à 148 jours par rapport au mortier témoin après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage.

La figure 4.73 résume l'effet des cycles de séchage- mouillage pour les différents mélanges de mortiers sur la résistance à la compression, nous remarquons que les plus optimales sont données par les taux de substitution de marbre de 30% et 50%.

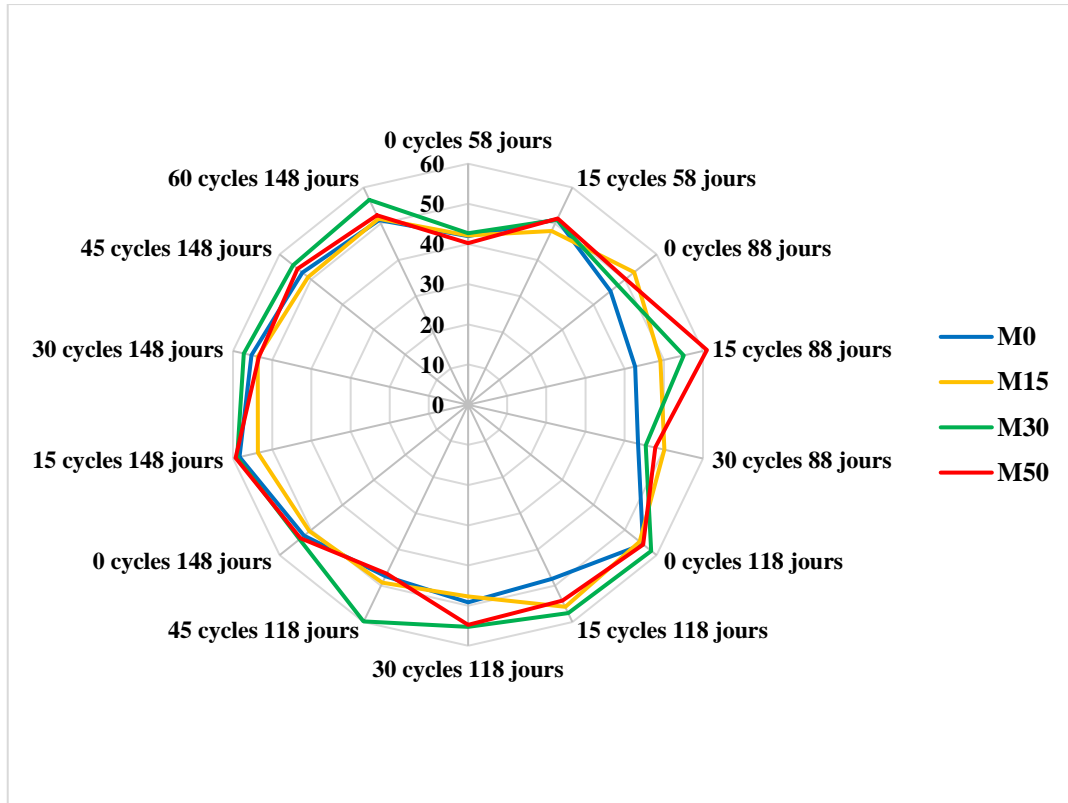


Figure 4.73 : Comparaison des valeurs de la résistance à la compression des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges.

De même que pour la résistance à la flexion, les figures 4.74, 4.75, 4.76 et 4.77 nous permettent d'établir une relation entre les résultats de la résistance à la compression des mortiers ayant subi un vieillissement naturel et les mortiers ayant subi 15 cycles de séchage mouillage pour les taux de substitution de 0%, 15%, 30% et 50% respectivement.

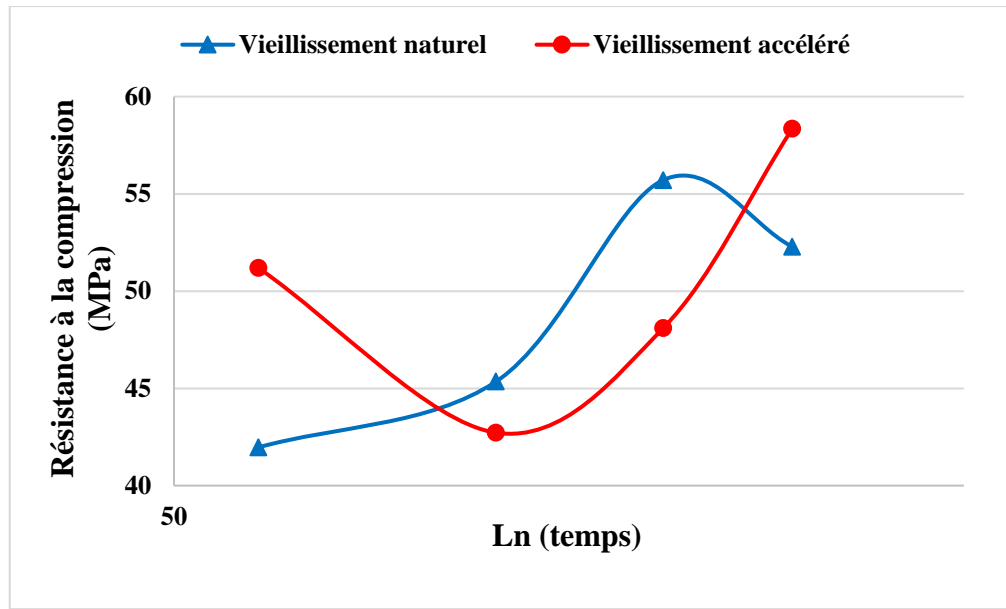


Figure 4.74 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 0% de marbre.

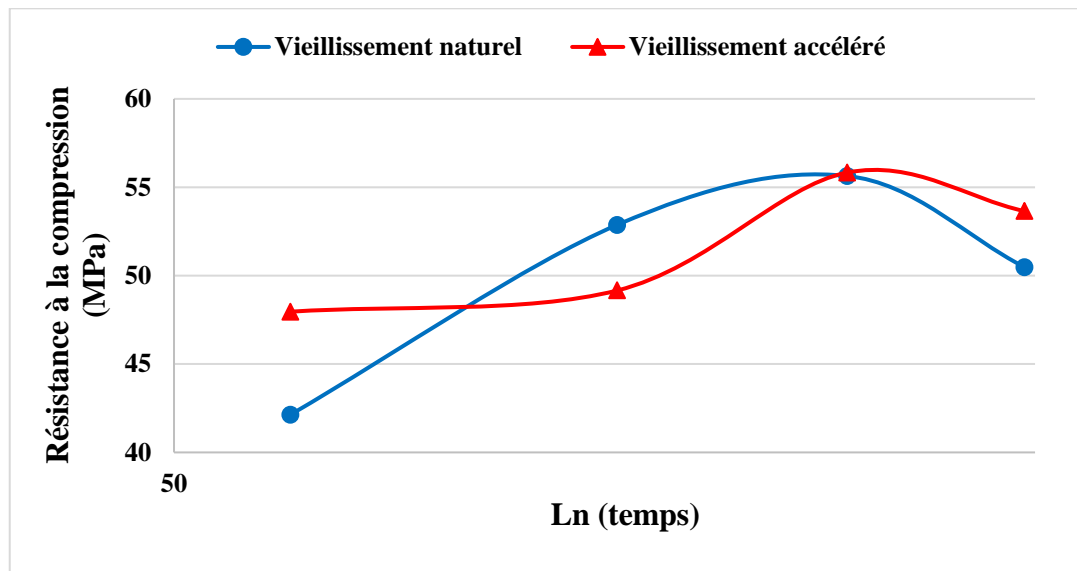


Figure 4.75 : Vieillissement naturel et accéléré des mortiers à 15% de marbre.

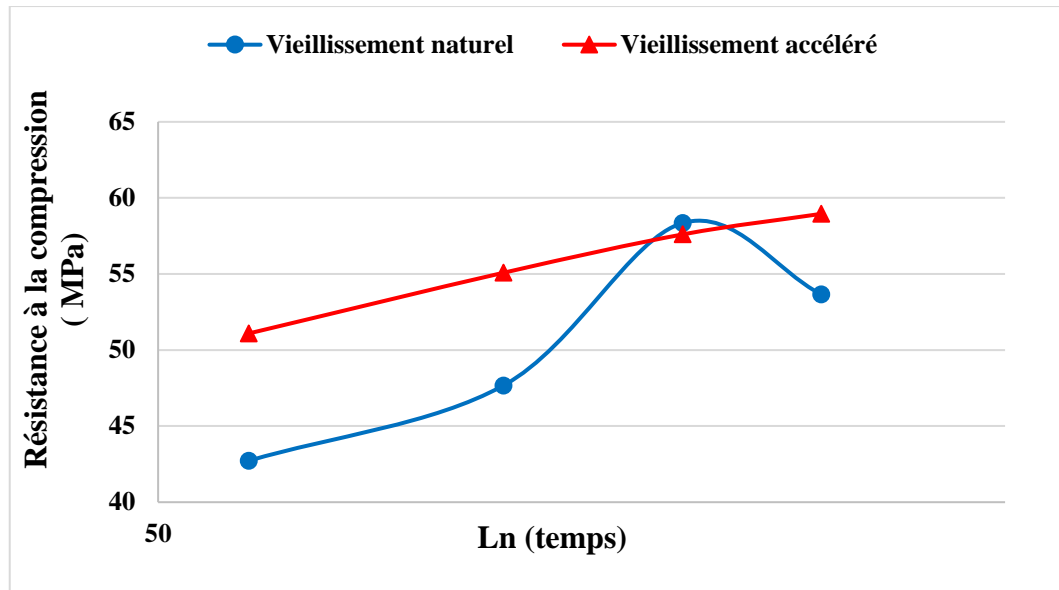


Figure 4.76 : Vieillessement naturel et accéléré des mortiers à 30% de marbre.

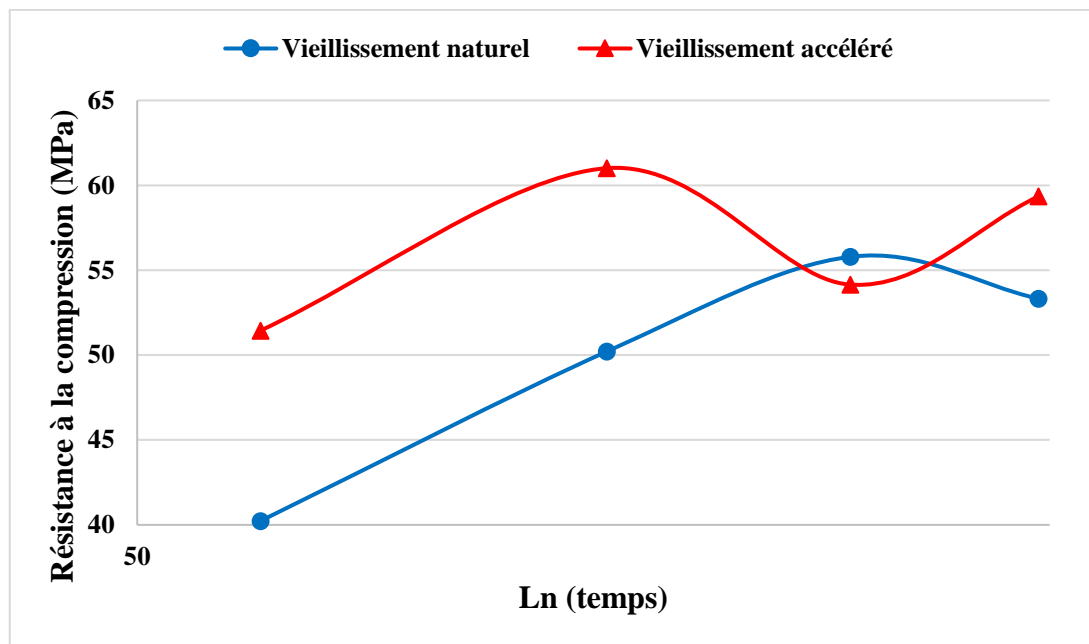


Figure 4.77 : Vieillessement naturel et accéléré des mortiers à 50% de marbre.

4.6.3. Absorption capillaire

Les figures 4.78, 4.79, 4.80 et 4.81 présentent les résultats de la sorptivité initiale des mortiers soumis aux différents cycles de séchage mouillage pour les différents taux de substitution du marbre à différents âges.

Nous remarquons une diminution de la sorptivité initiale pour pratiquement tous les mortiers en fonction de l'âge et du nombre de cycles des mortiers ayant subi le processus séchage mouillage en comparaison avec les mortiers de référence, ce qui signifie que le volume des petits pores a diminué avec l'âge et avec nombre de cycles, à la seule différence des échantillons ayant subi 60 cycles ou une augmentation de la sorptivité initiale est remarqué.

Les résultats de les sorptivité secondaire sont présentées dans les figures 4.82, 4.83, 4.84 et 4.85, nous remarquons une diminution puis une augmentation des valeurs au-delà de 45 cycles pour la majorité des échantillons ayant subi le séchage-mouillage.

D'après Wei et al [47]., le volume des pores n'est pas affecté par les cycles de séchage mouillage au début du processus, mais au-delà d'un certain nombre de cycles, le volume des gros pores commence à augmenter de façon significative mais le volume des petits pores a tendance à baisser.

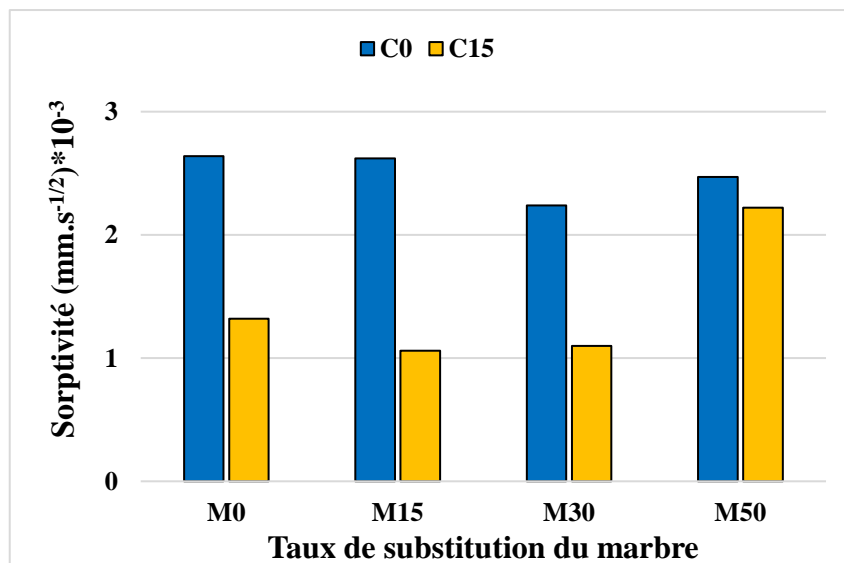


Figure 4.78 : Sorptivité initiale à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage.

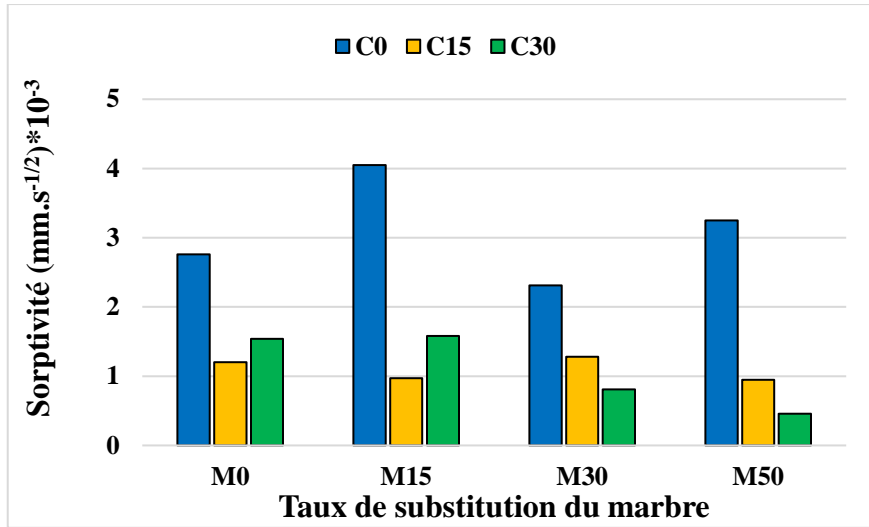


Figure 4.79 : Sorptivité initiale à 88 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage.

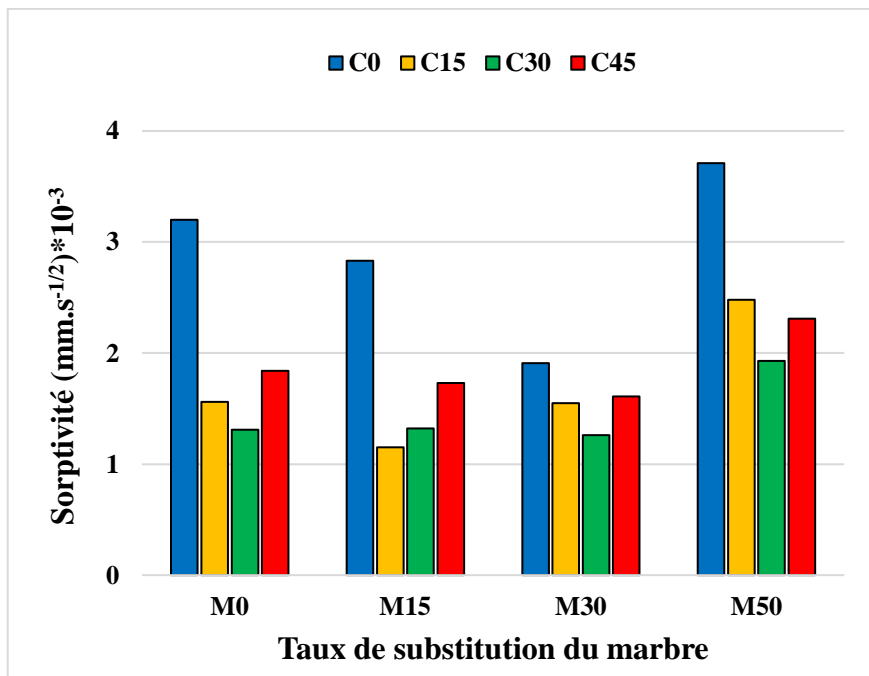


Figure 4.80 : Sorptivité initiale à 118 jours après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage.

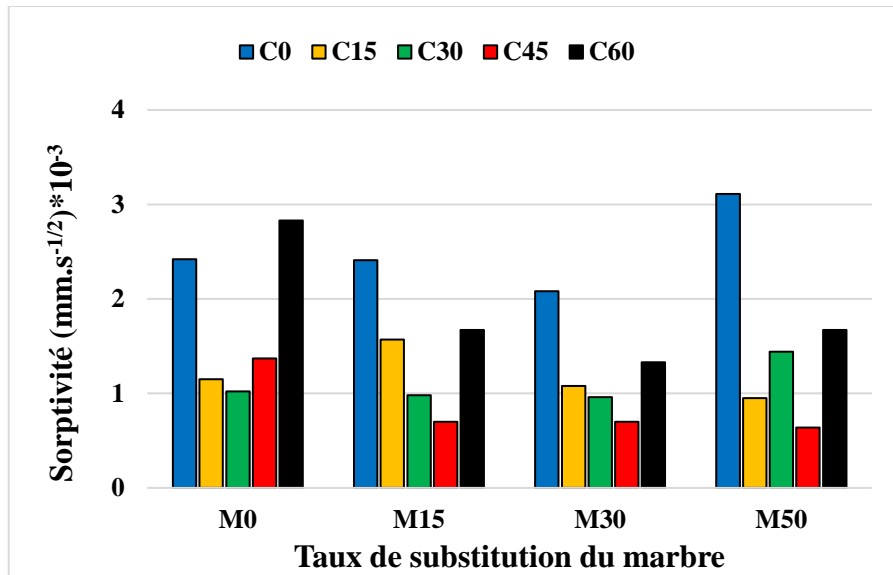


Figure 4.81 : Sorptivité initiale à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage.

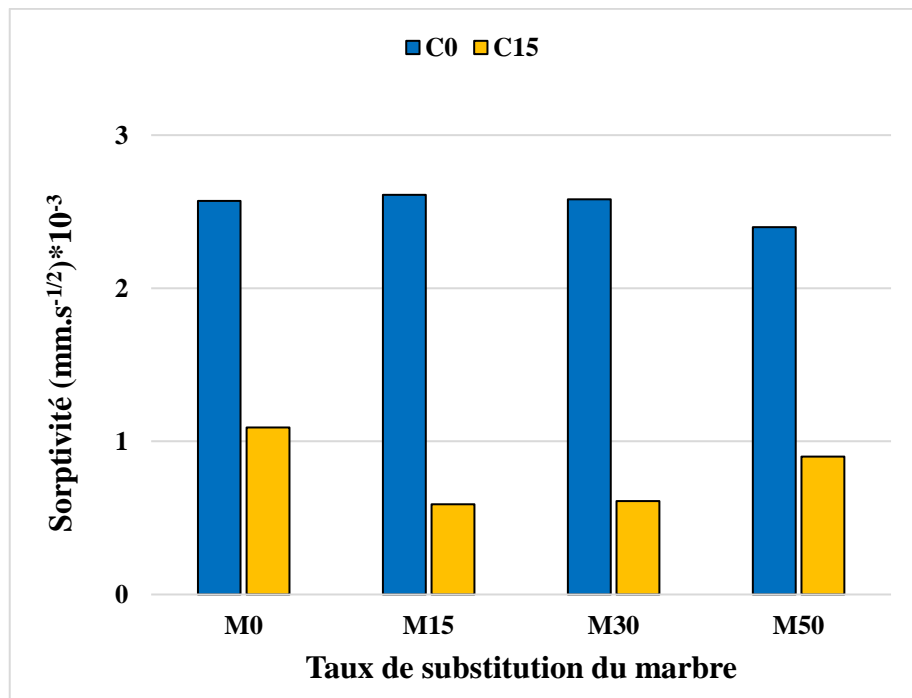


Figure 4.82 : Sorptivité secondaire à 58 jours après 15 cycles de séchage-mouillage.

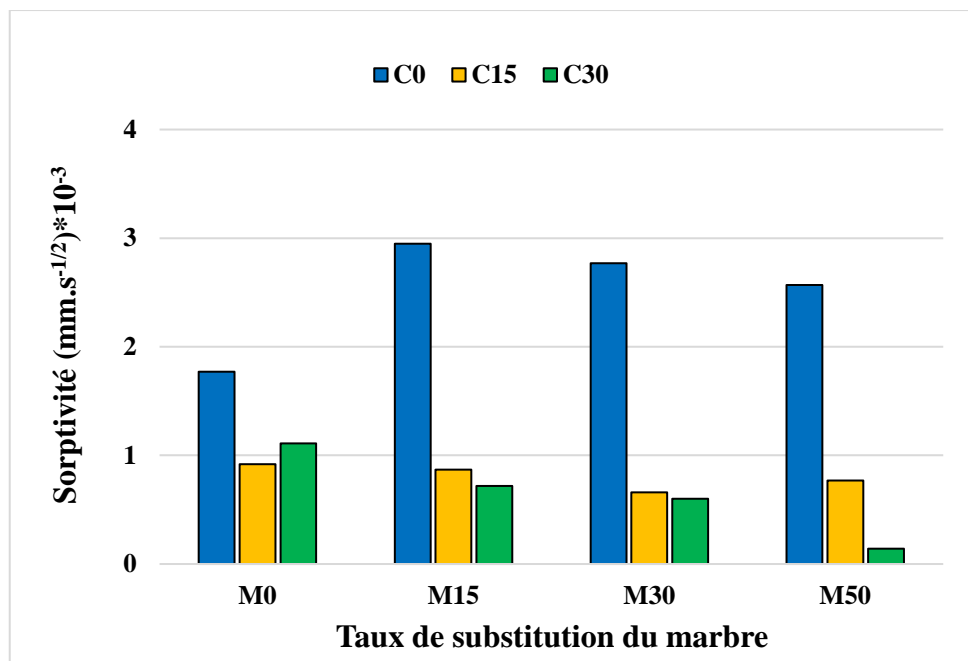


Figure 4.83 : Sorptivité secondaire à 118 jours après 15 et 30 cycles de séchage-mouillage.

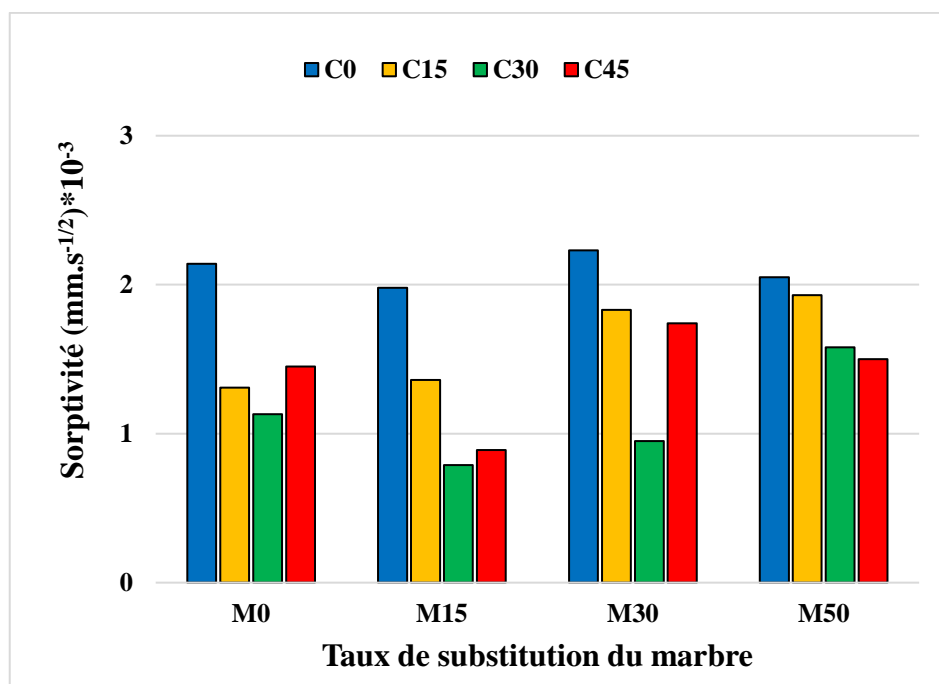


Figure 4.84 : Sorptivité secondaire à 118 jours après 15, 30 et 45 cycles de séchage-mouillage.

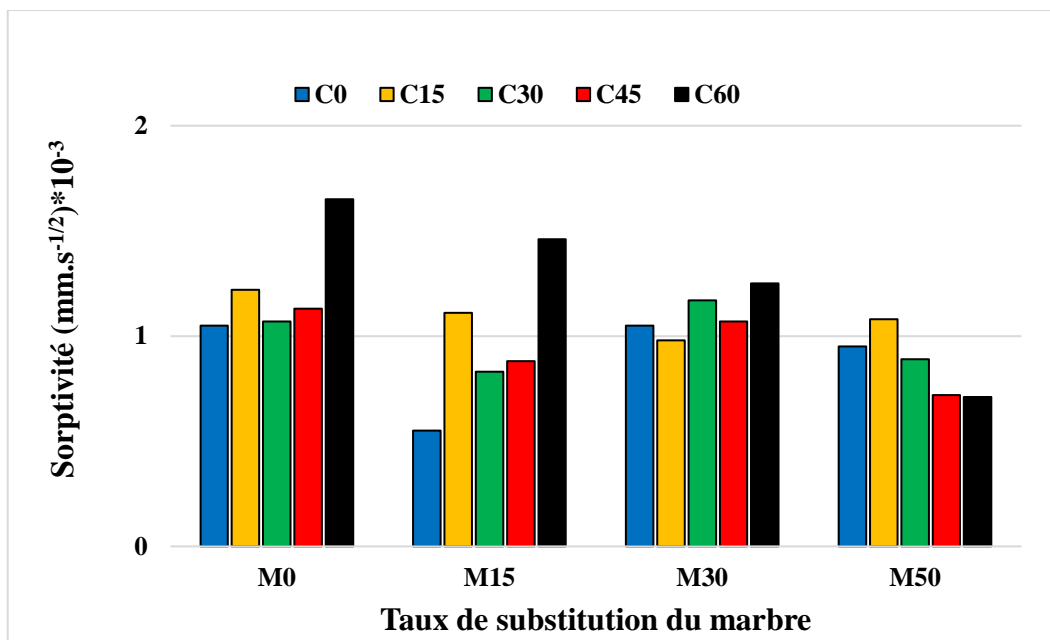


Figure 4.85 : Sorptivité secondaire à 148 jours après 15, 30, 45 et 60 cycles de séchage-mouillage.

Les figures 4.86 et 4.87 nous permettent d’avoir une vision globale des résultats de la sorptivité initiale et secondaire ou nous remarquons que les mortiers à 30 % de marbre donne la plus petite valeur de sorptivité alors que ceux à 50% donnent les plus grandes valeurs, ceci pour la sorptivité initiale et secondaire.

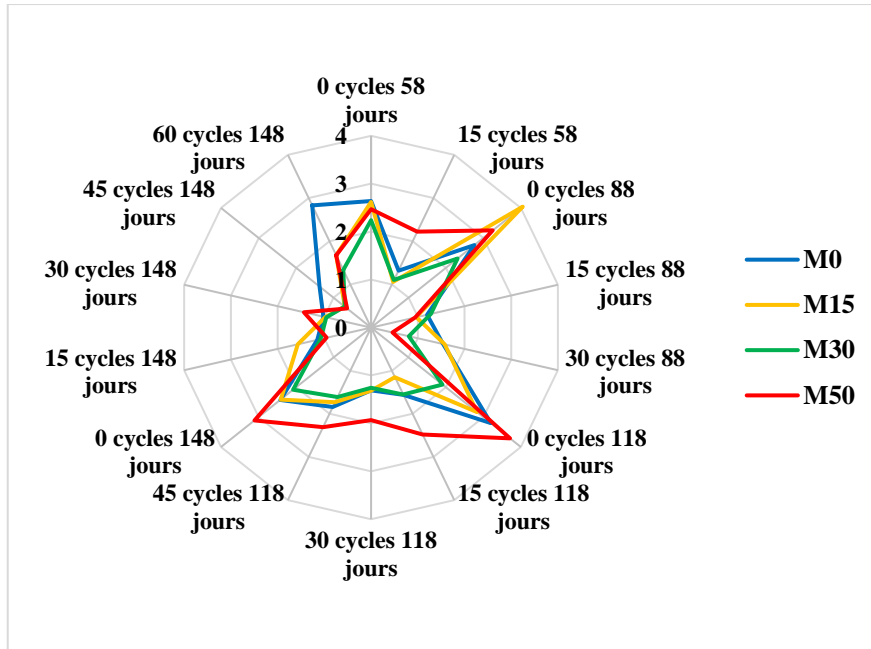


Figure 4.86 : Comparaison des valeurs de la sorptivité initiale des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges.

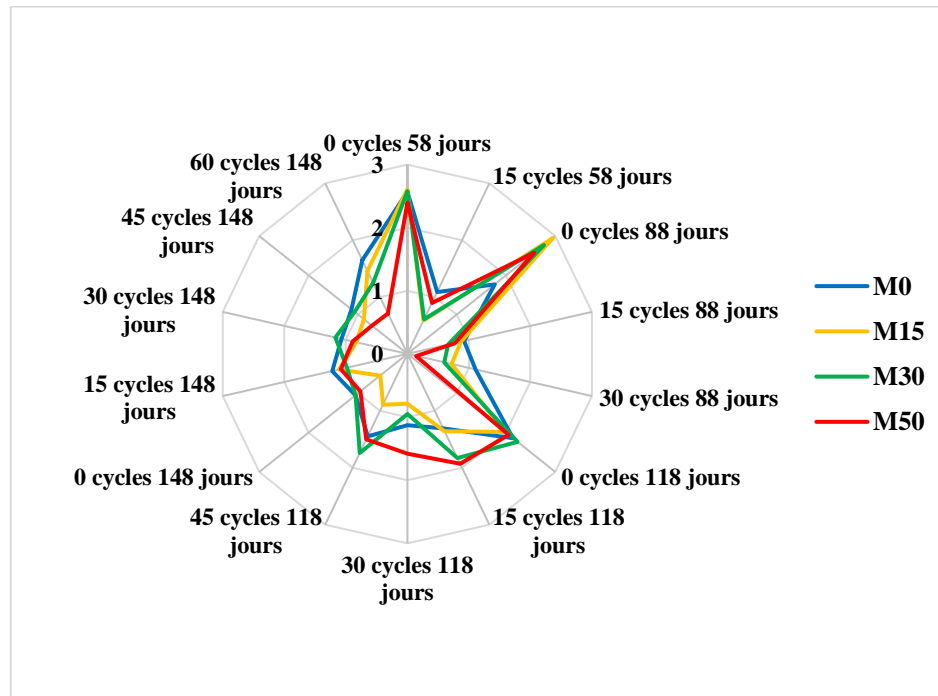


Figure 4.87 : Comparaison des valeurs de la sorptivité secondaire des échantillons pour différents taux de substitution de marbre, différents cycles de séchages-mouillages et différents âges.

4.7. Conclusion

- L'incorporation des déchets de marbre comme substitution du sable naturel dans les mortiers autoplaçants permet d'augmenter l'ouvrabilité et le pourcentage de l'air occlus.
- La substitution du sable par 30% de marbre améliore les résistances mécaniques principalement à 90 jours ou la résistance à la compression augmente de 8% et la résistance à la flexion augmente de 17%.
- L'utilisation des déchets de marbre permet de réduire la sorptivité ce qui limite la pénétration des agents agressifs comme les sulfates et les ions chlore.
- L'ajout des fibres de verre recyclées améliore les résistances mécaniques principalement la résistance à la flexion, une augmentation de 40.2% a été constaté à 28 jours pour un ajout de fibres de 1.5 kg/m³.
- Les essais de vieillissement mettent en évidence la possibilité d'accélérer le développement des matériaux par la technique de séchage-mouillage. Les résultats montrent une amélioration des caractéristiques mécaniques en dessous de 30 cycles de séchage mouillage, au-delà, des signes de détérioration sont observés.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail s'intègre dans les projets à impact environnemental qui vise à valoriser les déchets et à les réutiliser en tant que matériaux de construction. Cette étude a analysé en premier lieu, les effets de la substitution du sable naturel par les déchets de marbre sur le comportement des mortiers autoplaçants à l'état frais et durci et par rapport à certains paramètres liés à la durabilité, ensuite, l'effet de l'ajout des fibres de verre recyclées sur les performances des mortiers autoplaçants, et en dernier lieu l'effet de la combinaison du sable de marbre et des fibres de verre recyclées.

Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'utilisation des déchets de marbre en tant que substitut du sable naturel donne des résultats assez satisfaisants à l'état frais et durci.
- Les essais sur les mortiers autoplaçants à base de sable de marbre montrent une amélioration de l'ouvrabilité.
- Les résultats à l'état durci montrent une amélioration des performances mécaniques des mortiers autoplaçants, particulièrement à 90 jours ou nous nous avons constaté une amélioration de la résistance à la compression de 8% et de la résistance à la flexion de 17%, ceci pour un taux de substitution du sable naturel par les déchets de marbre de 30%.
- L'utilisation des déchets de marbre permet de réduire la sorptivité ce qui améliore la résistance aux attaques sulfatiques en limitant la pénétration des sulfates.
- L'ajout des fibres de verre améliore l'ouvrabilité jusqu'à un certain dosage (1kg/m^3), une diminution de l'ouvrabilité est constatée au-delà de cette valeur.
- Une augmentation des résistances mécaniques est constaté en fonction du dosage en fibres. A 28 jours, nous avons une augmentation de la résistance à la compression de près de 17% et une augmentation de la résistance à la flexion de 63%.
- La combinaison des déchets de marbre et des fibres de verre permet d'améliorer encore plus les résistances mécaniques particulièrement la résistance à la flexion.

- Le vieillissement des matériaux peut être accéléré par des techniques dont la technique de séchage mouillage en fixant la température de séchage et les périodes de séchage et mouillage.
- Une augmentation des résistances mécaniques a été constaté pour des cycles de séchage mouillage en dessous de 45 cycles, au-delà, une diminution des résistances a été remarqué.
- Les mortiers à base de sable de marbre ont développé une meilleure résistance au vieillissement par rapport au mortiers de référence particulièrement à 60 cycles, ceci par rapport aux résultats obtenus pour les essais de la résistance à la flexion et à la compression.
- Une diminution de la sorptivité initiale en fonction des cycles est remarqué, par contre la sorptivité secondaire diminue puis augmente à nouveau au-delà de 45 cycles.
- L'échantillon à 0% de sable de marbre a été le plus affecté par les cycles de séchage-mouillage avec une perte de résistance à la flexion de plus de 40% à 60 cycles.

Perspectives

Ce travail peut être par d'autres investigations, à savoir :

- Etude de la durabilité des mortiers à fibres de verre recyclés
- Etude de l'effet du vieillissement sur les mortiers à fibres de verre recyclés
- Optimisation des procédures de séparation des fibres de la matrice afin d'éliminer le maximum de résidus.
- Etude économique sur les procédures de récupération des déchets de marbre et de fibres et leurs transformations en matériaux de construction.
- Elaborer un modèle prévisionnel afin d'avoir une vision à long terme sur le comportement des matériaux vis-à-vis du vieillissement.
- Etude micro structurale des échantillons soumis au vieillissement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Festa and G. Dreux, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Eyrolles. .
- [2] “Ministry of the Environment and Sustainable Development,” 2018. [Online]. Available: <http://www.meer.gov.dz/a/?p=1648>. [Accessed: 11-Jun-2020].
- [3] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, A. Ngamjarrojana, and A. Chaipanich, “Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume,” *Mater. Des.*, vol. 64, pp. 261–269, Dec. 2014.
- [4] P. Penacho, J. De Brito, and M. Rosário Veiga, “Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 50, pp. 47–59, 2014.
- [5] M. S. Nasr, A. A. Shubbar, Z. A. A. R. Abed, and M. S. Ibrahim, “Properties of eco-friendly cement mortar contained recycled materials from different sources,” *J. Build. Eng.*, vol. 31, p. 101444, 2020.
- [6] D. Yang, M. Liu, and Z. Ma, “Properties of the foam concrete containing waste brick powder derived from construction and demolition waste,” *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. October 2019, p. 101444, 2020.
- [7] H. Hebhou, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, and E. Ghorbel, “Use of waste marble aggregates in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1167–1171, 2011.
- [8] R. M. Andrew, “Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2017,” *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, no. 4, pp. 2213–2239, 2018.
- [9] M. Dan Gavriletea, “Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of sand market,” *Sustain.*, vol. 9, no. 7, 2017.
- [10] Algerian Ministry of Energy, “Review of achievements of the energy and mining sector year 2013,” 2014.
- [11] F. Gameiro, J. De Brito, and D. Correia da Silva, “Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry,” *Eng. Struct.*, vol. 59, pp. 654–662, 2014.

- [12] A. Ergün, “Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 806–812, 2011.
- [13] M. J. Munir, S. M. S. Kazmi, and Y. F. Wu, “Efficiency of waste marble powder in controlling alkali–silica reaction of concrete: A sustainable approach,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 590–599, 2017.
- [14] K. E. Alyamaç and R. Ince, “A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1201–1210, 2009.
- [15] A. Boukhelkhal, “Influence De La Poudre De Marbre Sur Les Propriétés Des Bétons Autoplaçants,” 2012, no. Laboratoire de recherches de génie civil, pp. 8–9.
- [16] M. Tennich, M. Ben Ouezdou, and A. Kallel, “Effets des déchets de marbre et de carrelage sur les propriétés à l ’ état durci du béton autoplaçant,” *Journée Natl. du Bét. JNB’15*, no. May, p. 6, 2015.
- [17] D. K. Ashish, “Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth,” *J. Build. Eng.*, vol. 15, pp. 236–242, 2018.
- [18] T. Uygunoğlu, I. B. Topçu, and A. G. Çelik, “Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability,” *J. Clean. Prod.*, vol. 84, no. 1, pp. 691–700, 2014.
- [19] A. André, J. De Brito, A. Rosa, and D. Pedro, “Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 65, pp. 389–396, 2014.
- [20] N. Bur, “Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l’environnement dans le cadre du développement durable,” Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2013.
- [21] L. E. Rendon and A. K. Dessi, *Concrete Durability, Cementitious Materials and Reinforced Concrete Properties, Behavior and Corrosion Resistance-*, Springer. 2017.

- [22] “Commission internationale des grands barrages.” [Online]. Available: <https://www.icold-cigb.org/>.
- [23] M. Al Shamaa, “Etude du risque de développement d’une réaction sulfatique interne et de ses conséquences dans les bétons de structure des ouvrages nucléaires,” Thèse de Doctorat, Paris-Est, 2013.
- [24] International Atomic Energy Agency, “Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL),” 2020.
- [25] M. S. J. Gani, *Cement and concrete*. Taylor and Francis, 1997.
- [26] T. Dyer, *Concrete durability*, Taylor and Francis, 2014.
- [27] B. Chen, C. Li, and L. Chen, “Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age,” *Fire Saf. J.*, vol. 44, no. 7, pp. 997–1002, 2009.
- [28] W. Yahiaoui, “Durabilité du béton autoplaçant en climat chaud,” Thèse de Doctorat, Université Blida1, 2018.
- [29] F. Wu, X. Chen, and J. Chen, “Abrasion resistance of concrete under coupled debris flow and freeze-thaw cycles,” *Wear*, vol. 524–525, no. March, p. 204805, 2023.
- [30] J. M. and I. O. Jan Skalny, *Sulfate Attack on Concrete*, Taylor and Francis, 2019.
- [31] C. Perlot-Bascules, “Influence de la décalcification des matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert: application au stockage profond de déchets radioactifs,” Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, 2008.
- [32] B. Mather, *Concrete durability*, 1st Editio., vol. 26, no. 1. Taylor and Francis, 2004.
- [33] C. Colman, D. Bulteel, V. Thiery, S. Rémond, F. Michel, and L. Courard, “Internal sulfate attack in mortars containing contaminated fine recycled concrete aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, p. 121851, 2021.
- [34] H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, and H. Kaplan, “Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 208, no. 1–3, pp. 299–308, 2008.

- [35] H. Binici and O. Aksogan, “Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate,” *J. Build. Eng.*, vol. 19, pp. 109–121, 2018.
- [36] D. M. Sadek, M. M. El-Attar, and H. A. Ali, “Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development,” *J. Clean. Prod.*, vol. 121, pp. 19–32, 2016.
- [37] K. Ito and T. Hirokawa, “Iodine and Iodine Species in Seawater: Speciation, Distribution, and Dynamics,” *Compr. Handb. Iodine*, pp. 83–91, 2009.
- [38] A. Hadj Sadok, S. Kenai, and B. Menadi, “Résistance aux sulfates des mortiers à base de ciments de laitier,” 2014.
- [39] J. Li, F. Xie, G. Zhao, and L. Li, “Experimental and numerical investigation of cast-in-situ concrete under external sulfate attack and drying-wetting cycles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 249, p. 118789, 2020.
- [40] M. N. Aziez, “Attaques sulfatiques externes des matériaux cimentaires : influence de la température,” Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaid - Tlemcen, 2017.
- [41] M. N. Aziez, A. Achour, and A. Bezzar, “Effet combiné de la température et de l’attaque au sulfate de magnésium sur la durabilité du mortier à base de ciment composé au laitier,” *J. Adv. Res. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 985–994, 2019.
- [42] C. Ouyang, A. Nanni, and W. F. Chang, “Internal and external sources of sulfate ions in portland cement mortar: two types of chemical attack,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 18, no. 5, pp. 699–709, 1988.
- [43] R. El Hachem, E. Rozière, F. Grondin, and A. Loukili, “N° : 40-321 El Hachem R.,” *Evaluation*, pp. 1–6, 2010.
- [44] J. Ollivier and J.-M. Torrenti, “La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert,” *La durabilité des bétons*, pp. 51–133, 2008.
- [45] N. Oneschkow, J. Hümme, and L. Lohaus, “Compressive fatigue behaviour of high-strength concrete in a dry and wet environment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p.

119700, 2020.

- [46] K. Wang, J. Guo, and L. Yang, “Effect of dry–wet ratio on sulfate transport-reaction mechanism in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 302, no. 100, p. 124418, 2021.
- [47] Y. Wei, J. Chai, Y. Qin, Y. Li, Z. Xu, and Y. Li, “Effect of fly ash on mechanical properties and microstructure of cellulose fiber-reinforced concrete under sulfate dry–wet cycle attack,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 302, no. July, p. 124207, 2021.
- [48] J. H. Xie, M. W. Wei, P. Y. Huang, H. Zhang, and P. S. Chen, “Fatigue behavior of the basalt fiber-reinforced polymer/concrete interface under wet-dry cycling in a marine environment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 117065, 2019.
- [49] C. Chen, L. Wang, R. Liu, P. Zhu, H. Liu, and X. Wang, “Chloride penetration of concrete exposed to dry-wet cycle with various dry-wet ratios and temperature,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 400, no. August, p. 132883, 2023.
- [50] F. Xie, J. Li, G. Zhao, P. Zhou, and H. Zheng, “Experimental study on performance of cast-in-situ recycled aggregate concrete under different sulfate attack exposures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 253, p. 119144, 2020.
- [51] J. Wang, Y. Fan, Z. Che, K. Zhang, and D. Niu, “Study on the durability of eco-friendly recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials: The combined action of compound salt solution of MgSO₄, Na₂SO₄, and NaCl and dry-wet cycles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 377, no. March, p. 131149, 2023.
- [52] J. Sainz-Aja, I. Carrascal, J. Polanco, A. Cimentada, C. Thomas, and J. Brito, “Aging of recycled aggregates mortars by drying-wetting cycles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 307, p. 124934, 2021.
- [53] A. Abou Houraira, A. Ouali, O. Elhammoumi, and A. Fekri, “Effect of accelerated aging by temperature and moisture variation cycles on the durability of concrete,” *Int. J. Build. Pathol. Adapt.*, vol. 41, no. 3, pp. 533–548, 2023.
- [54] J. Kim, S. H. Han, and Y. C. Song, “Effect of Temperature and Aging on the Mechanical Properties of Concrete Part I . Experimental Results,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 1087–1094, 2002.

- [55] J. K. Kim, S. Hun Han, and S. Kyun Park, "Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part II. Prediction model," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 7, pp. 1095–1100, 2002.
- [56] M. E. Mathews, T. Kiran, V. C. Hasa Naidu, G. Jeyakumar, and N. Anand, "Effect of high-temperature on the mechanical and durability behaviour of concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 718–725, 2020.
- [57] B. Zhang and H. Zhu, "Durability of seawater coral aggregate concrete under seawater immersion and dry-wet cycles," *J. Build. Eng.*, vol. 66, p. 105894, 2023.
- [58] A. MUELLER, "The effect of drying and drying temperature on soil analytical test values," Thesis, The Oklahoma State University, 2015.
- [59] C. Thomas, P. Tamayo, J. Setién, D. Ferreño, J. A. Polanco, and J. Rico, "Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, p. 121920, 2021.
- [60] Y. L. Wang, X. Y. Guo, S. Y. H. Shu, Y. C. Guo, and X. M. Qin, "Effect of salt solution wet-dry cycling on the bond behavior of FRP-concrete interface," *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, p. 119317, 2020.
- [61] J. Gao, Z. Yu, L. Song, T. Wang, and S. Wei, "Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying-wetting cycles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 33–38, 2013.
- [62] F. Xu, S. Wang, T. Li, B. Liu, B. Li, and Y. Zhou, "The mechanical properties of tailing recycled aggregate concrete and its resistance to the coupled deterioration of sulfate attack and wetting–drying cycles," *Structures*, vol. 27, no. 13, pp. 2208–2216, 2020.
- [63] D. Huang, D. Niu, L. Su, and Q. Fu, "Chloride diffusion behavior of coral aggregate concrete under drying-wetting cycles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, no. 121485, 2021.
- [64] R. He, S. Zheng, V. J. L. Gan, Z. Wang, J. Fang, and Y. Shao, "Damage mechanism and interfacial transition zone characteristics of concrete under sulfate erosion and Dry-Wet cycles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 255, p. 119340, 2020.

- [65] X. H. Wang, E. Bastidas-Arteaga, and Y. Gao, “Probabilistic analysis of chloride penetration in reinforced concrete subjected to pre-exposure static and fatigue loading and wetting-drying cycles,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 84, no. November 2017, pp. 205–219, 2018.
- [66] G. Delannoy, S. Marceau, P. Glé, E. Gourlay, M. Guéguen-Minerbe, and S. Amziane, “Durability of hemp concretes exposed to accelerated environmental aging,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 119043, 2020.
- [67] B. Qi, J. Gao, F. Chen, and D. Shen, “Evaluation of the damage process of recycled aggregate concrete under sulfate attack and wetting-drying cycles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 138, pp. 254–262, 2017.
- [68] J. G. Tapali, S. Demis, and V. G. Papadakis, “Sustainable concrete mix design for a target strength and service life,” *Comput. Concr.*, vol. 12, no. 6, pp. 755–774, 2013.
- [69] H. S. Arel, “Re-Use of Waste Marble in Producing Green Concrete,” *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 10, no. 11, pp. 1377–1386, 2016.
- [70] D. Yang, Y. Yang, and J. Xia, “Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review,” *Geogr. Sustain.*, vol. 2, no. 2, pp. 115–122, 2021.
- [71] G. Reddy Babu and N. Venkata Ramana, “Feasibility of wastewater as mixing water in cement,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 1607–1614, 2018.
- [72] M. F. Arooj, F. Haseeb, A. I. Butt, M. Irfan-Ul-Hassan, H. Batool, and S. Kibriya, “A sustainable approach to reuse of treated domestic wastewater in construction incorporating admixtures,” *J. Build. Eng.*, vol. 33, no. June 2020, p. 101616, 2021.
- [73] M. Bahraman, G. Asadollahfardi, A. M. Salehi, and B. Yahyaei, “Feasibility study of using wash water from ready mixed concrete plant and synthetic wastewater based on tap water with different total dissolved solid to produce self-compacting concrete,” *J. Build. Eng.*, vol. 41, no. May, pp. 1–11, 2021.
- [74] P. Peduzzi, “Sand, rarer than one thinks. Article reproduced from United Nations Environment Programme (UNEP) Global Environmental Alert Service (GEAS),” *Environ. Dev.*, vol. 11, pp. 208–218, 2014.

- [75] S. Da and P. Le Billon, "Sand mining: Stopping the grind of unregulated supply chains," *Extr. Ind. Soc.*, vol. 10, no. March, p. 101070, 2022.
- [76] E. S. Rentier and L. H. Cammeraat, "The environmental impacts of river sand mining," *Sci. Total Environ.*, vol. 838, no. March, p. 155877, 2022.
- [77] M. Zolghadr, S. M. Ali Zomorodian, R. Sha'bani, and H. M. Azamatulla, "Migration of sand mining pit in rivers: An experimental, numerical and case study," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 172, no. April 2020, p. 108944, 2021.
- [78] B. Barman, B. Kumar, and A. K. Sarma, "Impact of sand mining on alluvial channel flow characteristics," *Ecol. Eng.*, vol. 135, no. May, pp. 36–44, 2019.
- [79] J. D. Morley, R. J. Myers, Y. Plancherel, and P. R. Brito-Parada, "A Database for the Extraction, Trade, and Use of Sand and Gravel," *Resources*, vol. 11, no. 4, pp. 1–17, 2022.
- [80] "Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville." [Online]. Available: <https://www.mhuv.gov.dz/fr/accueil/>.
- [81] Z. Duan, Q. Deng, C. Liang, Z. Ma, and H. Wu, "Upcycling of recycled plastic fiber for sustainable cementitious composites: A critical review and new perspective," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 142, 2023.
- [82] M. Ibrahim, W. Alimi, R. Assaggaf, B. A. Salami, and E. A. Oladapo, "An overview of factors influencing the properties of concrete incorporating construction and demolition wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 367, 2023.
- [83] S. A. Abera, "Analytical study on properties of concrete materials incorporating recycled aggregates from construction and demolition waste," *Mater. Today Proc.*, vol. 52, pp. 2172–2183, 2022.
- [84] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, A. Ngamjarrojana, and A. Chaipanich, "Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume," *Mater. Des.*, vol. 64, pp. 261–269, 2014.
- [85] A. Benli, M. Karataş, and E. Gurses, "Effect of sea water and MgSO₄ solution on the

- mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 464–474, 2017.
- [86] M. Abdul Basit, N. M. Sadiqul Hasan, M. Jihad Miah, and S. Chandra Paul, “Strength and cost analysis of concrete made from three different recycled coarse aggregates,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2023.
- [87] M. A. B. Martins, L. R. R. Silva, B. H. B. Kuffner, R. M. Barros, and M. L. N. M. Melo, “Behavior of high strength self-compacting concrete with marble/granite processing waste and waste foundry exhaust sand, subjected to chemical attacks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 323, no. January, p. 126492, 2022.
- [88] S. Singh, AnshumanTiwari, R. Nagar, and V. Agrawal, “Feasibility as a Potential Substitute for Natural Sand: A Comparative Study between Granite Cutting Waste and Marble Slurry,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 571–582, 2016.
- [89] J. Ahmad and Z. Zhou, “Development of high strength self compacting concrete with waste glass and waste marble,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 408, no. July, p. 133760, 2023.
- [90] “Bilan des réalisations du secteur de l’énergie et des mines.”
- [91] “Production minière : année 2018,” vol. 3, p. 2018, 2018.
- [92] O. Gencel, M. Nodehi, O. Yavuz Bayraktar, G. Kaplan, A. Benli, and F. Koksall, “The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 361, no. 10, p. 129612, 2022.
- [93] I. B. Topçu, T. Bilir, and T. Uygunoğlu, “Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1947–1953, 2009.
- [94] M. Singh, A. Srivastava, and D. Bhunia, “An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 471–488, 2017.
- [95] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M. E. Kocabağ, V. Bayram, and K. Mermerdaş, “Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble

- powder, limestone filler, and fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 160–170, 2012.
- [96] K. I. S. A. Kabeer and A. K. Vyas, “Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 321–332, 2018.
- [97] B. Demirel, “The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete,” *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 5, no. 9, pp. 1372–1380, 2010.
- [98] A. Khodabakhshian, J. de Brito, M. Ghalehnovi, and E. Asadi Shamsabadi, “Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 169, no. 2018, pp. 237–251, 2018.
- [99] A. Raif Boğa and A. Ferdi Şenol, “The effect of waste marble and basalt aggregates on the fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 363, 2023.
- [100] A. Essam, S. A. Mostafa, M. Khan, and A. M. Tahwia, “Modified particle packing approach for optimizing waste marble powder as a cement substitute in high-performance concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 409, 2023.
- [101] E. Tugrul Tunc, “Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste,” *J. Environ. Manage.*, vol. 231, no. September 2018, pp. 86–97, 2019.
- [102] S. Varadharajan, “Determination of mechanical properties and environmental impact due to inclusion of flyash and marble waste powder in concrete,” *Structures*, vol. 25, no. February, pp. 613–630, 2020.
- [103] M. Ahmadi, E. Abdollahzadeh, and M. Kioumars, “Using marble waste as a partial aggregate replacement in the development of sustainable self-compacting concrete,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2023.
- [104] C. Vaidevi, T. Felix Kala, and A. R. R. Kalaiyarrasi, “Mechanical and durability properties of self-compacting concrete with marble fine aggregate,” *Mater. Today Proc.*, vol. 22, pp. 829–835, 2020.

- [105] R. K. Khyaliya, K. I. S. A. Kabeer, and A. K. Vyas, "Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 598–607, 2017.
- [106] T. O. Osman Gencil, Mehrab Nodehi, Oguzhan Yavuz Bayraktar, Gokhan Kaplan, Ahmet Benli, Fuat Koksall, Turhan Bilir, Rafat Siddique, "The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study."
- [107] M. Sardinha, J. de Brito, and R. Rodrigues, "Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge," *Constr. Build. Mater.*, vol. 119, pp. 45–52, 2016.
- [108] S. Sreekumar Kavitha, L. Joseph, M. K. Madhavan, and K. Jayanarayanan, "Comparative study of carbon and glass fiber reinforced polymer composites for the confinement of concrete columns," *Mater. Today Proc.*, no. August 2023, pp. 1–6, 2023.
- [109] L. Chen, Z. Chen, Z. Xie, L. Wei, J. Hua, and L. Huang, "Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities," *Dev. Built Environ.*, vol. 16, no. July, p. 100255, 2023.
- [110] R. Agogu e and G. Dennier, "Guide pour le recyclage et l' ecoconception des composites – rapport technique.," Agence de la transition  cologique, 2022.
- [111] F. Tittarelli, "Effect of low dosages of waste GRP dust on fresh and hardened properties of mortars: Part 2," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1539–1543, 2013.
- [112] F. Tittarelli and S. P. Shah, "Effect of low dosages of waste GRP dust on fresh and hardened properties of mortars: Part 1," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1532–1538, 2013.
- [113] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, and B. F. S orensen, "Materials for wind turbine blades: An overview," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, pp. 1–24, 2017.
- [114] N. Kumar Yierlapalli, D. Kumar Boda, and S. Banda Lakshmi Patiswara, "Effect of ambient curing periods on the mechanical properties of geopolymer concrete prepared with three mineral admixtures and glass fibers," *Mater. Today Proc.*, vol. 92, no. 2, pp.

- 1–8, 2023.
- [115] M. Jawad, M. Idrees, and A. Akbar, “Performance of silica fume slurry treated recycled aggregate concrete reinforced with carbon fibers,” *J. Build. Eng.*, vol. 66, no. January, p. 105892, 2023.
- [116] T. Alomayri, A. M. Yosri, B. Ali, S. Safdar, M. Yaqub, and R. Kurda, “The influence of coconut fibres and ground steel slag on strength and durability properties of recycled aggregate concrete : sustainable design of fibre reinforced concrete,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 10027–10039, 2023.
- [117] R. R. Patil and V. D. Katare, “Application of fiber reinforced cement composites in rigid pavements: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 52, no. 1, pp. 1–10, 2023.
- [118] F. Tittarelli and G. Moriconi, “Use of GRP industrial by-products in cement based composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 3, pp. 219–225, 2010.
- [119] D. García, I. Vegas, and I. Cacho, “Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 293–300, 2014.
- [120] M. C. S. Ribeiro, A. C. Meira-Castro, F. G. Silva, J. Santos, J. P. Meixedo, and A. Fiúza, “Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 104, pp. 417–426, 2015.
- [121] M. Mastali, A. Dalvand, and A. R. Sattarifard, “The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers,” *J. Clean. Prod.*, vol. 124, pp. 312–324, 2016.
- [122] B. Zhou, M. Zhang, L. Wang, and G. Ma, “Experimental study on mechanical property and microstructure of cement mortar reinforced with elaborately recycled GFRP fiber,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 117, no. December 2020, p. 103908, 2021.
- [123] “EN 196-1, Méthodes d’essais des ciments - Partiel : détermination des résistances - Méthodes d’essais des ciments - Partiel : Détermination des résistances.”
- [124] N. P. 15-301, “Ciment – partie 1 Liants hydrauliques Ciments courants Composition,

spécifications et critères de conformité,” *AFNOR*, 2015.

- [125] NF EN 1008, “Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton,” *Eur. Stand. AFNOR*, 2003.
- [126] J. Domone P.L.J et Jin, “Properties of mortar for self-compacting concrete,” in *Proceedings or Rilem International Symposium of Self-Compacting Concrete, Stockholm, RiILEM Proceedings PRO7, Paris*, 1999, pp. 109–120.
- [127] O. Boukendakdji, “Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires,” Thèse de Doctorat, Université Blida1, 2010.
- [128] N. E. 12350-7, “Testing fresh concrete - Part7 : air content - Pressure methods,” 2019.
- [129] “ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes,” 2013.
- [130] “NF P 18-459 Concrete - Testing hardened concrete - Testing porosity and density.” 2010.
- [131] ASTM C1012/C1012M-15, “Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution,” vol. 11, pp. 5–9, 2015.
- [132] J. J. P.L.J. Domone, “Properties of mortar for self-compacting concrete,” in *First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 1999, pp. 109–120.
- [133] K. Vardhan, R. Siddique, and S. Goyal, “Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, pp. 45–55, 2019.
- [134] A. Danish, M. Ali, M. Usama, R. Fediuk, M. Fawad, and R. Muhammad, “Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites : A review on sustainability benefits and critical challenges,” *J. Build. Eng.*, vol. 44, p. 102600, 2021.
- [135] H. Kaplan, “Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete,” *Sci. Res. Essays*, vol. 2, no. 9, pp. 372–379, 2007.

- [136] X. Chen, H. Chen, Q. Chen, A. S. Lawi, and J. Chen, "Effect of partial substitution of cement with Dolomite powder on Glass-Fiber-Reinforced mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 344, no. February, p. 128201, 2022.
- [137] W. Wang, A. Shen, Z. Lyu, Z. He, and K. T. Q. Nguyen, "Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete, a review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 296, p. 123734, 2021.
- [138] T. Ahmad Wani and S. Ganesh, "Study on fresh properties, mechanical properties and microstructure behavior of fiber reinforced self compacting concrete: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 62, no. P12, pp. 6663–6670, 2022.