

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté Génie civil et d'architecture

Département Génie civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention d'un diplôme de :

DOCTORAT en SCIENCES

Spécialité : **Génie Civil**

Option : **Génie Civil**

Par

KORTEBY Abdelkarim

Thème :

**Valorisation des déchets de verre et leurs apports techniques
aux bétons autoplaçant**

Soutenue le **23/09/2025**, devant le jury composé de :

GHRICI Mohamed	Professeur	UHB Chlef	Président
BOUBEKEUR Toufik	Professeur	UAW Tissemsilt	Examineur
ALI BENYAHIA Khodja	Professeur	UDB Khemis Miliana	Examineur
IRKI Iyes	MCA	CUMA Tipaza	Examineur
EZZIANE Karim	Professeur	Université de Chlef	Rapporteur

REMERCIEMENTS

Je remercie Allah le tout puissant de m'avoir accordé patience, courage et santé pour l'élaboration et la finalisation de cette thèse de doctorat.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le Professeur EZZIANE Karim de l'Université de Chlef. Sa confiance, son expertise et sa disponibilité ont joué un rôle fondamental dans l'élargissement de mes connaissances et le développement de ma réflexion. Par son enthousiasme communicatif, il m'a transmis la passion pour la recherche. Ses relectures minutieuses et ses corrections pertinentes ont significativement contribué à la qualité de ce travail, auquel il a apporté une aide précieuse.

Je tiens à remercier monsieur Pr. GHRICI Mohammed, directeur du laboratoire de Géomatériaux de l'université de Chlef (LaG) pour avoir accepté de présider le jury de cette soutenance et de l'enrichir par son savoir-faire. Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury, Messieurs Pr. BOUBEKEUR Toufik de l'université de Tissemsilt, Pr. ALI BENYAHIA Khodja de l'université de Khemis Miliana et Dr. IRKI Ilyes du centre universitaire de Tipaza pour l'intérêt qu'ils ont témoigné pour cette étude en acceptant de participer au jury.

Je remercie également le Pr. ADJOU DJ Mhamed de l'Université de Chlef, pour son regard critique, la pertinence de ses conseils et sa disponibilité constante. Sa précieuse collaboration m'a permis d'affiner et d'enrichir cette thèse, et son soutien a été d'un grand réconfort tout au long de cette aventure scientifique.

J'adresse toute ma reconnaissance au Dr. OULD KHAOUA Younes, Maître de conférences à l'USTHB, pour son soutien inébranlable, ses conseils éclairés et ses encouragements constants, qui ont été des points d'appui essentiels tout au long de mon parcours doctoral. Son expertise et son engagement ont été d'une aide précieuse dans les moments décisifs de ce travail.

Je tiens à remercier aussi et exprimer ma gratitude à toute l'équipe du laboratoire de Géomatériaux de l'Université de Chlef (LaG), au sein duquel j'ai réalisé mes essais expérimentaux.

ملخص

الخرسانة ذاتية الدمك هي خرسانة شديدة السيولة يمكنها أن تنتوزع داخل القوالب الأكثر تعقيداً والمكتظة بالتسليح تحت تأثير وزنها الذاتي فقط، من دون الحاجة إلى اهتزاز خارجي. يتم تحقيق خاصية "الدمك الذاتي" بفضل استخدام كمية كبيرة من المواد الناعمة المكونة من الأسمنت والإضافات المعدنية، وذلك لضمان توزيع جيد للحصى الخشن ومنع أي ميل للانفصال الحبيبي. يُعتبر استخدام الإضافات ذات الأصل المعدني كبدائل جزئي للأسمنت أمراً مفيداً للغاية، إذ يساهم في تقليل كمية الأسمنت المستعملة، وبالتالي خفض إنتاجه، مما يؤدي إلى تقليل التكلفة، والحفاظ على الموارد الطبيعية، والحد من انبعاث الغازات الدفيئة. كما أن تامين نفايات الزجاج ومخلفات المحاجر في المواد الإسمنتية يمكن أن يشكل بديلاً بيئياً واقتصادياً واعداً.

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير إضافة نفايات الزجاج على شكل مسحوق ناعم جداً، وكذلك الرمل المكسر (SC)، على الخصائص الفيزيائية والريولوجية والميكانيكية للمونة ذاتية الدمك (MAP) كما يسعى إلى تطوير خرسانة ذاتية الدمك اقتصادية وصديقة للبيئة تحتوي على مسحوق الزجاج كإضافة إسمنتية بديلة جزئياً للأسمنت، وعلى نفايات المحاجر كرمال مكسر. تم استبدال الأسمنت جزئياً بمسحوق الزجاج بنسبة 0%، 10%، 20%، و30% من الحجم، وتمت مقارنة خصائص المونة ذاتية الدمك المعتمدة على الرمل المكسر (SC) بتلك المعتمدة على الرمل الطبيعي (SN). أظهرت النتائج أن إدخال 10% من مسحوق الزجاج (PV) مع أنواع مختلفة من خلطات الرمل يزيد من سيولة المونة ذاتية الدمك. وبعد 90 يوماً، أظهرت المونة التي تحتوي على 10% من مسحوق الزجاج زيادة بنسبة 5% في المقاومة الميكانيكية. كما تم الحصول على أفضل الأداءات من الخلطات المحضرة بالرمل المكسر مقارنة بتلك التي تحتوي على الرمل الطبيعي. وتم تحديد علاقات رياضية مناسبة للتنبؤ بانتشار المونة ومقاومتها الميكانيكية تبعاً لمتغيرات الاختبار، مع معامل ارتباط قريب من الواحد وخطاً تربيعي متوسط منخفض.

الكلمات المفتاحية : النفايات؛ الرمل المكسر؛ إعادة التدوير؛ المونة ذاتية الدمك؛ مسحوق الزجاج.

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) is a very fluid type of concrete that can flow and fill even the most complex and congested formworks under its own weight, without the need for external vibration. The self-compacting ability is made possible by the use of a large quantity of fine materials composed of cement and mineral additions, which ensure good dispersion of coarse aggregates without any tendency to segregation. The use of additions derived from waste recycling as a substitute for cement is highly beneficial, as it reduces the amount of cement consumed and consequently decreases its production, leading to cost savings, preservation of natural resources, and reduction of greenhouse gas emissions. The valorization of glass waste and quarry waste in cementitious materials could represent an interesting ecological and economic alternative. The interest in recycling these wastes is justified by their abundance in large quantities, with no established recovery or recycling systems.

This work aims to study the influence of adding finely ground glass waste powder as well as crushed sand (CS) on the physical, rheological, and mechanical behavior of self-compacting mortar, and to develop an economic and ecological SCC incorporating glass powder as a partial cement substitute together with quarry waste in the form of crushed sand. Cement was partially replaced with glass powder at levels of 0%, 10%, 20%, and 30% by volume, and the properties of SCMs (self-compacting mortars) based on CS were compared with those based on natural sand (NS). The results show that incorporating 10% glass powder with different types of sand mixtures improves the fluidity of SCMs. After 90 days, SCMs containing 10% glass powder exhibited a 5% increase in mechanical strength. The best performance was obtained with SCMs prepared using CS compared to those with NS. Adequate relationships were established to predict flowability and mechanical strengths as a function of test parameters, with correlation coefficients close to unity and a low mean square error.

Keywords: waste ; crushed sand ; recycling ; self-compacting mortar ; glass powder

RESUME

Les bétons autoplaçant ce sont des bétons très fluide qui se mettent en place dans les coffrages les plus complexes et les très encombrés uniquement sous son propre poids, sans vibration extérieure. L'obtention de l'autoplaçance est rendue possible par l'emploi d'une quantité importante de fines composée de ciment et d'addition minérale pour assurer une bonne dispersion des gros granulats sans aucune tendance à la ségrégation. L'utilisation des ajouts dont l'origine est le recyclage des déchets en remplacement du ciment est très bénéfique, elle réduit la quantité de ciment utilisée et par conséquent réduire leur production ce qui nous donne un gain du cout, une préservation des ressources naturelles et réduction de l'émission de gaz à effet de serre. La valorisation des déchets de verre et des déchets de carrière dans les matériaux cimentaires pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante.

Ce travail vise à étudier l'influence de l'addition des déchets de verre comme poudre finement broyée ainsi que le sable concassé (SC) sur le comportement physique, rhéologique et mécanique du mortier autoplaçant (MAP) et de développer un béton autoplaçant économique et écologique contenant la poudre de verre comme ajout cimentaire en remplacement partiel du ciment ainsi que les déchets de carrière comme sable concassé. Le ciment a été partiellement remplacé par la poudre de verre à des taux de 0%, 10%, 20% et 30% en volume, et les propriétés des MAP à base du SC ont été comparées à celles des MAP à base du sable naturel (SN). Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de 10% de PV avec différents types de mélanges de sable augmente la fluidité des MAP. A 90 jours, les MAP contenant 10% de PV ont présentés une augmentation de 5% dans les résistances mécaniques. Les meilleures performances ont été obtenues avec les mélanges de MAP préparés avec du SC comparés à ceux contenant du SN. Des relations adéquates ont été établies pour prédire l'étalement et les résistances mécaniques en fonction des paramètres d'essai, avec un coefficient de corrélation proche à l'unité et une faible erreur quadratique moyenne.

Mots-clés : déchets ; Sable concassé ; recyclage ; mortier autoplaçant ; poudre de verre ;

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	I
ملخص.....	II
Abstract.....	III
Résumé.....	IV
Table des Matières.....	V
Liste des Figures.....	VII
Liste des Tableaux.....	X
Liste des Abréviations et notations.....	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	2
1. Contexte général et problématique.....	2
2. Objectif de travail.....	3
3. Structure de la thèse.....	3
CHAPITRE I REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
I.1 INTRODUCTION.....	6
I.2 BÉTON AUTOPLAÇANT.....	6
I.2.1 Avantages des BAP.....	7
I.2.2 Constituants d'un BAP.....	8
I.2.3 Formulations et compositions des BAP.....	11
I.2.4 Caractérisation du BAP à l'état frais.....	14
I.2.5 Caractérisation du BAP à l'état durci.....	18
I.2.6 Mortier Autoplaçant (MAP).....	21
I.3 DÉVELOPPEMENT DE LA CONSTRUCTION DURABLE.....	25
I.3.1 Avantages environnementaux.....	27
I.3.2 Les défis et les considérations associés à la construction durable.....	29
I.3.3 Études des constructions durables.....	30
I.3.4 Recyclage et gestion des déchets en génie civil.....	35
I.4 LE VERRE : FABRICATION, COMPOSITION, PROPRIÉTÉS ET DÉCHETS.....	39
I.4.1 Définition du Verre.....	39
I.4.2 Fabrication du Verre.....	39
I.4.3 Composition Chimique du Verre.....	39
I.4.4 Les Types de Verre.....	40
I.4.5 Utilisation des Déchets de Verre.....	40
I.4.6 Recyclage du verre en Algérie.....	41
I.4.7 Le verre recyclé dans le béton.....	42
I.5 LA POUDRE DE VERRE : COMPORTEMENT ET EFFET SUR LE BÉTON.....	42
I.5.1 Réaction Pouzzolanique de la poudre de verre.....	42
I.5.2 Réaction alcali-silice du verre.....	46
I.5.3 Effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité de béton.....	47
I.5.4 Effet de la poudre de verre sur le temps de prise de béton.....	49
I.5.5 Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression de béton.....	51
I.5.6 Effet de la poudre de verre sur la résistance à la traction de béton.....	54
I.5.7 Effet de la poudre de verre sur la chaleur d'hydratation.....	57
I.5.8 Effet de la poudre de verre sur la durabilité de béton.....	58
I.6 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUES.....	68
CHAPITRE II MATERIAUX, FORMULATIONS ET METHODOLOGIE.....	70
II.1 INTRODUCTION.....	71
II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES.....	71
II.2.1 Ciment.....	71

II.2.2	La poudre de verre	71
II.2.3	Sable	73
II.2.4	Superplastifiant	74
II.2.5	Eau de gâchage	75
II.3	PROTOCOL EXPERIMENTALE	75
II.3.1	Étude de la pouzzolanité de la poudre de verre (PV)	76
II.3.2	Développement des formulations de mortier autoplâçant (MAP)	76
II.3.3	Caractérisation à l'état frais	76
II.3.4	Évaluation de la chaleur d'hydratation	77
II.3.5	Caractérisation à l'état durci	77
II.3.6	Analyse de l'indice d'activité pouzzolanique	77
II.4	FORMULATION	77
II.5	PROCEDURE DE MALAXAGE	78
II.6	ESSAIS ET METHODES	79
II.6.1	Activation de la poudre de verre	79
II.6.2	Essais sur MAP à l'état frais	80
II.6.3	Essais sur MAP à l'état durci	83
II.7	CONCLUSION	85
CHAPITRE III ANALYSES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS		87
III.1	INTRODUCTION	88
III.2	ESSAIS A L'ETAT FRAIS	88
III.2.1	Activation de la poudre de verre	88
III.2.2	Optimisation des dosages aux MAP	93
III.2.3	Effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité	100
III.2.4	Effet de la poudre de verre sur les paramètres rhéologiques	104
III.2.5	Evolution de la chaleur d'hydratation	106
III.3	ESSAIS A L'ETAT DURCI	108
III.3.1	Effet de la PV sur la résistance à la compression	108
III.3.2	Effet de la PV sur la résistance à la traction par flexion	111
III.3.3	Variation de l'indice d'activité pouzzolanique	114
III.4	Corrélation des résultats	115
III.4.1	Estimation de la variation d'étalement	115
III.4.2	Estimation de la résistance à la traction	117
III.4.3	Effet du rapport E/C sur de la résistance à la compression	118
III.4.4	Estimation de la résistance à la compression	119
III.5	CONCLUSION	122
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS		123
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE		127
ANNEXES		137

LISTE DES FIGURES

Figure I-1. Essai d'étalement et T50.....	16
Figure I-2. Essai V-Funnel	16
Figure I-3. Essai J-Ring	17
Figure I-4. Essai L-Box	17
Figure I-5. Essai U-Box.....	17
Figure I-6. Essai au Tamis de 5 mm	17
Figure I-7. Essai d'étalement pour mortier.....	23
Figure I-8. Essai à l'entonnoir V pour mortier.	23
Figure I-9. Matériaux, évaluations et processus de sélection.	26
Figure I-10. One Central Park à Sydney (Sajane, Kulkarni et al. 2025)	31
Figure I-11. Edge à Amsterdam (Bozhar, de Rooij et al. 2025, Sajane, Kulkarni et al. 2025).....	32
Figure I-12. Ville de Masdar à Abou Dhabi (Abou Zahr, 2025).....	33
Figure I-13. Vastra Hamnen à Malmö, en Suède (Korkiakoski 2011).....	34
Figure I-14. Vastra Hamnen à Malmö, en Suède. (Korkiakoski 2011).....	35
Figure I-15. Indice d'activité pouzzolanique des PV et des CV à 23°C. (Shi et al. , 2004)	43
Figure I-16. Teneur en hydroxyde de calcium des pâtes contenant de la PV et les CV après 90 jours (Neithalath et Schwarz, 2009).....	44
Figure I-17. Teneur en hydroxyde de calcium des échantillons de pâtes modifiées avec de la PV (Aliabdo et al., 2016)	44
Figure I-18. Analyse thermogravimétrique (ATG) de pâtes modifiées avec de la PV. (Aliabdo et al., 2016)	45
Figure I-19. Comportement thermique de la portlandite des pâtes de PV après 28 j : (a) Analyse thermogravimétrique et (b) analyse thermique différentielle. (Ibrahim and Meawad, 2018).....	45
Figure I-20. Image XRD de la portlandite de la PV après 28j. (Ibrahim and Meawad, 2018).....	46
Figure I-21. Analyse DTA/TGA de l'agent expansif. (Ducman et al. , 2002).....	47
Figure I-22. L'effet d'utilisation de la PV en remplacement du ciment sur l'affaissement du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)	48
Figure I-23. Variations de l'étalement avec l'augmentation de la teneur en PV (Rehman et al., 2018).....	49
Figure I-24. Temps de prise des pâtes de ciment Portland modifiées avec de la poudre de verre en remplacement du ciment. (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)	50
Figure I-25. Développement de la résistance à la compression des pâtes de ciment contenant de la poudre de verre fine (Neithalath et Schwarz, 2009)	52
Figure I-26. Effet du remplacement du ciment par de la PV sur la résistance à la compression du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016).....	53
Figure I-27. Effet PV sur la résistance à la compression du béton (Hassani, Matos et al. 2023).....	54
Figure I-28. Effet du remplacement du ciment par de la PV sur la résistance à la traction du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)	55

Figure I-29. Effet de PV sur la résistance à la flexion de béton (Elaqra, Abou Haloub et al. 2019).....	56
Figure I-30. Effet de PV sur la résistance à la flexion de béton (Bharathi, Adari et al. 2022).....	57
Figure I-31. Chaleur d'hydratation de pâtes de ciment avec la PV. (Neithalath et Schwarz, 2009).....	57
Figure I-32. Effet de PV sur l'absorption d'eau du béton (Elaqra and Rustom, 2018).....	58
Figure I-33. Effet de PV sur l'absorption d'eau du béton (Adesina and Das, 2020).....	59
Figure I-34. Effet de PV sur l'absorption d'eau du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016).....	60
Figure I-35. Coefficient de diffusion des chlorures des BAP contenant du PV à différents taux de substitution (Tariq, Scott et al. 2020).....	61
Figure I-36. Perméabilité aux chlorures du BAP à haute résistance contenant la PV après 28 jours (Amin, Zeyad et al. 2023).....	62
Figure I-37. Dégradation des éprouvettes de béton contenant de PV après une immersion de 12 semaines dans une solution d'acide sulfurique à 5 % (Siad, Lachemi et al. 2016).....	63
Figure I-38. Variations de la résistance en compression et du poids du béton contenant de PV après une exposition à l'acide sulfurique. (Bameri, Rashidi et al. 2022).....	63
Figure I-39. Perte de résistance en compression en fonction de l'âge pour le béton contenant du PV exposé aux sulfates (Shalan and El-Gohary, 2022).....	64
Figure I-40. Concentration interne en sulfate du béton contenant PV après 18 mois, en fonction de la position de la section d'extraction (Shalan and El-Gohary, 2022).	65
Figure I-41. Coefficient de diffusion du béton avec 10 %, 20 %, 40 % et 60 % de PV (Shalan and El-Gohary, 2022).	65
Figure I-42. Différents images de défaillance des éprouvettes de béton incorporant du PV en fonction de la température (Al Saffar, Tawfik et al. 2022).....	66
Figure I-43. Béton avec des échantillons contenant de 15 % à 35 % de PV présente des changements évidents après une exposition à des températures élevées (Lai, Lu et al. 2024).	67
Figure II-1. Procédure de broyage des déchets de verre.	72
Figure II-2. Types de sables utilisés.....	73
Figure II-3. Courbes granulométriques des sables utilisés.....	74
Figure II-4. Malaxeur à mortier.....	79
Figure II-5. Procédure d'activation de la PV.....	80
Figure II-6. Développement de l'essai d'étalement pour mortier.	81
Figure II-7. Dispositif du rhéomètre utilisé (Adjoudj et al., 2014)	82
Figure II-8. Calorimètre semi-adiabatique	83
Figure II-9. Remplissage des moules et conservation des éprouvettes	83
Figure II-10. Essai de compression	84
Figure II-11. Essai de traction par flexion.....	84
Figure II-12. Organigramme récapitulatif du protocole expérimental	85

Figure III-1. Optimisation du dosage en superplastifiant.....	89
Figure III-2. Variation du dosage en SP en fonction du taux de la chaux	90
Figure III-3. Résistance à la compression du mortier de la PV en fonction du taux de la chaux	91
Figure III-4. Etalement des mortiers en fonction du type et du taux de sable	95
Figure III-5. Etalement des MAPs à base des deux types de sable en fonction du % SP avec différents E/C..	99
Figure III-6. Etalement des MAPs en fonction du taux de la PV avec un rapport E/C= 0,5	102
Figure III-7. Linéarisation des moments finaux en fonction de la vitesse de rotation	104
Figure III-8. Viscosité plastique des MAP contenant différents %PV pour trois rapports E/C	105
Figure III-9. Evolution de la chaleur d'hydratation du MAP a base du SC en fonction de l'âge avec différentes % PV	106
Figure III-10. Evolution de taux de la chaleur d'hydratation du MAP a base du SC en fonction de l'âge avec différentes % PV	107
Figure III-11. Résistance à la compression des MAP à base de SN en fonction de %PV avec E/C=0.5	108
Figure III-12. Résistance à la compression des MAP à base de SC en fonction de %PV avec E/C=0.5	109
Figure III-13. Résistance à la traction des MAP à base de SN en fonction de %PV avec E/C=0.5 ..	111
Figure III-14. Résistance à la traction des MAP à base de SC en fonction de %PV avec E/C=0.5 ..	112
Figure III-15. Indice d'activité pouzzolanique en fonction de l'âge avec différentes % PV et E/C=0.5	114
Figure III-16. Comparaison entre les valeurs d'étalement mesurées et estimées à l'aide de l'équation (III.2).	116
Figure III-17. Corrélation entre la résistance à la traction et celle à la compression d'un MAP à base du SC	117
Figure III-18. Variation des résistances à la compression d'un MAP à base de sable concassé et de PV en fonction du rapport E/C.....	118
Figure III-19. Corrélation entre la résistance à la compression mesurée et estimée selon l'équation (III.8).	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Estimation des déchets rejetés en Algérie (Ouldkaoua et al., 2020).....	41
Tableau II-1. Compositions chimiques et minéralogiques, et propriétés physiques de ciment et de la PV.....	72
Tableau II-2. Propriétés physiques des sables utilisés	74
Tableau II-3. Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant (MEDAFLOW 30)...	75
Tableau II-4. Composition minéralogique de l'eau de gâchage.....	75
Tableau III-1. Composition des mortiers à base de la poudre de verre et de la chaux	89
Tableau III-2. Dosages optimaux en superplastifiant en fonction du taux de la chaux	90
Tableau III-3. Optimisation du rapport S/M pour les MAPs à base de sable naturel	94
Tableau III-4. Optimisation du rapport S/M pour les MAPs à base de sable concassé	94
Tableau III-5. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable naturel (E/C=0.4).....	97
Tableau III-6. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable naturel (E/C=0.5).....	97
Tableau III-7. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable naturel (E/C=0.6).....	98
Tableau III-8. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable concassé (E/C=0.4) ...	98
Tableau III-9. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable concassé (E/C=0.5) ...	98
Tableau III-10. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable concassé (E/C=0.6)..	99
Tableau III-11. Proportions du mélange des MAPs fabriqués avec différents types de sable	101
Tableau III-12. Quelque valeur caractéristique extraite d'après l'essai de la chaleur d'hydratation	108
Tableau III-13. La résistance ultime et l'âge de demi-résistance obtenus pour tous les mélanges en utilisant l'équation (III.6).....	120

ANNEXES

Tableau B-1. Feuille Excel donnant composition du mortier MAP (SC).....	142
Tableau B-2. Feuille Excel donnant composition du mortier MAP (SN).....	143

LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS

- Al₂O₃** : Alumine ;
- BAP** : Béton autoplaçant ;
- MAP** : Mortier autoplaçant
- MAPPV** : Mortier autoplaçant à base de poudre de verre ajout cimentaire ;
- C (CaO)**: Oxyde de calcium ou chaux vive ;
- C-S-H** : Silicate de calcium hydraté ;
- C₃A (3CaO, Al₂O₃)** : Aluminate tricalcique ;
- C₃S (3CaO, SiO₂)**: Silicate tricalcique ou « alite » ;
- C₂S (2CaO, SiO₂)**: Silicate bicalcique ou « bélite » ;
- C₄AF (4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃)** : Alumino-ferrite tétracalcique ;
- CaCO₃** : Calcite ;
- CaSO₄ 2H₂O** : Gypse secondaire ;
- C₃A 3CaSO₄ 32H₂O** : ettringite secondaire ;
- CaSO₄** : sulfate de calcium ;
- d** : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire;
- D_{max}** : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.
- E/C** : Eau / Ciment ;
- E/L** : Eau/liant ;
- SSB** : surface spécifique exprimée en cm²/g du constituant.
- G/S** : Gravillons /sable
- PV** : poudre de verre
- ρ** : Densité du constituant exprimée en g/cm³
- I** : Moment d'inertie de la section transversale
- R_c** : Résistance à la compression
- R_f**: Résistance à la flexion
- R_t** : Résistance à la traction
- V** : Volume des vides du mélange granulaire;
- V_f** : Fraction volumique de fibre;
- v** : La distance de la fibre la plus éloignée

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte général et problématique

Les bétons autoplaçant (BAP) représentent une évolution majeure dans le domaine des matériaux de construction, conçus pour accélérer le rythme de la réalisation des constructions, améliorer la qualité des structures et assurer une durabilité des constructions (construction durable). Ces bétons innovants se distinguent par leur capacité à s'adapter à de nombreuses applications en génie civil. L'autoplaçance de ces bétons est obtenue grâce à l'emploi d'une proportion importante de poudre, composées principalement de ciment et d'additions minérales le plus souvent des sous-produits industriels pour garantir un volume de pâte suffisant, qui assurent une dispersion homogène des granulats tout en évitant les phénomènes de ségrégation.

L'emploi des additions au ciment connaît ces dernières années un grand essor qui offre la solution la plus efficace consiste à baisser la quantité de clinker produite en le remplaçant par des ajouts ayant des propriétés proches ou analogues au clinker ainsi que bénéficie une amélioration des propriétés physiques, mécaniques et la durabilité dans les matériaux cimentaires. Le laitier des hauts fourneaux, les cendres volantes, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, les fillers calcaires sont les matériaux d'additions les plus utilisés dans le secteur cimentier.

Dans ce contexte, l'utilisation d'ajouts issus du recyclage des déchets, en remplacement partiel du ciment, présente des avantages significatifs. Cette réduction dans la production du ciment permet non seulement des économies de coût mais aussi des économies d'énergie qui réduisent les émissions de CO₂ à effet de serre, ainsi que la préservation des ressources naturelles non renouvelables pour les générations futures, répondant ainsi aux principes du développement durable, tant sur les plans économique, environnemental que sociétal.

En Algérie, la production importante de déchets industriels et ménagers, notamment le verre usagé, offre un potentiel considérable de valorisation dans les matériaux cimentaires, apportant ainsi une réponse doublement bénéfique : réduction de la pression sur les centres d'enfouissement et intégration dans une économie circulaire, c'est une solution à la fois écologique et économique.

2. Objectif de travail

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'incorporation de poudre de verre finement broyée sur les caractéristiques physiques, rhéologiques et mécaniques d'un mortier autoplaçant, en interaction avec deux types de sable utilisés comme granulats : un sable naturel et un sable concassé issu de déchets de carrières. Ce travail vise également à optimiser les formulations de mélange en vue de développer un béton autoplaçant (BAP) à la fois performant, économiquement viable et écologiquement durable en intégrant la poudre de verre en tant qu'ajout minéral, utilisée en substitution partielle du ciment portland, s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets verriers, ainsi que les déchets de carrière utilisé comme sable. Cette approche permettrait non seulement de réduire les coûts de production des BAP, mais aussi de préserver les ressources naturelles en limitant l'extraction des matériaux vierges, tout en contribuant significativement à la diminution des émissions de gaz à effet de serre associées à la production de ciment. Ce travail s'inscrit ainsi dans une perspective d'économie circulaire et de développement durable.

3. Structure de la thèse

Afin de répondre aux objectifs fixés dans le cadre de ce travail de recherche, cette thèse s'organise autour de quatre chapitres principaux, chacun contribuant à l'élaboration progressive de la problématique et à l'analyse des résultats expérimentaux.

Chapitre 1 : Revue de la littérature

Ce premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, dans lequel il est rappelé les principaux travaux en relation avec notre travail. Ce chapitre, servira par la suite de base pour les analyses et les discussions des résultats expérimentaux et il est composé de trois parties :

- La première partie est dédiée au béton et mortier autoplaçant (BAP et MAP). Elle propose un rappel des définitions fondamentales de ces matériaux, de ses propriétés à l'état frais et durci, des formulations typiques permettant son élaboration, ainsi que des essais normalisés permettant de caractériser ses performances. Un accent particulier est mis sur les études antérieures portant sur l'incorporation des déchets de verre dans la formulation du BAP.
- La deuxième partie aborde les concepts généraux relatifs au développement de la construction durable, à la gestion des déchets solides, et en particulier à la

classification des différents types de déchets, en mettant l'accent sur les enjeux environnementaux liés à leur valorisation.

- La troisième partie se focalise sur le verre et ses déchets. Elle décrit leur origine, leur composition minéralogique, les procédés de traitement et de recyclage actuellement disponibles, ainsi qu'un état de la recherche sur leur réutilisation dans le domaine des matériaux de construction.
- La dernière partie met en évidence l'effet de la poudre de verre sur le béton. Elle décrit leur effet sur les propriétés physiques, mécaniques et sur la durabilité des bétons.

Chapitre 2 : Méthodologie expérimentale

Ce chapitre présente le protocole expérimental mis en place pour atteindre les objectifs fixés, la caractérisation des matériaux qui ont été utilisés et en particulier celle de la poudre de verre, la formulation adoptée du mortier autoplaçant intégrant cette poudre de verre pour réaliser le travail expérimental ainsi que l'ensemble des méthodes d'essais mis en œuvre pour évaluer les propriétés des mélanges formulés, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Chapitre 3 : Résultats et analyses

Les résultats obtenus au cours de l'ensemble du programme expérimental sont exposés et analysés de manière critique dans ce chapitre. Chaque série de résultats fait l'objet d'une interprétation approfondie, accompagnée de comparaisons avec les données issues de la littérature, dans le but de valider les hypothèses de recherche et de mieux comprendre les effets de l'ajout de poudre de verre sur les propriétés du MAP.

Conclusions et perspectives

Nous présentons à la fin une synthèse des principales conclusions issues de ce travail de recherche, en mettant en évidence l'impact de l'incorporation de la poudre de verre sur les performances du mortier autoplaçant. Des recommandations sont formulées pour une utilisation optimale de ces déchets dans les matériaux cimentaires, et plusieurs pistes de recherche futures sont suggérées afin d'approfondir cette thématique, notamment dans le contexte de la durabilité et de la valorisation environnementale des matériaux de construction.

CHAPITRE I
REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 INTRODUCTION

Le ciment, après l'eau, est la substance la plus largement utilisée dans le monde, occupant une place centrale dans l'industrie de la construction. Cependant, les méthodes de production traditionnelles, destinées à répondre aux besoins croissants de ce matériau, engendrent une augmentation considérable des émissions de CO₂, représentant ainsi un défi environnemental majeur. En réponse à cette problématique, l'Agence Internationale de l'Énergie a recommandé en 2009 le captage et le stockage du CO₂ comme solution clé pour atténuer cet impact. Parallèlement, une approche de plus en plus privilégiée dans l'industrie consiste à réduire l'empreinte carbone du ciment par le biais de l'incorporation de matériaux alternatifs à hauteur partielle du clinker, tels que la cendre volante, le laitier, la pouzzolane naturelle, la fumée de silice et le métakaolin. Cette stratégie présente l'avantage de limiter les émissions de gaz à effet de serre tout en optimisant la consommation énergétique, contribuant ainsi à une approche plus durable de la construction.

Ce chapitre propose une revue détaillée des recherches scientifiques pertinentes dans le cadre de cette thématique, en se concentrant particulièrement sur l'utilisation de la poudre de verre (PV) en tant que matériau alternatif dans l'industrie du béton. Cette analyse examine également l'impact de l'incorporation de la poudre de verre sur les propriétés du béton, en mettant en lumière ses effets sur la rhéologie, la résistance mécanique, et d'autres caractéristiques cruciales pour la performance des matériaux. Ce matériau, offrant un potentiel significatif pour le développement de solutions durables, est exploré en profondeur pour mettre en évidence ses avantages et ses applications possibles. Cette analyse bibliographique sert de fondement pour étudier les bétons autoplaçant (BAP), en examinant leur composition, leurs spécifications techniques et les particularités qui les différencient des autres types de béton, permettant ainsi une meilleure compréhension de leurs performances et de leur rôle dans l'évolution vers des matériaux de construction plus écologiques.

I.2 BÉTON AUTOPLAÇANT

Le béton est un matériau composite hétérogène obtenu par le mélange de ciment, granulats, eau, et parfois d'ajouts minéraux et d'adjuvants en faibles proportions. Pour garantir la durabilité et la fiabilité des structures, il est essentiel non seulement de produire

un béton de haute qualité, mais également de veiller à une mise en œuvre adéquate afin de répondre aux exigences fonctionnelles des ouvrages.

L'histoire du BAP remonte aux travaux du professeur H. Okamura au Japon (Okamura and Ozawa 1995), avec la création du premier prototype. Par la suite, une première génération de BAP, caractérisée par une teneur élevée en liant, a été développée. La deuxième génération, introduite au Canada, se distingue par une faible teneur en liant et une incorporation accrue d'ajouts minéraux.

C'est dans ce contexte que des chercheurs japonais ont introduit l'idée d'un béton capable de satisfaire ces exigences, appelé par la suite béton autoplaçant (BAP). Ce concept, apparu en 1989, visait à répondre au besoin d'un béton facile à utiliser, nécessitant moins de main-d'œuvre qualifiée, tout en offrant une résistance élevée à jeune âge pour accroître la productivité. Ce développement a été stimulé par les avancées en génie civil, notamment pour des applications exigeantes comme les ponts suspendus, les gratte-ciel ou les structures architecturales complexes (Okamura and Ouchi 1999, Okamura and Ouchi 2003)

Grâce à ces avancées technologiques, l'utilisation des BAP s'est diversifiée, notamment pour la construction d'ouvrages d'art au Japon, en Europe et au Canada. Toutefois, leur usage reste souvent limité à des travaux de réparation, principalement en raison de leur coût élevé. Cela a conduit au développement d'une troisième génération de BAP, marquant une nouvelle étape de recherche pour répondre à des enjeux économiques.

I.2.1 Avantages des BAP

Les BAP offrent plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport aux bétons traditionnels (Okamura and Ouchi 2003).

I.2.1.1 Avantages techniques

L'introduction des BAP a simplifié les opérations classiques de mise en œuvre, réduisant les étapes de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage à une simple phase de coulage, suivie d'un débullage pour les applications horizontales. Pour les applications verticales, les déplacements sur les banches et les manipulations sont significativement réduits. Les avantages techniques incluent :

- Une mise en œuvre rapide et facile (coulage en un seul point, débit élevé de béton pompé) ;

- Une utilisation adaptée aux milieux fortement ferraillés ;
- Une amélioration des parements et de l'enrobage des armatures ;
- La possibilité de réaliser des éléments de formes complexes.

I.2.1.2 Avantages socio-économiques

Grâce à leur fluidité, les BAP ne nécessitent pas de vibration, ce qui présente des bénéfices majeurs pour les opérateurs (Boukendakdji, 2010) :

- Réduction du bruit sur le chantier ;
- Diminution de la pénibilité des tâches ;
- Réduction des risques d'accidents ;
- Diminution des coûts de main-d'œuvre et des systèmes de vibration ;
- Réduction du temps de bétonnage et des retouches nécessaires.

I.2.2 Constituants d'un BAP

Les BAP constituent une technologie de béton bien établie, développée pour assurer à la fois une grande fluidité et une homogénéité sans vibration. Cependant, leur utilisation demeure encore limitée malgré un fort potentiel de développement. Comme tous les types de béton, ils se composent de ciment, de granulats, d'eau et d'autres matériaux destinés à garantir leur fluidité et leur homogénéité (Assaad and Khayat 2006).

I.2.2.1 Ciment

Le ciment, principal liant hydraulique, est une poudre minérale qui, mélangée à l'eau, forme une pâte qui durcit grâce à des réactions d'hydratation. Le ciment Portland CEM I 42,5, contenant principalement du clinker, ou le CEM II/A et B 42,5, sont couramment utilisés pour les BAP.

I.2.2.2 Granulats

Les granulats forment le squelette granulaire du béton, et leur nature peut être naturelle, artificielle ou recyclée. Leur taille, forme et origine influencent la fluidité du BAP. Les granulats roulés, par exemple, réduisent les frictions entre particules, facilitant ainsi l'écoulement (Dreux and Festa 1998). Pour limiter les risques de blocage dans les zones confinées, on privilégie un diamètre maximal des granulats de 16 mm et un rapport gravillon/sable proche de 1 (Daoud 2003).

I.2.2.3 Additions minérales

Les ajouts minéraux, comme les cendres volantes, fumées de silice et laitiers, sont essentiels pour améliorer la fluidité et réduire les risques de ségrégation et de ressuage. Ils peuvent être d'origine naturelle (pouzzolanes, calcaire) ou artificielle (cendres volantes, laitier). Ces matériaux réduisent également l'impact environnemental en diminuant l'émission de CO₂.

I.2.2.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés en faibles proportions pour modifier les propriétés du béton, notamment sa maniabilité, sa rhéologie et sa résistance.

I.2.2.5 Les Superplastifiants

Les superplastifiants (SP), ajoutés en petites quantités par rapport à la masse de ciment, permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en œuvre du béton. Leur dosage dépend du type de polymère utilisé, de la nature du ciment et des caractéristiques du mélange. Étant donné que le béton est un matériau poreux composé de ciment, de granulats et d'eau, la quantité d'eau utilisée lors du gâchage influence fortement ses propriétés mécaniques finales (Boukendakdji, 2010).

Ces adjuvants modifient les propriétés rhéologiques du béton pendant une période définie, augmentant sa maniabilité et son ouvrabilité grâce à la dispersion des grains de ciment. Leur principale fonction est de fluidifier le mélange, ce qui améliore considérablement son ouvrabilité. En outre, les superplastifiants permettent de réduire le rapport eau/ciment pour une même ouvrabilité, ce qui augmente les performances mécaniques du béton.

Fabriqués à partir de polymères organiques contenant des groupes hydrophobes et hydrophiles, les superplastifiants se divisent en plusieurs familles, notamment (M. El Barak) :

- Polynaphtalènesulfonates (PNS),
- Polymélaminesulfonates (PMS),
- Lignosulfonates modifiés (LS),
- Polycarboxylates (PC),
- Polyacrylates (PA),
- Polyoxyéthylènes (POE).

Autrefois largement utilisés, les PNS et PMS tendent à disparaître en Europe en raison de la présence de formol, une substance polluante et toxique. À l'inverse, les adjuvants plus récents, comme ceux à base de PC, PA et PE, offrent une efficacité accrue. Le mécanisme d'action des superplastifiants dépend de leur composition. Par exemple, ceux à base de sulfonates (PNS, PMS, LS) agissent principalement par répulsion électrostatique entre les particules de ciment, tandis que les superplastifiants à base de PC et POE exercent un effet stérique, comme l'a démontré (Uchikawa, Sawaki et al. 1995).

I.2.2.6 Les Agents de Viscosité

Les agents de viscosité sont essentiels dans les formulations de bétons fluides pour garantir une bonne résistance à la ségrégation. En leur absence, une quantité plus importante de liant est nécessaire pour éviter la ségrégation et assurer un écoulement homogène (Boukendakdji, 2010).

Ces agents permettent de maintenir la fluidité et la capacité de remplissage tout en stabilisant le mélange. L'ajout de superplastifiants, bien qu'il améliore l'ouvrabilité, diminue la viscosité du béton, augmentant ainsi le risque de ségrégation et de ressuage. Les agents de viscosité, souvent des polysaccharides hydrosolubles, compensent cet effet indésirable. Parmi eux, on retrouve :

- La gomme welan ou de xanthane (polysaccharides issus de fermentations microbiologiques),
- Les dérivés cellulosiques (méthylcellulose, hydroxy-éthylcellulose),
- Les colloïdes naturels,
- Les suspensions de particules siliceuses.

Les agents colloïdaux classés selon leur mode d'action dans le béton :

1. **Classe A** : polymères solubles augmentant la viscosité de l'eau dans le mélange (éthers de cellulose, oxydes de polyéthylène).
2. **Classe B** : floculants organiques favorisant l'attraction entre grains de ciment (copolymères de styrène).
3. **Classe C** : émulsions organiques augmentant la cohésion (émulsions acryliques).
4. **Classe D** : matières inorganiques absorbant l'eau et stabilisant le mélange (bentonites, fumées de silice).
5. **Classe E** : particules super fines augmentant la densité du mélange (cendres volantes, terres diatomées).

Les agents les plus utilisés sont les dérivés de la cellulose et les polysaccharides microbiens comme la gomme welan. Celle-ci, ajoutée à faibles doses (0,02 % à 0,2 % de la masse du ciment), offre une efficacité remarquable, surtout à bas taux de cisaillement. Cependant, certains dérivés cellulosiques (HPMC, HEC) peuvent entraîner une importante quantité d'air dans le béton (jusqu'à 15 %). Leur utilisation nécessite donc un contrôle strict et une combinaison avec des agents entraîneurs d'air (Boukendakdji, 2010).

I.2.2.7 L'Eau

L'eau utilisée pour fabriquer le béton doit être exempte d'impuretés susceptibles d'altérer ses propriétés mécaniques, esthétiques ou de provoquer la corrosion des armatures.

Dans le béton, l'eau joue plusieurs rôles :

1. Une partie est absorbée ou adsorbée par les granulats.
2. Une autre partie participe au processus d'hydratation du ciment.
3. La portion restante, appelée eau libre, influe sur la fluidité du mélange.

L'eau est également cruciale pour l'ouvrabilité. Une augmentation de son dosage améliore la fluidité du béton en réduisant la concentration en solides, mais diminue simultanément la viscosité et le seuil de cisaillement. Cependant, un excès d'eau compromet la résistance mécanique du béton durci et favorise la ségrégation à l'état frais. C'est pourquoi il est important de tenir compte de l'humidité contenue dans les granulats et de n'utiliser que l'eau efficace.

I.2.3 Formulations et compositions des BAP

La formulation des BAP est complexe en raison de la diversité de leurs propriétés, telles que la fluidité, la viscosité, la résistance à la ségrégation et l'aptitude au remplissage. Malgré les nombreuses études menées pour comprendre les mécanismes régissant leur comportement dans des environnements confinés, il n'existe pas de méthodologie universelle permettant de formuler un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et des spécifications précises (Belaidi (2013), Benabed (2014))

La conception d'un béton autoplaçant implique la recherche d'une combinaison optimale de matériaux compatibles, ainsi qu'une détermination précise des dosages de chacun de ces composants pour garantir l'atteinte des propriétés recherchées. Il est ainsi

impossible de proposer une formulation standard applicable à tous les cas ; chaque projet, en fonction des matériaux locaux disponibles, doit élaborer sa propre recette.

Diverses approches ont été développées dans le monde entier pour formuler des bétons autoplaçant. Nous présentons ci-dessous une vue d'ensemble des principales méthodes, ainsi que quelques-unes de leurs modifications.

I.2.3.1 Formulation OKAMURA ou "Méthode Générale" (Japon)

La méthode OKAMURA, considérée comme la référence pour la formulation des BAP, a été élaborée à l'Université de Tokyo par Okamura. Elle consiste à déterminer en premier lieu le dosage des granulats et du sable dans le béton et le mortier, respectivement, avant de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment pour obtenir un béton présentant des performances optimales. Le principe fondamental de cette méthode repose sur les éléments suivants :

La teneur volumique en granulats du béton est fixée à 50 % du volume total des solides. Ce pourcentage vise à éviter les risques de blocage, à condition que le mortier satisfasse les critères d'ouvrabilité établis. (Boukendakdji, 2010)

$$G = \frac{50}{100} G_{\text{lim}} (1 - A) \quad (\text{I.1})$$

L'optimisation de la pâte de ciment est réalisée à partir d'un mortier dont la teneur en sable est de 40 %. Les ajustements sont effectués en ce qui concerne l'eau, le superplastifiant et les fines pour atteindre une viscosité adéquate (mesurée par le temps d'écoulement avec l'entonnoir en V) et une fluidité suffisante (mesurée par l'étalement au cône).

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1 - A - G)}{(1 - K_{\text{sf}})} \quad (\text{I.2})$$

Les auteurs définissent deux critères :

La fluidité du mortier, exprimée par l'étalement relatif D.

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \quad (\text{I.3})$$

La viscosité du mortier, mesurée par le temps d'écoulement au cône en V.

$$T = \frac{10}{t} \quad (\text{I.4})$$

L'objectif est d'optimiser simultanément la fluidité et la viscosité pour garantir les propriétés d'ouvrabilité et les performances mécaniques du béton autoplaçant.

I.2.3.2 Formulation LCPC (France)

La méthode développée au LCPC par Sedran et De Larrard (De Larrard 2000) repose sur le modèle de l'empilement compressible, visant à optimiser la porosité du système granulaire. Un agencement optimal des granulats permet de maximiser la résistance et l'ouvrabilité du béton. Cette approche permet de prédire la compacité du squelette granulaire à partir de caractéristiques des matériaux, telles que la densité apparente, la distribution granulométrique et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement du béton frais en fonction de la compacité du squelette granulaire.

Un logiciel dédié (Bétonlabpro 2) facilite l'application de cette méthode et permet de déterminer les dosages de divers types de béton, y compris les bétons autoplaçant. Pour ce dernier, les critères attendus sont les suivants :

- Un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm.
- Un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa.
- Une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s (mesurée par BTHREOM).

Ces critères visent à garantir un béton fluide, sans risque de ségrégation. Le dosage du liant et du superplastifiant peut être ajusté en fonction de ces propriétés et des exigences en termes de résistance à la compression.

I.2.3.3 Formulation CBI modifiée

La méthode CBI, modifiée par (Petersson, Billberg et al. 2004)., inclut un critère supplémentaire permettant de garantir un espacement suffisant entre les granulats pour réduire les frictions et faciliter la mise en œuvre. Cette méthode consiste à calculer l'épaisseur moyenne de la pâte autour des granulats en s'appuyant sur une vaste base de données de formulations.

L'espacement moyen entre les particules varie généralement entre 0,3 et 1 mm, selon les besoins du béton autoplaçant.

I.2.3.4 Formulation JSCE (Japon)

Proposée en 1998 par la Japonaise Society of Civil Engineers (JSCE), cette méthode repose sur des recherches et applications pratiques. Elle ajuste la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre en fonction de l'utilisation ou non d'agents de cohésion. Les points clés incluent :

- Le volume absolu des gros agrégats varie entre 0,30 et 0,32 m³/m³, avec un diamètre maximal de 20 à 25 mm.
- La quantité d'eau varie entre 155 et 190 kg/m³, selon la présence d'agents de viscosité.
- Les rapports eau/poudres et eau/liant sont définis en fonction des performances du béton durci.
- L'ajustement du dosage des superplastifiants et des agents de viscosité est effectué en fonction des résultats obtenus et de l'expérience pratique.

I.2.4 Caractérisation du BAP à l'état frais

Le béton autoplaçant (BAP) est un matériau capable de se mettre en place et de se compacter sous l'effet de son propre poids, sans vibration ou compactage mécanique. Ses propriétés clés à l'état frais incluent la fluidité, la viscosité, la résistance à la ségrégation et la capacité d'autocompaction.

La formulation du BAP repose sur les principes du béton vibré, mais avec une pâte de ciment excédentaire (65 à 120 l/m³) pour garantir une fluidité optimale, notamment lorsque des granulats concassés sont utilisés. La variabilité des vides inter-granulaires, liée à la nature et à la provenance des granulats, exige une adaptation de la composition du BAP (EFNARC 2005). Selon les guides européens, les propriétés essentielles du BAP à l'état frais se regroupent en quatre catégories :

- Capacité de passage
- Capacité de remplissage
- Résistance à la ségrégation
- Rhéologie

I.2.4.1 Capacité de passage

Cette propriété évalue la capacité du BAP à s'écouler entre des armatures sans blocage ni perte d'homogénéité. Elle dépend de la géométrie du ferrailage et des

granulats. L'essai de la boîte en L (L-Box) est couramment utilisé, mesurant le rapport de hauteur H2/H1 et le temps d'écoulement. Un rapport supérieur ou égal à 0,8 est requis. (Boukendakdji, 2010).

I.2.4.2 Capacité au remplissage

La capacité de remplissage décrit l'aptitude du BAP à s'écouler sous son propre poids et à remplir entièrement les coffrages, même lorsqu'ils comportent des armatures ou des zones confinées, sans recours à une vibration externe (Sonebi and Bartos, 2002). Cette propriété dépend principalement de la viscosité plastique du mélange, du rapport eau/liant, de la teneur en fines et de l'efficacité du superplastifiant.

Elle est généralement évaluée à l'aide d'essais normalisés, tels que l'essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow test), qui permet de mesurer le diamètre d'étalement et le temps T_{50} , ou encore l'essai du L-box, qui renseigne sur la capacité du béton à passer à travers les armatures. D'autres essais, comme le J-ring et le test (V-Funnel), peuvent également être utilisés pour caractériser la fluidité et la capacité de remplissage du coffrage.

I.2.4.3 Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation garantit l'uniformité du BAP pendant et après sa mise en place, essentielle pour prévenir les défauts tels que les fissures. Elle est mesurée par un essai au tamis de 5 mm, permettant de calculer le pourcentage de laitance séparée traversant le tamis.

I.2.4.4 Rhéologie

La rhéologie, science de l'écoulement, est cruciale pour comprendre le comportement du BAP à l'état frais. Elle analyse la relation entre contraintes et déformations, influencée par la viscosité, l'élasticité et la plasticité. Les essais empiriques, comme ceux mentionnés précédemment, aident à valider les caractéristiques rhéologiques et à assurer une mise en œuvre optimale.

I.2.4.5 Essais principaux sur le BAP à l'état frais (Boukendakdji, 2010)

a) Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump-flow) : mesure le diamètre d'étalement (50-80 cm) afin d'évaluer la fluidité et le temps T_{50} (temps pour atteindre 50 cm de diamètre) qui donne une indication sur la viscosité (Figure I.1).

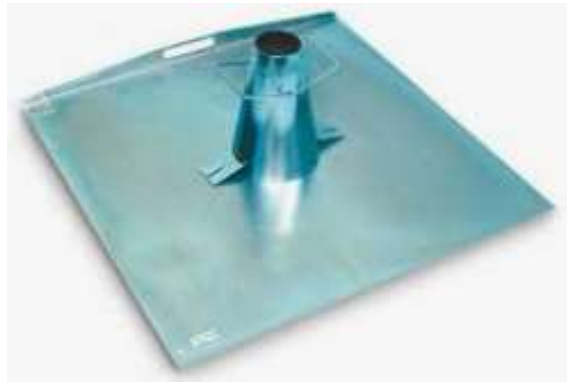


Figure I-1. Essai d'étalement et T50

b) Essai d'entonnoir en V (V-Funnel) : Mesure le temps d'écoulement à travers un orifice pour estimer la viscosité et détecter d'éventuels blocages. Cet essai permet de tester la capacité de passage de remplissage du BAP (Figure I.2).



Figure I-2. Essai V-Funnel

c) Essai de l'anneau J (J-Ring) : Associe des obstacles (anneaux d'armatures) à l'étalement au cône d'Abrams pour évaluer l'effet de ces obstacles sur l'étalement, et mesurer la capacité de passage (Figure I.3).



Figure I-3. Essai J-Ring

d) Essai à la boîte en L (L-Box) : Cet essai est couramment utilisé, il consiste à évaluer l'écoulement à travers des armatures en mesurant le rapport de hauteur H_2/H_1 et le temps d'écoulement. Un rapport supérieur ou égal à 0,8 est requis (Figure I.4).



Figure I-4. Essai L-Box

e) Essai à la boîte en en U (U-Box) : Cet essai permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton (Figure I.5).



Figure I-5. Essai U-Box

f) Essai de stabilité au tamis : Cet essai permet de déterminer le risque de ségrégation en mesurant le pourcentage de laitance séparée (Figure I.6).



Figure I-6. Essai au Tamis de 5 mm

I.2.5 Caractérisation du BAP à l'état durci

Une fois le béton durci, il atteint une forme stable qui ne peut plus être modifiée. Les propriétés mécaniques principales de ce matériau sont les suivantes :

- La compacité du béton, ou sa faible porosité, est essentielle pour sa durabilité à long terme.
- Une résistance élevée à la compression est l'une des performances souvent recherchées dans le béton durci.
- Les phénomènes de retrait constituent une caractéristique attendue dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformation sous charge du béton sont bien définies et peuvent être mesurées avec précision.

I.2.5.1 Résistance à la Compression

Les BAP se distinguent par un faible rapport eau/ciment (E/C), ce qui conduit à des performances mécaniques élevées. (Felekoğlu, Türkel et al. 2007) ont démontré que l'utilisation de fillers dans la formulation du béton accélère le développement de la résistance mécanique à des âges jeunes. En effet, les fines particules de filler, lorsqu'elles sont correctement dispersées par l'action des superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment par un effet principalement physique, contribuant ainsi à une matrice cimentaire plus dense. Ces effets influencent de manière significative la résistance mécanique jusqu'à 28 jours, avant de devenir moins marqués au-delà de cette période.

Zhu et Gibbs ont quant à eux constaté que l'ajout de poudre de pierre à chaux dans le BAP augmentait la résistance de 50 à 80% à 7 jours, et de 20 à 40% à 28 jours. Cette amélioration est attribuée à l'accélération de l'hydratation du ciment par la poudre de pierre à chaux, ce qui booste la résistance mécanique à des âges jeunes.

L'introduction d'adjuvants dans les formulations de BAP, et notamment des agents de viscosité, peut cependant réduire la résistance mécanique à des âges jeunes, en particulier si le dosage est trop élevé. (Boukendakdji, 2010).

I.2.5.2 Résistance à la Traction par flexion

Les travaux de (Zhu, Gibbs et al. 2001) n'ont pas révélé de différence significative entre la résistance à la traction des bétons autoplaçant (BAP) et celle des bétons vibrés de référence. Cependant, dans une étude ultérieure, (Ma'aruf, Abba et al. 2017) ont montré

que les BAP présentaient une résistance à la traction légèrement supérieure à celle des bétons traditionnels, en raison d'une meilleure homogénéité et d'une microstructure plus dense. En comparant des mélanges de BAP avec le même rapport E/C, il a été observé que le type et la finesse de la poudre avaient un impact négligeable sur la résistance à la traction (Felekoğlu, Türkel et al. 2007).

I.2.5.3 Module de Déformation Longitudinale

Étant donné que la majorité du volume du béton est constitué d'un granulat, le type et la quantité de ces derniers, ainsi que leurs modules d'élasticité, exercent une influence majeure sur le module d'élasticité global du béton. Le choix de granulats présentant un module d'élasticité élevé permet d'augmenter ce dernier dans le béton. En revanche, un béton contenant une grande proportion de pâte peut affaiblir la valeur de son module d'élasticité. En raison de leur grande proportion de pâte, les bétons autoplaçant tendent à afficher un module d'élasticité plus faible que celui des bétons conventionnels.

Assié et al. ont observé que, bien que les BAP présentent un rapport E/C élevé, ils affichent une résistance à la compression supérieure à celle des bétons traditionnels, mais que la quantité plus importante de pâte dans les BAP entraîne une réduction du module d'élasticité par rapport aux bétons ordinaires. Nassif, Najm et al. 2005 ont démontré que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression, ce qui implique que des résistances plus élevées entraînent des modules d'élasticité plus élevés, sous réserve que le seul paramètre soit le rapport eau/ciment. (Persson 2001) quant à lui, constaté que les modules d'élasticité, le fluage et le retrait des BAP ne diffèrent pas de manière significative de ceux des bétons traditionnels, lorsque la résistance est identique.

I.2.5.4 Le Retrait

Lors de la fabrication du béton, avant le début de la prise, celui-ci se trouve dans une phase dite plastique, où il ne présente pas de cohésion. Au cours de cette phase, le béton subit une contraction volumétrique appelée retrait plastique, résultat de phénomènes chimiques et physiques qui se produisent dans ce matériau en constante évolution.

La prise marque la transition entre l'absence de cohésion et l'apparition de la résistance du béton. Avant la prise, les déformations du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec l'environnement extérieur.

Immédiatement après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. En raison des différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à se séparer, entraînant l'eau et les bulles d'air vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, génère une couche d'eau à la surface et provoque un tassement de la matrice cimentaire.

- **Retrait Thermique (Plastique)**

Plusieurs études ont comparé le retrait plastique des BAP à celui des bétons vibrés. Hens et al. (Hans-Erik and Pentti 1999) ont observé que le retrait plastique des BAP est deux à trois fois plus élevé que celui des bétons traditionnels. Pour Turcry (Persson 2001), l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires.

Ces différences peuvent être expliquées par deux facteurs : un rapport E/L plus faible pour les BAP et une teneur plus élevée en superplastifiants, ce qui ralentit la prise. Pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir des adjuvants ayant une faible demande en eau afin de réduire le dosage en superplastifiants, le laitier étant une bonne option à cet égard.

- **Retrait Endogène ou d'Auto-dessiccation**

Le retrait endogène résulte de la contraction du béton après la prise, due à l'hydratation du ciment, et correspond à une diminution du volume du béton. Contrairement au béton ordinaire, où ce phénomène reste relativement limité en raison d'un rapport eau/liant plus élevé, le BAP présente un retrait endogène plus marqué. En effet, son faible rapport eau/liant et sa compacité élevée réduisent la quantité d'eau libre disponible pour l'hydratation, entraînant une auto-dessiccation plus importante et, par conséquent, une contraction interne plus prononcée.

- **Retrait de Séchage ou de dessiccation**

Le retrait de dessiccation survient à la surface du béton lorsqu'il est exposé à des conditions d'humidité relative plus faibles que celles présentes à l'intérieur du béton après la prise. Ce phénomène génère une déformation volumétrique à la surface du béton.

1.2.5.5 Fluage

Le fluage se définit comme l'augmentation progressive de la déformation sous une contrainte constante. Ce phénomène est d'une importance capitale dans le calcul des

structures en béton, car la déformation due au fluage peut être plusieurs fois supérieure à celle due à une charge appliquée. Le fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure ainsi que du type de matrice de ciment. Proust a trouvé que les valeurs de fluage des BAP et des bétons vibrés sont de même ordre de grandeur. Ces résultats sont corroborés par les travaux de (Turcry and Loukili 2006), indique que, en compression, le fluage total des BAP est équivalent à celui des bétons vibrés.

I.2.6 Mortier Autoplaçant (MAP)

I.2.6.1 Définition

Le mortier autoplaçant (MAP) est un mortier hautement fluide capable de se mettre en place sous son propre poids sans vibration ni compactage mécanique. Grâce à ses propriétés rhéologiques optimisées, il peut remplir des coffrages complexes, des zones confinées ou des éléments à géométrie fine tout en assurant une compacité élevée et une excellente finition de surface (Okamura et Ouchi, 2003) ; (Khayat 1999).

I.2.6.2 Caractéristiques du Mortier Autoplaçant

Les mortiers autoplaçant doivent satisfaire à des exigences précises de rhéologie afin de garantir un bon équilibre entre fluidité, stabilité et résistance mécanique. Les principales propriétés recherchées sont :

- **Fluidité et viscosité** : Le mortier doit pouvoir s'écouler librement sous son propre poids sans ségrégation ni ressuage. Ce comportement dépend du dosage en superplastifiant, du rapport eau/liant et de la teneur en fines (Khayat and Assaad 2008).
- **Autoplaçabilité** : C'est la capacité du mortier à se placer et à se compacter sans vibration. Elle dépend de la formulation et de la synergie entre les adjuvants, le ciment et les fillers.
- **Résistance mécanique** : Le MAP doit développer des résistances en compression et en flexion suffisantes selon son domaine d'application (murs, dalles, chapes, etc.).
- **Stabilité** : Le mélange doit rester homogène dans le temps, sans ségrégation ni exsudation, afin d'assurer la durabilité et une bonne finition.

I.2.6.3 Composition d'un Mortier Autoplaçant

Un mortier autoplaçant (MAP) est constitué des mêmes éléments de base qu'un mortier traditionnel, mais sa formulation est spécialement optimisée pour garantir une fluidité élevée sans ségrégation. Il se compose principalement d'un liant hydraulique, généralement constitué de ciment Portland pur ou mélangé à des additions minérales telles que la pouzzolane naturelle, le métakaolin, la fumée de silice, ou encore la poudre de verre finement broyée. Ces additions améliorent la rhéologie du mélange, la cohésion et la résistance mécanique tout en réduisant l'empreinte environnementale du matériau (Benabed, Abousnina et al. 2020).

Le sable fin, d'une granulométrie comprise entre 0 et 2 mm, constitue la fraction granulaire du mortier. Il apporte du volume, de la cohésion et contribue à la compacité du mélange. Le rapport sable/liant est soigneusement ajusté pour assurer un bon équilibre entre fluidité et résistance.

L'eau de gâchage joue un rôle essentiel puisqu'elle déclenche la réaction d'hydratation du ciment. Sa quantité doit être précisément contrôlée afin d'obtenir un rapport eau/liant optimal, garantissant à la fois la maniabilité du mortier frais et la performance mécanique du matériau durci.

Les superplastifiants représentent un élément clé du MAP. Ils permettent d'augmenter considérablement la fluidité du mélange sans ajout excessif d'eau, assurant ainsi un excellent comportement à l'état frais et une compacité élevée après durcissement.

Des fillers minéraux peuvent être incorporés (comme la poudre de calcaire, la cendre volante, la poudre de verre ou la pouzzolane naturelle) afin d'améliorer la stabilité du mélange, de réduire la ségrégation et d'optimiser la texture de la pâte cimentaire.

Enfin, certains adjuvants spécifiques, tels que les agents anti-mousse ou les agents de viscosité, peuvent être ajoutés pour ajuster la stabilité du mélange et éviter l'apparition de bulles d'air excessives (Hammouche, Belebchouche et al. 2025)

Ainsi, la conception d'un mortier autoplaçant repose sur un équilibre soigneux entre les proportions de liant, d'eau, de sable, de superplastifiant et de fines minérales, garantissant simultanément fluidité, homogénéité et performance mécanique.

I.2.6.4 Essais relatifs au MAP à l'état frais (Boukendakdji, 2010)

Après la conception de la formulation, des essais expérimentaux sont réalisés pour ajuster les paramètres rhéologiques et garantir les performances d'ouvrabilité recherchées

a) Essai d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue (Figure I.7).



Figure I-7. Essai d'étalement pour mortier.

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

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure I.8).



Figure I-8. Essai à l'entonnoir V pour mortier.

Quelques auteurs ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10 sec produisent un BAP réussi. Tandis que d'autres qui ont travaillé avec des matériaux anglais, ont suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec. (Boukendakdji, 2010)

I.2.6.5 Avantages du Mortier Autoplaçant

Les mortiers autoplaçant (MAP) représentent une avancée majeure dans le domaine des matériaux cimentaires, issue du concept des bétons autoplaçant. Leur formulation vise à obtenir une consistance à la fois fluide et stable, leur permettant de se mettre en place sous leur propre poids, sans vibration ni ségrégation. Grâce à ces performances rhéologiques, les MAP présentent plusieurs avantages notables par rapport aux mortiers traditionnels, notamment une meilleure homogénéité, une réduction du temps de mise en œuvre et une excellente qualité de finition (Berkani, Benabed et al. 2025). Par ailleurs, leur aptitude à remplir des moules complexes et à enrober efficacement les armatures contribue à améliorer la durabilité et les propriétés mécaniques des ouvrages. Les principaux avantages des mortiers autoplaçant peuvent être résumés comme suit :

- **Facilité de mise en œuvre** : réduction de la main-d'œuvre et du temps de pose.
- **Excellente finition** : adaptée aux surfaces apparentes et aux éléments préfabriqués.
- **Durabilité améliorée** : faible porosité et microstructure dense, limitant la pénétration d'agents agressifs.
- **Approche durable** : possibilité d'incorporer des matériaux recyclés (poudre de verre, cendres volantes, pouzzolane naturelle, etc.) comme substituts partiels du ciment ou du sable

I.2.6.6 Applications du Mortier Autoplaçant

Les MAP trouvent de nombreuses applications dans la construction et la réhabilitation, notamment (Makansi, Ipek et al. 2025) :

- **Murs et cloisons** : remplissage efficace des coffrages étroits sans vibration.
- **Réparations et rénovation** : remplissage des fissures et cavités dans les zones difficiles d'accès.
- **Béton préfabriqué** : réalisation d'éléments à géométrie complexe.
- **Revêtements et chapes fluides** : sols industriels, planchers chauffants, surfaces lisses et durables.
- **Réhabilitation des infrastructures** : ponts, tunnels, structures historiques.
- **Aménagements extérieurs** : trottoirs, murs de soutènement, ouvrages décoratifs.

Grâce à leur fluidité et à leur homogénéité, les mortiers autoplaçant offrent une qualité de mise en œuvre supérieure et une performance durable dans des environnements exigeants.

I.3 DÉVELOPPEMENT DE LA CONSTRUCTION DURABLE

La quête de pratiques de construction durables est devenue une priorité incontournable face à la croissance exponentielle des préoccupations environnementales et à l'urgence de limiter l'empreinte écologique du secteur de la construction. Ce défi mondial se manifeste par l'exigence croissante de réduire la consommation des ressources naturelles et les impacts négatifs des bâtiments tout au long de leur cycle de vie. Dans ce contexte, les matériaux avancés ont émergé comme des leviers essentiels pour réinventer les pratiques de construction traditionnelles, en offrant des solutions capables de conjuguer performance technique et réduction de l'impact environnemental (Almusaed, Almssad et al. 2023, Almusaed, Yitmen et al. 2023).

Cette revue se propose de fournir une analyse approfondie du rôle de ces matériaux dans la construction durable, en mettant en évidence non seulement leurs avantages pour les performances structurelles des bâtiments, mais aussi leur contribution à l'atténuation des effets néfastes de l'industrie de la construction sur l'environnement.

Le secteur de la construction connaît une transition fondamentale, marquée par un changement de paradigme vers des matériaux plus responsables sur le plan écologique, tout en garantissant une résistance et une durabilité accrues. Cette révolution dans la construction durable repose sur l'utilisation de matériaux de plus en plus performants et respectueux de l'environnement. Parmi ceux-ci, les formulations de béton haute performance, les composites verts, ainsi que les polymères et matériaux recyclés sont au cœur de cette dynamique.

Ces matériaux, non seulement capables de répondre aux exigences techniques modernes, se révèlent aussi des alternatives écologiques concrètes qui participent à la réduction de l'empreinte carbone et à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments (Rahla, Mateus et al. 2021, Ninduwezuor-Ehiobu, Tula et al. 2023).

La Figure I.9 présente une vue d'ensemble de l'évolution des matériaux de construction, illustrant le processus de sélection de ces derniers en fonction de critères environnementaux et techniques. L'adoption de matériaux avancés dans l'industrie de la

construction offre des avantages environnementaux considérables. En réduisant l'extraction des matières premières, en minimisant la consommation énergétique et en limitant les émissions de gaz à effet de serre générées lors de la production, ces matériaux s'alignent parfaitement avec les objectifs mondiaux de développement durable.

En outre, la longévité accrue des structures construites avec ces matériaux et les besoins réduits en entretien contribuent à une gestion plus efficace des ressources et à une diminution de l'impact environnemental tout au long du cycle de vie des bâtiments.

De surcroît, l'intégration de matériaux avancés dans les constructions permet de prolonger leur durée de vie utile, ce qui se traduit par une réduction des coûts d'entretien et une baisse de l'impact environnemental global, favorisant ainsi une approche intégrée de la durabilité (Hossain, Ng et al. 2020, Barbhuiya and Das 2023, Okogwu, Agho et al. 2023).



Figure I-9. Matériaux, évaluations et processus de sélection.

Dans le cadre de l'évolution vers des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement, l'adoption de matériaux avancés apparaît comme un levier essentiel pour atténuer les impacts négatifs de l'industrie. Ces matériaux jouent un rôle crucial en tant que catalyseurs du changement, permettant à la construction de réduire son empreinte écologique tout en répondant aux exigences croissantes de performance.

Les matériaux avancés couvrent une large gamme de substances conçues spécifiquement pour répondre, voire surpasser, les attributs de performance des matériaux de construction traditionnels, tout en privilégiant la durabilité. Ces matériaux se distinguent par leurs propriétés mécaniques supérieures, leur résistance accrue aux agressions extérieures et leur capacité à durer plus longtemps dans le temps. Surtout, ils se

caractérisent par une empreinte écologique considérablement réduite, ce qui en fait une alternative précieuse dans la quête de solutions de construction durable.

À mesure que les matériaux avancés continuent d'évoluer, il devient évident que des efforts soutenus en matière de recherche et de développement sont nécessaires pour surmonter les défis techniques actuels et libérer le potentiel inexploité de ces matériaux. Parmi les obstacles à surmonter figurent les défis technologiques relatifs à la production à grande échelle, les considérations économiques concernant le coût des matériaux et leur accessibilité, ainsi que les cadres réglementaires parfois contraignants. De plus, les résistances à l'adoption de ces nouveaux matériaux, qu'elles soient dues à des habitudes bien ancrées ou à des préoccupations concernant la fiabilité à long terme, doivent également être abordées (Himanen, Geurts et al. 2019).

Les recherches futures devraient donc se concentrer sur l'amélioration continue des processus de production, l'optimisation des propriétés des matériaux existants et l'élargissement de leur champ d'application dans divers scénarios de construction. L'objectif ultime est d'augmenter la compétitivité de ces matériaux sur le marché tout en minimisant leur coût et en maximisant leur durabilité et performance.

En conclusion, l'importance croissante des matériaux avancés dans la construction durable réside dans leur capacité à répondre à l'une des préoccupations majeures de notre époque : concilier le développement du milieu bâti avec une gestion environnementale responsable. Leur intégration systématique dans l'industrie de la construction pourrait bien constituer la clé pour un avenir plus durable, où la performance des matériaux et la préservation de l'environnement vont de pair.

I.3.1 Avantages environnementaux

Les avantages environnementaux sont inhérents à l'adoption de pratiques de construction durables, qui privilégient l'utilisation de matériaux et de processus respectueux de l'environnement. L'un des principaux avantages environnementaux de la construction durable est la réduction significative de l'extraction des matières premières. Les matériaux de construction traditionnels, tels que le béton et l'acier, nécessitent souvent l'extraction de grandes quantités de ressources naturelles, y compris des granulats, des minéraux et des combustibles fossiles.

Les alternatives durables, telles que les polymères recyclés, les composites verts et le béton haute performance avec des matériaux cimentaires complémentaires, contribuent à la

conservation des ressources en utilisant des matériaux recyclés ou en réduisant la demande de ressources vierges.

Cette réduction de l'extraction des matières premières aide à préserver les écosystèmes naturels, à minimiser la destruction des habitats et à atténuer l'impact environnemental associé aux activités minières et aux carrières. En adoptant des matériaux de construction durables, l'industrie fait un pas essentiel vers la réduction de son empreinte écologique et la promotion d'une gestion responsable des ressources (Eze, Ugulu et al. 2021, Datta, Tayeh et al. 2023).

Les pratiques de construction durables contribuent à réduire la consommation d'énergie globale tout au long du cycle de vie d'un bâtiment. Les processus de fabrication des matériaux de construction traditionnels, notamment ceux impliquant la production de ciment et d'acier, sont énergivores. En revanche, des matériaux comme les polymères recyclés, les composites verts et d'autres alternatives durables nécessitent souvent moins d'énergie pour leur production. En choisissant des matériaux qui demandent moins d'énergie, l'industrie de la construction participe activement à l'effort mondial de réduction des émissions de carbone et de lutte contre le changement climatique.

Une consommation d'énergie plus faible ne réduit pas seulement l'impact environnemental associé à la production de matériaux, mais s'inscrit également dans l'objectif global de transition vers un environnement bâti plus durable et plus économe en énergie.

L'adoption de pratiques de construction durables joue un rôle crucial dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, un facteur clé du changement climatique. Les matériaux de construction traditionnels, en particulier la production de ciment, sont de grands contributeurs aux émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Les alternatives durables, telles que les bétons avec des matériaux cimentaires complémentaires, peuvent réduire de manière significative l'empreinte carbone associée aux projets de construction. Les matériaux cimentaires complémentaires, tels que la cendre volante et le laitier, remplacent une partie du ciment dans le béton, réduisant ainsi les émissions de CO₂ liées à la production de ciment.. En incorporant ces matériaux durables, l'industrie de la construction devient un agent actif dans l'effort mondial pour atténuer l'impact du changement climatique (Röck, Saade et al. 2020, Lamb, Wiedmann et al. 2021).

I.3.2 Les défis et les considérations associés à la construction durable

La construction durable, bien qu'essentielle pour répondre aux préoccupations environnementales, fait face à un certain nombre de défis et de considérations qui nécessitent un examen attentif. Cet article explore les différentes facettes des défis et des considérations dans le domaine de la construction durable, englobant les obstacles technologiques, les considérations économiques, le paysage réglementaire, les barrières à l'adoption et les directions possibles pour les recherches futures (Mihelcic and Zimmerman 2021).

Le domaine de la construction durable cherche constamment à intégrer des matériaux et des technologies innovants. Le développement et l'intégration de ces innovations dans les pratiques de construction classiques posent des défis technologiques. Des matériaux avancés comme les composites verts aux techniques de construction sophistiquées, l'industrie rencontre des obstacles liés au développement et à l'adoption de technologies de pointe. L'établissement de protocoles normalisés et de processus de certification pour les matériaux et pratiques durables constitue un défi technologique majeur.

La cohérence des processus de fabrication et la garantie de la qualité des matériaux durables sont essentielles pour leur acceptation généralisée. L'absence de normes standardisées pourrait entraver l'intégration fluide des alternatives durables dans les projets de construction.

Un obstacle majeur à l'adoption des pratiques de construction durable est la perception de coûts initiaux plus élevés. Les matériaux et technologies durables présentent souvent une prime de prix par rapport à leurs homologues conventionnels. Bien que les avantages à long terme puissent compenser les coûts initiaux, les considérations économiques, particulièrement dans un contexte de budgets serrés et d'intervenants soucieux des coûts, constituent un défi significatif. Il est essentiel de démontrer un retour sur investissement clair et attrayant pour promouvoir la construction durable. La viabilité économique des pratiques et matériaux durables doit être efficacement communiquée aux investisseurs, développeurs et parties prenantes de la construction. Le défi réside dans la mise en évidence des avantages financiers à long terme associés à la réduction des coûts opérationnels, à l'efficacité énergétique et à la minimisation de l'impact environnemental (Fitriani and Ajayi 2023).

Une barrière importante à l'adoption des pratiques de construction durable réside dans le manque de sensibilisation et d'éducation des principales parties prenantes. Les architectes, les constructeurs, les promoteurs et les consommateurs ne sont pas toujours pleinement informés des avantages des alternatives durables, ce qui freine leur volonté d'adopter ces changements. Comblar cette lacune de connaissances est essentiel pour favoriser une culture de la durabilité au sein de l'industrie. Le secteur de la construction est marqué par des traditions et des pratiques profondément ancrées, et la résistance au changement en est une barrière courante.

Les professionnels du bâtiment peuvent être réticents à adopter de nouveaux matériaux ou méthodes en raison de préoccupations liées à l'inconnu, aux risques perçus ou à la nécessité de se recycler. Surmonter cette résistance nécessite des stratégies de gestion du changement efficaces et une formation continue.

I.3.3 Études des constructions durables

Les études de cas jouent un rôle crucial dans la démonstration des avantages tangibles des pratiques de construction durable. Un exemple marquant est le projet One Central Park à Sydney, conçu par l'architecte Jean Nouvel, qui est célèbre pour son utilisation innovante des murs végétalisés et des technologies de bâtiment intelligentes (Nwokediegwu, Ilojiana et al. 2024).

Ce projet intègre des matériaux avancés tels que le verre haut performance et un système innovant d'héliostat, conçu pour rediriger la lumière solaire vers des zones ombragées du bâtiment. Cette approche permet non seulement d'optimiser l'utilisation de l'éclairage naturel, mais aussi de réduire significativement la dépendance à l'éclairage artificiel, avec des bénéfices directs en termes d'économie d'énergie. Le verre haut performance, grâce à ses propriétés isolantes et ses capacités de gestion thermique, contribue à maintenir une température intérieure stable, tout en maximisant la transmission de lumière et en réduisant la chaleur excédentaire.

Le système d'héliostat, quant à lui, optimise l'utilisation des ressources naturelles en tirant parti de la lumière solaire à travers des techniques de redirection précises, rendant ainsi chaque espace plus lumineux sans recourir à des solutions énergivores. Cette synergie entre les matériaux avancés et les systèmes énergétiques innovants montre comment la conception durable, alliée à des technologies de pointe, peut transformer l'architecture moderne en un outil puissant pour la préservation de l'environnement. Ce projet démontre

non seulement l'efficacité de ces solutions mais aussi leur potentiel à réduire l'empreinte carbone des bâtiments, en contribuant à la transition vers des constructions à la fois performantes, économes en énergie et respectueuses de l'environnement.



Figure I-10. One Central Park à Sydney (Sajane, Kulkarni et al. 2025)

Edge à Amsterdam (Figure I.11) est un exemple révolutionnaire de conception de bureaux durables. Utilisant des matériaux avancés tels que des capteurs intelligents, du verre éco-énergétique et des matériaux recyclés, le bâtiment optimise la consommation d'énergie et le confort intérieur.

L'intégration de technologies de pointe a permis le bâti d'obtenir le titre de bâtiment de bureaux le plus écologique du monde, établissant ainsi une référence pour les futurs espaces de bureaux durables (Nwokediegwu, Ilojiana et al. 2024).

La ville de Masdar, initiée par l'Institut Masdar de science et de technologie, est un développement urbain neutre en carbone. En intégrant des principes de conception durables, des sources d'énergie renouvelable et des technologies innovantes, Masdar City vise à devenir un modèle de vie urbaine durable.

Le succès de Masdar City réside dans son approche holistique de la durabilité, mettant l'accent sur l'efficacité énergétique, la conservation de l'eau et une conception favorable aux piétons.

Le cas de Masdar City souligne l'importance d'une planification complète et de la collaboration interdisciplinaire. Il met en évidence la nécessité d'une vision à long terme et d'un engagement envers les principes durables, montrant que l'atteinte de la neutralité carbone nécessite un effort concerté des secteurs public et privé (Omar and Omar 2023).



Figure I-11. Edge à Amsterdam (Bozhar, de Rooij et al. 2025, Sajane, Kulkarni et al. 2025).

Le cas de Masdar City (Figure I.12) illustre de manière frappante l'importance d'une planification intégrée et d'une collaboration interdisciplinaire pour atteindre des objectifs ambitieux en matière de durabilité. Ce projet phare met en lumière la nécessité d'une vision à long terme, où chaque aspect de la conception et de la construction est pensé pour minimiser l'impact environnemental tout en maximisant l'efficacité énergétique. Masdar City s'engage à atteindre la neutralité carbone, un objectif qui requiert une approche systématique et une coopération active entre les secteurs public et privé.

En réunissant des experts en urbanisme, en énergie, en ingénierie et en environnement, le projet démontre qu'une transition vers des villes durables repose non seulement sur l'innovation technologique, mais aussi sur une gouvernance collaborative et une mobilisation collective. Cette démarche collaborative et proactive permet de surmonter les défis techniques et financiers, tout en assurant une mise en œuvre cohérente des principes de durabilité tout au long du développement de la ville (Omar and Omar 2023).

Vastra Hamnen, à Malmö, en Suède, incarne un modèle de transformation urbaine réussie, où une ancienne zone industrielle a été convertie en un quartier urbain durable et innovant. Ce projet ambitieux met l'accent sur l'intégration de sources d'énergie renouvelable, de bâtiments éco-énergétiques et de vastes espaces verts, afin de promouvoir une durabilité qui va au-delà de la simple réduction de l'empreinte écologique. Vastra Hamnen adopte une approche globale de la durabilité, englobant des dimensions environnementales, sociales et économiques.



Figure I-12. Ville de Masdar à Abou Dhabi (Abou Zahr, 2025)

Les bâtiments de ce quartier sont conçus pour maximiser l'efficacité énergétique, tout en utilisant des matériaux durables et en réduisant les besoins énergétiques grâce à des technologies avancées. Les espaces verts, quant à eux, jouent un rôle crucial non seulement pour améliorer la qualité de l'air et la biodiversité, mais aussi pour créer un cadre de vie agréable et favoriser la cohésion sociale.

Le succès de Vastra Hamnen (Figure I.13) se manifeste non seulement par son faible impact environnemental, mais aussi par sa capacité à attirer de nouveaux résidents et entreprises, contribuant ainsi à la revitalisation économique du secteur. En tant que quartier modèle, il montre que la durabilité peut être un moteur de croissance et de bien-être à long terme, en attirant des communautés et des entreprises soucieuses de leur impact sur l'environnement. Ce projet met en évidence l'importance de la planification urbaine qui priorise la durabilité dès le départ, prouvant que des choix éclairés en matière d'urbanisme peuvent créer des communautés résilientes et prospères, tout en respectant les principes du développement durable.

Nous enseignons que les développements durables réussis nécessitent un équilibre entre viabilité économique, conscience environnementale et bien-être social. De plus, l'engagement communautaire et l'implication dans le processus de planification sont essentiels pour le succès à long terme des projets urbains durables (Nwokediegwu, Ilojiana et al. 2024).



Figure I-13. Vastra Hamnen à Malmö, en Suède (Korkiakoski 2011)

Le Crystal à Londres est un bâtiment durable exemplaire conçu pour atteindre les plus hauts standards de performance environnementale. Son succès réside dans l'intégration de technologies éco-énergétiques, de mesures de conservation de l'eau et de matériaux durables.

Le bâtiment sert de centre névralgique pour les pratiques durables, jouant un rôle clé dans l'éducation et la sensibilisation à la cause environnementale. Il accueille une variété d'événements et d'expositions qui visent à promouvoir les principes du développement durable, tout en inspirant les visiteurs à adopter des comportements plus respectueux de l'environnement.

À travers des initiatives interactives, des démonstrations de technologies écologiques et des conférences sur les défis environnementaux, le bâtiment devient un lieu d'apprentissage et de partage, contribuant activement à sensibiliser le public aux enjeux écologiques contemporains. Ce centre représente ainsi un modèle de ce que peuvent être des espaces à la fois fonctionnels et porteurs de valeurs durables, tout en incitant à une réflexion collective sur les solutions à mettre en œuvre pour un avenir plus vert.



Figure I-14. *Vastra Hamnen à Malmö, en Suède. (Korkiakoski 2011)*

I.3.4 Recyclage et gestion des déchets en génie civil

Ces dernières années, le secteur de la construction a manifesté un grand intérêt pour l'utilisation de divers sous-produits, déchets industriels et produits de consommation usagés. L'utilisation de ces déchets et matériaux recyclés s'intègre parfaitement dans l'idée de construction durable. Le remplacement, même partiel, des ressources naturelles par des matériaux de déchets permet de les préserver pour les générations futures et constitue également une première étape vers une économie circulaire. Il convient de rappeler que la conception et la production de matériaux de construction doivent respecter des normes appropriées ainsi que les exigences de protection de l'environnement (Ulewicz 2023).

De plus, l'utilisation de déchets issus de diverses industries et de matériaux recyclés dans les matériaux de construction doit être précédée d'une série de tests en laboratoire afin de garantir leur innocuité pour l'environnement et la santé humaine.

Ce numéro spécial intitulé « Matériaux recyclés dans les applications de génie civil » présente les derniers résultats de recherches scientifiques sur l'utilisation des déchets et des matériaux recyclés pour la production de mortiers, bétons, céramiques et autres matériaux de construction. Ces recherches ont été menées dans de nombreux centres et universités à travers le monde, notamment aux États-Unis, en France, au Pakistan, en Turquie, en Pologne, en Ukraine, en Croatie, au Brésil, en Chine, en Arménie et au Chili (Ulewicz 2023).

Dans ce numéro, douze articles scientifiques originaux et deux articles de synthèse ont été publiés. Les thèmes abordés couvrent plusieurs aspects importants pour la construction et l'environnement, notamment la détermination des propriétés physico-chimiques et mécaniques des mortiers, bétons et matériaux céramiques fabriqués à partir de déchets et de matériaux recyclés. Un modèle pour prédire le processus d'hydratation d'un nouveau liant alternatif est également proposé, ainsi que des méthodes et technologies permettant de réduire l'excès de fluor dans divers déchets, offrant ainsi des avantages pour l'environnement.

Les résultats des recherches en laboratoire ainsi que des solutions intéressantes et pratiques y sont présentés.

(Zhao, Lv et al. 2023) présentent l'influence de l'ajout de déchets en plastique renforcé de fibres de verre (GFRP) (dans une plage de 1 à 5 %) sur les propriétés du béton. Il a été démontré que l'ajout de poudre de GFRP n'a pas d'effet significatif sur les propriétés mécaniques du béton, tandis que l'ajout d'une petite quantité d'agrégats de GFRP améliore légèrement la résistance à la compression et à la traction du béton.

(Pietrzak and Ulewicz 2023) ont étudié l'influence de l'ajout (dans une plage de 2,5 à 10 %) d'élastomère thermoplastique (TPE) post-consommation, issu de tapis de voiture usagés, sur les propriétés physiques et mécaniques du béton. Il a été démontré que seul l'ajout de déchets d'élastomères post-consommation, jusqu'à hauteur de 2,5 % de la masse du ciment, peut être utilisé comme substitut au sable et aux granulats dans le béton sans réduire ses propriétés mécaniques et sa microstructure.

(Kalak, Szypura et al. 2023) ont déterminé les propriétés mécaniques du béton produit avec l'ajout de cendres volantes issues de la conversion thermique des boues d'épuration municipales (SSFA). Une corrélation a été établie entre la résistance mécanique du béton modifié par des déchets et divers paramètres, notamment la composition des mélanges de béton (quantité de sable et de granulats, ciment, SSFA), le rapport eau/ciment (E/C) et l'indice de sable. Dans le cadre étudié par les auteurs, l'ajout de SSFA n'a pas diminué la résistance à la compression du béton produit. Bien qu'il n'existe pas encore de réglementations légales concernant les propriétés physico-chimiques du SSFA, ce matériau pourrait être utilisé pour la production de béton.

(Jura and Ulewicz 2021) ont étudié les propriétés du béton contenant des cendres volantes issues de la combustion de biomasse bois-tournesol dans une chaudière à lit

fluidisé. L'ajout de cendres volantes, dans des proportions allant de 10 à 30 %, a permis de substituer le sable sans compromettre les propriétés mécaniques du béton, notamment la résistance à la compression et aux basses températures. De plus, les ions métalliques lourds présents dans les cendres n'ont pas d'impact environnemental significatif.

(Blikharsky, Sobol et al. 2021) ont examiné l'effet du laitier granulé de haut fourneau broyé (GGBFS) et des cendres volantes (FA) sur la résistance mécanique du béton et la corrosion des armatures. Une combinaison de 10 % de GGBFS et de 10 % de FA a conduit à une résistance à la compression supérieure de 6,5 % par rapport au béton de référence, tout en maintenant une protection adéquate des armatures grâce à une microstructure plus dense.

(Muradyan, Arzumanyan et al. 2023) ont exploré l'effet de la biosilice sur la résistance à la compression des mortiers de ciment, en comparant deux méthodes de mélange : le mélange des ingrédients secs et le mélange après dissolution de la biosilice dans l'eau. Les deux approches ont donné des résultats positifs, avec une résistance maximale obtenue pour un mortier contenant 10 % de biosilice.

(Borek, Czapik et al. 2022) ont utilisé la poussière de contournement de cimenterie (CBPD) pour produire des briques autoclavées. La substitution complète de la chaux vive par la CBPD a augmenté la résistance à la compression de 5 % tout en réduisant la densité apparente de 5,3 %. Cette substitution modifie la composition de phase, favorisant la formation de structures cristallines plus denses, telles que la tobermorite.

(Kostrzewa-Demczuk, Stepień et al. 2023) ont évalué l'effet de la poudre de basalte comme composant des produits en silicate. À un taux de 10 %, l'ajout a doublé la résistance à la compression. Cependant, des proportions plus élevées ont réduit les performances tout en respectant les normes des silicates traditionnels.

(Sufian, Ullah et al. 2021) ont étudié l'effet de la farine de marbre (5–30 %) comme substitut à l'argile dans la fabrication de briques. Bien que la résistance à la compression et la densité aient diminué, la porosité et la capacité d'absorption d'eau ont augmenté. Les briques contenant 5–20 % de farine de marbre satisfont aux exigences normatives en matière de résistance à la compression.

(Dimter, Zagvozda et al. 2022) ont examiné les propriétés mécaniques des mélanges de sable et de cendres volantes de bois (WFA) stabilisés par du ciment. Une substitution

partielle du sable par 30 % de WFA a amélioré la résistance à la compression de 90,7 % par rapport au mélange sable-ciment, renforçant également la capacité portante et la résistance au gel/dégel, tout en réduisant les coûts de construction des structures de chaussée.

(Boukhelf, Targino et al. 2023) ont proposé un modèle basé sur les réseaux neuronaux artificiels (ANN) pour prédire le processus d'hydratation d'un nouveau liant alternatif. Ce modèle permet de contourner les limitations des modèles physiques en utilisant un nombre réduit de paramètres d'entrée, tout en offrant des calculs rapides et des explications réalistes.

Ils ont Vérifié sur des mortiers à base de ciments CEM I et CEM III avec ajout de poudre de verre comme substitut, ce modèle pourrait être un outil précieux pour les producteurs de ciment, permettant une identification rapide des modes d'hydratation via les tests de chaleur d'hydratation.

(Xiao, Wu et al. 2023) ont développé un processus innovant pour produire un sol léger mousseux à partir de farine de béton activée par des alcalins, dérivée de déchets de préfabrication. La formulation optimale combine 60 % de farine de béton, 20 % de cendres volantes et 20 % de laitier. Ce sol léger présente des avantages significatifs, notamment une facilité de mise en œuvre sans compactage et des coûts de production inférieurs à ceux des sols renforcés ou de remplissage classique.

(Dobiszewska, Bagcal et al. 2022) ont réalisé une revue complète sur l'utilisation des poussières de roche issues de diverses origines géologiques dans la production de mortiers et de bétons. L'analyse a porté sur l'impact de ces poussières en tant que substituts aux granulats fins sur les propriétés des composites cimentaires, telles que la maniabilité, la ségrégation, le saignement, les propriétés mécaniques et la durabilité.

Les résultats indiquent que les poussières de roche, dans des proportions appropriées, peuvent améliorer les propriétés des composites à l'état frais et durci. Cependant, les auteurs soulignent un manque d'information sur l'influence de la distribution granulométrique des poussières de roche sur les propriétés mécaniques et la structure interne des matériaux.

(Olejarczyk, Rykowska et al. 2022) ont exploré la production de matériaux de construction à partir de déchets contenant des substances dangereuses, notamment le fluor.

Bien que leur usage reste limité, ces déchets peuvent être transformés en additifs ou adjuvants après des processus de "solidification/stabilisation". Les auteurs ont proposé des méthodes pour réduire la concentration d'ions fluor dans les déchets et ont identifié plusieurs matériaux pouvant agir comme adsorbants de fluor, tout en tenant compte des faibles coûts de traitement.

I.4 LE VERRE : FABRICATION, COMPOSITION, PROPRIÉTÉS ET DÉCHETS

I.4.1 Définition du Verre

Le verre est un matériau solide, transparent et homogène, caractérisé par sa fragilité. Il est non cristallin, c'est-à-dire amorphe, ce qui lui confère une structure unique par rapport aux autres matériaux solides. En raison de cette structure particulière, le verre présente une grande résistance au feu et à l'humidité, ainsi qu'à une large gamme de liquides et de solides.

I.4.2 Fabrication du Verre

La fabrication du verre repose sur l'utilisation de matières premières principalement composées de roches naturelles, auxquelles sont ajoutés en plus petites quantités des produits chimiques industriels. Les principaux composants du verre industriel sont les oxydes, notamment le dioxyde de silicium (SiO_2), le calcaire, la dolomie, et parfois des roches alumineuses, qui sont broyées et traitées pour réduire leur teneur en impuretés. L'aptitude à la vitrification dépend des proportions spécifiques de ces oxydes dans le mélange, et leur combinaison permet de produire différents types de verre selon les propriétés recherchées.

I.4.3 Composition Chimique du Verre

Les verres peuvent être composés de divers oxydes et éléments chimiques, ajustés en fonction de leurs applications spécifiques. Par exemple, les verres de haute performance, tels que le verre borosilicaté utilisé dans les applications de haute température, présentent une composition chimique différente de celle des verres plus courants, comme les verres sodocalciques utilisés dans la fabrication de fenêtres ou de contenants.

I.4.4 Les Types de Verre

Le verre peut être classé en plusieurs catégories en fonction de sa composition chimique et de ses applications. Chaque type de verre a des propriétés spécifiques qui influencent son recyclage et ses performances dans diverses industries.

I.4.4.1 Verres Sodo-calciques

Les verres sodocalciques, les plus courants, sont composés de SiO_2 , Na_2O (oxyde de sodium) et CaO (oxyde de calcium). Leur faible coût de production, combiné à leurs bonnes propriétés mécaniques et leur facilité de recyclage, en fait un matériau largement utilisé dans les fenêtres et les emballages en verre.

I.4.4.2 Verres Boro-silicatés

Les verres borosilicatés, tels que le Pyrex, contiennent du SiO_2 et du B_2O_3 (oxyde de bore). Ce type de verre est particulièrement apprécié pour sa résistance thermique, ce qui le rend adapté à des applications dans les laboratoires et les ustensiles de cuisine. Cependant, en raison de leur composition complexe, ces verres sont plus difficiles à recycler que les verres sodocalciques.

I.4.4.3 Verres au Plomb

Les verres au plomb, également appelés cristaux, contiennent au moins 24 % d'oxyde de plomb (PbO). Ils sont utilisés principalement dans l'art, la décoration et la bijouterie en raison de leur clarté et de leur capacité à réfracter la lumière. Toutefois, leur contenu en plomb rend leur recyclage plus complexe.

I.4.5 Utilisation des Déchets de Verre

Les déchets de verre peuvent être réutilisés de plusieurs manières bénéfiques, telles que :

- **Additifs dans le béton et les mortiers** : Le verre broyé peut servir de charge dans les matériaux de construction, améliorant ainsi leur résistance et leurs propriétés thermiques.
- **Peintures et enduits** : Il est souvent utilisé pour produire des peintures antidérapantes ou pour créer des textures spéciales sur des surfaces peintes.
- **Protection des sols** : Sous forme de paillage, il protège les sols contre l'érosion.
- **Colorants** : Le verre broyé peut également être utilisé comme colorant dans certains produits industriels et artisanaux.

I.4.6 Recyclage du verre en Algérie

En Algérie, les déchets solides ménagers sont principalement constitués de produits organiques, représentant environ 72 % du total des déchets générés, ce qui souligne une gestion complexe des déchets organiques dans le pays. En revanche, les déchets plastiques ne constituent que 10 %, suivis par les déchets papier/carton à hauteur de 9,3 %, les chiffons et autres matériaux à 4,14 %, les métaux à 3,2 %, et enfin, le verre, qui représente une proportion relativement faible de 1,36 % des déchets solides produits. Cette répartition met en évidence l'importance de trouver des solutions efficaces pour la gestion et le recyclage de ces différents types de déchets, et en particulier pour le verre, dont la faible proportion dans les déchets solides ne doit pas occulter les défis qu'il représente pour les autorités locales, notamment en raison de son faible taux de recyclage. (Ouldkaoua et al., 2020).

Le recyclage des déchets en verre, et plus particulièrement sous forme de poudre, se présente comme une solution potentiellement bénéfique pour plusieurs secteurs, notamment celui de la construction. En effet, l'intégration de verre broyé dans la fabrication de béton permet de remplacer une fraction du ciment ou de ses substituts, contribuant ainsi à réduire la consommation de ressources naturelles et à limiter l'empreinte carbone associée à la production de béton. Cette pratique de valorisation des déchets en verre peut également jouer un rôle clé dans l'économie circulaire, en offrant une nouvelle vie aux matériaux qui, autrement, seraient envoyés en décharge, et en réduisant la dépendance vis-à-vis des matériaux vierges dans l'industrie de la construction.

Le tableau ci-dessous présente une estimation de la quantité de déchets rejetés en Algérie chaque année, offrant ainsi un aperçu des volumes à traiter et soulignant l'importance de mettre en œuvre des stratégies de recyclage efficaces pour minimiser l'impact environnemental de ces déchets.

Tableau I-1. Estimation des déchets rejetés en Algérie (Ouldkaoua et al., 2020)

Nature des déchets	Quantité en tonne/ an
Papier	385.000
Plastique	130.000
Métaux	100.000
Verre	50.000
Matières diverses	95.000
Total	760.000

I.4.7 Le verre recyclé dans le béton

À l'échelle mondiale, notamment aux États-Unis, le verre post-consommation représente environ 11 millions de tonnes de déchets non recyclés chaque année. Une solution prometteuse consiste à incorporer ce verre sous forme de poudre dans les mélanges de béton pour remplacer une partie du ciment ou de ses substituts. Des projets pilotes menés à Montréal et à New York ont démontré l'efficacité technique de cette approche, qui permet de réduire l'empreinte carbone du béton de 20 à 40 %. (Ouldkhaoua et al., 2020)

Le broyage du verre génère relativement peu d'énergie et émet seulement 18 kg de CO₂ par tonne de verre, un impact bien inférieur aux 201 kg de CO₂ par tonne émis par l'utilisation de cendres volantes. Ce processus offre ainsi une alternative écologique et efficace pour recycler les déchets de verre tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

I.5 LA POUDRE DE VERRE : COMPORTEMENT ET EFFET SUR LE BÉTON

La poudre de verre, obtenue en broyant le verre recyclé, est un matériau pouzzolanique qui peut être utilisé pour remplacer une fraction du ciment Portland dans le béton. Cette poudre améliore la durabilité du béton tout en réduisant son empreinte carbone. Le comportement de la poudre de verre dans un environnement cimentaire dépend principalement de sa granulométrie : les particules fines favorisent une réaction pouzzolanique bénéfique, tandis que les particules plus grosses peuvent engendrer des réactions nuisibles, telles que l'alcali-réaction, générant des désordres dans le béton (Shayan and Xu 2004, Taha and Nounu 2008).

I.5.1 Réaction Pouzzolanique de la poudre de verre

L'activité pouzzolanique du verre est évaluée à travers des tests mécaniques et chimiques, mesurant la capacité du verre à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment pour former des composés stables. Des recherches ont montré que la taille des particules de verre influe directement sur son activité pouzzolanique. Plus les particules sont fines, plus leur contribution à la résistance du béton est significative (Shao, Lefort et al. 2000).

(Shi et al. 2004) montre que, du point de vue de la résistance, la PV peut être considéré comme un bon ajout pouzzolanique. La seule réserve à son utilisation comme

substitut au ciment dans le béton concerne le risque potentiel de réaction alcali-granulat si des granulats réactifs sont utilisés. La figure I.15 présente les indices d'activité pouzzolanique pour différentes finesses de la PV, à 28 jours, leurs indices atteignent environ 110 %, bien au-dessus de celui des cendres volantes (85 %), ce qui indique une réactivité pouzzolanique très élevée. Ainsi, un remplacement de 20 % du ciment par de la poudre de verre finement broyée peut produire une résistance supérieure à celle du ciment Portland pur à 28 jours.

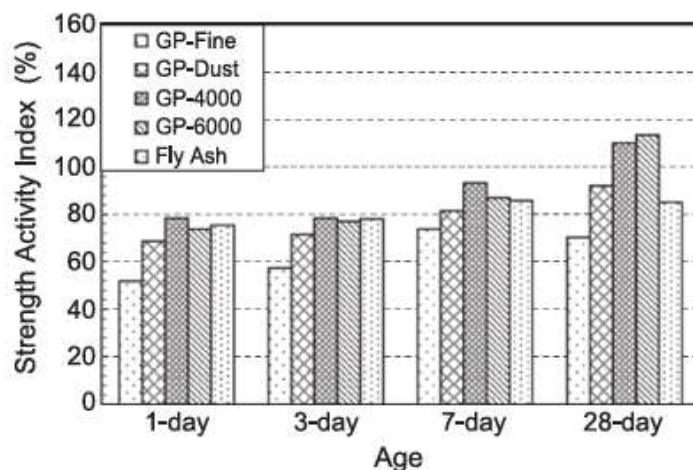


Figure I-15. Indice d'activité pouzzolanique des PV et des CV à 23°C. (Shi et al. , 2004)

(Neithalath et Schwarz, 2009) ont constaté que tant à court terme (14 jours) qu'à long terme (90 jours), la perte de CH est plus importante dans la pâte de base (non modifiée) que dans toutes les pâtes modifiées, ce qui est attendu. Après 14 jours, on n'observe pas de différence significative de teneur en CH entre les pâtes contenant 10 % de poudre de verre et celles contenant 10 % de cendre volante. En revanche, après 90 jours, les pâtes modifiées à la cendre volante présentent une teneur en CH plus faible que celles modifiées à la poudre de verre. Toutefois, la pâte contenant de la poudre de verre reste moins riche en CH que la pâte de base (figure I.16)

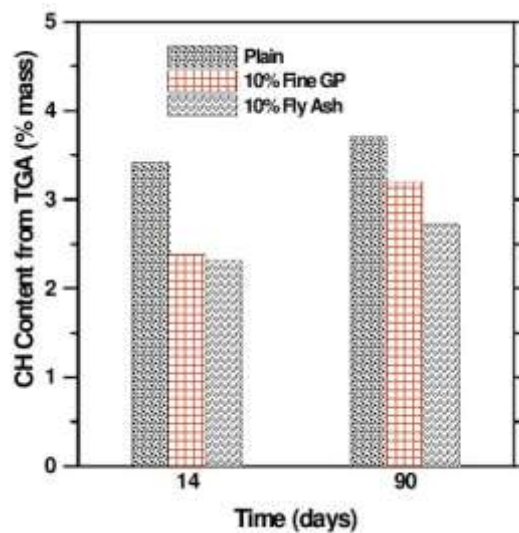


Figure I-16. Teneur en hydroxyde de calcium des pâtes contenant de la PV et les CV après 90 jours (Neithalath et Schwarz, 2009)

(Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016) ont trouvé que le remplacement du ciment par de la poudre de verre entraîne une diminution de la teneur en hydroxyde de calcium (Figure I.17). Cette tendance peut s'expliquer à la fois par la réduction de la quantité de ciment et par l'effet pouzzolanique de la poudre de verre (réaction entre l'oxyde de silicium et l'hydroxyde de calcium). L'analyse des résultats d'essai confirme que ces deux mécanismes sont présents.

En effet, la réduction de l'hydroxyde de calcium atteint environ 12 % avec 10 % de poudre de verre, alors qu'en l'absence d'effet pouzzolanique, cette réduction ne devrait être que de 10%. Un comportement similaire est observé avec un taux de remplacement de 15 %, où la diminution atteint environ 21%. Ces résultats confirment donc l'effet pouzzolanique de la poudre de verre.

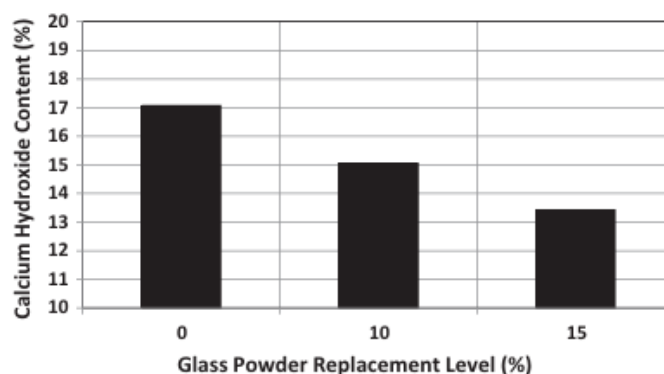


Figure I-17. Teneur en hydroxyde de calcium des échantillons de pâtes modifiées avec de la PV (Aliabdo et al., 2016)

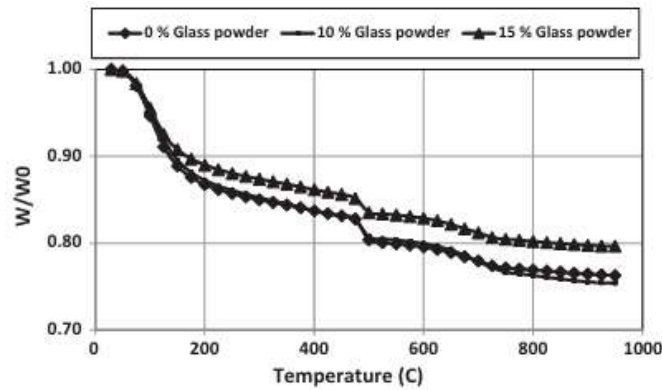


Figure I-18. Analyse thermogravimétrique (ATG) de pâtes modifiées avec de la PV. (Aliabdo et al., 2016)

Les analyses par diffraction des rayons X (XRD) et par thermogravimétrie différentiel thermique (TGA-DTA) ont confirmé le comportement pouzzolanique de la PV, notamment par la formation d'hydrosilicate de calcium, principal produit de la réaction pouzzolanique (Figure I.19). De plus, l'analyse XRD (Figure I.20) a révélé la présence d'uléxite dans la pâte à base de verre borosilicaté, ce qui explique la plus faible résistance à la compression des mortiers contenant ce type de verre. La présence de thermonatrite, formée par la carbonatation du sodium, indique également une moindre réactivité alcali-silice. (Ibrahim et Meawad, 2018)

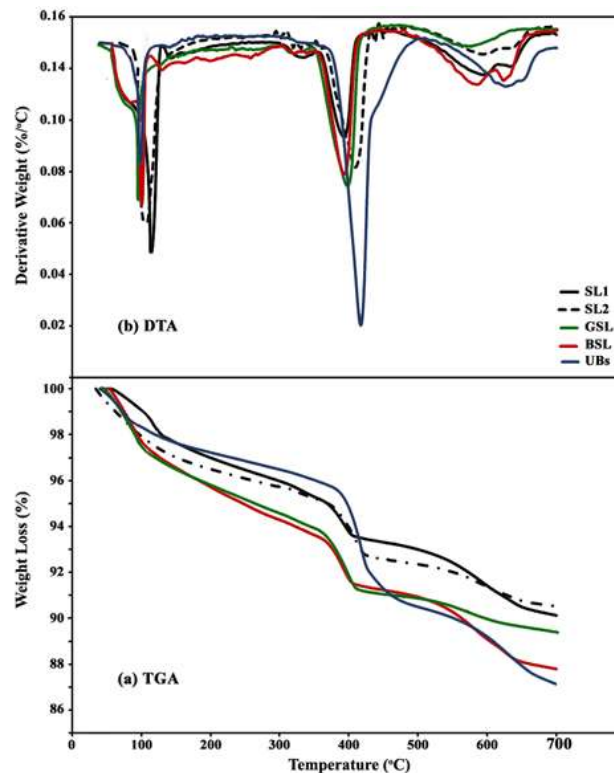


Figure I-19. Comportement thermique de la portlandite des pâtes de PV après 28 j : (a) Analyse thermogravimétrique et (b) analyse thermique différentielle. (Ibrahim and Meawad, 2018)

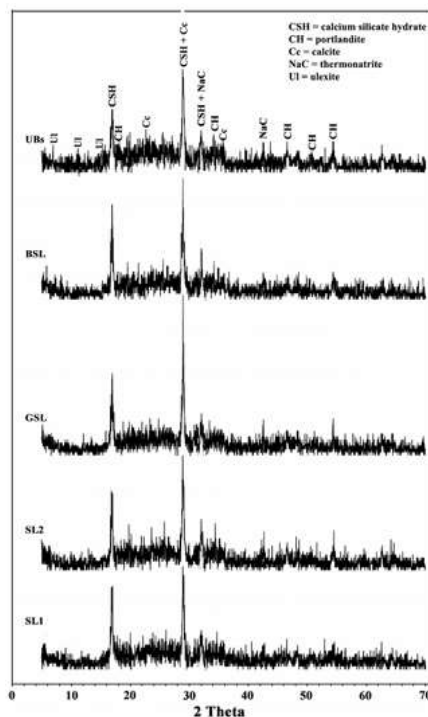


Figure I-20. Image XRD de la portlandite de la PV après 28j. (Ibrahim and Meawad, 2018)

I.5.2 Réaction alcali-silice du verre

Ducman et al. (2002) ont trouvé comme résultats sur essais de réactivité alcali-silice de l'agrégat expansé, effectués selon la norme ASTM C 289 (2016) (méthode chimique), une forte réactivité de l'agrégat de verre, indiquant également qu'il constitue une source supplémentaire d'alcalis. Toutefois, les essais réalisés sur des éprouvettes de mortier conformément à la norme ASTM C 227 (2018), utilisant un ciment Portland contenant 0,92 % d'équivalent Na_2O , ont montré que, malgré la forte réactivité de l'agrégat de verre expansé, aucune expansion ni fissuration n'a été observée.

Ce comportement est attribué à la structure poreuse de l'agrégat, capable d'absorber le gel de silice produit en grande quantité. L'agrégat se comporte de manière similaire à une pierre ponce rhyolitique.

Par ailleurs, les analyses ont mis en évidence le comportement pouzzolanique de l'agrégat, confirmé par la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H), principal produit de la réaction pouzzolanique (Figure I.21). L'analyse par diffraction des rayons X (XRD) a également confirmé la présence d'uléxite dans la pâte contenant de la poudre de verre borosilicaté, ce qui explique la réduction de la résistance à la compression des mortiers contenant ce type de verre.

La présence de thermonatrite, issue de la carbonatation du sodium, illustre une moindre intensité de la réaction alcali-silice dans ces mortiers.

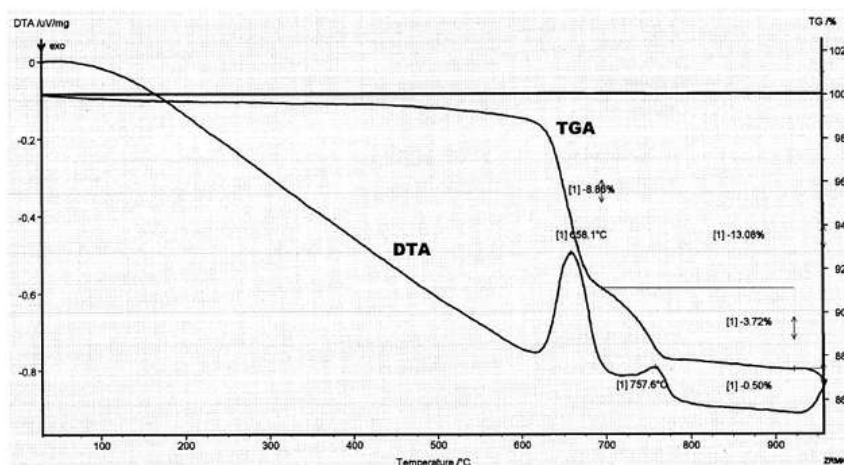


Figure I-21. Analyse DTA/TGA de l'agent expansif. (Ducman et al. , 2002)

I.5.3 Effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité de béton

(Vasudevan and Pillay 2013) ont étudié la propriété d'affaissement dans leurs recherches et ont conclu que, par rapport au mélange de contrôle, l'utilisation de poudre de verre recyclé apporte un autre avantage, à savoir une maniabilité du béton beaucoup plus élevée. R. Vandhiyan et al. (Vandhiyan, Ramkumar et al. 2013) ont observé que la maniabilité diminuait en raison du remplacement et qu'elle diminuait avec l'augmentation du taux de remplacement. Cela est dû à l'augmentation de la surface spécifique de la poudre de verre ainsi qu'à la forme angulaire des particules de verre.

(Kumarappan 2013) a démontré qu'il existe une augmentation systématique de l'affaissement à mesure que la quantité de poudre de verre dans le mélange augmente. L'affaissement est passé d'environ 40 mm pour le mélange de référence (c'est-à-dire 0 % de poudre de verre) à 160 mm avec 40 % de poudre de verre.

(Khatib, Negim et al. 2012), dans leurs études, ont également montré une augmentation systématique de l'affaissement à mesure que la teneur en poudre de verre dans le mélange augmente. Jangid Jitendra B. et Saoji A.C. (Sawant 2018) ont conclu que la maniabilité diminue à mesure que le pourcentage de poudre de verre dans le mélange augmente.

(Chikhalikar and Tande 2012) ont étudié les propriétés du béton renforcé de fibres d'acier (SFRC) contenant du verre recyclé comme pouzzolane et ont conclu qu'un

remplacement de 20 % du ciment par de la poudre de verre recyclé améliore la maniabilité du SFRC.

(Soroshian 2012) ont utilisé du verre recyclé broyé dans leurs expérimentations et ont constaté que l'affaissement augmentait légèrement avec l'introduction de ce verre broyé. Cela peut être attribué à la faible absorption d'eau du verre. L'affaissement des mélanges de béton avec granulats recyclés (pour les deux niveaux de rapport eau/ciment) est plus élevé que celui des mélanges de contrôle correspondants.

(Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016) ont rapporté que l'augmentation du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre augmente l'affaissement du béton. Pour un mélange de béton ayant une résistance de 33 MPa, l'utilisation de chaque 5 % de poudre de verre augmente l'affaissement du béton d'environ 10 mm. (Figure I.22)

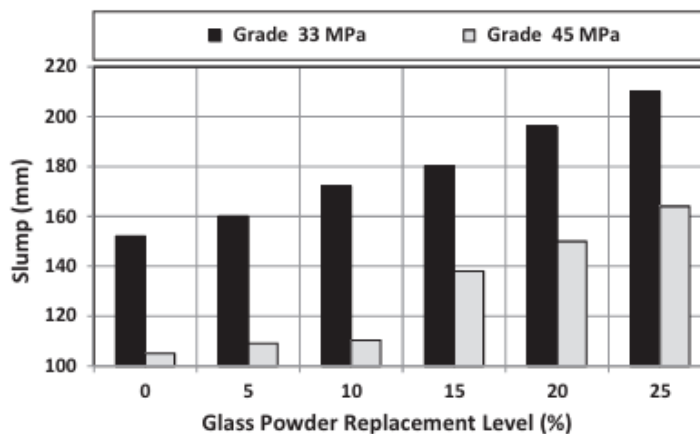


Figure I-22. L'effet d'utilisation de la PV en remplacement du ciment sur l'affaissement du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)

(Rehman et al., 2018) ont trouvé que l'ouvrabilité du béton s'améliore à mesure que la teneur en poudre de verre augmente, probablement en raison d'une densité de compactage optimisée liée à l'incorporation de cette poudre fine. En effet, les particules de verre, de par leur finesse et leur forme, comblent plus efficacement les vides entre les granulats, ce qui favorise une meilleure cohésion du mélange et une réduction de la demande en eau.

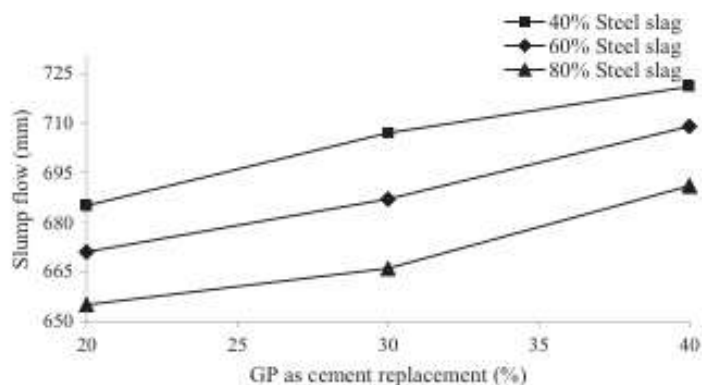


Figure I-23. Variations de l'étalement avec l'augmentation de la teneur en PV (Rehman et al., 2018)

I.5.4 Effet de la poudre de verre sur le temps de prise de béton

De manière générale, plusieurs échantillons contenant différentes quantités de poudre de verre (PV) présentaient des temps de prise initiale et finale plus élevés que les échantillons de contrôle. Selon les données, lorsque le pourcentage de PV augmente de 5 % à 20 %, les temps de prise initiale et finale augmentent de manière significative, avant que le taux d'augmentation ne diminue pour des substitutions de 25 % et 30 % de PV. Han et al. (2016) ont indiqué que l'utilisation de 10 % de PV borosilicaté comme alternative au ciment pouvait légèrement réduire les temps de prise initiale et finale (Han, Sun et al. 2016).

(Kamali and Ghahremaninezhad 2016) ont constaté que les fibres et les déchets de verre recyclé peuvent être utilisés pour réduire les temps de prise initiale et finale en remplaçant 20 % du ciment, à l'exception d'une légère augmentation de 11 % du temps de prise initiale lors de l'utilisation de fibres.

(Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016) ont rapporté une augmentation maximale de 26 % du temps de prise initiale avec une substitution de 25 % de PV au ciment, mais ont constaté que 5–10 % de PV pouvait accélérer l'hydratation, que 15 % n'avait aucun effet, et qu'au-delà de 25 %, la PV pouvait augmenter le temps de prise finale sans mentionner les raisons de ces comportements défavorables (Figure I.24).

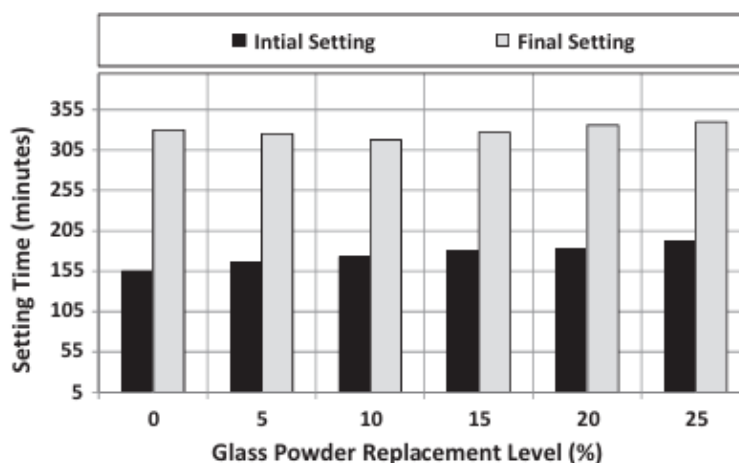


Figure I-24. Temps de prise des pâtes de ciment Portland modifiées avec de la poudre de verre en remplacement du ciment. (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)

(Lu, Duan et al. 2017) ont constaté que l'utilisation de poudre de verre (PV) pouvait augmenter les temps de prise initiale et finale, quelle que soit la taille des particules. Cependant, des particules plus petites, résultant d'un broyage prolongé, pouvaient encore augmenter davantage les temps de prise. L'augmentation la plus importante a été observée avec un remplacement de 20 % de PV après 30 minutes de broyage, entraînant un retard d'environ 17 % pour le temps de prise initiale et de 23 % pour le temps de prise finale.

L'effet du type de ciment a également été étudié, et il a été constaté que les ciments de types I et II, en combinaison avec 10–30 % de PV, pouvaient retarder les temps de prise initiale et finale (Elaqra and Rustom 2018). Le pourcentage plus élevé d' Al_2O_3 dans le ciment de type II était la raison principale d'un retard plus marqué dans l'hydratation du ciment

(Elaqra and Rustom 2018). Une seule étude a rapporté que des particules plus petites de PV entraînaient une augmentation plus significative des temps de prise (Lu, Duan et al. 2017). Hormis cet article, les autres études n'ont pas fourni de corrélation directe entre la taille des particules et les temps de prise.

(Patel, Tiwari et al. 2019) et Huseien et al. (2020) (Huseien, Hamzah et al. 2020) ont tous deux confirmé que la PV pouvait augmenter les temps de prise initiale et finale. Enfin, une étude récente a indiqué qu'une augmentation de la teneur en poudre de verre dans le liant prolongeait les temps de prise d'environ 18 % pour le temps initial et de 30 % pour le temps final (Mahajan and Bhagat 2022).

Lam et al., en utilisant du verre usagé comme substitut partiel au ciment, ont également observé une augmentation des temps de prise initiale et finale. Leurs résultats ont montré un prolongement du temps de prise de 5 % à 10 % pour la prise initiale et de 4 % à 8 % pour la prise finale, avec des retards plus importants à mesure que la quantité de verre usagé augmentait.

I.5.5 Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression de béton

(Islam, Rahman et al. 2017) ont rapporté que les échantillons contenant 10 % et 15 % de poudre de verre (PV) ne présentaient pas de différences significatives par rapport aux échantillons de contrôle à 28 jours.

À 90 jours, un comportement similaire a été observé, sauf pour les échantillons avec 15 % de PV. À 365 jours, tous les échantillons contenant jusqu'à 25 % de PV sans additifs, ainsi que ceux avec 10 % et 15 % de PV combinés à 1 % de superplastifiant (SP), avaient une résistance à la compression supérieure.

Les auteurs ont également souligné que l'impact du temps sur la résistance à la compression est lié aux propriétés pouzzolanique du verre, qui tendent à s'activer davantage avec le vieillissement du béton.

(Du and Tan 2017) ont observé qu'une incorporation allant jusqu'à 45 % de PV (laitier granulé de haut fourneau broyé) améliorait la résistance à la compression après 28 jours. Cependant, une teneur en PV de 60 % entraînait une diminution de la résistance. Néanmoins, à tous les points de mesure ultérieurs, y compris jusqu'à 365 jours, une résistance à la compression plus élevée a été constatée. Cela s'explique par la dissolution lente de la silice amorphe et sa réaction progressive avec le calcium, qui aboutissent à la formation retardée de silicate de calcium hydraté, un processus nécessitant plus de temps pour se développer pleinement.

(Elaqra, Abou Haloub et al. 2019) ont indiqué que l'utilisation conventionnelle de PV pouvait réduire la résistance à la compression à 28 jours, mais que l'incorporation de 10 % et 20 % de PV pouvait aboutir à une résistance supérieure à 90 jours. Ils ont également constaté que le trempage des particules de PV dans l'eau avant leur utilisation dans le béton pouvait améliorer la résistance à la compression.

Gupta et al. (Gupta, Jethoo et al. 2022) ont observé que des taux de 5–35 % de PV n'affectaient pas la résistance à 28 jours, mais l'augmentaient à 90 jours. Esmaeili et Al-

Mwanes (Esmacili and AL-Mwanes 2021), Li et al. (Li, Qiao et al. 2021), et Zhan et al. (Zhan, Zhang et al. 2022) ont également rapporté une amélioration de la résistance à la compression à des âges plus avancés par rapport à 28 jours.

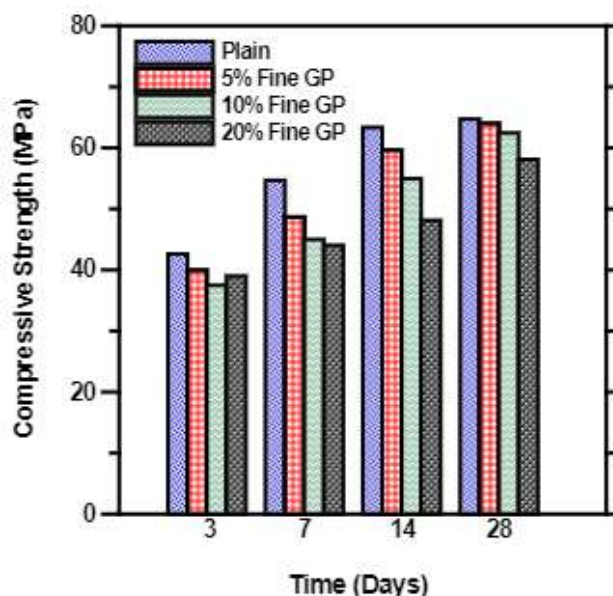
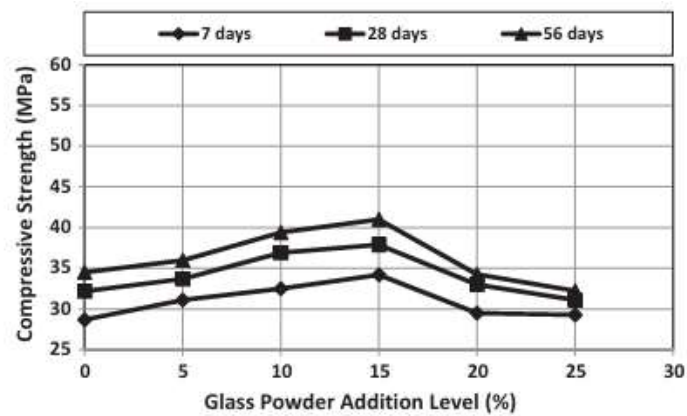


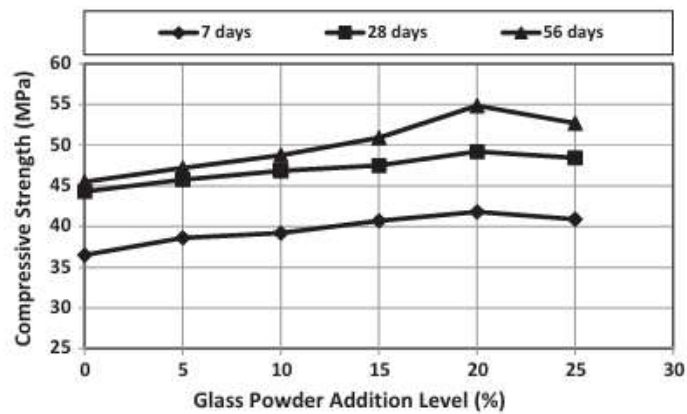
Figure I-25. Développement de la résistance à la compression des pâtes de ciment contenant de la poudre de verre fine (Neithalath et Schwarz, 2009)

(Ali, Dinkha et al. 2017) ont trouvé que 25% de PV avec une granulométrie importante (850 μm) pouvaient améliorer la résistance à la compression à 35 jours à des températures allant jusqu'à 800 °C. Jain et al. (2020) ont suggéré que l'utilisation d'une combinaison allant jusqu'à 20% de PV et 40% de poudre de granite pouvait augmenter la résistance à la compression, mais que des pourcentages plus élevés pourraient entraîner une diminution (Jain, Sancheti et al. 2020).

(Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016) ont rapporté que pour un béton de classe 33 MPa, l'ajout de poudre de verre jusqu'à 15 % entraîne une amélioration de la résistance à la compression. Cette amélioration optimale pourrait s'expliquer par les effets de remplissage pouzzolaniques et hydrauliques de la poudre de verre. À titre d'exemple, après 28 jours de cure à l'eau, on observe une augmentation de la résistance de 4,7 %, 14,6 % et 16,8 % respectivement pour des ajouts de 5 %, 10 % et 15 % de poudre de verre, comparé au béton de référence. Cependant, pour ce même béton de 33 MPa, une diminution de la résistance est constatée au-delà de 15 % d'ajout, probablement en raison de l'agglomération des particules de verre à des taux plus élevés. En revanche, pour un béton de classe 45 MPa, l'ajout de poudre de verre jusqu'à 25 % améliore la résistance à la compression. (Figure I.26)



(a) Concrete mix grade 33 MPa compressive strength



(b) Concrete mix grade 45 MPa compressive strength

Figure I-26. Effet du remplacement du ciment par de la PV sur la résistance à la compression du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)

Balasubramanian et al. (2021) ont observé que l'incorporation de plastique électronique recyclé (WEP) avec PV pouvait entraîner une réduction de 30% de la résistance à la compression en raison d'une hydratation incomplète et d'une structure poreuse (Balasubramanian, Krishna et al. 2021).

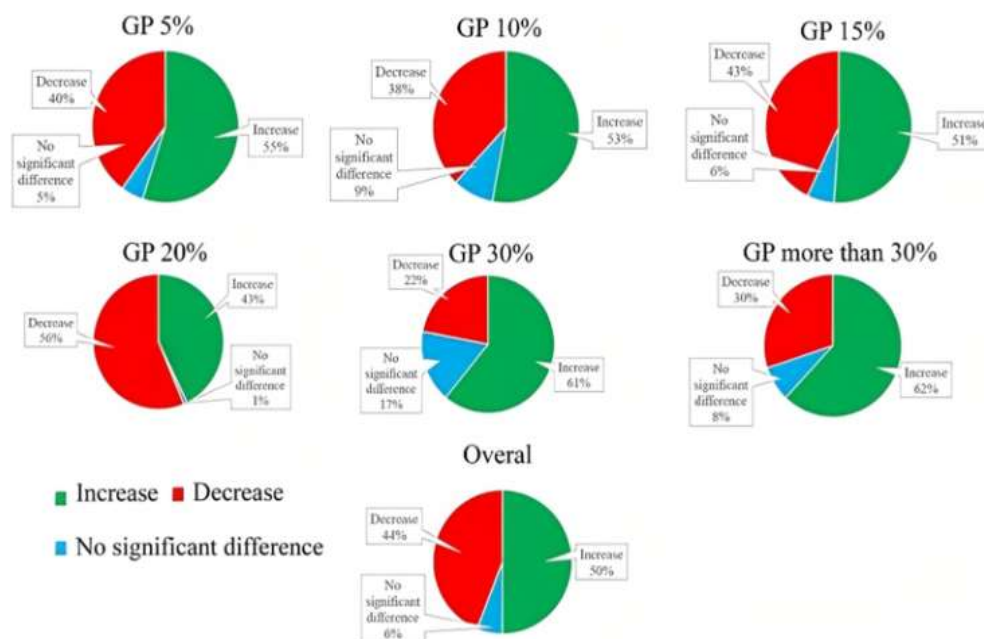


Figure I-27. Effet PV sur la résistance à la compression du béton (Hassani, Matos et al. 2023).

La Figure I.27 résume l'effet du pourcentage de poudre de verre (PV) sur la résistance à la compression du béton. Les échantillons contenant 5 %, 10 % et 15 % de PV ont montré un comportement similaire, environ 40 % signalant une diminution. Avec un remplacement à 20 %, davantage d'études ont rapporté des diminutions que des améliorations. Pour les échantillons contenant 30 % ou plus de PV, environ 60 % ont rapporté des améliorations. Avec un remplacement à 30 %, 17 % n'ont montré aucune différence significative par rapport aux échantillons de contrôle (Hassani, Matos et al. 2023).

Globalement, 50 % des échantillons ont présenté une résistance à la compression plus élevée avec un remplacement par PV, 44 % une résistance inférieure, et 6 % aucune modification. Des facteurs tels que la taille des particules de PV, l'âge de cure, les additifs et les types de ciment influencent de manière significative les propriétés du béton.

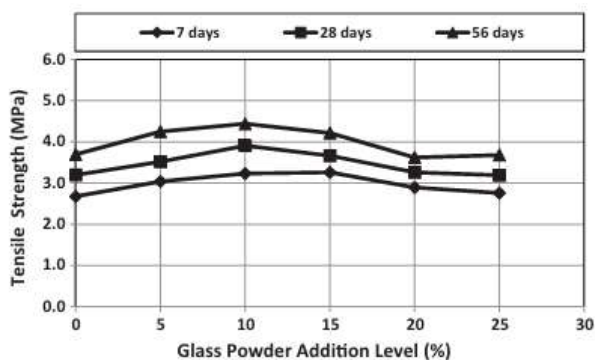
I.5.6 Effet de la poudre de verre sur la résistance à la traction de béton

He et al. (He, Zhan et al. 2019) ont rapporté les résistances à la traction du béton incorporant différentes teneurs en verre à 7, 28 et 90 jours. Leurs résultats révèlent que l'ajout de PV réduit initialement les résistances à la traction entre 7 et 28 jours, avec une diminution plus marquée pour les teneurs plus élevées en PV. Cependant, les échantillons de béton contenant du PV présentent un gain de résistance notable avec le temps de cure. À

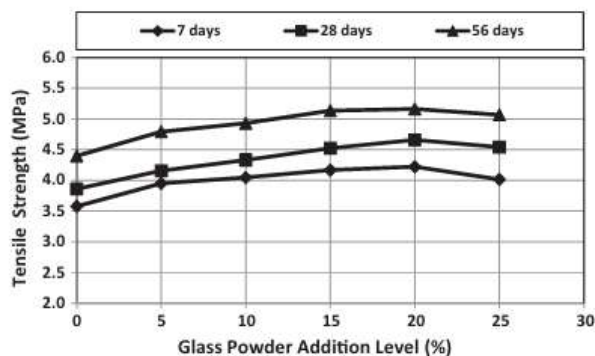
90 jours, les résistances à la traction des mélanges avec 10 % et 20 % de PV dépassent celles de l'échantillon témoin. Une substitution de 20 % de PV a été identifiée comme le niveau optimal.

Khan et al. (Khan, Shahzada et al. 2020) ont observé une tendance similaire, où la résistance à la traction diminuait initialement. Aux 56 jours, une augmentation de la résistance a été constatée, grâce à l'amorce de la réaction pouzzolanique du PV, permettant une meilleure intégration du PV dans la structure interne du béton. Les mélanges avec une teneur plus élevée en PV ont subi une perte de résistance plus importante aux premiers stades de cure par rapport à ceux avec moins de PV. Dans tous les mélanges, la baisse initiale de la résistance a été attribuée à la réduction de la quantité de liant remplacée par la PV.

(Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016) ont trouvé le même comportement observé précédemment pour la résistance à la compression également pour la résistance à la traction. L'amélioration marquée des résultats de résistance à la traction peut être attribuée à l'amélioration des propriétés de la zone de transition, qui joue un rôle déterminant dans la résistance à la traction du béton. (Figure I.28)



(a) Concrete mix grade 33 MPa compressive strength



(b) Concrete mix grade 45 MPa compressive strength

Figure I-28. Effet du remplacement du ciment par de la PV sur la résistance à la traction du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)

Plusieurs chercheurs ont examiné les effets du PV en tant que substitut partiel du ciment sur la résistance à la flexion du béton. Par exemple, Rehman et al. (Rehman, Iqbal et al. 2018) ont observé une amélioration de la résistance à la flexion pour un remplacement de 20 % et 30 % de PV, bien qu'une diminution ait été notée à 40 % par rapport à l'échantillon de référence. La résistance à la flexion maximale a été atteinte avec un remplacement de 20 % du ciment par du PV et un remplacement de 80 % des granulats fins par du laitier d'acier.

Elaqra et al. (Elaqra, Abou Haloub et al. 2019) ont étudié l'effet du PV sur le comportement en flexion du béton, révélant que la résistance à la flexion diminue à mesure que la teneur en PV augmente, comme illustré dans la Figure I.29. Le mélange contenant 10 % de PV a présenté la résistance à la flexion la plus élevée, tandis que le mélange avec 30 % a montré la plus faible. La résistance à la flexion est un indicateur de la porosité de la structure, suggérant que le mélange à 10 % possédait des pores plus fins que l'échantillon témoin.

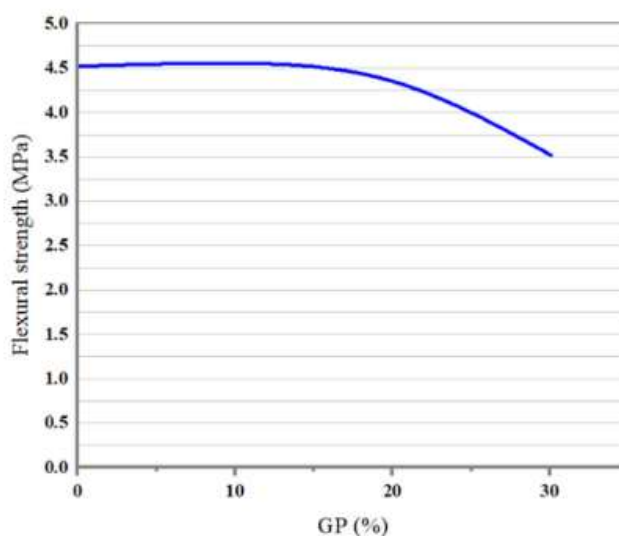


Figure I-29. Effet de PV sur la résistance à la flexion de béton (Elaqra, Abou Haloub et al. 2019)

Patel et al. (Patel, Shrivastava et al. 2021) ont exploré le rôle du PV dans le béton en utilisant deux tailles de particules légèrement différentes (75 et 63 μm). Leurs résultats ont montré une réduction de résistance par rapport au témoin était de 17,3 % pour un remplacement de 10 % et de 5,27 % pour 20 %.

De manière similaire, Bharathi et al. (Bharathi, Adari et al. 2022) ont rapporté la résistance en traction par fendage du béton autoplaçant incorporant du PV sur des périodes de cure de 7, 28 et 56 jours, comme illustré dans la Figure I.30. La résistance à la flexion a

progressivement augmenté avec des améliorations maximales de 24,8 %, 34,44 % et 35,02 % après 56, 28 et 7 jours respectivement, par rapport au mélange témoin.

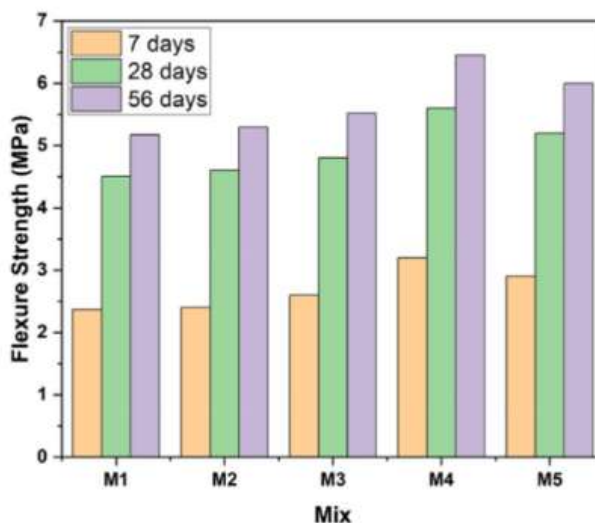


Figure I-30. Effet de PV sur la résistance à la flexion de béton (Bharathi, Adari et al. 2022)

I.5.7 Effet de la poudre de verre sur la chaleur d'hydratation

Les études précédentes sur le degré d'hydratation et la teneur en hydroxyde de calcium (CH) des pâtes modifiées par de la poudre de verre – comparées à celles modifiées par des cendres volantes – indiquent qu'un remplacement de 5 % à 10 % du ciment par de la poudre de verre fine est viable dans les systèmes cimentaires. Les résultats sur la chaleur d'hydratation montrent que ces taux de substitution entraînent une réduction de la chaleur dégagée par rapport aux pâtes classiques. Cet effet est particulièrement avantageux dans le béton de masse, car il permet de limiter les risques de fissuration thermique.

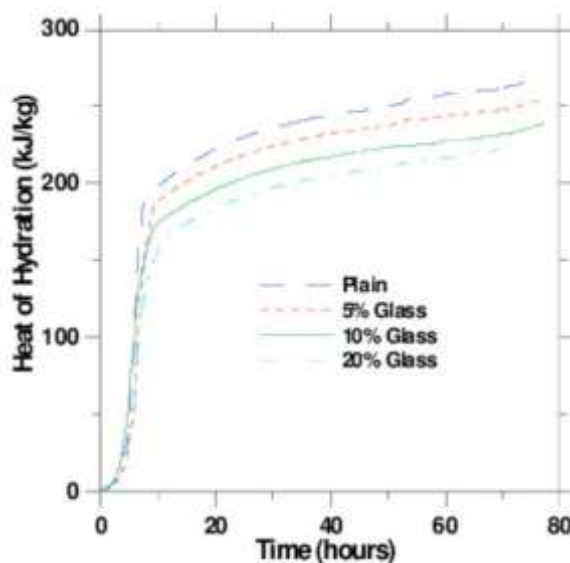


Figure I-31. Chaleur d'hydratation de pâtes de ciment avec la PV. (Neithalath et Schwarz, 2009)

(Neithalath et Schwarz, 2009) ont constaté pour les dégagements de chaleur d'hydratation des pâtes contenant 0%, 5%, 10% et 20% de ciment remplacé par la poudre de verre fine présentés dans la figure I.31 que plus le taux de remplacement par la poudre de verre augmente, plus la chaleur d'hydratation cumulée diminue par rapport à une pâte sans ajout.

I.5.8 Effet de la poudre de verre sur la durabilité de béton

I.5.8.1 Absorption d'eau

Les études ont largement examiné les caractéristiques d'absorption d'eau du béton contenant du verre en tant que substitut partiel du ciment. Le consensus indique que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en PV jusqu'à un certain niveau de substitution (Elaqra, Al-Afghany et al. 2019, Baikerikar, Mudalgi et al. 2023). De plus, cette réduction de l'absorption d'eau est plus marquée avec des temps de cure plus longs, comme illustré dans la Figure I.32 (Elaqra, Al-Afghany et al. 2019, Baikerikar, Mudalgi et al. 2023)

L'ajout de PV améliore la durabilité en réduisant l'absorption d'eau et la perméabilité (Jain, Sancheti et al. 2020). Cette amélioration est attribuée à la réaction pouzzolanique du PV, qui affine la microstructure du béton et diminue sa porosité (Jain, Sancheti et al. 2020).

Par ailleurs, Patel et al. (Patel, Shrivastava et al. 2021) ont constaté que l'absorption d'eau diminuait significativement lorsque du PV tamisé à 75 et 63 μm était utilisé. Les auteurs ont noté une réduction pouvant atteindre 56 % pour un remplacement de 20 % par PV. Plus le PV est fin, moins le béton absorbe d'eau.

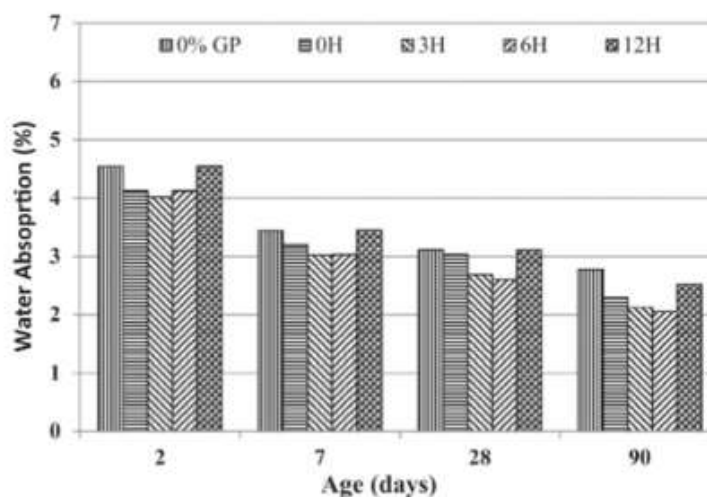


Figure I-32. Effet de PV sur l'absorption d'eau du béton (Elaqra and Rustom, 2018)

À l'inverse, Adesina et Das (Adesina and Das 2020) ont observé une augmentation de l'absorption d'eau avec des teneurs plus élevées en PV (25 % et 50 %) dans les composites cimentaires, comme illustré dans la Figure I.33. Les auteurs ont attribué ce comportement à une porosité accrue due à la réactivité lente du PV.

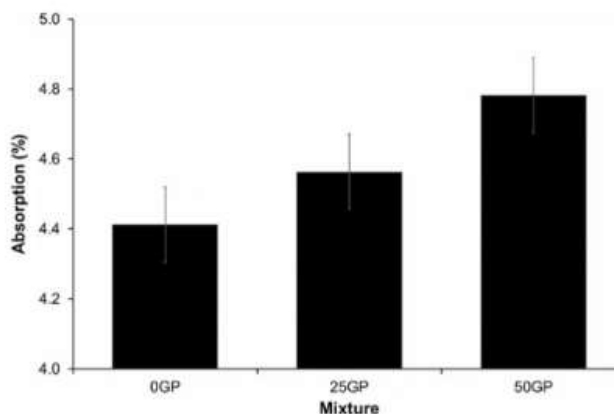


Figure I-33. Effet de PV sur l'absorption d'eau du béton (Adesina and Das, 2020)

Cependant, la Figure I.34 montre qu'une réduction de l'absorption d'eau est possible grâce à l'incorporation de PV. Il en ressort que le remplacement de 10 % à 20 % du ciment par du PV entraîne une diminution de l'absorption d'eau de 15 % à 25 % par rapport au béton témoin (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016). En revanche, des niveaux de substitution plus élevés (25 %) peuvent entraîner une augmentation de l'absorption d'eau. Cela s'explique par le fait que l'effet du PV ne compense pas entièrement la réduction de la teneur en ciment.

L'amélioration de l'absorption d'eau est principalement due à la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et le PV dans la pâte de ciment, formant un C-S-H supplémentaire. Ce produit améliore la densité de la matrice et réduit la porosité, diminuant ainsi l'absorption d'eau (Du and Tan 2017, Esmæili and AL-Mwanes 2021).

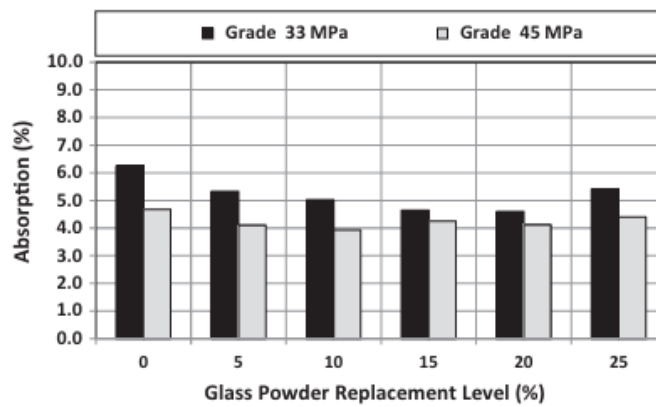


Figure I-34. Effet de PV sur l'absorption d'eau du béton (Aliabdo, Abd Elmoaty et al. 2016)

I.5.8.2 Perméabilité aux ions chlorures

Le degré de perméabilité des ions chlorure dans les matériaux à base de ciment est un indicateur fiable de leur durabilité globale. L'intégration du PV comme substitut partiel du ciment dans les mélanges de béton a montré des résultats prometteurs dans la réduction de cette perméabilité.

Les études indiquent que le remplacement du ciment jusqu'à 30 % par du PV entraîne une diminution notable de la pénétration des ions chlorure (Abdalla, Yahia et al. 2020). Cette amélioration est également observée dans le béton autoplaçant à haute résistance et les composites cimentaires renforcés (Amin, Zeyad et al. 2023). Comme l'illustre la Figure I.35 parmi tous les mélanges, le béton ordinaire à base de ciment Portland classique a présenté le coefficient de diffusion des chlorures le plus élevé. En revanche, les mélanges contenant du PV ont montré un coefficient de diffusion plus faible que le béton témoin, et celui-ci a continué à diminuer avec le temps (Tariq, Scott et al. 2020).

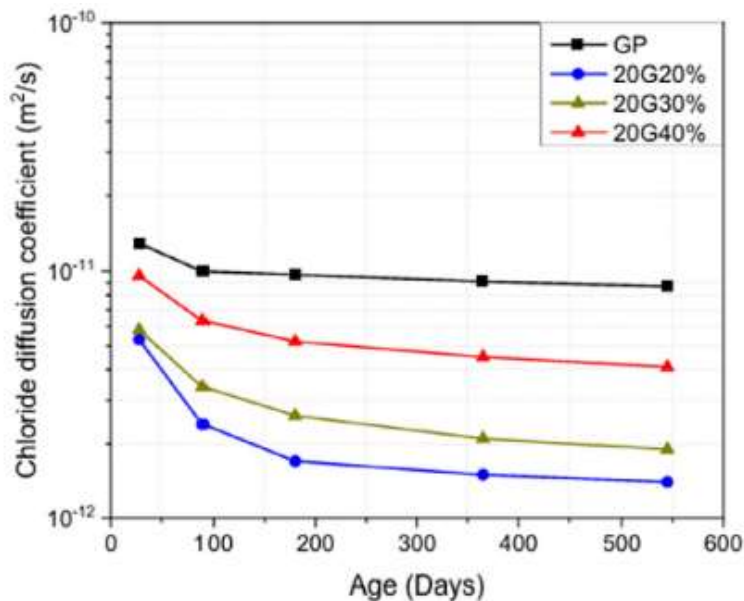


Figure I-35. Coefficient de diffusion des chlorures des BAP contenant du PV à différents taux de substitution (Tariq, Scott et al. 2020)

La réduction de la perméabilité aux chlorures grâce à l'incorporation du PV est attribuée à son effet de remplissage, à sa réaction pouzzolanique et aux améliorations microstructurales qu'il engendre (Tariq, Scott et al. 2020). En tant que micro-remplisseur, le PV densifie la matrice du béton et réduit les pores capillaires. Son activité pouzzolanique favorise la formation du gel C-S-H, ce qui entrave davantage la migration des ions chlorure. De plus, sa teneur élevée en silice fixe l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libre, réduisant ainsi les voies solubles pour les chlorures.

Cependant, certaines études ont montré que des niveaux de substitution plus élevés augmentent parfois la perméabilité en raison d'une réactivité pouzzolanique plus lente (Jani and Hogland 2014). Comme illustré dans la Figure I.36 l'augmentation de la teneur en PV à 30 %, 40 % et 50 % a conduit à une augmentation de la pénétration des chlorures. Ce schéma est cohérent quel que soit le type de PV utilisé. Une inclusion de 20 % de PV semble offrir un effet optimal sur la perméabilité aux chlorures du béton. Au-delà de 20 %, l'effet de dilution pourrait entraîner une microstructure moins dense en raison d'une production réduite de gel C-S-H.

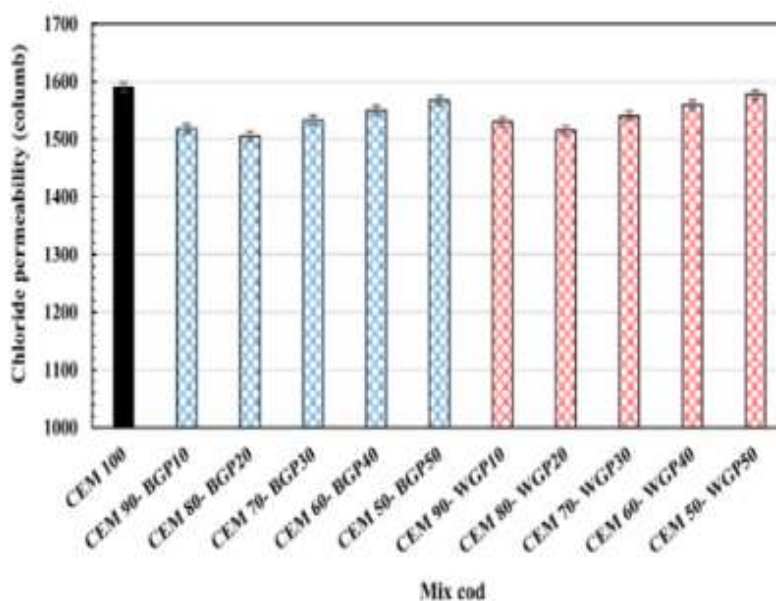


Figure I-36. Perméabilité aux chlorures du BAP à haute résistance contenant la PV après 28 jours (Amin, Zeyad et al. 2023)

I.5.8.3 Résistance à l'acide sulfurique

L'incorporation de verre dans le béton a montré des résultats prometteurs pour améliorer la durabilité face aux attaques acides. Les recherches mettent en évidence l'efficacité du PV en tant que substitut partiel du ciment pour renforcer la résistance du béton aux attaques de l'acide sulfurique.

Les études démontrent de manière cohérente qu'un remplacement de 5 % à 20 % par du PV peut améliorer significativement la durabilité du béton dans des environnements sulfatés (Siad, Lachemi et al. 2016, Bameri, Rashidi et al. 2022). Cette amélioration résulte du développement supplémentaire de gel C-S-H grâce à la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et la silice présente dans le PV (Asaad, Jasim et al. 2020). Ce gel formé limite efficacement la pénétration des ions sulfate (Figure I.37) en améliorant la cohésion de la matrice.

Dans les mortiers activés alcalinement, où le PV remplace 10 % à 20 % des cendres volantes, les recherches indiquent une réduction significative des dommages physiques, mécaniques et microstructuraux causés par l'exposition aux acides. Cette réduction est attribuée à la formation accrue de produits de réaction et à une microstructure plus dense, diminuant ainsi la porosité (Khan, Kuri et al. 2022). Cette densification limite l'infiltration des ions agressifs, tels que les ions sulfate et les ions hydrogène provenant de l'acide sulfurique. Cependant, les études mettent en garde contre une teneur en PV dépassant 20

%, qui pourrait augmenter les niveaux de calcium libre et la porosité, entraînant une détérioration du béton en milieu acide (Jani and Hogland 2014).

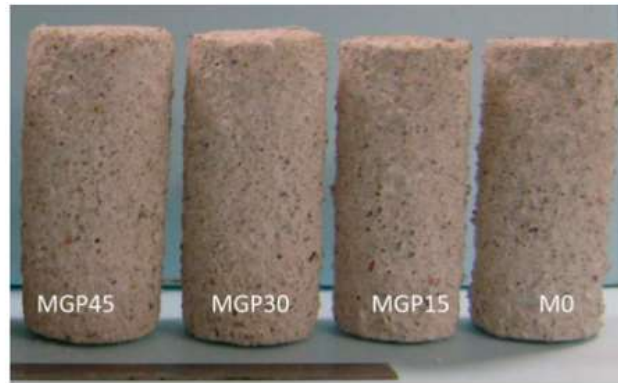


Figure I-37. Dégradation des éprouvettes de béton contenant de PV après une immersion de 12 semaines dans une solution d'acide sulfurique à 5 % (Siad, Lachemi et al. 2016)

L'alcalinité des pores du béton est modifiée par l'incorporation de PV, ce qui supprime la formation d'ettringite et d'autres produits d'attaque sulfatée, améliorant ainsi la résistance à l'exposition aux acides (Cao et al., 2023).

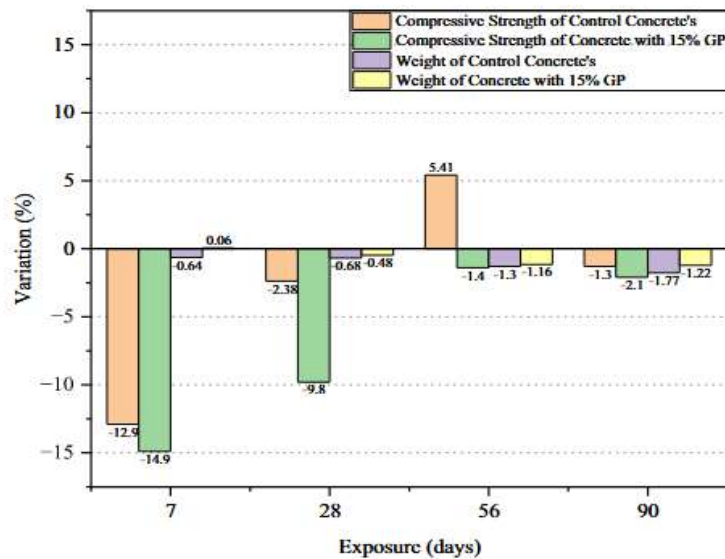


Figure I-38. Variations de la résistance en compression et du poids du béton contenant de PV après une exposition à l'acide sulfurique. (Bameri, Rashidi et al. 2022)

Les mélanges de béton contenant jusqu'à 15 % de PV en substitution du ciment présentent une perte de résistance en compression plus faible que les mélanges conventionnels lorsqu'ils sont exposés à l'acide sulfurique. Cependant, bien que l'incorporation de 15 % de PV puisse initialement entraîner une plus grande perte de

résistance en compression, elle conduit généralement à une réduction moindre du poids au fil du temps (Figure I.38)

I.5.8.4 Résistance aux sulfates

La résistance aux sulfates du béton incorporant du verre a montré des performances fiables. Les recherches indiquent que l'incorporation de PV dans le béton améliore considérablement la résistance aux sulfates. La PV s'est révélé plus efficace que des matériaux résiduels solides tels que la poudre de gangue de charbon et les cendres volantes (Tang, Li et al. 2020).

Par exemple, la Figure I.39 montre que le ciment mélangé contenant jusqu'à 60 % de PV présente une perte de résistance en compression réduite après une exposition aux sulfates (Shalan and El-Gohary 2022). De plus, les bétons contenant 20 % et 10 % de PV ont montré la plus faible concentration en ions sulfurés (Figure I.40). Cela suggère que l'incorporation de PV dans les mélanges de béton améliore la durabilité contre les attaques par sulfate et optimise l'intégrité mécanique du matériau.

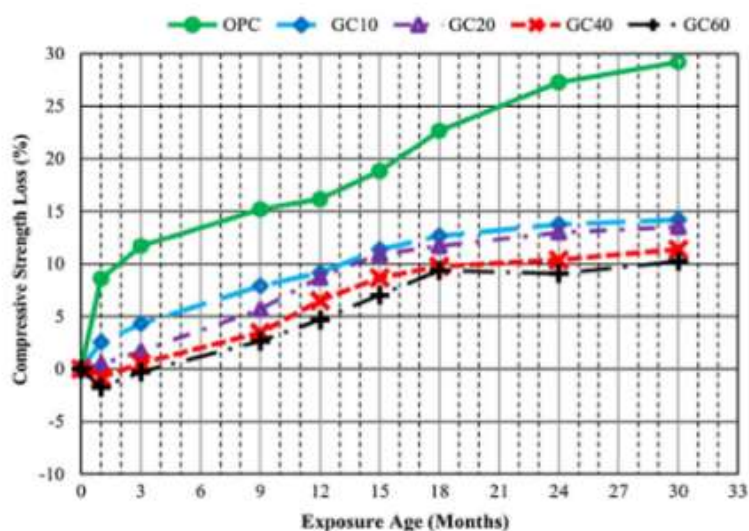


Figure I-39. Perte de résistance en compression en fonction de l'âge pour le béton contenant du PV exposé aux sulfates (Shalan and El-Gohary, 2022).

La concentration réduite d'ions sulfurés dans les mélanges avec une faible teneur en PV met en évidence le potentiel de l'utilisation du PV pour équilibrer efficacement les propriétés de résistance et de durabilité. En revanche, le béton contenant 40 % et 60 % de PV avait un contenu en ions sulfate respectivement 12 % et 27 % plus élevé que le béton témoin.

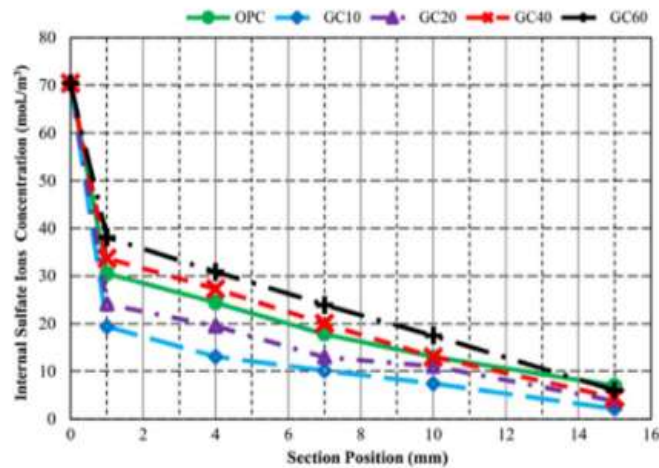


Figure I-40. Concentration interne en sulfate du béton contenant PV après 18 mois, en fonction de la position de la section d'extraction (Shalan and El-Gohary, 2022).

Un schéma similaire a été observé pour le coefficient de diffusion (Figure I.41), qui a indiqué un rapport de vide élevé dans le ciment mélangé contenant une grande quantité de PV. Ce rapport de vide élevé facilite probablement l'entrée des ions sulfate, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en ions sulfate.

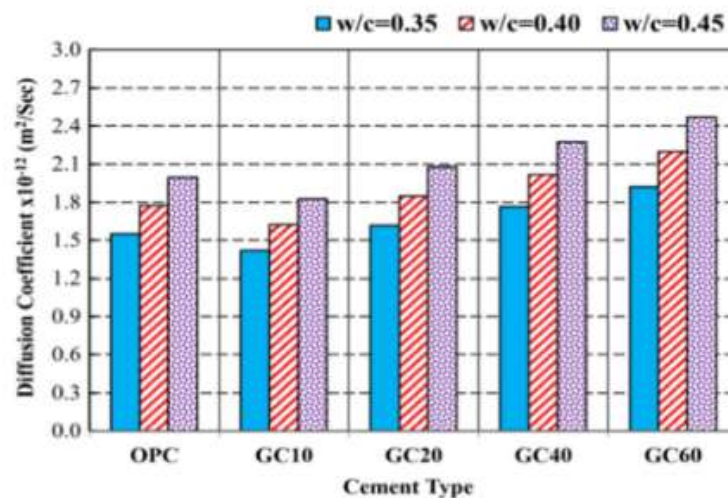


Figure I-41. Coefficient de diffusion du béton avec 10 %, 20 %, 40 % et 60 % de PV (Shalan and El-Gohary, 2022).

Cela suggère que, bien que le PV puisse être bénéfique pour des fins de recyclage, ses niveaux élevés d'incorporation compromettent la durabilité du béton contre les attaques par sulfate. Le mécanisme derrière la résistance améliorée aux sulfates du PV est attribué à l'alcalinité accrue de la solution de pores. Il a été rapporté que cette alcalinité améliorée aide à renforcer la résistance du béton aux attaques des ions sulfate.

I.5.8.5 Résistance au feu

La Figure I.42 montre que Le béton contenant PV bénéficie considérablement lorsqu'il est exposé à des températures élevées (Olofinnade, Ede et al. 2017, Li, Zhang et al. 2022, Lai, Lu et al. 2024). Les études montrent que l'incorporation de PV dans le béton améliore la stabilité et la rétention de la résistance à des températures allant jusqu'à 600°C (Al Saffar, Tawfik et al. 2022).



Figure I-42. Différents images de défaillance des éprouvettes de béton incorporant du PV en fonction de la température (Al Saffar, Tawfik et al. 2022)

Même à des températures plus élevées (800°C–900°C), le béton avec PV peut connaître une légère diminution de sa résistance par rapport au béton témoin (Figure I.43) (Olofinnade, Ede et al. 2017, Al Saffar, Tawfik et al. 2022, Li, Zhang et al. 2022, Lai, Lu et al. 2024). Cela est attribué à une densité de compaction humide améliorée et à la ré-solidification des particules de verre fondu au sein de la matrice du béton (Lai, Lu et al. 2024).

De plus, la présence de PV améliore la stabilité thermique du béton, minimisant l'étendue des microfissures et de la dégradation structurelle sous contrainte thermique. Ces caractéristiques font du béton avec PV un matériau prometteur pour des applications de résistance au feu et de durabilité thermique. Cependant, les niveaux optimaux de remplacement de PV varient, avec des bénéfices notés entre 15 % et 21 % (Olofinnade, Ede et al. 2017, Al Saffar, Tawfik et al. 2022, Li, Zhang et al. 2022, Lai, Lu et al. 2024).

Il est à noter qu'avec l'augmentation des températures, le béton avec PV subit des changements de couleur, une perte de masse et une augmentation de l'absorption d'eau (Li, Zhang et al. 2022). À des températures inférieures à 600°C, le béton avec PV performe mieux que le béton normal en termes de stabilité et de propriétés mécaniques résiduelles

(Al Saffar, Tawfik et al. 2022). Cette performance améliorée peut être attribuée aux réactions pouzzolaniques du PV, qui améliorent la microstructure et densifient la matrice du béton.

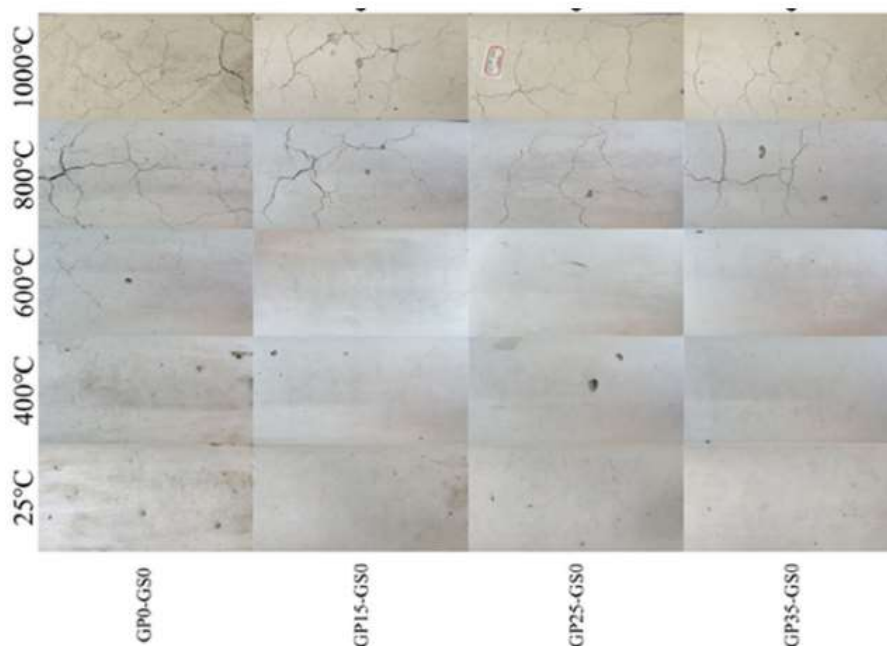


Figure I-43. Béton avec des échantillons contenant de 15 % à 35 % de PV présente des changements évidents après une exposition à des températures élevées (Lai, Lu et al. 2024).

De plus, le PV dans le béton géopolymère a montré des performances acceptables à des températures élevées, maintenant une résistance en compression résiduelle au-dessus de 50 % à 800°C (Turkey, Beddu et al. 2022). Dans l'ensemble, l'activité pouzzolanique du PV contribue à la création de gel C-S-H supplémentaire, améliorant les caractéristiques de liaison et la résistance thermique du béton. Cela se traduit par une résistance résiduelle plus élevée observée dans les échantillons de béton avec PV après une exposition à des températures élevées.

L'analyse microstructurale révèle des altérations dans la matrice du béton et l'interface à des températures élevées (Olofinnade, Ede et al. 2017). Ces changements microstructuraux sont cruciaux pour comprendre la durabilité à long terme du béton avec PV dans des conditions extrêmes. Cela met en évidence le potentiel du béton avec PV comme matériau supérieur pour des applications exposées à des températures élevées.

I.6 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUES

La revue bibliographique réalisée a permis de mettre en évidence les aspects fondamentaux de la formulation du béton autoplaçant (BAP), ses composantes essentielles et les avantages qu'il offre dans diverses applications. La conception d'un BAP repose sur l'optimisation de plusieurs paramètres, notamment le volume de la pâte cimentaire et le dosage adéquat en superplastifiant. Ces éléments sont cruciaux pour garantir une mise en place optimale, sans vibration ni effort mécanique externe, même dans des structures complexes et densément armées. Cette caractéristique unique du BAP assure un béton homogène, sans défauts tels que la ségrégation des granulats ou le ressuage. Toutefois, l'un des principaux défis liés à l'utilisation du BAP est son coût relativement élevé. Ce dernier résulte de la forte demande en ciment Portland et en adjuvants chimiques nécessaires pour maintenir une excellente maniabilité et fluidité.

Pour surmonter ces limitations économiques et environnementales, l'incorporation d'additions minérales est une approche prometteuse. Ces ajouts, qu'ils soient d'origine naturelle ou issus du recyclage de déchets industriels, apportent des bénéfices multiples. D'un point de vue technologique, ils améliorent certaines propriétés du béton, telles que la durabilité et la résistance mécanique. Sur le plan environnemental, leur utilisation permet de réduire la consommation de clinker, une composante du ciment dont la production est particulièrement énergivore et émettrice de gaz à effet de serre. Par ailleurs, les matériaux fins ou ultrafins, souvent obtenus par broyage de déchets industriels, contribuent à une meilleure réutilisation des ressources, favorisant ainsi une économie circulaire dans le domaine de la construction.

De nombreuses études ont montré que l'incorporation de poudre de verre dans les bétons et mortiers autoplaçant influence de manière significative leurs propriétés rhéologiques, mécaniques et durables. Sur le plan rhéologique, la finesse et la forme vitreuse des particules de verre contribuent à améliorer la fluidité et la stabilité du mélange, tout en réduisant le risque de ségrégation. En revanche, un dosage excessif peut accroître la viscosité et ralentir l'écoulement du matériau. Concernant les propriétés mécaniques, la réaction pouzzolanique entre la poudre de verre et la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment conduit à une microstructure plus dense, favorisant une amélioration progressive des résistances à moyen et long terme. Du point de vue thermique, la substitution partielle du ciment par la poudre de verre entraîne une réduction notable de la chaleur d'hydratation en raison de sa faible activité initiale, ce qui permet de limiter les risques de fissuration thermique dans les éléments massifs. Enfin, sur le plan de

la durabilité, l'ajout de poudre de verre permet de réduire la porosité capillaire et d'améliorer la résistance aux agents agressifs tels que les chlorures ou les sulfates, renforçant ainsi la pérennité du matériau.

Dans ce contexte, notre étude se concentre sur l'évaluation de la poudre de verre recyclée comme ajout cimentaire dans les formulations de mortiers autoplaçant (MAP). Nous explorons divers pourcentages de substitution du ciment par cette poudre afin d'analyser ses effets sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des MAP. Les résultats obtenus seront comparés à ceux d'études précédentes, afin d'évaluer les performances de ce matériau innovant et de proposer des solutions durables pour le développement de bétons à faible impact environnemental.

CHAPITRE II
MATERIAUX,
FORMULATIONS
ET METHODOLOGIE

II.1 INTRODUCTION

Le travail expérimental mené a été établi dans le but d'observer et d'évaluer l'effet de l'ajout de la poudre de verre d'une part, et d'une autre part l'effet de la nature du sable utilisé sur le comportement physique, rhéologique et mécanique du mortier autoplaçant.

Ce chapitre consacré à l'étude expérimentale et dans une première partie, nous présenterons l'ensemble des matériaux utilisés, en justifiant leurs caractéristiques et propriétés spécifiques.

La seconde partie est dédiée à la description de la formulation adoptée pour la fabrication du mortier autoplaçant, ainsi qu'à son processus de confection. Cette étape est essentielle, car la formulation doit être définie avec précision, en prenant en compte les dosages optimaux des constituants principaux : sable, ciment, eau et superplastifiant.

Enfin, la dernière partie du chapitre présente les différents essais expérimentaux réalisés au laboratoire de Géomatériaux de l'université de Chlef (LaG), couvrant à la fois les propriétés du mortier à l'état frais et celles à l'état durci. Ces essais visent à évaluer les performances et comprendre le comportement des MAP afin de vérifier les hypothèses initiales et à apporter des éléments de réponse aux problématiques de recherche formulées initialement.

II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de cette recherche est un ciment Portland composé (CEM II/A 42.5) qui est conforme à la norme algérienne NA 442, (2006), produit par la cimenterie d'Oued Sly située à Chlef, contient un ajout de 10 % de calcaire, avec une résistance caractéristique à la compression à 28 jours supérieure à 42,5 MPa. Les compositions minéralogiques et chimiques, ainsi que les propriétés physiques du ciment sont présentées dans le tableau II.1.

II.2.2 La poudre de verre

Les déchets de verre, principalement issus des vitres cassées et des bouteilles en verre blanc collectées dans des décharges publiques, ont été soumis à un processus de transformation en plusieurs étapes, visant à leur valorisation en tant que matériau

cimentaire alternatif. Tout d'abord, ces déchets ont été fragmentés manuellement en morceaux de petite taille. Ensuite, ils ont été introduits dans un broyeur à disque afin de les réduire en grains. Ces grains de verre ont subi un broyage avancé dans un Micro Duval permettant d'obtenir une poudre d'une finesse spécifique supérieur à celle du ciment (figure II.1). Cette poudre de verre finement broyée a été utilisée comme substitut partiel du ciment dans la formulation des mortiers autoplaçant conformément aux objectifs de cette recherche.



Déchets de verre



Broyage à Micro Duval



Poudre de verre

Figure II-1. Procédure de broyage des déchets de verre.

La composition chimique, ainsi que les propriétés physiques de la poudre de verre sont également présentées dans le tableau II.1.

Tableau II-1. Compositions chimiques et minéralogiques, et propriétés physiques de ciment et de la PV

	Ciment CEM II/A 42.5	Poudre de verre
Composition chimique (%)		
SiO ₂	22.6	72.8
Al ₂ O ₃	4.2	1.28
FeO ₃	3.55	0.09
CaO	62.17	8.15
SO ₃	2.19	0.22
MgO	0.63	4.1
K ₂ O	0.42	0.48
Na ₂ O		12.4
TiO ₂		0.47
PAF	1.84	
Composition minéralogique (%)		
C ₃ S	41.8	
C ₂ S	33.3	
C ₃ A	5.1	
C ₄ AF	10.7	
Propriétés physiques		
Finesse de Blaine (cm ² /g)	3250	4100
Densité spécifique	3.1	2.61

II.2.3 Sable

Deux types de sable ont été utilisés dans le cadre de ce travail :

- **Sable naturel (SN)** : Il s'agit d'un sable 0/4 extrait du site d'Oued Rass, situé dans la région de Chlef. Sa composition minéralogique est principalement siliceuse, notamment dans les fractions les plus fines. Ce sable, caractérisé par des grains généralement isométriques et arrondis, présente une grande pureté. Après avoir été séché et criblé, il répond aux exigences de qualité et de régularité nécessaires pour les applications étudiées.
- **Sable concassé (SC)** : Issu des carrières de production de granulats, ce sable constitue une alternative prometteuse pour la valorisation des résidus de concassage des roches. Il offre une solution aux problèmes liés à l'exploitation intensive des sables naturels, tout en répondant aux défis environnementaux, notamment la réduction des dépôts incontrôlés de poussières de carrières. Par ailleurs, en raison de sa composition et de sa granulométrie, le sable concassé présente des propriétés favorables à l'amélioration des performances des mortiers et des bétons, ce qui en fait un matériau intéressant dans le cadre d'une construction durable.



Sable Concassé



Sable Naturel

Figure II-2. Types de sables utilisés

La courbe de l'analyse granulométrique -tracé conformément à la norme algérienne NA 2607, (1992)- et les propriétés physiques des sables utilisés sont présentées dans la figure II.3 et le tableau II.2 respectivement.

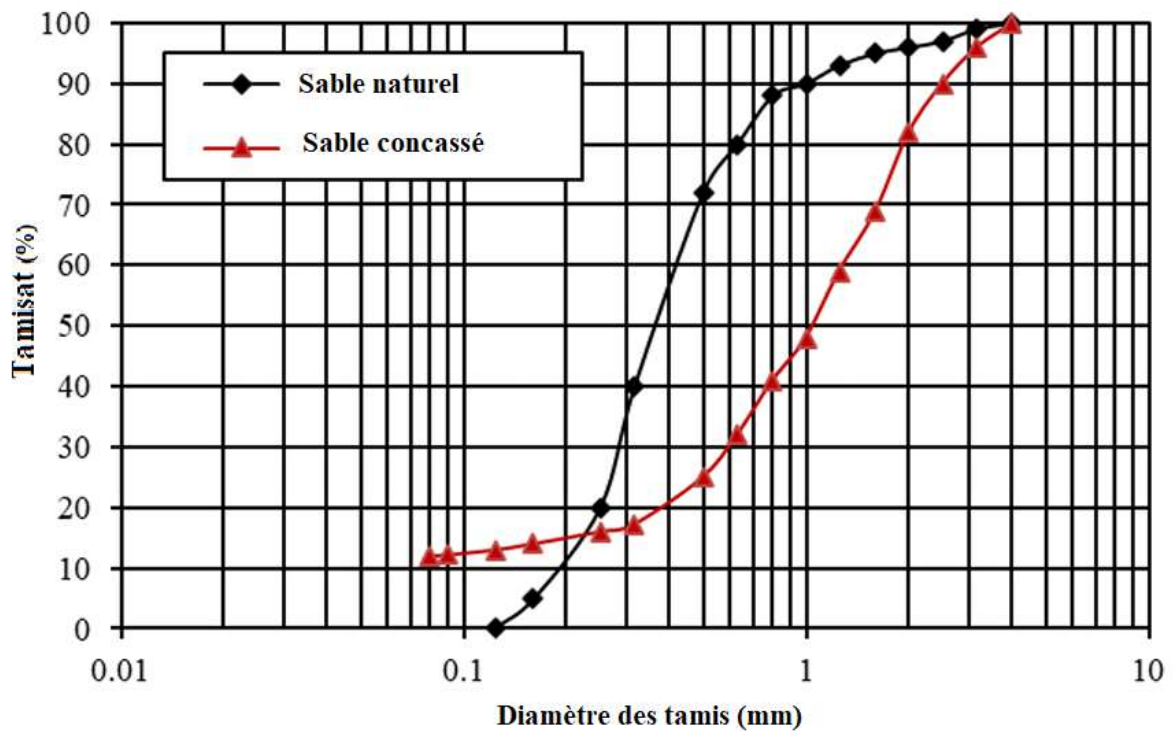


Figure II-3. Courbes granulométriques des sables utilisés.

Tableau II-2. Propriétés physiques des sables utilisés

Propriétés	Sable Naturel	Sable Concassé	Norme utilisée
Module de finesse	1.86	2.95	NA 2607 (1992)
Équivalent de sable (%)	86	76	NA 455 (2006)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,65	2,67	NA 255 (2006)
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,395	1,477	Idem
Compacité	53	55	Idem
Taux d'absorption d'eau (%)	1.8	2.1	Idem

II.2.4 Superplastifiant

Pour cette étude, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau désigné sous le nom commercial MEDAFLOW 30, Il est formulé à partir de polycarboxylates d'éther (PC) des polymères connus pour leurs performances exceptionnelles dans l'amélioration des propriétés rhéologiques du béton frais tout en ne générant aucun effet retardateur, Selon les spécifications techniques, la plage d'utilisation optimale de cet adjuvant est comprise entre 0,5 % à 2 % du poids de ciment. Les principales caractéristiques techniques de ce superplastifiant sont résumées dans le tableau II.3.

Tableau II-3. Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant (MEDAFLOW 30)

Caractéristiques	Valeurs
Teneur en extrait sec	30%
Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6 – 6.5
Densité	1.07 g/cm ³
Teneur en chlore	< 1 g/l

II.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des mortiers est une eau potable conforme aux exigences de la norme NF EN 1008 (Juill. 2003). Cette norme impose que l'eau de gâchage réponde à des critères chimiques et physiques rigoureux, particulièrement en cas de doute concernant sa qualité.

Afin d'éliminer tout risque pouvant affecter les propriétés des mortiers étudiés, nous avons opté pour l'eau potable de distribution la ville de Chlef. La composition chimique détaillée de cette eau est présentée au tableau II.4.

Cette eau est exempte d'impuretés et répond aux prescriptions de la norme précitée, garantissant ainsi son aptitude à la consommation humaine et son adéquation pour l'élaboration des mortiers utilisés dans cette recherche.

Tableau II-4. Composition minéralogique de l'eau de gâchage

Composantes	Concentration (mg/l)
Ca	53
Mg	6.6
Na	5.8
K	0.5
Cl	11
SO ₄	9
HCO ₃	168
NO ₃	2
Résidus secs à 180 °C	160
Ph	7.3

II.3 PROTOCOL EXPERIMENTALE

Ce protocole a pour objectif d'établir une démarche structurée et méthodique, tout en garantissant la rigueur scientifique nécessaire. Il vise également à définir et organiser les différentes étapes clés de la présente étude expérimentale, qui se décomposent comme suit

:

II.3.1 Étude de la pouzzolanité de la poudre de verre (PV)

Une activation chimique sera réalisée en utilisant de la chaux hydraulique pour étudier la pouzzolanité (réactivité) de la poudre de verre. Cette démarche permettra d'évaluer la réactivité (l'activité pouzzolanique) de la poudre de verre et d'analyser son potentiel en tant qu'ajout cimentaire dans des applications en béton.

II.3.2 Développement des formulations de mortier autoplaçant (MAP)

Deux séries de formulations de MAP seront élaborées pour étudier l'effet de la PV sur leurs propriétés physiques, rhéologiques et mécaniques, avec des pourcentages prédéfinis de sable dans les formulations :

- **Série 1** : Utilisation de sable naturel (SN) comme granulat.
- **Série 2** : Utilisation de sable concassé (SC) comme granulat.

Pour chaque formulation, les conditions suivantes seront appliquées :

- Détermination de la quantité de chaque type de sable dans la formulation des MAP pour chaque série de mélange ;
- Rapports eau/ciment (E/C) fixés à **0.4, 0.5 et 0.6** ;
- Ajustement des dosages en superplastifiant afin de maintenir une fluidité équivalente entre les mélanges. Ces dosages doivent être soigneusement déterminés en fonction des besoins spécifiques de chaque formulation ;
- Substitution partielle du ciment par la PV à des taux de **10 %, 20 % et 30 %**.

Cette approche méthodologique vise à étudier :

- L'impact de la nature du sable (SN et SC) utilisé et leur interaction avec la poudre de verre incorporée en remplacement partiel du ciment avec un dosage en superplastifiant adéquat ;
- L'influence des taux de substitution de ciment par la PV sur le comportement physique et rhéologique des MAP.

II.3.3 Caractérisation à l'état frais

- Ajustement de la formulation des MAP à l'aide de l'essai d'étalement au mini cône ;

- Etudier l'effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité des MAP ;
- Etudier le comportement rhéologique des MAP confectionnés par la poudre de verre.

II.3.4 Évaluation de la chaleur d'hydratation

L'évolution de la chaleur d'hydratation sera mesurée au cours du temps. Cette étape vise à analyser les interactions chimiques et thermiques liées à l'incorporation de la PV et à son impact sur la cinétique de réaction des mortiers autoplaçant selon NF EN 196-9 (2010).

Ce protocole permettra d'obtenir une compréhension des interactions physico-chimiques et mécaniques des MAP incorporant de la PV, en fonction de la nature des sables et des conditions de formulation.

II.3.5 Caractérisation à l'état durci

Une série d'essais sera menée pour évaluer l'effet de l'incorporation de la PV et de la nature du sable sur les propriétés mécaniques des MAP à l'état durci. Les essais porteront sur (EN 196-1 (2016)) :

- La résistance à la compression et à la traction des mortiers à **1j, 3j, 7j, 28j et 90j** ;
- Les corrélations entre les résistances mécaniques et l'ouvrabilité des mortiers.

II.3.6 Analyse de l'indice d'activité pouzzolanique

Une étude approfondie de l'évolution de l'indice d'activité pouzzolanique de la PV sera réalisée. Cette analyse permettra de mieux comprendre les mécanismes chimiques activés par la substitution partielle du ciment par la PV.

II.4 FORMULATION

La formulation d'un mortier autoplaçant (MAP) consiste à déterminer les quantités optimales des différents matériaux constituant le mélange, afin d'obtenir des propriétés répondant aux exigences spécifiques pour un MAP. Ce type de mortier est qualifié d'autoplaçant non en raison de sa composition, mais grâce à ses propriétés intrinsèques à l'état frais, notamment sa capacité de remplissage, sa capacité de passage et sa résistance à la ségrégation.

Pour qu'un mortier soit considéré autoplaçant, il doit présenter une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En termes de

rhéologique, cela implique un abaissement du seuil de cisaillement tout en maintenant une viscosité plastique adéquate. Ces propriétés permettent au mortier de s'écouler sous l'effet de la gravité tout en évitant la ségrégation des particules lors de l'écoulement.

La formulation d'un MAP nécessite une analyse approfondie, incluant le choix des matériaux et l'optimisation des paramètres clés tels que les rapports Eau/Liant (E/L) et Sable/Mortier (S/M), ainsi que le dosage en superplastifiant. Ce dernier joue un rôle crucial en améliorant la fluidité du mélange sans augmenter le rapport E/L, grâce à la réduction du seuil de cisaillement, avec un effet contrôlé sur la viscosité plastique.

La méthode de formulation utilisée s'appuie sur l'approche générale développée par Okamura, adaptée aux matériaux locaux, en particulier le sable. Les ajustements réalisés sur les rapports E/C, Sp/C et S/M ont permis d'optimiser les propriétés rhéologiques. Ces ajustements ont été validés à l'aide de l'essai d'étalement au mini-cône, avec un diamètre cible de la galette compris entre 270 mm et 330 mm (Domone et Jin, 1999), conformément aux spécifications.

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'influence de la poudre de verre et du type de sable sur les performances du mortier autoplaçant (MAP). L'optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M) vise à obtenir les meilleures propriétés du mortier à l'état frais et durci. Pour chaque type de sable, le rapport S/M a été ajusté et fixé de manière à élaborer une composition optimale, tandis que le rapport Eau/Ciment (E/C) a été varié : 0,40, 0,50, 0,60 et le dosage en superplastifiant (Sp/C) optimiser en fonction du rapport E/C pour garantir les performances souhaitées à l'état frais.

De nombreux essais préliminaires ont été réalisés, avec une variation du rapport SP/L, contrôlée et ajustée par l'essai d'étalement, permettant de déterminer un dosage spécifique en superplastifiant pour chaque formulation du MAP.

II.5 PROCEDURE DE MALAXAGE

Pour garantir une couverture uniforme de la surface des agrégats par la pâte de ciment et obtenir un mélange homogène des différents constituants, plusieurs auteurs décrivent des protocoles spécifiques de malaxage à l'aide d'un malaxeur à mortier d'une capacité de 5 litres. La méthodologie de malaxage est structurée en quatre étapes (Ouldkaoua, Y,2020):

- Malaxage à sec : Mélanger le ciment et le sable pendant environ 1 minute pour homogénéiser le mélange.
- Ajouter pendant 1 minute la première fraction d'eau : Introduire 2/3 de l'eau totale (Eau1).
- Ajouter pendant 1 minute le reste de l'eau et du superplastifiant : Incorporer le 1/3 restant de l'eau (Eau2) préalablement mélangés au superplastifiant,
- Malaxage final (rapide) : Continuer le malaxage avec une deuxième vitesse durant 1 minute afin d'assurer une parfaite homogénéité du mélange.



Figure II-4. Malaxeur à mortier.

II.6 ESSAIS ET METHODES

II.6.1 Activation de la poudre de verre

La première étape de cette étude consiste à analyser l'effet de l'activation de la poudre de verre par la chaux hydraulique afin d'évaluer sa pouzzolanité et la possibilité d'avoir utilisée comme matériau cimentaire dans le mortier. Pour évaluer son activité pouzzolanique, des mortiers normaux ont été préparés en utilisant uniquement la poudre de verre et la chaux comme liants, associés à un sable normalisé (Figure II.5). La poudre de verre a été partiellement remplacée par la chaux à des taux variant de 0 % à 100 %, avec un incrément de 10 %, en ajoutant des proportions appropriées de superplastifiant pour maintenir la même consistance aux mortiers correspondant à un étalement de 200 mm sur la table de secousses (NF-NE 1015-3, 2007).

Les mortiers préparés ont été coulés dans des moules permettant de former des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³, conservées à température ambiante sans cure d'humidification. Après décoffrage, ces éprouvettes ont été soumises à des essais d'écrasement par compression aux âges de 7, 28, et 90 jours. Ces mesures ont permis d'évaluer les résistances à la compression et de discuter l'activité pouzzolanique de la poudre de verre.



Mortier (PV+Chaux)



Eprouvettes pour écrasement

Figure II-5. Procédure d'activation de la PV.

II.6.2 Essais sur MAP À l'état frais

Pour établir les dosages optimaux en eau, en sable et en superplastifiant, des essais seront réalisés sur le mortier. Ces essais incluront une évaluation de l'ouvrabilité et des propriétés rhéologiques du mortier à l'état frais. Par la suite, des essais à l'état durci permettront de déterminer ses performances mécaniques. Les propriétés physiques du mortier seront caractérisées par l'essai d'étalement au mini-cône ainsi que par des mesures effectuées au rhéomètre.

Les mortiers autoplaçant (MAP) partagent des propriétés rhéologiques similaires à celles des bétons autoplaçant (BAP). Cependant, en raison du faible volume de gros granulats dans les BAP par rapport aux bétons ordinaires, le volume de pâte est plus élevé. Cela justifie la nécessité de mener des essais spécifiques sur ces mortiers pour garantir leur conformité.

II.6.2.1 Essai d'étalement au Mini-Cône

Cet essai consiste à remplir un moule tronconique (70x100x60 mm³) avec du mortier autoplaçant, disposé au centre d'une plaque métallique lisse, horizontale et légèrement humidifiée. Une fois le moule retiré verticalement, le mortier s'étale sous l'effet de son propre poids, formant une galette plus ou moins circulaire dont l'élargissement dépend de sa fluidité. Le diamètre d'étalement est mesuré dans deux directions perpendiculaires, puis

la moyenne des deux valeurs est retenue. Un mortier autoplaçant de qualité doit présenter un diamètre d'étalement compris entre 270 mm et 330 mm (Domone et Jin, 1999), sans signe de ségrégation ni de ressuage, ces derniers étant évalués visuellement. La Figure II.6 illustre le dispositif utilisé pour cet essai.



Figure II-6. Développement de l'essai d'étalement pour mortier.

II.6.2.2 Essai au rhéomètre

Pour évaluer expérimentalement le comportement rhéologique des mortiers, un rhéomètre rotatif a été utilisé. Après avoir mesuré l'étalement, le mortier préparé est versé dans un récipient spécialement conçu pour rester immobile lors de l'essai. Le croisillon du rhéomètre est ensuite abaissé jusqu'au centre du récipient, en veillant à ce que l'extrémité supérieure de ses ailes soit à hauteur de la surface du mortier.

L'essai au rhéomètre est réalisé en suivant un profil de vitesse adapté, grâce à un logiciel dédié qui contrôle la rotation du croisillon. Cet appareil permet de déterminer deux paramètres essentiels caractérisant le comportement rhéologique d'un mortier autoplaçant (MAP) : le seuil de cisaillement (SC), qui représente la contrainte nécessaire pour initier le mouvement, et la viscosité plastique (VP), qui quantifie la résistance à l'écoulement.

Le rhéomètre à mortier, équipé d'une palette avec des géométries mesurant 15 cm de longueur et 10 cm de largeur. Cette dernière permet de soumettre le mortier à un cisaillement contrôlé, tandis qu'un système d'acquisition enregistre le couple de frottement total correspondant à chaque vitesse de rotation imposée à la palette. (Figure III.7). La limite d'élasticité et la viscosité plastique sont ensuite déduites des courbes représentant la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement, en appliquant une analyse de régression basée sur le modèle rhéologique de Bingham.



Agitateur



Rhéomètre à mortier



Croisillon et récipient

Figure II-7. Dispositif du rhéomètre utilisé (Adjoudj et al., 2014)

II.6.2.3 Evaluation de la chaleur d'hydratation

L'essai sur l'évolution de la chaleur d'hydratation constitue un outil crucial pour caractériser le comportement thermodynamique des matériaux cimentaires lors de leur hydratation. Cet essai permet de quantifier la chaleur libérée au cours des réactions chimiques entre le ciment et l'eau (la réaction d'hydratation du ciment) par mesure de la température du mortier, ce qui est déterminant pour évaluer la cinétique d'hydratation, les pics d'activité thermique, et les implications sur la durabilité et la performance des ouvrages

Un calorimètre semi-adiabatique (Figure II.8) a été choisi pour mesurer la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier conformément à la norme NF EN 196-9, (2004). Selon cette dernière, la chaleur d'hydratation (**Q**), exprimée en joules par gramme de ciment, est la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre (**A**) et de la chaleur dissipée (déperditions) vers le milieu ambiant (**B**).

$$Q \text{ (J/g)} = A + B \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$A : \text{ est la chaleur accumulée dans le calorimètre, } A = \frac{c}{m_c} \theta_t \quad (\text{II.2})$$

$$B : \text{ est la déperdition thermique, } B = \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n \alpha_i \theta_i \Delta t_i \quad (\text{II.3})$$



Figure II-8. Calorimètre semi-adiabatique

II.6.3 Essais sur MAP à l'état durci

Les essais relatifs au MAP à l'état durci se concentrent sur l'évaluation des propriétés mécaniques, notamment les résistances à la traction par flexion et à la compression, mesurées aux âges de 1, 3, 7, 28 et 90 jours. Par ailleurs, un essai est réalisé pour analyser l'évolution de la chaleur dégagée lors du processus d'hydratation.



Figure II-9. Remplissage des moules et conservation des éprouvettes

II.6.3.1 Résistance à la compression

L'objectif de cet essai est de déterminer la résistance à la compression, laquelle correspond à la contrainte moyenne obtenue lors de l'écrasement par compression axiale effectués sur des tronçons des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ qui ont été préalablement écrasées par flexion à chaque âge d'essai : 1, 3, 7, 28 et 90 jours à l'aide d'une presse de capacité maximale de 2000 kN conforme à la norme NF EN 12390-16 (2019) (Figure II.10).

Pour chaque essai, l'éprouvette est soigneusement placée et centrée entre les plateaux de la presse, puis soumise à un chargement progressif jusqu'à atteindre la vitesse de chargement préalablement fixée qui tend à la rupture. Les essais sont réalisés conformément aux exigences de la norme NF EN 1015-11 (2019).



Figure II-10. Essai de compression

II.6.3.2 Résistance à la traction par flexion

Cet essai, conforme à la norme NF EN 12390-16 (2019) permet de déterminer la résistance à la flexion des MAP étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé, il consiste à tester en flexion des éprouvettes prismatique normalisées de côté a et de longueur $L= 4a$ ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) à différents âges de cure : 1, 3, 7, 28 et 90 jours. Les essais sont réalisés à l'aide d'une presse, conforme à la norme NF EN 1015-11 (2019), équipée d'un dispositif de flexion à trois points illustré dans la Figure II.11.

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule appropriée et corrigée à l'aide d'un coefficient de 0,6 pour tenir compte de l'effet de plastification du béton. Les valeurs corrigées permettent ainsi de déduire les résistances à la traction :

$$\sigma_t = \frac{1.8 P L}{2a^3} \quad (\text{II.4})$$

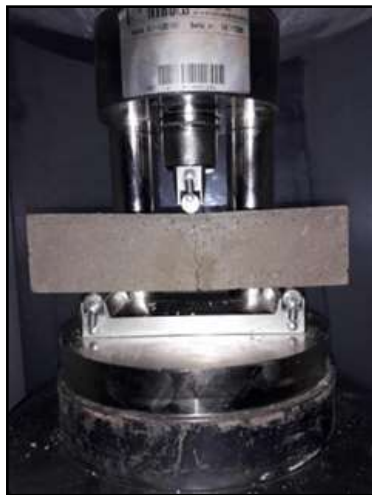


Figure II-11. Essai de traction par flexion.

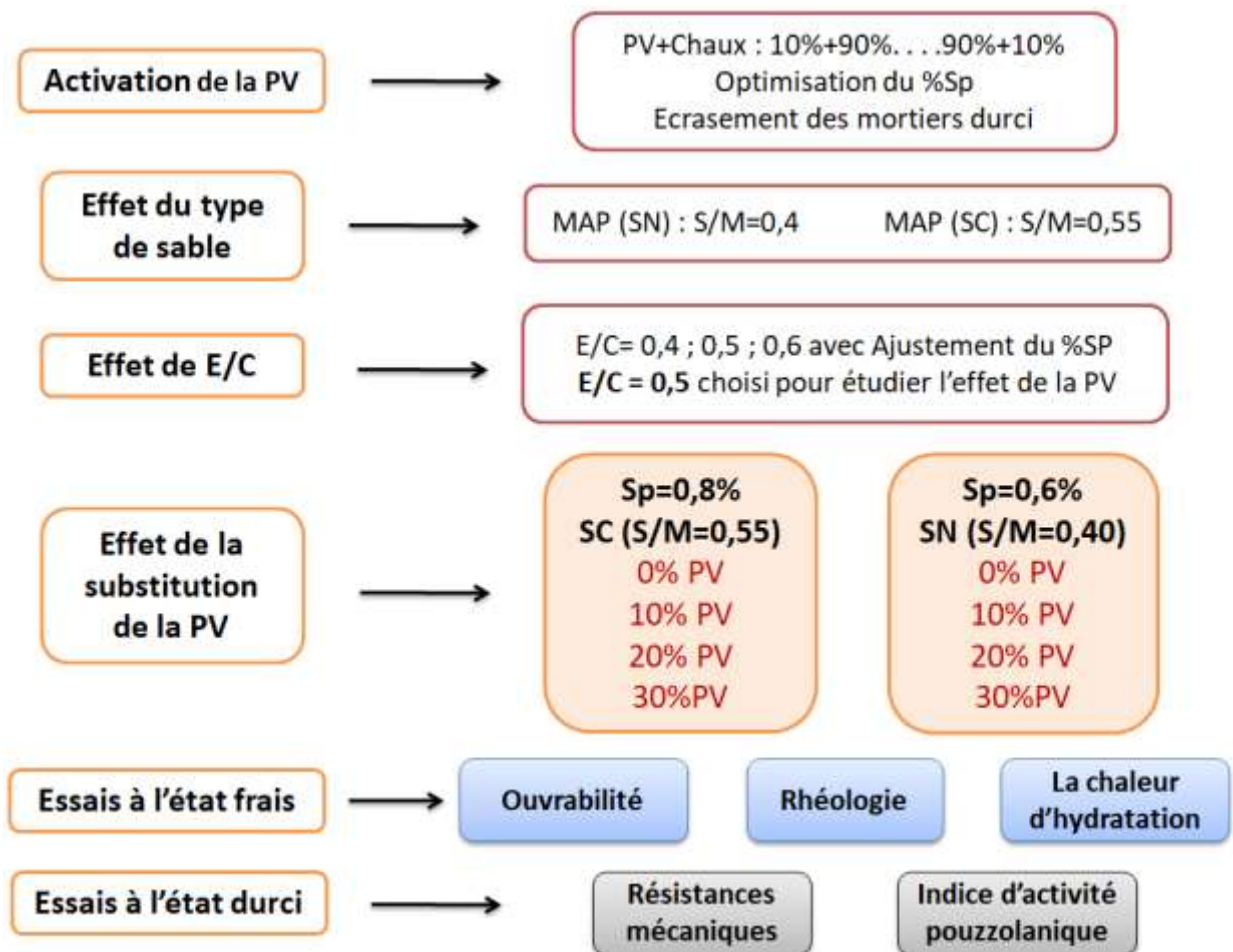


Figure II-12. Organigramme récapitulatif du protocole expérimental

II.7 CONCLUSION

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché algérien pour la préparation des MAP. Notre principal objectif est l'étude de l'effet combiné de la poudre de verre comme ajout cimentaire et le type de sable sur les performances physiques, rhéologiques et mécaniques des MAP. Afin d'atteindre ce but, on a procédé à la substitution du ciment par la PV et l'utilisation de deux types de sable (SC et SN). Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

- Activation de la poudre de verre en utilisant de la chaux hydraulique afin d'analyser son potentiel en tant qu'ajout cimentaire dans des applications en béton ;
- La méthode de formulation utilisée appelée méthode générale ou méthode d'Okamura. L'objectif de cette méthode est d'optimiser les dosages en eau, en superplastifiant et en sable en fabricant un mortier autoplaçant avec substitution partielle du ciment par la PV;

- Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur les MAP pour déterminer leurs caractéristiques physiques et rhéologiques, à travers l'essai d'étalement au mini cône et l'essai au rhéomètre ;
- À l'état durci, des essais sont menés pour examiner l'influence combinée de la PV et le type de sable sur les résistances à la compression et à la flexion ;
- Enfin, un essai de l'évolution de la chaleur d'hydratation sera mesuré au cours du temps afin d'évaluer la quantité de chaleur dégagée lors de la réaction d'hydratation du ciment.

Dans le chapitre suivant sont exposés les différents résultats des différents essais effectués suivis d'interprétations et comparaisons avec ceux obtenus par la littérature.

CHAPITRE III

ANALYSES ET

INTERPRETATIONS

DES RESULTATS

III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'exposé et à l'analyse des résultats obtenus lors des essais réalisés à l'état frais et à l'état durci. Ces résultats seront comparés avec ceux issus de la littérature afin de mieux comprendre les phénomènes observés. L'objectif principal est de mettre en lumière l'effet de la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre, ainsi que l'impact de la nature du sable sur les performances et la qualité des mortiers autoplaçant élaborés.

Les analyses portent sur les mélanges de mortiers autoplaçant (MAP) formulés en fixant les principaux paramètres de conception (rapport E/C, rapport S/M, et pourcentage de superplastifiant), tout en variant le type de sable et le taux de substitution par la poudre de verre. Nous étudierons notamment l'influence de ces variations sur l'ouvrabilité et les caractéristiques rhéologiques des MAP à l'état frais, ainsi que sur leurs propriétés mécaniques et l'évolution de la chaleur d'hydratation à l'état durci.

Les conclusions tirées de cette étude nous permettront de formuler des recommandations pertinentes.

III.2 ESSAIS A L'ETAT FRAIS

III.2.1 Activation de la poudre de verre

Dans un premier temps, une optimisation du dosage en superplastifiant a été effectuée afin de garantir une consistance homogène des mortiers normaux préparés dans le cadre de l'analyse de l'activité pouzzolanique de la poudre de verre.

Cette démarche visait à obtenir un étalement de 200 mm sur la table à chocs (NF-NE 1015-3, 2007) pour l'ensemble des mélanges. Pour chaque mélange, le dosage en superplastifiant a été ajusté de manière itérative à travers plusieurs essais successifs (généralement 03), jusqu'à déterminer le dosage optimal permettant d'atteindre l'étalement requis.

Les compositions des mélanges ainsi que les résultats de l'optimisation du dosage en superplastifiant sont récapitulés dans le tableau III.1.

Tableau III-1. Composition des mortiers à base de la poudre de verre et de la chaux

Chaux (%)	PV (%)	Sable (g)	PV (g)	Chaux (g)	Eau (g)	Sp (g)			Etalement (mm)		
						Essai (1)	Essai (2)	Essai (3)	Essai (1)	Essai (2)	Essai (3)
0	100	600	200	0	100	-	-	-	-	-	-
10	90	600	180	20	100	0.55	1.25	2.12	200	230	240
20	80	600	160	40	100	0.80	1.20	2.17	190	210	250
30	70	600	140	60	100	1.23	1.80	3.42	125	175	250
40	60	600	120	80	100	1.00	2.15	2.60	150	205	250
50	50	600	100	100	100	2.24	2.90	3.50	145	170	220
60	40	600	80	120	100	2.99	6.00	7.00	140	190	210
70	30	600	60	140	100	3.30	5.05	11.00	110	135	210
80	20	600	40	160	100	7.25	12.00	15.00	145	210	250
90	10	600	20	180	100	6.18	12.07	22.00	110	145	220
100	0	600	0	200	100	-	-	-	-	-	-

Les résultats d’optimisation du dosage en superplastifiant dans les mortiers à base de la poudre de verre et de la chaux sont présentés dans la figure III.1.

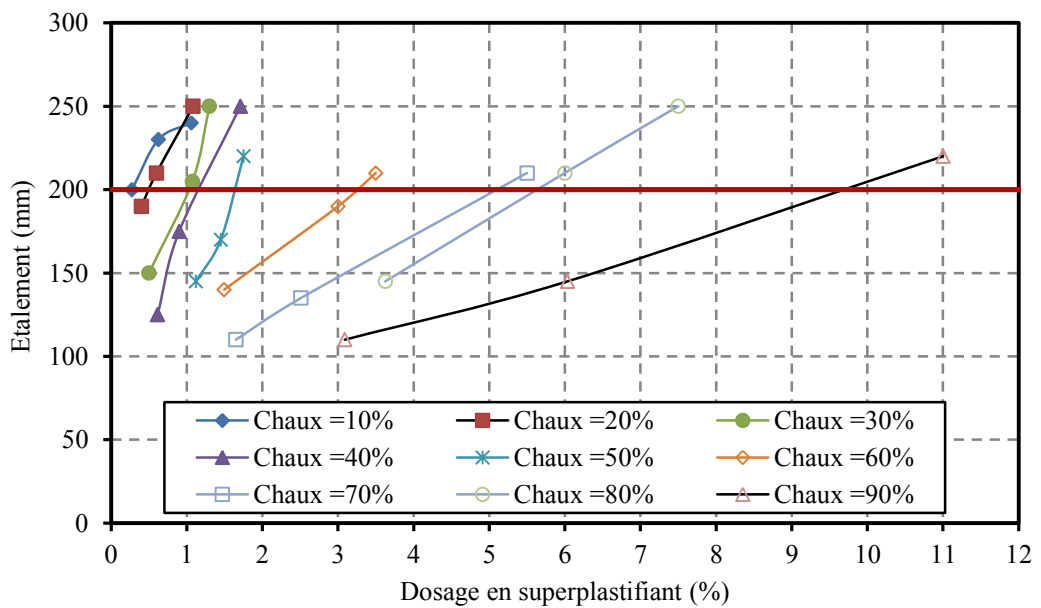


Figure III-1. Optimisation du dosage en superplastifiant.

D'après les résultats d'optimisation du dosage en superplastifiant et les courbes présentées dans la figure III.1, on distingue les dosages optimaux en superplastifiant en fonction du taux de la chaux qui sont représentés dans le tableau (III.2)

Tableau III-2. Dosages optimaux en superplastifiant en fonction du taux de la chaux

Chaux (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sp (%)	0.275	0.45	1.05	1.075	1.65	3.25	5.10	5.70	9.65

D'après ces dosages optimaux, on peut représenter graphiquement la croissance du besoin en superplastifiant dans la figure III.2. Ces résultats mettent en évidence une relation quasi-linéaire, qui est cohérente avec les observations rapportées par Dupont et al., (2018), selon lesquelles l'augmentation du superplastifiant tend à améliorer initialement la fluidité du mélange, jusqu'à atteindre un plateau au-delà duquel l'effet est marginal ou contre-productif.

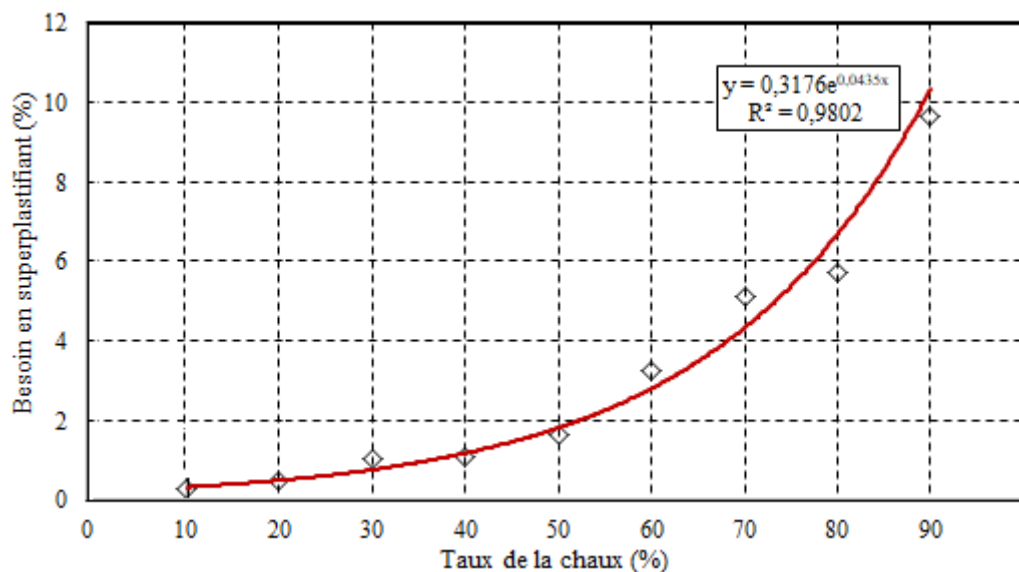


Figure III-2. Variation du dosage en SP en fonction du taux de la chaux

Cette figure III.2 met en évidence les dosages optimaux de superplastifiant correspondant à chaque taux de chaux, tels que répertoriés dans le tableau III.2. D'après cette dernière, une augmentation exponentielle du dosage en superplastifiant a été constatée en fonction de la teneur en chaux. Cette augmentation met en évidence un besoin croissant en superplastifiant lorsque la teneur en chaux augmente, ce qui s'explique par l'absorption significative induite par la chaux.

Cette tendance peut être attribuée à l'absorption importante du superplastifiant par les particules de chaux, phénomène souvent observé dans les systèmes à forte teneur en chaux (Fernández, J. M et al, 2013).

De manière similaire, plusieurs études ont rapporté que l'augmentation des minéraux réactifs, tels que la chaux ou le ciment Portland, influence de manière significative les besoins en superplastifiant. Par exemple, Selon Navarro-Blasco, I et al., (2014), la structure poreuse des particules de chaux et leur surface spécifique élevée, agissent comme des sites d'adsorption privilégiés pour les polymères du superplastifiant.

Après avoir obtenu une consistance homogène et semblable pour les différents mélanges de mortier à base de poudre de verre (PV) et de chaux, des essais d'écrasement par compression seront effectués. Ces tests porteront sur des tronçons d'éprouvettes prismatiques de dimensions normalisées (4x4x16 cm³) conformément aux recommandations de la norme NF EN 12390-16 (2019) aux âges de 7, 28 et 90 jours. Ces tranches d'âge permettent de caractériser l'évolution des résistances mécaniques à court, moyen et long termes.

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure III.3.

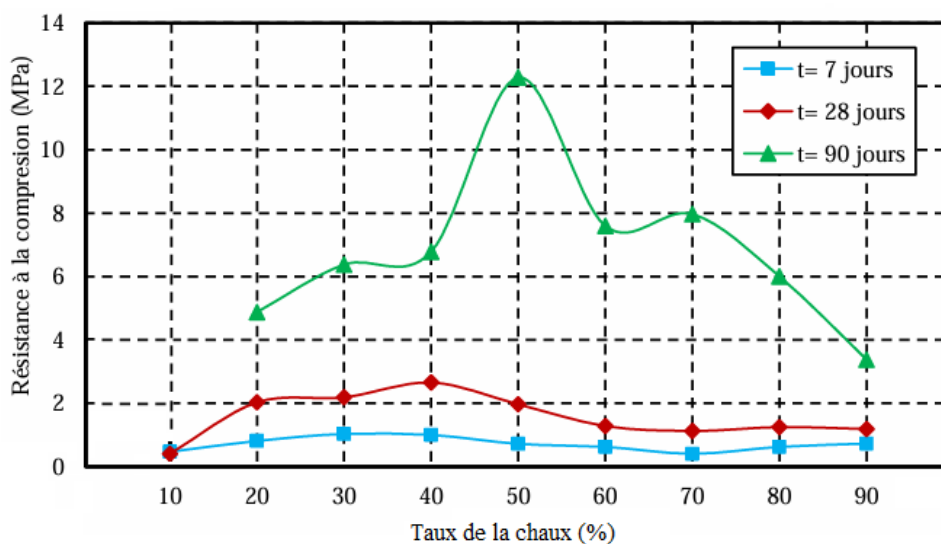


Figure III-3. Résistance à la compression du mortier de la PV en fonction du taux de la chaux

Les résultats obtenus, illustrés dans la figure III.3, montrent un gain significatif de résistance lorsque le mortier contient de la chaux en combinaison avec la poudre de verre. Ce phénomène s'explique par la dissolution de la chaux dans le mélange, ce qui élève le PH de la solution interstitielle et la rend basique.

Cette augmentation du PH déclenche l'activité pouzzolanique de la poudre de verre, laquelle conduit à la formation de produits d'hydratation similaires à ceux produits lors de l'hydratation du ciment (Fernandes et al., 2020 , Shi et al., 2015).

Ce comportement suggère que la chaux, en réagissant lentement avec les fines de la poudre de verre, contribue progressivement à la formation de produits cimentaires secondaires (type C-S-H ou C-A-H), améliorant ainsi la compacité et la cohésion de la matrice.

Au-delà de 50 %, l'excès de chaux entraîne toutefois une diminution de la résistance, probablement en raison d'un déséquilibre de la matrice et d'une formation accrue de pores, ce qui réduit la performance mécanique.

La poudre de verre contient un pourcentage élevé des SiO₂ (73%), le produit cimentaire dominant est le (C-S-H), parfois enrichi en alumine (C-A-S-H), qui améliore la compacité (1.3%), réduit la porosité et explique la forte augmentation de résistance observée à long terme (notamment à 90 jours dans la figure).

A 90 jours, la résistance à la compression atteint 12 MPa lorsque 50 % de la poudre de verre est remplacée par la chaux, un résultat qui corrobore les conclusions de précédentes études (Puertas et al., 2006), mettant en évidence l'activation pouzzolanique de la poudre de verre.

Cette amélioration des performances mécaniques confirme l'activité pouzzolanique de la poudre de verre, ainsi que son potentiel comme matériau cimentaire alternatif. En outre, son utilisation contribue à la réduction des déchets de verre, alignée avec les objectifs de développement durable et la production de ciments écologique respectueux de l'environnement (Mehta et Monteiro, 2014).

Ces résultats soulignent donc l'intérêt d'intégrer la poudre de verre activée dans les formulations de mortiers, non seulement pour valoriser un déchet abondant, mais également pour améliorer les propriétés mécaniques et durables des matériaux cimentaires modernes.

III.2.2 Optimisation des dosages aux MAP

Un mortier autoplaçant se compose principalement de sable et de poudre (Ciment+ Ajout) ainsi qu'un superplastifiant, formulés dans des proportions spécifiques visant à obtenir une fluidité optimale, sans ségrégation ni ressuage. La conception de ce type de mortier requiert une optimisation minutieuse de chaque composant, afin de satisfaire les exigences techniques tout en maintenant une rentabilité économique.

L'objectif, dans le cadre d'un volume donné de mortier, est d'optimiser la quantité de sable utilisée, tout en ajustant le dosage de superplastifiant pour assurer que le mélange conserve les caractéristiques propres aux mortiers autoplaçant (MAP).

III.2.2.1 Optimisation de la teneur en sable

Dans le cadre de cette optimisation, il est primordial de maximiser la proportion de sable, qui représente l'élément granulaire majoritaire, tout en assurant que le mélange conserve ses propriétés rhéologiques. Selon Dupont et al., (2018), l'incorporation d'une quantité élevée de sable permet de réduire la consommation de ciment, ce qui diminue non seulement le coût mais aussi l'empreinte écologique du matériau.

Cependant, une proportion excessive de sable peut compromettre la fluidité et nécessiter une augmentation du dosage en superplastifiant, ce qui pourrait engendrer des coûts supplémentaires.

Ainsi, pour formuler un MAP performant, il est nécessaire d'adopter une approche équilibrée en maximisant le volume de sable dans la formulation tout en ajustant le dosage en superplastifiant. Les études comparatives telles que celles de Dupont et al., (2018) et de Martin et Durand, (2020) soulignent que cette démarche permet d'obtenir des mortiers à la fois économiques et conformes aux normes en vigueur pour les matériaux autoplaçant, comme l'indiquent les recommandations de l'EFNARC 2005 (European Federation of National Associations Representing Concrete).

Pour un volume donné de mortier, la quantité optimale de sable est ciblée afin de garantir les conditions économiques, puis le dosage en superplastifiant est ajusté. L'ajustement vise à obtenir un mortier fluide avec un étalement entre 270 et 330 mm, comme recommandé par Domone et Jin, (1999).

Dans cette optimisation, on a testé dix compositions dont cinq pour chaque type de sable, et on a varié le rapport S/M de 0.35 jusqu'à 0.55 avec un pas de 0.05 en fixant le rapport E/C=0.40 ainsi que SP=1 %.

Les résultats des essais d'étalement au mini-cône pour le choix du S/M optimal pour chaque type de sable sont illustrés dans le tableau III.3 et tableau III.4.

Tableau III-3. Optimisation du rapport S/M pour les MAPs à base de sable naturel

S/M	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55
Ciment (g)	323.84	298.93	274.02	249.11	224.20
Sable (g)	333.90	381.60	429.30	477.00	524.70
Eau (g)	127.27	117.48	107.69	97.90	88.11
SP (g)	3.24	2.99	2.74	2.49	2.24
D_{moy} (mm)	310	298.33	213.33	100	100

Tableau III-4. Optimisation du rapport S/M pour les MAPs à base de sable concassé

S/M	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55
Ciment (g)	323.84	298.93	274.02	249.11	224.20
Sable (g)	336.42	384.48	432.54	480.60	528.66
Eau (g)	127.27	117.48	107.69	97.90	88.11
SP (g)	3.24	2.99	2.74	2.49	2.24
D_{moy} (mm)	345	321.67	320	316.67	283.33

Les résultats d'optimisation du rapport S/M pour les deux types de sables sont présentés dans la figure III.4.

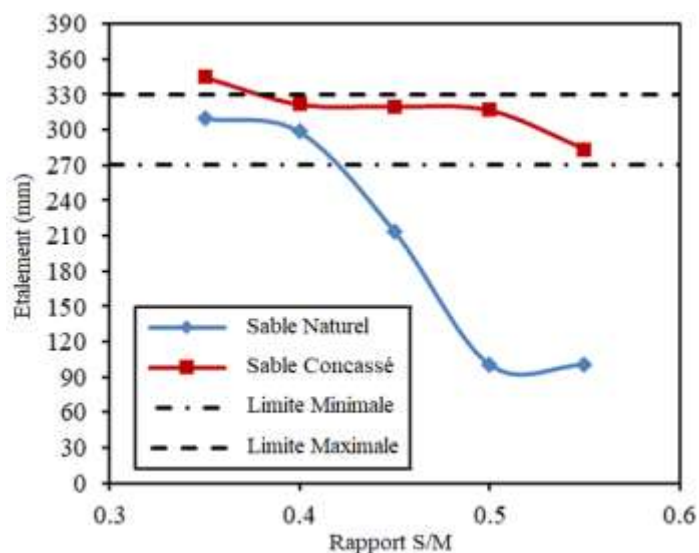


Figure III-4. Etalement des mortiers en fonction du type et du taux de sable

Comme illustré dans la Figure III.4, le MAP peut être formulé avec du sable naturel (SN) ou du sable concassé (SC). Il apparaît clairement que le SC est plus efficace que le SN, permettant une proportion sable/mortier allant jusqu'à 0,55 sans provoquer de ségrégation ni de ressuage. En revanche, pour un mortier réalisé avec du sable naturel, seulement 40 % de sable peut être incorporé. L'utilisation de SC permet non seulement d'augmenter la teneur en sable, mais aussi de contribuer à une meilleure rentabilité et homogénéité du mortier. Cette différence d'effet entre les deux types de sable sur les propriétés du MAP s'explique par la nature, la forme et la taille des particules (Sahraoui et Bouziani, 2019). Ces auteurs ont souligné que la morphologie angulaire des particules de SC favorise une meilleure cohésion et une compacité accrue.

Ce résultat corrobore les travaux de Benabed et al., (2016), qui ont démontré une amélioration significative des propriétés rhéologiques du béton autoplaçant (BAP) pour des mélanges contenant du sable concassé. En effet, le SC, par sa granulométrie spécifique et sa teneur en fines, améliore la fluidité et réduit la ségrégation du mélange, facilitant ainsi sa mise en œuvre. De plus, Rmili et al., (2009) ont mis en évidence que l'utilisation de mélanges combinant des granulométries variées de sable, incluant une proportion significative de SC, permet d'obtenir un meilleur comportement à l'état frais, notamment en termes de stabilité et de résistance à la ségrégation.

Par ailleurs, des recherches de Sua-iam et Makul, (2013) ont démontré que l'emploi de sable calcaire dans des formulations de BAP améliore également les propriétés rhéologiques. Ces auteurs ont observé une augmentation du taux d'affaissement avec une

teneur croissante en sable, atteignant une fluidité optimale à un taux de 60 %, ce qui correspond à une proportion idéale pour maximiser la maniabilité sans compromettre la stabilité. Cela est attribué à la teneur élevée en fillers calcaires dans le SC, conférant un pouvoir dispersif supérieur qui favorise une répartition homogène des particules dans la matrice.

En outre, Bounedjema et al., (2017) ont souligné le rôle clé des fines calcaires présentes dans le SC, qui contribuent à réduire le frottement inter-particulaire dans la pâte fraîche. Cette caractéristique améliore la densité de compactage, diminue le volume d'eau nécessaire au remplissage des vides, et optimise ainsi les propriétés mécaniques et la durabilité du mortier. Ce phénomène est particulièrement pertinent dans les formulations de MAP, où la gestion des interactions sable-liant est cruciale pour atteindre un équilibre entre fluidité, stabilité et performance mécanique. Ces différentes études convergent pour mettre en évidence les avantages significatifs du SC par rapport au SN, tant sur le plan rhéologique qu'économique, confirmant ainsi son rôle stratégique dans les formulations modernes de mortiers et bétons haute performance.

L'utilisation accrue du sable de concassage, en comparaison avec le sable naturel, présente plusieurs avantages dans une perspective de développement durable. Elle contribue, d'une part, à la valorisation d'un sous-produit issu des carrières, limitant ainsi son rejet dans l'environnement, et, d'autre part, à la préservation des ressources naturelles en sable et en roches, essentielles pour les générations futures. De plus, le sable de concassage se révèle généralement plus économique que le sable naturel, renforçant son intérêt à la fois écologique et socio-économique.

III.2.2.2 Optimisation du dosage de superplastifiant

Une fois la teneur en sable dans le mortier est déterminée, le dosage de superplastifiant est ajusté en fonction de l'étalement mesuré à chaque fois. Deux séries de mortiers ont été fabriquées : le premier contenant 40 % de sable naturel (SN) et la seconde 55 % de sable concassé (SC), chaque série étant préparée avec des rapports E/C de 0,4, 0,5 et 0,6.

Le rôle du superplastifiant est essentiel pour conférer au mortier ses propriétés autoplaçantes. Comme l'indiquent Martin et Durand, (2020), l'ajout de ces adjuvants permet de réduire significativement le rapport eau/liant tout en maintenant une rhéologie adaptée. Toutefois, le dosage optimal du superplastifiant doit être soigneusement

déterminé, car un surdosage pourrait entraîner des effets indésirables, tels que le ressuage, une ségrégation accrue ou une diminution de la résistance mécanique à long terme (Smith et Johnson, 2017).

Les résultats des essais d'étalement au mini-cône pour le choix d'un dosage optimal en superplastifiant pour chaque série de mortier avec un rapport E/C varié sont illustrés dans le tableau III.5, III.6, III.7, III.8, III.9 et III.10.

Tableau III-5. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable naturel (E/C=0.4)

SP (%)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
S/M	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Ciment (g)	298.93	298.93	298.93	298.93	298.93
Sable (g)	384.48	384.48	384.48	384.48	384.48
Eau (g)	118.73	118.32	117.90	117.48	117.06
SP (g)	1.20	1.79	2.39	2.99	3.59
D_{moy} (mm)	100	168.33	273.33	280	286.67

Tableau III-6. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable naturel (E/C=0.5)

SP (%)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
S/M	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Ciment (g)	298.93	298.93	298.93	298.93	298.93
Sable (g)	384.48	384.48	384.48	384.48	384.48
Eau (g)	149.05	148.63	148.21	147.79	147.37
SP (g)	0.60	1.20	1.79	2.39	2.99
D_{moy} (mm)	138.33	218.33	300	326.67	330

Tableau III-7. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable naturel (E/C=0.6)

SP (%)	0	0.2	0.4	0.6	0.8
S/M	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Ciment (g)	298.93	298.93	298.93	298.93	298.93
Sable (g)	384.48	384.48	384.48	384.48	384.48
Eau (g)	179.36	178.94	178.52	178.10	177.68
SP (g)	0	0.60	1.20	1.79	2.39
D_{moy} (mm)	160	231.67	313.33	331.67	380

Tableau III-8. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable concassé (E/C=0.4)

SP (%)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
S/M	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Ciment (g)	224.20	224.20	224.20	224.20	224.20
Sable (g)	528.66	528.66	528.66	528.66	528.66
Eau (g)	89.05	88.74	88.42	88.11	87.80
SP (g)	0.90	1.35	1.79	2.24	2.69
D_{moy} (mm)	100	120	198.33	248.33	281.67

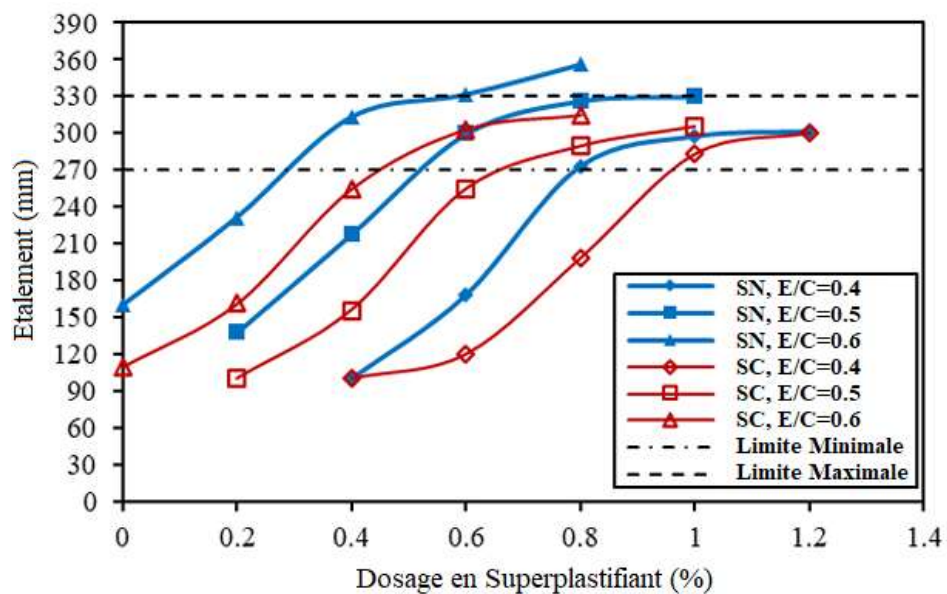
Tableau III-9. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable concassé (E/C=0.5)

SP (%)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
S/M	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Ciment (g)	224.20	224.20	224.20	224.20	224.20
Sable (g)	528.66	528.66	528.66	528.66	528.66
Eau (g)	111.78	111.47	111.16	110.84	110.53
SP (g)	0.45	0.90	1.35	1.79	2.24
D_{moy} (mm)	100	125	233.33	290	300

Tableau III-10. Optimisation du % SP pour les MAPs à base de sable concassé (E/C=0.6)

SP (%)	0	0.2	0.4	0.6	0.8
S/M	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Ciment (g)	224.20	224.20	224.20	224.20	224.20
Sable (g)	528.66	528.66	528.66	528.66	528.66
Eau (g)	134.52	134.20	133.89	133.58	133.26
SP (g)	0	0.45	0.90	1.35	1.79
D _{moy} (mm)	110	161.67	225	303.33	311.67

Les résultats ci-dessus sont récapitulés dans la figure III.5.

**Figure III-5.** Etalement des MAPs à base des deux types de sable en fonction du % SP avec différents E/C

Les résultats présentés sur la figure III.5 montrent que le type de sable joue un rôle déterminant dans la conception d'un mortier auto-plaçant.

Pour obtenir un étalement supérieur à 270 mm avec le sable naturel, un dosage en superplastifiant de 0,8 %, 0,52 % et 0,28 % a été nécessaire pour des rapports E/C respectifs de 0,4, 0,5 et 0,6. En revanche, lorsque le mortier est confectionné avec du sable concassé, ces dosages augmentent à 0,96 %, 0,66 % et 0,44 % pour les mêmes rapports

E/C. Cette augmentation s'explique par la diminution du volume de pâte de ciment causée par la teneur élevée en fines du SC.

Par conséquent, il peut être conclu que l'utilisation du SC dans la formulation des MAP offre une fluidité acceptable avec un dosage de superplastifiant modéré et une teneur en ciment réduite. Cela rend cette formulation plus économique et plus écologique que celle utilisant du sable naturel.

Le sable concassé (SC), riche en particules fines, contribue significativement à l'amélioration des propriétés des mortiers autoplacant. Cependant, son utilisation en forte proportion dans la formulation nécessite une compensation par un dosage accru de superplastifiant, une observation confirmée par Benabed et al., (2012). Ces auteurs ont démontré que les mortiers à base de sable mixte (concassé + naturel) présentaient une fluidité satisfaisante, tout en favorisant la maniabilité et la compacité. De manière similaire, les travaux de Sua-iam et Makul, (2013) ont montré qu'un remplacement partiel du sable naturel par du sable concassé améliorait l'aptitude au passage du béton auto-compactant, ce qui corrobore les performances observées avec le SC.

Ainsi, l'usage du SC apparaît comme une alternative avantageuse non seulement sur le plan économique et écologique, mais également pour répondre aux exigences techniques des MAP, en particulier dans des formulations à faible teneur en ciment.

III.2.3 Effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité

Pour étudier l'effet de la poudre de verre (PV) sur les propriétés physiques du MAP, deux séries de mortiers ont été préparées. La première série utilise du sable naturel (SN) avec une teneur en sable de 40 % en volume, tandis que la seconde est composée de mortier à base de SC contenant 55 % de sable en volume. Chaque série présente une fluidité similaire, avec des substitutions de 10 %, 20 % et 30 % du volume de ciment par la PV. Afin de maintenir une fluidité équivalente pour toutes les formulations, des proportions de superplastifiant de 1 %, 0,6 % et 0,4 % ont été ajoutées à la première série, et de 1,2 %, 0,8 % et 0,6 % à la seconde série, selon des rapports eau/ciment de 0,4, 0,5 et 0,6 respectivement. Les proportions des mélanges sont présentées dans le Tableau III.11.

Tableau III-11. Proportions du mélange des MAPs fabriqués avec différents types de sable

Mélange	E/C	PV (%)	S/M	Sable (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	PV (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	SP (%)
SN-0-0.4	0.4	0	0.4	1060	802.7	0	321.1	1.0
SN-10-0.4	0.4	10	0.4	1060	728.8	68.2	318.8	1.0
SN-20-0.4	0.4	20	0.4	1060	653.6	137.6	316.5	1.0
SN-30-0.4	0.4	30	0.4	1060	577.0	208.2	314.1	1.0
SN-0-0.5	0.5	0	0.4	1060	705.1	0	352.5	0.6
SN-10-0.5	0.5	10	0.4	1060	640.7	59.9	350.3	0.6
SN-20-0.5	0.5	20	0.4	1060	575.1	121.1	348.1	0.6
SN-30-0.5	0.5	30	0.4	1060	508.2	183.4	345.8	0.6
SN-0-0.6	0.6	0	0.4	1060	628.7	0	377.2	0.4
SN-10-0.6	0.6	10	0.4	1060	571.7	53.5	375.1	0.4
SN-20-0.6	0.6	20	0.4	1060	513.5	108.1	372.9	0.4
SN-30-0.6	0.6	30	0.4	1060	454.1	163.8	370.9	0.4
SC-0-0.4	0.4	0	0.55	1468.5	595.1	0	238.0	1.2
SC-10-0.4	0.4	10	0.55	1468.5	540.3	50.5	236.3	1.2
SC-20-0.4	0.4	20	0.55	1468.5	484.6	102.0	234.6	1.2
SC-30-0.4	0.4	30	0.55	1468.5	427.8	154.4	232.9	1.2
SC-0-0.5	0.5	0	0.55	1468.5	522.7	0	261.4	0.8
SC-10-0.5	0.5	10	0.55	1468.5	475.0	44.4	259.7	0.8
SC-20-0.5	0.5	20	0.55	1468.5	426.4	89.7	258.1	0.8
SC-30-0.5	0.5	30	0.55	1468.5	376.8	136.0	256.4	0.8
SC-0-0.6	0.6	0	0.55	1468.5	466.1	0	279.7	0.6
SC-10-0.6	0.6	10	0.55	1468.5	423.8	39.6	278.1	0.6
SC-20-0.6	0.6	20	0.55	1468.5	380.7	80.1	276.5	0.6
SC-30-0.6	0.6	30	0.55	1468.5	336.6	121.5	274.9	0.6

Pour chaque type de sable et pour un rapport E/C=0.5, accompagné de son dosage optimal en superplastifiant, le taux de substitution du ciment par la poudre de verre a été systématiquement varié. La variation de l'étalement mesuré en fonction de l'augmentation du taux de la PV est présentée dans la figure III.6.

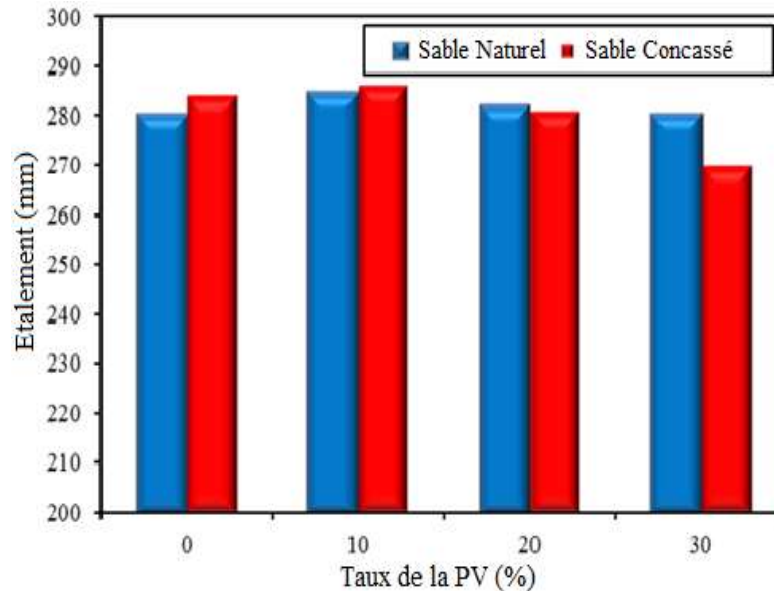


Figure III-6. Etalement des MAPs en fonction du taux de la PV avec un rapport E/C= 0,5

Les résultats de l'effet de l'ajout de la poudre de verre (PV) sur l'étalement du MAP en fonction du type de sable montrent que les valeurs d'étalement au mini cône pour les mélanges testés varient entre 270 mm et 286 mm, ce qui respecte les recommandations de Domone et Jin, (1999) pour des mortiers sans ségrégation ni ressuage. Il apparaît que l'incorporation de la PV dans la formulation des liants cimentaires influence légèrement la fluidité du mortier, avec une amélioration notable pour un taux de substitution de 10 %.

Ces observations concordent avec les travaux d'Ahmad et Zhou, (2023), qui ont montré que l'ajout de PV améliore l'écoulement du béton autoplaçant en augmentant la proportion de la PV. En effet, les particules de verre, grâce à leur surface lisse, agissent comme des lubrifiants dans le mortier, réduisant les frictions internes et facilitant ainsi l'écoulement. Par ailleurs, la présence de particules fines dans le sable concassé et dans la poudre de verre pourrait également expliquer ce gain de fluidité, comme l'a également constaté Miyazawa et al., (2009), où une réduction de la taille des particules augmentait la fluidité et la résistance à la ségrégation.

Cependant, au-delà d'un taux de 20 %, une légère diminution de l'étalement est observée, en particulier avec les mortiers réalisés avec du sable concassé. Cette diminution pourrait s'expliquer par la faible densité de la PV par rapport à celle du ciment, comme le suggèrent les travaux de Rehman et al., (2018).

En outre, la fluidité des MAP varie en fonction du type de sable et du taux de substitution de la PV. Par exemple, pour un mortier contenant 10 % de PV, l'étalement atteint 284 mm avec du SN et 286 mm avec du SC. Cette différence pourrait être attribuée à la présence de particules fines dans le SC, qui augmentent la fluidité des mélanges. De manière similaire, Benabed et al., (2012) ont étudié l'influence des combinaisons de types de sable sur le comportement rhéologique des MAP.

Ils ont constaté qu'un MAP confectionné par du sable concassé atteint un étalement de 263 mm, améliorable à 289 mm pour un mélange contenant 50 % de sable concassé et 50 % de sable naturel, mais réduit à 232 mm pour un mélange composé à parts égales de sable concassé et de sable de dune. Cette réduction s'explique par la finesse du sable de dune, dont le module de finesse de 0,78 nécessite une forte demande en eau pour atteindre la même fluidité.

Le sable naturel, lorsqu'il est combiné à d'autres types de sable, améliore l'étalement grâce à sa texture lisse et ses grains arrondis, tandis que le sable concassé, avec ses grains rugueux et allongés, augmente les paramètres rhéologiques. Westerholm et Lagerblad, (2008) ont également constaté que les paramètres rhéologiques augmentent de manière linéaire lorsque la teneur en fines dépasse 16 %. Dans cette étude, le SC contient seulement 12 % de fines, ce qui limite cet effet.

Bien que l'inclusion de PV augmente la maniabilité, aucune ségrégation n'a été observée. Das et al., (2024) expliquent ce phénomène par une réduction de la déformation des mélanges contenant de la PV, qui améliore la viscosité en maintenant une suspension uniforme des particules. Deepa et al., (2022) ont également observé une augmentation de l'étalement avec un taux croissant de la PV, attribuée à la surface antiadhésive des particules de verre, leur faible affinité avec l'eau et leur hydratation lente.

Aliabdo et al., (2016) ont noté que chaque augmentation de 5 % de substitution de ciment par de la PV réduit la demande en eau de 0,4 %, ce qui améliore la maniabilité et indirectement la résistance mécanique. Sobolev et al., (2007) ont montré que les fines particules de verre recyclé remplissent les vides entre les particules plus grosses, libérant

ainsi de l'eau excédentaire et augmentant la maniabilité. Ce comportement positif sur la maniabilité peut être attribué à la surface vitreuse et à la faible absorption d'eau de la PV ou à la taille relative des particules de verre comparée à celles du ciment, (Aliabdo et al., 2016).

III.2.4 Effet de la poudre de verre sur les paramètres rhéologiques

Le comportement rhéologique des mortiers contenant de la poudre de verre est fortement influencé par la quantité d'eau de gâchage utilisée. Des essais expérimentaux ont été réalisés en laboratoire à l'aide d'un rhéomètre pour étudier les propriétés rhéologiques de divers mortiers. En imposant un profil de vitesse au rhéomètre, le couple est mesuré avec et sans présence de mortier. Les étapes de calcul suivies reposent sur l'approche décrite par Estellé et Lanos, (2008).

À partir des variations du couple et de la vitesse de rotation correspondante, les paramètres rhéologiques tels que la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique sont déduits. La variation du moment final en fonction de la vitesse de rotation est modélisée par un ajustement linéaire.

La figure III.7 illustre cette corrélation linéaire pour l'un des mortiers testés, permettant ainsi de déduire les paramètres rhéologiques correspondants.

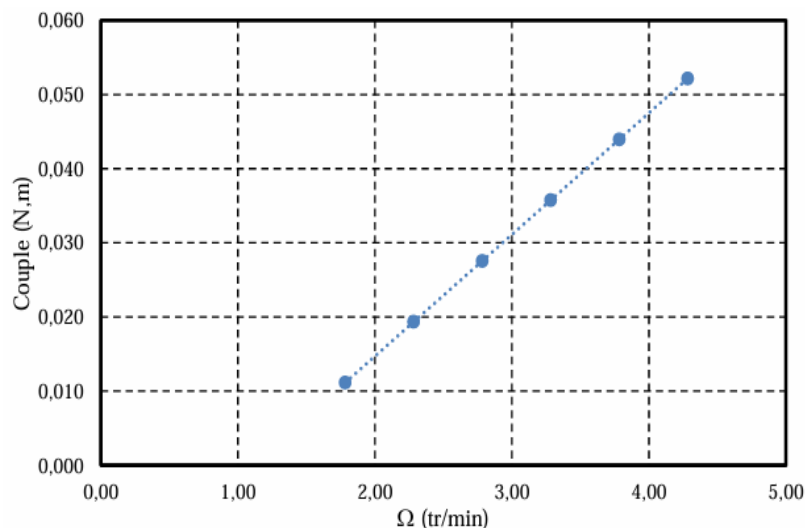


Figure III-7. Linéarisation des moments finaux en fonction de la vitesse de rotation

Les résultats obtenus mettent en évidence que les valeurs de la contrainte d'écoulement des différents mortiers, qu'ils contiennent ou non de la poudre de verre, sont

très faibles. Cela correspond au comportement des mortiers autoplaçant ou compactés par superplastifiant, qui ne nécessitent aucune vibration pour leur mise en œuvre.

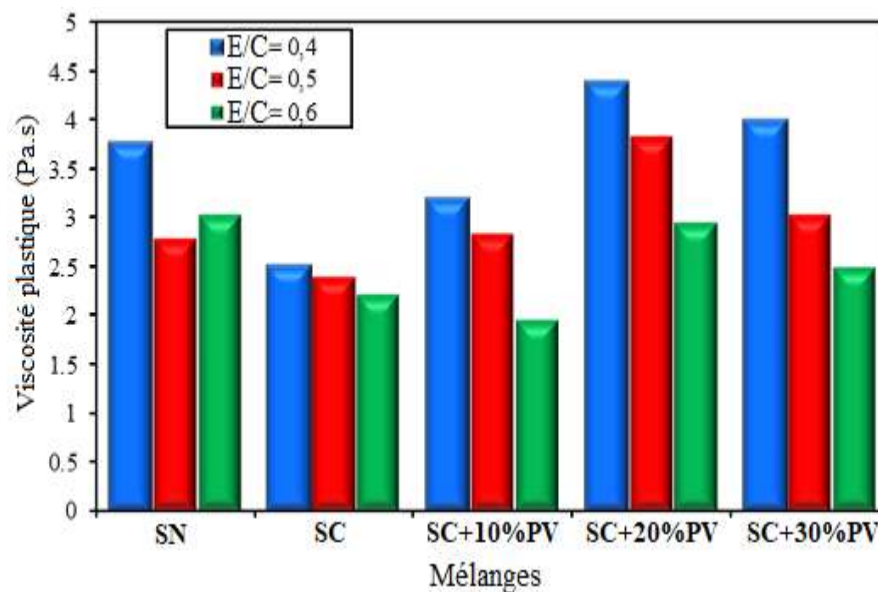


Figure III-8. Viscosité plastique des MAP contenant différents %PV pour trois rapports E/C

Les valeurs de viscosité plastique, présentées dans la Figure III.8, montrent qu'un mélange avec un rapport E/C élevé entraîne une diminution de la viscosité, en particulier pour les mortiers riches en poudre de verre. Il est observé que la substitution du ciment par de la poudre de verre augmente la viscosité du mortier jusqu'à un taux d'environ 20 %, après quoi un effet de dilution provoque une baisse de la viscosité. Pour des contenus élevés en poudre de verre, la disponibilité d'eau pour l'hydratation du ciment est plus importante, ce qui confère au mélange un comportement similaire à celui des mortiers à haut rapport E/C, suivi d'une diminution des valeurs de viscosité.

La finesse de la poudre de verre, supérieure à celle du ciment ordinaire, exige une quantité d'eau accrue pour couvrir les surfaces des particules, rendant ainsi le mortier plus visqueux. Ces résultats sont cohérents avec ceux de travaux antérieurs (Li et al., 2020 ; Yin et al., 2021) qui montrent que l'utilisation de la poudre de verre en remplacement du ciment réduit la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique, en raison de la faible réactivité de ce matériau à jeune âge.

Par ailleurs, le comportement rhéologique des mortiers est également influencé par la morphologie du sable utilisé. Comme l'ont démontré Li et al., (2023), la densité de compactage, la surface spécifique et l'épaisseur du film de pâte sont des facteurs

déterminants. Le sable concassé, par sa forte fraction fine, exerce une influence notable sur les propriétés rhéologiques du mortier. Cepuritis et al., (2016) ont confirmé que la fraction inférieure à 0,125 mm a un impact 6 à 8 fois plus important sur la rhéologie du béton. En comparaison, les mortiers à base de SC présentent des paramètres rhéologiques plus faibles que ceux à base de SN. Cette diminution est attribuée à la présence de poudres calcaires dans le SC, qui comblent le déficit en grains fins et améliorent la maniabilité et les propriétés rhéologiques du mortier.

Cette observation corrobore les travaux de Bounedjema et al., (2017), qui ont montré une réduction de 23 % de la contrainte d'écoulement et de 28 % de la viscosité plastique lors de l'utilisation de SC au lieu de SN. Enfin, en raison de la forme des grains du sable, la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique des mortiers préparés avec du sable concassé peuvent être respectivement 1,57 et 2,38 fois plus élevées que celles des mortiers à base de sable naturel (Li et al., 2023).

III.2.5 Evolution de la chaleur d'hydratation

Les courbes de chaleur totale d'hydratation des mortiers à base du sable concassé contenant respectivement 0 %, 10 %, 20 % et 30 % de poudre de verre (PV) en substitution du ciment, avec un E/C=0,5, conservés à une température de 20 ± 2 °C, sont présentées dans les Figures III.9 et III.10. De plus, certains paramètres caractéristiques extraits de ces courbes sont récapitulés dans le Tableau III.12.

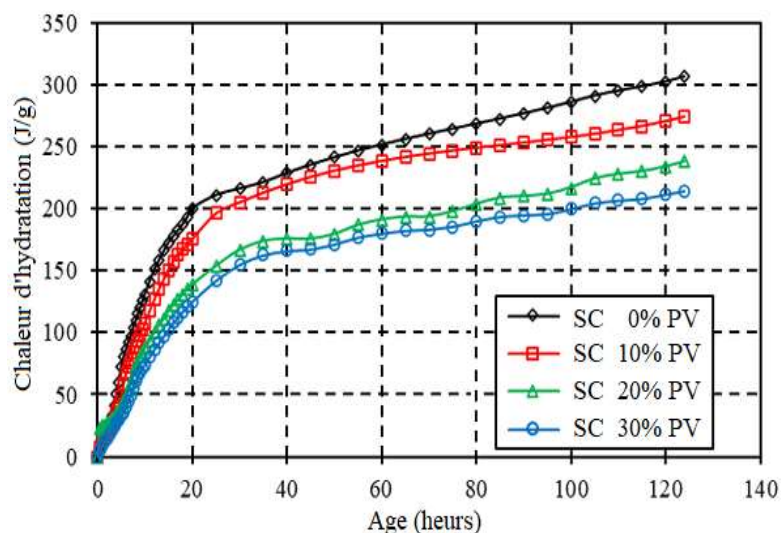


Figure III-9. Evolution de la chaleur d'hydratation du MAP à base de SC en fonction de l'âge avec différentes % PV

Selon les courbes de chaleur cumulée d'hydratation, il apparaît que l'ajout de poudre de verre réduit la chaleur dégagée, principalement aux jeunes âges, en raison de son effet dilution. En effet, à mesure que le taux de substitution par la poudre de verre augmente, la quantité de ciment actif dans le mélange diminue, ce qui se traduit par une réduction de la chaleur d'hydratation produite.

Avec le temps, la chaux issue de l'hydratation du ciment devient abondante, ce qui crée des conditions favorables pour initier la réaction pouzzolanique de la poudre de verre. Après cinq jours de mesure, la chaleur dégagée passe de 306 J/g à 214 J/g lorsque 30 % du ciment est remplacé par de la poudre de verre. De manière similaire, Chang et al. (2015) rapportent une diminution de 29 % de la chaleur dégagée au bout de trois jours pour un ciment de même type.

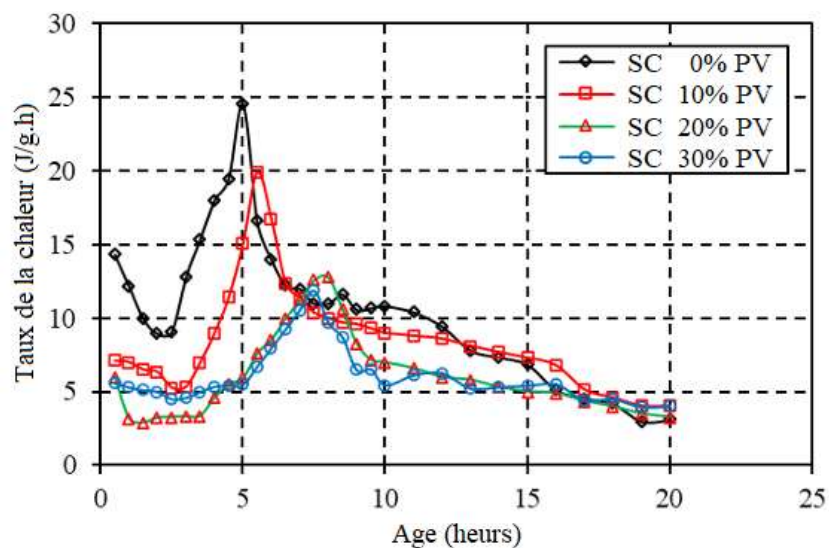


Figure III-10. Evolution de taux de la chaleur d'hydratation du MAP a base du SC en fonction de l'âge avec différentes % PV

Les résultats illustrés à la Figure III.10 montrent que la poudre de verre joue un rôle retardateur sur la chaleur d'hydratation. L'intensité du second pic de chaleur est diminuée et son apparition retardée. Par exemple, pour une substitution de 20 % du ciment par de la poudre de verre, le second pic est retardé de 3 heures et sa valeur est réduite de moitié par rapport à celle du mortier de référence. Il ressort des résultats obtenus que l'incorporation de poudre de verre prolonge la période d'induction, ce qui offre aux mortiers et bétons préparés un délai supplémentaire de mise en œuvre, comme l'indique le Tableau III.12.

Tableau III-12. *Quelque valeur caractéristique extraite d'après l'essai de la chaleur d'hydratation*

Mélanges	Fin de la période d'intégration (h)	Deuxième pic d'émission		Chaleur d'hydratation totale (J/g)				
		Taux (J/g.h)	Temps (h)	1 j	2j	3j	4j	5j
PV = 0%	2.5	24.5	5	211	241	261	281	306
PV = 10%	3	19.9	5.5	196	230	247	255	274
PV = 20%	3	12.7	8	154	186	198	212	238
PV = 30%	4.5	11.8	7.5	142	171	186	196	214

III.3 ESSAIS A L'ETAT DURCI

III.3.1 Effet de la PV sur la résistance à la compression

Les figures III.11 et III.12 présentent les résultats de la résistance à la compression pour différentes formulations de mortiers confectionné par du sable naturel et par du sable concassé avec un rapport E/C=0.5 à 1, 3, 7, 28 et 90 jours.

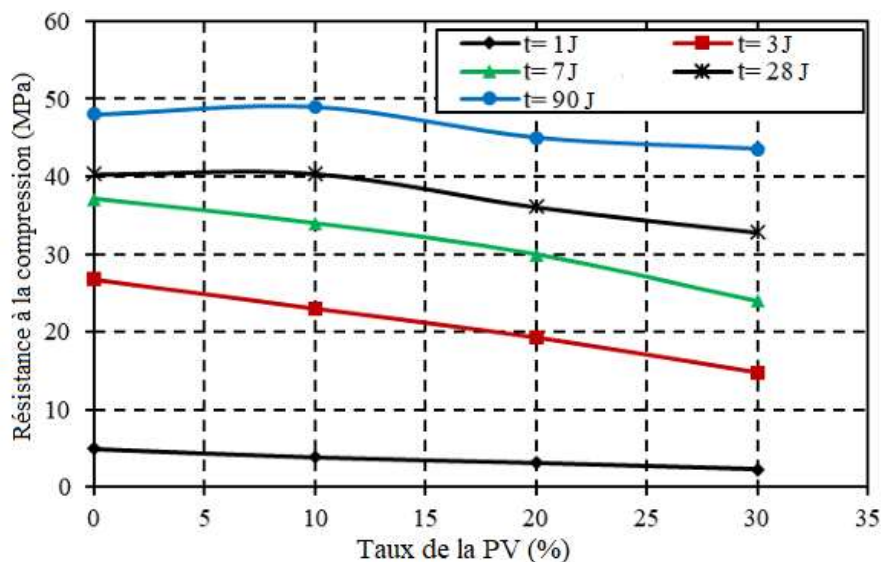


Figure III-11. *Résistance à la compression des MAP à base de SN en fonction de %PV avec E/C=0.5*

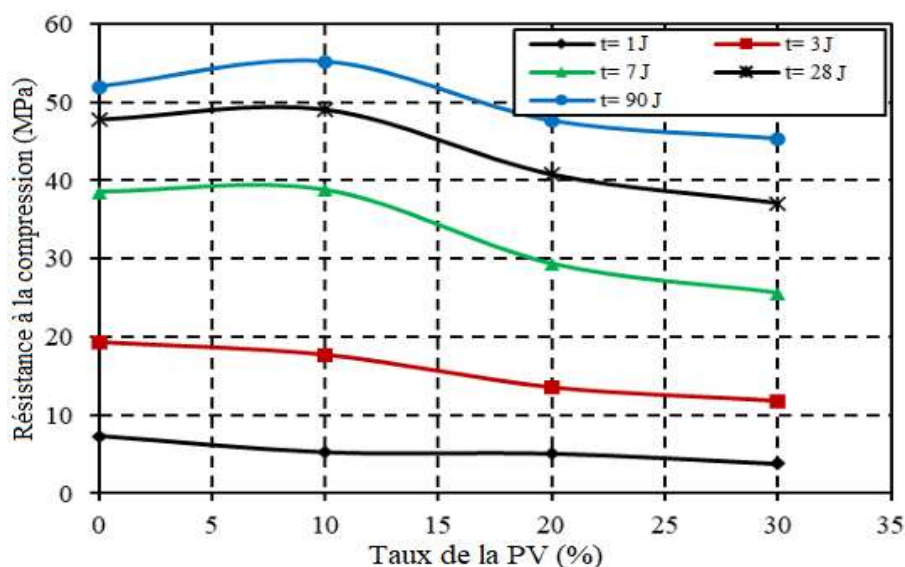


Figure III-12. Résistance à la compression des MAP à base de SC en fonction de %PV avec $E/C=0.5$

Il ressort clairement de ces résultats que la substitution de divers pourcentages de ciment par la poudre de verre (PV) entraîne une légère diminution de résistance à la compression à jeune âge. À trois jours, on observe une baisse de la résistance de 14 %, 26 % et 45 % pour des taux de substitution de ciment de 10 %, 20 % et 30 % respectivement. Cependant, à 90 jours, l'incorporation de PV conduit à une augmentation de par rapport au mortier témoin. En remplaçant 10 % du ciment par du PV, la résistance passe de 48 MPa à 49 MPa pour les mortiers à base de sable naturel et de 52 MPa à 55,2 MPa pour ceux contenant du sable concassé. Cette amélioration à long terme est attribuée à l'activité pouzzolanique de la PV, laquelle se manifeste après la saturation de la solution interstitielle par la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment, produisant des phases supplémentaires de C-S-H qui renforcent la structure du mortier (Rahma et al., 2017).

Dans ce cadre, une attention particulière sera portée à l'effet du vieillissement (90 jours), car la cinétique de la réaction pouzzolanique est souvent plus lente avec les ajouts riches en silice amorphe, tels que la PV. Selon Antoni et al. (2012), une amélioration significative de la résistance à long terme est observée, dépassant parfois celle des mélanges conventionnels à base de ciment pur. Les résultats obtenus permettront également de vérifier si le comportement mécanique des mélanges est comparable à celui d'autres ajouts, tels que les cendres volantes ou les fumées de silice, largement étudiés dans la littérature (Mehta, 1987; Khatib, 2008).

Torres et al. (2020) ont démontré qu'à 28 jours, l'ajout de 10 % de PV dans des matrices cimentaires pouvait améliorer la résistance à la compression jusqu'à 20 % par rapport à un mortier de référence sans ajout. Cependant, au-delà d'un certain taux de substitution, généralement supérieur à 20 %, la résistance mécanique diminue en raison d'une réduction de la teneur en ciment actif dans le mélange (Shi et al., 2015).

Pour des taux de substitution atteignant 30 %, une diminution de 8 % de la résistance à la compression a été constatée, ce qui s'explique par l'effet de dilution du ciment à des taux de substitution plus élevés (Ouldkhaoua et al., 2020).

De même, des réductions de résistance à la compression de 14,7 % (Das et al., 2024) et de 21% (Salahaddin et al., 2024) ont été rapportées entre le béton témoin et celui contenant 30 % de PV. Après 90 jours de cure, les travaux de Kadik et al. (2020) révèlent une baisse de 4,9 % et de 16 % de la résistance à la compression des bétons contenant respectivement 20 % et 30 % de PV comparativement au mélange témoin. Par ailleurs, une tendance générale a été observée dans d'autres études, où l'augmentation du contenu en PV entraîne initialement une baisse de 21 % de la résistance à la compression jusqu'à un taux de 10 %, suivie d'une diminution jusqu'à 23 % lorsque la teneur en PV passe de 10 % à 20 % (Zhou et al., 2024).

Ces résultats sont cohérents avec les travaux antérieurs, Aliabdo et al. (2016) ont constaté qu'une substitution de 10 % de ciment par de la poudre de verre améliorait la résistance à la compression du mortier d'environ 9 %. La résistance à la compression des coulis contenant 15 % de poudre de verre s'est avérée supérieure de 12 % par rapport aux coulis de référence (Yin et al., 2021). En outre, les meilleures valeurs de résistance à la compression ont été obtenues avec une substitution de 15 % du ciment par de la poudre de verre (Aliabdo et al., 2016). De manière différente (Deepa et al., 2022), ont mis en évidence une augmentation de la résistance à la compression des échantillons de béton contenant 30 % de poudre de verre comme substitut du ciment.

Les meilleures résistances à la compression obtenues à 90 jours sont celles des mélanges réalisées avec du sable concassé, qui présente des propriétés mécaniques optimales. Ce sable a un effet bénéfique en raison de sa forme angulaire qui donne une bonne adhérence ciment-granat par rapport au sable naturel. De même, Kothai et Malthy (2012) montrent une résistance à la compression élevée lorsque 30% du sable naturel ont été remplacés par du sable concassé dans le BAP.

Ces performances peuvent être attribuées à la formation d'un gel supplémentaire de silicate de calcium hydraté (CSH) résultant de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre. Ce gel CSH renforce la zone de transition interfaciale dans les échantillons de mortier contenant de la poudre de verre, ce qui augmente leur résistance mécanique. Lorsque la quantité excessive de poudre de verre ne trouve pas suffisamment de CH hydraté pour former un CSH plus dense, elle agit comme un simple filler inerte, entraînant une diminution des propriétés mécaniques de la matrice.

III.3.2 Effet de la PV sur la résistance à la traction par flexion

Les figures III.13 et III.14 mettent en évidence l'influence de la poudre de verre sur l'évolution des résistances à la traction des MAP confectionné par du sable naturel et par du sable concassé avec un rapport E/C=0.5 à 1, 3, 7, 28 et 90 jours.

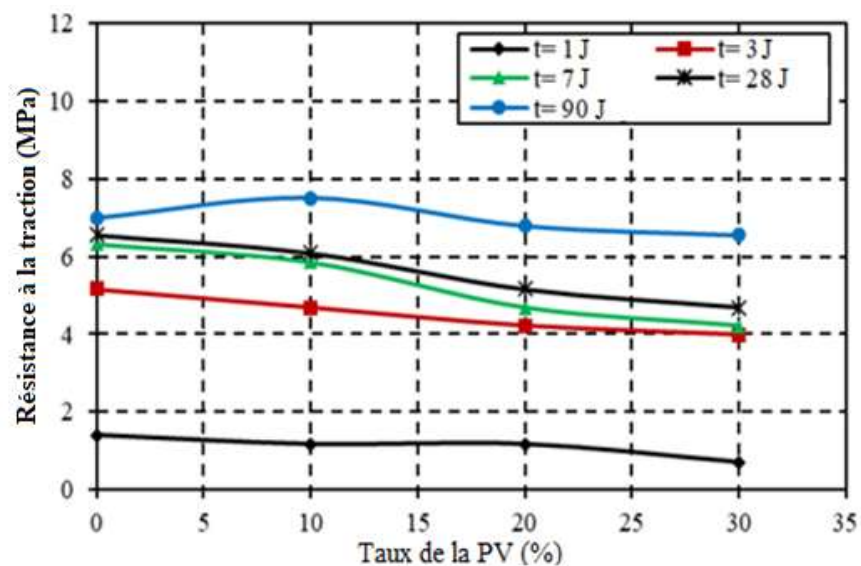


Figure III-13. Résistance à la traction des MAP à base de SN en fonction de %PV avec E/C=0.5

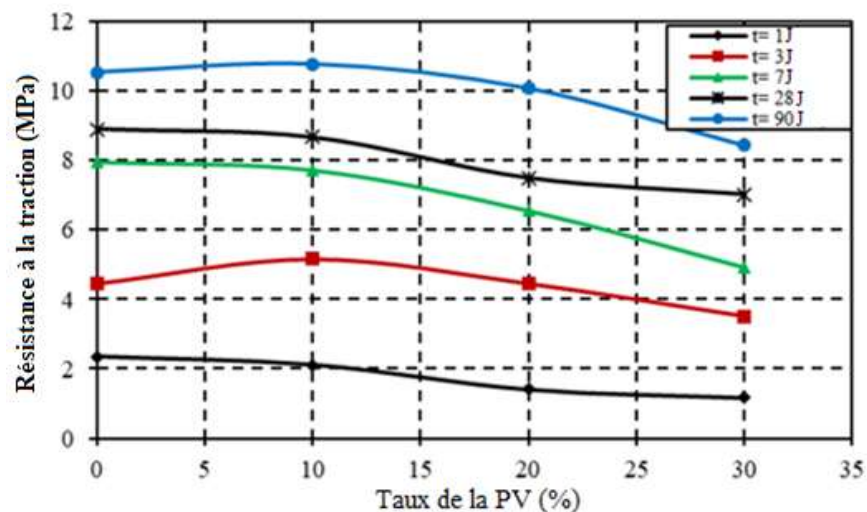


Figure III-14. Résistance à la traction des MAP à base de SC en fonction de %PV avec $E/C=0.5$

Les résultats montrent une augmentation générale de la résistance à la traction par flexion avec l'âge pour tous les mélanges. Les MAP formulé avec du sable concassé (SC) développent des résistances de 1,3 à 1,6 fois supérieures à celles des MAP à base de sable naturel (SN). L'incorporation de la poudre de verre (PV) dans la matrice cimentaire du MAP engendre une diminution des résistances, sauf pour un taux de 10 % de PV, principalement à long terme. Lorsque le MAP est formulé à base du SN, la présence de la poudre de verre a un effet négatif sur la résistance à la traction, comme l'indique la figure III.13. Cependant, à 90 jours, le MAP contenant 10 % de PV permet d'obtenir une résistance à la traction 5 % plus élevée que celle d'un mortier de référence sans PV, et ce pour les deux types de sables utilisés. Cette activité tardive de la poudre de verre confirme les résultats précédemment observés concernant son comportement pouzzolanique.

Au 1^{er} jour, une réduction de 50 % de la résistance a été mesurée pour les mortiers contenant 30 % de PV, et cela pour les deux types de sables. À 28 jours, cette diminution est réduite à 30 % et 20 % respectivement pour les MAP réalisés avec du sable naturel et du sable concassé.

Lorsque les MAP sont fabriquées avec du SC, les résistances à la traction restent proches de celles des MAP de référence sans PV comme illustré à la figure III.14. Néanmoins, un taux optimal de 10 % de PV permet d'atteindre des résistances significativement élevées, notamment à partir du troisième jour, où l'on observe une amélioration notable. Au-delà d'un taux de 10 %, une diminution progressive de la résistance est observée, particulièrement à long terme.

Ces résultats mettent en évidence que la résistance en traction des MAP dépend fortement du type de sable utilisé. Par exemple, les mortiers contenant du sable (SC) présentent des résistances supérieures à celles des mortiers élaborés avec du sable naturel. Benabed et al. (2014) ont constaté que l'utilisation de sable calcaire en comparaison avec du sable siliceux a un effet positif sur les résistances mécaniques des mortiers. Aux premiers âges (1 jour), les MAP conservent des résistances similaires à celles des mortiers de référence jusqu'à un taux de 20 % de PV, toutefois, au-delà de 7 jours de durcissement, une diminution de résistance est observée pour tous les types de sables. Cette baisse peut s'expliquer par une faible adhérence entre les particules de poudre de verre et la matrice

cimentaire, ce qui provoque des ruptures sous l'effet des charges appliquées. Ce comportement a été confirmé dans plusieurs études antérieures (Gokulnath et al., 2020; Vanjare et Mahure, 2012).

Dans la même optique, Kadik et al. (2020) ont constaté qu'un remplacement de 20 % ou 30 % du ciment par de la poudre de verre n'affecte pas le développement de la résistance en traction à long terme et tous les mélanges atteignant une résistance de 7,8 MPa. Une diminution de 2 %, 3,7 % et 6,75 % de la résistance à la traction a été rapportée pour des teneurs respectives en PV de 5 %, 10 % et 15 % (Vanjare et Mahure, 2012). À 28 jours, les résistances atteignent 8,5 MPa et 8 MPa respectivement pour les MAP a base du SC et du SN (Gokulnath et al., 2020).

Par ailleurs, Li et al. (2011) ont réalisé une étude comparative sur les performances mécaniques des bétons élaborés avec des sables calcaires concassés et des sables alluvionnaires. Les résultats ont montré une amélioration de la résistance en traction des mélanges à base de sables concassés. Cette amélioration s'explique, d'une part, par l'angularité des grains du sable concassé, qui favorise une meilleure adhérence entre le sable et la matrice cimentaire, et d'autre part, par la présence des particules fines qui comblent les micropores, conduisant à une densification de la microstructure de la pâte cimentaire (Wakchaure et al., 2012).

Enfin, le faible niveau de réaction pouzzolanique de la poudre de verre utilisée ne permet pas de compenser totalement la quantité de ciment remplacée. Les travaux antérieurs de l'analyse thermogravimétrique montrent que les mortiers contenant 20 % de PV présentent une diminution de 9,9 % de la teneur en portlandite (CH) et une augmentation de 42,6 % de la teneur en gel C-S-H entre 28 et 90 jours de durcissement, en raison d'une hydratation secondaire entre la poudre de verre et la portlandite (Qiong et al., 2022). De manière analogue, Kadik et al. (2020) ont montré que les bétons contenant 20 % et 30 % de PV présentent des teneurs en portlandite réduites de 34% et 43% respectivement par rapport au béton de référence sans PV. Ce comportement s'explique par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre, qui consomme la portlandite produite par l'hydratation du ciment pour former du C-S-H. Toutefois, cette activité pouzzolanique reste limitée, en raison de la faible finesse et de la composition chimique du verre utilisé dans cette étude.

III.3.3 Variation de l'indice d'activité pouzzolanique

Sur la base des résultats de résistance à la compression, l'activité pouzzolanique des mortiers à base de poudre de verre (PV) peut être estimée à l'aide de l'indice d'activité pouzzolanique (IAP), calculé selon l'équation (III.1) conformément à la norme ASTM C618 (2012).

$$IAP(p,t) = \frac{R_c(p,t)}{R_c(0,t)} 100\% \quad (III.1)$$

Dans cette équation, $R_c(p,t)$ et $R_c(0,t)$ représentent respectivement les résistances à la compression des mortiers contenant de PV et des mortiers sans PV, mesurées à un âge (t).

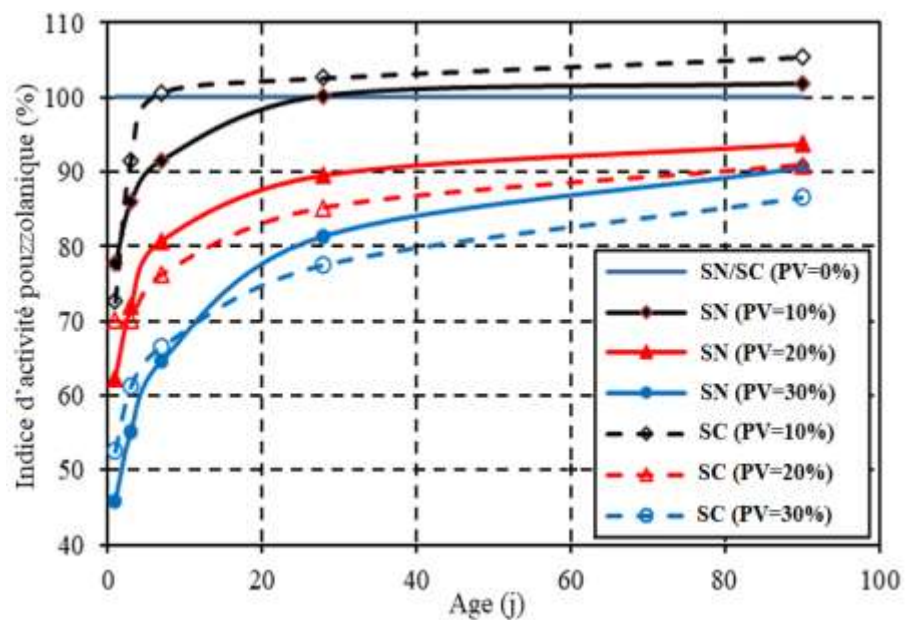


Figure III-15. Indice d'activité pouzzolanique en fonction de l'âge avec différentes %PV et E/C=0.5

Les résultats présentés dans la Figure III.15 illustre la variation de l'indice (IAP) en fonction de l'âge de cure. Les valeurs maximales de l'IAP ont été observées pour un taux de substitution de 10 % de PV après 7 jours de cure. À l'inverse, les valeurs les plus faibles de l'IAP ont été relevées aux premiers âges, notamment pour des taux de substitution élevés. De manière générale, des valeurs de de l'IAP plus élevées ont été obtenues aux âges de 28 et 90 jours, ce qui est conforme au comportement typique des ajouts pouzzolanique dans les mélanges de béton.

La Figure III.15 montre l'évolution de cet indice au fil du temps pour un mortier produit avec un E/C de 0,5, en comparant deux types de sables : un sable naturel (SN) et un sable concassé (SC). Lorsque le ciment est remplacé par 10 % de PV, l'IAP augmente rapidement et dépasse les 100 % dès le 7^{ème} jour pour les mortiers à base de SC, tandis qu'il atteint cette valeur après 28 jours pour ceux à base de SN. En revanche, pour des taux de substitution élevés, l'IAP reste inférieur à 100 %, même après 90 jours, et ce, quel que soit le type de sable utilisé.

Les mortiers réalisés avec le SN atteignent, au 90^{ème} jour, des valeurs de l'IAP respectivement de 105 %, 91 % et 86 % pour des taux de substitution de PV de 10 %, 20 % et 30 %. Cet indice est plus élevé pour les mortiers à base de SC, avec des valeurs respectives de 108 %, 98 % et 89 % pour les mêmes taux de substitution.

La PV, composé de minéraux siliceux amorphes, devient très actif après la réaction de prise du ciment, ce qui entraîne une augmentation de la concentration de chaux libre. Cette dernière déclenche la réaction pouzzolanique du PV, favorisant ainsi la production supplémentaire de C-S-H (silicate de calcium hydraté), qui contribue au durcissement de la pâte et à l'augmentation de la résistance mécanique.

D'après les résultats obtenus, les valeurs de l'IAP de l'ensemble des mélanges respectent l'exigence de la norme ASTM C618 (2012), qui stipule un IAP supérieur à 75 %. En général, des valeurs de l'IAP plus élevées ont été obtenues aux âges de 28 et 90 jours, ce qui est typique des matériaux cimentaires pouzzolanique utilisés en complément dans les mélanges de béton, comme c'est le cas du PV. Ces résultats corroborent les travaux précédents (Deepa et al. 2022, Patel et al. 2019).

III.4 Corrélation des résultats

III.4.1 Estimation de la variation d'étalement

Pour un mortier élaboré avec 55 % de sable concassé (SC), quel que soit le rapport E/C utilisé et contenant une proportion de poudre de verre (PV), le dosage en superplastifiant a été optimisé de manière à obtenir des étalements correspondant à ceux des mortiers autoplaçant (MAP). En appliquant la méthode des moindres carrés, une corrélation a été établie entre les diamètres d'étalement mesurés et ceux calculés à l'aide de plusieurs modèles empiriques en fonction des différents paramètres étudiés. La figure III.16 illustre la comparaison entre les valeurs expérimentales et celles prédites par la

relation suivante, où le coefficient de corrélation atteint $R^2=0,8674$, et l'erreur quadratique moyenne minimale obtenue est de 25 mm (c'est un modèle pour le MAP a base su SC).

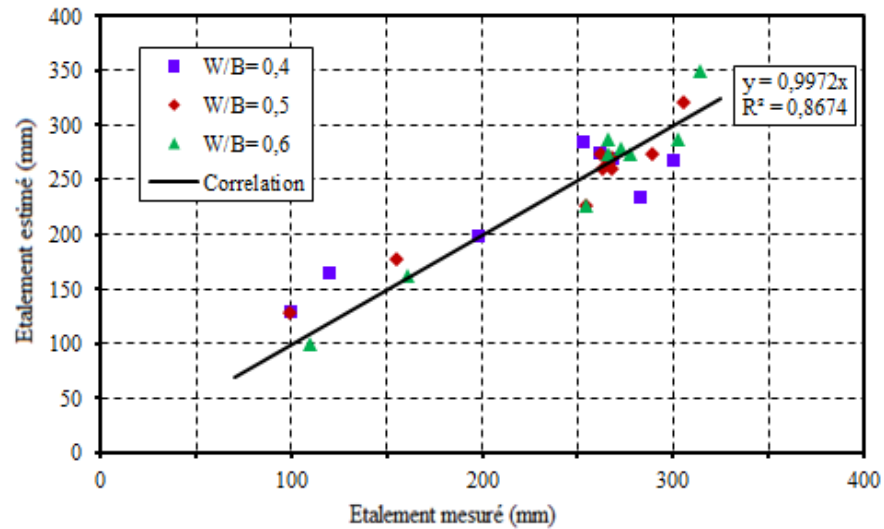


Figure III-16. Comparaison entre les valeurs d'étalement mesurées et estimées à l'aide de l'équation (III.2).

$$D = 430 (1+3.3 Sp-0.2 Sp^2) (0.5 \frac{E}{C} - 0.06) (1 +0.54 PV -2.2 PV^2) \quad (III.2)$$

Où :

D : représente le diamètre d'étalements (en mm) ;

Sp : désigne le dosage en superplastifiant ;

E/C : le rapport eau/ciment ;

PV : la teneur en poudre de verre.

Ces résultats confirment la fiabilité du modèle proposé pour prédire le comportement rhéologique des mortiers à base de sable concassé, en particulier lorsqu'une part importante de poudre de verre est utilisée comme addition cimentaire

Par ailleurs, les faibles écarts observés entre les valeurs expérimentales et théoriques mettent en évidence la fiabilité de cette approche pour la formulation de mortiers à hautes performances autoplaçant (Hwang et Khayat, 2019).

III.4.2 Estimation de la résistance à la traction

Pour une meilleure analyse de la variation de la résistance mécanique, il est pertinent d'établir une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction. Dans cette optique, la conversion de la résistance à la flexion en résistance à la traction directe devient indispensable. Cette conversion peut être réalisée en introduisant un coefficient de 0.6 permettant ainsi de prendre en compte la phase plastique qui intervient lors des essais de flexion (Neville, 1995). Plusieurs normes proposent des formules simplifiées pour établir cette corrélation, notamment la norme européenne EN 1992-1-1 (2004) :

$$R_t = 0.3 R_c^{2/3} \quad (\text{III.3})$$

Où : R_t et R_c représentent respectivement les résistances en traction et en compression.

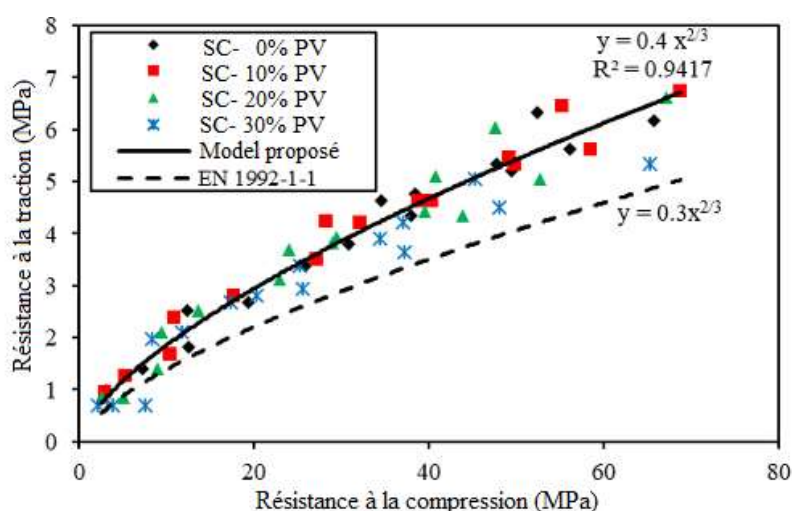


Figure III-17. Corrélation entre la résistance à la traction et celle à la compression d'un MAP à base du SC

La figure III.17 illustre l'évolution de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression, appliquée à un mortier élaboré à partir de sable concassé et de poudre de verre (0 %, 10 %, 20 % et 30 %). En comparant ces résultats à ceux prédits par le modèle EN 1992-1-1 (2004), on observe que les valeurs expérimentales dépassent les prévisions du modèle de 1 à 2 MPa. Cet écart reste faible pour des résistances faibles, mais s'amplifie à mesure que les résistances augmentent.

Il est possible d'adapter ce modèle en ajustant ses coefficients afin de tenir compte de la présence de sable SC et de poudre de verre (PV). Le modèle ainsi modifié peut être exprimé sous la forme suivante :

$$R_t = 0.3 R_c^{2/3} \quad \text{Ajustement} \rightarrow \quad R_t = 0.4 R_c^{2/3} \quad (\text{III.4})$$

Le modèle ainsi corrigé donne des valeurs de résistance à la traction supérieures de 33 % à celles fournies par le modèle initial, tout en maintenant un coefficient de corrélation proche de l'unité ($R^2=0,9417$). De plus, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) du modèle proposé est réduite à 0,37 MPa, contre une valeur supérieure à 1 MPa pour le modèle de référence EN 1992-1-1 (2004).

Ces résultats montrent que l'approche adoptée pour la correction du modèle est pertinente et offre une prédiction plus fiable des performances mécaniques des mortiers contenant du SC et de PV, conformément aux observations d'études antérieures sur les matériaux cimentaires alternatifs (Mehta & Monteiro, 2014).

III.4.3 Effet du rapport E/C sur de la résistance à la compression

Les résistances à la compression mesurées à 28 jours pour les mortiers confectionnés à base de sable concassé avec substitutions en PV sont présentées dans la figure III.18 pour les trois rapports (E/C : 0.4, 0.5 et 0.6).

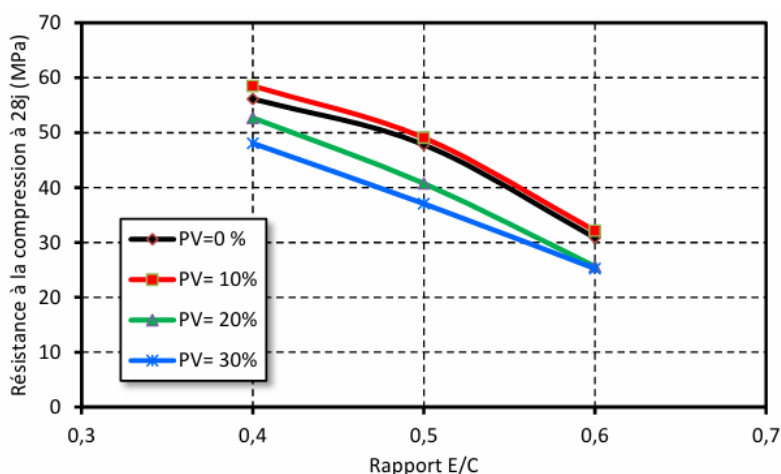


Figure III-18. Variation des résistances à la compression d'un MAP à base de sable concassé et de PV en fonction du rapport E/C

Il ressort clairement que l'augmentation du rapport E/C influe négativement sur le développement des performances mécaniques du mortier, un phénomène déjà largement documenté dans la littérature (Neville, 2011 ; Mehta & Monteiro, 2014). En effet, lorsque

le rapport E/C passe de 0,4 à 0,6, la résistance à la compression du mortier de référence diminue de 45 %, tandis que celles des mortiers incorporant respectivement 10 %, 20, % et 30 % de poudre de verre enregistrent des baisses de 43 %, 54 % et 55 %. Ces résultats montrent que l'incorporation de 10 % de poudre de verre permet de maintenir une évolution des résistances en fonction du rapport E/C comparable à celle du mortier sans ajout, tout en offrant des valeurs légèrement supérieures. Ces performances pourraient s'expliquer par l'effet pouzzolanique de la poudre de verre, qui contribue à une meilleure compacité de la matrice cimentaire et favorise le développement des silicates de calcium hydratés (C-S-H), comme indiqué par plusieurs études antérieures (Schneider et al., 2018; Shayan & Xu, 2006).

III.4.4 Estimation de la résistance à la compression

La résistance à la compression est une propriété dont l'équivalence doit toujours être prise en considération.

Dans cette étude, le modèle de Feret (1897) a été utilisé afin de prédire la résistance à la compression des mortiers contenant de la poudre de verre et du sable concassé. Ce modèle repose sur une fonction mathématique exprimée comme suit :

$$R_u = \frac{K_f}{[1 + \rho_c (1+y) \frac{E}{C}]^2} \quad (\text{III.5})$$

Où :

E/C : représente le rapport eau/ciment ;

ρ_c : désigne la masse volumique apparente du ciment ($\rho_c=3,1 \text{ g/cm}^3$) ;

y : est un coefficient dépendant de la consistance du béton. Pour une consistance fluide, la valeur de y est généralement fixée à 0.2, conformément aux recommandations de Baron et Olivier (1996) ;

Le coefficient K_f , quant à lui, dépend du squelette granulaire, de la classe du ciment ainsi que de la présence d'adjuvants ou d'ajouts minéraux.

Afin de mieux analyser l'évolution de la résistance à la compression au cours du temps, une relation fondée sur la norme ASTM C1074-93 (1993) a été adoptée pour

estimer les propriétés du béton selon l'approche de la maturité et qui suppose que la cinétique d'hydratation peut être exprimée par l'équation suivante :

$$R = R_u \frac{t - t_0}{(t - t_0) + t_{50}} \quad (\text{III.6})$$

Où :

R : représente la propriété étudiée (chaleur d'hydratation, retrait, résistance, etc..., ici, la résistance à la compression) ;

R_u : est la valeur ultime de cette propriété ;

t_0 : correspond à l'âge initial où la résistance commence à se développer (généralement proche de la fin de la prise, soit $t_0 \approx 0,25$ jours) ;

t_{50} : représente l'âge auquel 50% de la résistance ultime est atteinte en jours (âge de demi-résistance).

L'équation générale peut être écrite comme suit :

$$R(t) = \frac{K_f}{[1 + \rho_c (1+y) \frac{E}{C}]^2} \frac{t - t_0}{(t - t_0) + t_{50}} \quad (\text{III.7})$$

La corrélation des résultats par la méthode des moindres carrés permet d'estimer les valeurs de l'âge de demi-résistance t_{50} et de la résistance ultime R_u pour chaque taux de substitution de la poudre de verre et pour tous rapports eau/ciment. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.13.

Tableau III-13. La résistance ultime et l'âge de demi-résistance obtenus pour tous les mélanges en utilisant l'équation (III.6).

%PV		R_u (MPa)				t_{50} (j)			
		0	10	20	30	0	10	20	30
E/C	0.4	65.49	70.10	67.30	65.70	2.59	3.66	4.54	6.05
	0.5	55.53	58.85	50.73	48.38	4.12	4.96	6.06	7.21
	0.6	39.18	41.93	40.91	36.40	5.03	5.75	7.40	8.93

Selon les résultats obtenus, lorsque la poudre de verre remplace une partie du ciment, elle entraîne un gain de résistance qui atteint un optimum pour un taux de substitution d'environ 10 %. Bien que ce taux soit relativement faible, la poudre de verre se montre

active et, grâce à son effet pouzzolanique, compense le déficit de ciment en améliorant les performances mécaniques du mortier.

En fonction de la variation observée de la résistance ultime et de l'âge de demi-résistance, plusieurs relations ont été testées. Les coefficients de ces relations ont été déterminés par une régression linéaire des résultats expérimentaux. La relation obtenue dépend à la fois du taux de PV et du rapport E/C, et lorsqu'elle est introduite dans la formule de Feret, elle conduit à une expression générale sous la forme suivante :

$$R_c(t, P_v, \frac{E}{C}) = \frac{420 (1 + 0.8 P_v - 3.4 P_v^2)}{[1 + \rho_c (1 + y) \frac{E}{C}]^2} \frac{(t - t_0)}{7.1 \frac{E}{C} (1 + 3.4 P_v) + (t - t_0)} \quad (III.8)$$

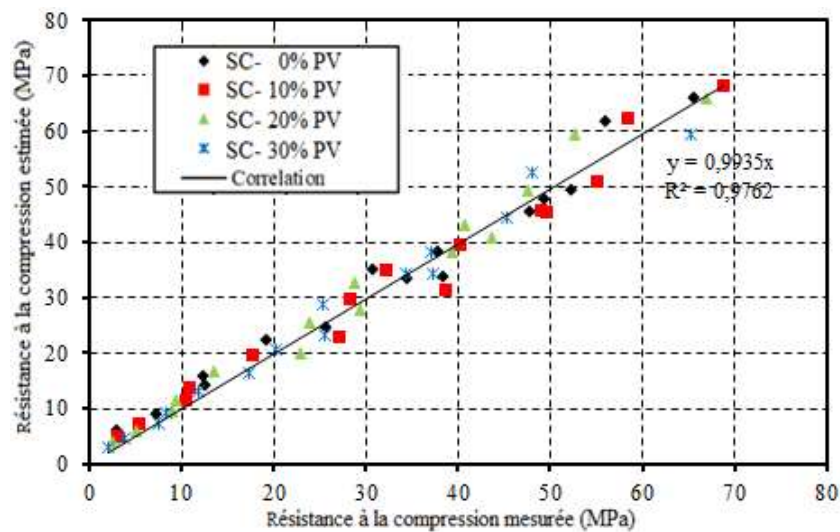


Figure III-19. Corrélation entre la résistance à la compression mesurée et estimée selon l'équation (III.8).

La Figure III.19 illustre la variation des résistances mesurées par rapport à celles estimées à l'aide de l'Équation (III.8), où le coefficient de corrélation atteint une valeur de 0,9762, témoignant ainsi de la pertinence du choix de cette relation. L'erreur quadratique moyenne demeure inférieure à 2,6 MPa pour l'ensemble des résultats. Cette relation s'avère donc particulièrement fiable pour les mortiers à base de SC.

III.5 CONCLUSION

Cette recherche a permis d'approfondir les connaissances sur les mortiers autoplaçant (MAP) intégrant de la poudre de verre comme ajout, en considérant différentes natures de sable. Il en ressort que l'utilisation de sable de concassage présente des avantages significatifs pour la formulation des MAP, offrant une maniabilité satisfaisante même à des taux de substitution élevés, pouvant atteindre 55% de volume du mortier. La présence de 10% de poudre de verre dans le mélange contribue également à améliorer l'ouvrabilité du mortier, avec un étalement supérieur à celui du mortier témoin, en particulier lorsqu'il est associé à des sables naturels. Cependant, dans le cas où on utilise le sable concassé, l'influence de la poudre de verre sur l'ouvrabilité demeure modeste, même pour des teneurs allant jusqu'à 20%.

Sur le plan des performances mécaniques, bien que les résistances initiales soient légèrement amoindries par l'ajout de poudre de verre, une amélioration notable est observée à partir de 28 jours, notamment pour un taux d'incorporation de 10%, ce qui suggère une cinétique de durcissement plus lente mais efficace à long terme. Ces résultats mettent en évidence le potentiel d'utilisation de la poudre de verre recyclée comme ajout minéral dans les formulations de mortiers autoplaçant, contribuant ainsi à une approche plus durable dans le secteur de la construction, en valorisant les déchets de verre et en réduisant la dépendance aux ressources naturelles.

**CONCLUSIONS GENERALES
ET RECOMMANDATIONS**

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Sur la base des résultats de cette étude expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le mortier composé de chaux et de poudre de verre (PV) est actif et produit des pâtes durcies. Cela prouve l'effet pouzzolanique de la poudre de verre, ce qui favorise son utilisation comme matériau cimentaire additionnel.
- La teneur en sable dans le mortier autoplaçant augmente de 40 % à 55 % lorsque le sable de carrière (SC) est utilisé à la place du sable naturel (SN). Le mortier à base de SC présente une meilleure fluidité avec un dosage acceptable de superplastifiant et une moindre teneur en ciment. Il semble plus économique et plus écologique que celui avec du sable SN.
- La présence de la PV contribue à améliorer l'ouvrabilité du MAP à base de sable naturel que celle du MAP à base de sable concassé. La substitution de 10 % de ciment par la PV entraîne une augmentation de l'étalement au mini cône de 280 mm à 284 mm pour le MAP à base de SN, et de 284 mm à 286 mm seulement pour le MAP à base de SC.
- Le mortier à base de SC présente des paramètres rhéologiques inférieurs à ceux du mortier à base de SN. Cette diminution peut s'expliquer par la quantité de poudre calcaire présente dans le SC, qui compense le déficit en grains fins. Pour un rapport E/C élevé et une teneur en PV de 20 %, la viscosité du mortier est la plus faible.
- La présence de PV retarde le dégagement de chaleur d'hydratation, où la courbe de flux est plus étalée avec un pic plus faible et une période dormante plus longue, donc, la PV diminue le pic de chaleur et retarde son apparition. Cela rend le mortier à base de PV plus performant dans les climats chauds et pour les éléments en béton massif.
- Jusqu'à 10 % de PV, une augmentation de 5% de la résistance mécanique à 90 jours est observée pour les mélanges réalisés avec du sable SC et SN. Les meilleures performances ont été obtenues pour les mélanges de MAP préparés avec du SC.

- Des relations mathématiques sont proposées pour exprimer l'effet du SC et du PV sur l'étalement au mini cône, la résistance en flexion et la résistance à la compression. L'application de ces relations aux résultats expérimentaux montre une grande fiabilité des résultats avec des coefficients de corrélation proches de l'unité et une faible erreur quadratique moyenne.
- La fabrication des mortiers autoplaçant à partir de déchets de verre et de carrières représente une solution innovante et durable répondant aux enjeux environnementaux actuels. En valorisant ces sous-produits, on réduit considérablement la quantité de déchets enfouis ou abandonnés dans la nature, tout en limitant l'exploitation et la consommation excessive des ressources naturelles. Cette démarche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire, favorisant à la fois l'utilisation de matériaux à faible coût, la préservation des ressources, la diminution de l'empreinte carbone (réduction des émissions de gaz à effet de serre) avec la promotion d'un secteur de la construction plus respectueux de l'environnement.

RECOMMANDATIONS

Dans la continuité des travaux réalisés dans le cadre de ce travail de recherche et sur la base des résultats intéressants trouvés, des travaux restent à mener dans plusieurs axes à savoir :

- Optimiser les formulations de matériaux cimentaires en intégrant des pourcentages précis d'additifs pouzzolanique ou recyclés (par exemple, 10 % de PV) pour équilibrer les performances mécaniques et la durabilité.
- Renforcer les études sur les impacts à long terme des matériaux innovants en simulant des conditions réelles, telles que les variations climatiques ou les agressions chimiques, pour valider leur durabilité et leur performance.
- Intégrer des méthodologies basées sur l'intelligence artificielle pour modéliser et optimiser les propriétés des matériaux cimentaires, réduisant ainsi les essais expérimentaux nécessaires et améliorant l'efficacité des formulations.
- Évaluer la durabilité à long terme des formulations innovantes en réalisant des essais approfondis sur la résistance aux attaques chimiques, comme les sulfates et les chlorures, dans des conditions simulées et réelles.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACI International Workshop on high Performance Concrete. "Self-compactable high performance concrete in Japan », Bangkok, Thailand, (1994).".
- Abdalla, A.H., Yahia, A., Tagnit-Hamou, A., 2020. "Statistical modeling of mechanical and transport properties of concrete incorporating glass powder." *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 10(2), 111-128.
- Adesina, A., Das, S., 2020. "Influence of glass powder on the durability properties of engineered cementitious composites." *Construction and Building Materials* 242, 118199.
- Ahmed, S. F. U. (2013). "Properties of concrete containing construction and demolition wastes and fly ash." *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(12): 1864-1870.
- Al Saffar, D.M., Tawfik, T.A., Tayeh, B.A., 2022. Stability of glassy concrete under elevated temperatures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 26(8), 3157-3168.
- Ali, M. H., et al. (2017). "Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20(2): 536-541.
- Aliabdo, A. A., et al. (2016). "Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete." *Construction and Building Materials* 124: 866-877.
- Almusaed, A., et al. (2023). "Assessing the role and efficiency of thermal insulation by the "Bio-Green Panel" in enhancing sustainability in a built environment." *Sustainability* 15(13): 10418.
- Almusaed, A., et al. (2023). "Reviewing and integrating aec practices into industry 6.0: Strategies for smart and sustainable future-built environments." *Sustainability* 15(18): 13464.
- Amin, M., Zeyad, A.M., Tayeh, B.A., Agwa, I.S., 2023. Effect of glass powder on high-strength self-compacting concrete durability. *Key Engineering Materials* 945, 117-127.
- Asaad, M.A., Jasim, A.M., SaadMahdi, F., Hussain, M.A., Habeeb, A.A., 2020. Performance of Green Concrete Comprising Waste Ceramic as a Fine Aggregate Replacement: Effect of Sulfuric Acid on Degradation Process. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology* 6, 31-37.
- Assaad, J. J. and K. H. Khayat (2006). "Effect of casting rate and concrete temperature on ASTM C1074-93 (1993), Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 7 p.
- ASTM C227-10 (2018), Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method). 5p.
- ASTM C618, (2012), Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org, 11p.
- ASTM C289-07 (2016), Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method) , 7p.

- Azevedo, F., et al. (2012). "Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes." *Construction and Building Materials* **34**: 186-191.
- Baikerikar, A., Mudalgi, S., Ram, V.V., 2023. Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of Eco-Friendly concrete. *Construction and Building Materials* **377**, 131078.
- Balasubramanian, B., et al. (2021). "Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic." *Construction and Building Materials* **278**: 122400.
- Bameri, M., Rashidi, S., Mohammadhasani, M., Maghsoudi, M., Madani, H., Rahmani, F., 2022. Evaluation of Mechanical and Durability Properties of Eco-Friendly Concrete Containing Silica Fume, Waste Glass Powder, and Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Advances in Materials Science and Engineering* 2022(1), 2730391.
- Barbhuiya, S. and B. B. Das (2023). "Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making." *Case studies in construction materials*: e02326.
- Belaidi, A. ((2013)). Contribution à l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels. Thèse de doctorat. Blida-Algerie, Université Saad Dahleb **Phd**: 1-192.
- Benabed, B. ((2014)). Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçant. Thèse de doctorat. Laghouat-Agerie, Université Amar Telidji 1-226.
- Bharathi, K., Adari, S., Pallepamula, U., 2022. Mechanical properties of self-compacting concrete using steel slag and glass powder. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* 7(1), 46.
- Blikharsky, Z., et al. (2021). "Properties of concretes incorporating recycling waste and corrosion susceptibility of reinforcing steel bars." *Materials* **14**(10): 2638.
- Borek, K., et al. (2022). "Cement bypass dust as an ecological binder substitute in autoclaved silica–lime products." *Materials* **16**(1): 316.
- Boucetta , T. A. ((2014)). Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçant et de hautes performances. Thèse de Doctorat Anaba-Algerie, Université Badji Mokhtar 1-210.
- Boukendakdji, O. ((2010)). Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires. Thèse de doctorat. Blida-Algerie, Université Saad Dahleb: 1-185.
- Boukhelf, F., et al. (2023). "Insight into the Behavior of Mortars Containing Glass Powder: An Artificial Neural Network Analysis Approach to Classify the Hydration Modes." *Materials* **16**(3): 943.
- Boukhelkhal, A., et al. (2016). "Effects of marble powder as a partial replacement of cement on some engineering properties of self-compacting concrete." *Journal of adhesion science and Technology* **30**(22): 2405-2419.
- BS EN 12350-10 (2010), Testing Self Compacting Concrete: L-Box Test, British Standard Int.
- Cao, Q., Han, B., Chen, L., Liu, Z., Yuan, Q., Zheng, K., 2023. Mitigation effect of glass powder on external sulfate attack and its relation to alkalinity of pore solution. *Construction and Building Materials* **370**, 130669.

- Cassagnabère, F., et al. (2010). "Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects." *Construction and Building Materials* **24**(7): 1109-1118.
- Chikhalikar, S. and S. Tande (2012). An experimental investigation on characteristics properties of fibre reinforced concrete containing waste glass powder as pozzolona. 37th Conference on our world in concrete and structures, Singapore.
- Daoud Atef , Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant: contribution à la modélisation numérique de l'interface, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, Juin 2003.
- Datta, S. D., et al. (2023). "Benefits and barriers of implementing building information modeling techniques for sustainable practices in the construction industry—A comprehensive review." *Sustainability* **15**(16): 12466.
- De Larrard, F. (2000). "Structures granulaires et formulation des bétons."
- Dimter, S., et al. (2022). "Evaluation of strength properties of sand stabilized with wood fly ash (WFA) and cement." *Materials* **15**(9): 3090.
- Dobiszewska, M., et al. (2022). "Influence of rock dust additives as fine aggregate replacement on properties of cement composites—a review." *Materials* **15**(8): 2947.
- Domone, P. (2006). "Mortar tests for material selection and mix design of SCC." *Concrete International* **28**(4): 39-45.
- Domone, P. and J. Jin (1999). Properties of mortar for self-compacting concrete. Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete.
- Dreux, G. and J. Festa (1998). *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Eyrolles.
- Du, H. and K. H. Tan (2017). "Properties of high volume glass powder concrete." *Cement and Concrete Composites* **75**: 22-29.
- Ducman et al. (2002) "Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali–silica reactivity" *Cement and Concrete Research* **32** (2) 223–226
- EFNARC, (2005), *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete.* Specification, Production and Use. 1-68.
- Elaqra, H. A., et al. (2019). "Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete." *Construction and Building Materials* **203**: 75-82.
- Elaqra, H. and R. Rustom (2018). "Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste." *Construction and Building Materials* **179**: 326-335.
- Elaqra, H.A., Al-Afghany, M.J., Abo-Hasseira, A.B., Elmasry, I.H., Tabasi, A.M., Alwan, M.D., 2019b. Effect of immersion time of glass powder on mechanical properties of concrete contained glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials* **206**, 674-682.
- Esmaeili, J. and A. O. AL-Mwanes (2021). "A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement." *Materials Today: Proceedings* **42**: 1958-1965.
- Eze, E. C., et al. (2021). "Determinants of sustainable building materials (SBM) selection on construction projects." *International Journal of Construction Supply Chain Management* **11**(2): 166-194.

- Felekoğlu, B., et al. (2007). "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete." *Building and environment* **42**(4): 1795-1802.
- Fitriani, H. and S. Ajayi (2023). "Barriers to sustainable practices in the Indonesian construction industry." *Journal of Environmental Planning and Management* **66**(10): 2028-2050.
- Ghrici, M., et al. (2007). "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements." *Cement and Concrete Composites* **29**(7): 542-549.
- Gupta, J., et al. (2022). "Evaluating long term properties of concrete using waste beverage glass." *Materials Today: Proceedings* **61**: 297-306.
- Han, W., et al. (2016). "Using of borosilicate glass waste as a cement additive." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **381**: 11-15.
- Hans-Erik, G. and P. Pentti (1999). Properties of SCC-especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete. Stockholm: RILEM Publications SARL.
- Hassani, M. S., et al. (2023). "Green Concrete with Glass Powder—A Literature Review." *Sustainability* **15**(20): 14864.
- He, Z.-h., Zhan, P.-m., Du, S.-g., Liu, B.-j., Yuan, W.-b., 2019. Creep behavior of concrete containing glass powder. *Composites Part B: Engineering* **166**, 13-20.
- Himanen, L., et al. (2019). "Data- driven materials science: status, challenges, and perspectives." *Advanced Science* **6**(21): 1900808.
- Hossain, M. U., et al. (2020). "Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **130**: 109948.
- Huseien, G. F., et al. (2020). "Alkali-activated mortars blended with glass bottle waste nano powder: Environmental benefit and sustainability." *Journal of Cleaner Production* **243**: 118636.
- Ibrahim et Meawad (2018) "Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials" *Construction and Building Materials* **182** (2018) : 451–458
- Irki, I., et al. (2017). "Effect of the length and the volume fraction of wavy steel fibers on the behavior of self-compacting concrete." *Journal of Adhesion Science and Technology* **31**(7): 735-748.
- Islam, G. S., et al. (2017). "Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice." *International Journal of Sustainable Built Environment* **6**(1): 37-44.
- Jain, K. L., et al. (2020). "Durability performance of waste granite and glass powder added concrete." *Construction and Building Materials* **252**: 119075.
- Jani, Y., Hogland, W., 2014. Waste glass in the production of cement and concrete—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2**(3), 1767-1775.
- Jura, J. and M. Ulewicz (2021). "Assessment of the possibility of using fly ash from biomass combustion for concrete." *Materials* **14**(21): 6708.
- Kalak, T., et al. (2023). "Modification of concrete composition doped by sewage sludge fly ash and its effect on compressive strength." *Materials* **16**(11): 4043.

- Kamali, M. and A. Ghahremaninezhad (2016). "An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders." *Construction and Building Materials* **112**: 915-924.
- Khan, F.A., Shahzada, K., Ullah, Q.S., Fahim, M., Khan, S.W., Badrashi, Y.I., 2020. Development of environment-friendly concrete through partial addition of waste glass powder (WGP) as cement replacement. *Civil Engineering Journal* 6(12), 2332-2343.
- Khan, M.N.N., Kuri, J.C., Sarker, P.K., 2022. Sustainable use of waste glass in alkali activated materials against H₂SO₄ and HCl acid attacks. *Cleaner Engineering and Technology* 6, 100354.
- Kavitha, O., et al. (2016). "Microstructural studies on eco-friendly and durable self-compacting concrete blended with metakaolin." *Applied Clay Science* **124**: 143-149.
- Khatib, J., et al. (2012). "Glass powder utilisation in concrete production." *European Journal of Applied Sciences* **4**(4): 173-176.
- Kostrzewa-Demczuk, P., et al. (2023). "Influence of Waste Basalt Powder Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Autoclave Brick." *Materials* **16**(2): 870.
- Kumarappan, N. (2013). "Partial replacement cement in concrete using waste glass." *International Journal of Engineering Research and Technology* **2**(10): 1880-1883.
- Lai, M., Lu, Z., Luo, Y., Ren, F., Cui, J., Wu, Z., Ho, J., 2024. Pre-and post-fire behaviour of glass concrete from wet packing density perspective. *Journal of Building Engineering* 86, 108758.
- Lamb, W. F., et al. (2021). "A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018." *Environmental research letters* **16**(7): 073005.
- Lee, G., et al. (2011). "Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks." *Construction and Building Materials* **25**(5): 2611-2618.
- Li, A., et al. (2021). "Study on the performance of pervious concrete mixed with waste glass powder." *Construction and Building Materials* **300**: 123997.
- Li, S., Zhang, J., Du, G., Mao, Z., Ma, Q., Luo, Z., Miao, Y., Duan, Y., 2022. Properties of concrete with waste glass after exposure to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering* 57, 104822.
- Ling, T.-C. and C.-S. Poon (2011). "Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes." *Materials & Design* **32**(5): 2675-2684.
- Ling, T.-C. and C.-S. Poon (2011). "Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar." *Journal of hazardous materials* **192**(2): 451-456.
- Ling, T.-C. and C.-S. Poon (2014). "Use of CRT funnel glass in concrete blocks prepared with different aggregate-to-cement ratios." *Green Mater* **2**(GMAT1): 43-51.
- Ling, T.-C. and C.-S. Poon (2014). "Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks." *Journal of Cleaner Production* **68**: 209-215.
- Lu, J.-x., et al. (2017). "Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet." *Construction and Building Materials* **131**: 793-799.
- M. El Barak, C. d. l. é. d. l. a. à l. é. d. b. a. à l. é. f., thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2005.

- Mahajan, L. S. and S. R. Bhagat (2022). Utilization of Pozzolan Material and Waste Glass Powder in Concrete. *Recent Trends in Construction Technology and Management: Select Proceedings of ACTM 2021*, Springer: 201-206.
- Mardani-Aghabaglou, A., et al. (2014). "Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point." *Construction and Building Materials* **70**: 17-25.
- Medine, M. ((2018)). Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage Des pneus usés. Département de Génie Civil. Sdi Bel-Absse -Algérie, Université Djillali Liabès.
- Mihelcic, J. R. and J. B. Zimmerman (2021). *Environmental engineering: Fundamentals, sustainability, design*, John wiley & sons.
- Mohammed, A., et al. (2020). "Vipulanandan constitutive models to predict the rheological properties and stress–strain behavior of cement grouts modified with metakaolin." *Journal of Testing and Evaluation* **48**(5).
- Muduli, R. and B. B. Mukharjee (2020). Characteristics of Concrete Prepared with Metakaolin and Recycled Coarse Aggregates. *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering*, Springer: 73-85.
- Muradyan, N. G., et al. (2023). "The Use of Biosilica to Increase the Compressive Strength of Cement Mortar: The Effect of the Mixing Method." *Materials* **16**(16): 5516.
- Nassif, H. H., et al. (2005). "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC." *Cement and Concrete Composites* **27**(6): 661-670.
- Nawa, T. (1999). State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete. Proc. of the International Workshop on Self-Compacting Concrete.
- Neithalath et Schwarz (2009) "Properties of Cast-In-Place Concrete and Precast Concrete Blocks Incorporating Waste Glass Powder" *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2009, Volume 3 43
- EN 196-1 (2016). Methods of testing cement - Determination of strength, 35p
- NF EN 1008 (Juill. 2003), 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, 19p.
- NF EN 1015-11, (2019). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci, 17p.
- NF EN 196-9 (2010). Methods of testing cement - Part 9: Heat of hydration – Semi-adiabatic method", 11p.
- Ninduwezuor-Ehiobu, N., Tula, O.A., Daraojimba, C., Ofonagoro, K.A., Ogunjobi, O.A., Gidiagba, J.O., Egbokhaebho, B.A., Bansa, A.A., 2023. Exploring innovative material integration in modern manufacturing for advancing us competitiveness in sustainable global economy. *Engineering Science & Technology Journal* **4**(3), 140-168.
- Ninduwezuor-Ehiobu, N., et al. (2023). "Exploring innovative material integration in modern manufacturing for advancing us competitiveness in sustainable global economy." *Engineering Science & Technology Journal* **4**(3): 140-168.
- Nwokediegwu, Z. Q. S., et al. (2024). "Advanced materials for sustainable construction: A review of innovations and environmental benefits." *Engineering Science & Technology Journal* **5**(1): 201-218.

- Okamura, H. and M. Ouchi (1999). Self-compacting concrete. Development, present use and future. Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium, Rilem Publications Cachan Cedex, France.
- Okamura, H. and M. Ouchi (2003). "Self-compacting concrete." *Journal of advanced concrete technology* **1**(1): 5-15.
- Okamura, H. and M. Ouchi (2003). "Self-compacting concrete—*Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1."
- Okamura, H. and K. Ozawa (1995). "Mix design for self-compacting concrete." *Concrete library of JSCE* **25**(6): 107-120.
- Okogwu, C., et al. (2023). "Exploring the integration of sustainable materials in supply chain management for environmental impact." *Engineering Science & Technology Journal* **4**(3): 49-65.
- Olejarczyk, M., et al. (2022). "Management of solid waste containing fluoride—a review." *Materials* **15**(10): 3461.
- Olofinnade, O.M., Ede, A.N., Ndambuki, J.M., Innovation, T., 2017. Experimental investigation on the effect of elevated temperature on compressive strength of concrete containing waste glass powder. *International Journal of Engineering and Technology Innovation* **7**(4), 280-291.
- Omar, N. H. E. and A. H. E. Omar (2023). "Towards applying the global roadmap for technology development for zero energy projects." *International Journal of Advanced Engineering and Business Sciences* **4**(1): 139-162.
- Omar, T. ((2017)). Etude de comportement rhéologiques des bétons autoplaçant Locaux Thèse de doctorat. Telmcen-Algérie, Université Aboubakr Belkaid 145.
- Ouldkaoua, Y. ((2020)). Développement des eco-bétons autoplaçant a base des co-produits et déchets : caractérisation et performance. Thèse de doctorat. Laghouat -Algérie, Université Amar Telidji 240.
- Patel, D., et al. (2019). "Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar." *Construction and Building Materials* **199**: 406-415.
- Persson, B. (2001). "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete." *Cement and Concrete Research* **31**(2): 193-198.
- Pietrzak, A. and M. Ulewicz (2023). "Influence of post-consumer waste thermoplastic elastomers obtained from used car floor mats on concrete properties." *Materials* **16**(6): 2231.
- Rahla, K. M., et al. (2021). "Selection criteria for building materials and components in line with the circular economy principles in the built environment—A review of current trends." *Infrastructures* **6**(4): 49.
- Rashad, A. M. (2014). "Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement." *Construction and Building Materials* **72**: 340-357.
- Rehman et al (2018) "Combined influence of glass powder and granular steel slag on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete" *Construction and Building Materials* **178** (18) 153–160
- Röck, M., et al. (2020). "Embodied GHG emissions of buildings—The hidden challenge for effective climate change mitigation." *Applied energy* **258**: 114107.

- Sawant, V. G. (2018). "Experimental Investigation of Waste Glass Powder as the Partial Replacement of Sand in Making Concrete." *Iconic Res. Eng. J* **1**: 7-9.
- Shalan, A.H., El-Gohary, M.M., 2022. Long-term sulfate resistance of blended cement concrete with waste glass powder. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* **27**(4), 04022047.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., Rodriguez, D. (2000). "Studies on concrete containing ground waste glass." *Cement and Concrete Research* **30**(1): 91-100.
- Sharifi, Y., et al. (2013). "Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete." *Frontiers of Structural and Civil Engineering* **7**(4): 419-428.
- Shayan, A. and A. Xu (2004). "Value-added utilisation of waste glass in concrete." *Cement and Concrete Research* **34**(1): 81-89.
- Shi, C., et al. (2011). "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement." *Cement and Concrete Research* **41**(7): 750-763.
- Shi et al. (2004) "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders" *Cement and Concrete Research* **35** (5): 987-993.
- Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., Hossain, K.M.A., 2016. Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials* **113**, 163-173.
- Sonebi, M. and P. J. Bartos (2002). "Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete." *Materials and structures* **35**: 462-469.
- Soroushian, P. (2012). "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement." *Construction and Building Materials* **29**: 368-377.
- Sousa, M. I. C. and J. H. da Silva Rêgo (2020). Mechanical Strength Analysis of Ternary Cement Pastes Containing Nanosilica and Metakaolin. *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete*, Springer.
- Sufian, M., et al. (2021). An Experimental and Empirical Study on the Use of Waste Marble Powder in Construction Material. *Materials* **2021**, *14*, 3829, s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published
- Taha, B. and G. Nounu (2008). "Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors." *Cement and Concrete Composites* **30**(6): 497-505.
- Tang, Z., Li, W., Li, P., Shah, S., 2020. Durability of Sustainable Construction Materials with Solid Wastes, *ACMSM25: Proceedings of the 25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials*. Springer, pp. 3-13.
- Tariq, S., Scott, A.N., Mackechnie, J.R., Shah, V., 2020. Durability of high volume glass powder self-compacting concrete. *Applied Sciences* **10**(22), 8058.
- Tobes, J., et al. (2007). Effect of sand particle size distribution on fluidity and passing ability of highly flowable mortars. *Proceeding of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete*.
- Turkey, F.A., Beddu, S.B., Ahmed, A.N., Al-Hubboubi, S.K., 2022. Effect of high temperatures on the properties of lightweight geopolymers based fly ash and glass powder mixtures. *Case Studies in Construction Materials* **17**, e01489.
- Ulewicz, M. (2023). *Recycled Materials in Civil Engineering Application*, MDPI. **16**: 7075.

Vandhiyan, R., et al. (2013). "Experimental study on replacement of cement by glass powder." *Int. J. Eng. Res. Technol* **2**(5): 234-238.

Vasudevan, G. and S. G. K. Pillay (2013). "Performance of using waste glass powder in concrete as replacement of cement." *Am. J. Eng. Res* **2**(12): 175-181.

Xiao, J., et al. (2005). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading." *Cement and Concrete Research* **35**(6): 1187-1194.

Xiao, Y., et al. (2023). "Study on Alkali-Activated Prefabricated Building Recycled Concrete Powder for Foamed Lightweight Soils." *Materials* **16**(11): 4167.

Zhan, P.-m., et al. (2022). "Strength, microstructure and nanomechanical properties of recycled aggregate concrete containing waste glass powder and steel slag powder." *Journal of Cleaner Production* **341**: 130892.

Zhao, T., et al. (2023). "Effect of Glass Fiber-Reinforced Plastic Waste on the Mechanical Properties of Concrete and Evaluation of Its Feasibility for Reuse in Concrete Applications." *Materials* **16**(20): 6772.

ANNEXES

Annexe A : Fiche technique du superplastifiant (MEDAFLOW 30)

NOTICE TECHNIQUE

Version 03

Edition février 2017

2

1

1

9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme NA 774 , NA 5102 et NA 5075

Super plastifiant-haut réducteur d'eau

Description

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de Polycarboxylates d'Ether qui améliore considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet de retard de prise.

Domaines D'application

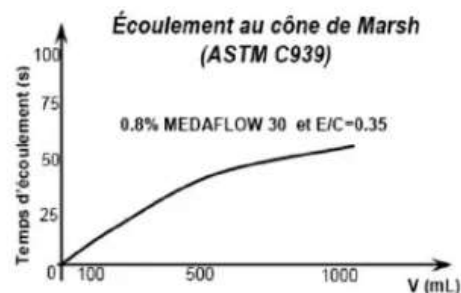
- Les bétons de préfabrication.
- Les bétons prêts à l'emploi.
- Les bétons lourds et légers.
- Les bétons d'ouvrages d'art.
- Les bétons de dallages industriels.
- Les bétons de bâtiment.
- Les bétons précontraints.
- Les bétons pompés.
- Les bétons pour fondations profondes.
- Les bétons pour ouvrages fortement ferrailés.
- Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- Les BHP, BTHP, BUHP et BFUP
- Les bétons autonivelants - bétons autoplaçants.
- Les bétons architectoniques.

Propriétés

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

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



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

Caractéristique

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1, 07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

Mode D'emploi

Le **MEDAFLOW 30** ne doit pas être ajouté directement dans l'eau de gâchage, mais après un temps préalable de malaxage et après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Le **MEDAFLOW 30** peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), et après introduction de la dose convenable, le malaxeur devra tourner à grande vitesse pendant 2 à 3 minutes après l'introduction du super plastifiant ;

Il est conseillé d'ajouter le **MEDAFLOW 30** à un béton qui ne soit pas trop ferme

Dosage :

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés

Conditionnement Et Stockage

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubique 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

Précautions D'emploi

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

NB : La couleur des produits à base de Polycarboxylates d'Ether (PCE) lors d'une exposition aux UV, est sujette à changer de ton , mais qui n' a aucune incidence sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en **22 AVR 2012**

Annexe B : Exemple de calcul de la composition du mortier autoplaçant

B.1/ Méthode et Formules de Calcul

B.1.1/ Calcul des quantités de chaque constituant

B.1.1.1/ Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment %C :

$$\%C_{vol} = \frac{(1-S/M)}{(1+E/C_{par\ volume})} * 100$$

La quantité de ciment *C* en kg :

$$C(kg) = \frac{V \times \%C_{vol}}{100} \times \rho_c$$

B.1.1.2/ Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

$$S(kg) = \left(1 - \frac{Absorption}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S/M \times \rho_s}{100}\right)$$

Le sable utilisé est à l'état sec, donc son humidité est nulle.

B.1.1.3/ Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est *Sp* :

$$Sp(kg) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

B.1.1.4/ L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties : une première partie E_1 , qui est de 60% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E_2 (40% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : $\%E_{vol}$

$$\%E_{vol} = \frac{(1-S/M) \times 100 \times E/C_{par\ volume}}{(1+E/C_{par\ volume})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \%E_{vol}}{100} \times \frac{\rho_E}{1000} \right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100} \right) + \left(\frac{V \times S/M \times \rho_s}{1000} \times \frac{Absorption}{100} \right)$$

Eau1 $E_1 = E \times 0.60$

Eau2 $E_2 = E \times 0.40$

B.2/ Résultats pour chaque MAP

B.2.1/ MAP à base du sable concassé

B.2.1.1/ Données

Pour un volume du mortier de $V=1.00 \text{ l}$

- Les masses volumiques absolues des constituants :
 - Ciment : $\rho_C=3100 \text{ kg/m}^3$
 - Sable : $\rho_S=2670 \text{ kg/m}^3$
 - Superplastifiant : $\rho_{Sp}=1070 \text{ kg/m}^3$
 - Eau : $\rho_E=1000 \text{ kg/m}^3$
- Taux d'absorption du sable $A_b=2.1$
- Rapport Sable/Mortier $S/M=0.55$
- Rapport (par poids) $E/C=0.50$ ou (par volume) $E/C=1.55$
- Le superplastifiant -MEDAFLOW 30- est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $\%Sp=0.8 \%$ du poids de ciment.

B.2.1.2/ Résultats

Tableau B-1. Feuille Excel donnant composition du mortier MAP (SC).

Essais sur Mortier				valeurs données dans cellules en rouge			
				valeurs calculées dans cellules en noir			
				Date : 12/03/2019			
Référence : MAP (SC)							
Données :							
volume de mortier (litres)	1,00						
sable/mortier vol	0,55						
E/C vol	1,550						
% ciment vol	17,65						
% Eau vol	27,35						
E/C	0,5000						
Ciment CEM II 42,5 sans ajout	100						
% Sp/C (MEDAFLOW30)	0,8						
	absorption (%)	correction (%)					
humidité sable	2,10	-2,10					
Résultats :							
Materiaux/Type	vol	densité	poid mélange	contenance d'eau		poid mélange	poid mélange
	litres	kg/m ³	kg	%	kg	kg	final g
ciment	0,176	3100	0,547			0,547	C 547,06
Eau	0,274	1000	0,274			0,301	E1 180,78
							E2 120,52
superplast (MEDAFLOW30)		1070	0,004	70	0,003	0,004	Sp 4,38
Sable	0,550	2670	1,469	-2,1	-0,031	1,438	S 1437,66
Total	1,000					2,290	

B.2.2/ MAP à base du sable naturel

B.2.2.1/ Données

Pour un volume du mortier de $V=1.00 \text{ l}$

- Les masses volumiques absolues des constituants :
 - Ciment : $\rho_C=3100 \text{ kg/m}^3$
 - Sable : $\rho_S=2650 \text{ kg/m}^3$
 - Superplastifiant : $\rho_{Sp}=1070 \text{ kg/m}^3$
 - Eau : $\rho_E=1000 \text{ kg/m}^3$
- Taux d'absorption du sable $A_b= 1.8$
- Rapport Sable/Mortier $S/M = 0.40$
- Rapport (par poids) $E/C = 0.50$ ou (par volume) $E/C=1.55$
- Le superplastifiant -MEDAFLOW 30- est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $\%Sp = 0.6 \%$ du poids de ciment.

B.2.1.2/ Résultats

Tableau B-2. Feuille Excel donnant composition du mortier MAP (SN).

Essais sur Mortier				valeurs données dans cellules en rouge				
				valeurs calculées dans cellules en noir				
				Date : 13/03/2019				
Référence : MAP (SC)								
Données :								
volume de mortier (litres)	1,00							
sable/mortier vol	0,4							
E/C vol	1,550							
% ciment vol	23,53							
% Eau vol	36,47							
E/C	0,5000							
Ciment CEM II 42,5 sans ajout	100							
% Sp/C (MEDAFLOW30)	0,6							
		absorption (%)	correction (%)					
humidité sable	1,80		-1,80					
Résultats :								
Materiaux/Type	vol	densité	poid mélange	contenance d'eau		poid mélange	poid mélange	
	litres	kg/m ³	kg	%	kg	kg	final g	
ciment	0,235	3100	0,729			0,729	C	729,41
Eau	0,365	1000	0,365			0,381	E1	228,43
							E2	152,29
superplast (MEDAFLOW30)		1070	0,004	70	0,003	0,004	Sp	4,38
Sable	0,400	2650	1,060	-1,8	-0,019	1,041	S	1040,92
Total	1,000					2,155		