



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat Es-Sciences

PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES ET DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS À BASE DE GRANULATS D'ARGILE EXPANSÉE AMÉLIORÉS PAR ENROBAGES CIMENTAIRES

Option

Matériaux de construction

Par

DROUNA Karima

Devant le jury

PRÉSIDENT	BEHIM Mourad	Pr	Université Badji Mokhtar – Annaba
RAPPORTEUR	ALI BOUCETTA Tahar	MCA	Université Badji Mokhtar – Annaba
CO- RAPPORTEUR	MENADI Souad	MCA	Université Badji Mokhtar – Annaba
EXAMINATEUR	NAFA Zahreddine	Pr	Université 8 Mai 1945 – Guelma
EXAMINATEUR	BENOUIS Abdelhalim	Pr	Université 8 Mai 1945 – Guelma
EXAMINATEUR	DERABLA Riad	MCA	Université 20 Août 1955 – Skikda

*Je dédie ce modeste travail à l'âme de mon cher défunt,
à la lumière qui a toujours éclairé mon chemin,
à mon ange gardien...*

*À mon cher père **DROUNA BOUZID**,
que Dieu, le Tout-Puissant, lui accorde le paradis éternel.*

Ta fille, Karima

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu le Tout-Puissant, source de force, de patience et de volonté, qui m'a permis de mener à terme ce travail de recherche.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma haute considération à mon directeur de thèse, **M. Tahar ALI BOUCETTA**, pour son accompagnement constant, ses orientations éclairées et sa bienveillance. Son soutien indéfectible et ses précieux conseils ont largement contribué à la réalisation et à l'aboutissement de cette thèse.*

*J'adresse mes sincères remerciements aux éminents membres du jury, **M. BEHIM Mourad**, **M. NAFA Zahreddine**, **M. BENOUIS Abdelhalim** et **M. DERABLA Riad**, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail, de l'enrichir par leurs observations pertinentes et de contribuer ainsi à son amélioration.*

*Je souhaite également témoigner toute ma reconnaissance à celles et ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide et leur soutien tout au long de ce parcours. J'ai une pensée particulière pour **M. Walid MAHERZI** de l'IMT Lille (France), dont la précieuse contribution a été d'une grande valeur pour l'avancement de mes recherches.*

Enfin, mes remerciements les plus chaleureux vont à ma chère famille, pour son soutien indéfectible, ses encouragements constants et sa présence bienveillante, qui ont constitué pour moi une source inestimable de motivation tout au long de cette aventure scientifique.

DROUNA Karima

RÉSUMÉ

Les bétons autoplaçants légers (BAPL) constituent une catégorie de matériaux innovants qui associent la maniabilité et la facilité de mise en œuvre, ces bétons aux avantages de légèreté liés à l'utilisation de granulats légers d'argile expansée (GLAE). Grâce à leur faible masse volumique, présentent un intérêt particulier pour les structures où la réduction du poids propre est un enjeu majeur.

Cependant, leur développement à l'échelle structurelle demeure limité par deux contraintes principales liées aux GLAE : leur forte capacité d'absorption d'eau et leur résistance mécanique relativement faible par rapport aux granulats naturels. Ces caractéristiques entraînent une diminution de l'ouvrabilité, une perte de compacité de la matrice cimentaire et, par conséquent, une baisse des performances mécaniques et de la durabilité des BAPL. Pour répondre à cette problématique, la présente thèse explore deux leviers complémentaires : d'une part, le conditionnement en humidité et l'enrobage des GLAE par des pâtes cimentaires optimisées, et d'autre part, l'incorporation d'additions minérales réactives notamment la poudre de verre (PV) et le laitier granulé (LG) en remplacement du filler calcaire conventionnel dans les formulations de BAPL. L'objectif est de limiter l'absorption d'eau, d'améliorer la résistance mécanique des granulats, de densifier la microstructure et de renforcer la zone de transition interfaciale.

Les résultats montrent que l'enrobage des GLAE réduit significativement leur porosité et leur absorption d'eau, tout en améliorant leur résistance. L'association avec des additions réactives accroît encore ces bénéfices : la PV et le LG favorisent la formation de produits d'hydratation secondaires (C-S-H, C-A-S-H) qui densifient la matrice cimentaire, réduisent la perméabilité et renforcent la durabilité. Les BAPL obtenus présentent ainsi une meilleure ouvrabilité, une stabilité accrue, des résistances mécaniques en nette progression et une résistance élevée à la carbonatation accélérée.

Mots clés : Béton autoplaçant léger, granulats légers d'argile expansée, conditionnement en humidité, enrobage cimentaire, poudre de verre, laitier granule, durabilité.

ABSTRACT

Lightweight self-compacting concrete (LWSCC) represents an innovative class of materials that combine the workability and ease of placement of self-compacting concretes (SCC) with the benefits of reduced density provided by lightweight expanded clay aggregates (LECA). Thanks to their low bulk density, these concretes are particularly attractive for structures where reducing self-weight is a critical requirement.

However, their structural-scale development remains limited by two major drawbacks associated with LECA: their high water absorption capacity and their relatively low mechanical strength compared with natural aggregates. These characteristics lead to a loss of workability, a decrease in the compactness of the cementitious matrix, and consequently, a reduction in both mechanical performance and durability of LWSCC. To address this issue, the present thesis investigates two complementary approaches: on the one hand, moisture conditioning and cementitious coating of LECA with optimized pastes; and on the other hand, the incorporation of reactive mineral additions, notably waste glass powder (WGP) and ground granulated blast-furnace slag (GGBS), as substitutes for conventional limestone filler in LWSCC formulations. The objective is to limit water absorption, enhance aggregate strength, densify the microstructure, and strengthen the interfacial transition zone.

The results demonstrate that coating LECA significantly reduces its porosity and water absorption while improving its strength. The combination with reactive additions further amplifies these benefits: WGP and GGBS promote the formation of secondary hydration products (C-S-H, C-A-S-H), which densify the cement matrix, lower permeability, and enhance durability. The resulting LWSCC exhibits improved workability, increased stability, higher mechanical strengths, and high resistance to accelerated carbonation.

Keywords: Lightweight self-compacting concrete, lightweight expanded clay aggregates, moisture conditioning, cementitious coating, waste glass powder, ground granulated blast-furnace slag, durability.

الملخص

تُعدّ الخرسانة ذاتية الرص الخفيفة الوزن فئة من المواد المبتكرة التي تجمع بين سهولة التشغيل والانسائية العالية المميزة للخرسانة ذاتية الرص، وبين ميزة الخفة الناتجة عن استخدام الركام الطيني الموسع خفيف الوزن. وبفضل كثافتها الحجمية المنخفضة، تكتسي هذه الخرسانة أهمية خاصة في المنشآت التي يكون فيها تقليل الوزن الذاتي مطلباً رئيسياً.

غير أنّ استخدامها على النطاق الإنشائي ما يزال محدوداً بسبب مشكلتين رئيسيتين مرتبطتين بالركام الطيني الموسع خفيف الوزن، وهما: القدرة العالية على امتصاص الماء، وضعف المقاومة الميكانيكية مقارنة بالركام الطبيعي. هاتان الخاصيتان تؤديان إلى فقدان قابلية التشغيل، ونقص في تماسك العجينة الأسمنتية، وبالتالي انخفاض في الأداء الميكانيكي ومتانة الخرسانة ذاتية الرص الخفيفة الوزن.

تهدف هذه الأطروحة إلى معالجة هذه الإشكالية من خلال محورين متكاملين: أولاً، تكييف رطوبة الركام الطيني الممتد خفيف الوزن وتغليفه بطبقات إسمنتية محسّنة؛ وثانياً، دمج إضافات معدنية فعّالة مثل مسحوق الزجاج والخبث المحبب المطحون كبديل عن الحصى الكلسية التقليدية في خلطات الخرسانة ذاتية الرص الخفيفة الوزن. ويكمن الهدف في تقليل امتصاص الماء، تحسين مقاومة الركام، زيادة كثافة البنية المجهرية، وتعزيز منطقة الانتقال البيئي.

أظهرت النتائج أن تغليف الركام الطيني الموسع خفيف الوزن يساهم بشكل كبير في تقليل مساميته وقدرته على امتصاص الماء، مع تحسين مقاومته. كما أن الجمع مع الإضافات الفعّالة يعزز هذه الفوائد بشكل أكبر، حيث يساهم كل من مسحوق الزجاج والخبث المحبب المطحون في تكوين منتجات إماهة ثانوية (C-S-H)، (C-A-S-H) تعمل على زيادة كثافة العجينة الأسمنتية، تقليل النفاذية، وتعزيز المتانة. وقد تميزت الخرسانة المنتجة بقابلية تشغيل أفضل، واستقرار أعلى، ومقاومات ميكانيكية متزايدة، فضلاً عن مقاومة عالية أمام الكربنة المعجلة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية الرص الخفيفة الوزن، الركام الطيني الموسع خفيف الوزن، تكييف الرطوبة، التغليف الإسمنتي، مسحوق الزجاج، الخبث المحبب المطحون، المتانة.

Table des matières

Résumé

Abstract

الملخص

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE 2

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

1. INTRODUCTION	7
2. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS (BAP)	7
2.1. Définition et origine	7
2.2. Constituants et différences avec le béton ordinaire	8
2.3. Méthodes de formulation des BAP dans la littérature	10
2.4. Caractérisation des BAP à l'état frais	11
3. GRANULATS LÉGERS POUR BÉTONS	12
3.1. Définition et classification des granulats légers	12
3.1.1. Les granulats légers naturels	12
3.1.1.1. Granulats de pierre ponce	12
3.1.1.2. Granulats de balle de riz	13
3.1.1.3. Granulats de diatomite	13
3.1.1.4. Granulats de sciure	13
3.1.1.5. Cendres volcaniques	14
3.1.1.6. Scories	14
3.1.2. Les granulats légers artificiels	15
3.1.2.1. Granulats de cendres volantes frittées	15
3.1.2.2. Granulats de scories artificielles	15
3.1.2.3. Granulats de perlite expansée	15
3.1.2.4. Granulats d'argile expansée	16
3.1.2.5. Granulats de coke breeze	16
3.1.2.6. Granulats de vermiculite expansée	16
3.2. Caractéristiques des granulats légers	17
3.2.1. Absorption d'eau	17
3.2.2. Masse volumique réelle	18
3.2.3. Masse volumique apparente	18

3.2.4. Forme et texture	18
3.2.5. Propriétés mécaniques	19
3.3. Applications des granulats légers.....	19
4. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS	20
4.1. Définition et origine	20
4.2. Principes de formulation des bétons autoplaçants légers	20
4.3. Propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants légers.....	21
4.3.1. Effets du type de granulat.....	21
4.3.2. Effets de la concentration en granulats.....	21
4.3.3. Effets de la taille des granulats et de la compacité	22
4.3.4. Effets des liants et de la teneur en fines.....	22
4.3.5. Effets des matériaux cimentaires supplémentaires	22
4.3.6. Effets du rapport eau/liant et du superplastifiant	23
4.3.7. Effets du prétraitement des granulats.....	23
4.4. Propriétés à l'état durci des bétons autoplaçants légers	24
4.4.1. Effets du type et de la concentration des granulats.....	24
4.4.2. Effets de la taille des granulats et de la compacité	24
4.4.3. Effets des liants et de la teneur en fines.....	25
4.4.4. Effets des matériaux cimentaires supplémentaires	25
4.4.5. Effets du rapport eau/ciment et des superplastifiants	26
4.4.6. Effets du prétraitement des granulats légers.....	26
5. DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS	27
5.1. Absorption d'eau.....	27
5.2. Zone de transition interfaciale (ZTI)	28
5.3. Résistivité électrique.....	29
5.4. Résistance au gel-dégel	29
6. CONCLUSION	30

CHAPITRE II

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

1. INTRODUCTION	34
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	34
2.1. Ciment.....	34
2.2. Additions minérales	35
2.2.1. Filler calcaire	35
2.2.2. Poudre de verre	36
2.2.3. Laitier granulé de haut fourneau.....	37
2.3. Granulats.....	38
2.4. Superplastifiant	40
2.5. Eau de gâchage.....	40
3. CONFECTION ET CONSERVATION DES ÉPROUVETTES	40
3.1. Méthode d'enrobage des GLAE	40
3.2. Approche de formulation des BAPL	42

3.2.1. Étape de calcul	43
3.2.2. Ajustement et validation de la composition du béton	44
3.3. Élaboration du béton et confection des éprouvettes	45
4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	46
4.1. Caractérisation microstructurale	46
4.1.1. Analyse par Diffraction des Rayons X.....	46
4.1.2. Microscopie électronique à balayage	46
4.2. Caractérisation à l'échelle des GLAE.....	47
4.2.1. Mesure de l'épaisseur des couches d'enrobage par microscopie optique	48
4.2.2. Détermination de la masse volumique des particules et du taux	
d'absorption d'eau	49
4.2.3. Évaluation de la résistance individuelle des granulats par essai de	
compression unitaire.....	50
4.3. Caractérisation à l'échelle des BAPL : à l'état frais.....	51
4.3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams	52
4.3.2. Le temps d'étalement.....	52
4.3.3. L'essai à boîte en L.....	53
4.3.4. Essai de stabilité au tamis	54
4.3.5. Essai à la colonne	54
4.3.6. Détermination de la masse volumique du béton à l'état frais.....	55
4.4. Caractérisation à l'échelle des BAPL : à l'état durci.....	56
4.4.1. Essais mécaniques de compression et de flexion	56
4.4.2. Détermination du module d'élasticité dynamique.....	57
4.4.3. Essai de porosité accessible à l'eau	57
4.4.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité	59
4.4.5. Essai de perméabilité à l'air	60
4.4.6. Essai de carbonatation accéléré	61
5. CONCLUSION	63

CHAPITRE III

EFFET DU CONDITIONNEMENT EN HUMIDITÉ DES GRANULATS LÉGERS D'ARGILE EXPANSÉE SUR LE COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

1. INTRODUCTION	67
2. CINÉTIQUE DE L'ABSORPTION D'EAU DES GRANULATS D'ARGILE EXPANSÉE	68
3. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAPL FRAIS	69
3.1. Effet sur l'essai d'étalement au cône d'Abrams	69
3.2. Effet sur le temps d'écoulement.....	70
3.3. Effet sur l'essai d'écoulement à la boîte en L	72
3.4. Effet sur la résistance à la ségrégation par la stabilité au tamis	74
3.5. Effet sur la résistance à la ségrégation par l'essai à la colonne	75
4. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAPL DURCI	77
4.1. Effet sur la masse volumique durci.....	78

4.2. Effet sur la résistance mécanique à la compression.....	78
4.3. Effet sur la résistance à la flexion	81
4.4. Effet sur le module d'élasticité dynamique.....	82
4.5. Effet sur l'absorption d'eau par capillarité.....	84
5. CONCLUSION	86

CHAPITRE IV

AMÉLIORATION DES GRANULATS LÉGERS D'ARGILE EXPANSÉE PAR ENROBAGES CIMENTAIRES : IMPACT SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

1. INTRODUCTION	90
2. EFFET DE L'ENROBAGE CIMENTAIRE SUR LES PROPRIÉTÉS DES GLAE	90
2.1. Évolution de l'épaisseur du revêtement en fonction du nombre de couches	90
2.2. Variation de la masse volumique en fonction du nombre de couches.....	90
2.3. Variation de l'absorption d'eau en fonction du nombre de couches	92
2.4. Variation de la résistance à la compression des GLAE en fonction du nombre de couches.....	94
2.5. Analyse microstructurale des surfaces de GLAE non enrobées et enrobées	96
3. EFFET DES GLAE ENROBÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAPL	101
3.1. Effet sur les performances des BAPL à l'état frais.....	101
3.1.1. Effet sur l'étalement et le temps d'écoulement	101
3.1.2. Effet sur l'écoulement à la boîte en L	104
3.1.3. Effet sur la résistance à la ségrégation	105
3.2. Effet sur les performances des BAPL à l'état durci.....	107
3.2.1. Effet sur la masse volumique durci	107
3.2.2. Effet sur la résistance à la compression	108
3.2.3. Effet sur la résistance à la flexion.....	111
3.2.4. Effet sur le module d'élasticité dynamique.....	113
4. CONCLUSION	116

CHAPITRE V

EFFET DE L'ENROBAGE DES GLAE SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

1. INTRODUCTION	120
2. POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU	120
3. ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITÉ	122
4. PERMÉABILITÉ À L'AIR	124
5. CARBONATATION ACCÉLÉRÉE	127

5.1. Suivi de masse.....	127
5.2. Vitesse ultrasonore.....	128
5.3. Profondeur dégradée	130
6. CONCLUSION	132
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	135
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	138

Table des figures

1.1	Théorie de l'excès de pâte (Abdizadeh et al., 2009)	9
1.2	Comparaison des compositions typiques d'un BAP et d'un BO (Okamura 2003)	9
1.3	Quelque exemple de granulats légers naturels : (a) pierre ponce, (b) balle de riz, (c) diatomite, (d) sciure de bois, (e) Cendres volcaniques et (f) Scories	15
1.4	Quelque exemple de granulats légers artificiels : (a) cendres volantes frittées, (b) scories artificielles, (c) perlite expansée, (d) argile expansée, (e) coke breeze et (f) vermiculite	17
1.5	Répartition en pourcentage des principales formes de GL utilisées dans les BAP au cours des vingt dernières années (Kumar et al., 2023)	17
2.1	Diffractogramme du filler calcaire	35
2.2	Observation MEB du filler calcaire	35
2.3	Diffractogramme de la poudre de verre	36
2.4	Observation MEB de la poudre de verre	36
2.5	Diffractogramme du laitier granule	37
2.6	Observation MEB du laitier granulé	37
2.7	Analyse granulométrique laser du ciment et des additions minérales	38
2.8	Photographie de la morphologie des grains de GLAE	39
2.9	Micrographie MEB de l'intérieur d'un grain de GLAE	39
2.10	Répartition granulométrique des granulats utilisés	39
2.11	Récapitulatif des opérations d'enrobage des GLAE	42
2.12	GLAE bruts (photo de gauche) et après enrobage avec une pâte de ciment (photo de droite)	42
2.13	Échantillons de GLAE enrobés après polissage, présentant une section transversale permettant l'observation de la couche d'enrobage	48
2.14	Mesure de l'épaisseur des couches d'enrobage par microscopie optique	49
2.15	Banc de compression Instron 5500R utilisé pour l'essai de résistance unitaire des GLAE, avec à droite un agrandissement montrant un granulat positionné entre les plateaux de compression	50
2.16	Essai d'écrasement unitaire d'un granulat léger selon la méthode à la plaque (Kockal et Ozturan, 2011)	51
2.17	Appréciation d'un essai d'étalement d'un BAPL	52
2.18	Observation de l'écoulement du béton dans l'essai à la boîte en L	54
2.19	Mesure de la stabilité au tamis après deux minutes de repos du BAPL	54
2.20	Dispositif expérimental de l'essai à la colonne	55
2.21	Récupération des GLAE par tamisage après lavage du BAPL, pour chaque section	55
2.22	Procédure d'étalonnage et mesure de la vitesse ultrasonique à travers une éprouvette cubique de béton	57

2.23	Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la porosité accessible à l'eau des BAPL.....	58
2.24	Représentation schématique du dispositif de mesure de l'absorption d'eau par capillarité	59
2.25	Dispositif expérimental pour la mesure de la perméabilité à l'oxygène des bétons	60
2.26	Vue de l'enceinte de carbonatation employée lors des essais de carbonatation accélérée.....	61
2.27	Essai de carbonatation accélérée au dioxyde de carbone	62
2.28	Dispositif expérimental de mesure de la vitesse ultrasonore des BAPL	63
3.1	Courbe d'absorption d'eau des GLAE au cours du temps.....	68
3.2	Observation MEB de la microstructure poreuse interne d'un GLAE (a), et distribution des diamètres de pores correspondants (b)	69
3.3	Variation de l'étalement du BAPL en fonction du taux d'humidité des GLAE ...	69
3.4	Variation du temps d'écoulement du BAPL en fonction de l'humidité des GLAE.....	71
3.5	Variation du taux de remplissage à la boîte en L en fonction du taux d'humidité des GLAE	72
3.6	Influence de la teneur en humidité des GLAE sur l'essai de ségrégation au tamis du BAPL	73
3.7	Influence de la teneur en humidité des GLAE sur l'essai à la colonne du BAPL	74
3.8	Analyse visuelle de la ségrégation potentielle à partir de la répartition des granulats dans les différentes formulations de béton étudiées	76
3.9	Effet de la teneur en humidité des GLAE sur la masse volumique à l'état durci des BAPL.....	77
3.10	Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance en compression des BAPL	78
3.11	Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance spécifique en compression des BAPL.....	79
3.12	Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance à la flexion des BAPL	80
3.13	Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance spécifique à la flexion des BAPL.....	81
3.14	Influence du taux d'humidité des GLAE sur le module dynamique d'élasticité des BAPL.....	82
3.15	Corrélation entre la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité dynamique	82
3.16	Influence de la teneur en humidité des GLAE sur l'absorption d'eau capillaire des BAPL.....	84
4.1	Évolution de l'épaisseur du revêtement des GLAE en fonction du nombre de couches.....	90
4.2	Coupes microscopiques de GLAE avec différentes épaisseurs d'enrobage cimentaire	90
4.3	Variation de la masse volumique des GLAE en fonction du nombre de couches d'enrobage	91

4.4	Variation de l'absorption d'eau à 24 heures des GLAE en fonction du nombre de couches d'enrobage	92
4.5	Effet de l'épaisseur d'enrobage sur la cinétique d'absorption d'eau : (a) CP, (b) PV et (c) LG	94
4.6	Variation de la résistance à la compression des GLAE en fonction du nombre de couches d'enrobage	95
4.7	Image MEB de la zone d'adhésion entre la couche d'enrobage contenant du LG et le GLAE	96
4.8	Images MEB des surfaces des GLAE : (a) brut, (b) enrobé avec du CP, (c) enrobé avec de la PV et (d) enrobé avec du LG	97
4.9	Microanalyses EDS des surfaces de GLAE bruts et enrobés	99
4.10	Effet des différents enrobages de GLAE sur l'étalement et le temps d'écoulement au cône des BAPL: (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	101
4.11	Effet des différents enrobages de GLAE sur l'écoulement à la boîte en L des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	103
4.12	Effet des différents enrobages de GLAE sur la stabilité au tamis des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	105
4.13	Effet des différents enrobages de GLAE sur la stabilité à la colonne des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	106
4.14	Effet des différents enrobages de GLAE sur la masse volumique durci des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	108
4.15	Impact des différents enrobages de GLAE sur la résistance à la compression des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	109
4.16	Impact des différents enrobages de GLAE sur la résistance spécifique à la compression des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	111
4.17	Impact des différents enrobages de GLAE sur la résistance à la flexion des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	112
4.18	Impact des différents enrobages de GLAE sur le module d'élasticité dynamique des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	113
5.1	Effet des différents enrobages de GLAE sur la porosité accessible des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	121
5.2	Effet des différents enrobages de GLAE sur l'absorption d'eau capillaire des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	123
5.3	t des différents enrobages de GLAE sur la perméabilité à l'air des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	125
5.4	Effet des différents enrobages de GLAE sur l'évolution des masses des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	128
5.5	Effet des différents enrobages de GLAE sur la vitesse ultrasonore des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG	129
5.6	Photographies des éprouvettes après pulvérisation de phénolphtaléine aux échéances 7, 28 et 90 jours	131

Liste des tableaux

1.1	Méthodes de formulation des BAP dans la littérature	10
1.2	Synthèse des méthodes d'essai utilisées pour évaluer les propriétés rhéologiques des BAP	11
2.1	Propriétés physiques du ciment	34
2.2	Composition chimique du ciment	35
2.3	Composition minéralogique	35
2.4	Caractéristiques du ciment et des additifs minéraux	38
2.5	Propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés	39
2.6	Principales caractéristiques techniques du SP (données fournisseur)	40
2.7	Composition des pâtes cimentaires utilisées pour l'enrobage des GLAE	41
2.8	Séquence de malaxage des pâtes d'enrobage (Diederich et al., 2013)	41
2.9	Paramètres d'entrée de l'outil de calcul	45
2.10	Séquence de malaxage des BAPL	45
3.1	Constituants des mélanges de BAPL étudiés	67
4.1	Composition des mélanges de BAPL étudiés	100
5.1	Coefficient de sorptivité des différents mélanges ($\text{kg/m}^2/\text{h}^{1/2}$)	124

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, le secteur du bâtiment et des travaux publics a connu une évolution notable vers le développement de matériaux de construction plus performants, plus durables et respectueux de l'environnement. Parmi ces matériaux, le béton autoplaçant (BAP) s'est largement imposé grâce à ses excellentes propriétés de mise en œuvre, permettant de s'affranchir des opérations de vibration tout en assurant une bonne compacité et une homogénéité optimale. Parallèlement, l'utilisation de bétons légers (BL) s'est également développée, notamment pour des applications structurelles et de préfabrication, en raison de leur faible masse volumique et de leurs avantages en termes d'allègement, d'isolation thermique et acoustique. De la combinaison de ces deux concepts est né le béton autoplaçant léger (BAPL), qui associe la rhéologie avantageuse du BAP et la légèreté du BL. Ce matériau présente une masse volumique généralement comprise entre 1400 et 2000 kg/m³, et permet une réduction significative des charges permanentes sur les structures, conduisant à une optimisation du dimensionnement des éléments porteurs et des fondations. Malgré ses atouts, le BAPL demeure relativement peu utilisé dans la pratique courante, en raison de son coût de production plus élevé et de certaines contraintes technologiques liées à la nature particulière des granulats légers (GL) qui le composent.

Parmi les granulats légers disponibles, les granulats légers d'argile expansée (GLAE) sont les plus couramment employés. Ils sont obtenus par cuisson à haute température d'argiles expansives, ce qui leur confère une structure poreuse et alvéolaire. Cette porosité, qui justifie leur faible masse volumique, constitue en même temps leur principal inconvénient. En effet, les GLAE présentent une absorption d'eau élevée, comprise entre 12 % et 40 %, susceptible d'affecter la rhéologie des mélanges, d'accroître le risque de ségrégation, de fragiliser la zone de transition interfaciale (ZTI) et, à terme, de réduire la résistance et la durabilité des BAPL. Ces limites expliquent la nécessité d'un traitement approprié des granulats avant leur incorporation dans le béton.

Deux approches principales sont rapportées dans la littérature pour atténuer les effets néfastes de la porosité et de l'absorption d'eau des GLAE. La première concerne le conditionnement en humidité, qui consiste à pré-humidifier ou pré-saturer les granulats afin de limiter l'absorption d'eau de gâchage pendant le malaxage. Cette méthode, bien que simple et économique, pose encore la question du degré optimal d'humidification permettant d'assurer un compromis satisfaisant entre ouvrabilité, performances mécaniques et stabilité microstructurale. La seconde approche, plus récente, repose sur l'enrobage superficiel des granulats par des pâtes cimentaires ou d'autres agents d'imprégnation, dans le but de réduire leur porosité ouverte, d'améliorer leur résistance et d'optimiser leur interaction avec la matrice cimentaire. Cette technique, prometteuse, reste cependant peu explorée dans le cas particulier des GLAE, en particulier lorsqu'elle intègre des ajouts cimentaires valorisables tels que le laitier granulé (LG) ou la poudre de verre (PV).

Dans ce contexte, la présente thèse s'inscrit dans une démarche visant à approfondir la compréhension du comportement des BAPL élaborés à partir de GLAE. Elle se focalise sur deux axes complémentaires : (i) l'étude de l'influence du taux d'humidité des GLAE sur les propriétés à l'état frais, les performances mécaniques et la microstructure des BAPL, et (ii) l'évaluation de l'efficacité d'enrobages cimentaires appliqués aux GLAE, tant sur leurs propriétés intrinsèques que sur les caractéristiques des BAPL, y compris leur durabilité. Au-delà de l'intérêt scientifique, ces travaux s'inscrivent également dans une perspective de valorisation de ressources locales, notamment les gisements d'argile expansible disponibles en Algérie, ainsi que de sous-produits industriels tel que laitier de haut fourneau et des déchets ménagères comme le verre, en cohérence avec une logique d'économie circulaire.

L'originalité de cette recherche réside dans la combinaison d'une approche systématique sur le conditionnement des granulats légers et d'une investigation approfondie de l'enrobage cimentaire appliqué aux GLAE, très peu étudiés dans la littérature. Elle vise ainsi à fournir des recommandations pratiques et scientifiquement fondées pour la formulation et l'optimisation des BAPL à base de GLAE. Pour cela, cette thèse est organisée en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art détaillé sur les bétons autoplacants légers, mettant en évidence les connaissances actuelles, les avantages et limites du matériau, ainsi que les solutions proposées dans la littérature pour améliorer ses performances.

Le deuxième chapitre concerne la présentation des matériaux utilisés et des méthodes expérimentales adoptées pour la caractérisation des granulats et des bétons étudiés.

L'étude de l'effet du conditionnement en humidité des GLAE sur le comportement des BAPL est abordée dans le troisième chapitre, incluant les propriétés rhéologiques, mécaniques et microstructurales. Plusieurs scénarios d'humidité ont été appliqués aux granulats, afin d'évaluer de manière comparative leur influence sur les propriétés des BAPL.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse de l'impact des enrobages cimentaires appliqués aux GLAE sur leurs propriétés physico-mécaniques, ainsi que sur les performances globales des BAPL élaborés avec ces granulats traités. Ce chapitre se structure en deux volets complémentaires. Le premier s'attache à évaluer l'effet des enrobages sur les propriétés physiques et mécaniques des granulats. Le second examine l'influence de ces améliorations à l'échelle des BAPL, en analysant à la fois leur comportement à l'état frais et leurs performances mécaniques à l'état durci.

Le dernier chapitre traite l'évaluation de la durabilité des BAPL contenant des GLAE enrobés, à travers différents indicateurs de performance et de résistance aux agressions externes.

À travers cette organisation, la thèse propose une contribution scientifique et technique à la problématique de l'utilisation des granulats légers d'argile expansée dans les bétons autoplacants légers, en apportant des éléments de réponse concrets pour une meilleure maîtrise de leurs propriétés et une valorisation plus large dans le secteur de la construction.

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

Ce chapitre propose un état de l'art sur les bétons autoplaçants légers (BAPL). Après un rappel de leur évolution et de leurs spécificités, l'analyse porte sur leurs propriétés à l'état frais et durci, ainsi que sur les paramètres influençant leur durabilité. Le rôle des granulats légers et les approches d'amélioration de leurs performances sont examinés. Enfin, les travaux récents sont discutés afin de dégager les avancées et les perspectives de recherche.

Sommaire

1. INTRODUCTION	7
2. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS (BAP)	7
2.1. Définition et origine	7
2.2. Constituants et différences avec le béton ordinaire	8
2.3. Méthodes de formulation des BAP dans la littérature	10
2.4. Caractérisation des BAP à l'état frais	11
3. GRANULATS LÉGERS POUR BÉTONS	12
3.1. Définition et classification des granulats légers.....	12
3.2. Caractéristiques des granulats légers	17
3.3. Applications des granulats légers.....	19
4. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS	20
4.1. Définition et origine	20
4.2. Principes de formulation des bétons autoplaçants légers	20
4.3. Propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants légers.....	21
4.4. Propriétés à l'état durci des bétons autoplaçants légers	24
5. DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS	27
5.1. Absorption d'eau	27
5.2. Zone de transition interfaciale (ZTI)	28
5.3. Résistivité électrique.....	29
5.4. Résistance au gel-dégel	29

Chapitre I - État de l'art des bétons autoplaçants légers

1. INTRODUCTION

Le béton constitue l'une des inventions les plus marquantes de l'histoire des matériaux de construction. Depuis les travaux de Louis Vicat en 1818, il n'a cessé de connaître des évolutions techniques et scientifiques, répondant aux exigences croissantes des ingénieurs et des architectes. Sa capacité d'adaptation, sa disponibilité et son excellent rapport performances/coût en ont fait le matériau le plus utilisé dans le monde, au point de concurrencer tous les autres matériaux de construction.

Aujourd'hui, le béton ne se limite plus à sa forme dite « ordinaire ». Selon les besoins et les applications, plusieurs catégories se sont développées. Ainsi, le béton autoplaçant se distingue par sa fluidité exceptionnelle obtenue grâce à l'usage de superplastifiants, facilitant la mise en place sans vibration. Le béton fibré, renforcé par des fibres de nature variée, offre de meilleures propriétés mécaniques et une résistance accrue à la fissuration. Le béton projeté, utilisé par voie sèche ou humide, trouve des applications particulières dans les ouvrages souterrains et les travaux de réparation. Le béton biosourcé, intégrant des composants issus de la biomasse, s'inscrit dans une démarche de construction durable.

Si l'on considère la masse volumique, le béton se décline en deux catégories principales : le béton lourd, formulé avec des granulats à forte masse volumique, et le béton léger, obtenu par l'utilisation de granulats de faible masse volumique. Ces derniers sont particulièrement recherchés dans les structures où l'allègement est nécessaire. Par ailleurs, les bétons à hautes performances, qu'ils soient fibrés ou non, représentent une gamme distincte caractérisée par des résistances mécaniques élevées et une durabilité accrue.

L'introduction des principes du développement durable dans le secteur du bâtiment et des travaux publics a également conduit à l'émergence de bétons bas carbone, visant à réduire l'empreinte environnementale du ciment et de ses dérivés. D'autres formulations spécifiques continuent d'élargir le champ d'application du béton : le béton drainant ou poreux, permettant l'infiltration des eaux pluviales, ou encore le béton alumineux, apprécié pour sa bonne tenue aux hautes températures.

Cette diversité illustre la capacité du béton à évoluer en fonction des contraintes techniques, économiques et environnementales. Dans ce contexte, les bétons autoplaçants légers (BAPL), qui combinent les avantages de l'autoplaçabilité et de la légèreté, apparaissent comme une réponse prometteuse aux besoins actuels de la construction moderne.

2. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS (BAP)

2.1 Définition et origine

Le béton autoplaçant, couramment désigné par l'abréviation BAP, se définit comme un béton fluide et homogène, capable de s'écouler et de remplir les coffrages sous l'effet de son propre

poids, sans recourir à une vibration mécanique. La distinction essentielle entre un béton ordinaire et un BAP réside donc dans le comportement à l'état frais, le second étant conçu pour conjuguer fluidité, stabilité et facilité de mise en œuvre.

Ce type de béton, considéré comme révolutionnaire, a été développé au Japon dans les années 1980. L'idée initiale fut proposée par H. Okamura en 1986, puis concrétisée par les travaux d'Ozawa et Maekawa en 1988 (Ozawa et Maekawa, 1988). Leur objectif était de répondre à plusieurs contraintes de la construction moderne : accélérer les cadences de mise en œuvre, améliorer la qualité du bétonnage dans des structures fortement armées, et réduire les nuisances sonores en supprimant l'étape de vibration. Ces recherches ont marqué le point de départ d'une large diffusion du concept à l'échelle internationale.

Comparé au béton traditionnel, le BAP a introduit plusieurs améliorations notables pour le domaine de la construction et des travaux publics. Ses principaux atouts peuvent se résumer comme suit :

- **Fluidité et stabilité** : le BAP s'écoule facilement tout en conservant une bonne homogénéité, ce qui permet d'éliminer l'énergie et le temps consacrés au compactage par vibration.
- **Productivité accrue** : la rapidité et la simplicité de mise en place améliorent l'efficacité des chantiers, réduisent la durée des travaux et limitent les reprises.
- **Qualité de finition** : grâce à sa grande capacité de remplissage, le BAP épouse fidèlement les formes du coffrage, y compris dans les zones difficiles d'accès, offrant ainsi des parements lisses et réguliers.
- **Meilleures conditions de chantier** : l'absence de vibration réduit considérablement les nuisances sonores et la pénibilité pour les opérateurs, contribuant à un environnement de travail plus sûr et plus agréable.

Ainsi, la mise au point du BAP a marqué une étape décisive dans l'évolution des matériaux cimentaires, en ouvrant la voie à une nouvelle génération de bétons à la fois performants, pratiques et adaptés aux exigences contemporaines du secteur de la construction.

2.2 Constituants et différences avec le béton ordinaire

Le BAP ne diffère pas fondamentalement du béton ordinaire vibré (BO) par la nature de ses constituants, puisqu'il est élaboré à partir des mêmes matériaux de base : ciment, granulats, eau et adjuvants. La différence réside principalement dans les proportions adoptées et l'utilisation d'additions minérales et d'adjuvants spécifiques.

Dans un BAP, la teneur en pâte cimentaire est généralement plus élevée que dans un BO, afin d'assurer la fluidité nécessaire à l'écoulement sans vibration. Cette pâte est souvent enrichie par des additions fines (filler calcaire, cendres volantes, laitier ou fumée de silice) qui améliorent la cohésion du mélange et réduisent le risque de ségrégation. La *théorie de la pâte excédentaire* est utilisée pour déterminer la quantité minimale de pâte nécessaire afin de remplir les vides entre les granulats, de manière à permettre au béton autoplaçant de s'écouler avec un minimum de frottements entre les particules, tout en équilibrant le mélange en fonction de la quantité d'eau retenue par les granulats, comme illustré à la Figure 1.1. Le

volume de pâte excédentaire requis dépend fortement des caractéristiques des granulats légers, telles que la granulométrie, la forme et la texture de surface, qui peuvent être déterminées par des essais en laboratoire.

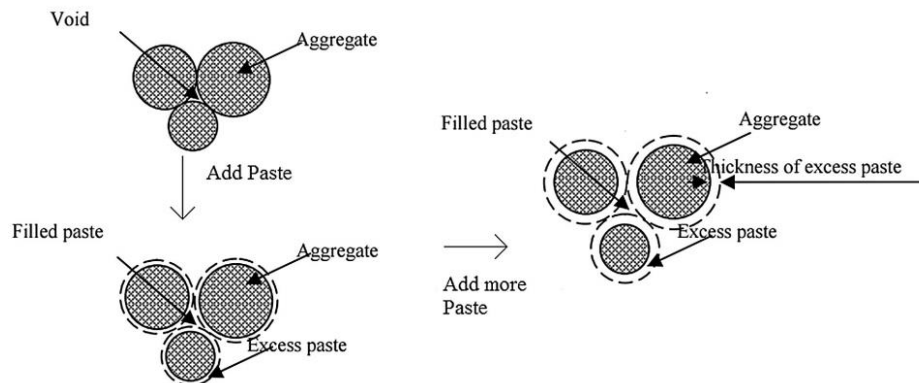


Figure 1.1. Théorie de l'excès de pâte (Abdizadeh et al., 2009).

Les superplastifiants de nouvelle génération jouent un rôle déterminant dans la formulation des BAP. Ces adjuvants permettent d'obtenir une grande maniabilité tout en limitant l'apport en eau, ce qui préserve les performances mécaniques et la durabilité. L'utilisation éventuelle de modificateurs de viscosité peut également contribuer à stabiliser le mélange dans les cas où les granulats présentent des caractéristiques défavorables. Enfin, la granulométrie des granulats est ajustée afin de réduire les frottements internes et de favoriser un bon écoulement. Les sables doivent être suffisamment fins pour garantir la continuité de la pâte, tandis que les gros granulats sont limités en taille et en proportion afin de faciliter la capacité de passage entre les armatures. Ainsi, la distinction entre un béton ordinaire et un béton autoplaçant ne repose pas sur la nature des matériaux utilisés, mais sur une optimisation de leur dosage et de leur combinaison. C'est cette approche de formulation qui confère au BAP ses propriétés particulières à l'état frais, sans compromettre ses performances mécaniques et sa durabilité à long terme. La Figure 1.2 présente un schéma simplifié montrant les différences de formulation (plus de pâte, plus de fines, superplastifiant, granulats adaptés) entre un BO et un BAP.

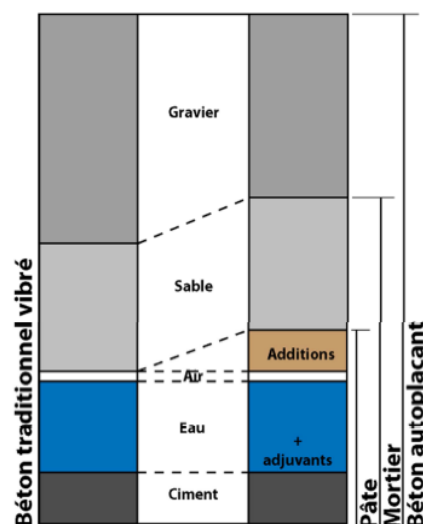


Figure 1.2. Comparaison des compositions typiques d'un BAP et d'un BO (Okamura, 2003).

2.3 Méthodes de formulation des BAP dans la littérature

Différentes méthodes de formulation ont été proposées au cours des trois dernières décennies pour concevoir des BAP répondant simultanément aux exigences de fluidité, de stabilité et de résistance mécanique. Parmi les approches les plus citées dans la littérature, on retrouve la méthode d'Okamura et Ozawa, considérée comme fondatrice, les recommandations de l'EFNARC qui privilégient une approche basée sur la performance, ainsi que les adaptations des méthodes classiques de l'ACI pour les BAP. Plus récemment, la théorie de la pâte excédentaire et d'autres approches basées sur la rhéologie prédictive ont enrichi le champ des formulations possibles. Le Tableau 1.1 résume les principales méthodes, leurs principes et leurs références.

Tableau 1.1. Méthodes de formulation des BAP dans la littérature.

Méthode	Description / principe
Méthode d'Okamura et Ozawa	Première approche développée au Japon à la fin des années 1980. Réduction du volume de gros granulats, augmentation de la pâte et utilisation de superplastifiants pour obtenir fluidité et stabilité.
Adaptation de la méthode ACI 211	Basée sur le dimensionnement classique des bétons selon l'ACI, avec ajustement du rapport E/C et du volume de pâte pour répondre aux exigences des BAP.
Recommandations EFNARC	Approche européenne basée sur des plages de performance (étalement, viscosité, ségrégation). Définit des fourchettes de dosage (E/P, fines, SP).
Théorie de la pâte excédentaire	La pâte doit combler les vides entre les granulats et permettre un écoulement avec un minimum de frottements. Dépend des caractéristiques des granulats (taille, forme, texture).
Approche par optimisation granulaire (Packing density)	Visée à maximiser le compactage des granulats pour réduire le volume de pâte nécessaire. Utilise des modèles de masse volumique granulaire (Andreasen & Andersen, Modified Andreasen).
Méthodes basées sur la rhéologie prédictive	Utilisation de modèles rhéologiques (Bingham, Herschel-Bulkley) pour prédire l'écoulement en fonction des proportions. Permet d'optimiser la formulation avant essais.
Approches expérimentales par plan d'expériences	Utilisation de plans d'expériences (DOE) et de statistiques pour optimiser plusieurs paramètres à la fois (E/C, dosage SP, volume de pâte).
Méthodes hybrides récentes	Combinaison des approches granulaires, rhéologiques et expérimentales, parfois couplées à l'intelligence artificielle (réseaux neuronaux, algorithmes génétiques).

2.4 Caractérisation des BAP à l'état frais

La caractérisation des BAP à l'état frais constitue une étape essentielle pour vérifier la conformité d'une formulation aux exigences de fluidité, de stabilité et de maniabilité. Contrairement aux BO, où l'essai d'affaissement (slump test) suffit généralement à évaluer la consistance, les BAP nécessitent une batterie d'essais complémentaires afin de s'assurer qu'ils répondent simultanément à trois critères fondamentaux : la fluidité, la capacité de passage entre les armatures et la résistance à la ségrégation. Ces essais, développés dans les années 1990 dans le cadre de programmes de recherche européens et internationaux, ont fait l'objet de recommandations (notamment celles de l'EFNARC) et, pour certains, de normalisation. Ils constituent aujourd'hui des outils indispensables pour juger l'aptitude d'un BAP à l'emploi sur chantier. Afin de mieux illustrer les différentes méthodes d'évaluation des propriétés à l'état frais, le Tableau 1.2 présente une synthèse des essais les plus couramment employés, leurs objectifs et leurs références.

Tableau 1.2. Synthèse des méthodes d'essai utilisées pour évaluer les propriétés rhéologiques des BAP.

Essai	Propriété évaluée	Description / principe
Slump-flow	Fluidité et capacité de remplissage	Mesure du diamètre d'étalement au cône d'Abrams. Indique la capacité du béton à s'écouler librement.
T₅₀₀	Viscosité / vitesse d'écoulement	Temps nécessaire pour atteindre un étalement de 500 mm dans le slump-flow.
L-box	Capacité de passage	Rapport de hauteur de béton entre les zones amont et aval après écoulement entre armatures.
V-funnel	Viscosité et stabilité	Mesure du temps d'écoulement du béton à travers une section en forme de V.
J-ring	Capacité de passage et blocage	Mesure l'étalement du béton entouré d'armatures verticales (anneau de tiges).
GT-box	Fluidité et ségrégation	Variante de l'essai L-box, permettant aussi d'évaluer la ségrégation.
Test de stabilité au tamis (Sieve segregation test)	Résistance à la ségrégation	Évalue la quantité de mortier passant au travers d'un tamis après décantation du béton frais.
Essai à la colonne (Column segregation test)	Résistance à la ségrégation statique	Mesure la variation de concentration en gros granulats entre le haut et le bas d'un échantillon cylindrique, après sédimentation.

3. GRANULATS LÉGERS POUR BÉTONS

3.1 Définition et classification des granulats légers

Les granulats légers (GL) se distinguent des granulats traditionnels par leur faible masse volumique, généralement inférieure à 2000 kg/m³, ainsi que par leur forte porosité interne. Ces caractéristiques leur confèrent une masse volumique réduite et des propriétés intéressantes telles qu'une bonne isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une résistance accrue aux chocs. De ce fait, ils constituent la base des bétons légers (BL), employés aussi bien pour des applications structurelles que pour des ouvrages à visée isolante ou décorative.

L'intérêt porté aux granulats légers s'est accru ces dernières années, dans un contexte de préservation des ressources naturelles et de réduction des déchets de construction. Leur utilisation en substitution partielle ou totale des granulats naturels est aujourd'hui largement étudiée afin de diminuer l'impact environnemental du secteur du bâtiment et des travaux publics. En outre, leur faible masse volumique contribue à alléger sensiblement les structures tout en maintenant les performances requises pour la construction.

On distingue généralement deux grandes catégories de granulats légers :

- Les granulats légers naturels, issus directement de formations minérales à faible masse volumique, souvent d'origine volcanique. Les plus connus sont la pierre ponce, la pouzzolane naturelle ou encore certaines scories volcaniques. Leur porosité est le résultat de processus géologiques, notamment la solidification rapide de laves riches en gaz.
- Les granulats légers artificiels, produits à partir de matières premières naturelles ou industrielles transformées par un procédé thermique ou mécanique. Le plus répandu est le granulat d'argile expansée (LECA ou GLAE), obtenu par cuisson à haute température dans des fours rotatifs. On peut également citer la perlite expansée, la vermiculite exfoliée, ainsi que des granulats issus de sous-produits industriels tels que les scories ou les cendres volantes granulées.

Cette classification met en évidence que, bien que tous les granulats légers visent à réduire la masse volumique des bétons, leur origine et leur procédé de fabrication déterminent fortement leurs propriétés physiques (porosité, absorption d'eau, masse volumique apparente, résistance mécanique) et conditionnent ainsi les performances des bétons qui en sont dérivés.

3.1.1. Les granulats légers naturels

3.1.1.1. *Granulats de pierre ponce*

Les granulats de pierre ponce font partie des granulats légers naturels les plus connus. Ils sont disponibles en abondance dans de nombreuses régions du monde et sont considérés comme respectueux de l'environnement (Polat et al., 2010 ; Uygunoğlu et Topçu, 2009). La pierre ponce se forme lors d'éruptions volcaniques, lorsque la lave, soumise à une pression extrêmement élevée, est brutalement expulsée puis refroidie, créant ainsi une structure poreuse caractéristique. Cette porosité confère à la pierre ponce une capacité d'absorption d'eau nettement supérieure à celle des granulats naturels ordinaires, pouvant atteindre jusqu'à

55 % de son poids (Karthika et al., 2020). Sa masse volumique est particulièrement faible, de l'ordre de $0,25 \text{ g/cm}^3$, ce qui en fait l'un des granulats les plus légers utilisés en construction.

En plus de sa légèreté, la pierre ponce présente plusieurs atouts : une résistance mécanique satisfaisante, une bonne performance en tant qu'isolant thermique, un point de fusion élevé et une excellente résistance au feu. Ses propriétés d'isolation acoustique sont également remarquables, ce qui en fait un matériau intéressant pour les constructions exposées à de fortes nuisances sonores (Muralitharan et Ramasamy, 2015).

3.1.1.2. *Granulats de balle de riz*

Les balles de riz constituent des résidus agro-industriels issus du processus de décortilage. Elles représentent environ un cinquième du poids du riz paddy récolté (Ganesan et al., 2008). Si leur pouvoir calorifique permet d'envisager une valorisation énergétique, leur incinération soulève néanmoins des préoccupations environnementales et sanitaires. Dans les zones rizicoles, leur accumulation massive demeure ainsi un défi, car elles sont encore peu exploitées de manière efficace.

Ces sous-produits présentent cependant des caractéristiques intéressantes. Leur structure particulière, associant silice et cellulose, les rend difficilement inflammables et peu dégradables, ce qui explique qu'elles soient parfois disponibles en grande quantité et à faible coût. À ce titre, elles peuvent être assimilées à des granulats naturels alternatifs, comparables aux chènevottes de chanvre, et réutilisées comme matières premières dans le secteur de la construction.

3.1.1.3. *Granulats de diatomite*

La diatomite est une roche sédimentaire poreuse résultant de l'accumulation et de la compaction des dépôts de diatomées. Sa structure particulière provient de la fine enveloppe siliceuse des diatomées, composée essentiellement de silice hydratée ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ce qui lui confère plusieurs propriétés avantageuses. Elle est notamment capable d'absorber et de retenir des fluides jusqu'à 3,5 fois son propre poids.

À l'état pur, la diatomite se présente sous une couleur blanchâtre. Toutefois, elle peut renfermer diverses impuretés, telles que du sable, des cendres volcaniques ou du carbonate de calcium, qui modifient ses caractéristiques. Sa conductivité thermique, naturellement faible, tend ainsi à augmenter avec l'enrichissement en impuretés et l'accroissement de la masse volumique.

3.1.1.4. *Granulats de sciure*

La sciure de bois correspond aux résidus fins et pulvérulents générés lors de la transformation du bois (Maharani et al., 2010). Souvent éliminée par combustion ou rejetée sans valorisation, elle constitue une source de pollution et un risque environnemental. Sa forte inflammabilité, en particulier dans les environnements industriels, impose une manipulation prudente et un traitement approprié.

Dans une perspective de valorisation durable, la sciure peut être employée comme granulats légers de substitution aux sables dans le béton. Elle est notamment utilisée pour la réalisation de planchers et d'éléments préfabriqués, favorisant la mise en œuvre de bétons écologiques et

contribuant à la réduction de l'empreinte environnementale du secteur de la construction. Par ailleurs, son emploi est également envisagé dans la fabrication de bétons légers non structurels, adaptés aux usages secondaires.

3.1.1.5. Cendres volcaniques

Les cendres volcaniques constituent un matériau naturel abondant, présent dans de nombreuses régions du monde, avec une forte occurrence notamment dans le centre de l'Oregon (États-Unis). Dans cette région, leur utilisation comme matériau de revêtement routier est une pratique courante depuis plusieurs décennies, notamment pour la construction de routes à surface non traitée. Toutefois, les performances observées sur ces chaussées se révèlent variables, oscillant entre de bons et de moins bons résultats (Kumar et al., 2023).

Sur le plan géologique, les scories volcaniques se distinguent par l'absence d'une composition chimique et minéralogique uniforme. Elles peuvent être classées en deux grandes familles :

- des scories acides, généralement claires, dominées par le quartz et les feldspaths ;
- des scories basiques, plus sombres, composées principalement de minéraux ferromagnésiens et dépourvues de quartz.

Cette diversité minéralogique explique la variabilité de leurs performances lorsqu'elles sont utilisées comme granulats dans différents contextes de construction.

3.1.1.6. Scories

La scorie volcanique est déjà employée comme granulats de substitution dans les formulations de béton. Cette roche magmatique légère présente une structure alvéolaire caractéristique, composée de vacuoles et de cavités arrondies, ce qui lui confère une texture partiellement vitreuse et cristalline. Sa couleur peut varier du noir et gris foncé jusqu'à un brun rougeâtre.

Sur le plan physique, la scorie possède une masse volumique réelle de 2,58, une absorption d'eau de l'ordre de 17 ± 3 %, ainsi qu'une masse volumique apparente avoisinant 1518 ± 3 kg/m³. Ces caractéristiques traduisent sa nature poreuse et expliquent son usage dans les bétons légers, où elle contribue à réduire la masse volumique globale tout en offrant des propriétés d'isolation intéressantes (Kumar et al., 2023).

La Figure 1.3 présente une illustration des différents types de granulats légers d'origine naturels, utilisés dans la formulation des bétons légers.





Figure 1.3. Quelques exemples de granulats légers naturels : (a) pierre ponce, (b) balle de riz, (c) diatomite, (d) sciure de bois, (e) Cendres volcaniques et (f) Scories.

3.1.2. Les granulats légers artificiels

3.1.2.1. Granulats de cendres volantes frittées

Les granulats issus du frittage des cendres volantes (SFAA) représentent une alternative intéressante aux granulats naturels dans la formulation des bétons légers. Ils se caractérisent par une morphologie sphérique et une teinte brunâtre. Leur masse volumique d'environ 1,5 et leur taux d'absorption d'eau proche de 15 % traduisent une forte porosité et expliquent leur légèreté par rapport aux granulats traditionnels.

Le procédé de production de ces granulats à partir des cendres volantes comporte généralement trois étapes successives, permettant de transformer un déchet industriel en matériau valorisable pour le secteur de la construction.

3.1.2.2. Granulats de scories artificielles

Les scories artificielles, issues principalement de la sidérurgie et de la production de fer et d'acier, constituent une catégorie de granulats légers largement valorisés dans le domaine de la construction. Leur structure minéralogique confère aux grains une surface irrégulière, rugueuse et très poreuse, généralement issue d'un concassage complet.

Leur faible masse volumique et leur forte porosité expliquent leur emploi privilégié dans la fabrication de blocs de maçonnerie pour cloisons, les couches de ragréage sur toitures plates ainsi que certains enduits légers. La présence importante de vides d'air leur procure d'excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique, tout en contribuant à une réduction des charges permanentes dans les structures. Ces atouts facilitent la mise en œuvre, accélèrent les travaux et permettent une diminution des coûts liés à la manutention (Kumar et al., 2023).

3.1.2.3. Granulats de perlite expansée

La perlite expansée est un matériau d'origine volcanique riche en silice, obtenu par chauffage à haute température (entre 900 et 1200 °C) qui provoque l'expansion de sa structure et la formation d'un granulat très poreux. Elle se caractérise par une forte capacité d'absorption d'eau (30 à 40 %) et une faible masse volumique avoisinant 240 kg/m³ (Kumar et al., 2023).

Grâce à ces propriétés, la perlite expansée est largement employée comme granulats légers dans la fabrication de bétons et de mortiers, où elle apporte à la fois une excellente isolation thermique et une stabilité chimique élevée. Ces caractéristiques expliquent son intérêt particulier pour les applications de construction nécessitant à la fois légèreté, inertie chimique et performance énergétique.

3.1.2.4. Granulats d'argile expansée

L'argile expansée est obtenue par chauffage de certaines argiles, schistes ou matériaux siliceux jusqu'à une température proche de la fusion. Sous l'effet de la chaleur, des gaz se dégagent dans la masse, provoquant une expansion importante et la formation d'une structure cellulaire interne. Cette microstructure poreuse est ensuite conservée lors du refroidissement, donnant naissance à un matériau particulièrement léger.

Ce granulats artificiel est largement utilisé dans la production de bétons légers structurels, en raison de sa combinaison intéressante de faible masse volumique, résistance mécanique et durabilité. Dans plusieurs pays, il est industrialisé selon différents procédés et commercialisé sous diverses appellations telles que LECA, Haydite, Aglite, Rocklite ou Gravelite, qui représentent des marques de référence dans le domaine des granulats légers (Kumar et al., 2023).

3.1.2.5. Granulats de coke breeze

Le coke breeze correspond à un sous-produit carboné, proche du clinker par son aspect, mais obtenu après une cuisson moins poussée. Ce matériau, utilisé comme granulats légers, conduit généralement à des bétons peu résistants et fragiles, ce qui limite fortement leur emploi dans des zones exposées aux intempéries ou soumises à l'humidité.

En revanche, lorsqu'il est associé au sable, il permet d'obtenir des bétons particulièrement légers, adaptés à des applications non structurelles telles que les cloisons intérieures. Sa principale contribution réside donc dans la réduction du poids propre des éléments, ce qui en fait un matériau intéressant pour certaines constructions légères ou secondaires (Kumar et al., 2023).

3.1.2.6. Granulats de vermiculite expansée

La vermiculite est un minéral d'aspect micacé, doté d'une structure lamellaire similaire à celle du mica. Lorsqu'elle est chauffée à des températures comprises entre 650 et 1000 °C, en présence d'une faible teneur en eau, elle subit un phénomène d'exfoliation, caractérisé par la séparation et l'expansion de ses fines couches. Ce processus entraîne une augmentation de volume pouvant atteindre 30 fois la taille initiale du matériau.

Sous sa forme exfoliée, la vermiculite présente une masse volumique apparente très faible, comprise entre 60 et 130 kg/m³, ce qui en fait un granulats extrêmement léger. Ces propriétés expliquent son emploi dans les bétons et mortiers isolants, où elle contribue à améliorer à la fois la légèreté, l'isolation thermique et acoustique des matériaux de construction (Kumar et al., 2023).

La Figure 1.4 présente une illustration des différents types de granulats légers d'origine artificiels, utilisés dans la formulation des bétons légers.

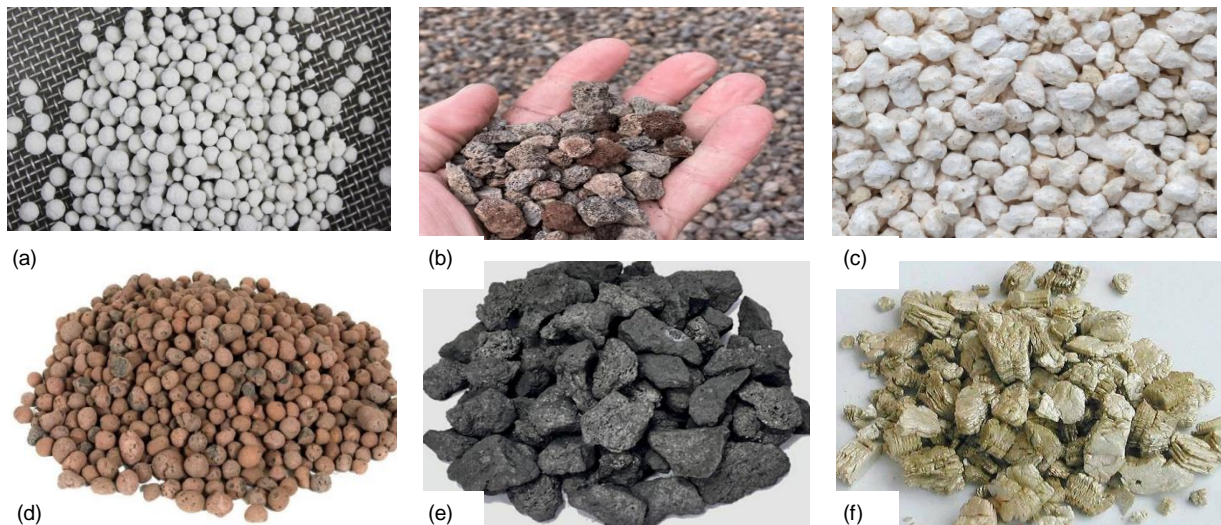


Figure 1.4. Quelques exemples de granulats légers artificiels : (a) cendres volantes frittées, (b) scories artificielles, (c) perlite expansée, (d) argile expansée, (e) coke breeze et (f) vermiculite.

La Figure 1.5 illustre la répartition en pourcentage des différents granulats légers employés dans les BAP au cours des deux dernières décennies. On constate que les granulats d'argile expansée (GLAE) occupent la part la plus importante, confirmant leur rôle prépondérant dans la formulation des bétons légers autoplaçants.

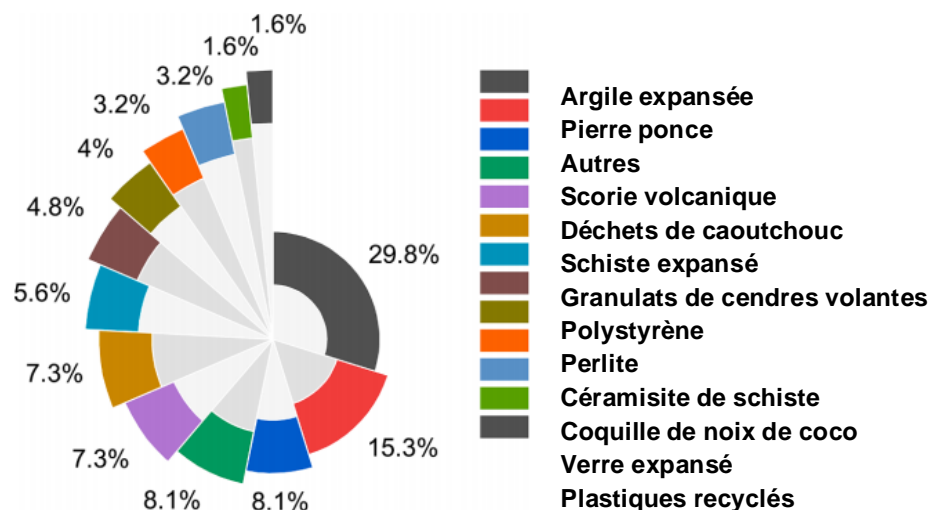


Figure 1.5. Répartition en pourcentage des principales formes de GL utilisées dans les BAP au cours des vingt dernières années (Kumar et al., 2023).

3.2 Caractéristiques des granulats légers

3.2.1. Absorption d'eau

En raison de leur structure hautement poreuse, les GL présentent une capacité d'absorption d'eau nettement supérieure à celle des granulats naturels (GN). Si cette caractéristique peut constituer un inconvénient pour la formulation de bétons de qualité, le colmatage complet des

pores afin de limiter l'absorption n'est pas envisageable, car il augmenterait la masse volumique globale des granulats. La solution la plus couramment adoptée consiste à pré-humidifier les granulats avant leur incorporation dans le mélange.

Ce paramètre joue un rôle déterminant sur le rapport eau/liant effectif du béton (Liu et al., 2011), et doit donc être explicitement pris en compte lors de la formulation. En outre, plusieurs études, dont celle de Shafigh et al. (Shafigh et al., 2012), ont montré que les bétons élaborés avec des granulats poreux se révèlent moins sensibles à une cure déficiente. L'eau stockée dans les granulats agit comme une réserve interne, favorisant l'hydratation continue et réduisant le risque de retrait plastique (Pierce, 2007).

3.2.2. Masse volumique réelle

La masse volumique réelle se définit comme le rapport entre la masse d'un matériau et celle d'un volume identique d'eau à 23 °C. Les granulats légers présentent des valeurs comprises entre 0,40 et 1,85, selon les données de la littérature. Cette large plage de variation s'explique par la diversité des sources géologiques ou industrielles des granulats et par les procédés de fabrication auxquels ils sont soumis.

Comparativement aux GN, la masse volumique réelle des GL est généralement inférieure de 10 à 80 %. Ce paramètre joue un rôle fondamental, notamment dans le calcul des rapports poids/volume, et influe directement sur la masse volumique finale du béton ainsi que sur sa maniabilité à l'état frais.

3.2.3. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des granulats joue un rôle déterminant dans la conception des bétons, car elle conditionne le volume de pâte nécessaire, la richesse du mélange ainsi que son coût global. Dans la méthode de formulation volumétrique, ce paramètre constitue l'une des données de base. Pour les granulats légers, les valeurs de masse volumique apparente se situent généralement entre 350 et 1490 kg/m³. Selon Ahmad et al. (Ahmad et al., 2007), une plage comprise entre 700 et 1400 kg/m³ est particulièrement adaptée aux applications structurelles, où un compromis est recherché entre légèreté et performances mécaniques.

Par rapport aux GN, les GL présentent des valeurs inférieures de 10 à 80 %, ce qui traduit leur forte porosité et explique en grande partie leurs propriétés de légèreté.

3.2.4. Forme et texture

Les propriétés des granulats, notamment leur taille, leur forme et leur texture, jouent un rôle déterminant dans le comportement du béton, qu'il soit ordinaire ou autoplaçant. La forme des particules influence directement l'emboîtement au sein de la matrice et le taux de compacité du squelette granulaire, deux paramètres clés pour la performance mécanique et la rhéologie du mélange. Les GL présentent généralement une morphologie anguleuse et parfois lamellaire, ce qui peut limiter la fluidité des BAP. Les travaux antérieurs ont montré que l'augmentation de la taille des grains conduit à une réduction de l'écoulement du BAP (Khaleel et al., 2011), tandis que l'emploi de granulats de 10 mm favorise un meilleur compromis entre ouvrabilité et résistance mécanique.

Par ailleurs, l'indice de forme constitue un critère important pour évaluer l'influence de la morphologie granulaire sur le béton durci. Les granulats sphériques, dont l'indice est faible, offrent une maniabilité accrue, tandis que les granulats anguleux, associés à un indice plus élevé, sont généralement corrélés à une meilleure résistance en compression (Cui et al., 2012). Enfin, la texture de surface conditionne le frottement interne du mélange. Dans le cas de granulats poreux, la pâte de ciment peut pénétrer dans les cavités superficielles, ce qui renforce l'adhésion entre la pâte et les granulats et améliore la cohésion de l'ensemble (Zhang et Gjorv, 1990).

3.2.5. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques à l'état durci des BAPL sont fortement influencées par la résistance intrinsèque des GL. Selon les données de la littérature, la résistance à l'écrasement des GL peut atteindre jusqu'à 11,8 MPa, en fonction de leur nature et de leur mode de production. Néanmoins, la plupart des études consacrées aux BAPL ne rapportent pas directement cette valeur, bien qu'il soit reconnu que la résistance des GL demeure nettement inférieure à celle des GN.

Ces différences de performance s'expliquent principalement par la variabilité des sources de granulats et par les procédés de fabrication mis en œuvre. Dans le cas des granulats artificiels (argile expansée, verre expansé), la résistance finale dépend étroitement de paramètres tels que la température de frittage, la taille et la distribution des pores, ainsi que la granulométrie globale des particules (Ozguven et Gunduz, 2012). Cependant, il est possible d'obtenir des BAPL de masse volumique comparable en utilisant différents GL, mais dont la résistance mécanique varie considérablement. Cette différence reflète l'importance de la qualité intrinsèque des granulats et de la composition du mélange dans la performance finale du matériau.

3.3. Applications des granulats légers

Au cours des dernières décennies, les GL de qualité structurelle ont trouvé de nombreuses applications dans le domaine de la construction et du génie civil. Ils ont été employés avec succès dans des solutions de stabilisation de pentes, des travaux de compensation de charges sur sols compressibles, la protection de conduites enterrées, ainsi que dans des applications exigeant une forte résistance thermique ou une résistance accrue au feu. On les retrouve également dans la réalisation de culées de ponts, murs de soutènement et ouvrages en milieu côtier, où leur légèreté constitue un atout majeur.

L'usage de BAP à base de GL s'est particulièrement développé depuis 1992, notamment au Japon, où ils ont été utilisés dans la construction de ponts à haubans (Ohno et al., 1993). Parmi les applications notables, on peut citer la réalisation d'une poutre de 20 m en BAPL (Dymond, 2007), l'expérimentation à grande échelle sur des murs en BAPL (Lahkega et Stenah, 2011), ainsi que la préfabrication de murs en forme de C et la construction d'éléments structurels pour gradins de stades (Shi, 2005 ; Hubertova et Hela, 2007).

De manière générale, l'intégration des GL dans les bétons, qu'ils soient autoplaçants ou traditionnels, suscite un intérêt croissant dans les milieux de la recherche et de la pratique, grâce aux avantages conjoints de la légèreté, de la performance mécanique et de la durabilité.

4. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

4.1. Définition et origine

Les bétons autoplaçants légers (BAPL), également désignés sous l'appellation anglophone Lightweight Self-Compacting Concrete (LWSCC), représentent une évolution récente dans le domaine des matériaux cimentaires. Ils combinent les deux concepts majeurs qui ont marqué l'ingénierie du béton moderne :

- d'une part, la légèreté, obtenue par l'utilisation de GL (naturels ou artificiels), permettant de réduire la masse volumique du béton et, par conséquent, les charges permanentes des structures ;
- d'autre part, l'autoplaçabilité, qui assure une mise en œuvre aisée grâce à une excellente fluidité et une capacité de remplissage sans vibration.

Le développement des BAPL répond à des besoins croissants en construction moderne, notamment dans les ouvrages de grande portée (ponts, bâtiments de grande hauteur, dalles et éléments préfabriqués), où la réduction du poids propre constitue un atout majeur sans compromettre les performances mécaniques et la durabilité.

Historiquement, les premiers travaux sur les BAPL sont apparus à la fin des années 1990 et au début des années 2000, lorsque les chercheurs ont cherché à adapter les méthodes de formulation des BAP à des matériaux granulaires poreux tels que l'argile expansée, la perlite ou la pierre ponce. Ces recherches ont rapidement montré que l'association entre GL et BAP ouvrait de nouvelles perspectives, en particulier pour la construction durable, en réduisant la consommation de matériaux et d'énergie tout en améliorant les conditions de mise en œuvre sur chantier.

En résumé, le BAPL peut être défini comme un béton fluide, homogène et auto-nivelant, dont la masse volumique est réduite grâce à l'emploi de GL, et qui conserve les propriétés essentielles du BAP à l'état frais (fluidité, capacité de passage, résistance à la ségrégation) tout en offrant des performances adaptées aux exigences structurelles et de durabilité.

4.2. Principes de formulation des bétons autoplaçants légers

La formulation des BAPL repose sur les mêmes fondements que celle des BAP classiques, tout en intégrant les spécificités liées à l'emploi de granulats légers. L'objectif est de concilier deux exigences souvent contradictoires : garantir une excellente ouvrabilité à l'état frais (fluidité, capacité de remplissage et résistance à la ségrégation) tout en assurant une résistance mécanique et une durabilité adaptées aux usages structurels.

Le premier principe fondamental concerne la gestion du volume de pâte. Dans les BAPL, la pâte doit être suffisante pour enrober efficacement les GL, combler leurs pores superficiels et réduire le frottement intergranulaire, tout en évitant une consommation excessive de liant. L'approche dite de la "pâte excédentaire" est souvent utilisée : elle consiste à ajuster la proportion de pâte de manière à assurer la mobilité du béton, en tenant compte de l'absorption d'eau caractéristique des granulats légers.

Un second principe essentiel est lié à la correction du rapport eau/liant. La porosité des GL entraîne une absorption d'eau variable selon leur nature et leur conditionnement préalable (secs, pré-humidifiés ou saturés). Pour compenser cet effet et éviter une perte de fluidité ou une ségrégation prématurée, il est courant de prétraiter les granulats (pré-mouillage) ou d'adapter le dosage en superplastifiants.

Enfin, le choix et la proportion des constituants minéraux complémentaires (laitiers, cendres volantes, fumées de silice, poudres de verre, etc.) permettent d'optimiser la rhéologie de la pâte tout en limitant la chaleur d'hydratation et en améliorant la durabilité. Ces additions minérales contribuent également à ajuster la viscosité de la matrice et à renforcer la cohésion entre les GL et la pâte cimentaire.

En somme, la formulation d'un BAPL ne se limite pas à une simple substitution de granulats ordinaires par des granulats légers, mais constitue un véritable exercice d'équilibre entre fluidité, stabilité et performances mécaniques. C'est pourquoi de nombreux modèles de formulation spécifiques ont été proposés dans la littérature afin d'adapter les méthodes existantes aux particularités des GL.

Il convient par ailleurs de rappeler qu'une attention particulière doit être accordée aux GL lors du malaxage. Contrairement aux GN, généralement introduits dès le début, leur incorporation est souvent retardée afin d'éviter leur fragmentation sous l'effet des forces mécaniques exercées dans le malaxeur. Cette précaution permet de préserver leur structure poreuse et, par conséquent, de maintenir leurs propriétés physiques initiales, indispensables au bon comportement des BAPL.

4.3. Propriétés à l'état frais des bétons autoplacants légers

4.3.1. Effets du type de granulat

Vahabi et al. (Vahabi et al., 2022) ont comparé des BAPL formulés avec de la scorie et de l'argile expansée, et ont conclu que l'argile expansée offrait de meilleures performances en termes de remplissage et de passage. De même, Dolatabad et al. (Dolatabad et al., 2020) ont observé, sur des mélanges contenant perlite, scorie et argile expansée, que l'ouvrabilité variait selon le type de granulat, avec notamment les temps les plus courts au test en entonnoir en V pour la scorie. Enfin, Li et al. (Li et al., 2021) ont montré que l'argile expansée conférait une fluidité et une capacité de passage supérieures à celles obtenues avec du caoutchouc ou du polystyrène expansé (EPS). Ces résultats soulignent que la nature du granulat léger influence directement sur les propriétés à l'état frais, en raison de différences de forme, de texture, de masse volumique et d'absorption d'eau.

4.3.2. Effets de la concentration en granulats

La concentration des GL joue un rôle déterminant sur les propriétés à l'état frais des BAPL. Plusieurs travaux indiquent qu'à composition identique, une augmentation du taux de substitution peut modifier significativement la fluidité et la capacité de passage du béton.

Plusieurs auteurs (Muthusamy et Kolandasamy, 2015 ; Poongodi et Murthi, 2021) ont montré qu'un accroissement du taux de granulats de coque de coco entraînait une hausse de l'ouvrabilité, avec un gain de 14 % de l'étalement pour une substitution totale des GN.

Kanadasan et Abdul Razak (Kanadasan et Abdul Razak, 2015) ont rapporté des résultats similaires avec le clinker de palmier à huile (POC), notant une augmentation de 8 % du diamètre d'étalement et une réduction de 34 % et 40 % des temps T_{500} et V-funnel. À l'inverse, certains travaux montrent une baisse de la fluidité au-delà d'un seuil critique de substitution, notamment avec la pouzzolane naturelle (Karthika et al., 2018). De plus, l'utilisation accrue de granulats comme le caoutchouc (Li et al., 2021), la perlite ou la scorie (Dolatabad et al., 2020) réduit nettement l'ouvrabilité. En résumé, la proportion de GL influe directement sur l'ouvrabilité des BAPL, en interaction avec leurs propriétés physiques et la composition du mélange.

4.3.3. Effets de la taille des granulats et de la compacité

La taille et la distribution granulométrique des GL constituent des paramètres essentiels dans la formulation des BAPL, car ils influencent directement la compacité du squelette granulaire et, par conséquent, les propriétés à l'état frais.

Mazaheripour et al. (Mazaheripour et al., 2011) ont montré que l'utilisation combinée de granulats d'argile expansée fins et grossiers, en substitution des sables naturels, améliorerait la fluidité du béton. Cette amélioration est toutefois associée à une augmentation de la viscosité, entraînant un allongement des temps mesurés aux essais T_{500} et V-funnel. De leur côté, Omar et al. (Omar et al., 2020) ont étudié l'effet du rapport gros/fins sur des BAPL à base d'ardoise expansée, et constaté qu'un rapport élevé diminuait la fluidité tout en augmentant le temps T_{500} . Par ailleurs, les travaux de Lotfy et al. (Lotfy et al., 2016) soulignent que l'emploi de GL fins permet de combler les vides intergranulaires, d'améliorer la compacité et, par conséquent, de réduire la ségrégation tout en favorisant une meilleure fluidité grâce à un excédent de pâte disponible.

4.3.4. Effets des liants et de la teneur en fines

Le rôle des liants et de la fraction fine est déterminant dans la rhéologie des BAPL. Li et al. (Li et al., 2017) ont mis en évidence l'importance de l'épaisseur du film de mortier dans des BAPL à base de céramsite d'ardoise : l'augmentation de cette épaisseur de 1.4 à 2.0 mm a entraîné un gain de 25 % du diamètre d'étalement, grâce à la réduction des frottements entre granulats. Au-delà de 2.0 mm, une diminution de la fluidité a toutefois été observée, alors que les temps T_{500} et V-funnel diminuaient avec l'accroissement de l'épaisseur du film.

De leur côté, Kanadasan et Abdul Razak (Kanadasan et Abdul Razak, 2014) ont montré que l'accroissement de la teneur en fines et du volume de pâte dans des BAPL à base de clinker de palmier à huile améliorerait significativement l'ouvrabilité. En passant d'un volume de pâte de 410 à 520 l/m³, le diamètre d'étalement a augmenté de 8 %, tandis que les temps T_{500} et V-funnel ont chuté respectivement de 14 à 6 secondes et de 5 à 2 secondes. Floyd et al. (Floyd et al., 2015) confirment par ailleurs qu'une teneur plus élevée en ciment contribue à renforcer la stabilité visuelle des mélanges.

4.3.5. Effets des matériaux cimentaires supplémentaires

Les additions minérales jouent un rôle clé dans la maîtrise des propriétés à l'état frais des BAPL, leur efficacité dépendant de leur nature et de leur dosage. Naderi et al. (Naderi et al.,

2018) ont montré que l'incorporation de fumée de silice dans des BAPL à base de scorie améliorait la fluidité, l'écoulement à la boîte en L, l'étalement et le temps au V-funnel. Avec une substitution de 12,5 % du ciment, le diamètre d'étalement augmente de 14,5 %. Des tendances similaires ont été rapportées dans des BAPL formulés avec d'autres GL, tels que la coque de coco ou les granulats plastiques (Adhikary et al., 2022). Cette amélioration est attribuée à l'effet lubrifiant de la fumée de silice, qui libère l'eau piégée entre les particules et favorise l'écoulement (Mehta & Ashish, 2019).

L'utilisation de cendres volantes a également montré des effets positifs. Ting et al. (Ting et al., 2020) ont observé, sur des BAPL à base de coques de palmier à huile, qu'une substitution de 50 % du ciment augmentait l'étalement de 660 à 730 mm et réduisait le temps T_{500} d'environ 64 %. L'amélioration de l'ouvrabilité est expliquée par l'effet de dilution qui limite la floculation des particules cimentaires, ainsi que par la morphologie sphérique des cendres, jouant un rôle de micro-billes lubrifiantes (Hemalatha et Ramaswamy, 2017).

En revanche, Agwa et al. (Agwa et al., 2020) ont montré que la substitution du ciment par 20 % de cendres de paille de riz ou de tiges de coton réduisait l'ouvrabilité. Par rapport au témoin, l'étalement a diminué de 20 % et 13 %, tandis que les temps T_{500} et V-funnel ont fortement augmenté (jusqu'à +133 % pour le T_{500} avec la paille de riz). Cette perte est attribuée à la grande surface spécifique de ces cendres, qui accroît la demande en eau.

Dans l'ensemble, ces résultats indiquent que l'ouvrabilité des BAPL peut être significativement modulée par le type et le dosage de matériaux pouzzolaniques employés.

4.3.6. Effets du rapport eau/liant et du superplastifiant

Les propriétés à l'état frais des BAPL dépendent fortement du rapport eau/liant et du dosage en superplastifiant. Güneyisi et al. (Güneyisi et al., 2016), sur des BAPL élaborés avec des granulats de cendres volantes, ont montré qu'une augmentation du rapport eau/liant améliorait significativement la capacité de remplissage et de passage. Des résultats similaires ont été rapportés par Lotfy et al. (Lotfy et al., 2015).

Lotfy et al. (Lotfy et al., 2015) soulignent par ailleurs que l'accroissement de la teneur en liant accroît la demande en superplastifiant pour conserver une bonne ouvrabilité. De plus, l'ajout de particules ultrafines peut augmenter la demande en eau ; dans ce cas, un apport supplémentaire en superplastifiant, ou une élévation du rapport eau/liant, est nécessaire pour atteindre la fluidité recherchée. Floyd et al. (Floyd et al., 2015) confirment que l'augmentation progressive du dosage en superplastifiant constitue un moyen efficace pour améliorer l'ouvrabilité des BAPL.

4.3.7. Effets du prétraitement des granulats

Le prétraitement des GL constitue une stratégie efficace pour limiter leur absorption d'eau et améliorer l'ouvrabilité des BAPL. Vahabi et al. (Vahabi et al., 2022) ont ainsi montré que le revêtement de scories et d'argiles expansées par des couches de latex réduisait leur porosité et améliorait l'étalement de 2 à 10 %, l'effet étant plus marqué avec des couches multiples. Ces membranes polymériques hydrophobes réduisent également les forces de frottement internes, ce qui diminue les temps d'écoulement et la résistance au blocage.

De leur côté, Güneyisi et al. (Güneyisi et al., 2016) ont comparé des BAPL élaborés avec des granulats de cendres volantes frittées (FAA) bruts et avec FAA traités au verre soluble. Ils ont observé que le revêtement hydrophobe réduisait l'absorption d'eau et les forces de cohésion, entraînant une meilleure fluidité (augmentation de l'étalement) et une réduction des temps d'écoulement.

De nombreuses études ont mis en évidence l'efficacité de l'enrobage des granulats légers par des revêtements cimentaires afin de réduire leur absorption d'eau et, par la même occasion, d'améliorer l'ouvrabilité des BAPL. Plusieurs auteurs (Wu et al., 2019 ; Nozahic & Amziane, 2012 ; Müller & Linsel, 2000) ont rapporté une diminution significative de l'absorption d'eau à 24 heures des granulats d'argile expansée (GLAE) après l'application d'une seule couche de pâte cimentaire (Domagała & Bryła, 2021) ou de plusieurs couches d'enrobages réalisés à partir de mélanges binaires de ciment Portland associés à des cendres volantes ou à de la fumée de silice (Dixit & Pang, 2022).

Ces résultats confirment que l'application de revêtements hydrophobes sur les granulats légers permet de diminuer leur demande en eau et d'optimiser l'ouvrabilité des BAPL.

4.4. Propriétés à l'état durci des bétons autoplaçants légers

4.4.1. Effets du type et de la concentration des granulats

Les GL présentent une résistance nettement inférieure à celle des granulats ordinaires, ce qui peut affecter significativement la résistance en compression des BAPL. Plusieurs études ont montré que, pour une composition similaire, l'utilisation de GL à faible résistance ou fortement poreux (LECA, pierre ponce, verre expansé, polystyrène) entraîne une baisse notable de la résistance. Vahabi et al. (Vahabi et al., 2022) ont par exemple observé que des BAPL à base de scorie développaient une résistance plus élevée que ceux à base de LECA. Des résultats similaires ont été rapportés par Dolatabad et al. (Dolatabad et al., 2020).

L'augmentation de la concentration en GL accentue cette diminution, notamment avec les granulats comme le caoutchouc ou le polystyrène expansé, dont l'adhérence à la pâte cimentaire est faible (Aslani et Kelin, 2018). En revanche, la plupart des GL couramment utilisés satisfont aux exigences du CEB/RILEM pour les bétons structurels. Toutefois, l'emploi à forte teneur de certains granulats, tels que le caoutchouc, la pierre ponce ou le clinker de palmier à huile, peut compromettre l'atteinte des résistances minimales requises, ce qui justifie la nécessité d'études complémentaires.

4.4.2. Effets de la taille des granulats et de la compacité

La taille des granulats influence de manière notable la résistance des BAPL et doit être prise en compte lors de la formulation. Lotfy et al. (Lotfy et al., 2015) ont montré qu'un faible volume de gros GL pouvait améliorer la résistance en compression. En revanche, Nahhab et Ketab (Nahhab et Ketab, 2020) ont observé que des BAPL formulés avec de petits granulats d'argile expansée développaient une résistance plus élevée que ceux contenant de gros granulats.

Cette tendance s'explique par le fait que les granulats de petite taille présentent généralement une résistance intrinsèque plus élevée et une porosité réduite, alors que les gros granulats

artificiels renferment souvent de larges pores, ce qui affaiblit la matrice. Des résultats similaires ont été rapportés par Miled et al. (Miled et al., 2007), confirmant que l'utilisation de GL de plus petite dimension peut contribuer à améliorer les performances mécaniques des BAPL.

4.4.3. Effets des liants et de la teneur en fines

L'optimisation de la teneur en fines et en matériaux liants est un paramètre essentiel pour le comportement mécanique des BAPL. En effet, une proportion accrue de particules fines contribue à épaissir le film de mortier entourant les granulats, ce qui peut améliorer la cohésion de la matrice. Li et al. (Li et al., 2017) ont montré que l'épaisseur du film de mortier avait une influence directe sur la résistance en compression : en augmentant cette épaisseur de 1.4 à 1.8 mm, la résistance à 28 jours a progressé de 21,2 %. Toutefois, au-delà de 1.8 mm, une diminution des résistances a été observée, traduisant un excès de pâte peu favorable.

Dans la même logique, Kanadasan et Razak (Kanadasan et Abdul Razak, 2014) ont constaté qu'une augmentation de la teneur en fines accroissait le volume de pâte, ce qui améliorerait la maniabilité des mélanges à base de clinker de palmier à huile. Cependant, cette amélioration de l'ouvrabilité s'accompagnait d'une baisse progressive de la résistance mécanique, confirmant la nécessité de trouver un équilibre. Floyd et al. (Floyd et al., 2015) soulignent également qu'un apport suffisant en ciment est indispensable pour maintenir une viscosité adéquate, garantir une bonne ouvrabilité et assurer des résistances initiales élevées. Toutefois, un dosage excessif en ciment peut générer des effets indésirables tels que la fissuration, le retrait ou encore une diminution de la durabilité à long terme.

Ainsi, la littérature converge vers l'idée qu'un dosage optimal en fines et en liant est nécessaire : des quantités trop faibles peuvent compromettre la fluidité et la cohésion du mélange, tandis qu'un excès entraîne une perte de résistance et une fragilisation du béton. Le défi de la formulation des BAPL réside donc dans la recherche d'un équilibre entre ouvrabilité, résistance mécanique et durabilité.

4.4.4. Effets des matériaux cimentaires supplémentaires

Les matériaux pouzzolaniques naturels ou issus de l'industrie sont aujourd'hui largement utilisés dans les BAP et BAPL afin d'améliorer à la fois les propriétés à l'état frais et à l'état durci. Leur efficacité dépend cependant du type, de la finesse et du dosage utilisés. La fumée de silice et les cendres volantes restent les plus couramment exploitées en raison de leur disponibilité.

Naderi et al. (Naderi et al., 2018) ont montré que l'ajout de fumée de silice dans des BAPL à base de scories permettait d'accroître la résistance en compression, l'incorporation de 5 % de fumée de silice offrant une augmentation d'environ 6 % des résistances à 28 et 56 jours. Faraj et al. (Faraj et al., 2021) ont également confirmé cet effet positif dans des BAPL contenant des granulats plastiques. L'action de la fumée de silice peut s'expliquer par l'accélération de l'hydratation à faible teneur, alors qu'un dosage excessif (supérieur à 20 %) retarde l'hydratation et peut générer une perte d'efficacité (Mehta & Ashish, 2019).

En revanche, l'utilisation de cendres volantes présente un comportement différent : Ting et al. (Ting et al., 2020) ont observé une amélioration de l'ouvrabilité mais une diminution progressive des résistances, atteignant une baisse de plus de 50 % pour une substitution de 50 % du ciment. Cette perte est généralement liée au retard d'hydratation induit par la cendre volante. À l'inverse, certaines cendres agricoles comme la cendre de paille de riz ou de tiges de coton, utilisées à faibles dosages (environ 10 %), se sont révélées bénéfiques pour la résistance en compression, avec des gains respectifs de 13,6 % et 31,8 % (Agwa et al., 2020). Toutefois, au-delà de ce seuil, leur efficacité décroît rapidement.

En résumé, l'apport de matériaux pouzzolaniques dans les BAPL influence de manière contrastée la résistance en compression : la fumée de silice tend à l'améliorer, notamment à long terme, tandis que les cendres volantes, bien qu'elles favorisent l'ouvrabilité, entraînent une baisse des résistances à forts dosages. Le choix du type et de la teneur optimale en pouzzolans demeure donc un facteur clé dans la formulation des BAPL.

4.4.5. Effets du rapport eau/ciment et des superplastifiants

À l'instar des BO, le rapport eau/ciment exerce une influence déterminante sur les propriétés des BAPL. L'utilisation de GL poreux et non traités tend à accroître les besoins en eau ou en superplastifiant afin de maintenir l'ouvrabilité du mélange. Cependant, comme pour les BAP et les BO, une teneur en eau trop élevée entraîne une diminution notable des résistances mécaniques. Güneyisi et al. (Güneyisi et al., 2016) ont ainsi montré qu'un rapport eau/liant élevé réduit significativement la résistance en compression des BAPL. Toutefois, l'incorporation de faibles doses de nano-silice s'est révélée efficace pour compenser cette perte et améliorer la résistance même à des rapports E/L élevés. Des résultats similaires ont été rapportés par Lotfy et al. (Lotfy et al., 2015), confirmant la sensibilité de ces bétons à l'excès d'eau.

En général, la porosité intrinsèque des bétons légers est plus importante que celle des bétons conventionnels, ce qui limite leur gain de résistance. L'augmentation du rapport eau/ciment accentue encore ce phénomène, en générant une porosité supplémentaire liée à l'évaporation de l'eau libre, et conduit ainsi à des résistances mécaniques plus faibles.

4.4.6. Effets du prétraitement des granulats légers

Ces dernières années, le prétraitement des GL a suscité un intérêt croissant en raison de son impact positif sur les propriétés des BAPL. Vahabi et al. (Vahabi et al., 2021) ont montré que l'application de revêtements au latex sur la scorie et le LECA améliore à la fois les propriétés à l'état frais et la résistance mécanique, avec des gains de résistance en compression atteignant 21 % pour la scorie et 13,5 % pour le LECA. Dans la même logique, Assaad et El Mir (Assaad et El Mir, 2020) ont souligné que l'utilisation du latex SBR (Styrene-butadiene rubber) favorise la formation d'une liaison interfaciale monolithique, limitant ainsi la propagation des microfissures.

Par ailleurs, Güneyisi et al. (Güneyisi et al., 2016) ont mis en évidence l'efficacité du verre liquide comme agent de prétraitement des granulats frittés à base de cendres volantes, avec une amélioration de 32 % à 44 % de la résistance en compression des BAPL. Ce renforcement

s'explique par la densification et le durcissement de la surface des GL, sans pour autant augmenter notablement leur masse volumique.

Outre les traitements polymériques ou chimiques, plusieurs études se sont intéressées à l'efficacité des revêtements cimentaires appliqués aux GL. Des résultats encourageants ont notamment été obtenus par Dixit et Pang (Dixit et Pang, 2022), qui ont procédé à l'enrobage des GLAE par quatre couches successives de mélanges cimentaires dopés à la fumée de silice ou aux cendres volantes, conduisant à une augmentation significative de la résistance à la compression (75 % et 52 % respectivement). En revanche, Domagała et Bryła (Domagała et Bryła, 2021) n'ont observé qu'une amélioration limitée (14 %) avec un enrobage à base de pâte de ciment seule, attribuant cette faible performance à une couverture inégale des surfaces granulaires, laissant de nombreux pores exposés. Ces résultats suggèrent que l'efficacité du prétraitement cimentaire dépend fortement de la nature du liant et de l'homogénéité de l'enrobage appliqué.

Ainsi, l'ensemble de ces travaux montre que le recours à des méthodes de prétraitement, notamment pour les granulats très poreux comme le LECA ou le verre expansé, constitue une stratégie efficace pour améliorer significativement la résistance des BAPL.

5. DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

5.1. Absorption d'eau

L'absorption d'eau constitue un paramètre essentiel de la durabilité des bétons, car l'infiltration d'eau accompagnée d'ions agressifs peut compromettre fortement leur performance à long terme. Les bétons légers présentent généralement une absorption d'eau plus élevée que les bétons conventionnels, en raison de la porosité accrue des GL par rapport aux GN. Cette absorption varie toutefois selon la nature et les caractéristiques physiques des granulats, de sorte que deux bétons légers de masse volumique similaire peuvent afficher des comportements différents.

Dans le cas des BAPL, l'utilisation de granulats hautement poreux (perlite, cendres volantes agglomérées à froid, ponce) entraîne une absorption d'eau importante, tandis que l'emploi de matériaux tels que le polystyrène expansé (EPS) ou le caoutchouc peut affaiblir l'adhérence avec la matrice cimentaire, dégradant la zone de transition interfaciale (ZTI) et augmentant également l'absorption (Angelin et al., 2020 ; Hilal et al., 2021).

À l'inverse, plusieurs travaux ont montré que l'incorporation d'additions minérales permet de réduire significativement l'absorption. Ainsi, l'ajout de 2 % de nano-silice a permis une diminution de près de 38 % de l'absorption (Ghanbari et al., 2020). De même, la combinaison de fumée de silice et de cendres volantes a réduit l'absorption de près de 15 % (Güneyisi et al., 2015a), en raison de la densification de la microstructure et du remplissage des vides par les produits d'hydratation, effet qui s'accroît avec le temps (Güneyisi et al., 2015b).

Par ailleurs, l'application de polymères (SBR, PVR) comme revêtements sur les granulats légers s'est révélée efficace pour limiter l'absorption d'eau, en réduisant la formation de pores capillaires et en améliorant la ZTI (Vahabi et al., 2022 ; Adhikary, 2022). D'autres approches, telles que l'utilisation de nanomatériaux, de revêtements hydrophobes ou encore

l'optimisation des conditions de cure, offrent également des perspectives intéressantes pour maîtriser l'absorption des BAPL. Domagała et Podolska (Domagała et Podolska, 2022) ont rapporté que le pré-enrobage des GL de types cendres volantes (Lyttag) et argile expansée, avec une pâte de ciment entraîne une réduction significative de l'absorption d'eau pour l'ensemble des bétons testés, indépendamment du type des GL, de la nature de la pâte de ciment utilisée pour l'enrobage et du taux d'humidité initial des granulats avant enrobage. La diminution de l'absorption d'eau des bétons fabriqués avec des granulats pré-enrobés varie de 34 % à 52 % par rapport aux composites de référence réalisés avec des granulats bruts.

En conclusion, si l'emploi de granulats légers accroît potentiellement le risque d'absorption d'eau, celui-ci peut être largement atténué par l'intégration d'additions minérales, de polymères ou de traitements de surface. Néanmoins, les recherches restent limitées sur ce sujet, et des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour évaluer l'effet combiné de ces paramètres sur l'absorption d'eau des BAPL.

5.2. Zone de transition interfaciale (ZTI)

Selon Adhikary et al. (Adhikary et al., 2021), plusieurs facteurs propres aux GL, tels que la texture de leur surface, leur teneur en eau et leur masse volumique, influencent directement la qualité de la ZTI, laquelle joue un rôle déterminant dans les performances mécaniques et la durabilité des bétons. La capacité d'adhésion entre le granulat et la matrice cimentaire varie notablement d'un type de GL à un autre. Ainsi, certains granulats comme le LECA, le verre expansé, la perlite ou encore la scorie montrent une bonne compatibilité avec la pâte cimentaire, ce qui se traduit par la formation d'une ZTI plus résistante et plus homogène (Duplan et al., 2014 ; Vahabi et al., 2022). À l'inverse, d'autres matériaux légers tels que le polystyrène expansé, le caoutchouc, le COK ou divers déchets polymériques adhèrent moins efficacement à la matrice cimentaire, générant des espaces de séparation dans la zone de transition (Angelin et al., 2020 ; Cheboub et al., 2020).

Ces discontinuités structurelles constituent des voies préférentielles pour l'air, l'eau ou les ions agressifs, et compromettent par conséquent la durabilité du béton. Toutefois, des recherches ont montré que certains ajouts pouvaient améliorer la compacité de la ZTI. Liu et al. (Liu et al., 2019) ont ainsi observé qu'une incorporation de fumée de silice favorise une densification locale, en raison d'une production accrue de gels C-S-H. D'autres travaux, tels que ceux de Vahabi et al. (Vahabi et al., 2022), ont démontré que l'application de revêtements polymériques à base de PVR ou de latex SBR sur les GL contribuait à renforcer la cohésion de la ZTI et à limiter la porosité. De manière similaire, Adhikary (Adhikary, 2022) a confirmé l'efficacité de traitements de surface par SBR et paraffine, qui permettent d'obtenir une zone de transition plus compacte et caractérisée par des liaisons interfaciales continues et homogènes.

De l'ensemble de ces résultats, il ressort que la nature des granulats légers constitue un facteur déterminant pour la qualité de la ZTI dans les BAPL. Néanmoins, les limites observées avec certains types de GL à faible adhérence peuvent être atténuées grâce à l'incorporation d'ajouts minéraux réactifs, comme la fumée de silice, ou à l'emploi de traitements de surface par polymères, qui contribuent tous deux à améliorer la masse volumique et la durabilité de la zone de transition.

5.3. Résistivité électrique

La résistivité électrique du béton constitue un indicateur essentiel pour évaluer le risque de corrosion des armatures, un phénomène susceptible de compromettre la durabilité de la structure. En d'autres termes, elle traduit la capacité du matériau à s'opposer au déplacement des ions chargés. Une relation inverse existe entre la résistivité électrique et la probabilité de corrosion : plus la résistivité est élevée, plus le risque de corrosion est réduit.

Dans ce contexte, Ranjbar et Mousavi ([Ranjbar et Mousavi, 2015](#)) ont examiné l'influence de l'ajout de polystyrène expansé sur la résistivité électrique des BAPL. Leurs résultats montrent qu'une augmentation de la teneur en GL de polystyrène entraîne une diminution de la résistivité électrique, mais correspond paradoxalement à une baisse du risque de corrosion. Ainsi, l'échantillon témoin présentait une résistivité de 19 k Ω ·cm, contre seulement 10 k Ω ·cm pour un béton contenant 30 % de GL. À l'inverse, l'utilisation de scories, de LECA ou encore de granulats de verre expansé a été associée à un accroissement du risque de corrosion ([Mehrinejad Khotbehsara et al., 2017](#)).

Par ailleurs, plusieurs études ont souligné l'effet bénéfique de certains ajouts minéraux. L'introduction de nano-silice et de poudre de zéolite, en réduisant le rapport eau/liant, améliore la résistivité électrique et diminue le risque de corrosion ([Afzali Naniz et Mazloom, 2018](#) ; [Ghanbari et al., 2020](#)). Cette amélioration est généralement attribuée à leur activité pouzzolanique, qui contribue à densifier la microstructure du béton. À l'inverse, une porosité accrue du béton réduit significativement la résistivité électrique, ce qui explique pourquoi l'emploi massif de GL très poreux tend à la faire baisser.

Enfin, Azarsa et Gupta ([Azarsa et Gupta, 2017](#)) rappellent que d'autres paramètres tels que la nature des granulats, leur dimension ainsi que les conditions de cure exercent également une influence notable sur la résistivité électrique. Cependant, les recherches portant spécifiquement sur la résistivité des BAPL restent encore limitées, et des investigations plus approfondies sont nécessaires afin de mieux comprendre l'effet des différents types de GL sur ce paramètre.

5.4. Résistance au gel-dégel

La résistance des bétons au gel-dégel est fortement influencée par leur porosité. En effet, une porosité plus élevée peut limiter l'endommagement par microfissuration causé par la recristallisation de la glace. Spiesz et al. ([Spiesz et al., 2013](#)) ont ainsi montré que les BAPL, en raison de leur porosité plus importante et de leur connectivité capillaire, présentent une meilleure résistance au gel. Ces auteurs soulignent notamment que l'incorporation de granulats de verre expansé confère au BAPL une excellente durabilité face aux cycles de gel-dégel. De même, Shi et Wu ([Shi et Wu, 2005](#)) rapportent que l'utilisation de schiste expansé améliore significativement la résistance au gel du BAPL, le module dynamique relatif d'élasticité restant proche de 60 % même après 320 cycles de congélation-décongélation.

Barnat-Hunek et al. ([Barnat-Hunek et al., 2018](#)) indiquent également que l'addition de perlite dans les BAPL peut fournir une résistance satisfaisante au gel, à condition que sa teneur reste limitée. Par ailleurs, la résistance au gel-dégel des BAPL peut différer de celle des bétons

légers classiques, en raison notamment de l'utilisation de volumes plus élevés d'adjuvants minéraux dans leur formulation.

Toutefois, la littérature scientifique disponible sur ce sujet demeure encore restreinte. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour parvenir à des conclusions plus robustes. Néanmoins, l'ensemble des études existantes tend à montrer que, grâce à leur porosité accrue, les BAPL présentent globalement une meilleure résistance au gel que les BAP conventionnels.

6. CONCLUSION

Ce premier chapitre a permis de dresser un panorama détaillé sur les BAPL, en retraçant leur évolution, leurs spécificités et les enjeux qu'ils soulèvent dans le contexte actuel de la construction. L'association entre la légèreté conférée par les GL et l'autoplaçabilité issue d'une formulation optimisée constitue une avancée majeure, répondant aux besoins de structures modernes plus performantes, durables et respectueuses des contraintes environnementales.

L'examen des GL a mis en évidence leur grande diversité, allant des matériaux naturels tels que la pierre ponce ou les scories volcaniques, aux granulats artificiels comme l'argile expansée, la perlite ou les sous-produits industriels valorisés. Cette variété influe fortement sur les propriétés des BAPL, tant à l'état frais qu'à l'état durci, en particulier en raison de la porosité marquée de ces matériaux. Si cette caractéristique favorise l'allègement et certaines performances thermiques, elle induit également des défis notables, notamment une absorption d'eau élevée et une vulnérabilité accrue de la ZTI. Les recherches récentes montrent toutefois que ces limites peuvent être atténuées par l'usage d'additions minérales, de polymères ou de traitements de surface visant à améliorer la compacité et la durabilité des BAPL.

En définitive, il ressort de cette revue que les BAPL représentent un matériau prometteur, capable de conjuguer maniabilité, légèreté et performances mécaniques acceptables. Cependant, leur développement à grande échelle reste conditionné à une meilleure maîtrise des interactions entre GL, matrice cimentaire et adjuvants, ainsi qu'à une compréhension approfondie de leur durabilité à long terme. Ces constats ouvrent la voie aux investigations expérimentales présentées dans les chapitres suivants, qui visent à explorer plus spécifiquement l'effet des enrobages cimentaires appliqués aux GL sur les propriétés globales des BAPL.

CHAPITRE II

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE II

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Ce deuxième chapitre décrit en détail les matériaux employés dans cette étude ainsi que les méthodes expérimentales mises en œuvre pour leur caractérisation. Dans un premier temps, les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des différents constituants sont présentées à partir des résultats d'essais préliminaires. Dans un second temps, l'approche de formulation, les protocoles expérimentaux, les dispositifs de mesure et les normes de référence sont exposés, de manière à assurer la reproductibilité des essais et la fiabilité des analyses. L'ensemble de ces éléments constitue le socle méthodologique nécessaire à l'interprétation des résultats et à la validation scientifique des travaux.

Sommaire

1. INTRODUCTION	34
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	34
2.1. Ciment.....	34
2.2. Additions minérales	35
2.3. Granulats.....	38
2.4. Superplastifiant	40
2.5. Eau de gâchage.....	40
3. CONFECTION ET CONSERVATION DES ÉPROUVETTES	40
3.1. Méthode d'enrobage des GLAE	40
3.2. Approche de formulation des BAPL	42
3.3. Élaboration du béton et confection des éprouvettes	45
4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	46
4.1. Caractérisation microstructurale	46
4.2. Caractérisation à l'échelle des GLAE.....	47

4.3. Caractérisation à l'échelle des BAPL : à l'état frais.....	51
4.4. Caractérisation à l'échelle des BAPL : à l'état durci.....	56
5. CONCLUSION	63

Chapitre II - Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes expérimentales

1. INTRODUCTION

La qualité et la pertinence des résultats expérimentaux reposent avant tout sur une connaissance approfondie des matériaux mis en œuvre et sur la rigueur des méthodes appliquées. Dans cette optique, ce chapitre présente, de manière structurée et détaillée, l'ensemble des constituants entrant dans la formulation des bétons étudiés. Une attention particulière est accordée à la caractérisation des granulats légers d'argile expansée, qui constituent le cœur de ce travail, ainsi qu'aux additions minérales, afin de mieux comprendre leur contribution au comportement des bétons étudiés.

La seconde partie du chapitre expose l'approche de formulation retenue, en précisant les choix méthodologiques, les paramètres de composition et les ajustements réalisés pour atteindre les objectifs fixés. Viennent ensuite la description des procédures de confection et de conservation des éprouvettes, étapes essentielles pour garantir la comparabilité et la reproductibilité des essais. Enfin, les méthodes expérimentales sont présentées avec précision, en s'appuyant sur les normes en vigueur et sur les dispositifs de mesure employés. Ce cadre méthodologique constitue le socle scientifique sur lequel reposent l'analyse critique et l'interprétation des résultats développées dans les chapitres suivants.

2. MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1. Ciment

Compte tenu de l'utilisation d'additions minérales dans les BAPL, il est préférable d'opter pour un ciment Portland artificiel exempt de tout ajout cimentaire. Ce choix permet d'éviter toute confusion quant à la teneur réelle en additions dans le mélange. Ainsi, le ciment retenu est un CEM I 42.5 R, fourni par la cimenterie de Biskra et conforme à la norme algérienne NA 442 (NA 442, 2013). Les propriétés physiques, ainsi que la composition chimique et la composition minéralogique calculée selon la formule de Bogue, sont présentées respectivement dans les tableaux 1, 2 et 3.

Tableau 2.1. Propriétés physiques du ciment (fiche technique de fabricant)

Propriétés	Unités	Valeurs
Masse volumique absolue	kg/m ³	3100
Masse volumique apparente	kg/m ³	980
Refus au tamis 80µm	%	1,05
Refus au tamis 40µm	%	13,14
Consistance normale	%	25
Début de prise	min	150-190
Fin de prise	min	220-250
S.S.B	cm ² /g	3728

Tableau 2.2. Composition chimique du ciment (fiche technique de fabricant).

Composition chimique (%)										
CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	SO ₃	CaO libre	PAF
62,63	20,00	3,62	4,30	2,37	0,19	0,47	0,019	2,70	0,60	2,92

Tableau 2.3. Composition minéralogique (fiche technique de fabricant).

Minéraux	Désignation	Teneur en (%)
Silicate tricalcique	C ₃ S	68,79
Silicate bicalcique	C ₂ S	8,33
Aluminate tricalcique	C ₃ A	5,57
Ferro aluminate tétracalcique	C ₄ AF	11,00

2.2. Additions minérales

Trois types d'additions minérales ont été employés dans cette étude : le filler calcaire, la poudre de verre et le laitier granulé de haut-fourneau. Les deux dernières additions ont été préparées au laboratoire à partir de matières premières brutes, puis finement broyées à l'aide d'un broyeur à boulets métalliques d'une capacité de 10 kg, fonctionnant à une vitesse d'environ 60 tours par minute. Afin d'obtenir une finesse comparable pour ces deux ajouts, la répartition des diamètres des boulets ainsi que la durée de broyage ont été maintenues constantes tout au long de l'opération.

2.2.1. Filler calcaire

À la différence des deux autres additions, le filler calcaire (FC) n'a pas été broyé au laboratoire. Il est directement fourni sous forme de poudre, conditionnée en sacs de 20 kg. Le FC utilisé dans cette étude provient de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG), implantée dans la commune d'El Khroub, wilaya de Constantine. Ce matériau est obtenu par broyage fin d'une roche calcaire présentant une blancheur élevée. L'analyse par diffraction des rayons X (Figure 2.1) indique que le FC est constitué majoritairement de carbonate de calcium (CaCO₃), avec une teneur supérieure à 85 % selon les données du fabricant.

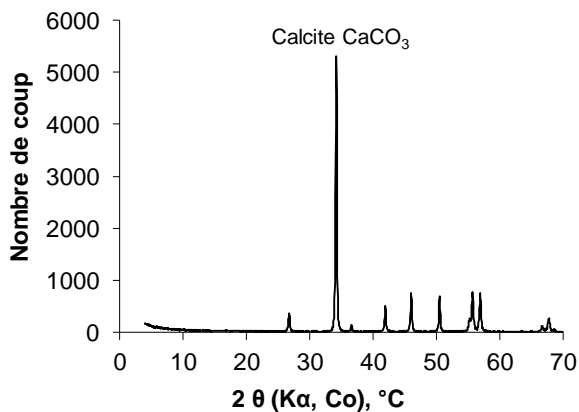


Figure 2.1. Diffractogramme du filler calcaire.

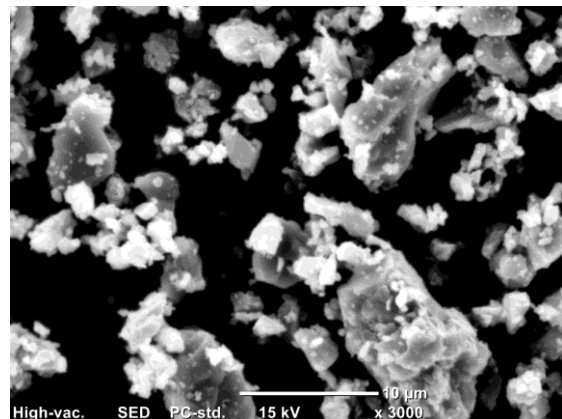


Figure 2.2. Observation MEB du filler calcaire.

L'observation au microscope électronique à balayage (Figure 2.2) montre que ses particules présentent le plus souvent des formes anguleuses à sub-anguleuses, avec des arêtes bien définies.

2.2.2. Poudre de verre

La poudre de verre (PV) utilisée dans cette étude provient du recyclage de bouteilles en verre collectées dans des décharges sauvages, en bordure de routes et dans des espaces verts. La sélection s'est effectuée sur la base de la couleur des bouteilles. En effet, la coloration du verre n'est pas obtenue par simple ajout de colorants, mais résulte de la présence d'oxydes métalliques incorporés lors de la fabrication ; chaque type d'oxyde confère une teinte spécifique au verre. Afin d'éviter toute interaction indésirable entre différents oxydes, il a été nécessaire de collecter uniquement des bouteilles de même couleur. Les bouteilles vertes, étant les plus abondantes, ont été retenues pour cette étude.

Après leur récupération, les bouteilles subissent plusieurs étapes de préparation avant broyage. Elles sont d'abord soigneusement nettoyées pour éliminer les étiquettes et les résidus de sucre, ces derniers pouvant entraîner un retard de prise du béton. Les bouteilles sont ensuite égouttées, puis concassées à l'aide d'un concasseur à mâchoires afin de réduire leur taille et de faciliter le broyage. Les fragments obtenus sont séchés dans une étuve à 105 °C jusqu'à élimination complète de l'humidité, ce qui permet d'éviter tout risque de colmatage lors de la mouture. Enfin, les débris secs sont introduits dans un broyeur à boulets métalliques pour produire une poudre très fine.

L'analyse par diffraction des rayons X (Figure 2.3) de la PV révèle un large halo amorphe centré entre 25° et 40° 2θ, caractéristique des matériaux vitreux, accompagné de faibles pics correspondant à des phases cristallines résiduelles. Cette signature confirme la prédominance de la phase amorphe, favorable à la réactivité pouzzolanique. La présence ponctuelle de fer métallique est attribuée à l'opération de broyage dans un broyeur métallique, de fines particules de fer ayant pu se détacher et adhérer à la PV. L'observation au microscope électronique à balayage (Figure 2.4) montre des particules anguleuses et tranchantes, présentant de nombreuses arêtes vives résultant de la fracturation du verre.

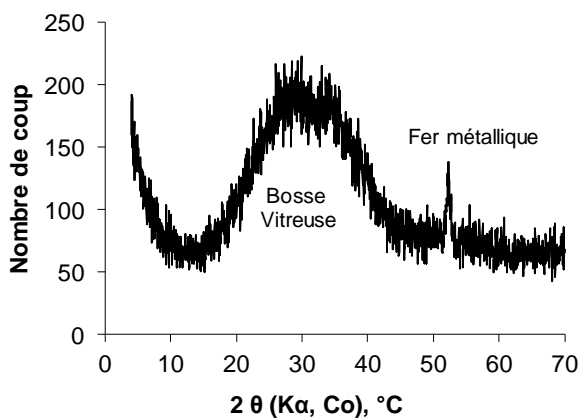


Figure 2.3. Diffractogramme de la poudre de verre.

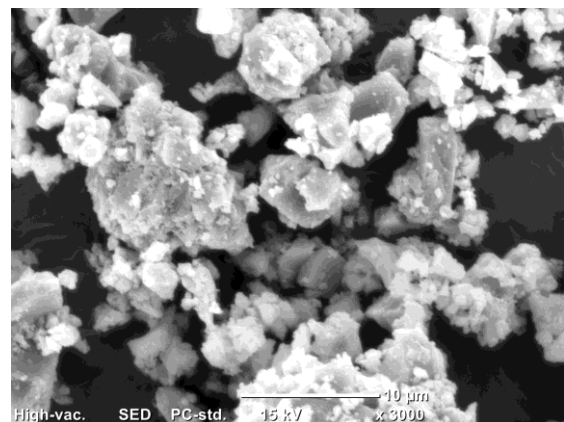


Figure 2.4. Observation MEB de la poudre de verre.

2.2.3. Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier granulé (LG) est un sous-produit issu de la fabrication sidérurgique. Celui utilisé dans cette étude provient du complexe sidérurgique d'El Hadjar, situé dans la wilaya d'Annaba. Lors de la fusion du minerai de fer dans les hauts-fourneaux, à des températures comprises entre 1135 et 1350 °C, il se produit une séparation par gravité : la fonte, plus dense, se dépose au fond du four, tandis que le laitier, de masse volumique plus faible, surnage à la surface. À ce stade, il n'existe pas encore de distinction entre les différents types de laitier. Ce n'est qu'après une trempe rapide à l'eau que l'on obtient le laitier granulé, caractérisé par des grains plus ou moins sphériques, de couleur gris clair. À l'état brut, le LG est pratiquement inerte et ne présente qu'une réactivité limitée. Pour exploiter pleinement son potentiel hydraulique latent, il est d'abord séché dans une étuve, puis finement broyé, généralement à une finesse supérieure à celle du ciment.

L'analyse par diffraction des rayons X (Figure 2.5) met en évidence un large halo amorphe centré entre 25° et 45° 2 θ , typique des matériaux vitreux, ainsi que quelques pics de faible intensité correspondant à des phases cristallines résiduelles. Cette prédominance amorphe reflète une forte proportion de phase réactive, favorable à son utilisation comme ajout cimentaire à activité hydraulique latente. L'observation au microscope électronique à balayage (Figure 2.6) révèle des particules à morphologie irrégulière, combinant des grains anguleux et des fragments plus arrondis.

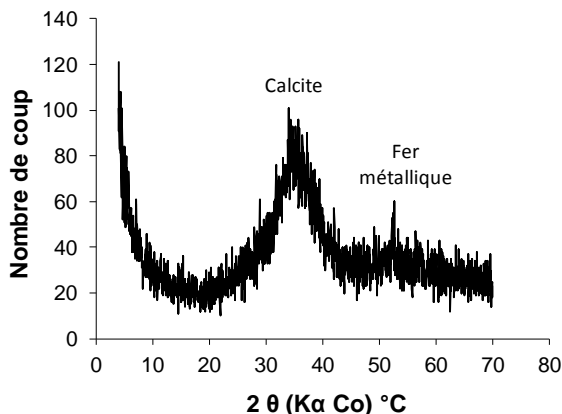


Figure 2.5. Diffractogramme du laitier granulé.

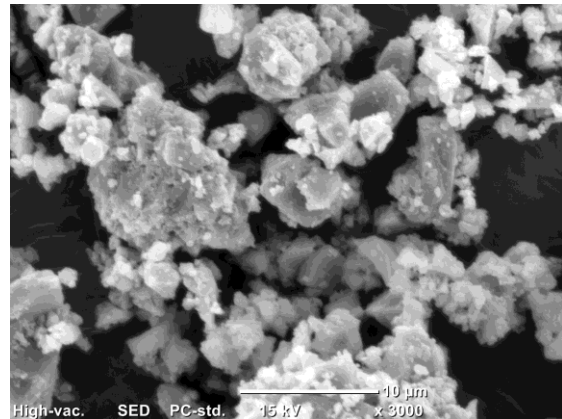


Figure 2.6. Observation MEB du laitier granulé.

Les caractéristiques physiques ainsi que la composition chimique des trois additions minérales sont présentées dans le Tableau 2.4. La Figure 2.7 illustre leur distribution granulométrique, obtenue par granulométrie laser en voie sèche, ainsi que celle du ciment. L'analyse montre que l'ensemble des additions minérales présentent une finesse supérieure à celle du ciment. Plus précisément, le LG affiche la distribution de particules la plus fine, suivi du FC et de la PV, dont les courbes cumulées se superposent presque entièrement. Le CEM I, quant à lui, présente une granulométrie plus grossière, caractérisée par une proportion plus élevée de particules de grand diamètre.

Il est également à noter qu'une finesse des additions supérieure à celle du ciment favorise l'effet de remplissage, contribuant ainsi à améliorer la compacité du mélange.

Tableau 2.4. Caractéristiques du ciment et des additifs minéraux.

Caractéristiques physiques									
	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	S.S.B* (cm ² /g)	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)	Demande en eau** (%)		
FC	857	2450	7581	1.1	6,80	28.7	31		
PV	795	2550	5661	1.5	6,52	31.8	35		
LG	1215	2910	5539	1.8	3,42	43.4	33		
Compositions chimique (%)									
Oxides (%)	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	PAF
FC	55,91	0,11	0,06	0,40	0,18	0,05	0,04	0	42,68
PV	10,75	0,95	0,41	76,93	0,29	2,38	0,01	0,26	0,30
LG	40,69	8,17	4,15	34,41	4,56	0,10	0,36	0,89	-

* Surface spécifique Blaine.

** Eau nécessaire pour une consistance normale à l'aide d'un appareil Vicat selon la norme NF EN 196-3 (NF EN 196-3, 2017).

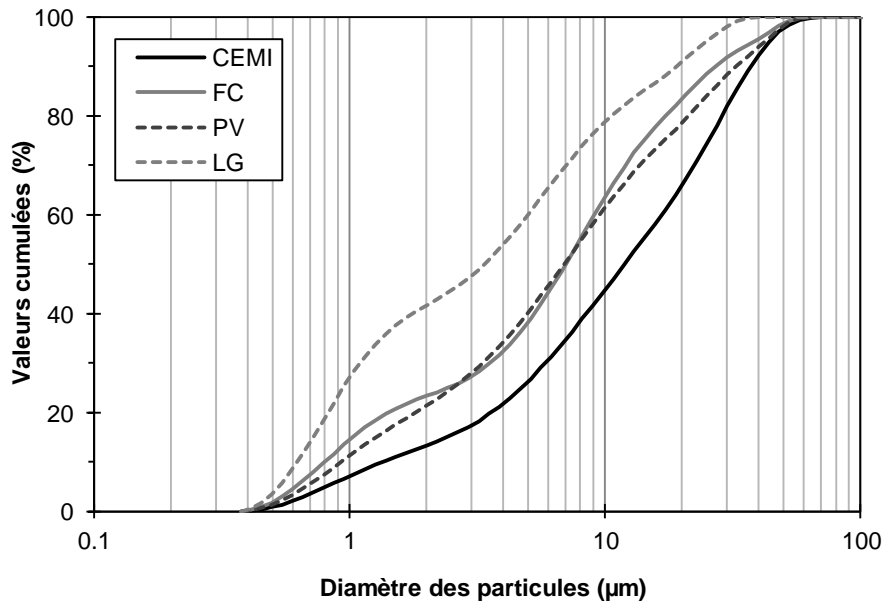


Figure 2.7. Analyse granulométrique laser du ciment et des additions minérales.

2.3. Granulats

Le squelette granulaire des différents mélanges de béton étudiés est constitué de deux sables naturels : un sable de dune fin (S1) de classe granulaire 0/2 mm, provenant de la localité d'Oum Ali (wilaya de Tébessa), et un sable de carrière (S2) de classe granulaire 0/4 mm, extrait dans la localité d'Aïn Abid (wilaya de Constantine). Les gros granulats naturels ont été intégralement remplacés par des GLAE fournis par l'usine ALGEXPAN de Bouinan (wilaya de Blida). Ces granulats se présentent sous forme de grains nodulaires, globalement arrondis à sub-arrondis, avec la présence ponctuelle de grains allongés, et appartiennent à la classe granulaire 4/14 mm (Figure 2.8). Les GLAE sont obtenus par un traitement thermique de l'argile, au cours duquel un dégagement gazeux interne provoque leur expansion, leur

conférant ainsi une faible masse volumique et une structure poreuse composée de pores de tailles variées (Figure 2.9). La répartition granulométrique des granulats, ainsi que leurs principales caractéristiques physico-mécaniques, sont présentées respectivement dans la Figure 2.10 et le Tableau 2.5.

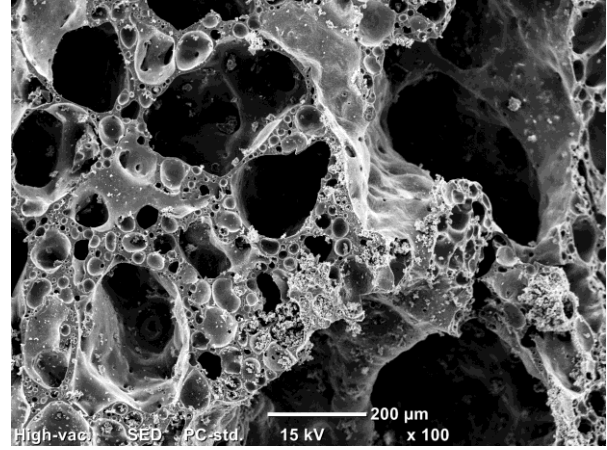


Figure 2.8. Photographie de la morphologie des grains de GLAE.

Figure 2.9. Micrographie MEB de l'intérieur d'un grain de GLAE.

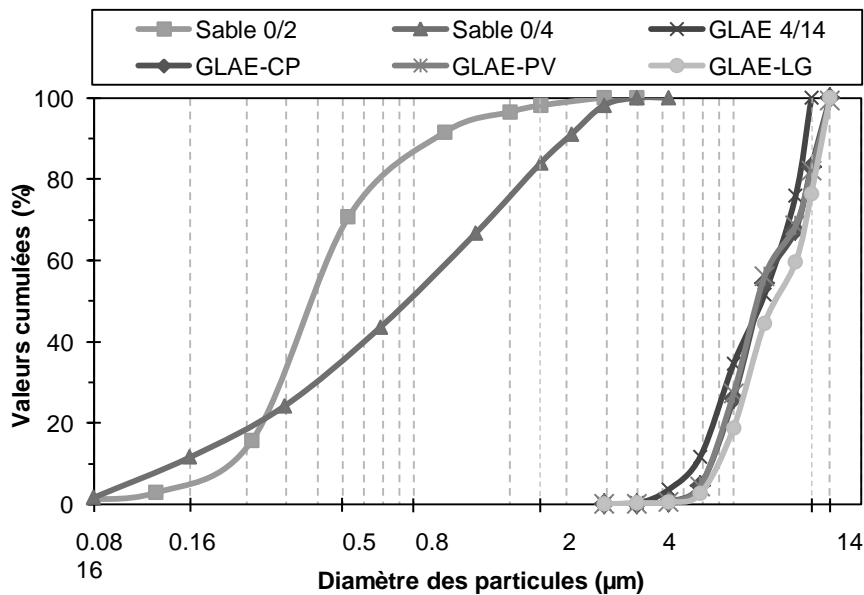


Figure 2.10. Répartition granulométrique des granulats utilisés.

Tableau 2.5. Propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés.

Caractéristiques	Unité	S1	S2	GLAE
Masse volumique apparente	kg/m ³	1544	1624	770
Masse volumique absolue	kg/m ³	2584	2470	1280
Module de finesse	-	1,87	2,62	-
Equivalent de sable	%	78,1	80,4	-
Bleu de méthylène	%	0,75	0,75	-
Coefficients d'absorption à 24h	%	1,72	2,15	8,74

2.4. Superplastifiant

Durant l'ensemble de la campagne expérimentale, le même superplastifiant (SP) réducteur d'eau à haut rendement, sans chlore et conforme à la norme NF EN 934-2+A1 (NF EN 934-2, 2012), a été utilisé. Il s'agit du POLYFLOW SPRE 400, commercialisé par l'entreprise SOLU EST et formulé à base de polycarboxylates. Le Tableau 2.6 présente les principales caractéristiques techniques de ce SP.

Tableau 2.6. Principales caractéristiques techniques du SP (données fournisseur).

	Densité	pH	Contenu solide	Teneur ions Cl ⁻	Teneur Na ₂ O	Plage d'utilisation
SPRE 400	1,07±0,01	5,0 à 5,5	29 %	≤ 0,1%	≤ 1,0%	0,3 à 2,0%

2.5. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la fabrication des différents mélanges de béton provient du réseau de distribution d'eau potable de la commune de Sidi Amar, située dans la wilaya d'Annaba.

3. CONFECTION ET CONSERVATION DES ÉPROUVETTES

3.1. Méthode d'enrobage des GLAE

Afin d'étudier l'effet du type d'enrobage cimentaire sur les propriétés des GLAE enrobés, trois mélanges ont été élaborés avec un rapport eau/ciment (E/C) fixé à 0,30 : un mélange constitué exclusivement de ciment et deux autres contenant respectivement de la PV et du LG. Le dosage de ces ajouts est resté constant, tandis que celui du SP a été ajusté. L'emploi du SP est indispensable pour préserver une rhéologie optimale des mélanges cimentaires. En effet, un rapport E/C aussi faible peut conduire à une consistance très épaisse, favorisant l'agglomération des granulats, compliquant leur séparation et générant une couche d'enrobage excessivement épaisse. À l'inverse, une pâte trop fluide risque d'entraîner une sédimentation de la suspension cimentaire, recouvrant seulement une partie de la surface des granulats.

Le dosage en SP a été déterminé expérimentalement à l'aide de l'essai d'affaissement au mini-cône pour l'ensemble des formulations, de manière à garantir une fluidité homogène entre les différentes pâtes et à obtenir des couches d'enrobage comparables. La valeur cible d'affaissement, fixée à 43 cm ± 1 cm, a permis de produire des pâtes simultanément fluides et visqueuses, assurant un enrobage intégral des GLAE sans sédimentation visible au fond de la cuve de malaxage en fin de préparation. Cette approche permet également de neutraliser l'influence des besoins spécifiques en eau et en SP liés aux ajouts cimentaires, généralement plus élevés que pour le ciment seul. La composition détaillée des mélanges d'enrobage est présentée au Tableau 2.7.

Tableau 2.7. Composition des pâtes cimentaires utilisées pour l'enrobage des GLAE.

Mélanges	CP	PV	LG	SP	Étalement (cm)
CP	1,0	-	-	0,35	42
PV	1,0	0,4	-	0,9	43,5
LG	1,0	-	0,4	0,9	43,9

Avant l'application de l'enrobage, les GLAE ont été immergés dans l'eau pendant 5 minutes, puis essuyés en surface avec un chiffon humide afin d'atteindre l'état de surface saturée sèche (SSS). Le choix de ce temps, ainsi que son effet sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAPL, seront examinés plus en détail au chapitre 3. Cette précaution empêche également les granulats d'absorber l'eau de gâchage de la pâte d'enrobage avant le durcissement. La préparation des pâtes d'enrobage a été réalisée dans un malaxeur à mortier d'une capacité de 5 litres, à vitesse variable. Le protocole de malaxage, inspiré des travaux de Diederich et al. (Diederich et al., 2013) consiste à diluer un tiers du SP dans l'intégralité de l'eau de gâchage, puis à incorporer les composants solides pour un malaxage de 3 minutes. Les deux tiers restants du SP sont ensuite ajoutés, et le malaxage est poursuivi pendant 2 minutes supplémentaires, soit un temps total de 5 minutes par mélange. Cette séquence optimise l'efficacité du SP, une part importante étant absorbée par les premiers noyaux formés lors du contact ciment-eau (Ramachandran, 1995). Le Tableau 2.8 résume les différentes étapes de la préparation de la pâte d'enrobage.

Tableau 2.8. Séquane de malaxage des pâtes d'enrobage (Diederich et al., 2013).

Durée	Étape
t₀	La totalité de l'eau de gâchage est versée dans la cuve du malaxeur, dans laquelle est incorporé un premier tiers (1/3) de la masse totale de SP. Un mélange rapide est effectué afin d'homogénéiser cette solution.
t 1min	Le ciment et addition sont ajoutés progressivement, tout en maintenant le malaxeur en fonctionnement à vitesse réduite. Cette méthode favorise un mouillage uniforme et progressif des particules fines.
t 1min	Le malaxage est ensuite porté à grande vitesse pendant 30 secondes, suivi d'une pause de 30 secondes au cours de laquelle les parois et le fond de la cuve sont soigneusement raclés pour éviter toute accumulation de matière sèche.
t 1min	Le malaxage à grande vitesse est repris.
t 2min	Enfin, les deux tiers (2/3) restants du SP sont incorporés en 15 secondes, puis le mélange est poursuivi à grande vitesse jusqu'à obtenir une pâte parfaitement homogène.

À l'issue du malaxage, la cuve est retirée et les GLAE sont incorporés manuellement à la pâte de manière à assurer un enrobage homogène. Le mélange est ensuite versé sur un tamis de 3,15 mm pour éliminer l'excédent de pâte. Après un repos de 15 minutes, les GLAE enrobés subissent une courte vibration mécanique visant à détruire les agglomérats et à faciliter leur séparation. Une attention particulière est accordée aux granulats de plus faible dimension, plus sujets à l'agglomération et plus difficiles à séparer. Les granulats ainsi préparés sont étalés sur une grille métallique et laissés à sécher à l'air libre pendant 24 heures à 20 °C et 65

% d'humidité relative. Ils sont ensuite stockés dans des sacs pendant 60 jours avant le démarrage de la campagne expérimentale. La Figure 2.11 récapitule les différentes étapes d'enrobage des GLAE.



Figure 2.11. Récapitulatif des opérations d'enrobage des GLAE.

L'étude s'est également intéressée à l'effet de l'épaisseur de la couche d'enrobage. À cet effet, 1, 2, 3 et 4 couches successives ont été appliquées, avec un intervalle de 24 heures entre chaque couche. Ce délai favorise l'adhérence entre les couches et limite la formation de zones de transition. Il est à noter que, jusqu'à quatre couches, l'enrobage n'affecte pas de manière significative la distribution granulométrique des GLAE, quel que soit le type d'enrobage (voir Figure 2.10). La Figure 2.12 illustre l'aspect des GLAE avant et après application de l'enrobage.



Figure 2.12. GLAE bruts (photo de gauche) et après enrobage avec une pâte de ciment (photo de droite).

3.2. Approche de formulation des BAPL

L'approche de formulation utilisée dans cette étude est inspirée des travaux de Bello (Bello, 2014) et repose sur une méthode itérative consistant à déterminer les quantités volumiques des constituants du béton à partir de quelques paramètres clés, tels que le volume de pâte, fixé entre 350 et 450 l/m³. Ce volume est supérieur à celui généralement utilisé dans les BAP conventionnels, et ce pour deux raisons : d'une part, garantir l'autoplaçance selon la théorie de l'excès de pâte (Kennedy, 1940), et d'autre part, maintenir un niveau de viscosité du mortier suffisant pour éviter la remontée des GLAE en surface, réduisant ainsi le risque de

ségrégation des BAPL. La concentration en liant, exprimée par le rapport du volume de liant au volume de pâte, est définie conformément aux travaux de Papanicolaou et Kaffetzakis (Papanicolaou et Kaffetzakis, 2011), qui rapportent une variation comprise entre 0,35 et 0,50 selon la résistance recherchée. En effet, plus la résistance à la compression visée est élevée, plus la concentration en liant doit être importante. Le rapport volumique gravillon/sable (V_g/V_s) influe de manière double sur les propriétés des BAPL : il régle à la fois la masse volumique du béton et son écoulement. Par souci de légèreté et pour éviter tout risque de blocage, ce rapport doit être compris entre 0,7 et 1,1. La proportion volumique d'addition minérale dans le liant, visant à réduire le dosage en ciment et à ajuster les propriétés mécaniques du béton, doit se situer entre 0,20 et 0,35. Enfin, le volume d'air occlus a été arbitrairement fixé à 2 % du volume total de béton.

Les deux premiers paramètres mentionnés constituent les variables itératives de la méthode, tandis que les trois derniers sont considérés comme des constantes d'entrée. Le dosage en SP a été déterminé expérimentalement à partir d'essais d'étalement du béton, de manière à atteindre la fluidité souhaitée. La classe de résistance à la compression et la classe d'exposition ont été choisies respectivement LC 30/33 pour un béton léger de structure, et XC1 à XC4, conformément à la norme NF EN 206+A2 (NF EN 206+A2, 2021).

3.2.1. Étape de calcul

La méthode adoptée repose sur la définition préalable de constantes et variables d'entrée permettant de déterminer les dosages des différents constituants du béton.

a) Constantes d'entrée

- Proportion de l'addition, définie par l'équation (2.1), avec des valeurs comprises entre 0,20 et 0,35.

$$\rho_f = \frac{V_f}{V_c + V_f} \quad (2.1)$$

- Rapport gravillons/sable (V_g/V_s) : fixé arbitrairement entre 0,7 et 1,1.
- Volume d'air occlus (V_a) : pris égal à 2 % du volume total du béton.

b) Variables d'entrée

Le volume de pâte (V_p) est un paramètre déterminant pour l'ouvrabilité (Bernier, 2009). Dans le cas des BAPL, ce volume doit permettre d'assurer à la fois l'autoplaçabilité et la stabilité du mélange. Les données issues de la littérature indiquent des valeurs comprises entre 350 et 450 l/m³. La valeur retenue dépend de la classe d'étalement visée : pour un étalement élevé, V_p se rapproche de 450 l/m³, alors que pour des valeurs plus faibles, il se rapproche de 350 l/m³. La qualité de la pâte est caractérisée par la concentration en liant (ω_c), définie par l'équation 2.2 :

$$\omega_c = \frac{V_l}{V_l + V_e + V_a} \quad (2.2)$$

Où :

- V_l : volume de liant,

- V_e : volume d'eau,
- V_a : volume d'air occlus.

D'après Papanicolaou et Kaffetzakis (Papanicolaou et Kaffetzakis, 2011), pour des BAPL présentant une résistance moyenne en compression comprise entre 30 et 60 MPa, ω_c se situe généralement entre 0,35 et 0,50. Ce paramètre est inversement lié au rapport E_{eff}/L : plus la résistance visée est élevée (rapport faible), plus la concentration en liant est importante.

c) Dosage des constituants

À partir des constantes et variables définies, le dosage des composants se calcule comme suit :

- Volumes des granulats : le volume total du sable et du gravier sont déterminés respectivement selon les équations 2.3 et 2.4 :

$$V_s = (1000 - V_p) \frac{1}{1 + \frac{V_g}{V_s}} \quad (2.3)$$

$$V_g = (1000 - V_p) \frac{\frac{V_g}{V_s}}{1 + \frac{V_g}{V_s}} \quad (2.4)$$

- Volumes de ciment et de l'addition (pour $0,35 < \omega_c < 0,50$), sont déterminés respectivement selon les équations 2.5 et 2.6 :

$$V_c = (1 - \rho_f) \cdot V_p \cdot \omega_c \quad (2.5)$$

$$V_f = \rho_f \cdot V_p \cdot \omega_c \quad (2.6)$$

- Volume d'eau efficace, déterminé selon l'équation 2.7 :

$$V_{eff} = V_p (1 - \omega_c) - V_a \quad (2.7)$$

3.2.2. Ajustement et validation de la composition du béton

Dans la méthode retenue, certains paramètres sont déterminés à l'avance, à savoir la proportion de l'addition minérale dans le liant (ρ_f), le volume d'air occlus dans le béton (V_a) et le rapport volumique granulats/sables (V_g/V_s). Les paramètres ajustables sont le volume de pâte (V_p) et la concentration en liant (ω_c), introduits dans l'outil de calcul pour générer une composition prévisionnelle. Pour un volume de pâte donné, seules quelques valeurs de concentration en liant sont envisageables ; des itérations sont donc menées pour identifier celle qui répond simultanément à la condition de résistance fixée et au volume de pâte choisi. La composition obtenue est ensuite vérifiée par le calcul de l'indice de serrage K à l'aide du logiciel BétonlabPro. Cet indice, qui reflète l'aptitude du squelette granulaire à atteindre une compacité optimale, est un critère déterminant pour assurer à la fois la fluidité et la stabilité du mélange. Dans le cas étudié, la valeur de K est de 5,3, ce qui, étant compris dans l'intervalle optimal de 4,5 à 5,5, garantit l'autoplaçance et la cohésion du béton. Le Tableau 2.9 regroupe l'ensemble des paramètres d'entrée ainsi que ceux faisant l'objet des ajustements.

Tableau 2.9. Paramètres d'entrée de l'outil de calcul.

Constantes d'entrée			Paramètres itératifs	
ρ_f	V_g/V_s	V_a	V_p	ω_c
0,33	1	0,02	415	0,47

3.3. Élaboration du béton et confection des éprouvettes

Le malaxage des bétons a été réalisé à l'aide d'une bétonnière à axe incliné, équipée d'une cuve basculante, d'une capacité de 120 litres. Pour garantir l'homogénéité des essais, l'ensemble des échantillons a été préparé à partir d'une seule gâchée d'environ 40 litres. La procédure utilisée pour les BAPL présente une légère particularité par rapport à celle appliquée aux BAP classiques, principalement en ce qui concerne l'ordre d'introduction des GLAE. En pratique, ces granulats sont incorporés en fin de malaxage afin de limiter leur fragmentation, qui pourrait être provoquée par le poids des autres constituants ou par la rotation prolongée de la cuve. La séquence détaillée de malaxage utilisée est présentée dans le Tableau 2.10.

Tableau 2.10. Séquence de malaxage des BAPL.

Durée	Étape
t_0	Verser dans la bétonnière les deux fractions de sable, le ciment et l'addition minérale, puis effectuer un malaxage à sec pendant 60 secondes en maintenant la cuve couverte.
t 1min	Ajouter ensuite les deux tiers (2/3) de la quantité totale d'eau.
t 30 s	Arrêter le malaxage, puis racler soigneusement la cuve et les palettes afin de récupérer le mortier adhérent et le ramener au centre de la cuve.
t 1min	Introduire la quantité totale des GLAE.
t 2min	Ajouter enfin le tiers (1/3) restant d'eau, préalablement mélangé à la totalité du SP.

Le remplissage des moules, destinés aux différents essais à l'état durci, est effectué sans recours à la vibration ni au compactage. Après le coulage, les moules sont maintenus pendant 24 heures à température ambiante. Une fois démoulées, les éprouvettes sont immergées dans l'eau à $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ jusqu'aux échéances prévues pour les essais.

Les types et dimensions des échantillons moulés, correspondant à une seule formulation, sont les suivants :

- **Cubes $10 \times 10 \times 10\text{ cm}$:**
 - Trois éprouvettes pour la résistance en compression.
 - Trois éprouvettes pour la mesure de la masse volumique à l'état durci et du temps de propagation des ondes ultrasonores.
- **Prismes $7 \times 7 \times 28\text{ cm}$:**
 - Trois éprouvettes pour la résistance à la traction par flexion (trois points).
 - Trois éprouvettes pour l'essai de carbonatation accélérée.

- **Cylindres 11 × 22 cm** : Deux éprouvettes sciées verticalement en deux pour la vérification de la ségrégation à l'état durci.
- **Cylindres 11 × 5 cm** :
 - Trois éprouvettes pour l'absorption d'eau.
 - Trois éprouvettes pour l'absorption capillaire.
- **Cylindres 10 × 5 cm** : Trois éprouvettes pour l'essai de diffusion des ions chlorure.
- **Cylindres 15 × 5 cm** : Trois éprouvettes pour l'essai de perméabilité à l'oxygène.

4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

4.1. Caractérisation microstructurale

La compréhension du comportement des bétons étudiés ne peut se limiter à l'analyse de leurs propriétés mécaniques et de durabilité ; elle nécessite également une investigation approfondie de leur structure interne. L'étude microstructurale permet d'identifier la nature et la répartition des phases minéralogiques, d'évaluer la compacité de la matrice cimentaire, ainsi que d'observer les interactions entre les constituants.

Dans ce travail, deux techniques complémentaires ont été mises en œuvre :

- La diffraction des rayons X (DRX), utilisée pour déterminer les phases cristallines présentes et identifier les produits d'hydratation et de réaction ;
- La microscopie électronique à balayage (MEB), permettant d'examiner la morphologie, la texture et l'arrangement des constituants à l'échelle microscopique.

Ces approches offrent une vision globale et cohérente de l'évolution de la microstructure en fonction des formulations et des conditions expérimentales adoptées.

4.1.1. Analyse par Diffraction des Rayons X

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique couramment utilisée pour identifier les phases cristallines présentes dans un matériau. Elle offre également la possibilité de réaliser des analyses quantitatives ou semi-quantitatives, notamment par comparaison avec un échantillon étalon.

Dans cette étude, les analyses ont été effectuées à l'aide d'un diffractomètre Siemens D5000, équipé d'un monochromateur arrière de type SOLLER et d'une anticathode au cobalt $\text{Co.K}\alpha$ ($\lambda = 1,789 \text{ \AA}$). Les mesures ont été réalisées sur une plage angulaire allant de 10° à 70° (2θ , $\text{Co.K}\alpha$), avec un pas d'avancement de $0,02^\circ$ et un temps de comptage de 12 secondes par pas. Les échantillons ont été préalablement broyés manuellement à l'aide d'un mortier en agate. Ce mode de broyage, contrairement à un broyage mécanique classique susceptible d'endommager certains hydrates comme l'ettringite en raison de l'échauffement produit, ne génère pas de chaleur significative, préservant ainsi l'intégrité des phases analysées.

4.1.2. Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique d'observation à haute résolution permettant d'examiner la morphologie, la texture et l'arrangement des constituants

d'un matériau à l'échelle microscopique. Elle fournit également des informations précieuses sur la masse volumique de la matrice cimentaire, les zones de transition, ainsi que sur la présence éventuelle de fissures ou de pores ouverts.

Dans cette étude, les observations ont été réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage MEB-EDS de marque ZEISS, fonctionnant en mode électrons secondaires pour l'imagerie de surface et, lorsque nécessaire, en mode électrons rétrodiffusés pour mettre en évidence les contrastes de composition. Les échantillons ont été préalablement séchés, puis recouverts d'une fine couche métallique conductrice par métallisation sous vide, afin d'assurer une conductivité optimale et d'éviter l'accumulation de charges pendant l'observation.

4.2. Caractérisation à l'échelle des GLAE

Dans le cadre de cette étude, la caractérisation des GLAE constitue une étape déterminante pour comprendre l'effet des traitements d'enrobage sur leurs propriétés intrinsèques et, par extension, sur le comportement des BAPL. Les GLAE présentent, par nature, une structure poreuse et une faible masse volumique, conférant à ces matériaux des performances particulières, mais également une sensibilité accrue à l'absorption d'eau et à la dégradation mécanique. L'enrobage cimentaire, appliqué selon différents types de formulation et nombres de couches, vise à améliorer ces caractéristiques tout en limitant les inconvénients liés à la porosité ouverte.

Pour évaluer l'efficacité de ces traitements, une série d'investigations complémentaires a été conduite, combinant des observations morphologiques et des mesures quantitatives. L'examen optique, réalisé sur des échantillons enrobés de résine et polis, permet de visualiser la section transversale des granulats et de mesurer avec précision l'épaisseur des couches protectrices. En parallèle, la masse volumique des particules et la cinétique d'absorption d'eau à différents temps d'immersion sont déterminées conformément aux exigences normatives, offrant un indicateur fiable de l'évolution des propriétés physiques. Enfin, la résistance mécanique unitaire des granulats, obtenue par essais de compression individuels, complète cette analyse en apportant des informations sur la capacité portante des particules traitées.

L'ensemble de ces données expérimentales fournit ainsi une base solide pour interpréter l'apport réel des enrobages étudiés et pour relier les modifications observées à l'échelle du granulat aux performances mesurées sur les bétons correspondants.

Ainsi, les méthodes expérimentales mises en œuvre pour cette caractérisation sont présentées ci-après. Elles décrivent successivement :

1. la préparation des échantillons et l'observation microscopique pour la mesure de l'épaisseur des couches d'enrobage,
2. la détermination de la masse volumique des particules et la cinétique d'absorption d'eau selon différents temps d'immersion,
3. l'évaluation de la résistance individuelle des granulats par essais de compression unitaire.

4.2.1. Mesure de l'épaisseur des couches d'enrobage par microscopie optique

L'évaluation de l'épaisseur des couches d'enrobage appliquées sur les GLAE a été réalisée à l'aide d'un protocole combinant imprégnation en résine, polissage et observation en microscopie optique. Les granulats enrobés, prélevés de manière représentative dans chaque série d'essais, ont tout d'abord été noyés dans une résine époxy à prise lente, coulée dans des moules en silicone afin de limiter les contraintes de démoulage et d'éviter toute détérioration des échantillons.

Ce protocole d'imprégnation a été retenu en raison de la difficulté à sectionner directement les granulats sans endommager la couche d'enrobage. En effet, une coupe mécanique classique risquerait de provoquer des fissures, des éclats ou des arrachements localisés de la couche protectrice, compromettant ainsi la fiabilité de la mesure. L'immersion préalable dans la résine permet de stabiliser la surface, de combler les éventuelles cavités ouvertes et d'assurer une bonne cohésion entre le granulat et son enrobage durant les étapes ultérieures. Après durcissement complet de la résine, les échantillons ont été soumis à un polissage progressif, à l'aide de disques abrasifs de granulométries décroissantes, jusqu'à obtenir une section transversale plane et régulière traversant le cœur du granulat. Cette préparation a permis d'exposer clairement la structure interne des particules ainsi que les différentes couches d'enrobage. L'aspect final des échantillons polis est illustré à la Figure 2.13, montrant la section transversale nette obtenue avant observation microscopique.

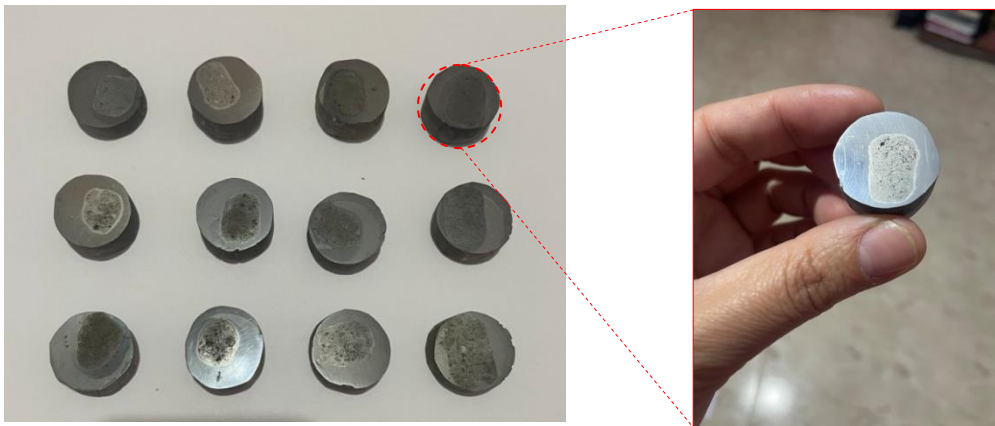


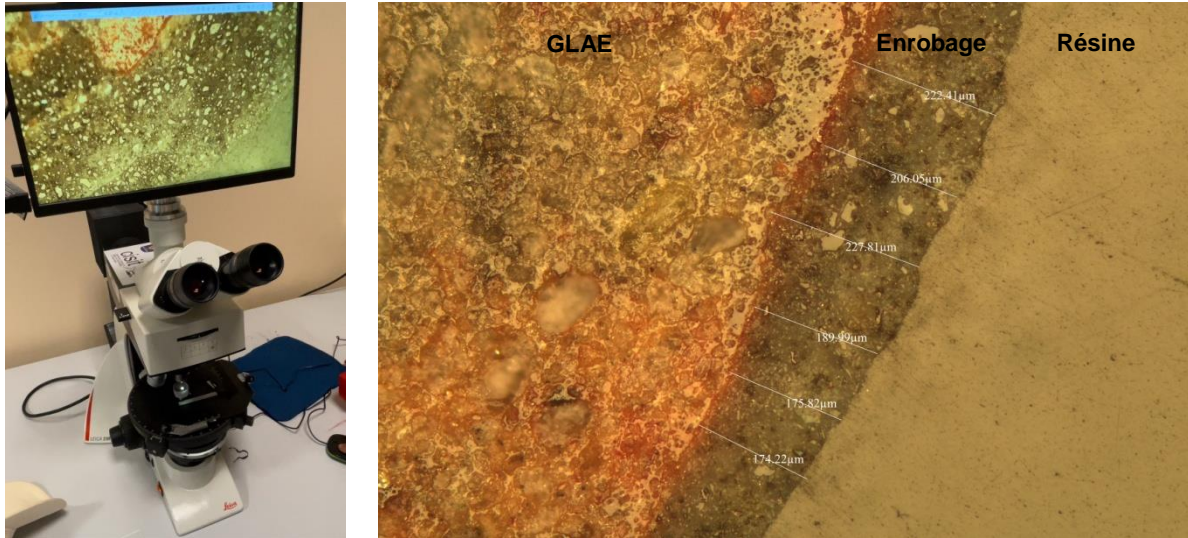
Figure 2.13. Échantillons de GLAE enrobés après polissage, présentant une section transversale permettant l'observation de la couche d'enrobage.

Les observations ont été effectuées au microscope optique Leica DM2500 M, équipé d'un système d'acquisition et de traitement d'images (voir Figure 2.14a). L'épaisseur des couches d'enrobage a été mesurée à l'aide de l'outil de mesure intégré au logiciel associé, sur la base de six mesures effectuées à intervalles réguliers autour de chaque granulat, afin de prendre en compte la variabilité locale et d'obtenir une estimation représentative.

Pour chaque combinaison de type d'enrobage et de nombre de couches appliquées, un total de huit granulats a été analysé. L'épaisseur moyenne rapportée correspond ainsi à la moyenne arithmétique des valeurs mesurées sur l'ensemble des échantillons testés. Cette approche

permet de disposer de données fiables et comparables entre les différents traitements étudiés, tout en réduisant l'influence des variations géométriques inhérentes aux GLAE.

Afin d'illustrer la procédure et la nature des observations réalisées, la Figure 2.14b présente un exemple de section polie d'un granulat enrobé, observée au microscope optique, sur laquelle apparaissent les lignes de mesure utilisées pour déterminer l'épaisseur de la couche d'enrobage.



(a) Microscope optique
Leica DM2500 M

(b) Section polie d'un GLAE enrobé, observée au microscope optique. Les flèches indiquent les mesures d'épaisseur de la couche d'enrobage.

Figure 2.14. Mesure de l'épaisseur des couches d'enrobage par microscopie optique.

4.2.2. Détermination de la masse volumique des particules et du taux d'absorption d'eau

La détermination de la masse volumique des particules et du taux d'absorption d'eau des GLAE, enrobés ou non, a été réalisée conformément à la norme NF EN 1097-6 (NF EN 1097-6, 2022). Les mesures ont été effectuées sur des échantillons préalablement séchés à masse constante, à l'aide de la méthode du pycnomètre prescrite par la norme.

Le pycnomètre est un récipient étalonné permettant de déterminer le volume réel des particules solides, c'est-à-dire sans tenir compte de leur porosité ouverte, par déplacement d'eau. La méthode consiste à mesurer successivement la masse des granulats à l'état sec (M_s), saturé surface sèche (M_{ss}) et immergé (M_i), afin de calculer la masse volumique apparente des particules selon l'équation (2.8) :

$$\rho_p = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad (2.8)$$

Par ailleurs, le taux d'absorption d'eau, qui traduit la quantité d'eau absorbée par rapport à la masse sèche. Pour cela, les échantillons sont d'abord séchés à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante, puis refroidis à température ambiante pour déterminer la masse sèche. Ils sont ensuite immergés dans l'eau pendant une durée adaptée à l'essai envisagé (par exemple 24 h

pour une absorption à long terme), puis essuyés afin de retirer l'eau superficielle avant de mesurer la masse saturée surface sèche (M_{SSS}). Enfin, les granulats saturés sont pesés immergés dans l'eau à l'aide d'un dispositif de suspension, ce qui donne la masse immergée (M_i). Le taux d'absorption est obtenu à partir de l'équation (2.9) :

$$WA_{24h} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.9)$$

En complément de la mesure de l'absorption à saturation (24 h), il est possible de suivre la cinétique d'absorption des granulats en effectuant des pesées à intervalles de temps définis, à 5, 15 et 30 minutes, puis 1, 2, 3 et 24 heures d'immersion. L'évolution de l'absorption en fonction du temps fournit des informations précieuses sur l'état de la porosité du matériau, notamment sur la proportion et la connectivité des pores ouverts. Un matériau présentant une absorption rapide sur les premières minutes possède généralement une porosité ouverte facilement accessible, tandis qu'une absorption progressive sur une période prolongée traduit la présence de pores plus fins ou moins connectés. Cette analyse permet ainsi de caractériser non seulement la capacité d'absorption globale, mais également la structure poreuse et la dynamique de remplissage des pores.

4.2.3. Évaluation de la résistance individuelle des granulats par essai de compression unitaire

L'évaluation de la résistance mécanique individuelle des GLAE a été effectuée au moyen d'essais de compression unitaire, afin de quantifier l'effet des différents enrobages appliqués. Les essais ont été réalisés sur un banc de compression Instron 5500R, équipé d'une cellule de charge d'une capacité maximale de 150 kN (voir Figure 2.15), garantissant une mesure

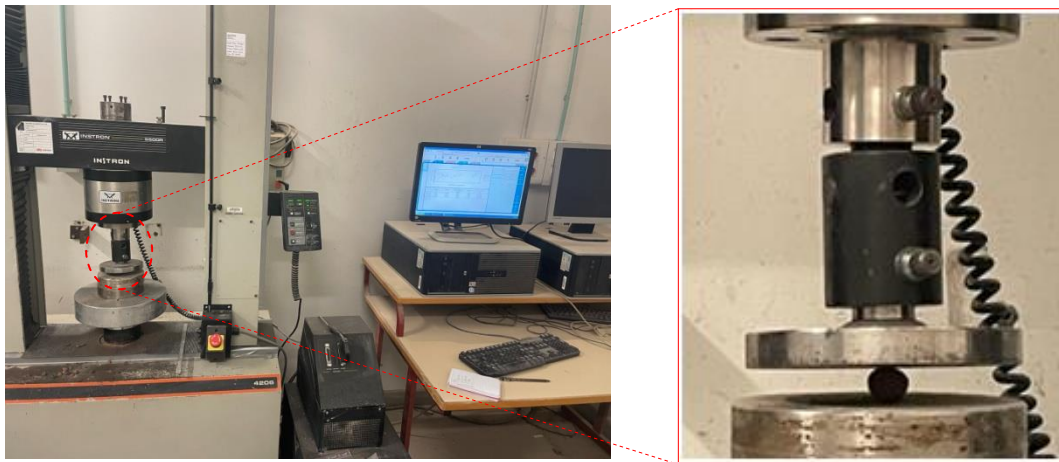


Figure 2.15. Banc de compression Instron 5500R utilisé pour l'essai de résistance unitaire des GLAE, avec à droite un agrandissement montrant un granulat positionné entre les plateaux de compression.

précise de la force appliquée jusqu'à la rupture. Chaque granulat a été placé individuellement entre les plateaux de compression, et la charge a été appliquée à une vitesse constante de 4,7 kN/min, conformément aux pratiques expérimentales visant à limiter les effets dynamiques et à assurer une propagation uniforme des contraintes. Pour chaque formulation, dix granulats ont été prélevés de manière aléatoire dans le lot, afin de minimiser les biais liés à la variabilité

intrinsèque du matériau. La résistance unitaire moyenne a ensuite été calculée par l'essai d'écrasement à la *plaque*, tel que développé par Kockal et Ozturan (Kockal et Ozturan, 2011), qui permet d'évaluer la résistance à l'écrasement d'un grain assimilé à une sphère. La Figure 2.16 décrit le principe de l'essai.

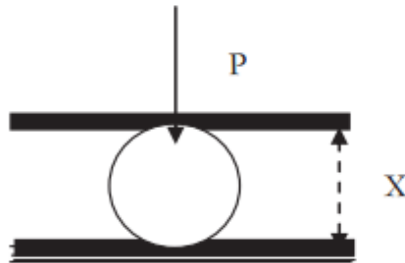


Figure 2.16. Essai d'écrasement unitaire d'un granulat léger selon la méthode à la plaque (Kockal et Ozturan, 2011).

La résistance à l'écrasement est calculée selon l'équation (2.10) :

$$\sigma = \frac{2,8 \times P}{\pi \times X^2} \quad (2.10)$$

Où :

- σ : résistance à l'écrasement du granulat (MPa),
- P : charge à la rupture du grain (N),
- X : diamètre moyen du grain (mm).

Cette approche permet de relier directement la charge de rupture à la taille du granulat, et ainsi de comparer l'effet de différents types d'enrobages sur la résistance mécanique intrinsèque des GLAE.

4.3. Caractérisation à l'échelle des BAPL : à l'état frais

L'évaluation des propriétés à l'état frais constitue une étape essentielle pour apprécier l'aptitude à l'emploi des BAPL. En effet, ces bétons doivent satisfaire simultanément plusieurs exigences : une capacité de mise en place sans vibration, une fluidité suffisante pour remplir les coffrages, une aptitude à passer entre les armatures et une stabilité de la composition limitant la ségrégation et le ressuage.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs essais normalisés ou spécifiquement adaptés aux BAPL ont été mis en œuvre, chacun apportant un éclairage complémentaire sur les performances à l'état frais. Ces essais couvrent trois aspects essentiels :

- La mobilité en milieu non confiné : évaluer la fluidité et la viscosité plastique du mélange.
- La mobilité en milieu confiné : apprécier la capacité de passage entre obstacles, simulant la présence d'armatures.
- La stabilité : vérifier la résistance à la ségrégation des constituants solides.

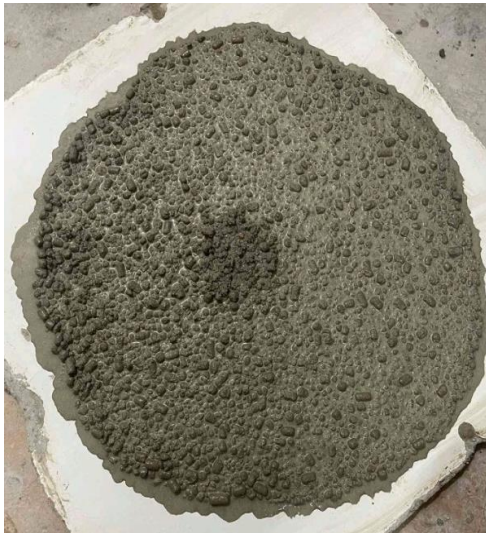
L'ensemble de ces essais permet de dresser un portrait complet du comportement des BAPL à l'état frais, garantissant que leurs propriétés répondent aux exigences normatives et aux contraintes pratiques du chantier.

4.3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams

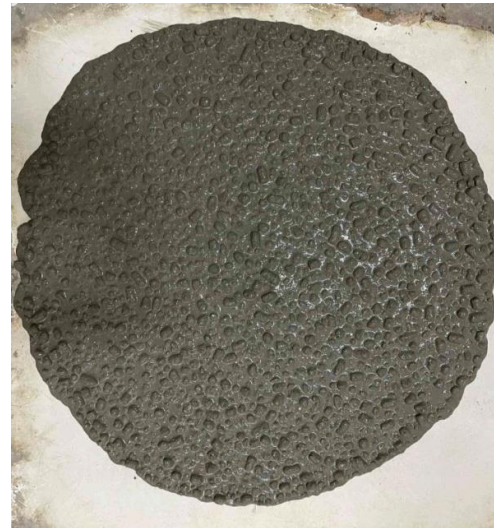
Facile à mettre en œuvre sur chantier et ne nécessitant qu'un matériel simple, l'essai d'étalement au cône d'Abrams est l'un des moyens les plus couramment utilisés pour évaluer la fluidité d'un béton en milieu non confiné. Le principe est simple : on remplit un cône tronqué métallique normalisé, sans vibration ni compactage, puis on le soulève verticalement d'un geste régulier. Le béton s'écoule alors sous son propre poids et forme une galette plus ou moins étalée. On mesure ensuite le diamètre moyen de cette galette, en prenant la moyenne de deux mesures perpendiculaires. Selon la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010), l'étalement obtenu permet de classer le béton en trois catégories :

- SF1 : 550 à 650 mm (fluidité modérée),
- SF2 : 660 à 750 mm (fluidité moyenne, adaptée à la plupart des usages),
- SF3 : 760 à 850 mm (fluidité élevée, idéale pour des zones très ferraiillés).

Il est à noter que, dans la majorité des cas, cet essai fournit bien plus d'informations que la seule valeur d'étalement. Par exemple, un amoncellement des granulats au centre de la galette constitue un indicateur de ségrégation, tandis qu'un dégagement de laitance en périphérie révèle un phénomène de ressuage (voir Figure 2.17a), en comparaison avec l'aspect correct d'une galette (voir Figure 2.17b). Ces observations qualitatives, associées à la mesure d'étalement, offrent une vision plus complète du comportement du béton à l'état frais.



(a) BAPL homogène présentant une répartition uniforme des granulats et ne montrant aucun signe visible de séparation des phases sur le pourtour de la galette.



(b) BAPL hétérogène caractérisé par une concentration des granulats au centre de la galette, accompagnée de la formation d'un anneau de laitance en périphérie.

Figure 2.17. Appréciation d'un essai d'étalement d'un BAPL.

4.3.2. Le temps d'étalement

Le T_{500} correspond simplement au temps que met le béton, après avoir retiré le cône d'Abrams, pour atteindre un diamètre de 500 mm. C'est une mesure qui complète l'essai d'étalement en donnant une indication sur la viscosité plastique du mélange. En pratique, plus le temps est court, plus le béton est fluide. À l'inverse, un temps plus long indique un mélange plus visqueux, souvent plus stable et moins sensible à la ségrégation.

Pour le mesurer, on utilise un chronomètre : on démarre au moment exact où le cône est complètement levé, et on l'arrête lorsque le bord de la galette atteint le cercle tracé à 500 mm autour de la position initiale du cône.

Suivant le T_{500} mesuré, la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010), distingue deux classes de BAP :

- VS1 : temps d'étalement inférieur à 2 secondes (faible viscosité).
- VS2 : temps d'étalement supérieur ou égal à 2 secondes (viscosité plus élevée).

D'après la corrélation proposée par Sedran (Sedran and Larrard, 1999), le temps d'étalement peut être relié à la viscosité plastique à l'aide de l'équation (2.11) :

$$\mu = \frac{\rho}{1000} \times (0,026 \times Sf - 2,39) \times T_{500} \quad (2.11)$$

Où :

- μ la viscosité plastique (Pa.s),
- ρ la masse volumique du béton (kg/m^3),
- Sf l'étalement (mm),
- T_{500} le temps d'étalement (s).

Cette relation permet, à partir de mesures simples sur chantier ou en laboratoire, d'obtenir une estimation quantitative de la viscosité plastique, paramètre essentiel pour comprendre et maîtriser le comportement rhéologique des BAPL.

4.3.3. L'essai à boîte en L

L'essai à la boîte en L est utilisé pour évaluer la capacité d'un BAP à s'écouler dans un milieu confiné et à passer entre les armatures, ce qui est une condition essentielle sur chantier. Il complète ainsi les informations fournies par l'essai d'étalement en milieu non confiné.

L'appareil se compose d'une boîte en forme de L composée de deux parties : la partie verticale est remplie avec le béton, qui s'écoule ensuite dans la partie horizontale, simulant le passage à travers trois barres d'armature (voir Figure 2.18). La vitesse et l'uniformité de l'écoulement sont observées pour déterminer si le béton peut se placer correctement sans vibration. Le résultat est exprimé par le rapport H_2/H_1 , où, H_1 est la hauteur du béton dans la partie verticale au départ et H_2 est la hauteur finale dans la partie horizontale après écoulement. Un rapport proche de 1 indique que le béton s'écoule facilement et uniformément, sans obstruction, tandis qu'un rapport plus faible signale une mobilité réduite et un risque de blocage ou de ségrégation.

Suivant le taux de remplissage obtenu dans la boîte en L, la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010) distingue deux classes de BAP :

- PL1 : taux de remplissage $\geq 0,80$ avec deux armatures.
- PL2 : taux de remplissage $\geq 0,80$ avec trois armatures.



Figure 2.18. Observation de l'écoulement du béton dans l'essai à la boîte en L.



Figure 2.19. Mesure de la stabilité au tamis après deux minutes de repos du BAPL.

4.3.4. Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis permet de vérifier la résistance à la ségrégation statique des BAP. Pour réaliser cet essai, un échantillon de 10 litres de béton est laissé au repos pendant 15 minutes. Ensuite, une portion de 4,8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) est délicatement déversée sur un tamis de 5 mm d'ouverture, depuis une hauteur de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ (voir Figure 2.19). Après un temps d'attente de 2 minutes, on mesure la quantité de laitance séparée et on calcule le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse initiale de l'échantillon, avec une précision de 0,01 selon l'équation (2.12) :

$$SR = \frac{P_{\text{laitance}} \cdot 100}{P_{\text{échantillon}}} \quad (2.12)$$

Suivant le pourcentage de laitance obtenu, la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010) distingue deux classes de BAP :

- SR1 : pourcentage de laitance ≤ 20 %.
- SR2 : pourcentage de laitance ≤ 15 %.

Cet essai fournit une information essentielle sur la stabilité du mélange, en permettant de vérifier si la pâte de ciment et les granulats restent bien répartis ou si, dans le cas des GLAE, les granulats légers tendent à remonter vers la surface.

4.3.5. Essai à la colonne

L'essai à la colonne permet d'évaluer la stabilité des BAPL face à la ségrégation statique. Il vise à vérifier si les granulats légers restent bien répartis ou s'ils ont tendance à remonter vers la surface, phénomène particulier de ce type de béton.

Le dispositif utilise une colonne cylindrique en PVC d'environ 45 cm de hauteur et 15 cm de diamètre, séparée en trois sections : supérieure, médiane et inférieure (voir Figure 2.20). Cette configuration permet de suivre la répartition verticale des granulats avant durcissement. Le béton est coulé en une seule opération dans la colonne, sans vibration ni compactage, puis laissé au repos jusqu'au début de sa prise. Une fois ce temps écoulé, chaque section de la colonne (supérieure, médiane et inférieure) est récupérée puis démoulée et lavée à l'eau sur un tamis de 4 mm afin de ne récupérer que les GLAE. Les granulats ainsi obtenus sont ensuite séchés jusqu'à atteindre une masse constante (voir Figure 2.21).



Figure 2.20. Dispositif expérimental de l'essai à la colonne.



Figure 2.21. Récupération des GLAE par tamisage après lavage du BAPL, pour chaque section.

En comparant la masse de GLAE récupérés dans les différentes sections de la colonne, il est possible d'évaluer le degré de ségrégation du BAPL. Cette évaluation peut être quantifiée à l'aide de l'indice de ségrégation statique (ISS), proposé par Wu et al. (Wu et al., 2009), défini par l'équation (2.13) :

$$ISS = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (2.13)$$

Où :

- σ est l'écart type des masses de GLAE mesurées dans les trois sections (supérieure, médiane et inférieure),
- μ est la moyenne de ces mêmes masses.

Un ISS faible (< 5) traduit une répartition homogène des granulats, tandis qu'un ISS élevé indique une ségrégation marquée, souvent caractérisée par une accumulation des GLAE en surface (ségrégation inversée), pouvant nuire à la stabilité et à la qualité du béton mis en œuvre.

4.3.6. Détermination de la masse volumique du béton à l'état frais

La masse volumique du béton à l'état frais a été mesurée conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12350-6 (NF EN 12350-6, 2012). Cet essai permet de vérifier la conformité

de la formulation en comparant la masse volumique réelle obtenue expérimentalement à la valeur théorique calculée à partir des proportions et des masses volumiques des constituants. Cette comparaison constitue un indicateur fiable du rendement volumétrique et, indirectement, de la qualité de la mise en œuvre.

Pour chaque mesure, le béton frais est introduit dans un récipient métallique rigide, d'un volume de 8 litres, identique à celui utilisé pour les essais d'air occlus, sans vibration ni compactage afin de préserver l'état initial du mélange. Le remplissage est effectué en une seule opération, en veillant à répartir uniformément le matériau dans le conteneur. Après mise à niveau de la surface, le récipient est pesé plein, puis vide. La masse volumique du béton est ensuite calculée par la relation (2.14) :

$$\rho = \frac{M_{\text{plein}} - M_{\text{vide}}}{V} \quad (2.14)$$

Où :

- ρ est la masse volumique du béton (kg/m^3),
- M_{plein} et M_{vide} sont respectivement les masses du récipient plein et vide (kg),
- V est le volume interne du récipient (m^3).

Les valeurs obtenues sont exprimées en kg/m^3 et comparées à la masse volumique théorique. Un écart significatif peut révéler la présence de bulles d'air en excès, une erreur de dosage ou une variation dans l'humidité des granulats.

4.4. Caractérisation à l'échelle des BAPL : à l'état durci

Dans le cadre de ce travail, l'amélioration des GLAE par différents enrobages cimentaires vise à optimiser leurs propriétés et, par conséquent, à accroître les performances globales des BAPL qui les intègrent. L'évaluation à l'état durci constitue une étape clé pour apprécier l'efficacité de ces traitements, tant sur le plan mécanique que sur celui de la durabilité. Les différents essais réalisés : résistance à la compression, résistance à la flexion, mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, ainsi que divers indicateurs et essais de durabilité, s'inscrivent dans une démarche globale visant à comprendre et à quantifier les mécanismes de transfert dans un milieu poreux cimentaire. Ces mécanismes, directement influencés par la microstructure interne et la porosité connectée, conditionnent le comportement du matériau face aux sollicitations mécaniques et aux agents de dégradation.

L'ensemble de ces investigations permet ainsi de relier les modifications apportées aux GLAE, observées à l'échelle microscopique, aux performances mesurées sur le matériau durci, offrant une vision intégrée de l'impact des enrobages cimentaires sur la qualité et la pérennité des BAPL.

4.4.1. Essais mécaniques de compression et de flexion

Les résistances à la compression et à la flexion des BAPL ont été déterminées à l'aide de deux presses hydrauliques de marque Matest, d'une capacité maximale respectivement de 2000 kN pour les essais de compression et de 150 kN pour les essais de flexion. Les essais de

compression ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de $10 \times 10 \times 10$ cm, tandis que les essais de flexion ont porté sur des éprouvettes prismatiques de $7 \times 7 \times 28$ cm.

Les mesures ont été effectuées aux âges de 7, 14, 28 et 90 jours afin d'évaluer l'évolution des propriétés mécaniques au cours du temps, depuis le jeune âge jusqu'à la maturité avancée du matériau. L'ensemble des procédures a été conduit conformément aux normes NF EN 12390-3 (NF EN 12390-3, 2019) pour la compression et NF EN 12390-5 (NF EN 12390-5, 2019) pour la flexion, garantissant ainsi la fiabilité et la comparabilité des résultats.

4.4.2. Détermination du module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique des BAPL a été déterminé après 90 jours de cure humide, suivis d'un séchage des éprouvettes jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Cette étape préalable permet de limiter l'influence de l'humidité résiduelle dans les pores, celle-ci pouvant perturber la propagation des ondes sonores et conduire à une estimation erronée de la vitesse et, par conséquent, du module d'élasticité dynamique.

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un appareil de contrôle ultrasonique de marque Matest (voir Figure 2.22), conformément à la norme NF EN 12504-4 (NF EN 12504-4, 2021). Le principe consiste à émettre une onde sonore à travers une éprouvette cubique de $10 \times 10 \times 10$ cm et à mesurer le temps nécessaire pour que cette onde traverse le matériau d'une face à l'autre, ce dernier est donné en ms (milliseconde). La vitesse de propagation V (m/s) est ensuite calculée à partir de ce temps de transit et de la distance parcourue.



Figure 2.22. Procédure d'étalonnage et mesure de la vitesse ultrasonique à travers une éprouvette cubique de béton.

Le module d'élasticité dynamique E est obtenu en appliquant l'équation (2.15) :

$$E = \frac{\rho V^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2.15)$$

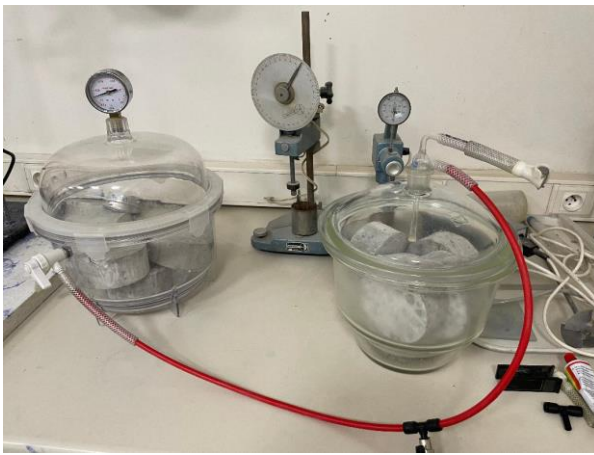
Où :

- ρ est la masse volumique du béton (kg/m^3),
- V est la vitesse de propagation de l'onde sonore (m/s),
- ν est le coefficient de Poisson, fixé à 0,2 pour les bétons légers.

Cette méthode non destructive permet d'estimer la rigidité élastique du matériau à partir de paramètres directement liés à sa compacité et à son homogénéité interne. Elle constitue ainsi un indicateur précieux de la qualité structurale du béton et de son comportement potentiel en service.

4.4.3. Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau constitue un paramètre essentiel pour caractériser la microstructure d'un béton et anticiper sa durabilité. Elle correspond au volume des pores ouverts et des pores de surface interconnectés, susceptibles d'être remplis par de l'eau. Cette caractéristique est particulièrement importante pour les bétons légers, dont la structure poreuse joue un rôle déterminant dans les mécanismes de transfert de fluides et d'agents agressifs. Dans cette étude, les mesures ont été réalisées conformément à la norme NF P 18-459 (NF P 18-459, 2022), sur des éprouvettes cylindriques de 11 × 5 cm, après 90 jours de cure humide. Pour chaque formulation, trois éprouvettes ont été testées afin d'assurer la représentativité des résultats. Avant la saturation en eau, les échantillons sont placés dans un dessiccateur hermétique et soumis à une phase de dégazage pendant 4 heures à une dépression de 25 mbar (voir Figure 2.23a). Cette étape permet de vider l'air contenu dans les pores, facilitant ainsi leur remplissage complet lors de l'immersion. Après cette phase de dégazage, les échantillons sont immergés dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20 heures. A la fin de la période d'immersion, les échantillons subissent une série de pesées. La masses sèche (M_{sec}) obtenue après séchage à masse constante dans une étuve à 105 °C, la masse saturée (M_{sat}) obtenue par pesée à l'air et enfin la masse immergée (M_i) des éprouvettes obtenue par pesé hydrostatique dans l'eau (voir Figure 2.23b).



(a) Immersion des éprouvettes durant l'essai (b) Dispositif de la pesé hydrostatique

Figure 2.23. Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la porosité accessible à l'eau des BAPL.

La porosité P (%) est ensuite calculée à partir de l'équation (2.16) :

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (2.16)$$

Où :

- M_{sat} est la masse de l'éprouvette saturée en eau (g),
- M_{sec} est la masse de l'éprouvette sèche (g),
- M_i est la masse de l'éprouvette immergée dans l'eau (g).

Cette mesure permet d'établir un lien direct entre les propriétés des GLAE, modifiées par les différents enrobages cimentaires, et la connectivité poreuse du béton durci. Une porosité plus faible traduit généralement une meilleure compacité et, par conséquent, une résistance accrue aux mécanismes de dégradation liés à la pénétration des fluides.

4.4.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'absorption capillaire est un indicateur important de la durabilité des bétons, car elle reflète la capacité du matériau à absorber l'eau par effet de succion à travers son réseau de pores ouverts. Ce phénomène est directement lié à la connectivité et à la taille des pores capillaires, et conditionne la vitesse de pénétration des agents agressifs dissous dans l'eau.

Dans cette étude, l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité des BAPL a été évaluée conformément aux recommandations de la norme NF EN 13057 (NF EN 13057, 2002), sur trois éprouvettes cylindriques de 110 × 50 mm après 90 jours de cure humide. Avant l'essai, les échantillons sont séchés à masse constante dans une étuve à 80 °C afin d'éliminer toute humidité résiduelle, puis laissés refroidir à température ambiante dans un dessiccateur. Afin d'orienter le flux d'absorption dans le sens vertical et d'éviter toute perte d'eau par les faces latérales, celles-ci sont recouvertes d'un papier aluminium adhésif soigneusement appliqué. Les éprouvettes sont ensuite placées verticalement, leur face inférieure en contact avec une lame d'eau d'environ 5 mm de hauteur, permettant une imbibition unidirectionnelle par capillarité, la Figure 2.24 montre le dispositif de mesure de l'absorption capillaire.

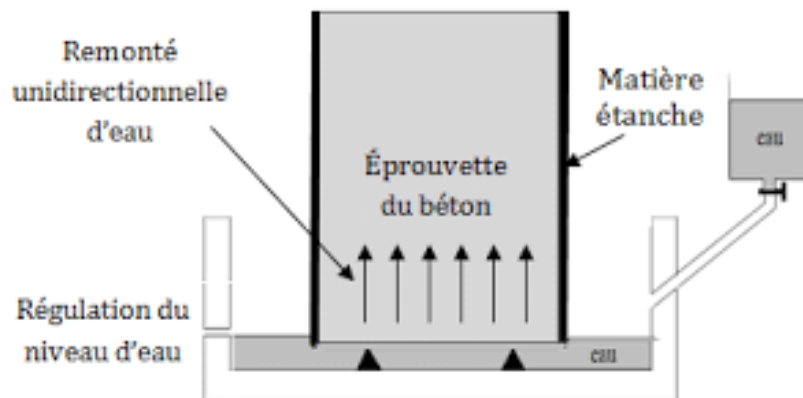


Figure 2.24. Représentation schématique du dispositif de mesure de l'absorption d'eau par capillarité.

Les masses sont relevées par pesées successives à des intervalles de 0, 15, 30 minutes, puis 1, 2, 4, 8 et 24 heures, avec une précision de 0,01 g. À partir des masses relevées pour chaque échéance t , le coefficient d'absorption capillaire peut être calculé selon l'équation (2.17) :

$$Ca_t = \frac{M_t - M_0}{A} \quad (2.17)$$

Où :

- $C_{a,t}$: coefficient d'absorption capillaire à l'échéance t (kg/m^2),
- M_t : masse de l'éprouvette à l'échéance t (kg),
- M_0 : masse initiale de l'éprouvette avant immersion (kg),
- A : surface de la section de l'éprouvette en contact avec l'eau (m^2).

La variation du coefficient d'absorption capillaire est souvent représentée en fonction de la racine carrée du temps. Dans un scénario théorique idéal, si l'on considère qu'un matériau cimentaire possède un réseau de pores parfaitement interconnectés, de section constante et uniformément répartis, la relation entre absorption et racine carrée du temps devrait être strictement linéaire (Powers et al., 1959). En pratique, les observations expérimentales montrent un comportement plus complexe : la courbe obtenue présente une pente qui tend à diminuer au fur et à mesure du temps, traduisant une cinétique d'absorption non linéaire. L'absorption initiale, qui s'étend généralement jusqu'à environ 1 h (Balayssac, 1992) ou 2 h (Emerson, 1990), selon le degré de compacité et de continuité du réseau poreux, se caractérise par le remplissage rapide des capillaires les plus larges. La phase d'absorption entre 1h (ou 2h) et 4h (ou 8h ou 24h) désigne la sorptivité, c'est-à-dire la vitesse par remontée capillaire exprimée en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. Cette phase traduit principalement l'occupation progressive des capillaires plus fins et moins connectés, dont la contribution à l'absorption globale devient prépondérante à mesure que le temps avance.

4.4.5. Essai de perméabilité à l'air

La perméabilité à l'oxygène est une mesure indirecte de la facilité avec laquelle un gaz peut traverser le réseau poreux d'un matériau cimentaire sous l'effet d'un gradient de pression. Cet essai repose sur l'application d'un flux d'air sec à une face de l'échantillon, l'autre face étant reliée à un dispositif de mesure du débit. Le passage de l'air à travers l'éprouvette dépend essentiellement de la connectivité et de la taille des pores. Plus la microstructure est dense et peu connectée, plus la perméabilité mesurée est faible, ce qui traduit une meilleure résistance aux pénétrations gazeuses et, par extension, à certains agents de dégradation.

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un perméamètre de marque Controls, suivant la méthode CemBureau (voir Figure 2.25), sur trois éprouvettes par formulation, de dimensions $15 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, après 90 jours de cure humide, conformément à la norme XP P18-463 (XP P18-463, 2011).

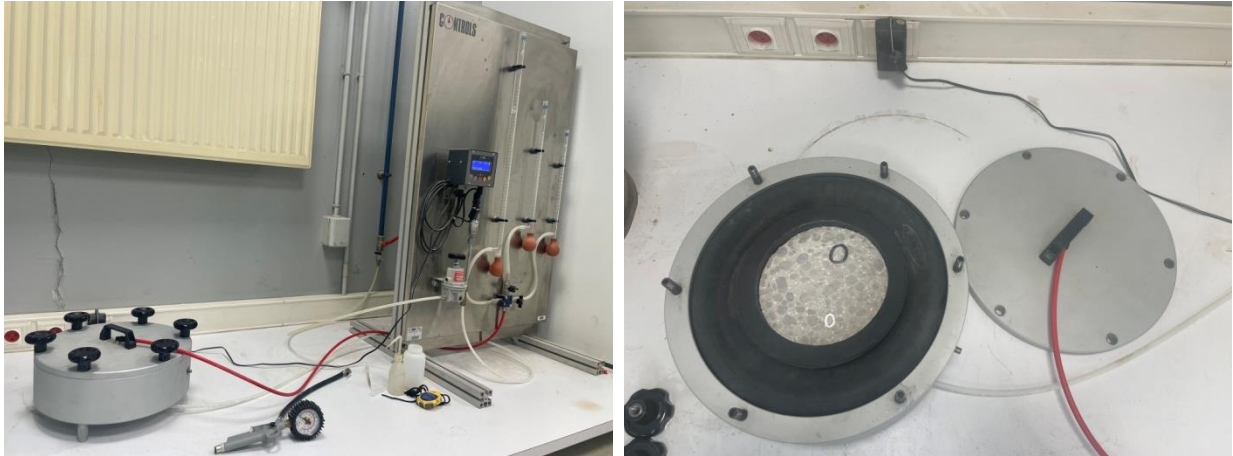


Figure 2.25. Dispositif expérimental pour la mesure de la perméabilité à l'oxygène des bétons.

Avant de procéder aux mesures, une préparation spécifique des échantillons a été effectuée :

- Séchage à 80 °C jusqu'à masse constante (pour limiter tout endommagement), puis conditionnement à 20 ± 2 °C et 50 ± 5 % HR,
- Les faces latérales sont étanchéifiées par application d'un papier aluminium adhésif afin d'imposer un flux unidirectionnel,
- Mesure du diamètre, de l'épaisseur et calcul de la surface traversée,
- Choix des pressions d'essais : 2 et 3 Bar.

La perméabilité apparente à l'oxygène (k_a) est déterminée à partir de la loi de Poiseuille, selon l'équation (2.18) :

$$k_a = \frac{2\mu \cdot Q \cdot p_1 \cdot L}{A(p_1^2 - p_{atm}^2)} \quad (2.18)$$

Où :

- Q : débit volumique mesuré à la pression atmosphérique (m³/s),
- P_{atm} : pression atmosphérique (Pa),
- L : épaisseur de l'échantillon (m),
- A : section transversale de l'échantillon (m²),
- P₁ : pression appliquée à l'amont (Pa),
- μ : viscosité dynamique de l'air, égale à $1,8 \cdot 10^{-5}$ Pa.s, à 20°C.

4.4.6. Essai de carbonatation accéléré

L'essai de carbonatation accélérée a été réalisé sur des éprouvettes cubiques de $7 \times 7 \times 7$ cm, après une période de cure humide de 90 jours. La carbonatation du béton a été effectuée dans une enceinte (voir Figure 2.26) de carbonatation maintenue à une teneur en dioxyde de carbone de 3 %, une humidité de 50 % et une température de 20 ± 1 °C, conformément aux prescriptions de la norme XP P18-458 (XP P18-458, 2022).

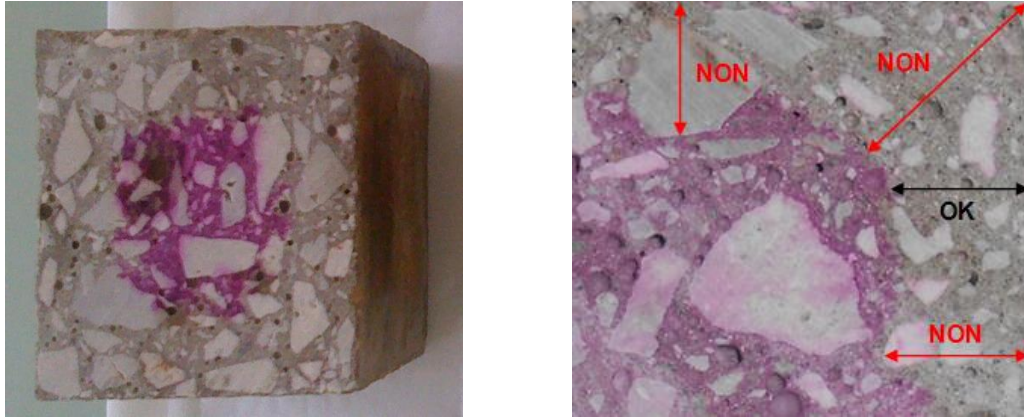


Figure 2.26. Vue de l'enceinte de carbonatation employée lors des essais de carbonatation accélérée.

Avant leur exposition au CO_2 , les échantillons ont subi une phase de séchage à $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 48 heures, afin de stabiliser leur teneur en eau et de favoriser la pénétration du dioxyde de carbone dans la matrice cimentaire. Les éprouvettes ont ensuite été placées dans l'enceinte de carbonatation et y sont restées jusqu'aux échéances de mesure fixées à 7, 28 et 90 jours. À chaque échéance, les échantillons étaient sortis de l'enceinte, puis l'une de leurs faces était immédiatement pulvérisée d'une solution indicatrice de phénolphtaléine. Cet indicateur coloré réagit instantanément en fonction du pH du matériau (voir Figure 2.27a) :

- lorsque le pH est supérieur à 9.2, la surface prend une teinte rouge violacé traduisant l'absence de carbonatation ;
- lorsque le pH est inférieur à ce seuil, la surface conserve sa couleur naturelle, indiquant une zone carbonatée.

Pour chaque éprouvette, plusieurs points de mesure de la profondeur de carbonatation étaient relevés à l'aide d'une règle métallique. Un total de quatre mesures par face était effectué, en veillant à exclure les points correspondant à la présence de granulats ou situés au niveau des coins, afin de ne pas fausser les résultats (voir Figure 2.27b). La profondeur moyenne de carbonatation pour chaque éprouvette était ensuite calculée à partir des valeurs retenues.



(a) Aspect visuel d'un échantillon de béton soumis à la carbonatation accélérée, mettant en évidence la limite entre la zone carbonatée et la zone saine.

(b) Indication du choix des rayons pour la mesure de l'épaisseur carbonatée.

Figure 2.27. Essai de carbonatation accélérée au dioxyde de carbone.

Parallèlement à la mesure de la profondeur de carbonatation, des essais complémentaires ont été réalisés sur les éprouvettes ayant subi l'exposition au dioxyde de carbone. Dans un premier temps, la masse de chaque échantillon a été relevée à chaque échéance de mesure (0, 7, 28 et 90 jours), afin de suivre l'évolution de leur poids au cours de la carbonatation et de détecter d'éventuelles variations liées aux échanges hygrométriques et à la formation de calcite dans la matrice cimentaire. Par ailleurs, un essai de mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (méthode UPV – *Ultrasonic Pulse Velocity*) a été effectué sur les mêmes éprouvettes (voir Figure 2.28). Ce dernier permet d'évaluer, de manière non destructive, les éventuelles modifications des propriétés mécaniques et de la compacité interne du matériau induites par la carbonatation.

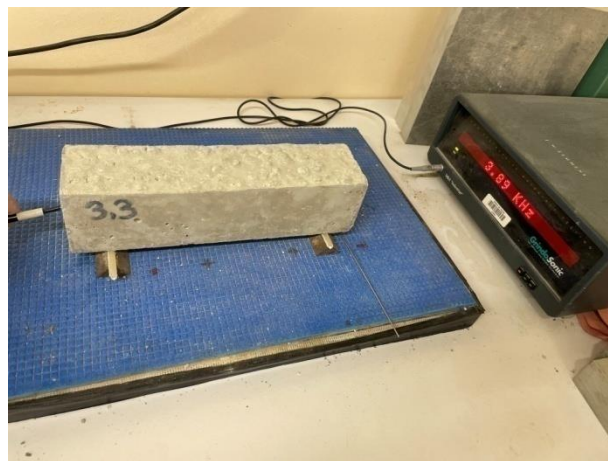


Figure 2.28. Dispositif expérimental de mesure de la vitesse ultrasonore des BAPL.

5. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée les matériaux entrant dans la composition des BAPL étudiés, ainsi que l'ensemble des méthodes expérimentales mises en

œuvre pour leur caractérisation. Les propriétés physiques, chimiques et microstructurales des constituants ont été établies à partir d'essais normalisés, garantissant la fiabilité et la comparabilité des données. Une attention particulière a été portée aux GLAE et à leurs variantes enrobées, afin de mieux comprendre l'influence des traitements appliqués sur leurs performances intrinsèques.

Les protocoles de formulation et de confection des bétons, ainsi que les conditions de conservation des éprouvettes, ont été exposés avec précision, dans le but de reproduire fidèlement les conditions expérimentales et d'assurer la répétabilité des mesures. Les différentes techniques d'évaluation, qu'elles concernent l'analyse microstructurale, l'état frais ou l'état durci, constituent un socle méthodologique robuste pour établir des liens entre la nature des matériaux, leurs caractéristiques internes et leurs performances globales.

Ces éléments serviront de base à l'interprétation des résultats présentés dans le chapitre suivant, qui sera consacré à l'étude de l'effet du degré d'humidité des GLAE sur le comportement des BAPL, afin de mettre en évidence l'influence de cet état hygrométrique sur leurs propriétés à l'état frais et durci.

CHAPITRE III

EFFET DU CONDITIONNEMENT EN HUMIDITÉ DES GRANULATS LÉGERS D'ARGILE EXPANSÉE SUR LE COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

CHAPITRE III

EFFET DU CONDITIONNEMENT EN HUMIDITÉ DES GRANULATS LÉGERS D'ARGILE EXPANSÉE SUR LE COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

Ce troisième chapitre traite de l'influence du conditionnement en humidité des granulats légers d'argile expansée sur les bétons autoplaçants légers. En raison de leur forte capacité d'absorption d'eau, l'introduction de ces granulats peut modifier l'équilibre hydrique du mélange et affecter ses propriétés à l'état frais et durci. Après présentation des modalités de conditionnement appliquées, les principaux résultats expérimentaux sont analysés afin d'identifier le mode de préparation optimal. Le taux d'humidité retenu sera ensuite adopté pour la poursuite des travaux de cette thèse.

Sommaire

1. INTRODUCTION	67
2. CINÉTIQUE DE L'ABSORPTION D'EAU DES GRANULATS D'ARGILE EXPANSÉE	68
3. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAPL FRAIS	69
3.1. Effet sur l'essai d'étalement au cône d'Abrams	69
3.2. Effet sur le temps d'écoulement.....	70
3.3. Effet sur l'essai d'écoulement à la boîte en L	72
3.4. Effet sur la résistance à la ségrégation par la stabilité au tamis	73
3.5. Effet sur la résistance à la ségrégation par l'essai à la colonne	74
4. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAPL DURCI	77
4.1. Effet sur la masse volumique durci.....	77
4.2. Effet sur la résistance mécanique à la compression.....	78
4.3. Effet sur la résistance à la flexion	80
4.4. Effet sur le module d'élasticité dynamique.....	81
4.5. Effet sur l'absorption d'eau par capillarité.....	83
5. CONCLUSION	85

Chapitre III – Effet du conditionnement en humidité des granulats légers d’argile expansée sur le comportement des bétons autoplaçants légers

1. INTRODUCTION

L’incorporation de GLAE dans les BAPL présente de nombreux avantages, notamment en termes d’allègement structural, de performances thermiques et, plus largement, de durabilité environnementale grâce à la réduction de la masse volumique globale. Cependant, ces granulats se caractérisent par une forte capacité d’absorption d’eau, qui constitue un paramètre critique dans la maîtrise des formulations. Ce phénomène peut en effet perturber l’équilibre hydrique du béton, modifiant la répartition de l’eau entre la pâte cimentaire et les granulats, et influençant ainsi sa rhéologie à l’état frais, son développement mécanique et son comportement à long terme. Le conditionnement en humidité des GLAE apparaît dès lors comme une étape incontournable pour assurer la qualité, la fiabilité et la reproductibilité des mélanges.

Dans ce contexte, plusieurs scénarios d’humidité ont été appliqués aux granulats, afin d’évaluer de manière comparative leur influence sur les propriétés des BAPL :

- GLAE séchés à l’air libre (Sec),
- GLAE séchés à l’air libre avec ajout, lors du malaxage, d’une quantité d’eau équivalente à celle absorbée après 24 h (Sec + Wa24h),
- GLAE pré-mouillés pendant 5 min avec la quantité d’eau absorbée à 24 h (PM-5min),
- GLAE pré-saturés pendant 5 min et essuyés en surface (PS-5min),
- GLAE pré-saturés pendant 1 h et essuyés en surface (PS-1h),
- GLAE pré-saturés pendant 24 h et essuyés en surface (PS-24h).

Le Tableau 3.1 présente les proportions des différents constituants des mélanges de BAPL étudiés dans le présent chapitre.

Tableau 3.1. Constituants des mélanges de BAPL étudiés.

Mélanges	CEM I	FC	E _{eff}	E _t	SP	Sable 0/2	Sable 0/4	GLAE 4/14	TH* GLAE
Unité	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%
Sec	423,3	160	185,6	185,6	4,46	278,7	454,7	374,4	0
Sec + Wa_{24h}	423,3	160	185,6	218,3	4,46	278,7	454,7	374,4	0
PM-5min	423,3	160	185,6	210,1	4,46	278,7	454,7	374,4	6,54
PS-5min	423,3	160	185,6	191,8	4,46	278,7	454,7	374,4	1,65
PS-1h	423,3	160	185,6	202,3	4,46	278,7	454,7	374,4	4,47
PS-24h	423,3	160	185,6	218,3	4,46	278,7	454,7	374,4	8,74

* Teneur en humidité du GLAE

L'analyse de ces différentes conditions permettra d'identifier le degré de saturation optimal des granulats, conciliant ouvrabilité, résistance mécanique et durabilité. Le taux d'humidité retenu sur la base de ces résultats constituera une référence pour la suite des travaux développés dans les prochains chapitres.

2. CINÉTIQUE DE L'ABSORPTION D'EAU DES GRANULATS D'ARGILE EXPANSÉE

La cinétique d'absorption d'eau des GLAE a été déterminée conformément à la méthode du pycnomètre, selon la norme NF EN 1097-6 (NF EN 1097-6, 2022). Les essais ont été réalisés sur trois échantillons de granulats prélevés de manière aléatoire, avec des durées d'immersion dans l'eau de 5, 15 et 30 minutes, puis de 1, 2, 3 et 24 heures. Les résultats sont présentés à la Figure 3.1.

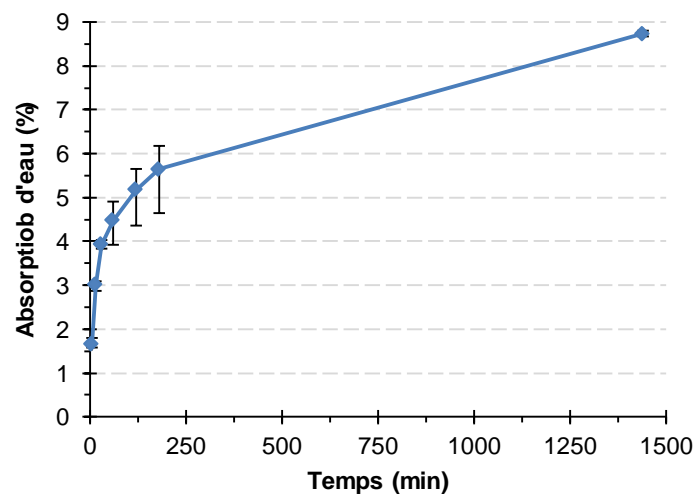


Figure 3.1. Courbe d'absorption d'eau des GLAE au cours du temps.

La courbe de cinétique d'absorption met en évidence une pente initiale prononcée, traduisant une absorption rapide au cours des premières minutes, suivie d'une progression plus régulière. Près de 45 % de la capacité d'absorption à 24 heures est atteinte dès les 30 premières minutes, pour une valeur maximale avoisinant 9 %. Ce résultat témoigne de la forte porosité des GLAE, mais la valeur mesurée à 24 heures reste inférieure à celles rapportées dans la littérature. En effet, plusieurs travaux sur les BAPL à base de GLAE (Adhikary et al., 2021 ; Kumar et al., 2023) mentionnent des taux d'absorption à 24 heures, à pression atmosphérique, variant entre 9,2 % et 39 % en masse.

La valeur relativement faible obtenue peut s'expliquer par une température de cuisson supérieure à 1180 °C lors de la fabrication des GLAE. Chiou et al. (Chiou et al., 2006) montre qu'à de telles températures, une couche vitreuse se forme à la surface des granulats, ce qui réduit la connectivité entre les pores et, par conséquent, leur capacité d'absorption. Celle-ci dépend étroitement de la structure capillaire et du phénomène de capillarité, les pores capillaires, définis comme ceux de diamètre supérieur à 2 μm , jouant un rôle essentiel dans l'absorption d'eau. La Figure 3.2a illustre la distribution volumique des pores d'un grain de GLAE, où l'on observe une large plage de diamètres (3,1 μm à plus de 40 μm , Figure 3.2b), avec une prédominance de pores capillaires de petite taille.

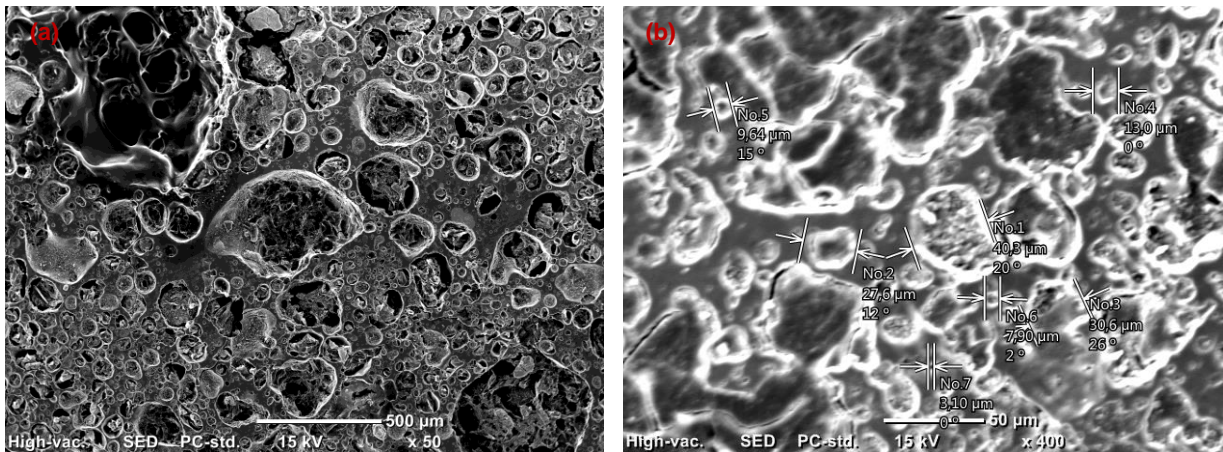


Figure 3.2. Observation MEB de la microstructure poreuse interne d'un GLAE (a), et distribution des diamètres de pores correspondants (b).

Par ailleurs, Chibbaro et al. (Chibbaro et al., 2009) montre que la rugosité des parois des pores ralentit la progression du liquide en leur sein. L'aspect relativement lisse observé dans les pores des GLAE (Paul et al., 2021) pourrait ainsi contribuer à expliquer leur coefficient d'absorption. Enfin, il convient de rappeler que la capacité d'absorption totale des GLAE ne peut être atteinte par une simple immersion à pression atmosphérique, en raison de l'air piégé dans les pores, qui limite leur remplissage complet.

3. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAPL FRAIS

3.1. Effet sur l'essai d'étalement au cône d'Abrams

La Figure 3.3 illustre la variation de l'étalement des BAPL en fonction du taux d'humidité des GLAE. La plupart des mélanges appartiennent à la classe de fluidité SF3 (étalement compris entre 750 mm et 850 mm), à l'exception du béton de référence contenant des GLAE secs, qui se situe dans la classe SF2 (étalement entre 550 mm et 650 mm), conformément à la norme (NF EN 206-9, 2010).

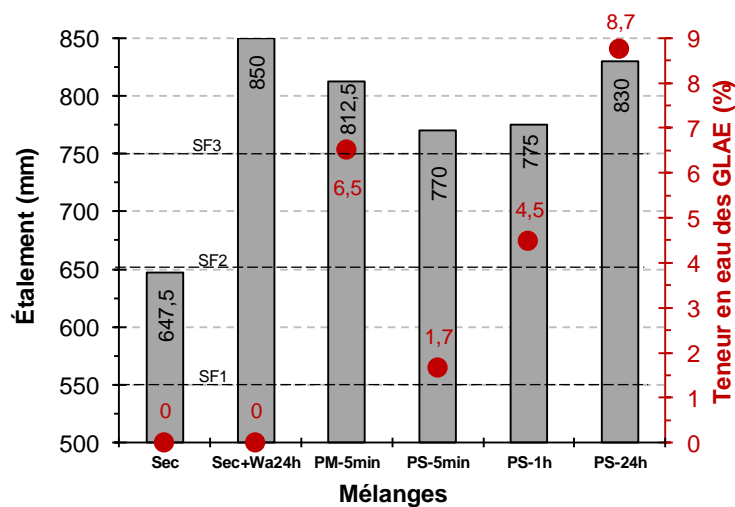


Figure 3.3. Variation de l'étalement du BAPL en fonction du taux d'humidité des GLAE.

La plus faible valeur d'étalement enregistrée pour le BAPL témoin s'explique principalement par le caractère fortement absorbant des GLAE, dont le taux d'absorption d'eau à 24 heures est de 8,7 % (voir Figure 3.1). Introduits à l'état sec, c'est-à-dire avec une teneur en humidité nulle, ces granulats, en raison de leur porosité importante, variée et interconnectée, absorbent rapidement l'eau de gâchage. Ce phénomène entraîne un transfert d'eau de la pâte fraîche vers les granulats, provoquant un raidissement précoce du béton dans le malaxeur, une augmentation de la cohésion du mélange et, par conséquent, une diminution de son ouvrabilité. Ce déficit d'ouvrabilité peut être compensé par l'ajout d'une quantité d'eau équivalente à celle absorbée par les GLAE à 24 heures, tout en conservant une teneur en humidité nulle des granulats. Cette correction a été appliquée dans le mélange dit Sec+Wa24h, ce qui a permis une amélioration de l'étalement de 31,3 % par rapport au mélange témoin. L'eau ajoutée satisfait à la fois les besoins en absorption des GLAE secs et améliore l'ouvrabilité résiduelle du béton. Le pré-mouillage ou la pré-saturation des granulats contribue également à améliorer l'étalement des BAPL par rapport au mélange témoin. Cette amélioration est estimée à 25,5 % pour un pré-mouillage de 5 minutes, et à 18,9 %, 19,7 % et 28,2 % respectivement pour des durées de pré-saturation de 5 minutes, 1 heure et 24 heures. L'introduction de granulats partiellement saturés limite en effet l'absorption d'eau pendant le malaxage et la mise en place du béton.

Les points rouges présentés dans la Figure 3.3 illustrent l'évolution de la teneur en eau des granulats pour les différents modes d'humidification des GLAE. Une relation directe entre la teneur en eau des GLAE et l'étalement des BAPL est ainsi observée : l'augmentation de l'humidité des granulats améliore l'étalement. En effet, une partie de l'eau préalablement absorbée par les GLAE est restituée au mortier, favorisant un meilleur mouillage des particules et une augmentation de la fluidité. Hubertova et Hela ([Hubertova et Hela, 2007](#)) ont étudié l'influence de la pré-humidification sur l'écoulement et le maintien des propriétés rhéologiques des BAPL. En comparant deux bétons contenant respectivement des GLAE secs et des GLAE pré-humidifiés, ils ont montré que cette dernière condition favorise l'écoulement et la stabilité rhéologique du béton. De même, Kim et al. ([Kim et al., 2020](#)) ont rapporté que les LECA ayant une teneur en humidité initiale de 0 % ou de 8 % absorbaient significativement plus d'eau pendant le malaxage que ceux présentant une humidité initiale plus élevée, indiquant ainsi que la capacité d'absorption diminue à mesure que l'humidité préexistante augmente.

3.2. Effet sur le temps d'écoulement

La Figure 3.4 présente le temps d'étalement des BAPL en fonction du taux d'humidité des GLAE. Le T_{500} correspond au temps nécessaire au béton pour atteindre un diamètre d'étalement de 500 mm, et constitue un indicateur de sa viscosité. Ce paramètre peut être estimé à l'aide de la corrélation proposée par Sedran et Larrard ([Sedran et Larrard, 1999](#)), via l'application de l'équation (2.11) (cf. Chapitre II, § 4.3.2). Les valeurs estimées sont représentées par des points rouges sur la Figure 3.4.

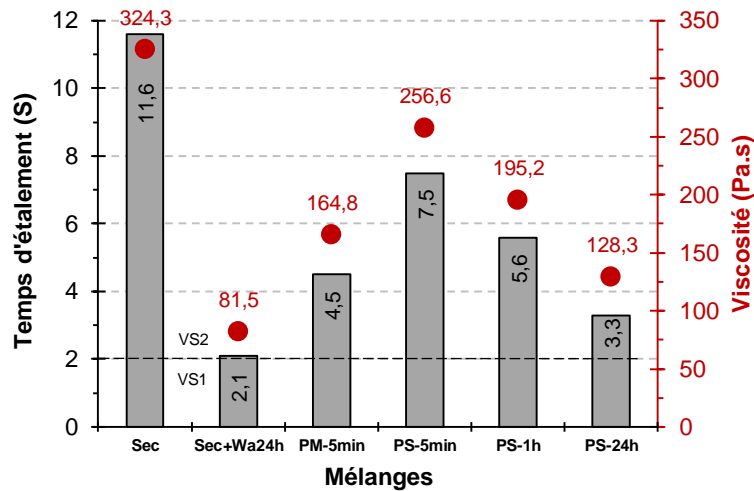


Figure 3.4. Variation du temps d'écoulement du BAPL en fonction de l'humidité des GLAE.

L'ensemble des mélanges présentent des valeurs de T_{500} supérieures à 2 secondes, ce qui les classe dans la catégorie VS2, conformément à la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010). Ces résultats confirment les observations faites sur l'étalement : le mélange témoin avec GLAE secs présente le T_{500} le plus élevé, tandis que les autres mélanges montrent des temps d'écoulement plus courts, proportionnels au taux d'humidité des granulats. En raison de leur porosité élevée, les GLAE secs absorbent rapidement une partie de l'eau de la pâte cimentaire, réduisant ainsi la quantité d'eau libre disponible. Cette absorption entraîne une augmentation de la viscosité plastique, ralentit l'écoulement du béton et prolonge le temps d'étalement, d'où la valeur élevée du T_{500} observée pour le mélange témoin. L'ajout de la quantité d'eau absorbée par les GLAE à 24 h à l'eau de gâchage efficace (cas du mélange Sec+Wa24h) compense cette perte d'eau libre, ce qui réduit significativement le T_{500} et la viscosité plastique du BAPL, respectivement de 82 % et 75 % par rapport au mélange témoin.

Lorsque les GLAE sont pré-humidifiés ou pré-saturés, leur capacité d'absorption d'eau pendant le malaxage est fortement diminuée. Contrairement aux GLAE secs, qui captent une partie de l'eau de gâchage, les GLAE pré-humidifiés en retiennent très peu. L'eau libre reste ainsi disponible pour assurer la lubrification de la pâte et faciliter l'écoulement du béton. De plus, l'humidité interne déjà présente dans les GLAE réduit les frottements internes lors du malaxage, favorise un meilleur enrobage des granulats et améliore l'homogénéité du mélange, ce qui accélère l'écoulement et raccourcit le T_{500} . Cette diminution a été évaluée à 61,2 %, 35,3 %, 51,7 % et 71,6 % respectivement pour les mélanges PM-5min, PS-5min, PS-1h et PS-24h. Enfin, les GLAE pré-humidifiés restituent progressivement une partie de l'eau absorbée dans la pâte, selon le gradient d'humidité. L'ensemble de ces effets combinés améliore la déformabilité du mélange, réduit la viscosité plastique et favorise une cinétique d'écoulement plus rapide, se traduisant par un T_{500} plus court que celui observé pour le mélange témoin à base de GLAE secs.

3.3. Effet sur l'essai d'écoulement à la boîte en L

La Figure 3.5 présente les résultats du test de capacité de remplissage mesurée à l'aide de la boîte en L, en présence d'un obstacle constitué d'une grille à trois barres, conformément à la norme NF EN 12350-10 (NF EN 12350-10, 2010). L'ensemble des BAPL affiche des taux de remplissage supérieurs à la valeur minimale recommandée par la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010), fixée à 0,8, à l'exception du BAPL témoin, qui enregistre une valeur plus faible, indiquant un blocage au niveau des armatures.

Lorsque les GLAE sont utilisés avec un taux d'humidité nul, le mortier du BAPL témoin tend à gagner en robustesse en raison de la forte absorption d'eau par les granulats, ce qui augmente la cohésion et la viscosité du béton. Cette situation réduit considérablement la mobilité du mélange et accentue le risque de blocage, compromettant ainsi la capacité de remplissage. Néanmoins, aucun signe de ségrégation dynamique n'a été observé visuellement lors de l'écoulement du béton. En revanche, lorsque la quantité d'eau absorbée par les granulats est prise en compte dans le calcul de l'eau effective du mélange, tout en maintenant les GLAE à l'état sec (formulation Sec+Wa24h), le taux de remplissage à la boîte en L est satisfaisant, sans manifestation visible de blocage. Toutefois, la valeur enregistrée peut être trompeuse. En effet, cet essai est reconnu pour accentuer les phénomènes de séparation entre la matrice cimentaire et les gros granulats, ce qui permet de détecter une éventuelle ségrégation dynamique, souvent accompagnée d'une remontée visible des GLAE à la surface du béton. Dans le cas présent, en raison du rapport e/c élevé de cette formulation, la viscosité du mélange diminue et le mortier perd en robustesse, réduisant ainsi sa capacité à maintenir les granulats en suspension.

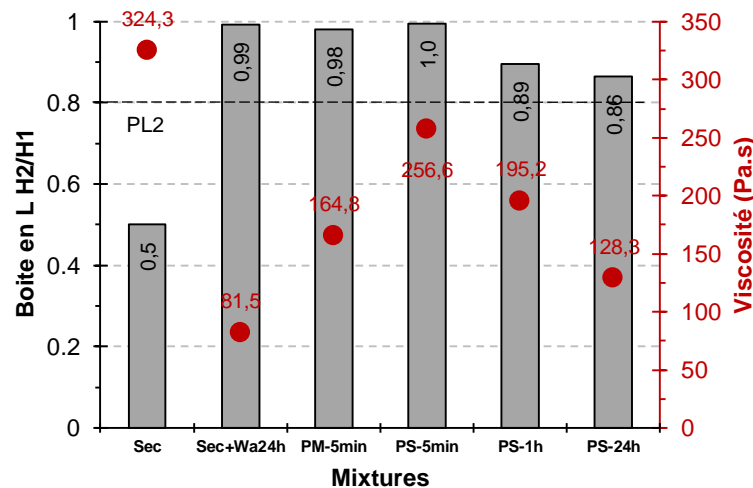


Figure 3.5. Variation du taux de remplissage à la boîte en L en fonction du taux d'humidité des GLAE.

Par ailleurs, l'augmentation du taux d'humidité des GLAE, par pré-mouillage ou pré-saturation, améliore généralement la capacité de remplissage des BAPL selon le critère de recevabilité de l'essai à la boîte en L. Il est rapporté que l'eau préalablement absorbée par les GLAE est progressivement relarguée dans le mortier, entraînant une augmentation du rapport e/c effectif. Or, une telle augmentation conduit à une diminution de la capacité de

remplissage, ce qui contredit les résultats de Lotfy et al. (Lotfy et al., 2015), qui indiquent au contraire une amélioration des capacités de remplissage et de passage avec l'augmentation du rapport e/c. L'eau absorbée joue ainsi le rôle d'un réservoir interne : plus le taux d'humidité des GLAE est élevé, plus la quantité d'eau restituée dans le mélange est importante. Cette restitution accrue peut entraîner une réduction de la viscosité et de la cohésion du béton, ce qui constitue la principale cause d'une capacité de remplissage amoindrie à la boîte en L. Les mélanges PM-5 min et PS-24h ont d'ailleurs présenté des signes visuels de ségrégation à l'arrêt de l'écoulement.

3.4. Effet sur la résistance à la ségrégation par la stabilité au tamis

La résistance à la ségrégation statique des BAPL a été évaluée à l'aide de l'essai de stabilité au tamis, conformément à la norme NF EN 12350-11 (NF EN 12350-11, 2010). L'indice de ségrégation statique (SR) est défini comme le rapport entre la masse de laitance recueillie à travers un tamis de 5 mm d'ouverture et la masse totale de béton testé. Les résultats présentés dans la Figure 3.6 se situent majoritairement dans la classe SR2 ($\leq 15\%$), à l'exception des bétons BAPL (Sec+Wa24h) et (PS-24h), qui appartiennent à la classe SR1 (15 % à 20 %). L'augmentation de l'indice SR par rapport au mélange témoin a été estimée à 131,9 %, 61,7 %, 19,8 %, 45,1 % et 157,7 % respectivement pour les mélanges BAPL à base de GLAE Sec+Wa24h, PM-5min, PS-5min, PS-1h et PS-24h.

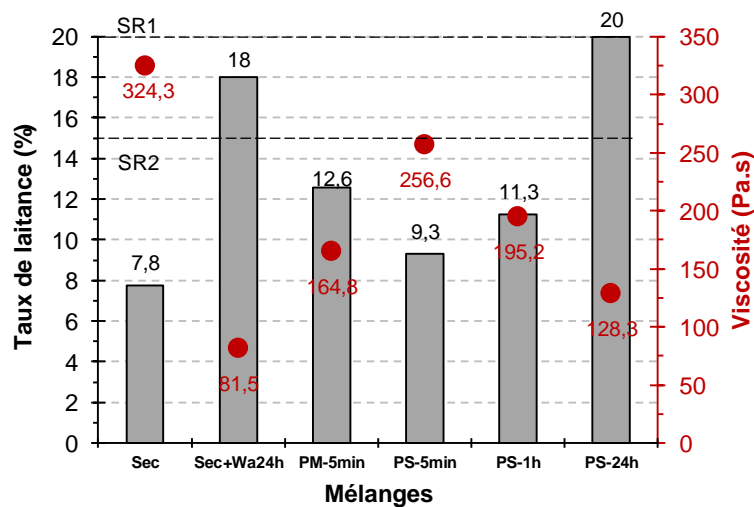


Figure 3.6. Influence de la teneur en humidité des GLAE sur l'essai de ségrégation au tamis du BAPL.

Les résultats mettent en évidence une corrélation claire entre la résistance à la ségrégation, exprimée par le taux de laitance, et la viscosité plastique des bétons, représentée par les points rouges sur le graphique. Plus la viscosité du BAPL est élevée, meilleure est sa stabilité au tamis. Autrement dit, une viscosité suffisante empêche les GLAE de remonter à la surface ou de se séparer de la pâte. C'est le cas du BAPL témoin : du fait du caractère sec de ses granulats, ceux-ci absorbent rapidement une partie de l'eau de la pâte cimentaire, ce qui réduit le rapport e/c effectif. Le mortier devient alors plus épais et cohésif, ce qui entraîne une augmentation de sa viscosité. À l'inverse, lorsque la viscosité est relativement faible, le mortier perd en robustesse et ne parvient plus à maintenir les GLAE en suspension. Ceux-ci

ont alors tendance à flotter ou à migrer vers la surface, comme observé avec le BAPL (Sec+Wa24h), qui présente une faible viscosité et une quantité importante de laitance, signe manifeste de ségrégation statique. Ce comportement résulte principalement de l'augmentation du rapport e/c, consécutive à la prise en compte de l'absorption d'eau des GLAE dans le calcul de l'eau effective. Cette approche a eu pour effet de fluidifier le mélange, mais au détriment de sa stabilité. Par ailleurs, le pré-mouillage ou la pré-saturation des GLAE agit de manière différenciée sur la stabilité des BAPL. Selon les conditions appliquées, les granulats absorbent des quantités d'eau variables et, selon leur taux d'humidité, une partie de cette eau est restituée dans le mélange. Cette redistribution conditionne directement la capacité du béton à résister à la ségrégation. Globalement, plus la teneur en eau des GLAE augmente, plus la viscosité du BAPL tend à diminuer, pour les mêmes raisons évoquées précédemment.

Il convient enfin de rappeler que les BAPL se distinguent des BAP conventionnels (formulés avec des granulats naturels) par un volume de pâte nettement plus élevé. Dans cette étude, cette différence atteint environ 16 %, si l'on considère comme référence un volume de pâte conventionnel de l'ordre de 350 l/m³ (Domone, 2006). Cet accroissement du volume de pâte contribue généralement à améliorer la stabilité du béton en augmentant sa viscosité. Cependant, ce paramètre peut induire en erreur dans le cadre de l'essai de stabilité au tamis, puisque c'est précisément la quantité de pâte qui influence directement le résultat. En effet, un volume de pâte élevé combiné à un rapport e/c important peut accentuer le risque de ségrégation par excès de fluidité. C'est précisément ce phénomène qui se manifeste dans le cas du BAPL PS-24h.

3.5. Effet sur la résistance à la ségrégation par l'essai à la colonne

Un autre essai, proposé comme alternative à l'essai de stabilité au tamis est l'essai à la colonne. Cet essai, fréquemment appliqué aux BAPL, consiste à évaluer la répartition des gros granulats, potentiellement sujets à ségrégation, le long d'une colonne en PVC de dimensions 150 × 450 mm (cf. Chapitre II, § 4.3.5). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 3.7.

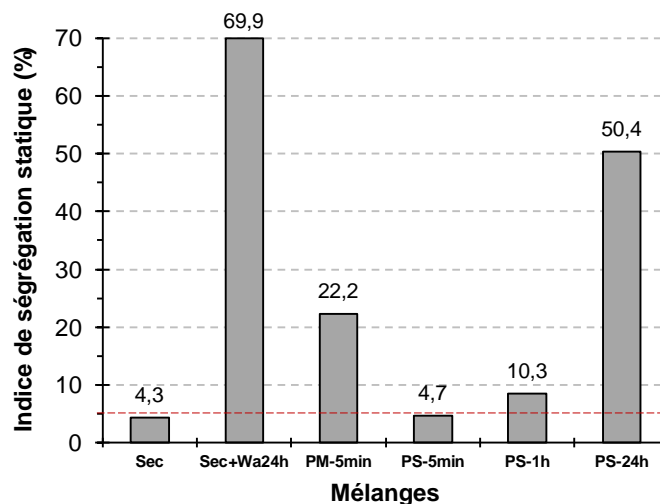


Figure 3.7. Influence de la teneur en humidité des GLAE sur l'essai à la colonne du BAPL.

En se référant aux travaux de Wu et al. (Wu et al., 2009) sur les BAPL, une valeur limite de 5 % est recommandée pour le SSI. Cette valeur, indiquée en rouge sur la Figure 3.7, représente le seuil en dessous duquel aucun risque de ségrégation n'est observé, traduisant une répartition relativement homogène des granulats sur toute la hauteur de la colonne. Les résultats de l'essai montrent que la majorité des mélanges présentent des SSI supérieurs à 5 %, à l'exception du BAPL témoin et du BAPL PS-5min. Une certaine similitude peut être observée entre ces résultats et ceux obtenus par l'essai de stabilité au tamis (pour deux bétons), ce qui suggère une bonne corrélation entre les deux méthodes d'évaluation de la ségrégation. Deux enseignements principaux peuvent être tirés de ces observations :

- D'une part, le maintien d'un rapport e/c aussi bas que possible, en utilisant des GLAE secs (sans humidité résiduelle), accroît la viscosité du mortier. Cette augmentation favorise la cohésion du mélange et améliore sa résistance à la ségrégation, mais peut se faire au détriment des propriétés d'autoplaçance.
- D'autre part, il est possible d'identifier un taux d'humidité optimal des GLAE permettant d'assurer un bon compromis entre robustesse du mortier et capacité d'écoulement du béton. Ce compromis semble avoir été atteint avec le mélange PS-5min, qui présente une bonne stabilité tout en conservant des propriétés d'autoplaçance satisfaisantes.

Comme déjà souligné précédemment, une augmentation du rapport e/c compromet la stabilité du béton. Les BAPL ayant enregistré les SSI les plus élevés sont également ceux qui présentent les indices de ségrégation au tamis (SR) les plus importants.

En complément des résultats expérimentaux, des observations visuelles de l'homogénéité des BAPL ont été réalisées sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 11×22 cm. Après une cure de 28 jours dans l'eau, les cylindres ont été sciés en deux dans le sens du coulage. Les moitiés obtenues ont ensuite été disposées verticalement, de haut en bas, puis photographiées. La Figure 3.8 illustre la répartition des GLAE dans la matrice cimentaire pour les différents mélanges. Une bonne répartition des GLAE sur toute la hauteur des éprouvettes a été observée, sans signe visible de ségrégation, sur les photographies des BAPL Sec et PS-5min. La distribution des gros granulats y apparaît relativement uniforme, bien qu'une légère accumulation de pâte soit visible au fond de l'éprouvette PS-5min. En revanche, pour les autres mélanges présentant des rapports e/c plus élevés, une séparation entre la matrice cimentaire et les GLAE est constatée. En raison de leur faible masse volumique, les granulats légers ont tendance à remonter vers la partie supérieure, tandis que la pâte plus dense s'accumule au fond de l'éprouvette, ce qui constitue un indicateur clair de ségrégation. Par ailleurs, la hauteur de la couche de pâte déposée au fond est proportionnelle au rapport e/c , plus celui-ci est élevé, plus la quantité de pâte décantée est importante. Ces observations confirment les résultats expérimentaux présentés dans cette section et soulignent l'intérêt des examens visuels dans l'évaluation de la stabilité des BAPL.

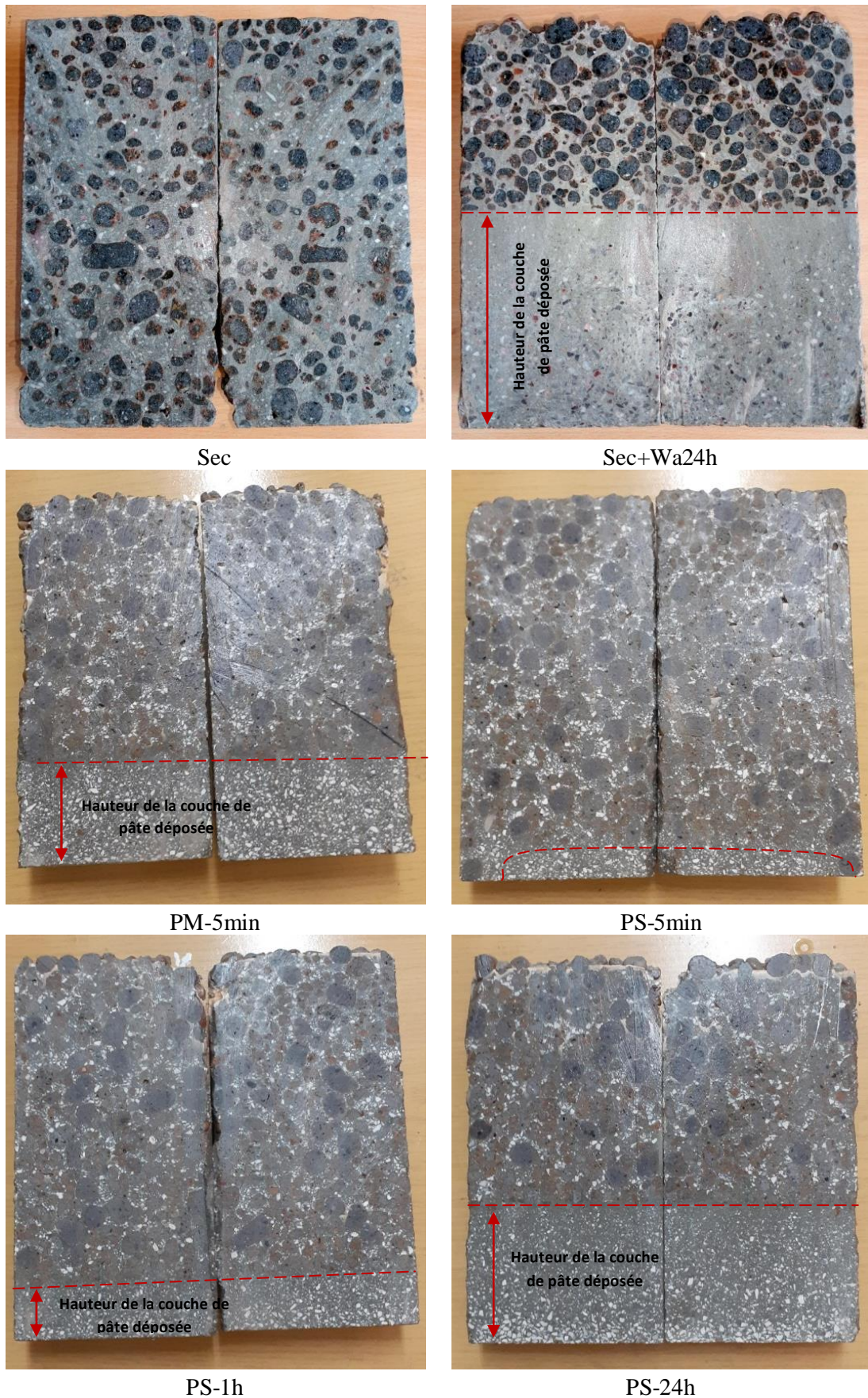


Figure 3.8. Analyse visuelle de la ségrégation potentielle à partir de la répartition des granulats dans les différentes formulations de béton étudiées.

4. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAPL DURCI

4.1. Effet sur la masse volumique durci

La Figure 3.9 illustre la variation de la masse volumique à l'état durci des BAPL en fonction du taux d'humidité des GLAE, après une cure de 60 jours dans l'eau suivie d'un séchage en étuve à 80 °C jusqu'à stabilisation de la masse. Les masses volumiques mesurées demeurent toutes inférieures à la limite de 2000 kg/m³, seuil défini pour les bétons légers à vocation structurelle selon la norme NF EN 13055 (NF EN 13055, 2016), ce qui constitue un résultat satisfaisant. Bien que les variations ne suivent pas une tendance linéaire marquée, on observe néanmoins un effet perceptible du degré d'humidité des GLAE sur la masse volumique durcie des BAPL. Un écart maximal d'environ 261 kg/m³ est relevé entre les valeurs extrêmes, pour une moyenne proche de 1810 kg/m³.

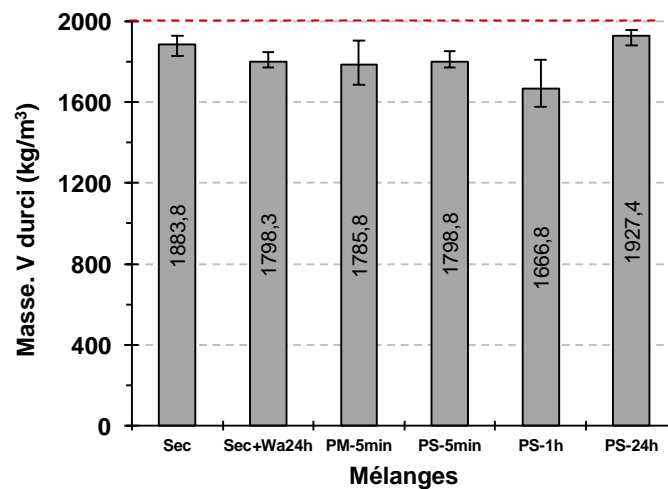


Figure 3.9. Effet de la teneur en humidité des GLAE sur la masse volumique à l'état durci des BAPL.

L'analyse des résultats met en évidence une tendance notable : les formulations élaborées à partir de GLAE préalablement saturés sur une période prolongée présentent des masses volumiques durcies plus élevées. Ce comportement s'explique par la porosité intrinsèque des granulats légers, bien connus pour leur forte capacité d'absorption d'eau. Lorsqu'ils sont introduits dans le mélange à l'état sec ou partiellement humide, les GLAE captent une partie de l'eau de gâchage, modifiant ainsi le rapport e/c et perturbant l'hydratation du liant. Cette absorption non maîtrisée conduit à une hydratation incomplète, une compacité réduite et, par conséquent, une baisse de la masse volumique du béton. À l'inverse, une pré-saturation prolongée, par exemple pendant 24 heures, permet de saturer les pores internes des GLAE avant leur mise en œuvre, limitant ainsi toute absorption supplémentaire durant le malaxage. Cette approche favorise une hydratation plus homogène, une meilleure cohésion de la matrice cimentaire et, in fine, une masse volumique finale plus élevée. Enfin, les masses volumiques obtenues à l'état durci se situent dans les intervalles généralement rapportés par les études antérieures sur les BAPL (Adhikary et al., 2021), confirmant ainsi la cohérence des résultats avec la littérature.

4.2. Effet sur la résistance mécanique à la compression

L'évolution de la résistance à la compression des différents mélanges de BAPL en fonction du taux d'humidité des GLAE a été suivie à 7, 14, 28 et 90 jours, comme illustré à la Figure 3.10. Comme attendu, les résistances mesurées à 7 jours représentent entre 75 % et 85 % de celles obtenues à 28 jours, lesquelles varient de 24 à 43 MPa. Les résultats montrent une progression régulière et cohérente des résistances au cours du temps. Sans surprise, les performances les plus élevées ont été obtenues pour le BAPL élaboré avec des GLAE secs, tandis que les résistances les plus faibles ont été enregistrées pour les mélanges contenant les GLAE présentant le taux d'humidité le plus élevé. En prenant les résistances à 28 jours comme référence, les diminutions de performance liées à l'augmentation du rapport e/c total sont estimées à 31,7 %, 22,7 %, 12,5 %, 23,5 % et 43,9 %, respectivement pour les mélanges BAPL à base de GLAE Sec+Wa24h, PM-5min, PS-5min, PS-1h et PS-24h.

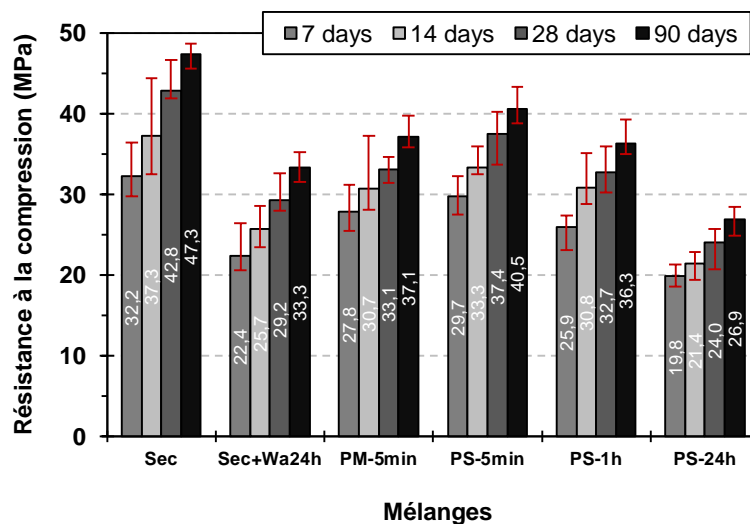


Figure 3.10. Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance en compression des BAPL.

Ces résultats s'expliquent principalement par le rôle de l'absorption d'eau des granulats légers. Lorsqu'ils sont introduits secs ou partiellement humides, une partie de l'eau de gâchage est absorbée par les GLAE, ce qui réduit localement le rapport e/c et favorise une compacité accrue de la pâte. À l'inverse, lorsque les GLAE sont saturés, même après essuyage superficiel, une fraction de l'eau contenue dans leurs pores peut être relarguée dans le mélange, augmentant ainsi le rapport e/c total. Cet excès d'eau entraîne une masse volumique plus faible de la matrice, affaiblit la ZTI et accroît la porosité globale. Dans ce contexte, Lo et al. (Lo et al., 2008a) ont montré que l'absorption d'eau et le degré d'humidité des granulats légers influencent significativement le processus de formation de la ZTI. De leur côté, Vargas et al. (Vargas et al., 2017) ont mis en évidence que l'augmentation du rapport e/c induit une augmentation de l'épaisseur de la ZTI dans les bétons légers, confirmant ainsi l'existence d'une forte corrélation entre ces deux paramètres.

L'effet de la pré-humidification des granulats sur la résistance à la compression des bétons ne fait pas l'unanimité au sein de la communauté scientifique. Selon Poon et al. (Poon et al., 2004), lorsque les granulats recyclés sont utilisés à l'état sec (taux d'humidité nul), la résistance à la compression du béton recyclé atteint son maximum. À l'inverse, d'autres études (Dayalan et Buellah, 2014 ; Golias et al., 2012) ont montré que l'utilisation de granulats légers pré-humidifiés favorise le processus d'auto-curage, permettant ainsi d'obtenir des résistances optimales. De manière similaire, les travaux de Gopi et Revathi (Gopi et Revathi, 2019) ainsi que de Famili et al. (Famili et al., 2012) ont mis en évidence que les GLAE pré-humidifiés, incorporés dans des BAPL, relarguent progressivement de l'eau dans la matrice cimentaire, contribuant ainsi à l'hydratation du ciment et à l'amélioration de la résistance mécanique. Toutefois, ces constats ne concordent pas entièrement avec les résultats de la présente étude. Un point commun aux recherches précédemment citées réside dans le fait que les GLAE y étaient utilisés en substitution partielle des granulats naturels, alors que dans notre cas, le remplacement est total. Ainsi, la quantité d'eau absorbée lors de la pré-humidification est directement proportionnelle à la part de GLAE introduite dans le mélange. En cas de substitution totale, le taux d'humidité global des granulats est plus élevé, ce qui limite leur capacité d'absorption supplémentaire au moment du malaxage, voire conduit à l'effet inverse : les GLAE peuvent relarguer l'eau stockée dans la matrice cimentaire. Ce phénomène engendre une structure plus poreuse et moins dense, se traduisant par une diminution de la résistance mécanique. Il ressort des résultats présentés à la Figure 3.10 que la saturation des GLAE dans l'eau pendant 5 minutes constitue la condition d'humidité offrant les meilleures performances mécaniques pour les BAPL, en comparaison aux autres états d'humidité testés.

Dans le but d'intégrer la masse volumique des GLAE dans l'évaluation des performances mécaniques, la résistance spécifique à la compression a été calculée comme le rapport entre la résistance à 28 jours et la masse volumique du béton à l'état durci. Les résultats correspondants sont présentés à la Figure 3.11.

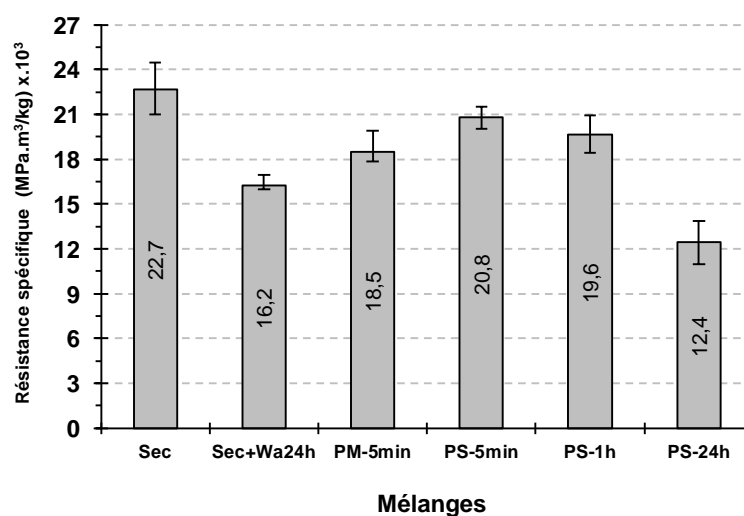


Figure 3.11. Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance spécifique en compression des BAPL.

Les résultats révèlent une tendance similaire à celle observée pour la résistance absolue (Figure 3.10), caractérisée par une baisse progressive des performances à mesure que le rapport e/c total augmente. Il est à noter que le mélange contenant des GLAE pré-saturés pendant 5 minutes (PS-5min) se distingue par la résistance spécifique la plus élevée parmi l'ensemble des états d'humidification testés. La diminution de la résistance spécifique, liée à l'augmentation du rapport e/c , est estimée à 28,5 %, 18,4 %, 8,4 %, 13,5 % et 45,2 %, respectivement pour les mélanges Sec+Wa24h, PM-5min, PS-5min, PS-1h et PS-24h. Ces résultats confirment qu'une pré-humidification brève et bien contrôlée des GLAE, comme celle de 5 minutes, constitue un compromis optimal. Elle permet en effet de maintenir une structure interne plus dense tout en bénéficiant de l'effet d'auto-curage. À l'opposé, un excès d'humidité prolongé compromet l'efficacité du liant, perturbe l'équilibre interne du béton et se traduit par une dégradation des performances spécifiques, en contradiction avec les objectifs recherchés pour les BAPL à vocation structurelle.

4.3. Effet sur la résistance à la flexion

La Figure 3.12 présente l'évolution de la résistance à la flexion des BAPL après 7, 14, 28 et 90 jours de cure humide, en fonction du taux d'humidité initial des GLAE. Le rapport entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression à 28 jours varie entre 8 % et 10 %, ce qui correspond aux plages de valeurs rapportées pour les BAPL à base de GLAE non traités (Kumar et al., 2023). Ces proportions demeurent toutefois inférieures à celles observées pour les BAP formulés avec des granulats naturels, généralement comprises entre 10 % et 15 % (Schutter et Audenaert, 2007). Cette relative faiblesse peut être attribuée à plusieurs facteurs. D'une part, les GLAE présentent une résistance mécanique intrinsèque limitée, en raison de leur structure poreuse et de leur faible masse volumique. D'autre part, leur forme arrondie et leur surface souvent lisse ou vitrifiée compromettent l'adhérence avec la pâte cimentaire, affaiblissant ainsi la zone de transition, dont la qualité est déterminante pour la transmission des efforts en flexion. Une ZTI fragilisée favorise l'apparition précoce de microfissures, qui se propagent plus facilement sous contrainte, entraînant une rupture prématurée des éprouvettes.

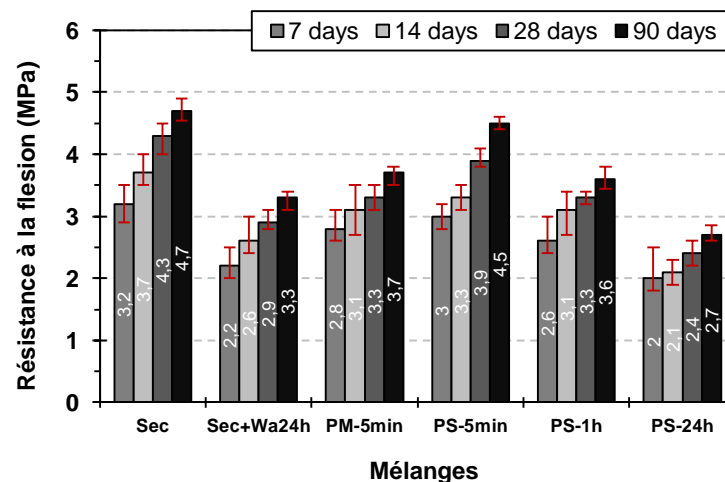


Figure 3.12. Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance à la flexion des BAPL.

Les résultats mettent en évidence une tendance analogue à celle observée pour la résistance à la compression : une diminution progressive de la résistance à la flexion avec l'augmentation du rapport e/c total. À 28 jours, cette baisse est estimée à 32,6 %, 23,3 %, 9,3 %, 23,3 % et 44,2 %, respectivement pour les mélanges BAPL élaborés avec des GLAE Sec+Wa24h, PM-5min, PS-5min, PS-1h et PS-24h. Comme pour la compression, la pré-humidification des GLAE n'apporte pas d'amélioration significative de la résistance à la flexion par rapport à l'utilisation de granulats secs. Ce comportement s'explique principalement par l'augmentation du rapport e/c dans la matrice cimentaire, due au relargage d'une partie de l'eau absorbée par les granulats, qui agit comme une source d'eau supplémentaire dans le mélange. Parmi les états d'humidité testés, la saturation superficielle de 5 minutes (PS-5min) apparaît comme le compromis le plus favorable, enregistrant la plus faible perte de résistance en comparaison avec les GLAE secs. Cela suggère un équilibre optimal entre absorption initiale et relargage limité d'eau. En résumé, les recherches portant sur la résistance à la flexion des BAPL à base de GLAE restent limitées, ce paramètre étant souvent considéré comme secondaire dans les études expérimentales et relativement peu exploité dans les applications pratiques.

En intégrant la masse volumique des BAPL dans le calcul de la résistance spécifique à la flexion (Figure 3.13), les résultats montrent une tendance similaire à celle de la Figure 3.12. Les diminutions de résistance, par rapport au mélange témoin, sont estimées à 29,4 %, 19 %, 5 %, 13,3 % et 45,4 % respectivement pour les mélanges élaborés avec des GLAE Sec+Wa24h, PM-5min, PS-5min, PS-1h et PS-24h. Il est particulièrement intéressant de constater que, lorsqu'on prend en compte la masse volumique, le mélange PS-5min ne présente qu'une perte de 5 % de sa résistance à la flexion par rapport au témoin. Cette perte, relativement négligeable, doit être mise en perspective avec les améliorations notables observées à l'état frais, notamment en termes de maniabilité et de stabilité du mélange.

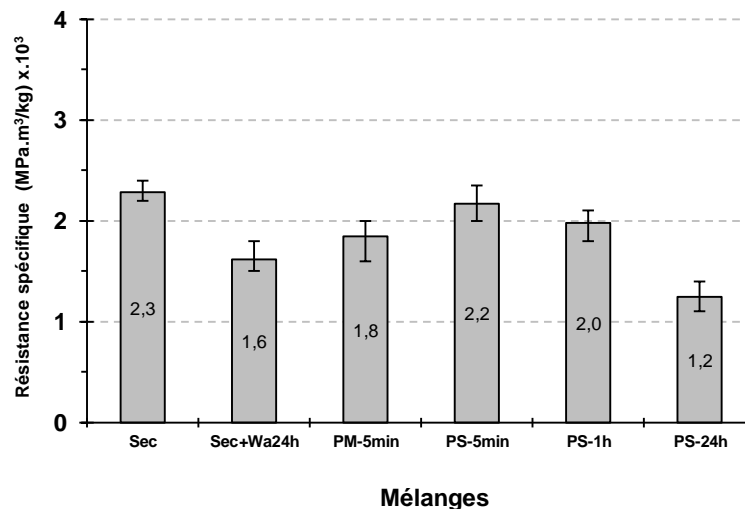


Figure 3.13. Influence du taux d'humidité des GLAE sur la résistance spécifique à la flexion des BAPL.

4.4. Effet sur le module d'élasticité dynamique

Les valeurs du module d'élasticité dynamique E_d sont déterminées à partir de l'équation (2.15), en se basant sur le temps de propagation d'une onde traversant une éprouvette cubique

de 100 mm de côté, après une cure humide de 60 jours suivie d'un séchage en étuve à 80 °C jusqu'à stabilisation de la masse. Les résultats, présentés à la Figure 3.14, révèlent une tendance similaire à celle observée pour la résistance à la compression.

La comparaison entre les modules E_d et les résistances à la compression à 28 jours met en évidence une corrélation linéaire marquée, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,95$ (Figure 3.15). Les valeurs du module E_d obtenues varient entre 18 GPa et 30 GPa. Ces résultats sont en accord avec les données de la littérature pour les BAPL à base de GLAE, situées entre 19 GPa et 25 GPa selon Karamloo et al. (Karamloo et al., 2016), et entre 21,5 GPa et 22,4 GPa selon Malešev et al. (Malešev et al., 2014), à l'exception du mélange témoin qui se distingue légèrement. En revanche, les BAP classiques formulés avec des granulats naturels présentent des modules d'élasticité supérieurs d'environ 15 % (Lo et al., 2007). L'incorporation des GLAE dans les BAP conduit donc à une réduction notable du module d'élasticité.

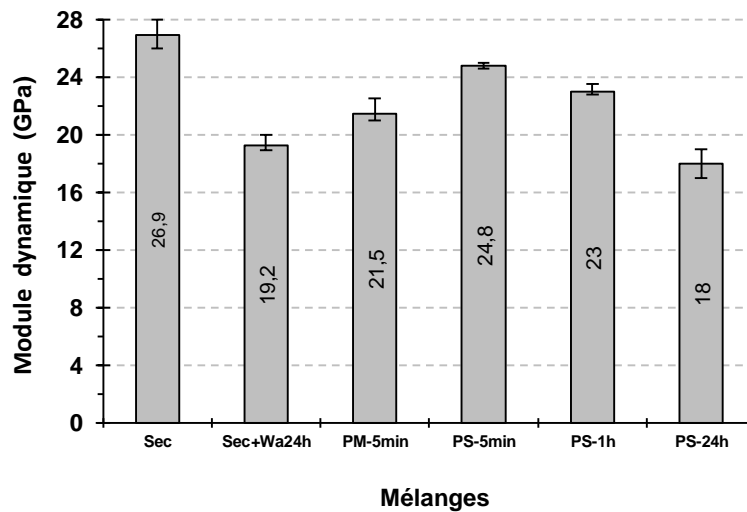


Figure 3.14. Influence du taux d'humidité des GLAE sur le module dynamique d'élasticité des BAPL.

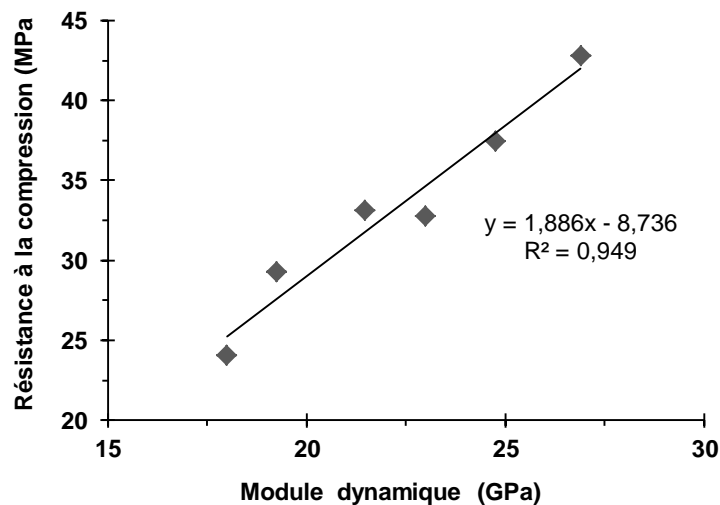


Figure 3.15. Corrélation entre la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité dynamique.

Cette baisse peut être attribuée à plusieurs facteurs. D'une part, la structure interne des GLAE, fortement poreuse, engendre une masse volumique plus faible et limite leur résistance mécanique, ce qui affecte défavorablement la rigidité globale du béton. D'autre part, la composition et le procédé de fabrication des GLAE leur confèrent une rigidité intrinsèque inférieure à celle des granulats naturels (Floyd et al., 2015). Enfin, l'interface entre les GLAE et la matrice cimentaire joue un rôle déterminant dans le comportement élastique : leur surface souvent lisse ou vitrifiée réduit l'adhérence avec la pâte de ciment, compromettant la transmission des contraintes mécaniques et, par conséquent, les performances élastiques globales du BAPL.

La valeur la plus élevée du module E_d a été enregistrée pour le mélange témoin contenant des GLAE secs, comparativement aux autres mélanges. Les pertes de module par rapport au témoin ont été estimées à 28,4 %, 20,2 %, 7,9 %, 14,5 % et 33,1 % respectivement pour les mélanges BAPL à base de GLAE Sec+Wa24h, PM-5min, PS-5min, PS-1h et PS-24h. L'utilisation de GLAE secs dans la formulation des BAPL entraîne donc une augmentation significative du module E_d . Ce comportement peut s'expliquer par plusieurs facteurs interdépendants. D'une part, les granulats secs absorbent une partie de l'eau de la pâte cimentaire lors du malaxage, ce qui réduit localement le rapport e/c autour de l'interface granulat-pâte. Il en résulte une ZTI plus dense et mieux consolidée, améliorant ainsi la transmission des contraintes mécaniques. D'autre part, cette absorption partielle favorise le développement d'une microstructure plus compacte et limite la formation de porosités capillaires indésirables. En outre, exempts d'eau libre, les GLAE secs conservent une structure stable jouant le rôle de squelette rigide dans la matrice, contribuant pleinement au comportement élastique du béton. L'ensemble de ces effets se combine pour conférer au matériau une rigidité dynamique accrue.

À l'inverse, l'incorporation de GLAE pré-humidifiés ou pré-saturés entraîne une réduction significative du module E_d des BAPL. Cette diminution est liée, d'une part, au relargage progressif de l'eau contenue dans les granulats vers la pâte cimentaire, qui accroît localement le rapport e/c et affaiblit la compacité de la microstructure. D'autre part, la présence d'une pellicule d'eau à la surface des granulats lors du malaxage compromet l'adhérence granulat-matrice, affaiblissant la ZTI et limitant l'efficacité de la transmission des contraintes. Saturés, les granulats se comportent comme des inclusions plus souples, susceptibles de se déformer sous charge, ce qui accroît la déformabilité globale du béton. Cette hétérogénéité interne, associée à une cohésion structurelle réduite, explique la baisse de rigidité constatée lorsque les GLAE ne sont pas employés à l'état sec. Cependant, la pré-saturation des GLAE pendant 5 minutes (BAPL PS-5min) apparaît comme un compromis pertinent, permettant de limiter l'absorption d'eau lors du malaxage tout en améliorant l'adhérence granulat-matrice, et donc de préserver des performances mécaniques satisfaisantes.

4.5. Effet sur l'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau capillaire des BAPL a été réalisé après 60 jours de cure humide. Les résultats obtenus, calculés à l'aide de l'équation (2.17), correspondent à la moyenne de trois mesures. La Figure 3.16 illustre l'évolution du coefficient d'absorption capillaire (Ca_t) en fonction de la racine carrée du temps, pour les différents taux d'humidité des GLAE. Afin

d'améliorer la lisibilité, les résultats ont été répartis sur deux graphiques distincts, ce qui permet d'éviter le chevauchement des courbes.

L'allure générale des courbes d'absorption capillaire suit une progression quasi linéaire en fonction de la racine carrée du temps. Cette phase ascendante traduit le remplissage progressif des pores accessibles à l'eau, principalement les capillaires connectés et les vides intergranulaires, et elle se poursuit tout au long de l'essai. Selon Badreddine-Bessa (Badreddine-Bessa, 2004), plus les pores sont larges, plus la pente de la droite est élevée. Cette portion linéaire est particulièrement significative, car elle reflète la qualité de la microstructure et du réseau poreux. La pente de chaque courbe indique la vitesse d'absorption : une valeur élevée traduit une porosité ouverte et interconnectée, tandis qu'une pente plus faible témoigne d'une structure plus dense et moins perméable. Dans ce type d'essai, on observe généralement un palier ou une phase de stabilisation en fin de courbe, indiquant que le matériau a atteint un état proche de la saturation. Or, dans le cas présent, aucune stabilisation nette n'est constatée, même après 24 heures (fin de l'essai). Ce comportement s'explique par la nature hautement poreuse des GLAE, qui conservent une capacité d'absorption active durant toute la durée de l'essai, y compris après pré-humidification. De plus, la microstructure relativement ouverte des BAPL favorise la migration capillaire de l'eau sur de longues périodes.

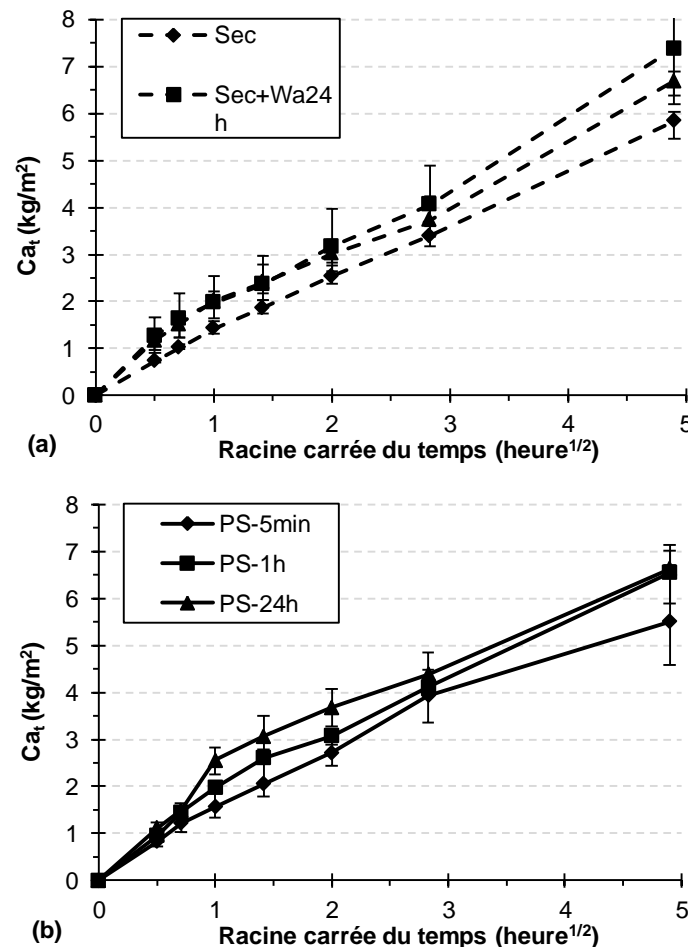


Figure 3.16. Influence de la teneur en humidité des GLAE sur l'absorption d'eau capillaire des BAPL.

L'augmentation du rapport e/c effectif, induite soit par l'ajout de l'équivalent en eau absorbé par les granulats (cas du mélange Sec+Wa24h), soit par le relargage de l'eau stockée dans les GLAE pré-humidifiés, exerce une influence notable sur l'absorption capillaire du béton. Une hausse du coefficient Ca_{24h} des BAPL par rapport au mélange témoin a été estimée à 26,5 %, 14,6 %, 12,2 % et 13,8 % respectivement pour les mélanges à base de GLAE Sec+Wa24h, PM-5min, PS-1h et PS-24h. En revanche, une diminution de 5,7 % du coefficient Ca_{24h} a été observée pour le mélange PS-5min par rapport au témoin. Ce comportement s'explique par le fait que, lorsque les GLAE restituent une partie de l'eau stockée dans leurs pores pendant le malaxage ou après la mise en place, cette eau supplémentaire accroît localement la teneur en eau libre dans la pâte cimentaire. L'élévation du rapport e/c qui en résulte favorise la formation d'une microstructure plus poreuse et moins dense, en particulier dans la pâte et la ZTI. Un réseau de pores plus ouvert et interconnecté facilite alors la migration capillaire de l'eau, entraînant une absorption plus rapide et plus importante. En d'autres termes, plus le relargage d'eau est élevé, plus l'indice d'absorption capillaire tend à croître, traduisant une perméabilité accrue du matériau.

La pré-saturation des GLAE pendant une courte durée de 5 minutes a permis d'obtenir les valeurs les plus faibles de vitesse d'absorption et d'absorption capillaire (Figure 3.16b), comparativement aux autres mélanges. Ce résultat peut être attribué à la teneur en eau résiduelle des GLAE, qui contribue à améliorer la qualité de la ZTI. Alexandre Bogas et al. (Alexandre Bogas et al., 2015) ont ainsi rapporté une réduction de 18 % de l'absorption capillaire à 28 jours pour des bétons légers contenant des GLAE pré-humidifiés pendant 3 minutes avec 50 % de l'eau totale du mélange. Les auteurs expliquent ce comportement par une amélioration de la ZTI, résultant d'une diminution du ressuage autour des granulats pré-humidifiés, permettant une meilleure interpénétration de la pâte dans les zones interfaciales. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres chercheurs (Elsharie et al., 2005), confirmant l'influence déterminante de l'état d'humidité initial des granulats légers sur les caractéristiques microstructurales de la ZTI.

6. CONCLUSION

À partir des résultats expérimentaux sur l'effet du taux d'humidité des GLAE sur les propriétés d'autoplaçance à l'état frais et sur les performances mécaniques et durables des BAPL à l'état durci, plusieurs scénarios d'humidité ont été étudiés : séchés à l'air libre (Sec), séchés à l'air libre avec ajout d'une quantité d'eau équivalente à celle absorbée après 24 h (Sec+Wa24h), pré-mouillés pendant 5 min avec la quantité d'eau absorbée à 24 h (PM-5min), pré-saturés pendant 5 min et essuyés en surface (PS-5min), pré-saturés pendant 1 h et essuyés en surface (PS-1h), et pré-saturés pendant 24 h et essuyés en surface (PS-24h). Les conclusions principales sont les suivantes :

- **Influence sur la rhéologie** : L'humidité initiale des GLAE a une incidence majeure sur la rhéologie des BAPL. À l'état sec, les granulats absorbent une partie importante de l'eau de gâchage, ce qui accroît la viscosité, ralentit l'écoulement (augmentation du T_{500}) et réduit l'ouvrabilité. À l'inverse, une pré-humidification même brève, ou une compensation en eau, limite cette absorption, fluidifie la pâte, réduit les frottements internes et améliore nettement l'étalement du béton (jusqu'à +31,3 %).
- **Écoulement et stabilité** : À l'état sec, les GLAE rigidifient le mélange et provoquent des blocages dans la boîte en L. Trop humides, ils relarguent l'eau absorbée, diminuant la cohésion et favorisant la ségrégation dynamique. Une pré-saturation de 5 minutes (PS-5min) permet au BAPL de s'écouler sans blocage tout en conservant son homogénéité.
- **Rôle de la viscosité du mortier** : Les résultats mettent en évidence le rôle clé de la viscosité du mortier dans la stabilité des BAPL. Celle-ci est fortement influencée par le taux d'humidité des GLAE, qui modifie le rapport e/c effectif. Une humidité excessive favorise la ségrégation, tandis qu'un pré-mouillage court et bien contrôlé améliore à la fois la cohésion et la stabilité. Le mélange PS-5min illustre parfaitement ce compromis entre stabilité et aptitude à l'écoulement.
- **Propriétés mécaniques** : Les performances mécaniques des BAPL (résistance à la compression, résistance en flexion et module d'élasticité dynamique) diminuent globalement avec l'augmentation de l'humidité des GLAE, en raison de l'excès d'eau restituée qui altère la compacité de la matrice et la qualité de la ZTI. Si les GLAE secs assurent les meilleures performances mécaniques, ils pénalisent fortement l'ouvrabilité. Le mélange PS-5min se distingue comme le meilleur compromis, conciliant performances mécaniques satisfaisantes, bonne cohésion et maniabilité adaptée aux exigences des BAPL structurels.
- **Absorption capillaire et durabilité** : Le degré de pré-humidification des GLAE s'avère déterminant pour contrôler l'absorption capillaire des BAPL. Une humidification modérée, comme dans le cas du mélange PS-5min, a limité la vitesse d'absorption capillaire, permis la formation d'un film d'eau fin à la surface des granulats et favorise une microstructure plus compacte grâce à un effet de cure interne progressif. À l'inverse, un excès d'eau entraîne un relargage rapide dans la matrice, augmentant la porosité et affaiblissant la ZTI, au détriment de la durabilité du béton.

En définitive, les résultats obtenus montrent que, dans leur état sec, les GLAE ne permettent pas d'élaborer un BAPL conforme aux exigences normatives, en particulier sur le plan rhéologique. Leur forte capacité d'absorption perturbe en effet la formulation, entraînant une diminution marquée de la fluidité initiale et une instabilité du mélange. À l'inverse, une pré-saturation des granulats s'avère indispensable pour garantir la faisabilité et les performances du BAPL. Parmi les différentes conditions testées, une durée de pré-saturation de 5 minutes constitue le compromis optimal : elle assure une rhéologie conforme aux critères de l'autoplaçant, une homogénéité accrue, ainsi que des propriétés mécaniques acceptables, conduisant à un BAPL structurel satisfaisant. Ce taux d'humidification des GLAE sera donc retenu pour la suite de ce travail.

CHAPITRE IV

AMÉLIORATION DES GRANULATS LÉGERS D'ARGILE EXPANSÉE PAR ENROBAGES CIMENTAIRES : IMPACT SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

CHAPITRE IV

AMÉLIORATION DES GRANULATS LÉGERS D'ARGILE EXPANSÉE PAR ENROBAGES CIMENTAIRES : IMPACT SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

Ce quatrième chapitre est consacré à l'amélioration des propriétés des granulats légers d'argile expansée par enrobages cimentaires et à leur influence sur les bétons autoplaçants légers. Trois types de formulations d'enrobage ont été étudiés afin de réduire la porosité des granulats et d'améliorer leur comportement mécanique et hydrique. Après présentation des procédés d'enrobage et de la méthodologie expérimentale adoptée au chapitre 2, les résultats obtenus sont analysés, mettant en évidence les bénéfices apportés par ces traitements sur les propriétés des granulats et sur les performances globales des BAPL.

Sommaire

1. INTRODUCTION	90
2. EFFET DE L'ENROBAGE CIMENTAIRE SUR LES PROPRIÉTÉS DES GLAE	90
2.1. Évolution de l'épaisseur du revêtement en fonction du nombre de couches	90
2.2. Variation de la masse volumique en fonction du nombre de couches	91
2.3. Variation de l'absorption d'eau en fonction du nombre de couches	92
2.4. Variation de la résistance à la compression des GLAE en fonction du nombre de couches	94
2.5. Analyse microstructurale des surfaces de GLAE non enrobées et enrobées	96
3. EFFET DES GLAE ENROBÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAPL	100
3.1. Effet sur les performances des BAPL à l'état frais.....	100
3.2. Effet sur les performances des BAPL à l'état durci.....	107
4. CONCLUSION	117

Chapitre IV – Amélioration des granulats légers d’argile expansée par enrobages cimentaires : impact sur les bétons autoplaçants légers

1. INTRODUCTION

Les GLAE sont largement utilisés pour la production de BAPL en raison de leur faible masse volumique et de leur aptitude à répondre aux exigences de légèreté structurelle. Cependant, leur forte porosité et leur capacité d’absorption d’eau constituent des limites importantes : elles peuvent perturber l’équilibre hydrique du mélange, réduire la résistance mécanique et affecter la durabilité du béton. Afin de surmonter ces inconvénients, une approche d’amélioration a été explorée, consistant à recouvrir les granulats par des enrobages cimentaires. L’objectif est de diminuer leur perméabilité et leur porosité, tout en renforçant leur résistance mécanique, de manière à optimiser les performances globales des BAPL. Trois types d’enrobages ont ainsi été étudiés : une pâte de ciment seule (CP), un mélange ciment-laitier granulé (LG) et un mélange ciment-poudre de verre (PV).

Le chapitre est organisé en deux étapes complémentaires. Dans un premier temps, l’attention est portée sur l’effet des enrobages sur les propriétés physiques et mécaniques des granulats. Dans un second temps, l’impact de ces améliorations est analysé à l’échelle des BAPL, en considérant à la fois leur comportement à l’état frais et leurs performances mécaniques à l’état durci.

2. EFFET DE L’ENROBAGE CIMENTAIRE SUR LES PROPRIÉTÉS DES GLAE

2.1. Évolution de l’épaisseur du revêtement en fonction du nombre de couches

La Figure 4.1 présente les mesures d’épaisseur des revêtements obtenues pour les différents GLAE, réalisées par microscopie sur sections polies (cf. Chapitre II, § 4.2.1). La Figure 4.2 montre des coupes transversales des GLAE enrobés avec un mélange cimentaire, appliqué en quatre couches.

Il apparaît clairement qu’une augmentation du nombre de couches d’enrobage entraîne une augmentation progressive de l’épaisseur de la couche cimentaire entourant les granulats, et ce, indépendamment du type de mélange utilisé. La variabilité des mesures, représentée par les barres d’erreur (Figure 4.1), a révélé des fluctuations importantes des épaisseurs mesurées, notamment pour la troisième et la quatrième couche. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette irrégularité. D’une part, bien que les mélanges d’enrobage aient été formulés pour présenter la même ouvrabilité (même mini-étalement au cône), des différences de viscosité subsistent selon le type de liant employé. Il a été rapporté (Ting et al., 2019a ; Han et al., 2022 ; Chen et al., 2023) que la PV et le LG augmentent la viscosité des pâtes cimentaires par rapport au ciment pur, ce qui peut favoriser un dépôt d’épaisseur plus important autour des granulats. D’autre part, l’application manuelle et successive des couches d’enrobage peut

engendrer localement des irrégularités liées à la nature de la surface sous-jacente (rugosité, absorption partielle, début de prise), en particulier à partir de la troisième couche. Néanmoins, les valeurs mesurées restent dans des marges acceptables compte tenu du caractère expérimental du procédé. Elles ne traduisent pas un manque de contrôle, mais plutôt une variabilité inhérente à ce type d'application en laboratoire.

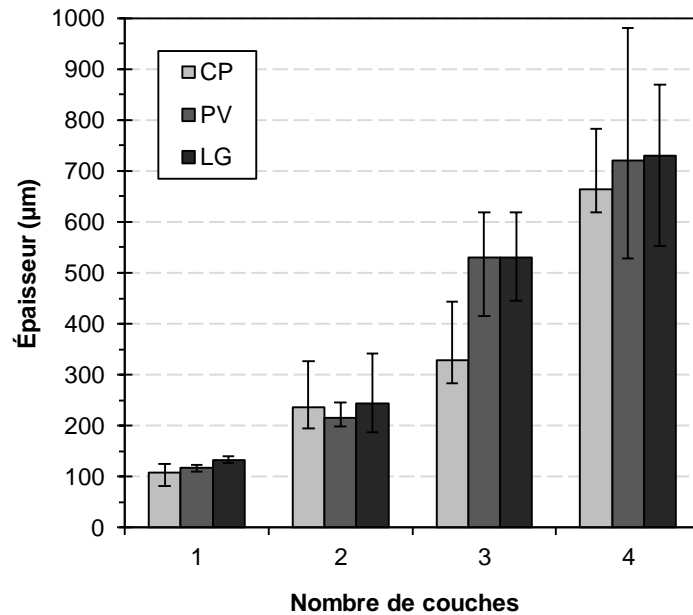


Figure 4.1. Évolution de l'épaisseur du revêtement des GLAE en fonction du nombre de couches.

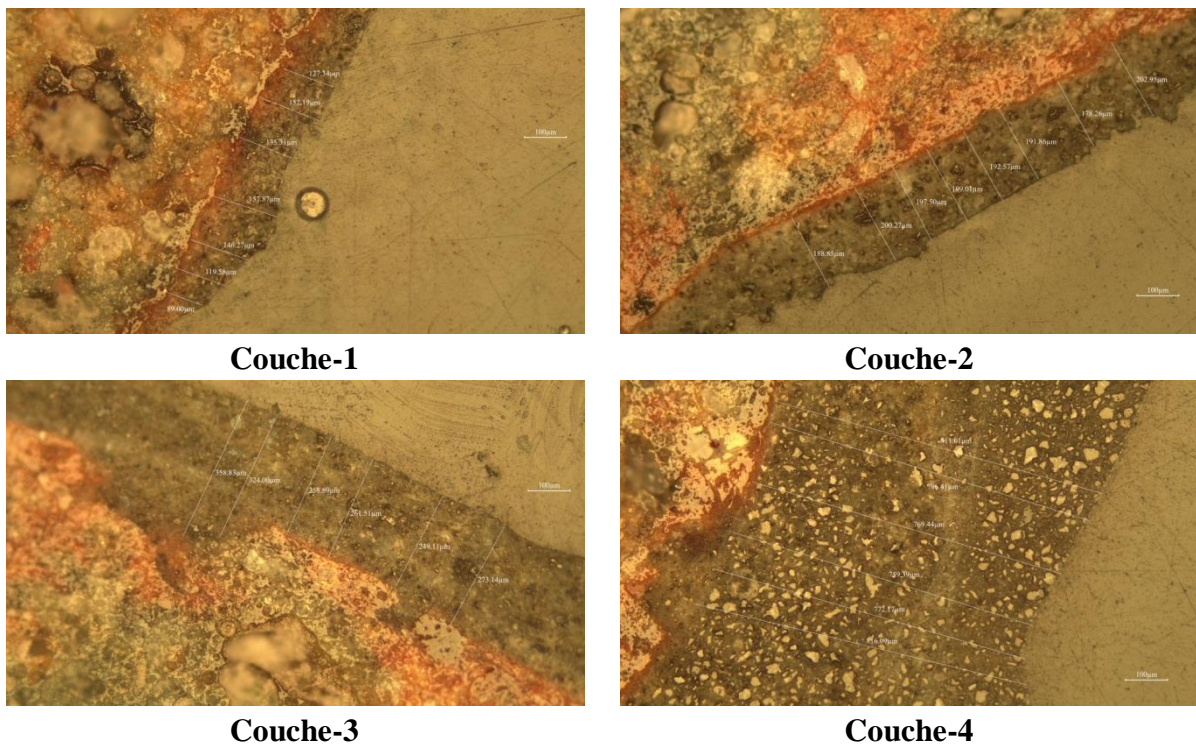


Figure 4.2. Coupes microscopiques de GLAE avec différentes épaisseurs d'enrobage cimentaire.

Cette hétérogénéité est également visible sur les images présentées à la Figure 4.2. Par ailleurs, une légère différence des épaisseurs moyennes entre les trois mélanges a été observée à la Figure 4.1, notamment pour la troisième couche, avec un écart plus marqué entre le mélange CP et ceux contenant des additions minérales. L'augmentation d'épaisseur entre la troisième et la quatrième couche est plus prononcée pour le CP. La variation relative a été estimée à 102 %, 36 % et 37,6 % pour les mélanges CP, PV et LG, respectivement. Ces résultats suggèrent non seulement une meilleure stabilité des mélanges contenant des additions, mais aussi une bonne adhérence de la quatrième couche, ce qui témoigne d'une efficacité satisfaisante de l'ensemble des formulations testées.

2.2. Variation de la masse volumique des particules en fonction du nombre de couches

La Figure 4.3 illustre l'évolution de la masse volumique apparente des GLAE, nus et enrobés, obtenue par la méthode du pycnomètre (NF EN 1097-6, 2022), en fonction du nombre de couches d'enrobage.

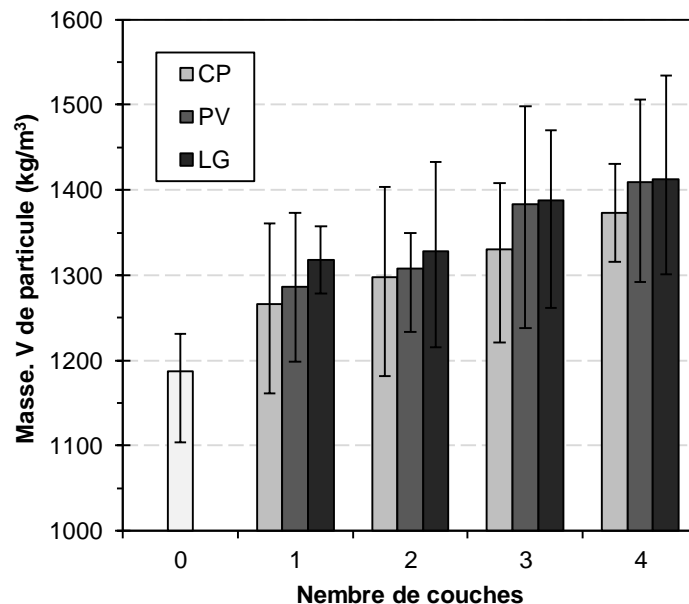


Figure 4.3. Variation de la masse volumique des GLAE en fonction du nombre de couches d'enrobage.

Les résultats de masse volumique confirment ceux des mesures d'épaisseur et montrent une similarité évidente : une augmentation de la masse volumique des granulats avec l'accroissement de l'épaisseur du revêtement, ce qui s'explique par l'accumulation de matériau adhérent à la surface des granulats. Plusieurs auteurs (Yew et al., 2021 ; Müller et Linsel, 2000) ont rapporté que l'augmentation de la masse volumique des granulats légers après enrobage par une pâte cimentaire est liée à la différence de masse volumique entre les granulats et le mélange de revêtement. À titre indicatif, l'augmentation de masse volumique des GLAE après application de la quatrième couche d'enrobage est estimée à 15,6 %, 18,7 % et 19 % pour les mélanges CP, PV et LG, respectivement, par rapport aux GLAE non enrobés. Néanmoins, cette hausse de masse volumique ne remet pas en cause le caractère léger des

GLAE enrobés, qui restent en deçà de la limite de 2000 kg/m^3 prescrite par la norme NF EN 13055 (NF EN 13055, 2016). Pour une épaisseur d'enrobage comparable des granulats légers, les valeurs de masse volumique obtenues dans cette étude sont inférieures à celles rapportées par Dixit et Pang (Dixit et Pang, 2022), qui ont trouvé des masses volumiques apparentes de 1690 et 1590 kg/m^3 pour des mélanges d'enrobage à base de fumée de silice (FS) et de cendre volante (CV), respectivement. De même, Domagała et Bryła (Domagała et Bryła, 2021) ont observé que des GLAE de fraction $8/16 \text{ mm}$ enrobés avec une pâte de ciment présentaient des masses volumiques particulières comprises entre 780 et 1060 kg/m^3 pour des épaisseurs de revêtement allant de $300 \text{ }\mu\text{m}$ à $1000 \text{ }\mu\text{m}$. L'enrobage des GLAE avec les trois mélanges cimentaires conduit à des masses volumiques comparables, notamment pour la troisième et la quatrième couche, ce qui met en évidence l'efficacité de la démarche d'enrobage adoptée dans cette étude.

2.3. Variation de l'absorption d'eau en fonction du nombre de couches

L'effet de l'enrobage des GLAE sur l'absorption d'eau à 24 heures en fonction du nombre de couches est présenté à la Figure 4.4. En parallèle, les cinétiques d'absorption d'eau des GLAE bruts et enrobés sont illustrées à la Figure 4.5.

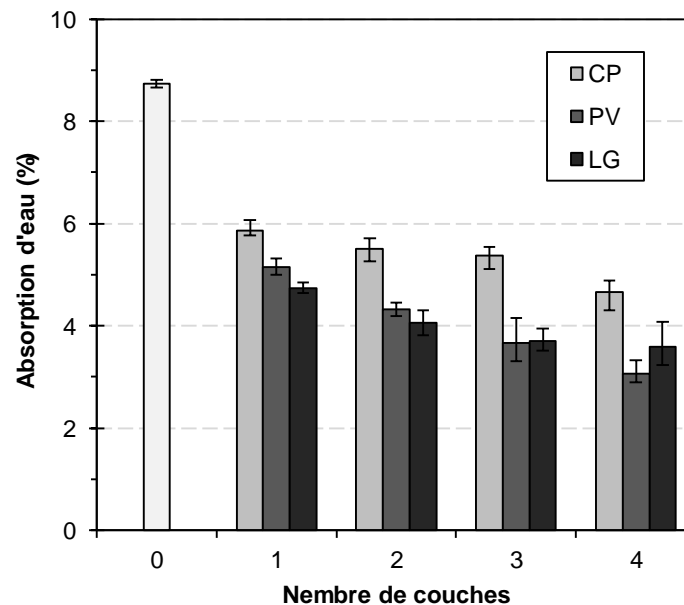


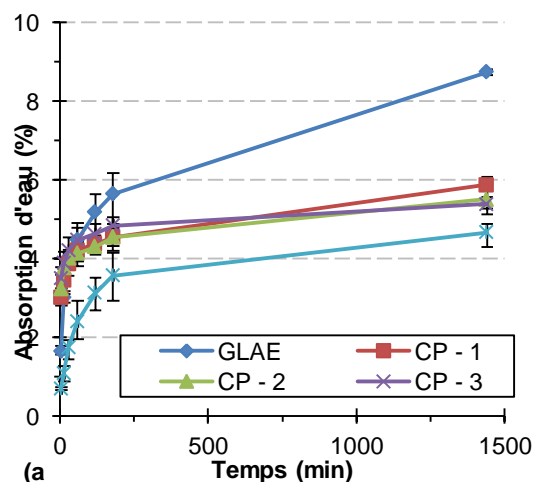
Figure 4.4. Variation de l'absorption d'eau à 24 heures des GLAE en fonction du nombre de couches d'enrobage.

Comme le montrent la figure, l'augmentation du nombre de couches, c'est-à-dire de l'épaisseur de l'enrobage des granulats, réduit de manière significative le coefficient d'absorption d'eau. Le revêtement de la surface des GLAE par un mélange cimentaire a un impact notable sur leur capacité d'absorption d'eau. Le remplissage des pores de surface par la pâte de ciment et la formation d'une couche externe épaisse entourant les granulats ont conduit à une réduction substantielle de l'absorption d'eau. Cette réduction a été estimée à 46,7 %, 64,9 % et 59 % pour les mélanges d'enrobage à base de CP, PV et LG, respectivement, après application de quatre couches. Il convient de noter que l'efficacité

d'une seule couche d'enrobage reste limitée, plusieurs zones de la surface des granulats demeurant exposées et empêchant une couverture complète. Ces zones non recouvertes favorisent l'absorption d'eau. L'augmentation progressive du nombre de couches permet de couvrir ces zones exposées, une couverture optimale étant atteinte à la quatrième couche, ce qui réduit considérablement la capacité d'absorption des GLAE.

Il est intéressant de souligner que les mélanges PV et LG se sont révélés plus efficaces que le mélange CP pour réduire l'absorption d'eau des GLAE enrobés. Il est important de rappeler que les trois mélanges ont été formulés avec le même rapport e/c. Cette différence s'explique principalement par la densification de la microstructure de la couche d'enrobage, favorisée par la formation supplémentaire de C-S-H, qui réduit significativement la porosité du revêtement. Plusieurs auteurs (Nahi et al., 2020 ; Zhang et al., 2023) ont rapporté que l'utilisation de PV et de LG dans les mélanges cimentaires améliore les propriétés mécaniques des matériaux. Cette amélioration est attribuée à la formation de nouveaux C-S-H issus de la réaction pouzzolanique et de l'activité hydraulique latente entre la silice présente dans ces additions cimentaires et la portlandite. Cette réaction entraîne un affinement des pores, une réduction de leur connectivité et, par conséquent, une diminution de la porosité. De nombreuses études ont également mis en évidence l'efficacité de cette technique pour réduire l'absorption d'eau des granulats légers traités par enrobages cimentaires. Divers auteurs (Wu et al., 2019 ; Nozahic et Amziane, 2012 ; Müller et Linsel, 2000) ont rapporté une réduction significative de l'absorption d'eau à 24 heures après application d'une seule couche (Domagała et Bryła, 2021) ou de plusieurs couches (Dixit et Dai Pang, 2022).

La forme des courbes de cinétique d'absorption d'eau des GLAE (Figure 4.5) révèle des différences significatives selon le type et le nombre de couches d'enrobage. À l'état brut, les GLAE présentent une pente initiale abrupte et une absorption continue de l'eau, atteignant un maximum d'environ 9 %, ce qui reflète leur forte porosité. Les courbes des échantillons enrobés montrent une pente initiale plus faible pour les enrobages PV et LG (première et deuxième couches) par rapport aux GLAE bruts, indiquant une réduction notable de l'absorption rapide durant les premières minutes. Cette réduction devient encore plus marquée avec l'augmentation du nombre de couches, en particulier à partir de la troisième et de la quatrième couche, où la stabilisation est atteinte plus rapidement. Ces couches se caractérisent par des pentes intermédiaires plus plates et réduisent considérablement l'absorption totale. En



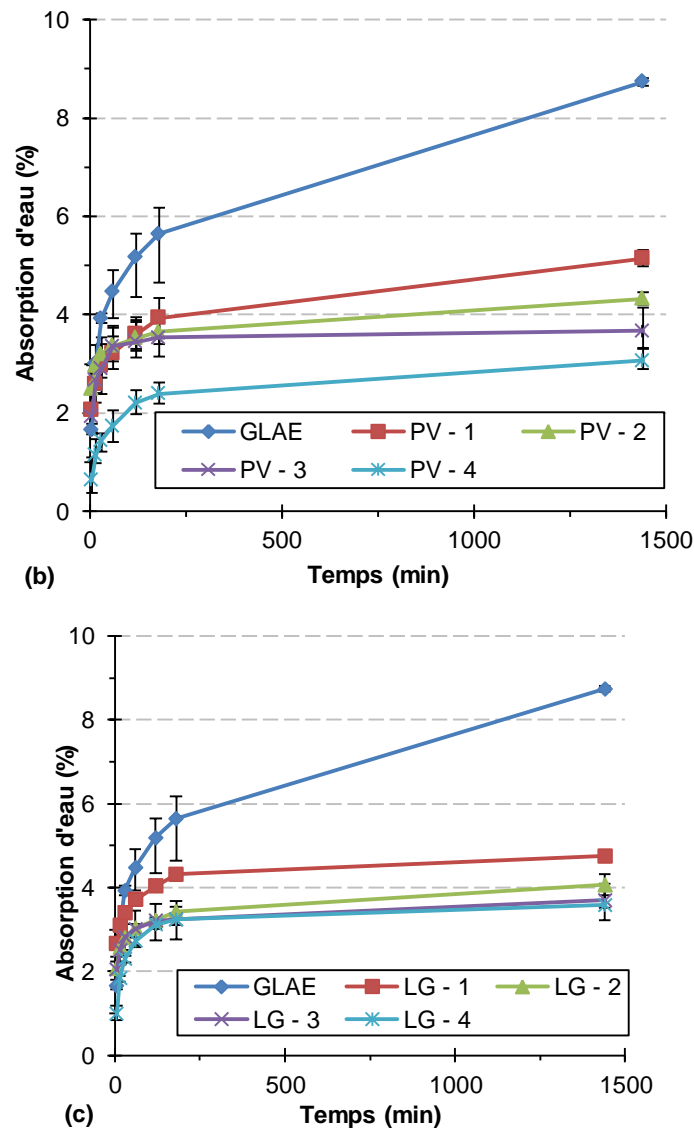


Figure 4.5. Effet de l'épaisseur d'enrobage sur la cinétique d'absorption d'eau : (a) CP, (b) PV et (c) LG.

comparant les performances des enrobages CP, PV et LG, le mélange PC donne des résultats similaires à ceux de PV et LG en termes de réduction globale de l'absorption d'eau à 24 heures. Toutefois, sa pente initiale est légèrement plus abrupte. Cela peut être attribué à une adhésion initiale et à une densification microstructurale légèrement moins efficaces dans le cas du CP par rapport aux mélanges d'enrobage. Néanmoins, à partir de la troisième couche, les trois types d'enrobage présentent des performances globalement comparables, réduisant l'absorption d'eau de plus de 47 %.

2.4. Variation de la résistance à la compression des GLAE en fonction du nombre de couches

Les résultats des essais d'écrasement en fonction du nombre de couches d'enrobage sont présentés à la Figure 4.6. La résistance à la compression des particules individuelles de GLAE, qu'il s'agisse de granulats bruts ou enrobés, a été déterminée à l'aide de l'essai

d'écrasement par plaque (Kockal et Ozturan, 2011), selon l'équation (2.10) (cf. Chapitre II, § 4.2.3).

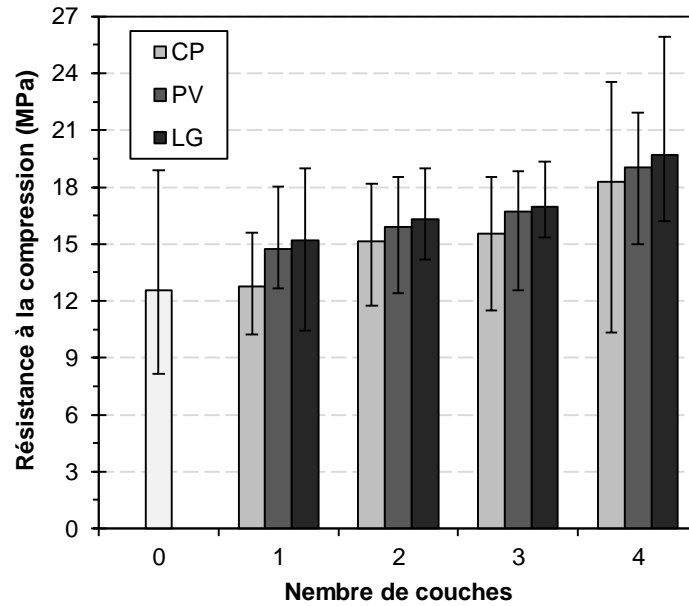


Figure 4.6. Variation de la résistance à la compression des GLAE en fonction du nombre de couches d'enrobage.

La dispersion importante des résultats de contraintes observée sur l'ensemble des granulats est, dans le cas des GLAE bruts, attribuée aux variations intrinsèques de leur microstructure issues du procédé de fabrication (Dixit et Dai Pang, 2022). En revanche, pour les GLAE enrobés, cette dispersion est principalement due à l'hétérogénéité de l'enrobage, qui engendre une répartition non uniforme des contraintes et conduit ainsi à des variations dans les résultats de compression. L'augmentation du nombre de couches s'accompagne d'une amélioration de la résistance mécanique des GLAE, indépendamment du type d'enrobage utilisé. Une tendance similaire à celle de l'évolution des épaisseurs d'enrobage a été observée, confirmant que l'amélioration de la résistance mécanique des GLAE est étroitement liée à l'augmentation de l'épaisseur de la couche de pâte cimentaire, qui forme une coque solide autour du granulat.

L'amélioration de la résistance mécanique des GLAE enrobés de quatre couches par rapport aux GLAE bruts a été estimée à 45,6 %, 51,7 % et 57,3 % pour les mélanges CP, PV et LG, respectivement. Une fois encore, les enrobages à base d'ajouts cimentaires se distinguent par rapport à ceux à base de CP, comme en témoigne l'absence d'amélioration significative des GLAE enrobés avec du CP dès la première couche. Les résistances les plus élevées ont été obtenues avec le mélange LG, suivi de près par le mélange PV. Cette différence de résistance s'explique par la formation de couches plus épaisses avec le mélange LG (voir Figure 4.1). Le renforcement de la coque externe des GLAE enrobés par une couche de pâte cimentaire épaisse et densifiée, favorisée par la formation de nouveaux C-S-H, a permis de réduire la porosité externe. De plus, l'obstruction de la porosité superficielle des GLAE par la pâte cimentaire suite à l'application de l'enrobage crée de multiples points d'ancrage à la surface, renforçant davantage l'adhésion de l'enrobage à la surface brute des GLAE (Figure 4.7).

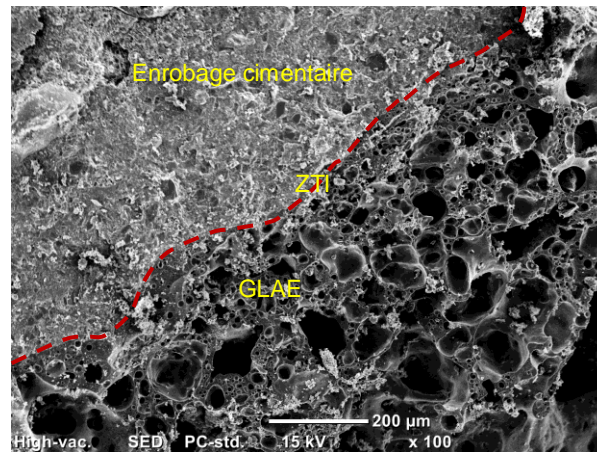


Figure 4.7. Image MEB de la zone d'adhésion entre la couche d'enrobage contenant du LG et le GLAE.

Deux modes de rupture distincts ont été observés après les essais de compression sur les granulats individuels : l'écrasement pour les GLAE bruts et ceux enrobés avec une ou deux couches, et un fendage pour les GLAE enrobés avec trois ou quatre couches. La différence de modes de rupture entre les GLAE bruts et enrobés s'explique par l'effet du revêtement cimentaire sur la redistribution des contraintes et le renforcement de la surface. Les GLAE bruts, poreux et fragiles, subissent un écrasement sous l'effort appliqué en raison de la concentration des contraintes aux points de contact et de leur faible résistance interne. Pour les GLAE enrobés, le mode de rupture dépend de l'épaisseur de l'enrobage : avec une ou deux couches, la rupture reste similaire à celle des granulats non enrobés, c'est-à-dire par écrasement, car l'enrobage est insuffisant pour modifier de manière significative le transfert des contraintes. À partir de trois à quatre couches, l'enrobage agit comme une couche de renforcement et de confinement, redistribuant les contraintes et conduisant à une rupture par fendage, caractérisée par une traction latérale et une propagation progressive des fissures. Ce comportement reflète l'amélioration mécanique apportée par l'enrobage. Ce changement de mode de rupture indique l'efficacité mécanique de l'enrobage des GLAE pour une épaisseur spécifique dépassant 300 µm.

Une comparaison avec les études disponibles dans la littérature sur l'effet de l'enrobage des GLAE avec des mélanges cimentaires a révélé une amélioration de leurs performances mécaniques. Dixit et Pang (Dixit et Pang, 2022) ont observé une augmentation de la résistance des GLAE enrobés de quatre couches de pâte de ciment contenant de la fumée de silice et des cendres volantes, atteignant respectivement 80,1 % et 66,6 %. En revanche, Domagała et Bryła (Domagała et Bryła, 2021) ont rapporté une augmentation négligeable de la résistance des GLAE après imprégnation avec une pâte de ciment.

2.5. Analyse microstructurale des surfaces de GLAE non enrobées et enrobées

Un MEB équipé d'un détecteur EDS a été utilisé pour observer l'état de surface des GLAE bruts ainsi que la ZTI entre ceux-ci et la première couche d'enrobage. La formation potentielle d'autres ZTI entre les différentes couches de l'enrobage cimentaire des GLAE recouverts de quatre couches a également été examinée. Les figures 4.8a à 4.8d représentent

respectivement les GLAE bruts, les GLAE enrobés avec du CP, les GLAE enrobés avec la PV et les GLAE enrobés avec du LG.

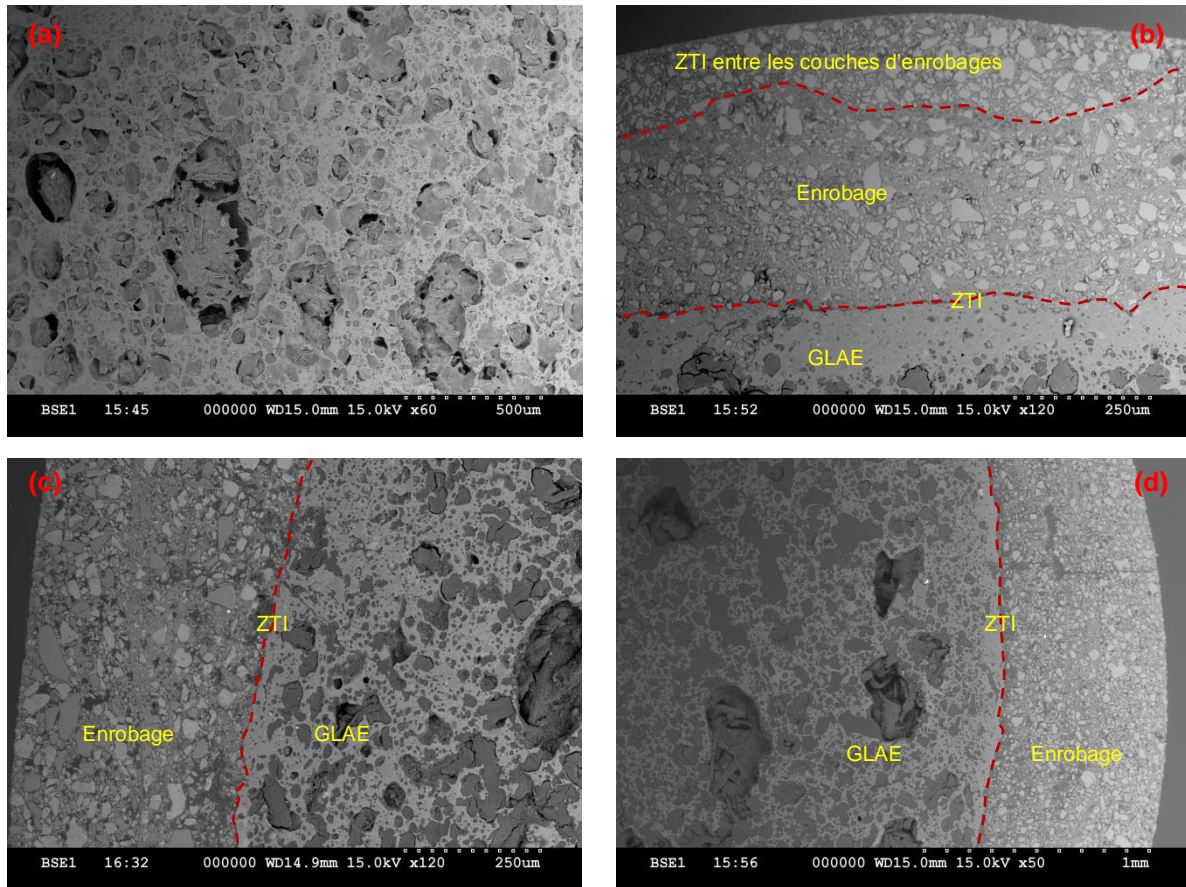


Figure 4.8. Images MEB des surfaces des GLAE : (a) brut, (b) enrobé avec du CP, (c) enrobé avec de la PV et (d) enrobé avec du LG.

Comme le montre la Figure 4.8a, une structure très poreuse est visible, caractérisée par des cavités de forme irrégulière, majoritairement arrondies, réparties sur une large plage de pores. Une proportion nettement plus élevée de pores de petite taille est observée par rapport aux pores de plus grande dimension. Ces pores résultent du dégagement gazeux au cours du processus de frittage. La surface présente une texture hétérogène, avec des zones plus claires suggérant une vitrification partielle et des zones plus sombres correspondant à des cavités profondes ou à des matériaux moins denses. Dans la Figure 4.8b, la zone de transition ZTI entre le GLAE brut et la première couche d'enrobage est identifiable. Une démarcation nette entre les couches d'enrobage est observée, révélant une hétérogénéité susceptible d'affaiblir l'adhésion entre ces couches. Par ailleurs, des pores sont visibles à l'intérieur de l'enrobage, traduisant une porosité résiduelle pouvant influencer les propriétés mécaniques du composite ainsi que son absorption d'eau. Ces observations sont cohérentes avec les essais antérieurs réalisés sur des GLAE enrobés par une pâte de ciment. Enfin, les Figure 4.8c et 4.8d montrent que la structure interne des enrobages à base de PV et de LG est plus compacte que celle du mélange CP. Aucune ZTI n'est visible entre les différentes couches d'enrobage et la ZTI entre le granulat et l'enrobage apparaît plus étroite et moins marquée, ce qui témoigne d'une bonne adhésion. Il convient de noter la présence d'une fissure longitudinale dans l'enrobage du LG, probablement due au retrait lié à l'hydratation du ciment (Wu et al., 2022).

L'analyse MEB-EDS réalisée sur la surface du GLAE brut (Figure 4.9) a révélé une composition chimique dominée par l'oxygène (60,6 %), suivi par la silice (25,6 %), l'alumine (8,8 %), ainsi que des traces de potassium, de calcium et de fer. Cette composition est caractéristique des matériaux aluminosilicatés, où la silice et l'alumine constituent les principaux composants, suggérant une structure complexe, amorphe et partiellement cristalline. Le potassium est probablement associé aux micas ou aux feldspaths potassiques. Parallèlement, le calcium peut provenir de phases carbonatées ou silicatées, tandis que le fer, souvent présent sous forme d'oxydes (hématite ou magnétite), influence la coloration du GLAE.

L'analyse des images EDS présentées à la Figure 4.9 a montré que les différents mélanges de revêtement contiennent principalement de l'alumine, du calcium et des ions silicatés, ce qui confirme l'hypothèse de la formation de phases C-S-H et/ou C-A-S-H dans tous les GLAE enrobés (Medina et al., 2012). Les données EDS ont également révélé que les rapports Ca/Si des mélanges CP, PV et LG sont respectivement de 1,3, 0,78 et 0,9. Comme dans le cas du mélange CP, un rapport Ca/Si plus élevé peut indiquer une présence plus importante d'hydroxyde de calcium (C-H), lequel contribue moins au développement des résistances et peut engendrer une porosité accrue en raison de sa nature cristalline (Hu et al., 2020 ; Alim et Mohiuddin, 2023). Mejdi et al. (Mejdi et al., 2020) ont rapporté qu'une augmentation du rapport Ca/Si influence significativement les propriétés micromécaniques du C-S-H. Selon ces auteurs, ces résultats s'expliquent par des chaînes silicatées plus rigides et un nombre réduit de défauts au sein des phases C-S-H. À l'inverse, les rapports Ca/Si plus faibles observés dans les revêtements PV et LG suggèrent la formation de phases C-S-H ou C-A-S-H plus polymérisées et plus denses, généralement associées à une meilleure performance mécanique et à une perméabilité réduite. En outre, selon Lothenbach et al. (Lothenbach et al., 2011), les alumines présentes dans la PV et le LG peuvent également participer à la formation de C-S-H en jouant le rôle de ponts au sein des chaînes silicatées, prolongeant ainsi leur longueur moyenne. Ces effets de pontage contribuent à la formation d'une microstructure plus cohésive, renforçant ainsi les propriétés mécaniques et la durabilité du GLAE enrobé. Ces résultats corroborent les observations de la présente étude, en soulignant que la composition chimique révélée par l'EDS, en particulier le rapport Ca/Si et la présence d'alumine réactive, permet d'expliquer les meilleures performances du GLAE enrobé avec des pâtes d'enrobages contenant des ajouts cimentaires, en comparaison au mélange contenant uniquement du CP.

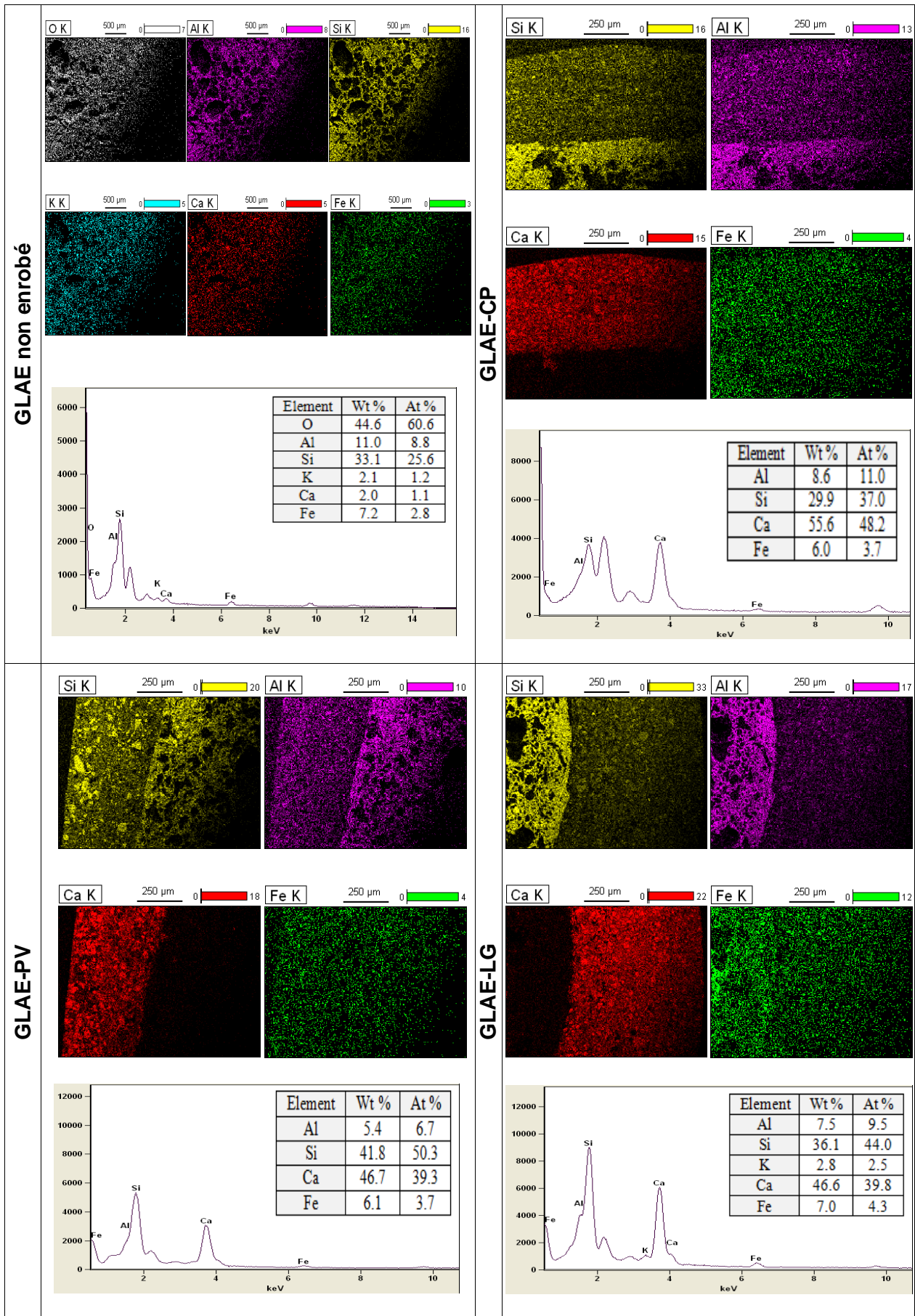


Figure 4.9. Microanalyses EDS des surfaces de GLAE bruts et enrobés.

3. EFFET DES GLAE ENROBÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAPL

En se basant sur les résultats précédents concernant l'effet de l'enrobage cimentaire sur les GLAE, notamment en termes d'absorption d'eau et de résistance à la compression des granulats individuels, il a été constaté qu'une augmentation de l'épaisseur de la couche d'enrobage améliore de manière significative les propriétés physico-mécaniques des GLAE enrobés. Par conséquent, les meilleurs résultats ont été obtenus avec un enrobage composé de quatre couches. Cette configuration a donc été retenue pour la suite de cet article, afin d'étudier son impact sur les propriétés à l'état frais et durci des BAPL, tout en validant leurs performances globales en vue d'une application pratique. Par ailleurs, outre l'effet des différents types d'enrobage, l'influence des additions minérales a également été examinée. Trois additions ont ainsi été utilisées dans la fabrication des BAPL : un filler calcaire, de la poudre de verre et du laitier granulé. Les proportions des différents constituants utilisés pour la fabrication des mélanges de béton sont données dans le Tableau 4.1 conformément à l'approche de formulation des BAPL présentée au chapitre 2 à la section 3.2.

Tableau 4.1. Composition des mélanges de BAPL étudiés.

Mélanges	CEM I	MCS*	E _{eff}	E _t	SP	Sable 0/2	Sable 0/4	GLAE 4/14	
Unité	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	
FC	GLAE	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	374,4
	GLAE-CP	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	447,2
	GLAE-PV	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	445,6
	GLAE-LG	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	445,6
PV	GLAE	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	374,4
	GLAE-CP	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	447,2
	GLAE-PV	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	445,6
	GLAE-LG	423,3	160	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	445,6
LG	GLAE	423,3	130	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	374,4
	GLAE-CP	423,3	130	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	447,2
	GLAE-PV	423,3	130	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	445,6
	GLAE-LG	423,3	130	185,6	191,6	4,46	278,7	454,7	445,6

* MCS : Matériaux cimentaires supplémentaires.

3.1. Effet sur les performances des BAPL à l'état frais

3.1.1. Effet sur l'étalement et le temps d'écoulement

La figure 4.10 illustre l'effet des GLAE, qu'ils soient non enrobés ou enrobés avec différents mélanges cimentaires, sur l'étalement au cône (Slump Flow) et le temps T₅₀₀ des BAPL. L'ensemble des mélanges présentent des valeurs d'étalement et des temps T₅₀₀ situés dans les plages recommandées par la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010), à savoir un étalement compris entre 550 mm et 850 mm et un temps T₅₀₀ supérieur à 2 secondes.

Les résultats indiquent un meilleur étalement pour les BAPL contenant des GLAE non enrobés par rapport à ceux avec des GLAE enrobés. Bien que ce résultat puisse sembler, à première vue, contre-intuitif au regard de l'effet bénéfique de l'enrobage sur la réduction de l'absorption d'eau (estimée entre 47 % et 65 % ; voir Section 2.3), plusieurs facteurs peuvent

expliquer cette observation. Il convient de rappeler que tous les GLAE ont été incorporés dans les mélanges de béton dans le même état SSS. L'un des principaux facteurs est la modification de la texture de surface des GLAE après l'application de l'enrobage. L'enrobage des GLAE avec quatre couches successives, qu'il s'agisse de pâte de ciment pure ou associée à de la PV ou du LG, transforme leur surface initialement lisse en une surface plus rugueuse. Cette rugosité accrue favorise les frottements entre granulats, réduisant ainsi leur capacité à se déplacer dans la matrice et, par conséquent, la mobilité globale du béton.

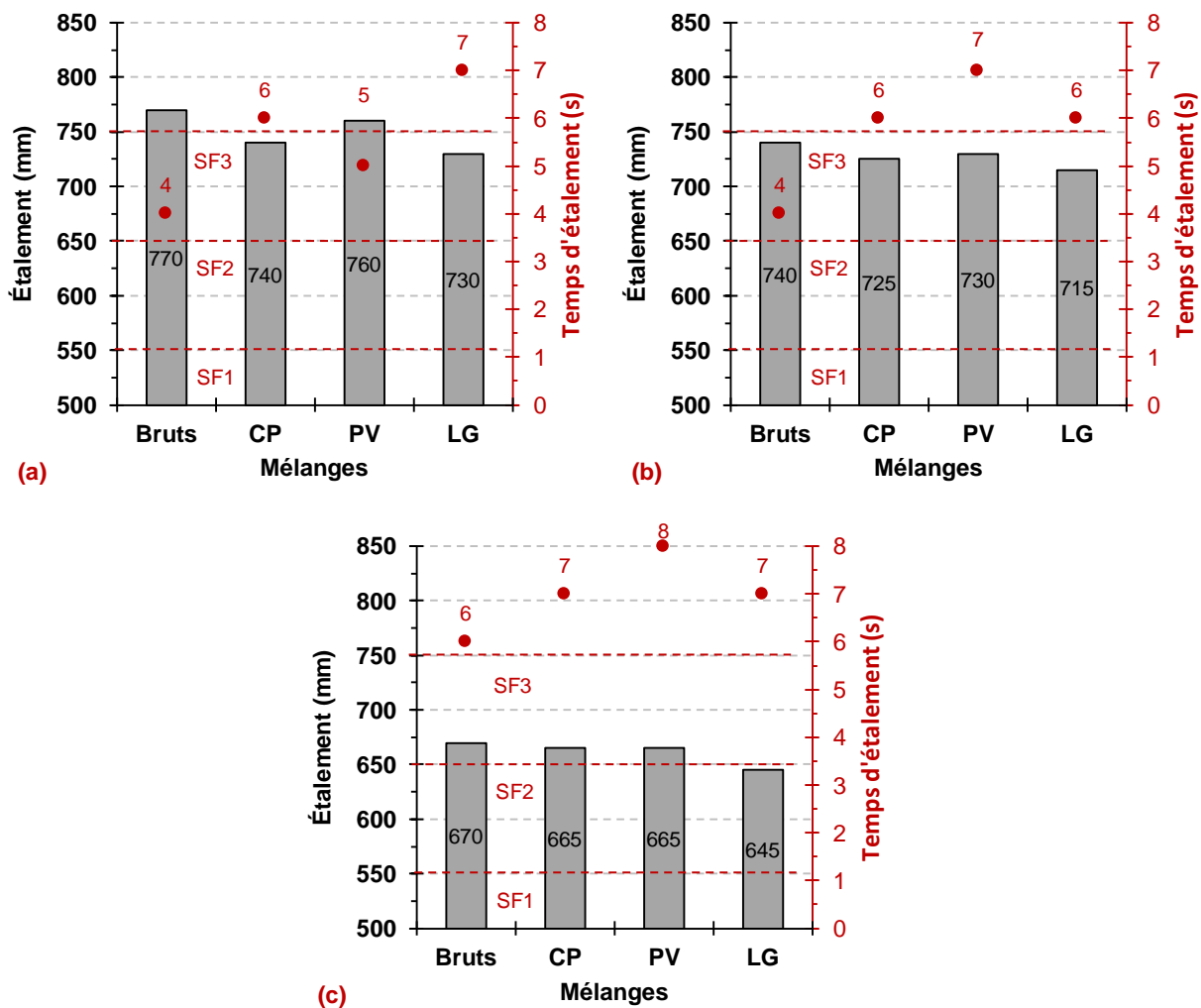


Figure 4.10. Effet des différents enrobages de GLAE sur l'étalement et le temps d'écoulement au cône des BAPL: (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

De plus, l'augmentation de la masse volumique des GLAE enrobés affecte défavorablement l'ouvrabilité des mélanges, comme cela a été démontré précédemment (voir Section 2.2). L'épaississement de la couche d'enrobage entraîne en effet une masse volumique plus élevée des granulats, les rendant plus lourds. Il devient alors plus difficile de maintenir leur flottabilité dans la matrice et l'énergie nécessaire pour les mobiliser est nettement plus importante. Enfin, la forme des granulats peut influencer significativement la fluidité du béton. Les GLAE non enrobés, caractérisés majoritairement par des formes arrondies, contribuent efficacement à améliorer l'étalement du béton. En revanche, les GLAE enrobés présentent une répartition irrégulière de l'enrobage sur leur surface, comme indiqué dans la

Section 2.1. Cette distribution inégale modifie la morphologie des granulats en les rendant plus anguleux. Ce phénomène a également été observé par Dixit et Pang (Dixit et Pang, 2022), qui ont montré que l'application de plusieurs couches d'enrobage sur les GLAE accentuait leur angularité. Une telle morphologie conduit à une répartition non uniforme des contraintes internes, réduisant ainsi la fluidité du béton. Néanmoins, les valeurs d'étalement des BAPL contenant des GLAE enrobés restent largement dans les plages acceptables et ne constituent pas un frein à l'utilisation de cette technique dans la production des BAPL.

Le FC assure les valeurs maximales d'étalement par rapport à la PV et au LG, en raison de sa faible demande en superplastifiant, qui reste moindre pour une même fluidité (Zhu, 2005). À l'inverse, certaines additions réactives comme le LG influencent l'écoulement à travers deux composantes : une composante physico-chimique et une composante granulaire liée aux frottements interparticulaires (Toutou, 2002). Par ailleurs, Shi et al. (Shi et al., 1998) ont montré que les LG adsorbent une partie du superplastifiant. Ainsi, à dosage constant en adjuvant, une diminution de la fluidité peut être observée, ce qui explique les valeurs d'étalement plus faibles obtenues avec le LG.

Le T_{500} correspond au temps nécessaire pour que le béton atteigne un étalement de 500 mm à partir du moment où le cône est levé. Ce paramètre est particulièrement utile pour évaluer la viscosité du mélange. Selon la figure 4.10, les valeurs de T_{500} , représentées par des points rouges, sont toutes supérieures ou égales à 4 secondes. Une tendance similaire à celle observée pour l'étalement a été mise en évidence : le mélange contenant des GLAE non enrobés présente des valeurs de T_{500} plus faibles, tandis que les mélanges avec des GLAE enrobés affichent des valeurs plus élevées. Comme pour l'étalement, plusieurs facteurs contribuent à cette augmentation du temps d'étalement. La surface plus rugueuse des GLAE enrobés accroît les frottements internes entre les granulats et la pâte de ciment, générant une résistance au mouvement et ralentissant l'écoulement global. De plus, la forme irrégulière ou anguleuse des granulats réduit la déformabilité de la matrice et requiert davantage d'énergie pour mobiliser le béton. À l'inverse, les GLAE non enrobés favorisent un écoulement plus fluide grâce à leur surface lisse et leur forme sphérique. Enfin, l'augmentation de la masse volumique des GLAE enrobés entraîne une masse volumique globale plus élevée du mélange, ce qui ralentit encore l'écoulement du béton. L'ensemble de ces facteurs explique les temps T_{500} plus longs observés dans les BAPL contenant des GLAE enrobés.

L'ajout du FC et de la PV aux BAPL conduit à des temps d'étalement globalement similaires, ce qui s'explique par le rôle essentiellement granulaire de ces deux additions. En effet, le FC agit comme un filler inerte, améliorant la compacité et réduisant les frottements internes grâce à un effet de lubrification. De manière comparable, la PV, dont l'activité pouzzolanique reste limitée à l'état frais, se comporte principalement comme un filler, avec une influence sur l'écoulement proche de celle du FC. En revanche, le LG présente un comportement différent : sa surface spécifique et sa réactivité hydraulique latente favorisent l'adsorption du superplastifiant, réduisant ainsi son efficacité et augmentant la friction interparticulaire. De plus, il a été rapporté que l'incorporation de LG tend à accroître la viscosité des pâtes cimentaires, ce qui contribue à rallonger le temps d'étalement (Ting et al., 2019a ; Han et al., 2022).

3.1.2. Effet sur l'écoulement à la boîte en L

Les résultats de l'essai à la boîte en L, présentés à la Figure 4.11 sont obtenus conformément à la norme NF EN 12350-10 (NF EN 12350-10, 2010). La capacité de passage et de remplissage (PL) de la boîte en L a été évaluée dans des conditions confinées et en présence d'un obstacle constitué de trois barres d'armature.

Tous les BAPL présentent des rapports de remplissage supérieurs au seuil recommandé par la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010), fixé à 0,8, avec une capacité de remplissage quasi parfaite, quel que soit le type de GLAE, bruts ou enrobés. Contrairement à l'ouvrabilité, l'enrobage des GLAE n'a pas limité la capacité de remplissage dans la boîte en L. En effet, les indices PL des mélanges contenant des GLAE enrobés étaient comparables à ceux des GLAE bruts. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de la pré-saturation des GLAE jusqu'à l'état SSS, ce qui empêche les granulats d'absorber l'eau de gâchage en raison de leur structure poreuse et interconnectée. Le mélange contenant des GLAE bruts a enregistré une valeur proche du maximum (1). Les données de la littérature, notamment les travaux de Kumar et al. (Kumar et al., 2023) et Adhikary et al. (Adhikary et al., 2022), confirment que

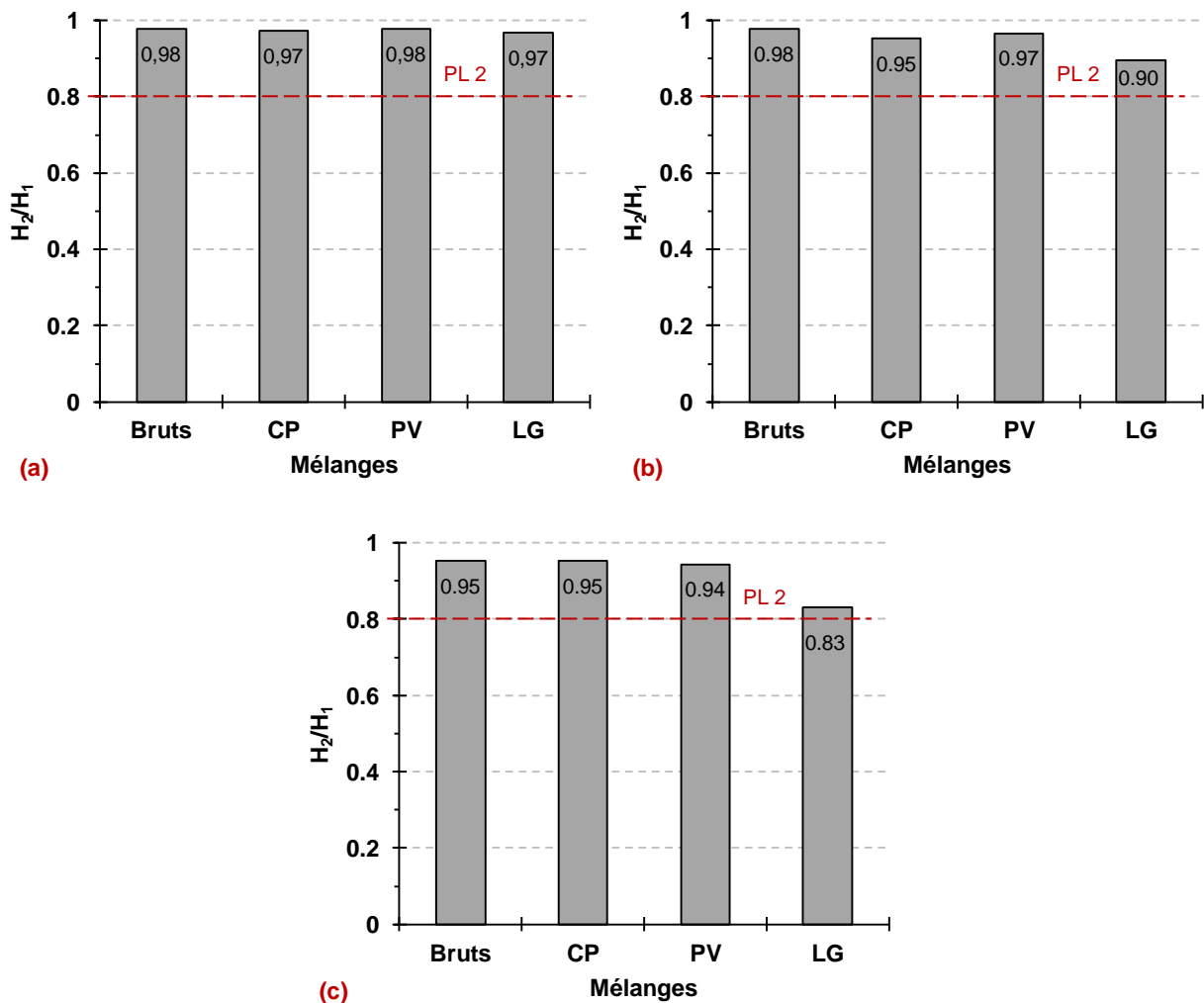


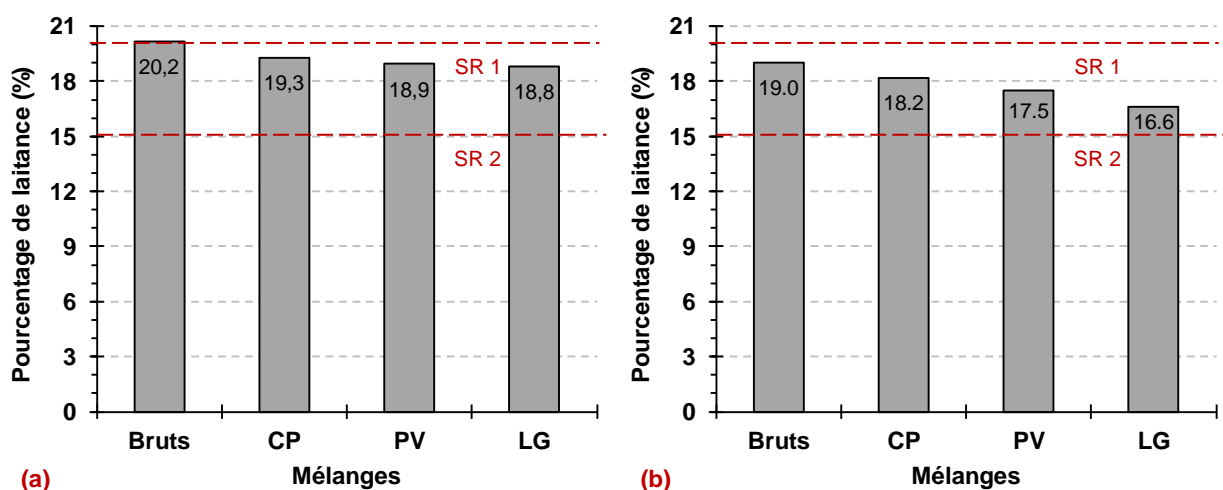
Figure 4.11. Effet des différents enrobages de GLAE sur l'écoulement à la boîte en L des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

les BAPL contenant des GLAE présentent généralement une grande capacité de remplissage dans la boîte en L. Cette performance est probablement due, en partie, à leur forme arrondie et à leur faible masse volumique, qui facilitent le déplacement à l'intérieur du béton.

L'essai à la boîte en L met davantage en évidence la capacité de passage du béton entre les armatures, laquelle dépend non seulement de sa fluidité mais aussi de sa déformabilité. Les résultats montrent que l'ajout de FC et de PV favorise de meilleures capacités de remplissage, contrairement au LG. Cette différence s'explique par le fait que le FC et la PV, jouant essentiellement un rôle de fillers, améliorent la compacité et réduisent les frottements internes, ce qui facilite l'écoulement du béton. En revanche, le LG contribue à une augmentation notable de la viscosité du mélange, ce qui pénalise sa capacité de déformation et limite le passage entre les obstacles, entraînant ainsi des valeurs de remplissage plus faibles.

3.1.3. Effet sur la résistance à la ségrégation

La Figure 4.12 présente les résultats de l'essai de stabilité au tamis réalisé conformément à la norme NF EN 12350-11 (NF EN 12350-11, 2010). L'indice de ségrégation statique (SR), caractérise la résistance du béton à la ségrégation statique lors de sa mise en place. Les valeurs de SR des BAPL varient de 15 % à 20 % (classe SR1) pour les BAPL à base de FC et PV, à l'exception du BAPL-FC élaboré avec des GLAE non enrobés, qui présente une valeur légèrement plus élevée, dépassant 20 %. Tandis que les BAPL à base de LG contenant des LECA enrobés enregistrent des valeurs SR les plus faibles inférieures à 15 % (classe SR2). Le volume de pâte des BAPL a été fixé à 415 l/m³, supérieur au volume typique de 350 l/m³ utilisé pour les BAP à base de granulats naturels (Domone, 2006). Ce volume de pâte accru a été adopté afin d'assurer une viscosité suffisante pour maintenir les granulats légers en suspension et éviter leur remontée vers la surface. En conséquence, des valeurs élevées de l'indice SR ont été observées, ce qui ne reflète pas nécessairement la véritable résistance à la ségrégation des BAPL. Cela explique en partie la classification de certains résultats dans la classe SR1.



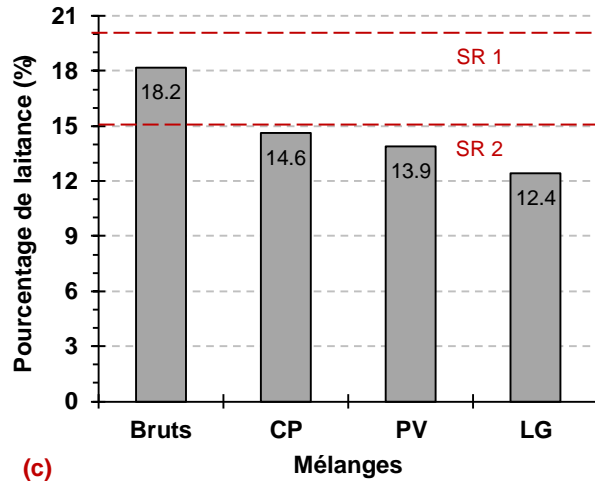


Figure 4.12. Effet des différents enrobages de GLAE sur la stabilité au tamis des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

Une amélioration de la résistance à la ségrégation est observée dans les mélanges contenant des GLAE enrobés par rapport à ceux élaborés avec des GLAE bruts. Cette amélioration est estimée à 4,4 %, 6,1 % et 6,9 % pour les mélanges CP, PV et LG respectivement, dans le cas des BAPL à base de FC ; à 4,2 %, 7,9 % et 12,6 % pour les mélanges CP, PV et LG respectivement, dans le cas des BAPL à base de PV ; et enfin à 19,8 %, 23,6 % et 31,9 % pour les mélanges CP, PV et LG respectivement, dans le cas des BAPL à base de LG. Ces résultats confirment une nette amélioration de la résistance du béton à la ségrégation. Cette performance peut être attribuée à une meilleure cohésion entre la pâte cimentaire et les GLAE enrobés, rendue possible par la rugosité accrue de leur surface, qui favorise un emboîtement mécanique plus efficace avec la pâte et réduit ainsi de manière significative la ségrégation.

Par rapport à la résistance à la ségrégation déterminée par la stabilité au tamis, les additions minérales influencent fortement la stabilité des BAPL. Les résultats montrent que la meilleure résistance est obtenue avec le LG, suivi de la PV et enfin du FC. Cette hiérarchie s'explique par l'effet des additions sur la cohésion du mortier, paramètre essentiel pour maintenir les granulats en suspension et limiter leur migration dans le mélange. Or, la cohésion est directement liée à la viscosité du mortier : plus celle-ci est élevée, plus la pâte est capable de s'opposer au phénomène de ségrégation. Dans ce contexte, le LG accroît significativement la viscosité, ce qui améliore la cohésion et confère une meilleure stabilité. La PV renforce également la cohésion, mais de façon moins marquée, tandis que le FC agit principalement comme un filler inerte, favorisant davantage la fluidité que la stabilité, ce qui explique les valeurs plus faibles de résistance à la ségrégation observées avec cette addition.

Bien que les BAPL présentent des indices SR proches de la limite supérieure, les mélanges restent stables et ne montrent aucun signe visible de ségrégation lors de l'essai d'étalement ni de tassement au fond du seau pendant les opérations de manutention. Afin de surmonter les difficultés liées à la forte teneur en fines, qui peut fausser les résultats de l'essai au tamis, plusieurs auteurs proposent une alternative pour les BAPL : l'essai en colonne (Nikzad et al., 2024). La figure 4.13 présente les résultats de l'ISS obtenus par application de l'équation (2.13).

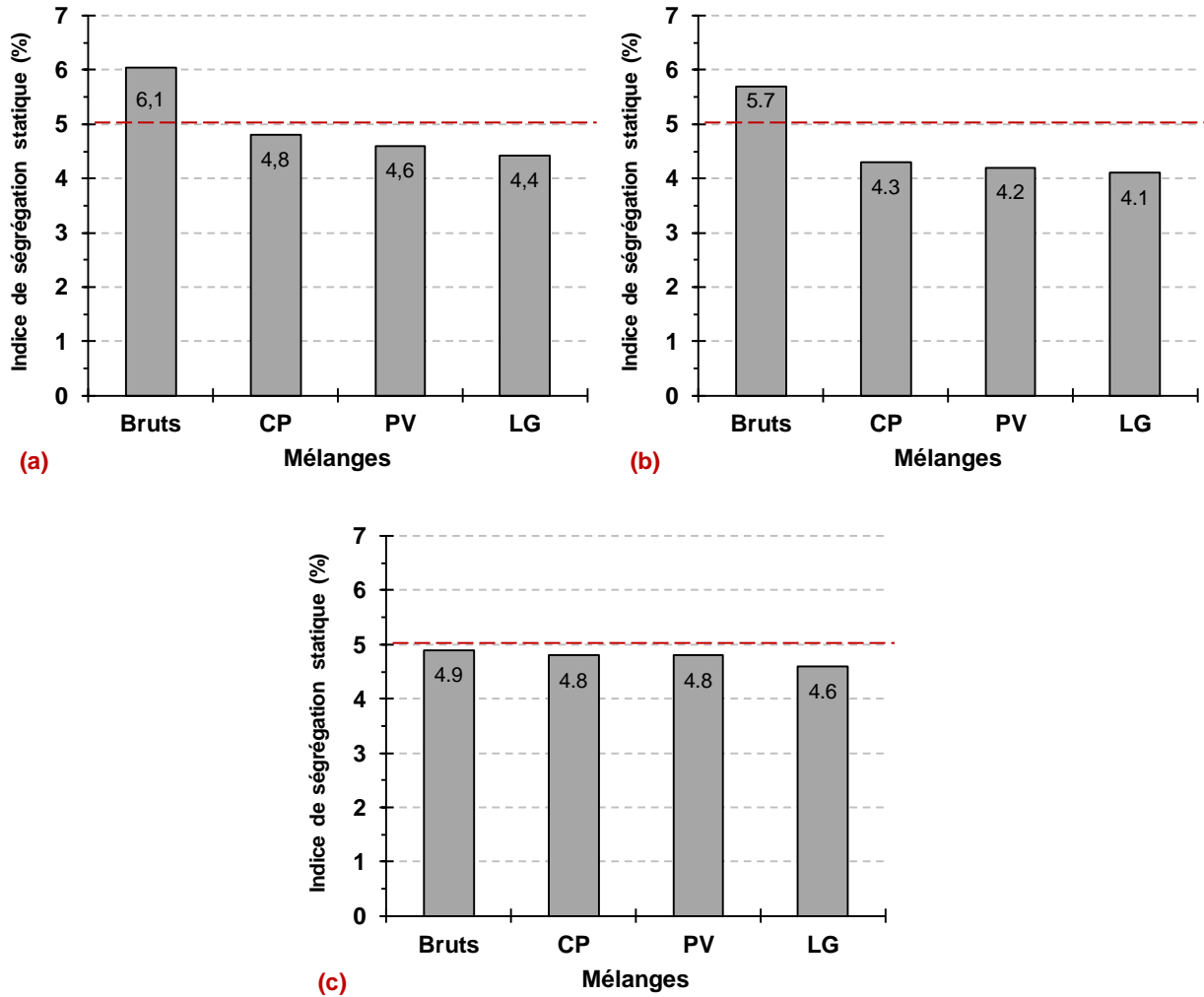


Figure 4.13. Effet des différents enrobages de GLAE sur la stabilité à la colonne des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

Les résultats de l'essai en colonne montrent que tous les BAPL élaborés avec des GLAE enrobés se situent en dessous de la limite critique recommandée par Wu et al. (Wu et al., 2009). Ils révèlent une tendance similaire à celle observée lors de l'essai de stabilité au tamis, avec une diminution de l'ISS estimée à 20,7 %, 24 % et 26,8 % pour les BAPL à base de FC utilisant les enrobages CP, PV et LG respectivement ; à 24,6 %, 26,3 % et 28,1 % pour les BAPL à base de PV ; et enfin à 2 %, 2 % et 6,1 % pour les BAPL à base de LG. Ces résultats confirment l'effet bénéfique de l'enrobage, qui modifie l'état de surface des GLAE en leur conférant une texture plus rugueuse, favorisant ainsi une meilleure cohésion avec la pâte. En revanche, les BAPL à base de FC et de PV élaborés avec des GLAE bruts présentent des valeurs d'ISS supérieures à 5 %, indiquant un risque de ségrégation. Ces mélanges avaient déjà enregistré les valeurs les plus élevées de l'indice SR lors de l'essai de stabilité au tamis. Ce comportement s'explique principalement par l'état de surface lisse et vitreux des GLAE bruts, qui réduit l'adhérence avec la pâte et affaiblit la résistance à la ségrégation.

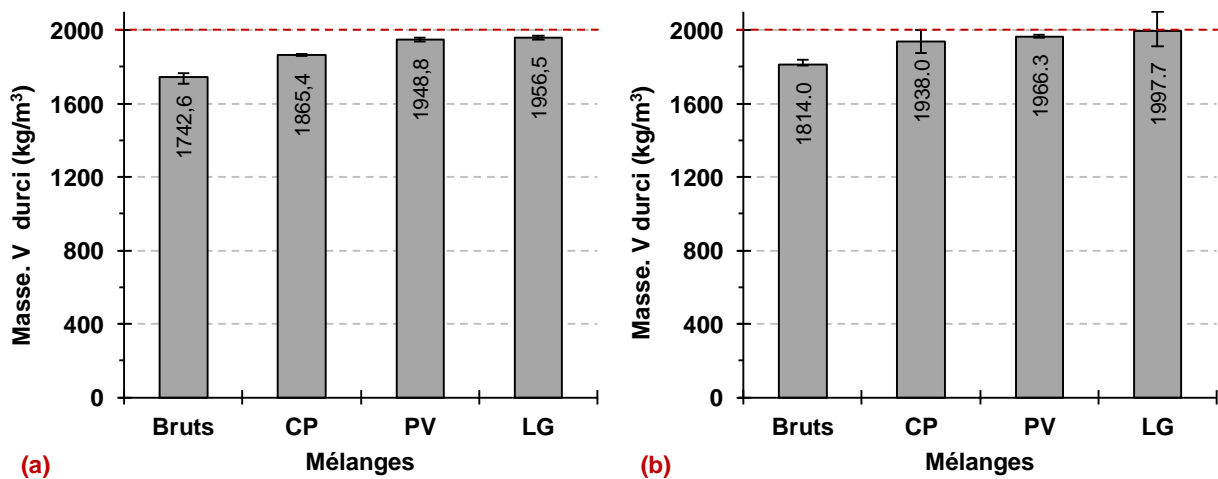
L'essai de colonne réalisé sur les BAPL formulés avec FC, PV et LG a confirmé les tendances observées lors du test de stabilité au tamis. En effet, les valeurs d'ISS mesurées pour les BAPL à base de GLAE enrobés se sont révélées nettement plus faibles que celles obtenues

avec des GLAE bruts, toutes inférieures à 5 %, traduisant une nette amélioration de la résistance à la ségrégation. Les résultats indiquent que le LG présente les ISS les plus bas, suivi du PV, puis du FC. Cet ordre de performance correspond pleinement aux observations issues de l'essai de stabilité au tamis, confirmant que la cohésion et la stabilité du mélange dépendent étroitement de la nature de l'addition minérale incorporée. Cela s'explique principalement par une augmentation de la viscosité et de la cohésion du mortier à l'état frais. En effet, le LG présente une interaction plus forte avec le superplastifiant, ce qui réduit la dispersion des particules de ciment et élève à la fois la contrainte seuil et la viscosité plastique du mélange ; la pâte se déforme moins facilement mais retient mieux les granulats, limitant leur migration et donc la ségrégation (temps d'écoulement plus long, mais ISS plus bas).

3.2. Effet sur les performances des BAPL à l'état durci

3.2.1. Effet sur la masse volumique durci

La Figure 4.14 illustre l'évolution de la masse volumique à l'état durci des BAPL bruts et enrobés après 90 jours de cure à l'eau, suivie d'un séchage à masse constante à 105 °C. Une première observation positive concernant les BAPL élaborés avec des GLAE enrobés est que, globalement, aucun de ces mélanges n'a dépassé la limite de 2000 kg/m³ définissant le béton léger (NF EN 13055, 2016). L'augmentation des masses volumiques par rapport au BAPL-FC contenant des GLAE enrobés est de 7 %, 11,8 % et 12,3 % pour les mélanges CP, PV et LG, respectivement. Celles des BAPL-PV atteignent 6,8 %, 8,4 % et 10,1 % pour les mêmes mélanges, tandis que celles des BAPL-LG sont de 7,3 %, 11,8 % et 13,3 %. Cette augmentation résulte directement de l'accroissement de la masse volumique des GLAE après le processus d'enrobage, tel qu'observé dans la section 2.1.



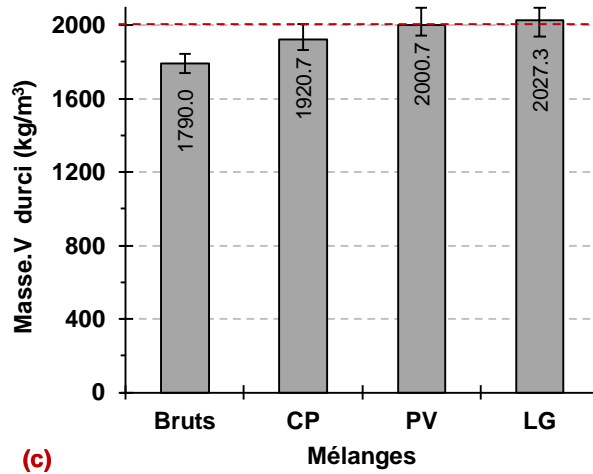


Figure 4.14. Effet des différents enrobages de GLAE sur la masse volumique durci des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

La différence de masse volumique entre les BAPL à base de GLAE enrobés est principalement liée à la viscosité des pâtes d'enrobage. Plus le matériau d'enrobage est visqueux, plus la couche formée autour du granulat est épaisse et, par conséquent, une plus grande quantité de matière reste fixée à sa surface, ce qui se traduit directement par une masse volumique plus élevée. C'est pourquoi les GLAE enrobés avec des pâtes contenant des additions minérales présentent des masses volumiques supérieures à ceux enrobés avec une pâte de ciment seule. L'augmentation de masse volumique observée dans le mélange CP sont nettement inférieure à celle rapportée dans les travaux de Domagała et Bryła (Domagała et Bryła, 2021), où la valeur mentionnée atteint 19 %. De même, en comparant les masses volumiques des BAPL enrobés avec des mélanges binaires aux résultats obtenus par Dixit et Pang (Dixit et Pang, 2022) sur des bétons légers fabriqués avec des GLAE enrobés par des mélanges contenant de la fumée de silice et de la cendre volante, les augmentations sont respectivement de 26 % et 18 %.

Ces résultats sont encourageants, car l'un des inconvénients majeurs potentiels de cette approche pourrait être une augmentation importante des masses volumiques, susceptible de disqualifier le béton de la catégorie des bétons légers.

3.2.2. Effet sur la résistance à la compression

La Figure 4.15 présente les résultats de la résistance à la compression des différents BAPL aux âges de 7, 14, 28 et 90 jours, pour les trois types d'additions minérales.

Une tendance similaire à celle observée lors des essais de compression sur granulats individuels a été relevée, à savoir une résistance à la compression plus élevée pour les BAPL élaborés avec des GLAE enrobés par rapport au mélange de référence, et ce à tous les âges de cure. À titre d'illustration, l'amélioration de la résistance à 28 jours des BAPL-FC est de 19,4 %, 32,7 % et 45,8 % pour les mélanges CP, PV et LG, respectivement. De même, les BAPL-PV présentent des gains de 3,7 %, 27,3 % et 27,9 % pour les mêmes mélanges, tandis que les BAPL-LG affichent des augmentations de 1,9 %, 18,8 % et 28,9 %. Les résistances les plus élevées ont été obtenues avec les BAPL contenant des GLAE enrobés de LG,

probablement en raison d'une formation plus abondante de produits d'hydratation, principalement de type

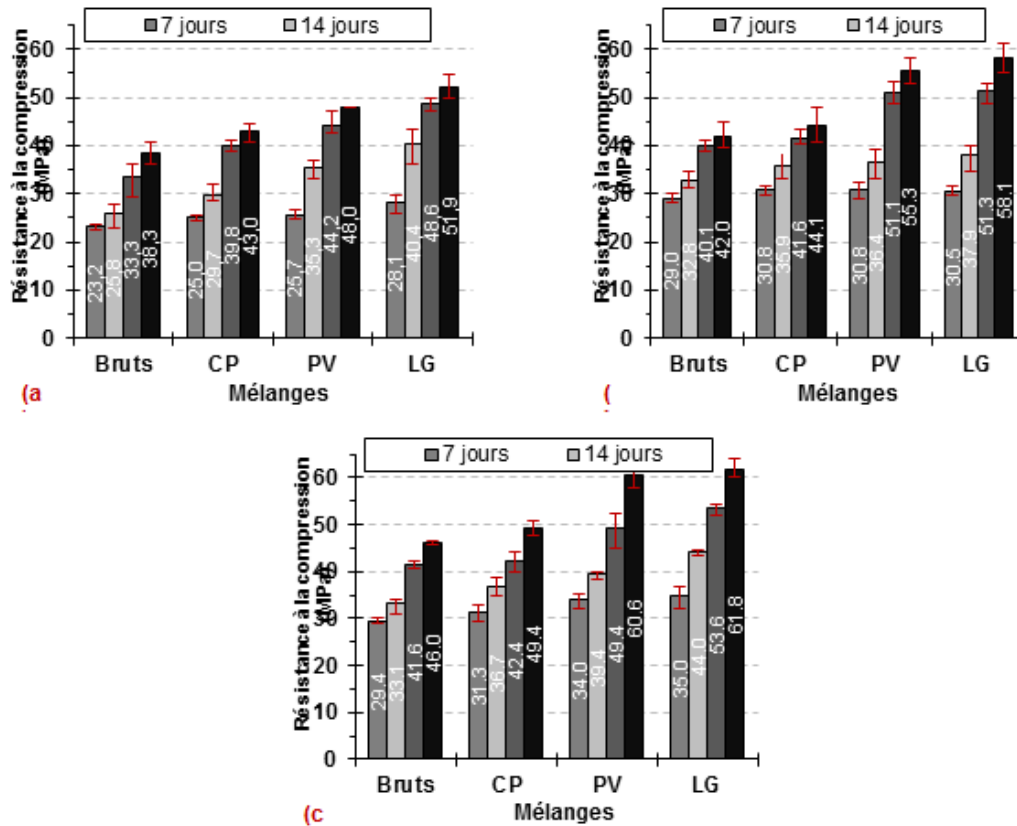


Figure 4.15. Impact des différents enrobages de GLAE sur la résistance à la compression des BAPL : (a) avec FC. (b) avec PV et (c) avec LG.

Figure 4.15. Impact des différents enrobages de GLAE sur la résistance à la compression des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

C-S-H, par rapport aux autres mélanges d'enrobage. De plus, la microstructure formée par le mélange contenant du LG est plus dense et plus compacte, grâce à la finesse des particules du LG. Enfin, l'épaisseur moyenne des couches d'enrobage des GLAE à base de LG était supérieure à celle des autres GLAE enrobés, comme montré à la Figure 4.1, ce qui a pu contribuer à l'augmentation de la résistance du mélange GLAE-LG. Néanmoins, les résistances obtenues avec les BAPL contenant des GLAE enrobés de PV sont proches de celles des LG, soulignant encore l'efficacité des additions minérales dans les applications d'enrobage des GLAE.

À l'inverse, dans les travaux de Domagała et Bryła (Domagała et Bryła, 2021), seule une amélioration de 14 % de la résistance à la compression des bétons légers fabriqués avec des GLAE enrobés par un mélange à base de CP est observée. Les auteurs ont attribué ce résultat à une couverture inégale des surfaces granulaires, laissant de nombreux pores exposés. Cette observation justifie l'application de quatre couches dans le processus d'enrobage des GLAE dans la présente étude, garantissant une couverture quasi parfaite de la surface et optimisant ainsi les performances des granulats.

Il convient de noter que, le matériau d'enrobage étant identique à la matrice cimentaire, une parfaite compatibilité est maintenue entre les GLAE, les différentes couches d'enrobage et la matrice du béton. Cette compatibilité préserve l'adhérence entre les granulats et la matrice, comme le confirme la ligne de rupture observée dans les éprouvettes de béton après les essais de compression, qui traverse les granulats plutôt que l'interface.

Sur le plan de la résistance à la compression, les meilleurs résultats sont obtenus avec les BAPL contenant une addition de LG, suivis de ceux élaborés avec de la PV, tandis que le mélange de référence, formulé avec du FC, présente les résistances les plus faibles. L'amélioration apportée par les additions minérales s'explique par plusieurs mécanismes : l'effet de remplissage, qui densifie la microstructure, l'effet de surface, qui accélère la cinétique de durcissement, ainsi que l'effet chimique, qui se traduit par des réactions pouzzolaniques ou hydrauliques lorsque les ajouts sont réactifs. À 28 et 90 jours, l'influence des réactions pouzzolaniques et/ou hydrauliques latentes devient prédominante, en particulier dans les mélanges contenant du LG et de la PV, favorisant la formation supplémentaire de C–S–H et, par conséquent, une amélioration durable des résistances mécaniques (Matos et al., 2016 ; Sethy et al., 2016). Le FC, en revanche, agit principalement par effet de remplissage et par nucléation des hydrates, ce qui induit une amélioration notable aux jeunes âges, mais beaucoup moins marquée à long terme (Kadri et al., 2010).

Une comparaison directe des valeurs absolues de résistance des mélanges, sans prendre en compte l'augmentation de masse volumique, peut s'avérer trompeuse pour évaluer l'efficacité du procédé d'enrobage. C'est pourquoi des valeurs de résistance spécifique ont été calculées, définies comme le rapport entre la résistance à la compression à 28 jours (à titre d'exemple) et la masse volumique à l'état durci des mélanges, comme illustré à la Figure 4.16. Les résultats confirment la tendance observée à la Figure 4.15 : les mélanges incorporant des GLAE enrobés présentent une résistance spécifique plus élevée que le mélange de référence à base de GLAE bruts, avec un avantage marqué pour les enrobages contenant des additions minérales. L'augmentation de la résistance spécifique des BAPL-FC est estimée à 11,6 %, 18,6 % et 29,8 % pour les pâtes d'enrobage CP, PV et LG, respectivement. Celle des BAPL-PV atteint 8,5 %, 28,7 % et 30 %, tandis que celle des BAPL-LG est de 12,3 %, 29,2 % et 34,4 % pour les mêmes pâtes d'enrobage. Ces résultats montrent que l'amélioration mécanique apportée par l'enrobage est non seulement efficace en termes absolus, mais également avantageuse rapportée à la masse, ce qui revêt une importance particulière dans le contexte des bétons légers, quel que soit le type d'addition minérale utilisé.

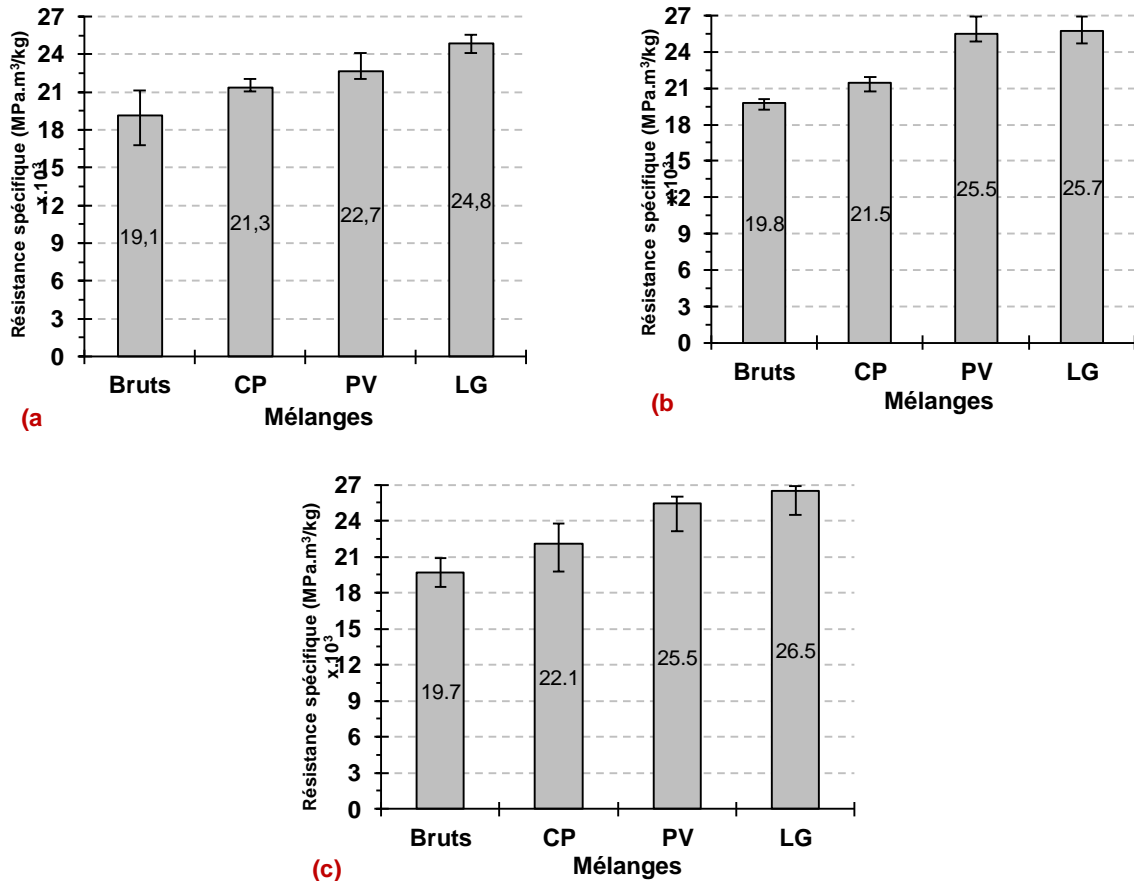


Figure 4.16. Impact des différents enrobages de GLAE sur la résistance spécifique à la compression des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

3.2.3. Effet sur la résistance à la flexion

La Figure 4.17 présente l'évolution de la résistance à la flexion des BAPL aux âges de 7, 14, 28 et 90 jours. Celle-ci représente entre 19 % et 24 % de la résistance à la compression à 28 jours. Selon Kumar et al. (Kumar et al., 2023), les valeurs typiques rapportées pour les BAPL indiquent un rapport résistance à la flexion / résistance à la compression compris entre 5 % et 18 %. Une fois encore, l'effet bénéfique de l'enrobage des GLAE est mis en évidence, puisque tous les bétons confectionnés avec des GLAE enrobés présentent une résistance à la flexion supérieure à celle du béton témoin élaboré avec des GLAE bruts, et ce, à tous les âges de cure et pour l'ensemble des additions minérales. À 28 jours, les gains de résistance par rapport au BAPL-FC contenant des GLAE bruts sont respectivement de 6,5 %, 23 % et 27,9 % pour les mélanges avec GLAE enrobés par CP, PV et LG. Pour le BAPL-PV, ces augmentations atteignent 8,5 %, 23,2 % et 29,3 %, tandis que pour le BAPL-LG elles s'élèvent à 11 %, 28 % et 35,4 %.

Les études portant sur la résistance à la flexion des BAPL à base de GLAE restent généralement limitées, en particulier lorsqu'il s'agit de GLAE enrobés d'une couche cimentaire. Ce paramètre n'est pas un axe majeur de recherche et son application demeure peu développée (Ting et al., 2019b). Toutefois, les travaux de Dixit et Pang (Dixit et Pang, 2022) ont rapporté une augmentation de la résistance à la flexion des bétons légers fabriqués avec

des GLAE enrobés de 6 % et 20 % respectivement, pour des enrobages contenant des cendres volantes et de la fumée de silice, par rapport aux bétons réalisés avec des GLAE bruts

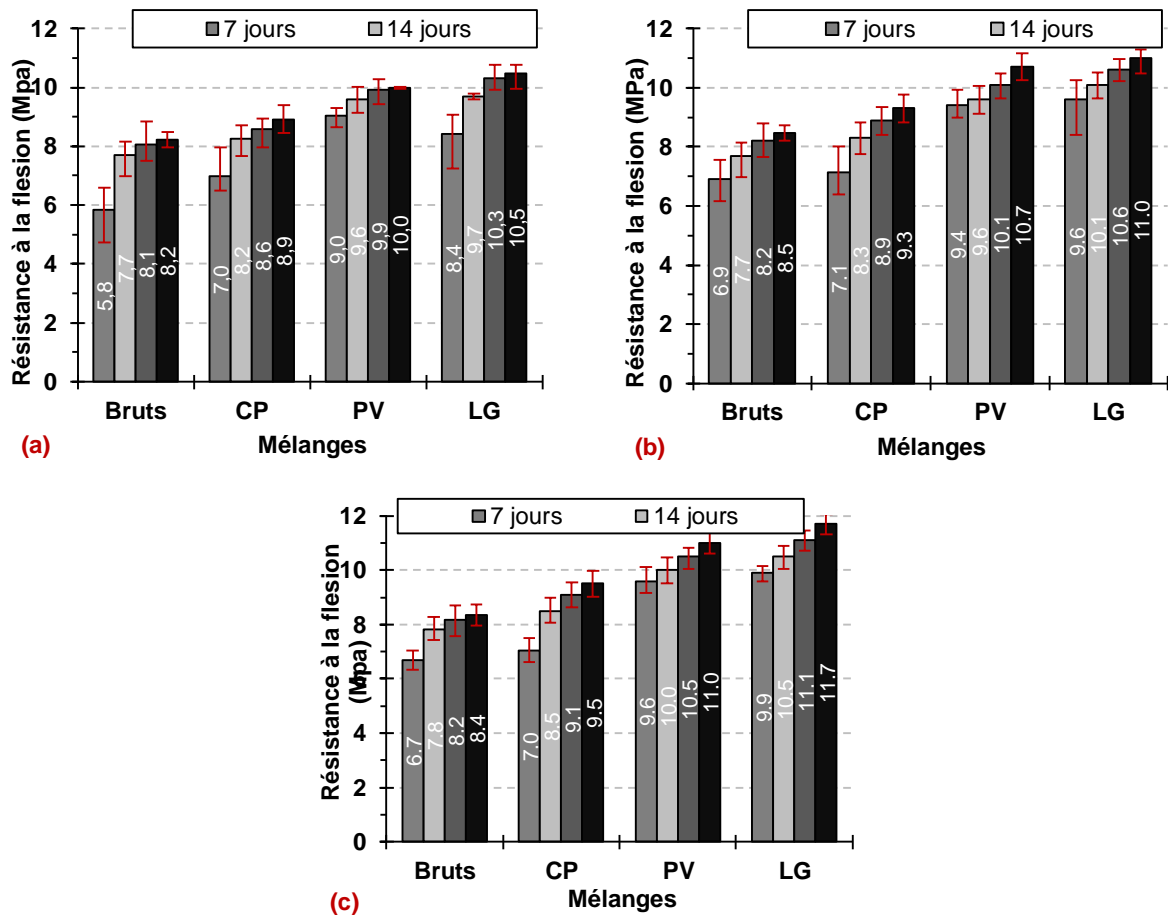


Figure 4.17. Impact des différents enrobages de GLAE sur la résistance à la flexion des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

. Une revue de la littérature ([Kumar et al., 2023](#)) a montré que les valeurs de résistance à la flexion des BAPL avec GLAE bruts à 28 jours varient entre 3 MPa et 8 MPa. La valeur obtenue pour le mélange témoin à base de GLAE bruts dans cette étude est proche de la limite supérieure des valeurs rapportées dans la littérature. L'incorporation d'additions minérales dans les BAPL améliore sensiblement leur résistance à la flexion, selon une hiérarchie similaire à celle observée en compression. Les meilleures performances sont obtenues avec le LG, tandis que les valeurs associées à la PV et au FC restent relativement proches. L'effet bénéfique du LG et de la PV résulte de la combinaison de l'effet de remplissage et des réactions chimiques (hydrauliques ou pouzzolaniques), qui assurent une meilleure cohésion de la matrice et un renforcement de l'interface pâte-granulat. Le FC, en revanche, agit essentiellement par effet de remplissage et par nucléation des hydrates, ce qui limite son efficacité par rapport aux additions réactives.

3.2.4. Effet sur le module d'élasticité dynamique Les valeurs du module dynamique d'élasticité ont été déterminées à l'aide de l'équation (2.15), basée sur la mesure du temps de propagation d'une onde sonore à travers un échantillon de béton durci après 90 jours de cure. La Figure 4.18 illustre les résultats obtenus pour le module d'élasticité de l'ensemble des BAPL.

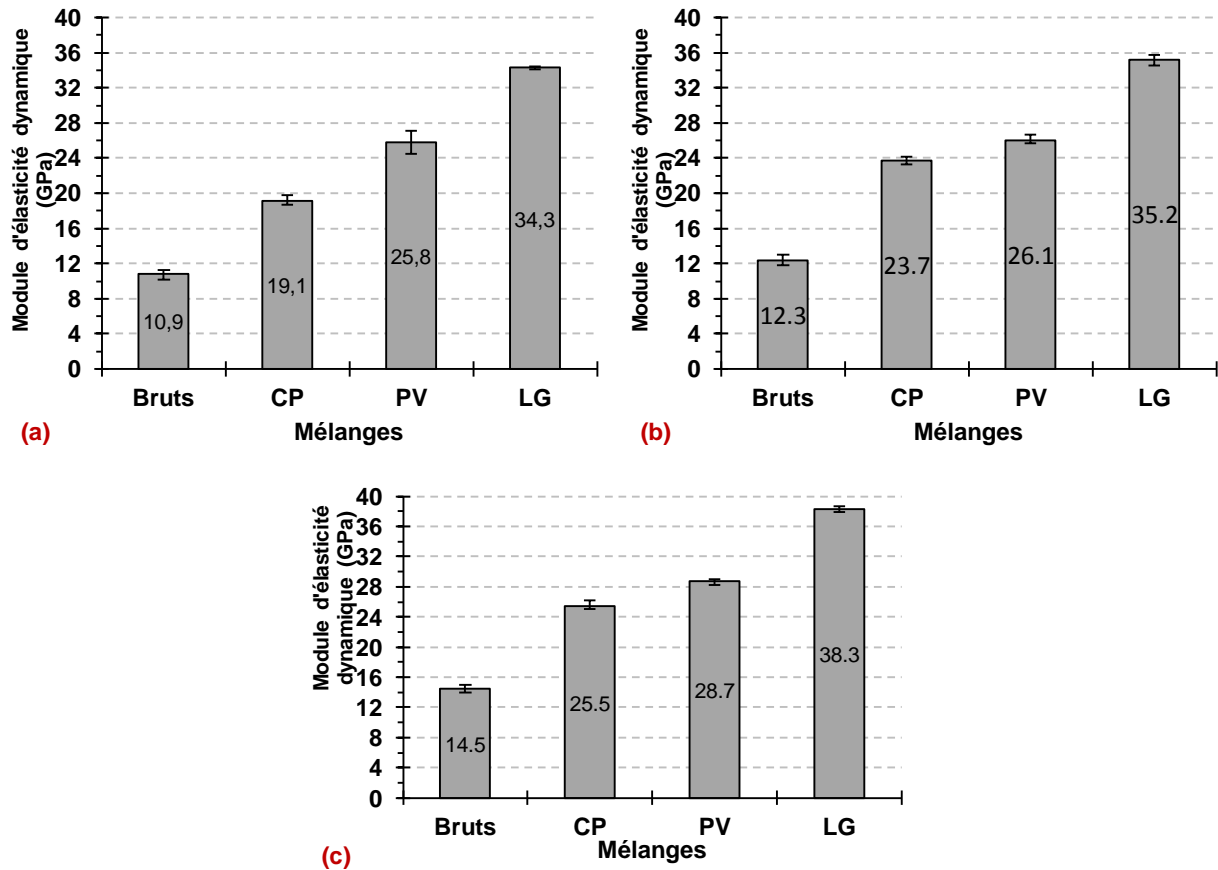


Figure 4.18. Impact des différents enrobages de GLAE sur le module d'élasticité dynamique des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

Les données de la littérature concernant le module d'élasticité des BAPL fabriqués avec des GLAE indiquent des valeurs comprises entre 10 GPa et 14 GPa (Mehta et Monteiro, 2006) et, selon une autre étude, entre 9,7 GPa et 18,7 GPa (Corinaldesi et Moriconi, 2015). Dans la présente étude, la valeur observée pour le module d'élasticité des BAPL à base de GLAE bruts se situe dans les intervalles rapportés dans la littérature. En revanche, le module d'élasticité des BAP contenant des granulats naturels est nettement plus élevé, avec des valeurs comprises entre 29,5 GPa et 31,5 GPa (Kumar et al., 2023). Ainsi, l'incorporation de GLAE dans le BAP entraîne une réduction notable du module d'élasticité. Cette réduction peut être attribuée à plusieurs facteurs, en particulier à la nature poreuse des GLAE. En effet, ces granulats se caractérisent par une structure interne hautement poreuse, ce qui diminue leur masse volumique tout en affectant leur capacité à résister aux déformations. La présence de porosité réduit la capacité des granulats à supporter les contraintes, entraînant ainsi une diminution globale de la rigidité du béton. En raison de leur composition et de leur procédé de fabrication, les GLAE présentent intrinsèquement une rigidité plus faible que les granulats naturels (Floyd et al., 2015). Cette différence de rigidité se reflète directement dans les propriétés élastiques du béton. De plus, l'interface granulat-matrice joue un rôle crucial dans le comportement élastique du béton. En raison de leur surface généralement plus lisse, les GLAE présentent une adhésion réduite à la pâte cimentaire. Cette caractéristique limite l'efficacité du transfert des contraintes entre les granulats et la matrice, contribuant ainsi à une diminution globale de la performance élastique du matériau.

L'effet bénéfique de l'enrobage des GLAE apparaît clairement sur la Figure 4.18, où une augmentation significative du module d'élasticité a été observée pour l'ensemble des types d'enrobage. Cette augmentation a été quantifiée pour les BAPL-FC à 76 %, 137,4 % et 215,6 % pour les enrobages à base de CP, de PV et de LG respectivement. Pour les BAPL-PV, les gains atteignent 92,7 %, 112,2 % et 186,2 %, tandis que pour les BAPL-LG ils sont de 75,9 %, 97,9 % et 164,1 % pour les mêmes mélanges. Ces améliorations sont attribuées au renforcement de l'adhésion entre les granulats et la pâte cimentaire, favorisant à la fois l'emboîtement mécanique et l'adhésion chimique. Ce renforcement résulte de la transformation de la surface des GLAE, initialement lisse, en une texture plus rugueuse grâce au procédé d'enrobage. L'étude de Panghal et Kumar ([Panghal et Kumar, 2024](#)) a montré que l'application d'enrobages sur les granulats renforce considérablement l'interface granulat-ciment, facilitant ainsi le transfert des charges et réduisant la propagation des microfissures. Par ailleurs, la réduction de la porosité des GLAE, obtenue grâce à la formation d'une coque solide à leur surface, contribue à sceller les pores superficiels des granulats. Cela réduit leur déformabilité sous les charges appliquées, améliorant ainsi la rigidité et la capacité portante du béton. En outre, l'augmentation de la masse volumique des GLAE a un effet positif sur le module d'élasticité. Ardakani et Yazdani ([Ardakani et Yazdani, 2014](#)) ont mis en évidence une relation linéaire entre la masse volumique des GLAE et le module d'élasticité du béton.

Les BAPL fabriqués avec des GLAE enrobés à l'aide de mélanges contenant des additions minérales présentent les valeurs les plus élevées du module d'élasticité, en particulier pour les granulats enrobés avec le mélange LG. Cette amélioration peut être attribuée à la formation supplémentaire de phases cimentaires, telles que le C-S-H ou le C-A-S-H, résultant des réactions pouzzolaniques et des réactions hydrauliques latentes. Ces transformations renforcent la microstructure autour des granulats, améliorant les propriétés mécaniques des GLAE et du béton. Yew et al. ([Yew et al., 2023](#)) ont rapporté que l'enrobage de granulats légers d'origine végétale avec un mélange cimentaire contenant de la fumée de silice augmente le module d'élasticité du béton d'environ 30 %. Les auteurs ont expliqué ce résultat par une amélioration significative de l'adhésion entre les granulats et la pâte cimentaire. De plus, Shaban et al. ([Shaban et al., 2019](#)) ont démontré que l'immersion des granulats dans une suspension composée de 3 % de fumée de silice nanostructurée et de 40 % de cendre volante pendant 4 heures entraîne une augmentation de 11 % de la masse volumique des particules et une réduction de 55 % de l'absorption d'eau. Ces changements améliorent non seulement les performances mécaniques des granulats, mais augmentent également de manière significative le module d'élasticité du béton. Les résultats obtenus montrent que les additions minérales exercent une influence déterminante sur le module d'élasticité dynamique des BAPL. L'augmentation observée traduit une microstructure plus dense et plus homogène, favorisant une meilleure transmission des ondes élastiques et une rigidité accrue du matériau. L'effet de remplissage, commun à toutes les additions, améliore la compacité et réduit la porosité, tandis que la réactivité chimique du LG et de la PV contribue à la formation de C-S-H supplémentaires, renforçant l'interface pâte-granat. Le LG se distingue par l'amélioration la plus marquée, suivi de la PV, tandis que le FC, dépourvu de réactivité chimique, présente un effet plus limité, essentiellement lié à la finesse de ses particules.

4. CONCLUSION

Le traitement des LECA par enrobage avec une couche cimentaire composée de CP, de CP-PV et de CP-LG s'est révélé être une méthode très efficace pour améliorer leurs propriétés et, par conséquent, celles des BAPL. Tous les mélanges d'enrobage ont été formulés avec une ouvrabilité constante et un rapport e/c fixé à 0,30. Cette approche a permis de neutraliser les variations liées aux besoins en eau et en superplastifiant des additions minérales, généralement plus élevés que ceux du ciment. L'effet de l'épaisseur de l'enrobage sur les propriétés des GLAE, ainsi que l'influence de l'épaisseur optimale sur les performances des BAPL, ont été étudiés. Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- L'augmentation de l'épaisseur des couches d'enrobage entraîne une densification plus marquée des GLAE tout en préservant leur caractère léger ($< 2000 \text{ kg/m}^3$), réduit de manière significative leur capacité d'absorption d'eau (jusqu'à 65 %) et améliore leur résistance mécanique (jusqu'à 57 %). Le PV et le LG se distinguent par leur efficacité à former de nouvelles phases C-S-H et C-A-S-H grâce à leurs réactions pouzzolaniques et hydrauliques respectivement, ce qui conduit à une diminution de la porosité et à une meilleure cohésion de l'enrobage.
- Le mode de rupture des GLAE évolue avec l'enrobage, passant de l'écrasement pour les granulats bruts ou légèrement enrobés à la fissuration par clivage pour ceux comportant trois ou quatre couches. Cela traduit une redistribution des contraintes et un effet de confinement accru. Ces résultats confirment l'efficacité des mélanges cimentaires contenant des additions minérales dans l'optimisation des performances des GLAE enrobés.
- Les résultats expérimentaux montrent que l'enrobage des GLAE influence différemment les propriétés des BAPL selon les essais réalisés. Alors que l'étalement et le temps T_{500} sont négativement affectés par l'augmentation de la rugosité et de la masse volumique des GLAE enrobés, ces mélanges demeurent néanmoins conformes aux normes et adaptés à un usage pratique. En revanche, les capacités de remplissage et de passage évaluées par l'essai à la boîte en L n'ont pas été impactées.
- Les performances des GLAE enrobés se distinguent par leur stabilité et leur résistance à la ségrégation. La texture de surface rugueuse de ces granulats renforce significativement la cohésion interne du béton, réduisant la ségrégation statique (SR) et la ségrégation en colonne (SSI) respectivement jusqu'à 32 % pour les BAPL-LG et 28 % dans le cas des BAPL-PV.
- Bien que l'enrobage des GLAE augmente la masse volumique à l'état durci des BAPL jusqu'à 13 %, des améliorations notables ont été observées : +46 % en résistance à la compression, +35 % en résistance à la flexion et +215 % en module d'élasticité. Les enrobages contenant des additions minérales se démarquent par leurs performances supérieures, attribuées aux interactions pouzzolaniques et hydrauliques qui renforcent la microstructure.

- Par ailleurs, l'enrobage à base de LG s'est révélé le plus efficace parmi les formulations testées, surpassant nettement celui à base de PV. Cette supériorité s'explique par la finesse des particules de LG, qui favorise une microstructure plus dense, ainsi que par sa forte réactivité hydraulique latente, générant une quantité accrue de produits d'hydratation, principalement du C-S-H. De plus, les GLAE enrobés avec LG ont présenté une couche d'enrobage légèrement plus épaisse, ce qui a pu contribuer à améliorer davantage les performances mécaniques du béton.
- L'analyse globale de l'influence des additions minérales sur les BAPL met en évidence trois comportements distincts. Le FC, de nature inerte, agit principalement par effet de remplissage et de lubrification, favorisant la fluidité à l'état frais mais apportant des gains mécaniques limités à long terme. La PV se caractérise par une réactivité pouzzolanique, ce qui améliore à la fois la stabilité et les performances mécaniques, de manière intermédiaire entre le FC et le LG. Le LG se distingue nettement par son interaction avec le superplastifiant et sa réactivité hydraulique latente : s'il pénalise légèrement la fluidité initiale, il confère une stabilité remarquable aux mélanges et assure les meilleures résistances mécaniques et modules d'élasticité. Ainsi, le LG apparaît comme l'addition la plus efficace pour optimiser les propriétés des BAPL, suivi de la PV.

La technique d'enrobage des GLAE avec des matériaux cimentaires a donné des résultats prometteurs. Cependant, cette méthode nécessite une optimisation afin de réduire à la fois les coûts de production et l'empreinte carbone des granulats. Bien que l'étape supplémentaire d'enrobage puisse accroître le coût de production des GLAE, une évaluation dans une perspective plus large est indispensable. Une approche basée sur le cycle de vie montre que l'amélioration des propriétés des GLAE enrobés permet l'utilisation des BAPL dans des applications structurelles plus exigeantes. Cette amélioration peut engendrer des économies globales à l'échelle du projet, notamment grâce à une réduction de la consommation de matériaux, une optimisation des fondations, une logistique simplifiée et une durée de service prolongée des structures. Ainsi, les bénéfices fonctionnels et économiques à long terme peuvent compenser l'investissement initial lié à l'enrobage des granulats.

D'un point de vue environnemental, l'utilisation de sous-produits industriels dans la matrice d'enrobage constitue également une stratégie viable pour réduire l'empreinte carbone globale de la production de bétons légers. Une évaluation approfondie de la durabilité à long terme de ces bétons, en particulier dans diverses conditions environnementales, est une étape essentielle pour valider leur potentiel dans les applications structurelles. Une campagne expérimentale a déjà été menée à cette fin, et ses résultats feront l'objet du dernier chapitre. En outre, pour une mise en œuvre à l'échelle industrielle, l'utilisation de systèmes mécanisés (tels que des tambours rotatifs ou des tapis roulants continus) pourrait automatiser le processus d'enrobage tout en garantissant une meilleure homogénéité et une reproductibilité accrue à l'échelle de la production.

CHAPITRE V

EFFET DE L'ENROBAGE DES GLAE SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

CHAPITRE V

EFFET DE L'ENROBAGE DES GLAE SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

Ce cinquième chapitre est consacré à l'étude de l'effet de l'enrobage des GLAE sur la durabilité des BAPL. Les investigations portent sur plusieurs indicateurs de durabilité, notamment la porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire, la perméabilité aux gaz et la résistance à la carbonatation accélérée. L'influence des trois additions minérales utilisées dans la formulation des BAPL est également analysée. Les résultats, obtenus suivant la méthodologie expérimentale décrite au chapitre 2, sont présentés et discutés, mettant en évidence l'apport de l'enrobage et des additions dans l'amélioration de la compacité, la réduction de la perméabilité et, par conséquent, le renforcement de la durabilité globale des BAPL.

Sommaire

1. INTRODUCTION	120
2. POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU	120
3. ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITÉ	122
4. PERMÉABILITÉ À L'AIR	124
5. CARBONATATION ACCÉLÉRÉE	127
5.1. Suivi de masse.....	127
5.2. Vitesse ultrasonore.....	128
5.3. Profondeur dégradée.....	130
6. CONCLUSION	132

Chapitre V – Effet de l’enrobage des GLAE sur la durabilité des bétons autoplacants légers

1. INTRODUCTION

La durabilité constitue un enjeu majeur pour les bétons modernes, en particulier pour les BAPL dont la structure poreuse peut les rendre plus vulnérables aux agents agressifs extérieurs. Dans ce contexte, l’utilisation de GLAE enrobés par des pâtes cimentaires apparaît comme une approche prometteuse visant à limiter leur porosité et à améliorer la compacité de la matrice. Ce traitement, déjà étudié dans les chapitres précédents sous l’angle des propriétés physiques et mécaniques, est ici abordé sous l’aspect de la durabilité. Les investigations menées s’appuient sur l’évaluation de plusieurs indicateurs de performance : la porosité accessible à l’eau, l’absorption capillaire, la perméabilité aux gaz et la résistance à la carbonatation accélérée. Par ailleurs, l’effet des trois additions minérales introduites dans la formulation des BAPL est également examiné, afin d’identifier leur rôle dans l’amélioration de la microstructure et dans la réduction de la perméabilité globale.

Ce chapitre présente ainsi les résultats expérimentaux relatifs à la durabilité des BAPL, compare les performances obtenues entre formulations à base de GLAE bruts et de GLAE enrobés, et discute les apports combinés de l’enrobage et des additions minérales dans le renforcement de la résistance à la pénétration des agents agressifs.

2. POROSITÉ ACCESSIBLE À L’EAU

La porosité accessible à l’eau a été déterminée conformément à la norme NF P 18-459 (NF P 18-459, 2022), dont la méthodologie est décrite au chapitre II, section 4.4.3. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.1. Il ressort de ces résultats que l’enrobage des GLAE contribue de manière significative à la réduction de la porosité des BAPL. L’ampleur de cette diminution dépend à la fois de la composition de l’enrobage appliqué aux GLAE et de la nature de l’addition minérale incorporée dans la formulation du béton. Par rapport aux BAPL témoins contenant des GLAE bruts, la réduction de porosité observée pour les BAPL-FC est de 2,5 %, 9,3 % et 16,7 % respectivement pour les enrobages CP, PV et LG. Pour les BAPL-PV, ces réductions atteignent 6,5 %, 17,6 % et 26,1 % pour les mêmes mélanges. Enfin, pour les BAPL-LG, les diminutions sont estimées à 10,5 %, 20,3 % et 27,3 %, toujours selon les mêmes configurations d’enrobage.

La réduction de la porosité accessible à l’eau observée dans les BAPL enrobés s’explique principalement par l’effet de l’enrobage cimentaire appliqué aux GLAE. En effet, l’enrobage crée une couche superficielle dense qui colmate une partie des pores ouverts présents à la surface des granulats légers. Cette barrière limite la pénétration de l’eau et réduit les échanges entre la matrice cimentaire et les granulats, ce qui diminue la connectivité des pores et, par conséquent, la porosité globale du béton. Par ailleurs, l’efficacité de l’enrobage dépend fortement de sa composition. Les enrobages élaborés avec la PV et le LG induisent une

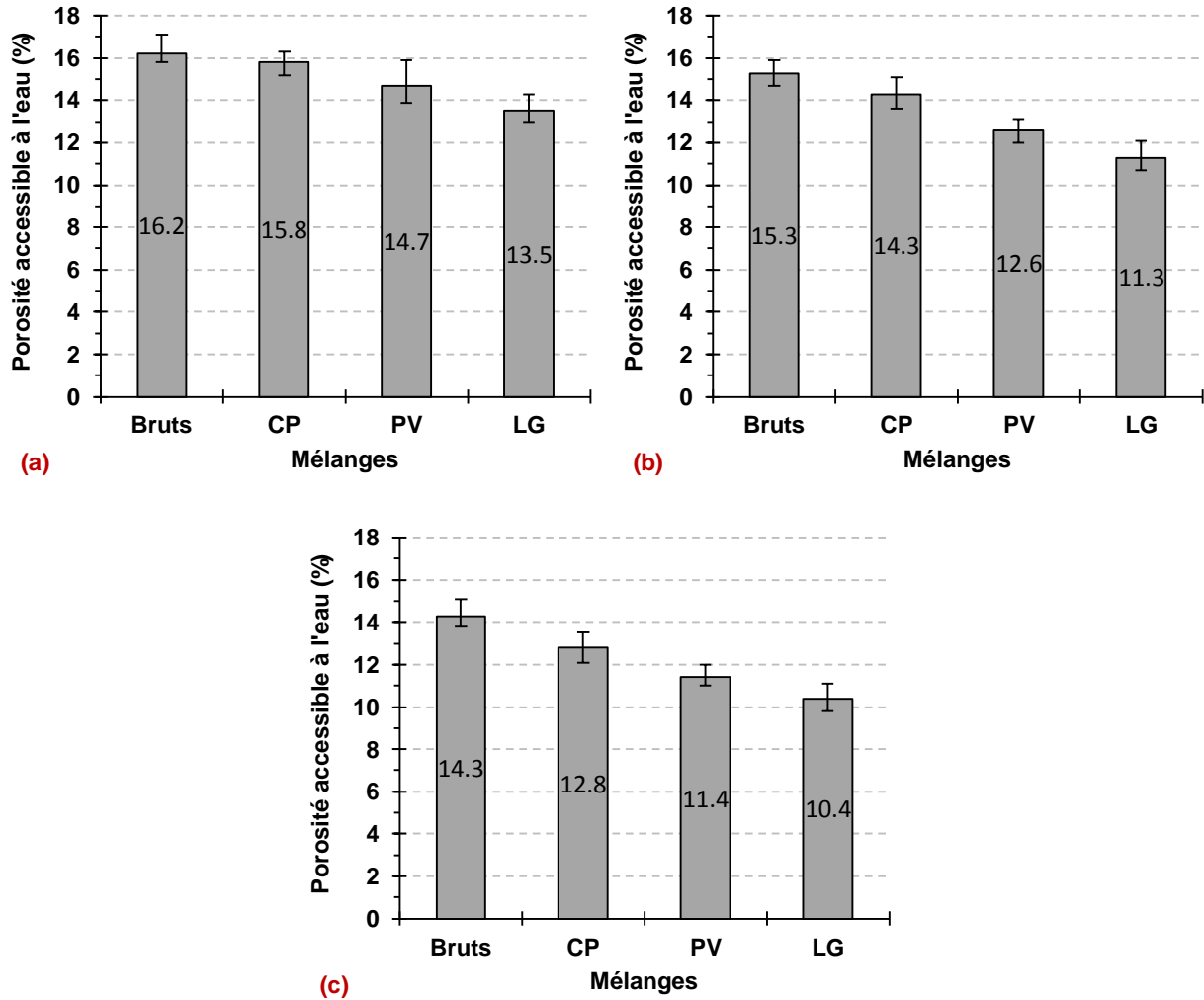


Figure 5.1. Effet des différents enrobages de GLAE sur la porosité accessible des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

diminution plus marquée de la porosité par rapport à la pâte de ciment seule. Ce comportement s'explique par la réactivité pouzzolanique de la PV et l'activité hydraulique latente du LG, qui génèrent des produits de réaction supplémentaires (C-S-H principalement). Ces produits contribuent à combler les vides résiduels au sein de la zone de transition et à densifier davantage la microstructure du béton. Ainsi, l'association de l'effet de colmatage de l'enrobage et de la réactivité des additions minérales assure une réduction significative de la porosité, particulièrement dans les cas où la PV et le LG sont utilisés. Plusieurs auteurs ont rapporté une diminution de l'absorption d'eau des BAPL. Koňáková et al. (Koňáková et al., 2017) ont constaté une réduction de 47 % de la porosité ouverte d'un enduit à base de schiste argileux lorsque le sable siliceux a été remplacé par des GLAE (0–4 mm). Cette réduction s'explique principalement par la présence de pores interconnectés dans les GLAE, qui favorisent l'absorption d'eau et accroissent l'accessibilité des granulats. Par ailleurs, Vahabi et al. (Vahabi et al., 2022) ont montré qu'un enrobage polymère appliqué sur les granulats légers permet de réduire l'absorption d'eau aussi bien des granulats que des BAPL. De même, Adhikary (Adhikary, 2022) a obtenu des résultats similaires et rapporte que ce type

d'enrobage limite la formation des pores capillaires et améliore la ZTI, ce qui conduit à une réduction de l'absorption d'eau des BAPL.

Il a été démontré précédemment que l'enrobage des GLAE contribue à réduire la porosité accessible des BAPL. Dans cette logique, l'utilisation d'additions minérales permet de diminuer davantage cette porosité. La Figure 5.1 illustre que les additions réactives, telles que la PV et le LG, réduisent plus efficacement la porosité des BAPL que le FC. Ce dernier, essentiellement inerte, agit principalement par effet de remplissage et par une germination hétérogène, des effets perceptibles surtout à court terme. En revanche, le LG développe son efficacité à plus long terme en raison de son activité hydraulique latente. Quant à la PV, son caractère pouzzolanique, renforcé par une teneur élevée en alcalins jouant le rôle de catalyseur, entraîne une réduction de la porosité grâce à la formation accrue de C-S-H (Schwarz, 2008), caractérisés par une masse volumique plus importante (Richardson, 1999). Par ailleurs, Güneyisi et al. (Güneyisi et al., 2015a) ont rapporté que la combinaison de la fumée de silice et des cendres volantes réduit l'absorption d'eau des BAPL d'environ 15 %. Selon ces auteurs, l'ajout de telles additions accélère la formation des produits d'hydratation et comble les vides, ce qui améliore les propriétés d'absorption d'eau. De plus, l'augmentation de la durée de cure agit favorablement sur l'efficacité de ces ajouts, en améliorant la microstructure et la ZTI (Güneyisi et al., 2015b).

3. ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITÉ

L'absorption d'eau par capillarité des différents mélanges de BAPL a été déterminée conformément à la norme NF EN 13057 (NF EN 13057, 2002), sur des échantillons de béton ayant subi une cure humide de 90 jours. La méthode d'essai est décrite au chapitre 2, section 4.4.4. Le coefficient d'absorption traduit la capacité du béton à absorber l'eau au cours du temps : plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption, et donc le coefficient d'absorption, sont faibles.

Les résultats obtenus montrent que le coefficient d'absorption (Ca_t) des mélanges augmente avec la racine carrée du temps. Toutefois, deux comportements distincts apparaissent dans l'évolution des courbes. D'une part, on observe une évolution linéaire du coefficient d'absorption en fonction de la racine carrée du temps, jusqu'à 24 heures (fin de l'essai), cas correspondant aux BAPL-FC. Selon Badreddine-Bessa (Badreddine-Bessa, 2004), plus les pores sont larges, plus la pente de la droite est élevée. D'autre part, certains mélanges présentent une variation qui se traduit par une succession de segments linéaires à pente décroissante, comme pour les BAPL-PV et les BAPL-LG, ce qui témoigne d'un ralentissement de l'absorption. Toujours selon (Badreddine-Bessa, 2004), cette régression des pentes peut s'expliquer par deux causes probables. La première est que la remontée capillaire aurait atteint l'ensemble de la hauteur de l'éprouvette (50 mm). Cependant, les observations ont montré que la surface supérieure des échantillons demeurait sèche après 24 heures, ce qui indique que la durée de l'essai n'était pas suffisante pour permettre à l'eau de traverser toute la hauteur. La seconde cause, jugée plus vraisemblable, est l'existence de plusieurs familles de pores. Une fois la remontée capillaire achevée dans les plus gros pores, l'absorption se poursuit progressivement dans les pores plus fins. Cette transition ralentit la cinétique

d'absorption et explique la diminution des pentes observées. Étant donné la durée limitée de l'essai (24 h), le remplissage des pores de gel de très faible diamètre n'a pas pu être atteint. Ainsi, l'absorption capillaire mesurée concerne principalement les pores capillaires.

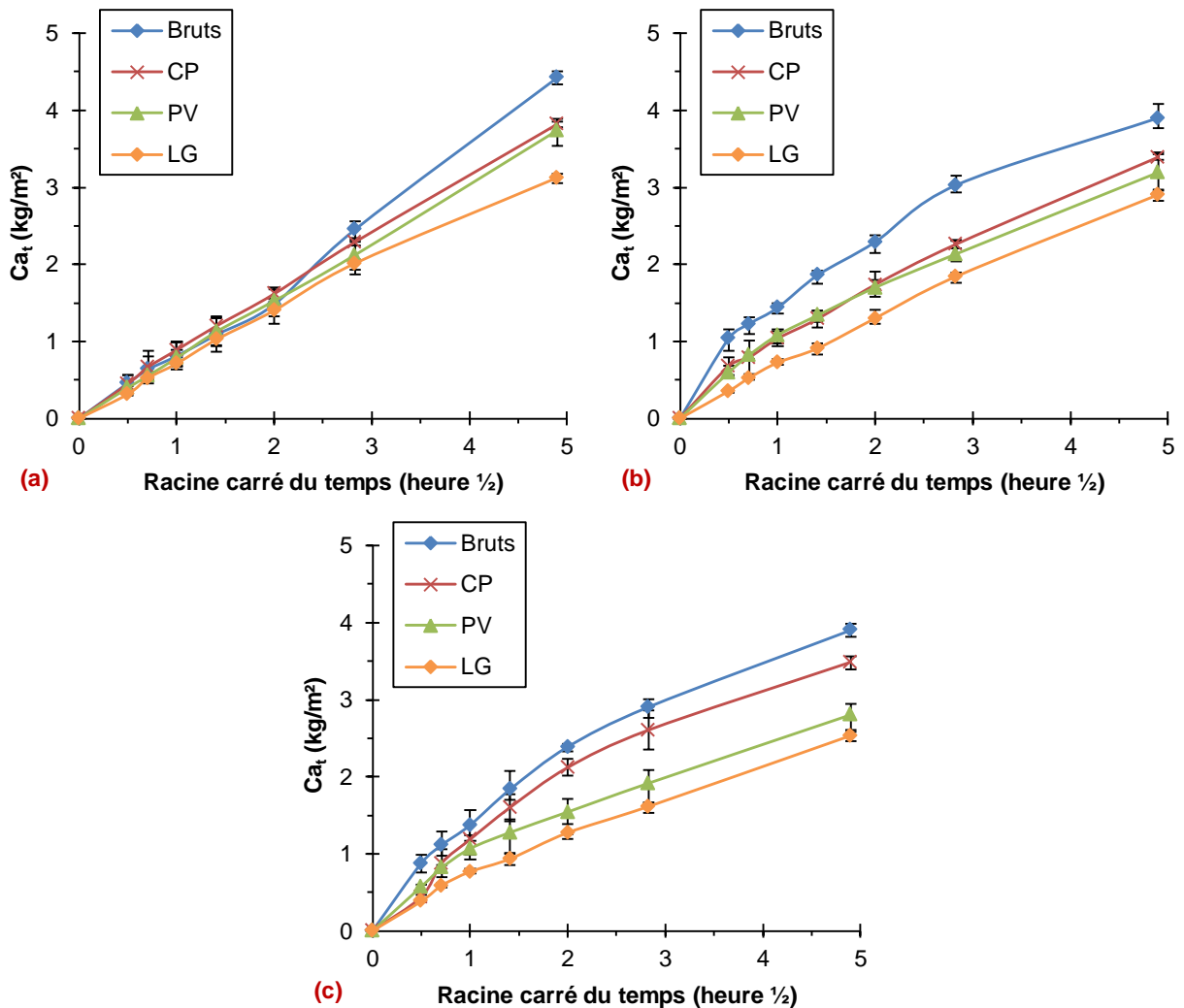


Figure 5.2. Effet des différents enrobages de GLAE sur l'absorption d'eau capillaire des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

À travers la Figure 5.2 on constate que l'enrobage des GLAE contribue de manière significative à la diminution de la capacité d'absorption d'eau capillaire des BAPL. En effet, la couche cimentaire formée à la surface des GLAE permet de colmater une partie des pores ouverts et de réduire la perméabilité superficielle des granulats. Cette barrière physique limite la pénétration de l'eau et ralentit la migration capillaire au sein du béton. La réduction de l'absorption capillaire s'avère plus importante lorsque l'enrobage intègre des additions minérales réactives telles que la PV ou le LG. Ces matériaux participent à la formation supplémentaire de produits d'hydratation, en particulier les C-S-H, qui densifient la microstructure et affinent le réseau poreux. De ce fait, la continuité des pores capillaires est interrompue et la cinétique d'absorption s'en trouve considérablement ralentie. Ainsi, l'ordre décroissant d'efficacité observé ($CP < PV < LG$) traduit la capacité croissante des enrobages à affiner la porosité et à renforcer l'imperméabilisation de la surface des GLAE. Ce mécanisme

explique la diminution progressive des coefficients d'absorption enregistrés pour l'ensemble des BAPL, indépendamment de la nature de l'addition minérale utilisée dans leur formulation.

Bogas et al. (Bogas et al., 2015) ont montré que le remplacement partiel des sables ou des granulats grossiers ordinaires par des GLAE conduit à une absorption capillaire, aussi bien initiale qu'à long terme, plus élevée que celle observée pour le béton de référence. De leur côté, Real et al. (Real et al., 2015) ont mis en évidence une augmentation du coefficient d'absorption capillaire des mortiers avec l'incorporation de GLAE, celle-ci croissant proportionnellement au volume de GLAE introduit dans le mélange. Plus récemment, Vahabi et al. (Vahabi et al., 2021) ont suggéré que l'application de revêtements polymères sur les granulats légers pourrait limiter l'absorption d'eau, tant des granulats eux-mêmes que des BAPL. Des résultats similaires ont été rapportés par Adhikary (Adhikary, 2022). L'emploi de ces revêtements polymères réduit la formation de pores capillaires et améliore la ZTI, ce qui se traduit par une diminution de l'absorption d'eau des BAPL.

Le coefficient de sorptivité présenté dans le Tableau 5.1 a été déterminé à partir du gradient de la partie linéaire des courbes (entre 1 et 8 heures) illustrées dans la Figure 5.2. On constate que l'incorporation de la PV et du LG réduit sensiblement les coefficients de sorptivité des BAPL-PV et BAPL-LG, comparativement au béton de référence BAPL-FC. Cette amélioration est attribuée à l'affinement de la structure poreuse induit par l'utilisation d'additions réactives. L'effet bénéfique du LG sur la sorptivité a déjà été souligné par plusieurs chercheurs (Hadj-Sadok et al., 2011 ; Güneysi et Gesoğlu, 2008), qui l'expliquent par la formation de C-S-H lors des réactions hydrauliques. Ces produits contribuent à modifier la distribution ainsi que les dimensions de la porosité capillaire. De leur côté, Matos et al. (Matos et al., 2016) ont montré que l'incorporation de PV entraîne une sorptivité plus faible que celle du béton témoin. Ce comportement est lié à la formation supplémentaire de C-S-H issue des réactions pouzzolaniques, qui densifie la microstructure, homogénéise le matériau et affine son réseau poreux. Il en résulte une diminution de la porosité ouverte et, par conséquent, de la sorptivité.

Tableau 5.1. Coefficient de sorptivité des différents mélanges ($\text{kg/m}^2/\text{h}^{1/2}$).

Mélanges	GLAE Bruts	GLAE-CP	GLAE-PV	GLAE-LG
BAPL-FC	0,90	0,77	0,73	0,71
BAPL-PV	0,87	0,77	0,58	0,61
BAPL-LG	0,84	0,78	0,46	0,46

4. PERMÉABILITÉ À L'AIR

Les résultats de la perméabilité à l'air des différents mélanges de BAPL, pour les divers types d'additions minérales, après une cure humide de 90 jours, ont été obtenus par application de l'équation (2.18), dont le mode opératoire est décrit au chapitre 2, section 4.4.5. Les coefficients de perméabilité, calculés à partir de la moyenne de trois éprouvettes, sont présentés dans la Figure 5.3. Deux gradients de pression d'air constants ont été appliqués, à savoir 2 bar et 3 bar. Les essais ont été réalisés conformément à la norme XP P18-463 (XP P18-463, 2011).

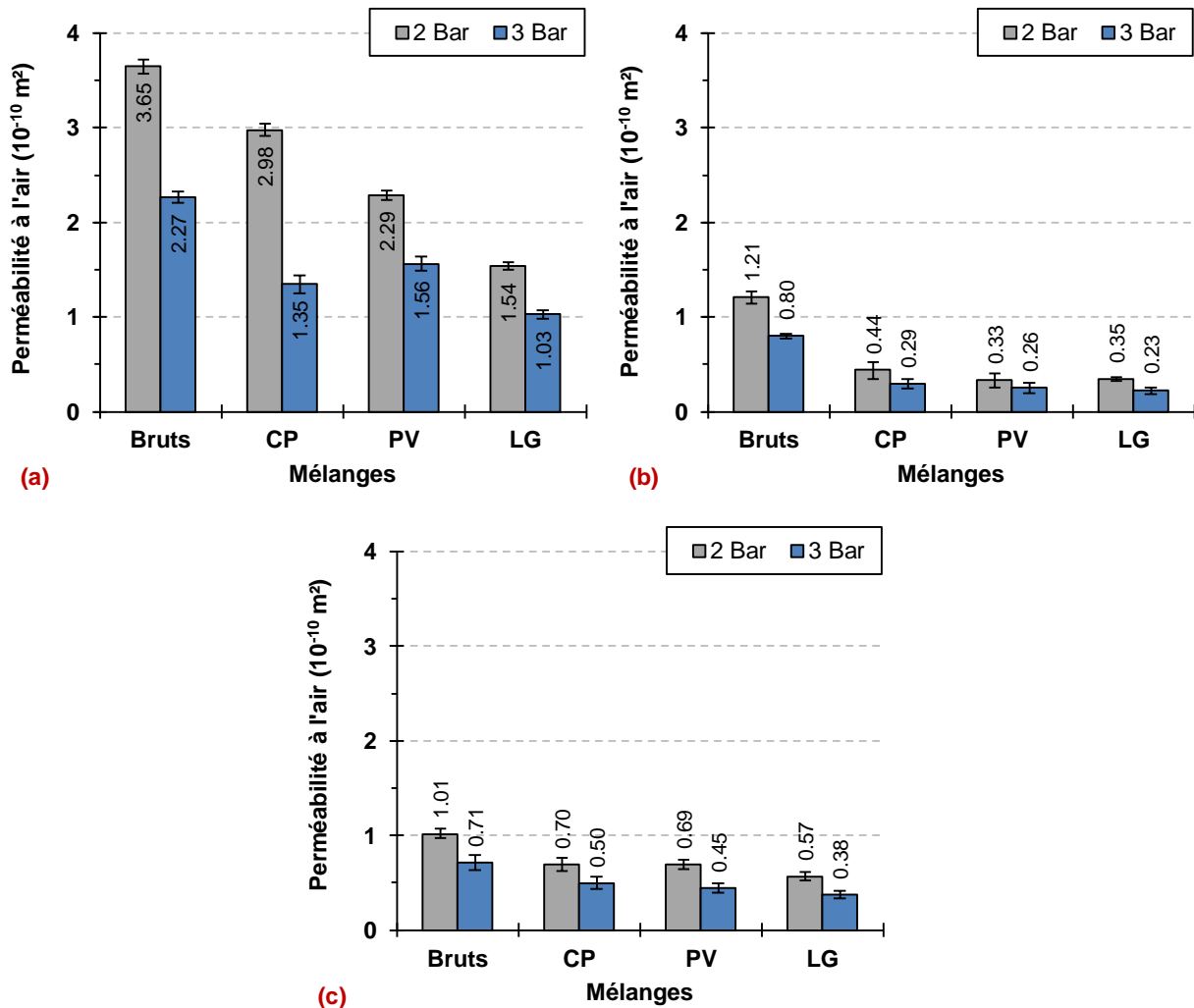


Figure 5.3. Effet des différents enrobages de GLAE sur la perméabilité à l'air des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

Une tendance similaire à celle observée lors des essais précédents se dégage des résultats de la Figure 5.3, à savoir une plus faible perméabilité des BAPL à base de GLAE enrobés par rapport à ceux à base de GLAE bruts, et ce, quel que soit le gradient de pression appliqué et indépendamment de la nature de l'addition minérale incorporée dans le béton. À titre d'exemple, pour une pression d'air de 2 bar, la diminution de la perméabilité des BAPL-FC à base de GLAE enrobés par rapport à ceux bruts est estimée à 18,4 %, 37,3 % et 57,9 % respectivement pour des enrobages composés de CP, PV et LG. De même, pour les BAPL-PV, cette diminution atteint 22,7 %, 41,9 % et 39,4 % pour les mêmes mélanges. Enfin, pour les BAPL-LG, elle est de 31,4 %, 32 % et 44,3 %, toujours selon les mêmes mélanges.

Les résultats obtenus mettent en évidence deux aspects complémentaires. D'une part, l'augmentation de la pression d'essai conduit à une diminution des valeurs de perméabilité mesurées. Ce comportement s'explique par l'« effet Klinkenberg ». À faible pression, le libre parcours moyen des molécules de gaz est relativement important et peut être comparable à la taille des pores les plus fins du béton. Les molécules ont alors tendance à glisser le long des parois des canaux poreux, ce qui accroît artificiellement le débit et entraîne une surestimation de la perméabilité. Lorsque la pression appliquée augmente, ce phénomène de glissement

devient négligeable : les collisions moléculaires dominent et l'écoulement se rapproche davantage du régime décrit par la loi de Darcy. Les valeurs obtenues reflètent alors plus fidèlement la perméabilité intrinsèque du matériau, généralement plus faible que la perméabilité apparente mesurée à basse pression. Ces observations rejoignent celles de Real et Bogas (Real et Bogas, 2017), qui ont montré que la perméabilité à l'oxygène diminue lorsque la pression d'essai augmente, confirmant ainsi l'effet Klinkenberg. Cet effet est d'ailleurs accentué dans le cas de granulats légers plus poreux. D'autre part, les résultats indiquent que les BAPL élaborés avec des GLAE enrobés présentent une meilleure étanchéité à l'air que ceux fabriqués à partir de GLAE bruts. L'enrobage joue un rôle protecteur en colmatant une partie de la porosité ouverte des granulats et en réduisant les voies préférentielles de circulation des fluides, ce qui limite la perméabilité globale du béton. L'analyse comparative des différents enrobages confirme que les formulations contenant de la PV ou du LG conduisent aux coefficients de perméabilité les plus faibles. Cette amélioration s'explique par les réactions pouzzolaniques (dans le cas de la PV) et les réactions hydrauliques latentes (dans le cas du LG), qui génèrent des produits supplémentaires de réaction. Ceux-ci participent à la densification de la microstructure de l'enrobage et réduisent la connectivité des pores, rendant ces formulations plus performantes que l'enrobage réalisé uniquement avec de la pâte de ciment (CP).

Real et Bogas (Real et Bogas, 2017) ont montré que la perméabilité des bétons légers structurels dépend de l'importance relative de chacune de leurs phases constitutives. Lorsque la matrice cimentaire présente une structure poreuse ouverte et que la porosité plus élevée des granulats légers devient accessible, la perméabilité des bétons légers tend à dépasser celle des bétons conventionnels à base de granulats naturels. Ce phénomène se manifeste de manière plus marquée pour la perméabilité aux gaz que pour celle à l'eau. En effet, l'écoulement gazeux peut emprunter des pores de diamètre plus réduit que ceux accessibles à l'eau (effet Klinkenberg), ce qui diminue l'efficacité protectrice de la pâte cimentaire. Selon Lydon (Lydon, 1995) et Real et Bogas (Real et Bogas, 2017), la qualité de la pâte entourant les particules de granulats légers constitue donc un facteur déterminant pour garantir une faible perméabilité, et ce indépendamment de la porosité intrinsèquement élevée de ces granulats.

Il est intéressant de constater, à travers les résultats de la Figure 5.3, l'effet bénéfique des additions minérales réactives telles que la PV et le LG dans la réduction de la perméabilité à l'air des BAPL par rapport au FC. En effet, le remplacement du FC par de la PV ou du LG a permis de diminuer sensiblement la perméabilité des BAPL. Pour estimer la contribution de ces additions réactives, prenons l'exemple des BAPL à base de GLAE bruts pour une pression d'essai de 2 bar : la réduction de la perméabilité atteint 84,4 % avec la PV et 72 % avec le LG par rapport au FC. Cette amélioration s'explique principalement par la réactivité chimique des additions, qu'elles soient pouzzolaniques (PV) ou hydrauliques latentes (LG). Avec le temps, cet effet se renforce grâce à la formation accrue de C-S-H, qui densifie la microstructure du béton et améliore sa compacité (Fraj et al., 2012). À court terme, l'effet de nucléation hétérogène contribue également à l'amélioration de la structure poreuse, phénomène commun à toutes les additions, qu'elles soient inertes ou réactives.

L'incorporation de la PV ou du LG modifie profondément la microstructure des matrices cimentaires. Selon Matos et al. (Matos et al., 2016), cette évolution est due à la formation

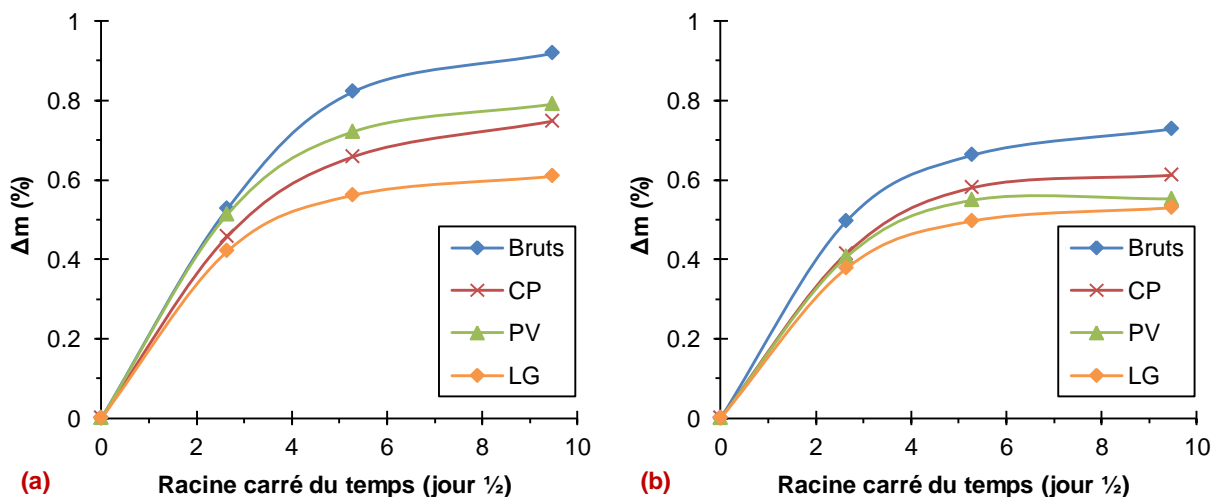
supplémentaire de C-S-H issue des réactions pouzzolaniques, ce qui améliore l'homogénéité de la microstructure et affine le réseau poreux. Le résultat se traduit par une transformation des gros pores en pores plus fins et par une augmentation du volume des pores de petite taille au détriment des plus gros. Cet affinage de la porosité conduit à une segmentation accrue du réseau poreux et à une augmentation de sa tortuosité. Pla et al. (Pla et al., 2018) ont par ailleurs souligné l'importance déterminante de la composition de la matrice de mortier, qui contrôle les mécanismes de transport des fluides au sein du matériau cimentaire et conditionne ainsi sa durabilité. De leur côté, Real et Bogas (Real et Bogas, 2017) ont observé que le remplacement partiel du ciment par des additions minérales réactives, telles que la fumée de silice et les cendres volantes, réduit significativement la perméabilité aux gaz par rapport aux pâtes de référence à base de CEM I, en particulier pour de faibles rapports E/L. À l'inverse, la substitution du ciment par du FC entraîne une augmentation de la perméabilité, surtout lorsque le rapport E/L est élevé, en raison de l'augmentation de la porosité ouverte de la pâte.

5. CARBONATATION ACCÉLÉRÉE

5.1. Suivi de masse

Le suivi de la masse des différents mélanges de BAPL au cours de leur conservation dans l'enceinte de carbonatation accélérée a été réalisé à chaque échéance. Pour ce faire, les éprouvettes sont sorties de l'enceinte, pesées, puis replacées dans leur environnement initial. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 5.4.

La première augmentation des masses des échantillons intervient dès leur introduction dans l'enceinte et se poursuit durant les premiers jours de l'essai. Elle s'explique principalement par la mise en équilibre hygrométrique des échantillons avec l'atmosphère de l'enceinte. Au-delà de 7 jours et jusqu'à 90 jours, l'augmentation résiduelle des masses est attribuée à la formation de calcite (CaCO_3), phénomène résultant de la réaction progressive du dioxyde de carbone avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment. Néanmoins, l'accroissement des masses entre 28 et 90 jours demeure insignifiant et tend à se stabiliser. Il est à noter que cette évolution reste comparable pour l'ensemble des formulations, indépendamment du type d'enrobage appliqué aux GLAE et de la nature de l'ajout minérale incorporée dans le béton.



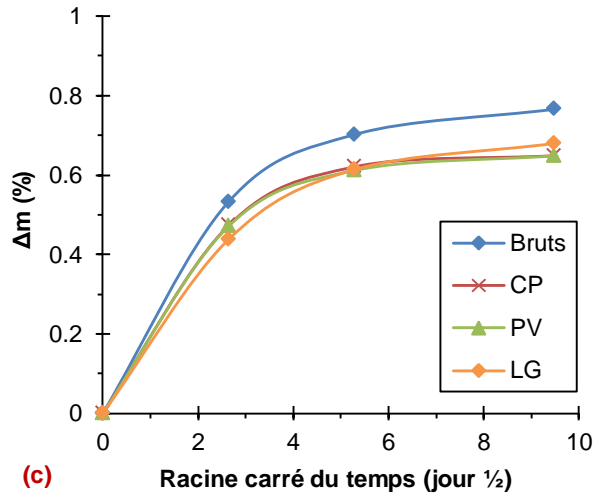
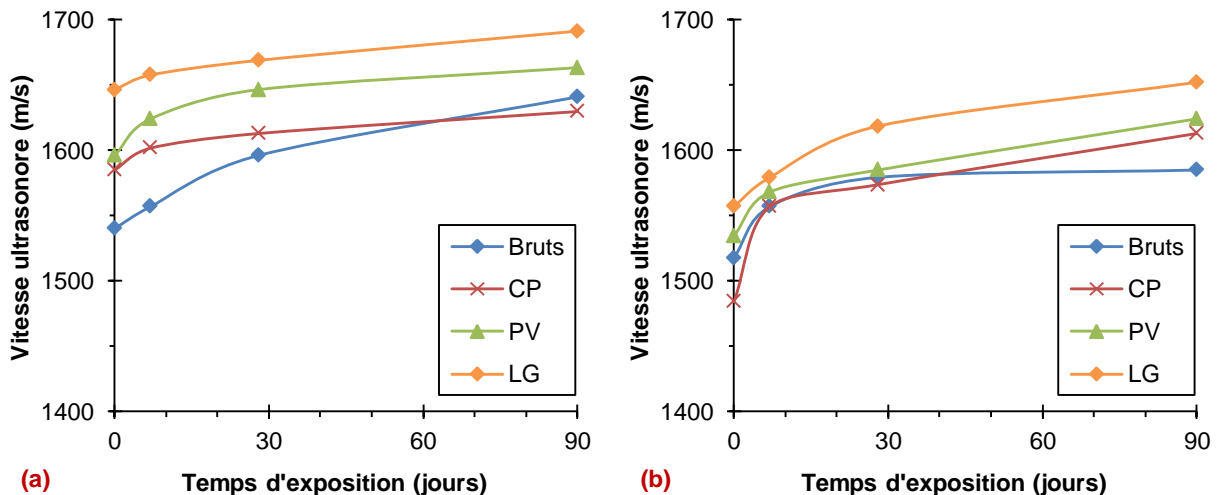


Figure 5.4. Effet des différents enrobages de GLAE sur l'évolution des masses des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

5.2. Vitesse ultrasonore

En parallèle du suivi de masse des BAPL, la vitesse ultrasonore a été déterminée pour l'ensemble des mélanges à partir d'éprouvettes prismatiques de dimensions $7 \times 7 \times 28$ cm. À chaque échéance de carbonatation, les éprouvettes sont sorties de l'enceinte, puis la fréquence de résonance de chacune d'elles est mesurée à l'aide d'un appareil de contrôle non destructif. Le principe de la mesure repose sur l'excitation mécanique de l'échantillon par un petit choc, suivie de l'enregistrement des vibrations par un capteur. L'appareil identifie ensuite les fréquences propres de vibration (en kHz), caractéristiques de la rigidité et de la géométrie de l'échantillon. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 5.5.



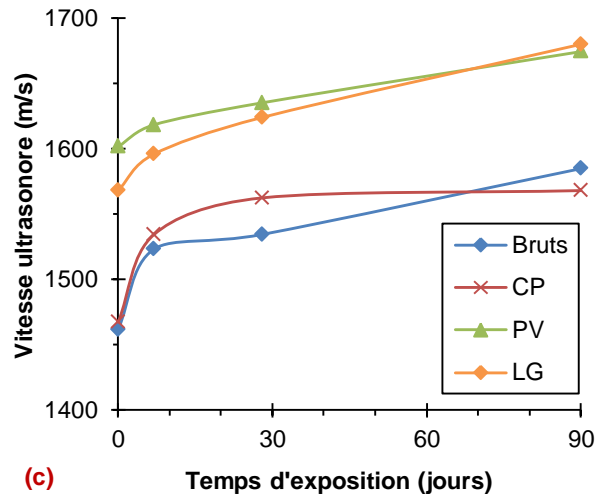


Figure 5.5. Effet des différents enrobages de GLAE sur la vitesse ultrasonore des BAPL : (a) avec FC, (b) avec PV et (c) avec LG.

L'analyse montre une augmentation progressive des vitesses ultrasonores en fonction du temps d'exposition au dioxyde de carbone, indépendamment de la composition de la pâte d'enrobage des GLAE et de la nature des additions minérales. Les vitesses les plus élevées sont observées pour les BAPL contenant des GLAE enrobés, en comparaison avec ceux élaborés à partir de GLAE bruts. Un classement similaire se dégage également entre les différents types d'enrobage, avec des performances supérieures pour le LG, suivi de la PV, puis du CP. Néanmoins, la variation des vitesses ultrasonores demeure négligeable pour la plupart des mélanges, notamment entre 28 et 90 jours.






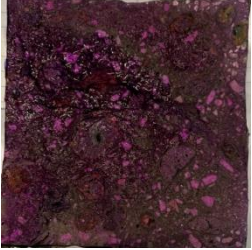

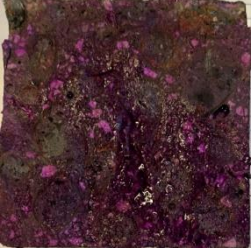




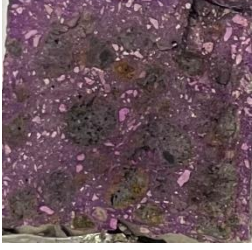
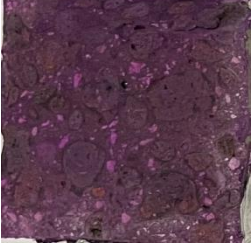

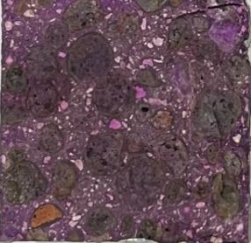
L'augmentation progressive de la vitesse ultrasonore observée au cours de l'exposition dans l'enceinte de carbonatation est directement liée aux transformations microstructurales induites par la réaction du dioxyde de carbone avec la portlandite. Cette réaction conduit à la formation de calcite, dont le volume solide supplémentaire a pour effet de colmater les microfissures et les micropores présents dans la matrice cimentaire. Plus la durée d'exposition au CO_2 est prolongée, plus la quantité de calcite formée augmente, ce qui entraîne une densification progressive de la microstructure et une réduction notable de la porosité accessible. Cette évolution se traduit par une amélioration de la compacité interne du béton et donc par une augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, qui sont d'autant plus rapides que le matériau est dense et rigide.

L'augmentation des vitesses ultrasonores enregistrées pour les bétons à base de GLAE enrobés avec des additions minérales réactives (LG et PV) peut être attribuée à une densification microstructurale plus prononcée. En effet, le LG développe une activité hydraulique latente en réagissant avec la portlandite, tandis que la PV, riche en silice amorphe, participe à des réactions pouzzolaniques similaires ; ces processus génèrent des produits C-S-H supplémentaires, assurant un meilleur remplissage des pores et une cohésion accrue de la matrice. Par ailleurs, l'enrobage des granulats favorise une amélioration notable de la ZTI, réduisant la porosité superficielle des GLAE et limitant la formation de microfissures, ce qui facilite la propagation des ondes ultrasonores. Enfin, l'action combinée de l'enrobage et de la carbonatation crée un effet synergique : la couche cimentaire limite

d'abord la porosité accessible, puis la précipitation progressive de calcite induite par la carbonatation densifie davantage la microstructure. Ainsi, la microstructure obtenue est plus compacte et homogène, expliquant les vitesses supérieures mesurées pour les formulations LG et PV par rapport aux bétons bruts ou enrobés au CP seul.

5.3. Profondeur dégradée

Les essais de carbonatation accélérée ont été réalisés conformément à la norme XP P18-458 (XP P18-458, 2022), selon le protocole détaillé au chapitre 2, section 4.4.7. Après une cure humide de 90 jours à 20 °C, la profondeur de carbonatation a été évaluée aux échéances de 7, 28 et 90 jours par pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine. La Figure 5.6 illustre les sections des BAPL examinées à chaque échéance. Aucun front de carbonatation n'a été détecté sur l'ensemble des mélanges après application de l'indicateur coloré.

Temps		Bruts	CP	PV	LG
7 jours	BAPL-FC				
	BAPL-PV				
	BAPL-LG				
28 jours	BAPL-FC				

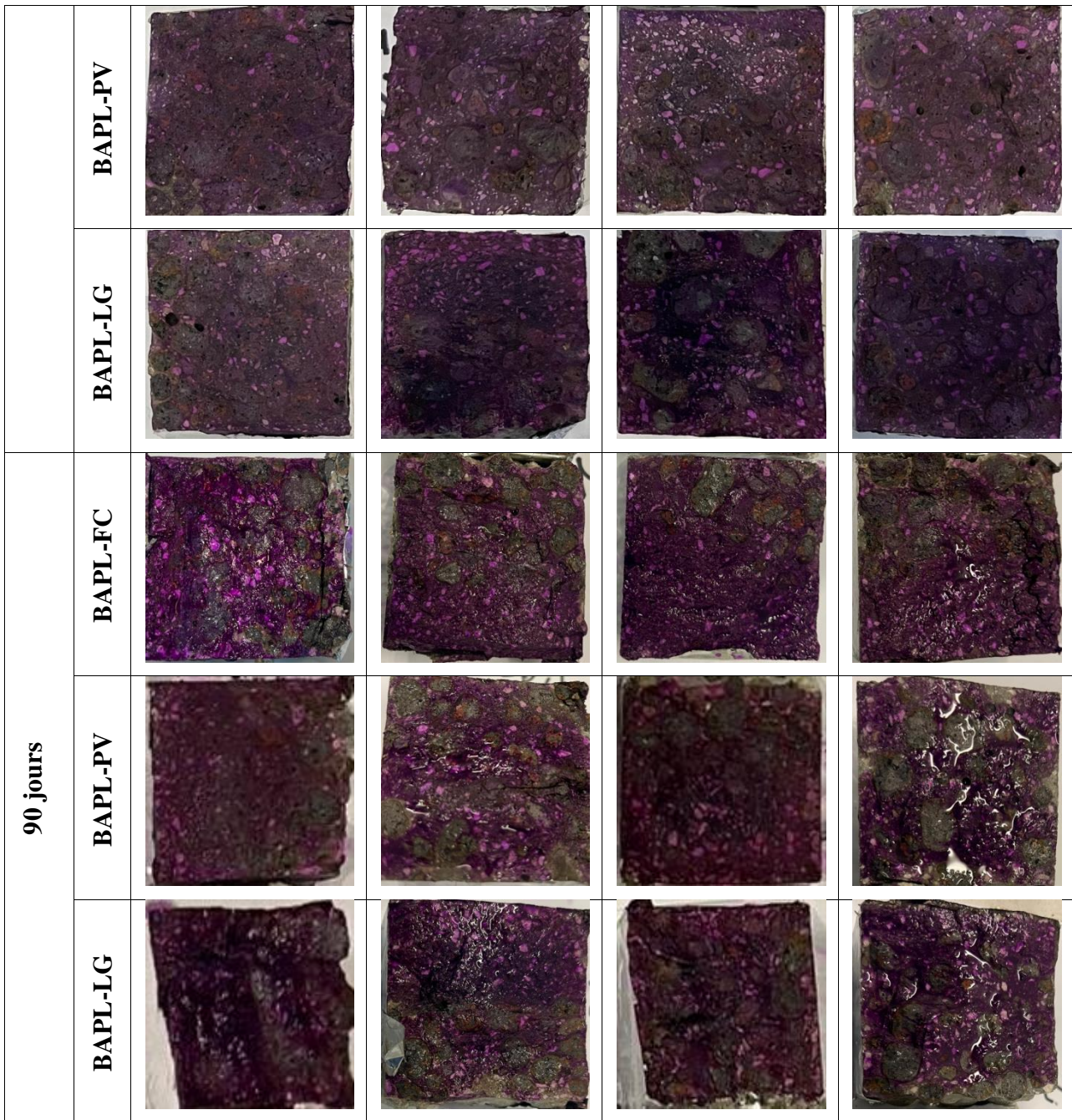


Figure 5.6. Photographies des éprouvettes après pulvérisation de phénolphthaléine aux échéances 7, 28 et 90 jours.

La non-carbonatation observée dans les BAPL peut s'expliquer en partie par la formation d'une microstructure plus dense, rendue possible grâce à un faible rapport E/C et à l'incorporation d'additions minérales, en particulier la PV et le LG. Par ailleurs, une durée de cure prolongée de 90 jours favorise le développement des réactions pouzzolaniques et hydrauliques latentes des additions réactives, tout en permettant une hydratation plus complète. Cette combinaison se traduit par une quantité accrue de produits d'hydratation et, par conséquent, par une meilleure compacité de la matrice cimentaire. Ce résultat est en accord avec les observations issues du suivi des masses, qui ont révélé une variation très limitée des poids, signe d'une faible formation de calcite résultant d'un début de carbonatation.

Bogas (Bogas, 2011) rapporte que, pour des rapports E/C inférieurs à 0,4, les profondeurs de carbonatation des bétons légers structurels et des bétons à granulats naturels demeurent insignifiantes, et que ces deux types de bétons présentent des performances similaires vis-à-vis de la carbonatation. En revanche, pour des rapports E/C plus élevés, la profondeur de carbonatation devient significative, et le béton conventionnel montre alors une meilleure résistance que le béton léger. D'autres travaux confirment ces tendances : Lo et al. (Lo et al., 2008b) et Haque et al. (Haque et al., 2004) ont mis en évidence une carbonatation plus faible dans les bétons légers que dans les bétons ordinaires de résistance comparable. Cette observation s'explique par le fait que, pour un même niveau de résistance, le béton léger présente généralement une matrice plus dense, liée à une teneur en ciment plus élevée et à un rapport E/C plus faible, ce qui limite sa perméabilité. Dans la même perspective, Lo et al. (Lo et al., 2008b) ont confirmé la meilleure résistance à la carbonatation du béton léger à base de GLAE par rapport au béton ordinaire de résistance équivalente. De leur côté, Bremner et al. (Bremner et al., 1994) ont montré que les profondeurs de carbonatation sont plus faibles dans le béton léger que dans le béton ordinaire de résistance équivalente, soulignant que la qualité de la pâte cimentaire constitue un facteur déterminant pour une bonne résistance à la carbonatation. Enfin, Al-Khaiat et Haque (Al-Khaiat et Haque, 1999) ont observé que, pour des durées de cure supérieures à une semaine, associées à des pâtes mieux hydratées, la résistance à la carbonatation devient comparable entre bétons légers et bétons ordinaires.

6. CONCLUSION

L'étude menée dans ce chapitre a permis d'évaluer l'effet de l'enrobage des GLAE et de l'incorporation d'additions minérales sur la durabilité des bétons autoplaçants légers. Plusieurs indicateurs ont été analysés, dont la porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire, la perméabilité aux gaz et la résistance à la carbonatation accélérée. Les principaux enseignements peuvent être résumés comme suit :

- **Porosité accessible à l'eau**
 - L'enrobage des GLAE réduit significativement la porosité globale des BAPL.
 - Les enrobages intégrant des additions réactives (PV, LG) se révèlent plus efficaces que la pâte de ciment seule, grâce à la formation de produits supplémentaires d'hydratation (C-S-H) qui densifient la microstructure.
- **Absorption d'eau par capillarité**
 - Les BAPL à base de GLAE enrobés présentent une absorption capillaire nettement plus faible que ceux à base de GLAE bruts.
 - La réduction est renforcée par l'usage de la PV et du LG, qui interrompent la continuité des pores capillaires et ralentissent la cinétique d'absorption.
- **Perméabilité à l'air**
 - L'enrobage des GLAE limite efficacement la perméabilité aux gaz, quel que soit le type d'addition utilisée.

- L'effet protecteur est plus marqué avec la PV et le LG, en raison de leur activité pouzzolanique ou hydraulique latente, conduisant à une microstructure plus compacte et moins perméable.

- **Résistance à la carbonatation accélérée**

- Aucun front de carbonatation n'a été observé après 90 jours d'exposition, traduisant une bonne compacité des BAPL étudiés.
- Les vitesses ultrasonores mesurées confirment une densification progressive de la microstructure, plus prononcée pour les BAPL avec enrobages réactifs.
- Les résultats concordent avec les études antérieures indiquant que, pour de faibles rapports E/C et des matrices denses, les bétons légers peuvent présenter une résistance à la carbonatation comparable, voire supérieure, à celle des bétons ordinaires.

Ces résultats montrent que l'enrobage des GLAE, particulièrement lorsqu'il est associé à des additions minérales réactives comme la PV et le LG, améliore sensiblement la durabilité des BAPL. Cette amélioration se manifeste par une réduction de la porosité, une moindre absorption capillaire, une meilleure étanchéité aux gaz et une résistance accrue à la carbonatation. Ainsi, l'association de l'enrobage et des additions réactives constitue une stratégie efficace pour renforcer la longévité et la performance des BAPL structurels.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans la problématique de l'optimisation des bétons autoplaçants légers (BAPL) à base de granulats légers d'argile expansée (GLAE), dont la porosité intrinsèque peut compromettre certaines propriétés mécaniques et durables. L'objectif principal a été d'examiner, à travers une approche expérimentale rigoureuse, l'influence de deux leviers d'amélioration, le conditionnement en humidité des GLAE et leur enrobage par des pâtes cimentaires réactives, sur le comportement des BAPL, tant à l'état frais et durci qu'en termes de durabilité.

Dans un premier temps, la caractérisation des matériaux et la présentation des protocoles expérimentaux ont permis d'établir un socle méthodologique robuste. Les propriétés physiques, chimiques et microstructurales des constituants, notamment des GLAE bruts et enrobés, ont été analysées afin de garantir la fiabilité et la comparabilité des résultats. Cette étape a constitué une base solide pour les investigations ultérieures.

L'étude de l'effet du conditionnement en humidité des GLAE a montré que l'état hygrométrique initial des granulats joue un rôle déterminant sur la rhéologie, la stabilité et les performances mécaniques des BAPL. Les résultats ont mis en évidence que des GLAE secs perturbent fortement la mise en œuvre, tandis qu'un excès d'humidité entraîne un relargage d'eau nuisible à la compacité et à la durabilité. Parmi les conditions étudiées, une pré-saturation de 5 minutes (PS-5min) s'est avérée être le compromis optimal, assurant à la fois une bonne ouvrabilité, une cohésion satisfaisante et des propriétés mécaniques adaptées à un usage structurel.

Dans un second axe, le traitement des GLAE par enrobages cimentaires a montré un potentiel remarquable pour améliorer leurs performances intrinsèques et, par conséquent, celles des BAPL. L'augmentation de l'épaisseur des couches d'enrobage a permis de réduire fortement la porosité et la capacité d'absorption des granulats, tout en renforçant leur résistance mécanique. Les effets bénéfiques ont été encore plus marqués avec l'utilisation d'additions réactives (poudre de verre, laitier granulé), grâce à la formation accrue de produits d'hydratation (C-S-H, C-A-S-H) densifiant la microstructure. Les BAPL élaborés avec ces granulats enrobés ont ainsi présenté une nette amélioration de leurs performances mécaniques et une réduction de la ségrégation, confirmant la pertinence de cette approche.

Enfin, l'évaluation de la durabilité a confirmé l'efficacité de l'enrobage et des additions minérales dans la maîtrise des propriétés de transfert. La porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire et la perméabilité aux gaz ont été sensiblement réduites, en particulier avec la poudre de verre et le laitier granulé. L'essai de carbonatation accélérée a montré l'absence de front de carbonatation après 90 jours d'exposition, traduisant une bonne compacité de la matrice et une résistance accrue à la carbonatation. Ces résultats démontrent que l'association de l'enrobage et des additions réactives constitue une stratégie efficace pour améliorer significativement la longévité des BAPL.

Dans l'ensemble, cette recherche a permis de mettre en évidence que le conditionnement en humidité des GLAE et leur enrobage par des mélanges cimentaires optimisés sont deux leviers complémentaires et synergiques pour améliorer les propriétés des BAPL. Ces travaux apportent une contribution scientifique et technique importante à la compréhension et au développement de bétons légers autoplaçants structurels performants et durables.

Perspectives

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche et de développement :

- **Optimisation de la formulation** : affiner les conditions de pré-saturation des GLAE et l'épaisseur optimale des enrobages, afin de concilier au mieux performances mécaniques, durabilité et légèreté des BAPL.
- **Évaluation à long terme** : approfondir l'étude de la durabilité dans des environnements agressifs variés (cycles gel/dégel, milieux sulfatés, chlorures) afin de confirmer le potentiel des BAPL enrobés dans des conditions de service réelles.
- **Analyse environnementale et économique** : réaliser des bilans énergétiques et des analyses de cycle de vie pour évaluer le rapport coût-bénéfice et l'impact carbone global de la technique d'enrobage à grande échelle.
- **Industrialisation du procédé** : développer des méthodes de mise en œuvre mécanisées (tambours rotatifs, tapis roulants continus) pour automatiser et homogénéiser le processus d'enrobage, en vue d'une application industrielle.
- **Innovations dans les matrices d'enrobage** : explorer l'utilisation de nouveaux ajouts cimentaires et de sous-produits industriels à faible empreinte carbone, afin de concilier performance, durabilité et performance environnementale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A
Abdizadeh, N., Zekavati, A., & Afshin, H. (2009). Mix design of structural self-compacting concrete using void-bulk density method. In <i>Third Int. Conf. Concr. Dev.</i> (pp. 999-1009).
Adhikary, S. K. (2022). The influence of pre-coated EGA and aerogel on the properties of lightweight self-compacting cementitious composites. <i>Materials Today Communications</i> , <i>31</i> , 103496.
Adhikary, S. K., Ashish, D. K., & Rudžionis, Ž. (2021). Expanded glass as light-weight aggregate in concrete—A review. <i>Journal of Cleaner Production</i> , <i>313</i> , 127848.
Adhikary, S. K., Ashish, D. K., Sharma, H., Patel, J., Rudžionis, Ž., Al-Ajamee, M., Thomas, B. S & Khatib, J. M. (2022). Lightweight self-compacting concrete: A review. <i>Resources, Conservation & Recycling Advances</i> , <i>15</i> , 200107.
Adhikary, S. K., Rudžionis, Ž., & Tučkutė, S. (2022). Characterization of novel lightweight self-compacting cement composites with incorporated expanded glass, aerogel, zeolite and fly ash. <i>Case studies in construction materials.</i> , <i>16</i> , 1-19.
Agwa, I. S., Omar, O. M., Tayeh, B. A., & Abdelsalam, B. A. (2020). Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , <i>235</i> , 117541.
Ahmad, M. H., & Noor, N. M. (2007, December). Physical properties of local palm oil clinker and fly ash. In <i>Engineering Conference</i> (p. 162).
Ahmadi, S. H., Mazloom, M., & Salehi, H. (2024). Total and initial fracture energies of self-compacting lightweight concrete containing silica fume and nano-silica. <i>Engineering Fracture Mechanics</i> , <i>308</i> , 110382.
Alexandre Bogas, J., Gomes, M. G., & Real, S. (2015). Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. <i>Materials and Structures</i> , <i>48</i> , 2869-2883.
Alexandre Bogas, J., Gomes, M. G., & Real, S. (2015). Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. <i>Materials and Structures</i> , <i>48</i> (9), 2869-2883.
Alim, M. I., & Mohiuddin, K. A. (2023). Micro-Characterization of Recycled Concrete Aggregate. <i>Journal of Engineering Science</i> , <i>14</i> (2), 145-155.
Al-Khaiat, H., & Haque, N. (1999). Strength and durability of lightweight and normal weight concrete. <i>Journal of materials in civil engineering</i> , <i>11</i> (3), 231-235.
Angelin, A. F., Lintz, R. C. C., Osorio, W. R., & Gachet, L. A. (2020). Evaluation of efficiency factor of a self-compacting lightweight concrete with rubber and expanded clay contents. <i>Construction and Building Materials</i> , <i>257</i> , 119573.
Ardakani, A., & Yazdani, M. (2014). The relation between particle density and static elastic moduli of lightweight expanded clay aggregates. <i>Applied Clay Science</i> , <i>93</i> , 28-34.
Aslani, F., & Kelin, J. (2018). Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber

aggregates exposed to elevated temperatures. <i>Journal of cleaner production</i> , 200, 1009-1025.
Assaad, J. J., & El Mir, A. (2020). Durability of polymer-modified lightweight flowable concrete made using expanded polystyrene. <i>Construction and Building Materials</i> , 249, 118764.
ASTM C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2022.
Azarsa, P., & Gupta, R. (2017). Resistivity of Concrete for Electrical Durability Evaluation: A Review. <i>Adv. Mater. Sci. Eng</i> , 2017, 1-30.
B
Badreddine-Bessa, A. (2004). <i>Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers</i> (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).
Balayssac, J. P. (1992). <i>Relations entre performances mécaniques, microstructure et durabilité des bétons</i> (Doctoral dissertation, Toulouse).
Barnat-Hunek, D., Góra, J., Andrzejuk, W., & Łagód, G. (2018). The microstructure-mechanical properties of hybrid fibres-reinforced self-compacting lightweight concrete with perlite aggregate. <i>Materials</i> , 11(7), 1093.
Bello, L. (2014). <i>Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables</i> (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
Bernier, G. (2004). <i>Formulation des bétons</i> . Ed. Techniques Ingénieur.
Bogas, J. A. (2011). Characterization of structural lightweight expanded clay aggregate concrete. <i>Lisbon: PhD thesis in civil engineering. Technical University of Lisbon, Instituto Superior Técnico</i> .
Bremner, T. W., Holm, T. A., & Stepanova, V. F. (1994). Lightweight Concrete-A Proven Material for Two Millennia. In <i>Advances in Cement and Concrete</i> (pp. 37-51). ASCE.
C
Cheboub, T., Senhadji, Y., Khelafi, H., & Escadeillas, G. (2020). Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 249, 119406.
Chen, Y., Wu, X., Yin, W., Tang, S., & Yan, G. (2023). Effects of Waste Glass Powder on Rheological and Mechanical Properties of Calcium Carbide Residue Alkali-Activated Composite Cementitious Materials System. <i>Materials</i> , 16(9), 3590.
Chibbaro, S., Costa, E., Dimitrov, D. I., Diotallevi, F., Milchev, A., Palmieri, D. & Succi, S. (2009). Capillary filling in Microchannels with wall corrugations: A comparative study of the Concus– Finn criterion by continuum, kinetic, and Atomistic approaches. <i>Langmuir</i> , 25(21), 12653-12660.
Chiou, J., Wang, K. S., Chen, C. H., & Lin, Y. T. (2006). Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. <i>Waste Management</i> , 26(12), 1453-1461.
Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2015). Use of synthetic fibers in self-compacting

lightweight aggregate concretes. <i>Journal of building engineering</i> , 4, 247-254.
Cui, H. Z., Lo, T. Y., Memon, S. A., & Xu, W. (2012). Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. <i>Construction and Building materials</i> , 35, 149.
D
Dayalan, J., & Buellah, M. (2014). Internal curing of concrete using prewetted light weight aggregates. <i>International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology</i> , 3(3), 10554-10560.
De Schutter, G., & Audenaert, K. (Eds.). (2007). <i>Report 38: Durability of Self-Compacting Concrete-State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 205-DSC</i> (Vol. 38). RILEM publications.
Diederich, P., Mouret, M., & Ponchon, F. (2013). Simple tools for achieving self-compacting ability of concrete according to the nature of the limestone filler. <i>Construction and Building Materials</i> , 48, 840-852.
Dixit, A., & Dai Pang, S. (2022). Optimizing lightweight expanded clay aggregate coating for enhanced strength and chloride resistance. <i>Construction and Building Materials</i> , 321, 126380.
Dolatabad, Y. A., Kamgar, R., & Tazangi, M. A. J. (2020). Effects of perlite, leca, and scoria as lightweight aggregates on properties of fresh and hard self-compacting concretes. <i>Journal of Advanced Concrete Technology</i> , 18(10), 633-647.
Domagała, L., & Bryła, E. (2021). The properties of lightweight aggregates pre-coated with cement pastes and their suitability for concrete. <i>Materials</i> , 14(21), 6417.
Domagała, L., & Podolska, A. (2022). Effect of lightweight aggregate impregnation on selected concrete properties. <i>Materials</i> , 15(1), 198.
Domone, P. L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. <i>Cement and concrete composites</i> , 28(2), 197-208.
Duplan, F., Abou-Chakra, A., Turatsinze, A., Escadeillas, G., Brule, S., & Masse, F. (2014). Prediction of modulus of elasticity based on micromechanics theory and application to low-strength mortars. <i>Construction and Building Materials</i> , 50, 437-447.
E
Elsharief, A., Cohen, M. D., & Olek, J. (2005). Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar. <i>Cement and Concrete research</i> , 35(7), 1368-1376.
Emerson, M. (1990). Mechanisms of water absorption by concrete. protection of concrete. proceedings of the international conference held at the university of dundee, 11-13. <i>Publication of: E and F Spon Limited</i> .
F
Famili, H., Saryazdi, M. K., & Parhizkar, T. (2012). Internal curing of high strength self consolidating concrete by saturated lightweight aggregate-effects on material properties. <i>International Journal of Civil Engineering</i> , 10(3), 210-221.
Faraj, R. H., Sherwani, A. F. H., Jafer, L. H., & Ibrahim, D. F. (2021). Rheological

behavior and fresh properties of self
Floyd, R. W., Hale, W. M., & Bymaster, J. C. (2015). Effect of aggregate and cementitious material on properties of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. <i>Construction and Building Materials</i> , 85, 91-99.
Fraj, A. B., Bonnet, S., & Khelidj, A. (2012). New approach for coupled chloride/moisture transport in non-saturated concrete with and without slag. <i>Construction and Building Materials</i> , 35, 761-771.
G
Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. <i>Construction and building materials</i> , 22(8), 1675
Ghanbari, M., Kohnehpooshi, O., & Tohidi, M. (2020). Experimental study of the combined use of fiber and nano silica particles on the properties of lightweight self compacting concrete. <i>Int. J. Eng</i> , 33(8), 1499
Golias, M., Castro, J., & Weiss, J. (2012). The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing. <i>Construction and Building Materials</i> , 35, 52-62.
Gopi, R., & Revathi, V. (2019). Influence of presaturated light expanded clay and fly ash aggregate in self compacting concrete. <i>Revista Romana de Materiale</i> , 49(3), 370-378.
Güneyisi, E., & Gesoğlu, M. (2008). A study on durability properties of high replacement levels of slag. <i>Materials and Structures</i> , 41(3), 479-493.
Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O. A., & Öz, H. Ö. (2015a). Physico-mechanical properties of self-compacting concrete containing treated cold-bonded fly ash lightweight aggregates and SiO ₂ nano-particles. <i>Construction and Building Materials</i> , 101, 1142-1153.
Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O. A., & Öz, H. Ö. (2016). Effect of nano silica on the workability of self
Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Booya, E., & Mermerdaş, K. (2015b). Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate. <i>Construction and Building Materials</i> , 74, 17-24.
H
Hadj-sadok, A., Kenai, S., Courard, L., & Darimont, A. (2011). Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag. <i>Construction and Building Materials</i> , 25(2), 1018-1025.
Han, F., Pu, S., Zhou, Y., Zhang, H., & Zhang, Z. (2022). Effect of ultrafine mineral admixtures on the rheological properties of fresh cement paste: A review. <i>Journal of Building Engineering</i> , 51, 104313.
Haque, M. N., Al-Khaiat, H., & Kayali, O. (2004). Strength and durability of lightweight concrete. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 26(4), 307-314.
Hemalatha, T., & Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics–Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. <i>Journal of cleaner production</i> , 147, 546.
Hilal, N., Hamah Sor, N., & Faraj, R. H. (2021). Development of eco-efficient lightweight

self-compacting concrete with high volume of recycled EPS waste materials. <i>Environmental Science and Pollution Research</i> , 28(36), 50028-50051.
Hu, Z., Wyrzykowski, M., Griffa, M., Scrivener, K., & Lura, P. (2020). Young's modulus and creep of calcium-silicate-hydrate compacts measured by microindentation. <i>Cement and Concrete Research</i> , 134, 106104.
Hubertova, M., & Hela, R. (2007). The effect of metakaolin and silica fume on the properties of lightweight self consolidating concrete. <i>Special Publication</i> , 243, 35-48.
K
Kadri, E. H., Aggoun, S., De Schutter, G., & Ezziane, K. (2010). Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. <i>Materials and structures</i> , 43(5), 665-673.
Kanadasan, J., & Razak, H. A. (2014). Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing. <i>Materials & Design (1980-2015)</i> , 56, 9-19.
Kanadasan, J., & Razak, H. A. (2015). Engineering and sustainability performance of self-compacting palm oil mill incinerated waste concrete. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 89, 78-86.
Karamloo, M., Mazloom, M., & Payganeh, G. (2016). Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 123, 508-515.
Karthika, R. B., Vidyapriya, V., Sri, K. N., Beaula, K. M. G., Harini, R., & Sriram, M. (2021). Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. <i>Materials Today: Proceedings</i> , 43, 1606-1613.
Kennedy, C. T. (1940). The design of concrete mixes. In <i>Journal Proceedings</i> (Vol. 36, No. 2, pp. 373-400).
Khaleel, O. R., Al-Mishhadani, S. A., & Razak, H. A. (2011). The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC). <i>Procedia Engineering</i> , 14, 805-813.
Kim, Y. H., Park, C. B., Choi, B. I., Shin, T. Y., Jun, Y., & Kim, J. H. (2020). Quantitative measurement of water absorption of coarse lightweight aggregates in freshly-mixed concrete. <i>International Journal of Concrete Structures and Materials</i> , 14, 1-9.
Klinkenberg, L. G. (1941). The permeability of porous media to liquids and gases, API Drilling and production practices, p200-213.
Kockal, N. U., & Ozturan, T. (2011). Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 33(1), 61-67.
Koňáková, D., Čáchová, M., Vejmelková, E., Keppert, M., Jerman, M., Bayer, P., & Černý, R. (2017). Lime-based plasters with combined expanded clay-silica aggregate: Microstructure, texture and engineering properties. <i>Cement and concrete composites</i> , 83, 374-383.
Kumar, P., Pasla, D., & Saravanan, T. J. (2023). Self-compacting lightweight aggregate concrete and its properties: A review. <i>Construction and Building Materials</i> , 375, 130861.
Lokesh, N. (2018). Structural properties of lightweight self-compacting concrete made with

pumice stone and mineral admixtures. <i>Revista Romana de Materiale</i> , 48(2), 208-213.
L
LAHKEGA, O. V. T. N. I., & STENAH, V. B. V. P. (2011). Evaluation of the strength variation of normal and lightweight self-compacting concrete in full scale walls. <i>Materiali in tehnologije</i> , 45(6), 571-577.
Li, J., Chen, Y., & Wan, C. (2017). A mix-design method for lightweight aggregate self-compacting concrete based on packing and mortar film thickness theories. <i>Construction and Building Materials</i> , 157, 621-634.
Li, N., Zhang, S., Long, G., Jin, Z., Yu, Y., Zhang, X., ... & Li, H. (2021). Dynamic Characteristics of Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete by Impact Resonance Method. <i>Advances in Civil Engineering</i> , 2021(1), 8811303.
Liu, X., Chia, K. S., & Zhang, M. H. (2011). Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 25(1), 335-343.
Liu, X., Wu, T., Yang, X., & Wei, H. (2019). Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. <i>Construction and Building Materials</i> , 226, 388-398.
Lo, T. Y., Cui, H. Z., Tang, W. C., & Leung, W. M. (2008a). The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 22(4), 623-628.
Lo, T. Y., Tang, P. W. C., Cui, H. Z., & Nadeem, A. (2007). Comparison of workability and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal self-compacting concrete. <i>Materials Research Innovations</i> , 11(1), 45-50.
Lo, T. Y., Tang, W. C., & Nadeem, A. (2008b). Comparison of carbonation of lightweight concrete with normal weight concrete at similar strength levels. <i>Construction and Building Materials</i> , 22(8), 1648-1655.
Lotfy, A., Hossain, K. M., & Lachemi, M. (2015). Lightweight self-consolidating concrete with expanded shale aggregates: Modelling and optimization. <i>International Journal of Concrete Structures and Materials</i> , 9, 185-206.
Lotfy, A., Hossain, K. M., & Lachemi, M. (2015). Lightweight self-consolidating concrete with expanded shale aggregates: Modelling and optimization. <i>International Journal of Concrete Structures and Materials</i> , 9(2), 185-206.
Lotfy, A., Hossain, K. M., & Lachemi, M. (2016). Mix design and properties of lightweight self-consolidating concretes developed with furnace slag, expanded clay and expanded shale aggregates. <i>Journal of Sustainable Cement-Based Materials</i> , 5(5), 297-323.
Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. <i>Cement and concrete research</i> , 41(12), 1244-1256.
Lydon, F. D. (1995). Effect of coarse aggregate and watercement ratio on intrinsic permeability of concrete subject to drying. <i>Cement and Concrete Research</i> , 25(8), 1737-1746.
M
Maharani, R., Yutaka, T., Yajima, T., & Minoru, T. (2010). Scrutiny on physical properties

of sawdust from tropical commercial wood species: Effects of Different Mills and Sawdust's Particle Size. <i>Indonesian Journal of Forestry Research</i> , 7(1), 20-32.
Malešev, M., Radonjanin, V., Lukić, I., & Bulatović, V. (2014). The effect of aggregate, type and quantity of cement on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete. <i>Arabian Journal for Science and Engineering</i> , 39, 705-711.
Matos, A. M., Ramos, T., Nunes, S., & Sousa-Coutinho, J. (2016). Durability enhancement of SCC with waste glass powder. <i>Materials Research</i> , 19(1), 67-74.
Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H., & Hosseinpour, I. (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 25(1), 351-358.
Medina, C., Frías, M., & De Rojas, M. S. (2012). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. <i>Construction and Building Materials</i> , 31, 112-118.
Mehrinejad Khotbehsara, M., Mohseni, E., Ozbakkaloglu, T., & Ranjbar, M. M. (2017). Retracted: durability characteristics of self-compacting concrete incorporating pumice and metakaolin. <i>Journal of materials in civil engineering</i> , 29(11), 04017218.
Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. <i>Journal of Building Engineering</i> , 29, 100888.
Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials.
Mejdi, M., Wilson, W., Saillio, M., Chaussadent, T., Divet, L., & Tagnit-Hamou, A. (2020). Quantifying glass powder reaction in blended-cement pastes with the Rietveld-PONKCS method. <i>Cement and Concrete Research</i> , 130, 105999.
Miled, K., Sab, K., & Le Roy, R. (2007). Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. <i>Mechanics of Materials</i> , 39(3), 222-240.
Müller, H. S., & Linsel, S. (2000). A New Type of High Performance Lightweight Concrete. <i>Materials for buildings and structures</i> , 6, 23-27.
Muralitharan, R. S., & Ramasamy, V. (2015). Basic properties of pumice aggregate. <i>International Journal of Earth Sciences and Engineering</i> , 8(4), 1845-1852.
Muthusamy, S., & Kolandasamy, P. (2015). Samozbijajući lagani beton na visokim temperaturama. <i>Građevinar</i> , 67(04.), 329-338.
N
NA 442, (2003). Cements: composition, specification and conformity criteria of common cements.
Nahhab, A. H., & Ketab, A. K. (2020). Influence of content and maximum size of light expanded clay aggregate on the fresh, strength, and durability properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with micro steel fibers. <i>Construction and Building Materials</i> , 233, 117922.
Nahi, S., Leklou, N., Khelidj, A., Oudjit, M. N., & Zenati, A. (2020). Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder. <i>Construction and Building Materials</i> , 262, 120875.
Naniz, O. A., & Mazloom, M. (2018). Effects of colloidal nano-silica on fresh and

hardened properties of self-compacting lightweight concrete. <i>Journal of Building Engineering</i> , 20, 400-410.
NF EN 1097-6: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: determination of particle density and water absorption, 2022.
NF EN 1097-6: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: determination of particle density and water absorption, 2022.
NF EN 12350-10: Testing fresh concrete - Part 10: self-compacting concrete - L box test, 2010.
NF EN 12350-11: Testing fresh concrete - Part 11: self-compacting concrete - Sieve segregation test, 2010.
NF EN 12350-6 : Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique, 2012.
NF EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: compressive strength of test specimens, 2019.
NF EN 12390-5: Testing hardened concrete - Part 5: flexural strength of test specimens, 2019.
NF EN 12504-4: Testing concrete in structures - Part 4: determination of ultrasonic pulse velocity, 2021.
NF EN 13055: Lightweight aggregates - Part 1: lightweight aggregates for concrete, mortar, and grout, 2016.
NF EN 13055: Lightweight aggregates - Part 1: lightweight aggregates for concrete, mortar, and grout, 2016.
NF EN 13057 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de l'absorption capillaire, 2002.
NF EN 196-3, (2017). Methods of testing cements – Part 3: determination of setting times and soundness.
NF EN 206+A2 : Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2021.
NF EN 206-9: Concrete - Part 9: additional rules for Self-Compacting Concrete (SCC), 2010.
NF EN 934-2+A1, (2012). Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labeling.
NF P 18-459: Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique, 2022.
Nikzad, Y., Mazloom, M., & Parhizkari, M. H. (2024). Effect of sand fineness modulus on SCC and SCLC properties. <i>Construction and Building Materials</i> , 421, 135761.
Nozahic, V., & Amziane, S. (2012). Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. <i>Composites Part A: Applied Science and Manufacturing</i> , 43(11), 1837-1849.
O
Ohno, H., Kawai, T., Kuroda, Y., & Ozawa, K. (1993). Development of vibration-free high strength lightweight concrete and its application. In <i>Proceeding of FIP symposium</i> (Vol. 1,

pp. 297-304).
Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. <i>Journal of advanced concrete technology</i> , 1(1), 5-15.
Omar, A. T., Ismail, M. K., & Hassan, A. A. (2020). Use of polymeric fibers in the development of semilightweight self-consolidating concrete containing expanded slate. <i>Journal of Materials in Civil Engineering</i> , 32(5), 04020067.
Ozguven, A., & Gunduz, L. (2012). Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. <i>Cement and Concrete composites</i> , 34(6), 781-787.
P
Panghal, H., & Kumar, A. (2024). Enhancing concrete performance: Surface modification of recycled coarse aggregates for sustainable construction. <i>Construction and Building Materials</i> , 411, 134432.
Papanicolaou, C. G., & Kaffetzakis, M. I. (2011). Lightweight aggregate self-compacting concrete: state-of-the-art & pumice application. <i>Journal of Advanced Concrete Technology</i> , 9(1), 15-29.
Paul, A., Murgadas, S., Delpiano, J., Moreno-Casas, P. A., Walczak, M., & Lopez, M. (2021). The role of moisture transport mechanisms on the performance of lightweight aggregates in internal curing. <i>Construction and Building materials</i> , 268, 121191.
Pierce, K. (2007). <i>Performance of Lightweight Aggregate in Self Consolidating Concrete: A Thesis</i> (Doctoral dissertation, University of Alabama in Huntsville).
Pla, C., Tenza-Abril, A. J., Valdes-Abellan, J., & Benavente, D. (2018). Influence of microstructure on fluid transport and mechanical properties in structural concrete produced with lightweight clay aggregates. <i>Construction and Building Materials</i> , 171, 388-396.
Polat, R., Demirboğa, R., Karakoç, M. B., & Türkmen, İ. (2010). The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze-thaw cycles. <i>Cold Regions Science and Technology</i> , 60(1), 51-56.
Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. <i>Cement and concrete research</i> , 34(1), 31-36.
Poongodi, K., & Murthi, P. (2021). Correlation between compressive strength and elastic modulus of light weight self-compacting concrete using coconut shell as coarse aggregate. <i>Australian Journal of Structural Engineering</i> , 22(2), 85-95.
Powers, T. C., Copeland, L. E., & Mann, H. M. (1959). <i>Capillary continuity or discontinuity in cement pastes</i> (No. 110).
R
Ramachandran, V. S. (1995). <i>Concrete admixtures handbook: properties, science and technology</i> . William Andrew.
Ranjbar, M. M., & Mousavi, S. Y. (2015). Strength and durability assessment of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. <i>Materials and Structures</i> , 48(4), 1001-1011.
Real, S., & Bogas, J. A. (2017). Oxygen permeability of structural lightweight aggregate

concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 137, 21-34.
Real, S., Bogas, J. A., & Pontes, J. (2015). Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders. <i>Construction and Building Materials</i> , 98, 425-436.
Richardson, I. G. (1999). The nature of CSH in hardened cements. <i>cement and concrete research</i> , 29(8), 1131-1147.
S
Schwarz, N., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. <i>Cement and Concrete Research</i> , 38(4), 429-436.
Sethy, K. P., Pasla, D., & Sahoo, U. C. (2016). Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 112, 581-587.
Shaban, W. M., Yang, J., Su, H., Liu, Q. F., Tsang, D. C., Wang, L., Xie, J., & Li, L. (2019). Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. <i>Construction and Building Materials</i> , 216, 632-647.
Shafiqh, P., Jumaat, M. Z., Mahmud, H. B., & Abd Hamid, N. A. (2012). Lightweight concrete made from crushed oil palm shell: Tensile strength and effect of initial curing on compressive strength. <i>Construction and Building Materials</i> , 27(1), 252-258.
Shi, C., & Wu, Y. (2005). Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. <i>ACI Materials Journal</i> , 102(5), 355.
Shi, C., Yang, X., Yu, Z., & Khayat, H. (2005). Design and application of self-compacting lightweight concretes. In <i>SCC'2005-China: 1st international symposium on design, performance and use of self-consolidating concrete</i> . RILEM Publications SARL (pp. 55-64).
Spiesz, P., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2013). Development of cement-based lightweight composites—Part 2: Durability-related properties. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 44, 30-40.
Sedran, T., & De Larrard, F. (1999, September). Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In <i>Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7</i> (pp. 321-332).
T
Ting, L., Qiang, W., & Shiyu, Z. (2019a). Effects of ultra-fine ground granulated blast-furnace slag on initial setting time, fluidity and rheological properties of cement pastes. <i>Powder Technology</i> , 345, 54-63.
Ting, T. Z. H., Rahman, M. E., & Lau, H. H. (2020). Sustainable lightweight self-compacting concrete using oil palm shell and fly ash. <i>Construction and Building Materials</i> , 264, 120590.
Ting, T. Z. H., Rahman, M. E., Lau, H. H., & Ting, M. Z. Y. (2019b). Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 201, 763-777.
Toutou, Z. (2002). <i>Rhéologie et formulation des géosuspensions concentrées: évaluation des conditions d'extrudabilité</i> (Doctoral dissertation, Rennes, INSA).

U
Uygunoğlu, T., & Topçu, İ. B. (2009). Thermal expansion of self-consolidating normal and lightweight aggregate concrete at elevated temperature. <i>Construction and Building Materials</i> , 23(9), 3063-3069.
V
Vahabi, M. Y., Tahmouresi, B., Mosavi, H., & Fakhretaha Aval, S. (2021). Effect of pre-coating lightweight aggregates on the self-compacting concrete. <i>Structural Concrete</i> , 23(4), 2120-2131.
Vargas, P., Restrepo-Baena, O., & Tobón, J. I. (2017). Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. <i>Construction and Building Materials</i> , 137, 381-389.
W
Wu, F., Yu, Q., Liu, C., Brouwers, H. J. H., & Wang, L. (2019). Effect of surface treatment of apricot shell on the performance of lightweight bio-concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 229, 116859.
Wu, Y., Liu, C., Liu, H., Hu, H., He, C., Song, L., & Huang, W. (2022). Pore structure and durability of green concrete containing recycled powder and recycled coarse aggregate. <i>Journal of Building Engineering</i> , 53, 104584.
Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., & Ding, Y. (2009). An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. <i>Construction and Building Materials</i> , 23(5), 2087-2092.
X
XP P18-458: Essai sur béton durci - Essai de carbonatation accélérée, 2022.
XP P18-463: Bétons - Essai de perméabilité aux gaz sur béton durci, 2011.
Y
Yew, M. K., Yew, M. C., Beh, J. H., Lee, F. W., Lim, S. K., Lee, Y. L., Lim, J. H., & Kabeer, K. S. A. (2023). Effect of Pre-Soaking Treatment Method of Plant-Based Aggregate on the Properties of Lightweight Concrete—Preliminary Study. <i>Coatings</i> , 13(5), 864.
Yew, M. K., Yew, M. C., Beh, J. H., Saw, L. H., & Lim, S. K. (2021). Effects of pre-treated on dura shell and tenera shell for high strength lightweight concrete. <i>Journal of Building Engineering</i> , 42, 102493.
Yunxing, S. H. I., Yasuo, T. A. N. I. G. A. W. A., Hiroshi, M. O. R. I., & Yoshiyuki, K. U. R. O. K. A. W. A. (1999). A study on effect of superfine powders on fluidity of cement paste. <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , 20, 9-14.
Z
Zarnaghi, V. N., Fouroghi-Asl, A., Nourani, V., & Ma, H. (2018). On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume. <i>Construction and Building Materials</i> , 193, 557-564.
Zhang, M. H., & Gjörv, O. E. (1990). Microstructure of the interfacial zone between

lightweight aggregate and cement paste. *Cement and Concrete Research*, 20(4), 610-618.

Zhang, S., Niu, D., Wang, Y., Tian, W., Luo, D., & Zhang, L. (2023). Insight into mechanical properties and microstructure of concrete containing steel slag and ground-granulated blast-furnace slag. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(9), 1169-1180.

Zhu, W., & Gibbs, J. C. (2005). Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1457-1462.