

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo-matériaux et Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Structures et matériaux de Génie Civil

DURABILITÉ DU BÉTON A BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ET CIMENT TERNAIRE

Par

BOUBAKEUR ASMAA

Devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| Yahiaoui Walid | MCA, U. de Blida 1 | Président |
| Omrane Mohammed | MCA, U. de Djelfa | Examineur |
| Hariche Lazhar | MCA, U. de Djelfa | Examineur |
| Menadi Belkacem | Prof, U. de Blida 1 | Directeur de thèse |
| Kouider Djelloul Omar | MCB, U. de Khemis Meliana | Co-directeur de thèse |
| Kenai Said | Prof, U. de Blida 1 | Invité |

Blida, 2024

RÉSUMÉ

Dans l'état actuel du monde, la pollution augmente très rapidement. Une de ses principales raisons est la production d'une grande quantité de ciment, ce qui entraîne le rejet de CO₂ dans l'environnement, ainsi que le dépôt de déchets de construction et de démolition sur les terres, ce qui provoque la pollution des sols. Afin de résoudre ce problème majeur, il est important de réduire l'utilisation du ciment en le remplaçant par des ajouts cimentaires tels que le laitier et le métakaolin et en utilisant des granulats recyclés pour remplacer les granulats naturels. Le présent travail vise à étudier l'effet combiné du laitier granulé de haut fourneau et du métakaolin (MK) sur les performances du béton autoplaçant recyclé (BAPR). Les granulats grossiers naturels (GGN) ont été remplacés par des granulats grossiers recyclés (GGR) à des taux de 50 % et 100 %, tandis que les granulats fins naturels (GFN) ont été partiellement substitués à 50 % par des granulats fins recyclés (GFR). Des essais à l'état frais ont été réalisés, notamment les essais d'étalement, du temps d'écoulement en entonnoir en V, de la boîte en L et de la stabilité au tamis. Les propriétés mécaniques et de durabilité telles que la résistance à la compression, la vitesse d'auscultation sonore, la perméabilité à l'eau, la porosité, l'absorption d'eau et la perméabilité aux ions chlorure ont également été mesurées. Les résultats expérimentaux montrent que l'utilisation combinée de laitier et de MK dans les mélanges de BAPR satisfaisait aux exigences de l'EFNARC en matière de capacité de remplissage, de capacité de passage et de résistance à la ségrégation. A l'état durci, les propriétés mécaniques diminuent avec l'incorporation de granulats recyclés. L'absorption d'eau, la porosité, la perméabilité aux ions chlorure présentent des valeurs plus élevées pour les mélanges de BAP à base de granulats recyclés. Cependant, l'utilisation combinée de laitier et de MK dans le BAPR réduit significativement l'absorption d'eau, la porosité et la perméabilité aux ions chlorure. Le pourcentage optimal de remplacement par le laitier et le MK est de 15%, car les mélanges de BAPR présentent les meilleures performances à ce niveau de remplacement. Il est possible de produire du BAP durable en utilisant un maximum de granulats recyclés, sans affecter significativement les critères de résistance.

Mots clés : Béton autoplaçant, Granulats recyclés, Laitier, Métakaolin, Propriétés mécaniques, Propriétés de durabilité.

ABSTRACT

In the current state of the world, pollution is increasing very rapidly. One of its main reasons is the production of a large quantity of cement, which results in the release of CO₂ into the environment, as well as the deposition of construction and demolition waste on land, leading to soil pollution. To address this major issue, it is important to reduce the use of cement by replacing it with cementitious additives such as slag and metakaolin, and by using recycled aggregates to replace natural aggregates. The present study aims to investigate the combined effect of granulated blast furnace slag and metakaolin (MK) on the performance of recycled self-compacting concrete (RSCC). Coarse natural aggregates (CNA) were replaced by coarse recycled concrete aggregates (CRA) at rates of 50% and 100%, while fine natural aggregates (FNA) were partially substituted at 50% by fine recycled concrete aggregates (FRA). Fresh state tests were conducted, including slump tests, V-funnel flow time tests, L-box tests, and sieve stability tests. Mechanical and durability properties such as compressive strength, sonic pulse velocity, water permeability, porosity, water absorption, and chloride ion permeability were also measured. The experimental results show that the combined use of slag and MK in RSCC mixes met the EFNARC requirements for filling capacity, passing ability, and resistance to segregation. In the hardened state, mechanical properties decrease with the incorporation of recycled aggregates. Water absorption, porosity, and chloride ion permeability show higher values for RSCC mixes based on recycled aggregates. However, the combined use of slag and MK in RSCC significantly reduces water absorption, porosity, and chloride ion permeability. The optimal replacement percentage for slag and MK is 15%, as RSCC mixes exhibit the best performance at this level of replacement. It is possible to produce sustainable RSCC using a maximum of recycled aggregates without significantly affecting strength criteria.

Keywords: Self-compacting concrete, Recycled aggregates, Slag, Metakaolin, Mechanical properties, Durability properties.

ملخص

في الوقت الحالي يزداد التلوث بسرعة كبيرة في العالم. واحدة من أسبابه الرئيسية هي إنتاج كميات كبيرة من الاسمنت، مما يؤدي الى انبعاث ثاني أكسيد الكربون في البيئة، بالإضافة الى تراكم نفايات البناء والهدم على الأراضي، مما يسبب تلوث التربة. من أجل حل هذه المشكلة الكبيرة، من المهم تقليل استخدام الاسمنت من خلال استبداله بإضافات الاسمنت مثل خبث الأفران والميتاكاولين واستخدام الحصى معاد تدويره ليحل محل الحصى الطبيعي. يهدف العمل الحالي الى دراسة التأثير المشترك لخبث الأفران والميتاكاولين على أداء الخرسانة المرصوفة ذاتيا القائمة على المجاميع المعاد تدويرها. تم استبدال المجاميع الطبيعية الخشنة بمجمعات خرسانية خشنة معاد تدويرها بمعدلات 50% و 100%، بينما تم استبدال المجاميع الطبيعية الدقيقة جزئيا بنسبة 50% بمجمعات خرسانية دقيقة معاد تدويرها. تم اجراء اختبارات في الحالة السائلة بما في ذلك اختبار الانتشار، اختبار زمن التدفق للقمع على شكل V، اختبار العلبة على شكل حرف L واختبار استقرار المنخل. كما تم قياس الخصائص الميكانيكية والمتانة مثل مقاومة الضغط، سرعة الموجات فوق الصوتية، نفاذية الماء، المسامية، امتصاص الماء ونفاذية الكلوريد. تظهر النتائج التجريبية أن الاستخدام المشترك للخبث والميتاكاولين في مخاليط الخرسانة المرصوفة ذاتيا القائمة على المجاميع المعاد تدويرها يلبي متطلبات EFNARC من حيث قدرة الملء، القدرة على المرور ومقاومة الفصل. في الحالة الصلبة، تنخفض الخصائص الميكانيكية مع ادراج الحصى معاد تدويره. تظهر قيم امتصاص الماء، المسامية والنفاذية الكلوريد لمخاليط الخرسانة المرصوفة ذاتيا القائمة على المجاميع المعاد تدويرها قيما اعلى. غير أن استخدام المشترك للخبث والميتاكاولين في الخرسانة المرصوفة ذاتيا القائمة على المجاميع المعاد تدويرها يقلل بشكل كبير من امتصاص الماء، المسامية ونفاذية الكلوريد. النسبة المثلى للاستبدال بالخبث والميتاكاولين هي 15%، حيث تظهر خلائط الخرسانة المرصوفة ذاتيا القائمة على المجاميع المعاد تدويرها أفضل الأداء عند هذا المستوى من الاستبدال. لذلك من الممكن انتاج خرسانة مرصوفة ذاتيا مستدامة باستخدام الحد الأقصى من المجاميع المعاد تدويرها دون التأثير بشكل كبير على معايير القوة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المرصوفة ذاتيا، المجاميع المعاد تدويرها، الخبث، الميتاكاولين، الخصائص الميكانيكية، خصائص المتانة.

Je tiens à remercier Monsieur Fortas Abdelkader, Madame Barbara Amina, Madame Gout Ahlem et toute l'équipe du laboratoire de Géomatériaux et de Génie Civil de l'Université de Blida 1. Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du département de Génie Civil de l'Université de Blida 1, qu'il s'agisse d'enseignants, de chercheurs, de techniciens ou de personnel administratif, avec lesquels j'ai eu le plaisir de travailler.

Je remercie tous mes collègues de travail, Bayah Meriem, Maameri Nor El houda, Mouhous Chahrazed, Boutheldja Ines, pour leur aide et leur gentillesse spontanée, ainsi que pour tous les moments que nous avons traversés ensemble, sans oublier de remercier tous mes amis de promotion.

Mes vifs remerciements du fond du cœur vont à ma famille, à mes sœurs, à mes frères, et en particulier à mes parents qui m'ont soutenu durant mes études, m'ont toujours encouragé, et dont la générosité est inestimable.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GÉNÉRALE 19

**CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GRANULATS
RECYCLÉS ET LES AJOUTS CIMENTAIRES DANS L'INDUSTRIE DU BÉTON.. 23**

1.1 Introduction 23

1.2 Problèmes environnementaux et émissions de CO₂ 23

1.2.1 Production de ciment et son émission de CO₂ dans le monde 24

1.2.2 Production de ciment et son émission de CO₂ en l'Algérie 25

1.3 Béton à base des granulats de béton recyclé..... 27

1.3.1 Recyclage des déchets de construction et de démolition dans le monde 27

1.3.2 Caractéristiques des granulats recyclés 28

1.3.3 Influence des granulats de béton recyclé sur l'ouvrabilité..... 30

1.3.4 Influence des granulats de béton recyclé sur les propriétés mécaniques 35

1.3.5 Influence des granulats de béton recyclé sur la durabilité des bétons..... 44

1.4 Béton à base de granulats de béton recyclé et d'ajouts cimentaires 54

1.4.1 Influence des granulats recyclés et des ajouts cimentaires sur l'ouvrabilité..... 55

1.4.2 Influence des granulats recyclés et ajouts cimentaires sur les résistances
mécaniques..... 57

1.4.3 Influence des granulats recyclés et des ajouts cimentaires sur la durabilité de
béton 64

1.5 Synthèse Bibliographique..... 75

CHAPITRE 2 MATÉRIAUX ET ESSAIS 77

2.1 Introduction 77

2.2 Caractérisation des matériaux utilisés 77

2.2.1 Ciment 77

2.2.2 Laitier 77

2.2.3 Métakaolin..... 78

2.2.4 Sable 82

2.2.5 Gravier 82

2.2.6 Granulats recyclés 82

2.2.7 Superplastifiant..... 85

| | | |
|---|--|------------|
| 2.2.8 | Eau de gâchage | 85 |
| 2.3 | Formulation | 85 |
| 2.3.1 | Formulation du mortier autoplaçant | 85 |
| 2.3.2 | Formulation du béton autoplaçant | 86 |
| 2.4 | Procédure de malaxage | 87 |
| 2.4.1 | Mortier autoplaçant | 87 |
| 2.4.2 | Béton autoplaçant | 87 |
| 2.5 | Essais sur mortier autoplaçant | 88 |
| 2.5.1 | Essai d'étalement au mini-cône | 88 |
| 2.5.2 | Essai d'entonnoir en V (V-funnel) | 88 |
| 2.6 | Essais sur béton autoplaçant à l'état frais | 89 |
| 2.6.1 | Essai d'étalement et T500 | 89 |
| 2.6.2 | Essai d'entonnoir en V (V-funnel) | 90 |
| 2.6.3 | Essai de la boîte en L (L-Box) | 91 |
| 2.6.4 | Essai de stabilité au tamis | 92 |
| 2.7 | Essais sur béton autoplaçant à l'états durci | 93 |
| 2.7.1 | Résistance à la compression | 93 |
| 2.7.2 | Essai de Vitesse d'auscultation sonique (VAS) | 93 |
| 2.7.3 | L'absorption par capillarité | 94 |
| 2.7.4 | Essai de Porosité | 95 |
| 2.7.5 | Essai de Perméabilité aux ions chlorures | 96 |
| 2.7.6 | Perméabilité à l'eau | 98 |
| 2.8 | Récapitulatif du programme des essais réalisées | 99 |
| CHAPITRE 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION | | 102 |
| 3.1 | Introduction | 102 |
| 3.2 | Optimisation des rapports S/M et SP/L | 102 |
| 3.2.1 | Effet du superplastifiant sur l'étalement au mini cône | 103 |
| 3.2.2 | Effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel) | 104 |
| 3.3 | Effet combiné des ajouts (laitier/MK) sur les propriétés des BAPR à l'état frais ... | 105 |
| 3.3.1 | Étalement au cône d'Abrams | 105 |
| 3.3.2 | Temps d'écoulement T500 et le temps à l'entonnoir en V | 108 |
| 3.3.3 | Mesure du rapport (H2/H1) de l'essai de la boîte en L (L-Box) | 111 |
| 3.3.4 | Résistance à la ségrégation | 113 |
| 3.4 | Effet combiné des ajouts (laitier/MK) sur les propriétés des BAPR à l'état durci.. | 115 |
| 3.4.1 | Résistance à la compression | 115 |

| | | |
|---|--|------------|
| 3.4.2 | Vitesse d'auscultation sonore | 119 |
| 3.4.3 | Absorption d'eau par capillarité | 121 |
| 3.4.4 | Porosité..... | 125 |
| 3.4.5 | Perméabilité à l'eau | 130 |
| 3.4.6 | Pénétration aux ions chlorures | 133 |
| 3.5 | Corrélations entre les propriétés du béton autoplaçant..... | 137 |
| 3.5.1 | Corrélation entre la résistance à la compression et VAS | 137 |
| 3.5.2 | Corrélation entre résistance à la compression et la porosité | 138 |
| 3.5.3 | Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la porosité..... | 138 |
| 3.5.4 | Corrélation entre la profondeur de pénétration et la porosité..... | 138 |
| 3.6 | Conclusion : | 140 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES..... | | 142 |
| RÉFÉRENCES..... | | 146 |
| Annexes | | 169 |
| Annexe A | | 170 |
| Annexe B | | 172 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Intensité directe en CO ₂ du ciment dans le scénario de développement durable, 2014-2030..... | 24 |
| Figure 1.2 : Production mondiale de ciment, 2010-2020..... | 25 |
| Figure 1.3 : Schéma des granulats de béton recyclé..... | 29 |
| Figure 1.4 : Etalement et temps d'écoulement en fonction du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés. | 31 |
| Figure 1.5 : Résultats de l'essai d'étalement et de temps d'écoulement | 33 |
| Figure 1.6 : Effet des GR sur l'étalement, le temps d'écoulement T500, le temps d'écoulement T _{vf} et le rapport H ₂ /H ₁ | 34 |
| Figure 1.7 : Evolution de la résistance à la compression dans des échantillons de béton..... | 35 |
| Figure 1.8 : Résultats de résistance à la compression à 7,28 et 91 jours du BAP..... | 36 |
| Figure 1.9 : Résistance à la compression du BAP avec et sans granulats recyclés..... | 37 |
| Figure 1.10 : Résistance à la traction par fendage des mélanges de BAP..... | 39 |
| Figure 1.11 : Résultats de résistance à la traction des mélanges de BAPR..... | 40 |
| Figure 1.12 : Résistance à la traction des mélanges à 28 et 91 jours. | 40 |
| Figure 1.13 : Résistance à la traction à 28 jours..... | 41 |
| Figure 1.14 : Relation entre les modules d'élasticité dynamique et statique. | 43 |
| Figure 1.15 : Module d'élasticité statique et dynamique de différents types de béton. | 44 |
| Figure 1.16 : Absorption d'eau des BAP contenant des quantités variables de GR. | 45 |
| Figure 1.17 : Coefficient de capillarité de l'eau des mélanges de BAP..... | 46 |
| Figure 1.18 : Perméabilité à l'oxygène en fonction du rapport E/C pour différents degrés de substitution après 28 jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c). | 47 |
| Figure 1.19 : Effet des granulats recyclés sur la résistance à la pénétration du chlorure du BAP. | 49 |
| Figure 1.20 : Effet des GR sur la réduction de la résistance et la perte de masse..... | 50 |
| Figure 1.21 : Influence de l'incorporation de (a) GGR, (b) GFR et (c) GGR et GFR sur la profondeur de carbonatation des mélanges de béton..... | 52 |
| Figure 1.22 : Évolution de la profondeur de carbonatation de béton pour différents rapports eau-ciment à 28 jours. | 53 |
| Figure 1.23 : Maniabilité du béton recyclé avec du laitier..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Figure 1.24 : Affaissement des mélanges de granulats de béton recyclé avec différents taux de laitier..... | 56 |
| Figure 1.25 : Influence des granulats recyclés et des ajouts cimentaires sur l'étalement. | 57 |
| Figure 1.26 : Résultats de la résistance à la compression à 28 jours..... | 59 |
| Figure 1.27 : Variation de la résistance à la compression (CS), de la résistance à la traction par fendage (STS) et de la résistance à la flexion (FS) par rapport au mélange de béton témoin.. | 60 |
| Figure 1.28 : Effets des granulats recyclés et de la teneur en pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction. | 61 |
| Figure 1.29 : Développement du module d'élasticité en fonction des ajouts cimentaires. | 63 |
| Figure 1.30 : Effet des granulats recyclés sur le module d'élasticité d'échantillons contenant du métakaolin et du calcaire..... | 63 |
| Figure 1.31 : Absorption d'eau de différents mélanges..... | 65 |
| Figure 1.32 : Volume des pores – courbe de distribution différentielle et intégrale de la taille des pores..... | 66 |
| Figure 1.33 : Perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR. | 66 |
| Figure 1.34 : Coefficient de migration des chlorures de béton contenant des granulats naturels et recyclés en fonction de taux de bentonite à 90 jours..... | 68 |
| Figure 1.35 : Pénétration des chlorures après 28 et 90 jours d'immersion dans une solution à 10% de NaCl. | 69 |
| Figure 1.36 : Profondeur de pénétration des chlorures pour différents mélanges..... | 70 |
| Figure 1.37 : Images MEB du béton avec des cendres de balle de riz avant (a) et après (b) exposition à l'acide. | 71 |
| Figure 1.38 : Effet de laitier et de GR sur la résistance à l'acide du béton. | 72 |
| Figure 1.39 : Perte de masse due à l'attaque de H ₂ SO ₄ à 28, 56, 90 et 120 jours. | 73 |
| Figure 2.1 : Analyse minéralogique par DRX du laitier. | 79 |
| Figure 2.2 : Analyse minéralogique par DRX du métakaolin..... | 79 |
| Figure 2.3 : Images MEB et spectres EDS de laitier (A et B) et de métakaolin (C et D). | 81 |
| Figure 2.4 : Courbe granulométrique du sable et graviers naturels. | 83 |
| Figure 2.5 : Courbe granulométrique du sable et graviers recyclés. | 83 |
| Figure 2.6 : Procédure de fabrication de granulats recyclés. | 84 |
| Figure 2.7 : Séquence de malaxage du BAP. | 88 |
| Figure 2.8 : Essai d'étalement pour mortier. | 88 |
| Figure 2.9 : Essai d'étalement des BAP. | 89 |

| | |
|---|-----|
| Figure 2.10 : Essai de temps d'écoulement a l'entonnoir en V..... | 90 |
| Figure 2.11 : Essai de la boîte en L. | 91 |
| Figure 2.12 : Essai de stabilité au tamis. | 92 |
| Figure 2.13 : Mesure de la vitesse d'auscultation sonique..... | 94 |
| Figure 2.14 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité. | 95 |
| Figure 2.15 : Essai de porosité. | 96 |
| Figure 2.16 : Essai de perméabilité aux ions chlorure. | 97 |
| Figure 2.17 : Essai de perméabilité à l'eau. | 98 |
| Figure 2.18 : Organigramme de la procédure expérimentale..... | 100 |
| Figure 3.1 : Etalement et temps d'écoulement Tv de mortier en fonction de dosage en SP.. | 104 |
| Figure 3.2 : Effet combiné du laitier et du MK sur l'étalement des BAPR. | 108 |
| Figure 3.3 : Effet combiné du laitier et du MK sur le temps d'écoulement T500 et le temps à l'entonnoir en V de BAPR. | 110 |
| Figure 3.4 : Relation entre le temps d'écoulement à l'entonnoir en V en fonction du temps d'écoulement T500..... | 111 |
| Figure 3.5 : Effet combiné du laitier et du MK sur le rapport H2/H1 de BAPR. | 113 |
| Figure 3.6 : Effet combiné du laitier et du MK sur la stabilité au tamis de BAPR..... | 114 |
| Figure 3.7 : Variation de la résistance à la compression en fonction du temps. | 116 |
| Figure 3.8 : Comparaison des résultats de résistances à la compression à 90 jours avec des études précédentes..... | 117 |
| Figure 3.9 : Variation de la résistance à la compression à 90 jours par rapport au mélange de béton témoin..... | 118 |
| Figure 3.10 : Vitesse d'auscultation sonique des différents BAP. | 120 |
| Figure 3.11 : Effet combiné du laitier et du MK sur l'absorption d'eau par capillarité du BAPR. | 124 |
| Figure 3.12 : Effet combiné du laitier et du MK sur la sportivité du BAPR..... | 124 |
| Figure 3.13 : Effet combiné du laitier et du MK sur la porosité du BAPR..... | 125 |
| Figure 3.14 : Images au microscope électronique à balayage des mélanges : (a) 100/50R0L0MK, (b) 100/50R15L5MK, (c) 100/50R15L10MK et (d) 100/50R15L15MK.. | 129 |
| Figure 3.15 : Effet combiné du laitier et du MK sur la profondeur de pénétration d'eau du BAPR. | 132 |
| Figure 3.16 : Variation de la profondeur de pénétration par rapport au mélange de béton témoin (0/0R0L0MK)..... | 132 |

| | |
|--|-----|
| Figure 3.17 : Effet combiné du laitier et du MK sur la résistance à la pénétration du chlorure du BAPR. | 136 |
| Figure 3.18 : Variation de la charge totale passée par rapport au mélange de béton témoin (0/0R0L0MK)..... | 136 |
| Figure 3.19 : Corrélation établie entre la résistance à la compression et VAS. | 137 |
| Figure 3.20 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité. | 138 |
| Figure 3.21 : Corrélation entre la porosité et la charge totale passée..... | 139 |
| Figure 3.22 : Corrélation entre la porosité et la profondeur de pénétration. | 139 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 1.1: Répartition des cimenteries par région..... | 26 |
| Tableau 1.2: Evolution de la production nationale de ciment..... | 26 |
| Tableau 1.3 : Quantité de déchets de construction et de démolition et taux de recyclage pour différents pays. | 28 |
| Tableau 1.4 : Absorption des granulats recyclés et des granulats naturels rapportée par différents chercheurs..... | 30 |
| Tableau 1.5 : Résultats des propriétés du BAP à l'état frais. | 32 |
| Tableau 1.6 : Remplacement optimal de GR sur la base de résistance à la compression des bétons selon de nombreuses études. | 38 |
| Tableau 1.7 : Résultats des propriétés mécaniques du BAP. | 42 |
| Tableau 1.8 : Résultats de la diffusion des chlorures à 28 et 91 jours. | 49 |
| Tableau 1.9 : Pourcentage de diminution de la résistance à la compression du béton recyclé avec l'ajout de laitier. | 58 |
| Tableau 1.10 : Module d'élasticité (résultats et valeurs normalisées). | 62 |
| Tableau 1.11 : Résultats de l'absorption d'eau et la pénétration d'eau..... | 64 |
| Tableau 1.12 : Résultats de l'essai de pénétration rapide des chlorures. | 67 |
| Tableau 2.1 : Compositions chimiques et propriétés physiques du ciment, du laitier et du métakaolin. | 78 |
| Tableau 2.2 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés..... | 82 |
| Tableau 2.3 : Composition des différents BAP étudiés. | 86 |
| Tableau 2.4 : Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorure. | 97 |
| Tableau 2.5 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau. | 98 |
| Tableau 3.1 : Composition du mortier en fonction des rapports S/M et SP/L. | 102 |
| Tableau 3.2 : Résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs du rapport..... | 103 |
| Tableau 3.3 : Valeurs recommandées pour les essais du BAP..... | 105 |

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

| | |
|--------------------------------|--|
| A | Quantité d'air (m ³) |
| A _{bs} | Coefficient d'absorption du sable |
| A _{bG} | Coefficient d'absorption du gravier |
| Al ₂ O ₃ | Alumine |
| BAP | Béton autoplaçant |
| BAPR | Béton autoplaçant recyclé |
| C ₃ A | Aluminate tricalcique (célite) |
| CaO | Oxyde de calcium |
| C | Coefficient d'absorption capillaire |
| C ₃ S | Silicate tricalcique (Alite) |
| C ₂ S | Silicate bicalcique (bélite) |
| C ₄ AF | Alumino-ferrite tétracalcique |
| Ca CO ₃ | Carbonate de calcium |
| Ca(OH) ₂ | Portlandite |
| CEM II/B 42.5 | Ciment Portland composé de Classe 42,5 |
| Cl ⁻ | Les ions chlorure |
| CNA | Coarse natural aggregate |
| CRA | Coarse recycled aggregate |
| CV | Cendre volante |
| CH | Hydroxyde de calcium |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone |
| C-S-H | Silicate de calcium hydraté |
| DCD | Déchets de construction et de démolition |
| DM | Déchets de marbre |
| DRX | Diffraction des rayons X |
| D _{max} | Diamètre maximal des granulats |
| E | Eau |
| EDS | Spectroscopie de dispersion d'énergie |

| | |
|----------------------------------|--|
| E/C | Eau/Ciment |
| E/L | Eau/Liant |
| E/P | Eau/Poudre |
| FNA | Fine natural aggregate |
| FRA | Fine recycled aggregate |
| FS | Fumée de silice |
| G | Gravier |
| GFN | Granulat fin naturel |
| GFR | Granulat fin recyclé |
| GGN | Granulat grossier naturel |
| GGR | Granulat grossier recyclé |
| GN | Granulat naturel |
| GR | Granulat recyclé |
| G/S | Gravier/Sable |
| G_{lim} | Volume absolu 1 m ³ de gros granulats |
| H ₂ /H ₁ | Taux de remplissage |
| H ₂ SO ₄ | Acide sulfurique |
| ITZ | Interfacial transition zone |
| MAP | Mortier autoplaçant |
| MEB | Microscopie électronique à balayage |
| MK | Métakaolin |
| NaOH | Hydroxyde de sodium |
| Na ₂ SO ₄ | Sulfate de sodium |
| Na ₂ SiO ₃ | Silicate de sodium |
| P | Poudre (Ciment+ajout) |
| PZ | Pouzzolane |
| r ₁ | Diamètres d'étalement (xx) |
| r ₂ | Diamètres d'étalement (yy) |
| SCC | Self-Compacting Concrete |
| SiO ₂ | Silice |

| | |
|--------------|--|
| SO_3 | Trioxide de soufre |
| S/M | Sable/Mortier |
| Sp | Superplastifiant |
| Sp/L | Superplastifiant/Liant |
| T_{50} | Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm (sec) |
| T_{vf} | Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec) |
| V_p | Volume de pâte (m^3) |
| V_w | Volume d'eau (m^3) |
| Π | Pourcentage de laitance |
| ρ_{app} | Masse volumique apparente |
| ρ_{abs} | Masse volumique absolue |
| ρ_c | Masse volumique du ciment |
| ρ_E | Masse volumique d'eau |
| ρ_G | Masse volumique du gravier |
| ρ_s | Masse volumique du sable |
| ρ_{PS} | Masse volumique du superplastifiant |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, la production et la consommation de béton ont connu une croissance significative en raison de leur énorme potentiel d'utilisation dans le domaine de la construction. La production annuelle moyenne de béton est d'environ une tonne par habitant à l'échelle mondiale. Cette quantité importante de production de béton soulève des préoccupations environnementales majeures, notamment l'épuisement des granulats naturels, car ces derniers constituent environ 60 à 75% du volume du béton. Par conséquent, de nombreux pays à travers le monde sont confrontés à une pénurie de granulats naturels. De plus, la production de granulats et de béton entraîne des émissions de CO₂, de poussières et d'autres gaz nocifs qui causent la pollution de l'environnement.

Par ailleurs, une énorme quantité de déchets de construction et de démolition est générée chaque année dans le monde entier en raison de la démolition, de l'entretien et de la reconstruction de diverses structures de génie civil. La manière la plus courante de gérer ces déchets est encore l'enfouissement ou le dépôt dans des endroits vacants. Cela entraîne une immense pénurie d'espaces d'enfouissement et une augmentation des coûts de transport et d'élimination. Par conséquent, de nombreux pays optent pour le recyclage et la réutilisation de ces déchets de béton comme une alternative aux granulats naturels. Cette démarche permet non seulement de réduire le besoin d'espaces d'enfouissement, mais également de résoudre de nombreux problèmes environnementaux et de ressources.

Bien que l'utilisation de granulats recyclés (GR) présente plusieurs avantages environnementaux et économiques, son utilisation dans la production de béton structurel n'est pas encore courante. La raison peut être les propriétés négatives des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Des recherches antérieures ont confirmé que les granulats recyclés présentaient des propriétés inférieures telles qu'une granulométrie médiocre, une absorption d'eau élevée, des structures poreuses et une densité plus faible en raison du mortier résiduel adhérent à leur surface.

La possibilité de remplacer les granulats naturels par des granulats recyclés a été étudiée par plusieurs chercheurs. Les résultats ont montré qu'avec des taux de remplacement faibles, le béton recyclé présente des performances comparables à celles du béton naturel. Cependant, l'incorporation de granulats recyclés à des dosages élevés a un effet négatif sur les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et à la traction, le module d'élasticité, ainsi que sur les propriétés de durabilité.

Différentes méthodes ont été utilisées pour compenser ces effets négatifs des granulats recyclés sur les performances mécaniques et la durabilité du béton, telles que l'augmentation de la teneur en ciment, la réduction du rapport eau/ciment (E/C), l'ajout de matériaux cimentaires supplémentaires, l'élimination du vieux mortier adhérent et l'ajout de diverses fibres. L'utilisation des matériaux cimentaires supplémentaires pour remplacer le ciment, comme le laitier, le métakaolin, les cendres volantes, la fumée de silice et la cendre de balle de riz, réduit les émissions de CO₂ dans l'industrie du ciment et élimine leurs effets négatifs sur l'environnement. En plus de ces avantages écologiques, les matériaux cimentaires supplémentaires influencent positivement les propriétés du béton telles que la résistance et la durabilité. Ces améliorations sont attribuées à l'activité pouzzolanique de ces matériaux réagissant avec la Portlandite, ce qui entraîne la formation d'hydrates de silicate de calcium supplémentaires (C-S-H).

L'intégration des ajouts cimentaires dans le béton recyclé offre de nombreuses possibilités, que ce soit les en utiliser en combinaison binaire, ternaire ou même quaternaire. Ces ajouts, tels que le laitier, la fumée de silice (FS) et le métakaolin (MK), peuvent être combinés de différentes manières pour améliorer les performances du béton recyclé.

L'utilisation en combinaison ternaire présente plusieurs avantages par rapport à une combinaison binaire. Tout d'abord, elle permet une meilleure optimisation des propriétés du béton en tirant parti des caractéristiques spécifiques de chaque ajout cimentaire. Par exemple, le laitier peut contribuer à améliorer l'ouvrabilité, la résistance à la compression et la durabilité, tandis que le MK peut renforcer la matrice de béton et réduire la perméabilité, offrant ainsi une amélioration globale des performances.

En comparaison, l'utilisation en combinaison binaire présente des limites dans l'optimisation des propriétés du béton recyclé. Bien que cette approche puisse encore apporter des améliorations significatives, elle ne permet pas toujours d'exploiter pleinement le potentiel de chaque ajout cimentaire. Par exemple, l'utilisation exclusive de laitier peut ne pas suffire à améliorer toutes les propriétés nécessaires du béton recyclé, et l'ajout d'un autre matériau comme le MK pourrait être nécessaire pour compenser ses limitations. L'utilisation des ajouts cimentaires en combinaison ternaire dans le béton recyclé offre une approche plus flexible et efficace pour améliorer ses performances mécaniques et sa durabilité. En exploitant les synergies entre différents matériaux, on peut obtenir des bétons recyclés de haute qualité, adaptés à une variété d'applications de construction durable.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse, mettant l'accent sur un point de vue écologique et économique. L'objectif de notre recherche, en premier lieu, est de produire un béton autoplaçant écologique à partir de co-produits et de déchets, notamment en tant que granulats et ciment, dans le but de réduire l'extraction de granulats, les émissions de CO₂ et les coûts de construction. En deuxième lieu, cette étude vise à examiner les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité d'un BAP incorporant des granulats recyclés comme granulats grossiers et fins, ainsi que du laitier et du métakaolin en tant qu'ajouts cimentaires.

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces préoccupations, une campagne expérimentale a été élaborée et présentée dans ce manuscrit qui comprend trois chapitres plus une introduction :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur l'utilisation des granulats recyclés et les ajouts cimentaires dans l'industrie du béton, dans laquelle l'effet des granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité de béton. Nous décrivons ensuite l'influence des ajouts cimentaires sur le comportement de béton recyclé à l'état frais et à l'état durci

Le deuxième chapitre regroupe les méthodes de caractérisation utilisées pour qualifier les constituants, les mélanges et les différentes compositions ainsi que les essais réalisés sur les BAP à l'état frais et à l'état durci.

Le dernier chapitre est consacré à l'exposition et à la discussion de différents résultats obtenus. Des commentaires, accompagnés d'une comparaison avec d'autres résultats, mettant en évidence l'impact de l'utilisation des ajouts cimentaires et des granulats recyclés sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci. Enfin, une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives clôturent ce travail de recherche.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GRANULATS RECYCLÉS ET LES AJOUTS CIMENTAIRES DANS L'INDUSTRIE DE BÉTON

CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DES GRANULATS RECYCLÉS ET LES AJOUTS CIMENTAIRES DANS L'INDUSTRIE DU BÉTON

1.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter un état de l'art sur l'utilisation des ajouts cimentaires et des granulats de béton recyclé dans l'industrie du béton. La première partie se concentre sur la définition des granulats recyclés et leurs caractéristiques, ainsi que sur l'effet de l'incorporation des granulats recyclés sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons. La deuxième partie consiste à présenter les différents résultats de la littérature concernant les propriétés du béton à base de granulats recyclés et d'ajouts cimentaires aux états frais et durci. Finalement, un bilan global des conclusions tirées de cette étude est présenté en discutant les différents axes sur lesquels nous devons nous concentrer durant cette thèse.

1.2 Problèmes environnementaux et émissions de CO₂

La demande en matières premières augmente en raison du développement technologique et économique [1]. Après de nombreuses années de production, le béton, qui consomme une grande quantité de ces matériaux, demeure le matériau le plus utilisé dans l'industrie de la construction jusqu'à présent [2]. Par conséquent, la question qui se pose est de savoir pendant combien de temps les matières premières en diminution continue seront-elles suffisantes ? Étant donné qu'elles ne sont pas renouvelables, il est impossible de déterminer le volume des ressources naturelles ni la durée pendant laquelle elles peuvent être consommées sans s'épuiser. Par conséquent, les experts prévoient une aggravation du problème de déséquilibre entre la demande de ces matériaux et leur disponibilité, rendant nécessaire la recherche d'une alternative [3]. De nombreux pays ont souligné l'importance vitale de nouveaux matériaux pour soutenir l'économie de la construction, étant donné que les sites d'enfouissement disponibles ne sont plus suffisants et diminuent rapidement. Ainsi, un lien a été établi entre ce problème et la demande de récupération des déchets solides non dégradables afin de faire face aux problèmes de durabilité, d'énergie et d'environnement simultanément [4].

1.2.1 Production de ciment et son émission de CO₂ dans le monde

Les données montrent que les émissions totales de CO₂ ont augmenté de 0,9% par an au cours des années 1900 et ont atteint à 3% au cours des années 2000. On prévoit que les émissions de CO₂ continueront d'augmenter encore jusqu'en 2030. Les données montrent également que la Chine, l'Inde et certains autres pays en développement sont responsable de la majeure partie des émissions de CO₂ [5]. L'industrie du ciment est la principale source de production de CO₂. De plus, elle est le troisième plus grand consommateur d'énergie industrielle (représentant 12 à 15% de la consommation totale d'énergie) et le deuxième producteur industriel de CO₂ [6]. La Chine, en tant que premier producteur de ciment, a produit plus de la moitié de la production mondiale de ciment au cours des dernières années (environ 56%) [7] et génère la plus grande quantité de CO₂ provenant de la production mondiale de ciment (Figure 1.1) [8]. On s'attend à ce que ces chiffres continuent d'augmenter jusqu'en 2030 en raison de l'urbanisation croissante et de la consommation accrue de ciment par habitant [6]. Il est également signalé que 36% des émissions de CO₂ provenant des activités de construction sont directement attribuables à l'utilisation de ciment [9]. En 2014, la production de ciment a atteint 4,2 milliards de tonnes et est restée à peu près constante jusqu'à présent, et en 2020, environ 4,1 milliards de tonnes de ciment ont été produites dans le monde (Figure 1.2) [10].

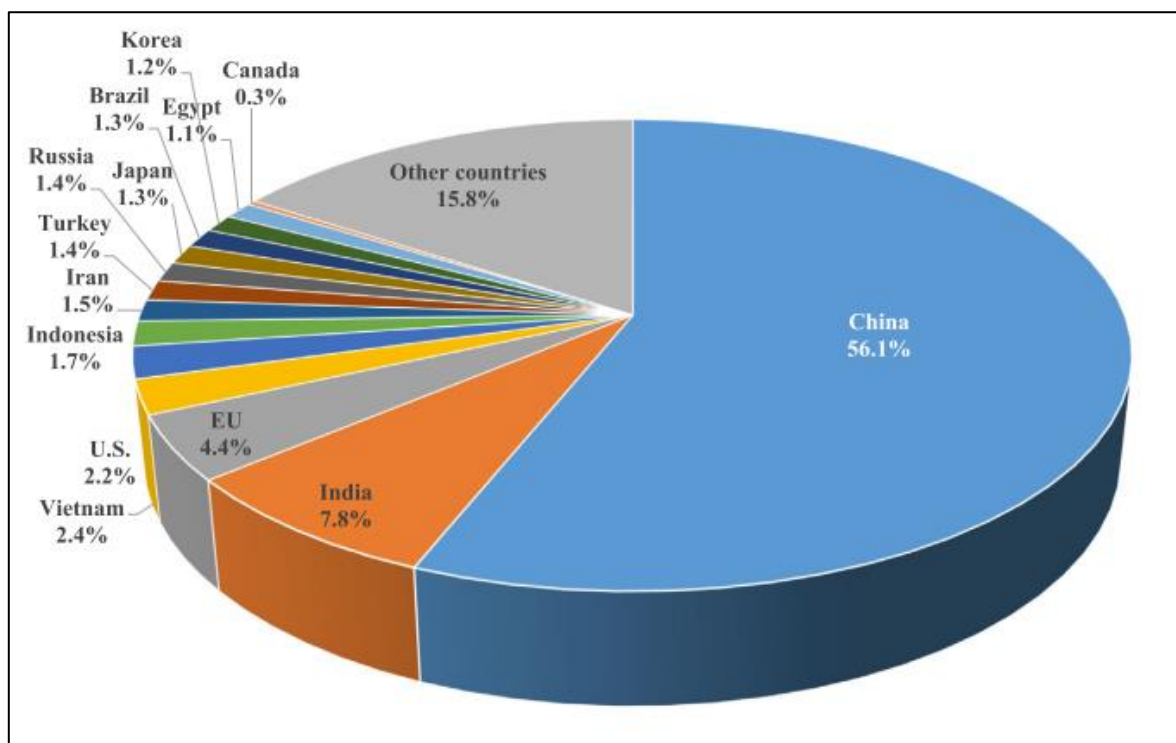


Figure 1.1 : Répartition de la production mondiale de ciment en 2019 [8].

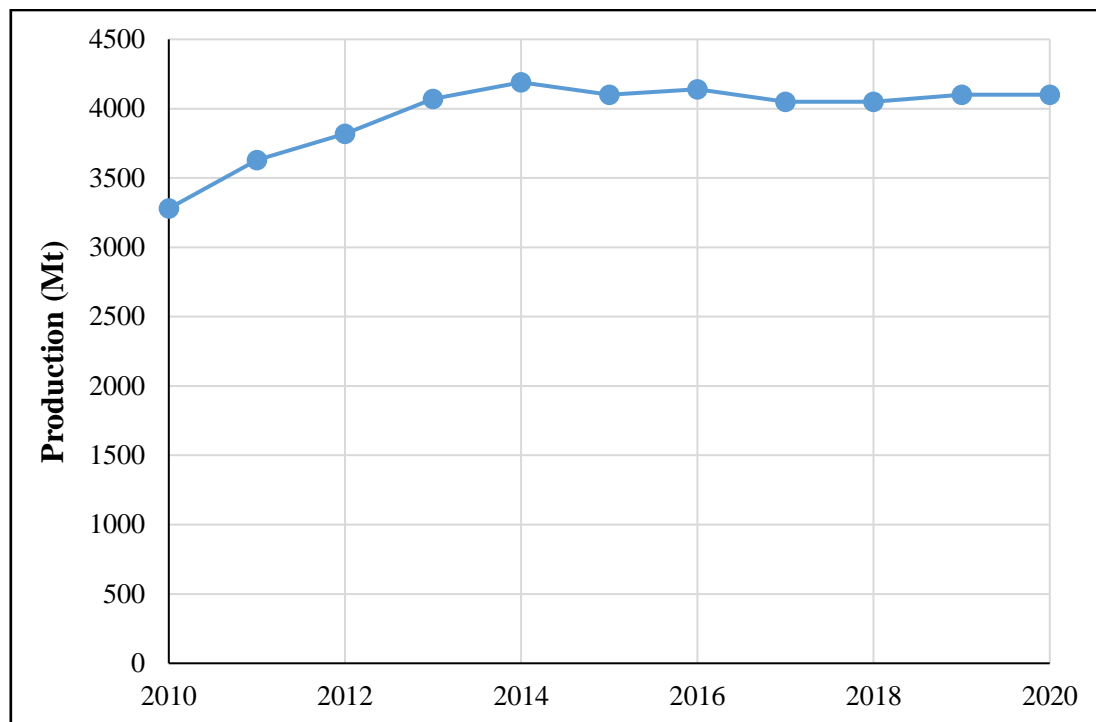


Figure 1.2 : Production mondiale de ciment, 2010-2020 [10].

1.2.2 Production de ciment et son émission de CO₂ en l'Algérie

La production nationale de ciment devrait dépasser la barre des 40 millions de tonnes en 2020, selon le ministère de l'Industrie et des Mines, concernant la situation de la filière de production de ciment en Algérie. En 2015, la production nationale s'établissait à 20,65 millions de tonnes puis à 24,45 millions de tonnes en 2018 [11]. La capacité de production de l'Algérie, qui compte 19 cimenteries en service, est passée de 20 à 25 millions de tonnes entre de 2015 et 2018 grâce à la réception de plusieurs projets d'extension ou de nouvelles cimenteries. Parmi ces projets, on trouve l'extension, depuis janvier 2017, de la cimenterie d'Ain El Kebira à Sétif, du groupe GICA, d'une capacité de 2 millions de tonnes par an, la réception de la cimenterie CILAS à Biskra avec une capacité additionnelle de 2.7 millions de tonnes en 2017. De plus, de nouvelles cimenteries appartenant des opérateurs privés, comme celles du groupe Lamouri à Biskra et de l'entreprise Hamel à Adrar, dont la capacité de production est d'un million de tonnes chacune. Selon les statistiques et les nouvelles usines présentées dans le tableau 1.1 et tableau 1.2, une augmentation dans la production du ciment a été remarquée, ce qui entraîne une augmentation des émissions de CO₂ [11].

Tableau 1.1: Répartition des cimenteries par région [10]

| Région | Nombre | Affiliation | Cimenterie |
|--------------|-----------|-------------|--|
| Saida | 4 | GICA | Cimenterie ECDE |
| | | LAFARGE | Cimenterie OGGAZ |
| | | GICA | Cimenterie SCIZ |
| | | GICA | Cimenterie SCIS |
| Alger | 1 | GICA | Cimenterie Rais Hamidou |
| Blida | 2 | GICA | Cimenterie Sour El Ghouzlane |
| | | GICA | Cimenterie de Meftah |
| Sétif | 2 | LAFARGE | Cimenterie M'sila |
| | | GICA | Cimenterie Ain kebira |
| Oran | 2 | SPCC | Cimenterie SPCC |
| | | GICA | Cimenterie de Béni saf |
| Batna | 5 | GICA | Cimenterie Ain Touta |
| | | GICA | Cimenterie Hama Bouziane |
| | | GICA | Cimenterie Tebessa |
| | | LAFARGE | Cimenterie CILAS |
| | | BISKRIA | Cimenterie Biskria |
| Annaba | 1 | GICA | Cimenterie Skikda |
| Bechar | 1 | STG | Cimenterie Adrar |
| Laghouat | 1 | AMMOUDA | Cimenterie AMMOUDA ENGINEERING (créé en 2019) |
| Total | 19 | | |

Tableau 1.2: Evolution de la production nationale de ciment [11]

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| GICA | 12.12 | 12.32 | 13.95 | 13.60 |
| LAFARGE | 07.93 | 8.57 | 9.50 | 08.20 |
| BISKRIA | | 0.005 | 1.50 | 1.90 |
| Cimenterie Adrar | | | 0.50 | 0.63 |
| Total (Mt) | 20.65 | 21.53 | 25.45 | 24.45 |

1.3 Béton à base des granulats de béton recyclé

La consommation de ressources naturelles et la production de déchets par l'industrie de la construction ont considérablement augmenté ces dernières années. Déjà, plus de 30 milliards de tonnes de granulats naturels sont consommées chaque année pour produire du béton à l'échelle mondiale. L'augmentation moyenne de l'utilisation des granulats est estimée à 5% par an à l'échelle mondiale, ce qui signifie que le total pourrait être d'environ 66,3 milliards de tonnes d'ici 2022 [12]. Les déchets de construction et de démolition représentent environ 36% du total des déchets produits dans le monde [13].

Le processus actuel de « construction-démolition » exerce une pression considérable sur les ressources naturelles, en mettant un accent particulier sur les granulats naturels (GN) et entraîne des quantités élevées de déchets de construction et de démolition (DCD). Ces deux faits ont un impact très négatif sur l'environnement. En raison de la crise économique et environnementale actuelle, les exigences d'un développement plus durable dans l'industrie de la construction nécessitent une approche différente de la technologie du béton [14].

L'utilisation des granulats recyclés (GR) pour produire un nouveau béton semble être une solution à fort potentiel. Cela permet à la fois de résoudre les problèmes liés au stockage, au transport et à l'élimination des déchets de construction et de démolition et tout en contribuant à un environnement potentiellement plus durable, en augmentant de la valeur de ces déchets et en réduisant ainsi la consommation de granulats naturels [15].

Dans le contexte du développement d'un éco-béton avec des déchets de construction et de démolition recyclés, de nombreuses études ont porté sur l'utilisation des déchets de construction et de démolition comme remplacement de granulats naturels. Cette partie résume l'influence de granulats de béton recyclé sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité du béton/mortier.

1.3.1 Recyclage des déchets de construction et de démolition dans le monde

Le taux de recyclage des déchets de construction et de démolition est très bas dans le monde entier, seulement 5% des déchets de construction et de démolition actuellement produits sont recyclés dans le béton [12]. Le tableau 1.3 indique les quantités des déchets de construction et de démolition ainsi que les taux de recyclage pour différents pays à travers le monde.

Tableau 1.3 : Quantité de déchets de construction et de démolition et taux de recyclage pour différents pays [16]

| Pays | Déchets de construction et démolition (million tonnes) | Taux de recyclage (%) |
|---------------|--|-----------------------|
| Chine | 2360 | - |
| Etats - Unis | 600 | - |
| Inde | 530 | - |
| France | 240 | 15 |
| Allemagne | 225 | 17 |
| Royaume - Uni | 138 | 45 |
| Italie | 61 | 9 |
| Espagne | 38 | <5 |
| Vietnam | 19 | 0 |
| Suède | 12 | 21 |

1.3.2 Caractéristiques des granulats recyclés

En général, les granulats recyclés présentent des propriétés différentes de celles des granulats naturels, telles qu'une densité plus faible, une résistance plus faible, une porosité plus élevée et une absorption d'eau plus élevée [17], [18]. La différence fondamentale entre les granulats recyclés et les granulats naturels réside dans la présence de vieux mortier adhérent aux granulats recyclés [19]. Ce vieux mortier adhérent modifie les propriétés des granulats recyclés, et par conséquent les propriétés du béton frais et durci fabriqué à partir ces granulats recyclés. En général, la densité et l'absorption d'eau des granulats recyclés sont largement influencées par la quantité de vieux mortier adhérent.

1.3.2.1 Teneur en mortier résiduel

Les granulats recyclés se composent à la fois de granulats naturels et de mortier de ciment fixé à la surface des granulats naturels (Figure 1.3) [20]. La présence de ce mortier fixé était la principale raison de la qualité inférieure des granulats recyclés par rapport à celle des granulats naturels [21]. La quantité de mortier fixé peut varier de 20% à 70% de la teneur totale en granulats, ce qui est une propriété directement liée au béton d'origine [22]. Cette caractéristique joue un rôle essentiel dans la quantité de mortier fixé. Une résistance plus faible du béton d'origine affaiblit la liaison entre le granulat et le mortier d'origine, entraînant une diminution de la teneur en mortier fixé [23].

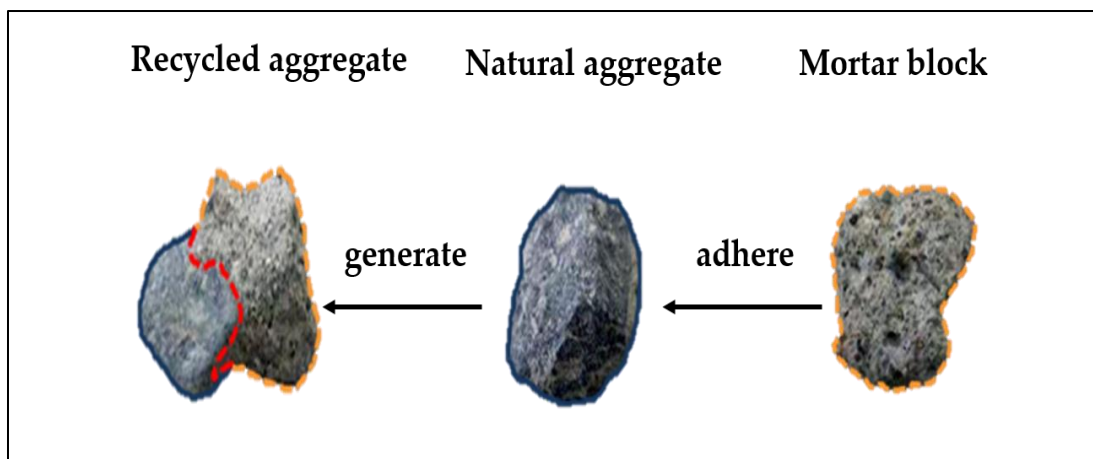


Figure 1.3 : Schéma des granulats de béton recyclé [20].

1.3.2.2 Densité et masse volumique

La densité est l'une des propriétés physiques importantes des granulats. En général, en raison de la faible densité du vieux mortier adhérant au granulats recyclés, la densité relative du granulats recyclés est toujours inférieure à celle du granulats naturel [24], [25]. La densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2.4 et 2.5 alors que les granulats naturels ont généralement une densité relative d'environ 2.75 [26].

1.3.2.3 Absorption d'eau

L'absorption d'eau est l'une des principales différences entre les granulats naturels et les granulats recyclés. L'absorption d'eau des granulats recyclés est nettement plus élevée que celle des granulats naturels en raison de la forte capacité d'absorption des vieux mortiers collés aux granulats recyclés [27]–[29]. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10%, tandis que pour des granulats naturels, elles sont souvent inférieures à 1%, mais peuvent atteindre jusqu'à 5% (Tableau 1.4) [30], [31]. Abed et al. [32] ont étudié l'impact du recyclage multiple sur la performance du béton. Ils ont observé que le taux d'absorption d'eau des granulats recyclés augmentait avec le nombre croissant de recyclage en raison de l'augmentation progressive de la teneur en mortier adhérant. Les granulats recyclés obtenus à partir de béton avec un rapport eau/ciment (E/C) plus faible, et donc avec une porosité plus basse et une résistance mécanique plus élevée, ont une absorption d'eau plus faible. La taille des particules des granulats recyclés a un effet significatif sur leur capacité d'absorption d'eau : les granulats fins recyclés ont une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les granulats grossiers recyclés en raison de la quantité relativement plus élevée de mortier adhérent par rapport aux granulats grossiers recyclés.

Tableau 1.4 : Absorption des granulats recyclés et des granulats naturels rapportée par différents chercheurs

| Référence | Absorption (%) | | | |
|---------------------------------|----------------|-------|-------------|-------|
| | Naturel | | Recyclé | |
| | Gravier | Sable | Gravier | Sable |
| Medina et al. [33] | 2.66 | - | 4.36 – 4.49 | - |
| Verien [34] | 1.8 – 2.7 | - | 5.3 – 5.4 | - |
| Kappor et al. [35] | 0.68 | - | 5.35 | - |
| Gesoglu et al. [17] | - | 2.1 | - | 10.9 |
| Thomas et al. [36] | 1.6 – 1.8 | - | 5.3 | - |
| Betran et al. [37] | 1.53 | - | 6.94 | - |
| Zhihui et al. [38] | 0.7 | - | 4.1 | - |
| Ait mohamed amer et al. [39] | 0.96 | - | 5.05 | - |
| Vieira et al. [40] | - | 0.58 | - | 12.63 |
| Pickel et al. [41] | 1.53 | - | 6.93 | - |
| Roesler at al. [42] | 1.9 | 2.43 | 5.51 | 9.85 |
| Omrane et al. [19] | 1.6 | 0.65 | 6.8 | 9.07 |
| Djelloul et al. [43] | 0.5 | 1.7 | 3.21-7.39 | 8.87 |

1.3.2.4 Dureté

Plusieurs essais sont réalisés pour évaluer la résistance à l'abrasion des granulats. Parmi ceux-ci, l'essai d'abrasion de Los Angeles qui est le plus couramment utilisé à travers le monde. En général, les granulats recyclés présentent un coefficient de Los Angeles supérieur à celui des granulats naturels en raison de la présence de mortier collé [26]. La perte d'abrasion à Los Angeles dépend de la résistance du béton à partir duquel les granulats recyclés sont obtenus, de la taille des granulats et de la quantité de mortier collé.

1.3.3 Influence des granulats de béton recyclé sur l'ouvrabilité

La porosité et l'absorption d'eau élevées des granulats recyclés ont une influence significative sur les caractéristiques à l'état frais et la maniabilité du béton [44]. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser certaines méthodes correctives lors de la production du béton contenant des granulats recyclés afin de respecter les critères de maniabilité requis [45], [46].

Mahakavi et al. [47] ont étudié l'impact du taux de substitution (25,50,75 et 100%) des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés du BAP. D'après la figure 1.4, il est clair que le diamètre d'étalement diminue et le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés. Les granulats recyclés sont également très hétérogènes et poreux et peuvent contenir un grand nombre d'impuretés. Cette hétérogénéité affecte les caractéristiques des granulats recyclés, ce qui peut avoir un impact sur la qualité du béton. Pour cette raison, le diamètre d'étalement varie de 690 à 650 mm pour les mélanges avec granulats recyclés, ce qui reste conforme aux exigences de BAP.

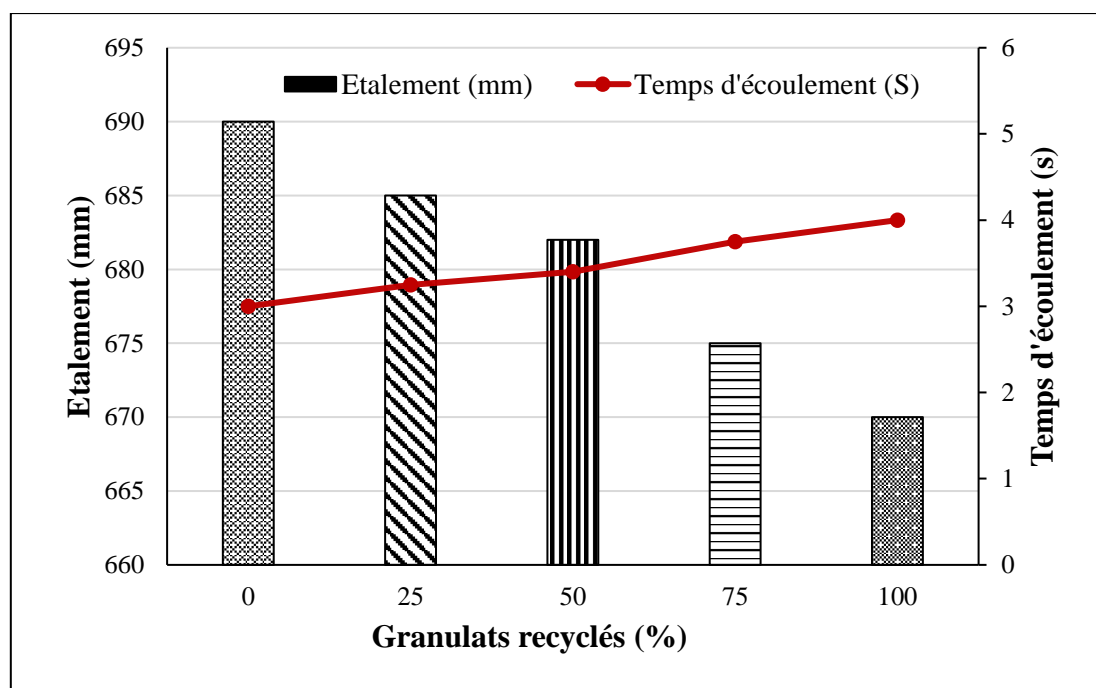


Figure 1.4 : Etalement et temps d'écoulement en fonction du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés [47].

Selon Tang [48], l'essai d'étalement n'a révélé aucune différence significative dans les valeurs d'étalement entre les mélanges témoins et les mélanges recyclés. Aucune ségrégation ou séparation de l'eau n'a été observée dans les mélanges contenant des granulats recyclés et en général, la fluidité était semblable à celle du béton témoin. Cependant, les valeurs T50 qui représentent la viscosité du mélange ont tendance à augmenter avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés. Cela pourrait être dû à la forme angulaire des granulats recyclés et à leur absorption d'eau plus élevée. Un temps T500 plus court indique une meilleure capacité d'écoulement mais une viscosité plus faible. De même, l'essai L Box n'a montré aucune différence significative dans le rapport de blocage entre les mélanges de béton naturel et recyclé.

lors des mesures initiales. Les résultats démontrent que tous les mélanges étaient résistants à la ségrégation. IL a également constaté que le taux de ségrégation des mélanges de béton a diminué avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés en raison de leur plus grande capacité d'absorption d'eau. L'auteur conclut que les granulats recyclés peuvent être utilisés pour produire des BAP en remplaçant jusqu'à 100 % des granulats grossiers naturels sans affecter les propriétés du béton frais (Tableau 1.5).

Tableau 1. 5 : Résultats des propriétés du BAP à l'état frais [48]

| Mélanges | Densité (kg/m ³) | Etalement | | | | | L-box | Résistance à la ségrégation (%) |
|----------|---------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---|----------------|------------------------------------|
| | | Initiale | | Après 1 h | | Variation | Initiale | |
| | | D ₀ (mm) | T ₅₀ (s) | D ₁ (mm) | T ₅₀₀ (s) | (S ₀ -S ₁) /S ₀ (%) | B ₀ | |
| Témoin | 2380 | 720 | 2.8 | 650 | 3.9 | 9.7 | 0.89 | 8.6 |
| R25 | 2360 | 690 | 3.5 | 610 | 5.5 | 11.6 | 0.87 | 7.5 |
| R50 | 2340 | 710 | 3.6 | 640 | 6.2 | 9.9 | 0.90 | 5.9 |
| R75 | 2330 | 730 | 4.1 | 610 | 6.7 | 16.4 | 0.84 | 6.2 |
| R100 | 2310 | 700 | 4.2 | 560 | 7.5 | 20.0 | 0.81 | 5.3 |

Kapoor et al. [49] ont étudié l'effet des granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais du béton autoplaçant. Dans cette étude, les granulats grossiers naturels ont été remplacés par des granulats grossiers recyclés à des niveaux de remplacement de 0 %, 50 % et 100 %. De même, les granulats fins naturels ont été remplacés par des granulats fins recyclés à des niveaux de remplacement de 0%, 25%, 50%, 75% et 100%. Les résultats d'étalement ont indiqué une diminution de la fluidité en raison de la substitution croissante des granulats grossiers recyclés (GGR) et des granulats fins recyclés (GFR) en raison de leur forme angulaire et de leur absorption d'eau plus élevée. La réduction du temps d'écoulement était plus prononcée avec des pourcentages plus élevés de substitution de GGR et de GFR, ce qui indique une baisse de la fluidité due à une fluidité réduite des mélanges de béton (Figure 1.5).

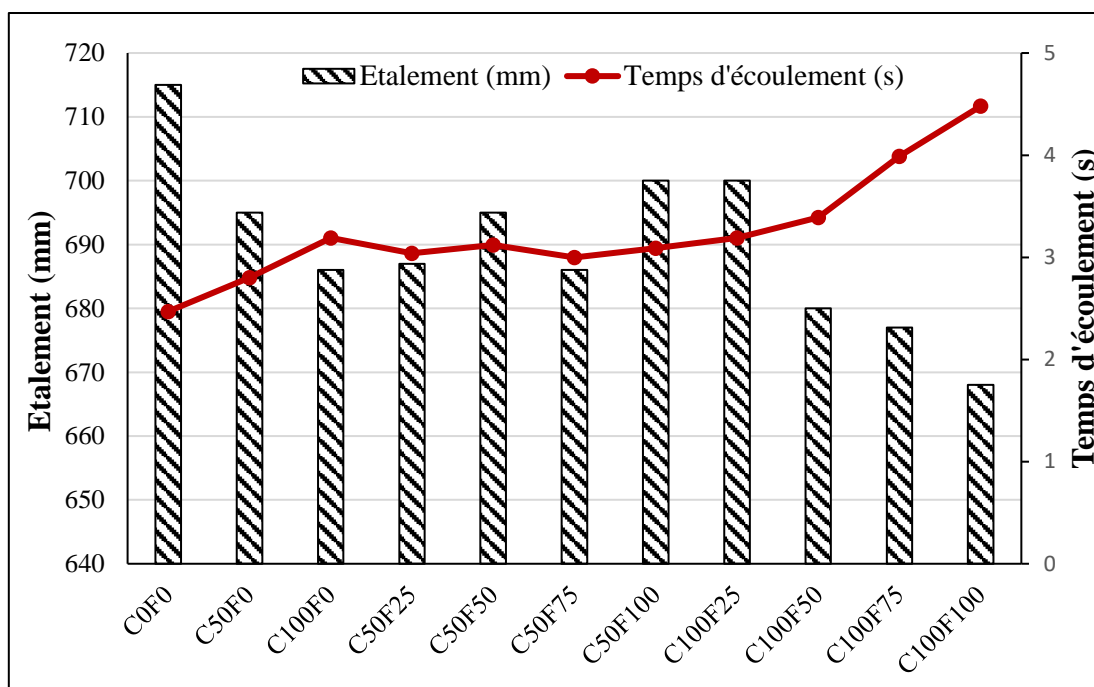


Figure 1.5 : Résultats de l'essai d'étalement et de temps d'écoulement [49].

Safiuddin et al. [50] ont observé que l'étalement augmente initialement pour des taux d'incorporation relativement faibles de GR (30% et 40%). Cependant, pour des taux plus élevés (70% et 100%), l'étalement diminue en raison de l'augmentation de la teneur en granulats fins, due à la fragmentation des GR pendant le mélange et à leur plus grande absorption d'eau. En ce qui concerne le temps d'écoulement, ils ont constaté qu'il diminue pour des taux d'incorporation de GR de 30% et 40%, mais augmente pour des taux de 70% et 100%. Les raisons de ces deux tendances opposées sont les mêmes que pour l'étalement. La réduction de la teneur en granulats grossiers (30% et 40%) et la plus grande rugosité et angulosité des granulats recyclés augmentent la friction entre les granulats, contribuant ainsi à l'augmentation du temps d'écoulement.

D'après les résultats expérimentaux rapportés par Revathi et al. [51], l'étalement et la capacité de passage des mélanges de béton autoplaçant recyclé diminuent avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés. Cependant, tous les mélanges de béton autoplaçant recyclé possédaient une fluidité, une capacité de remplissage et une capacité de passage adéquates selon les recommandations de l'EFNARC.

Carro López et al. [52] ont étudié l'effet de l'incorporation de granulats fins recyclés à des niveaux de 0%, 20%, 50% et 100% sur la rhéologie du béton autoplaçant au cours du temps (à 15, 45 et 90 min). Les résultats montrent que les mélanges avec 50 % et 100 % de sable recyclé ont totalement perdu leurs caractéristiques de BAP à 90 min, tandis que cette perte de fluidité et de capacité de remplissage n'était pas significative dans les mélanges de BAP avec 20% de remplacement (Figure 1.6). Ce changement significatif de propriétés est dû à l'absorption très élevée du sable recyclé.

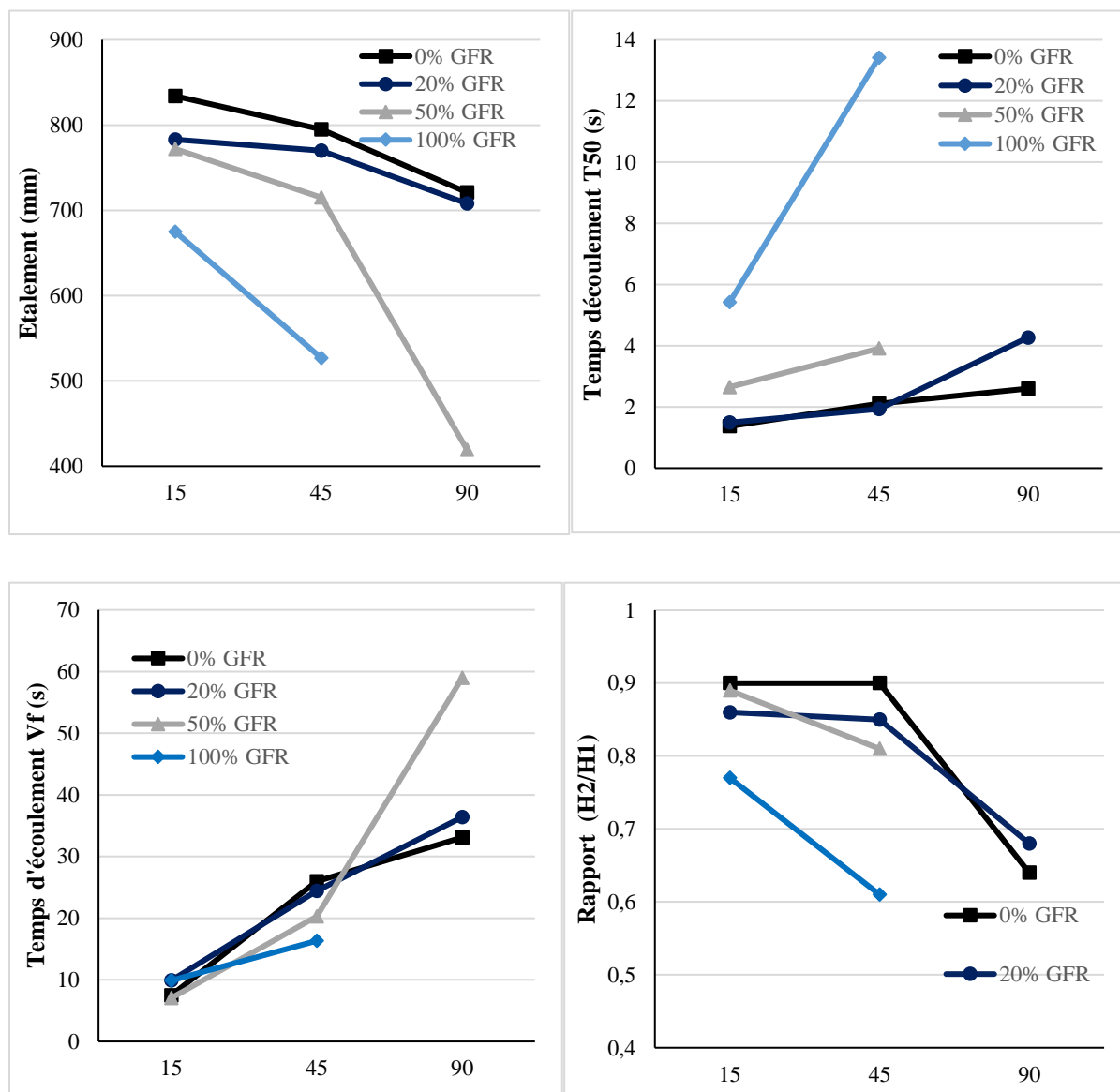


Figure 1.6 : Effet des GR sur l'étalement, le temps d'écoulement T500, le temps d'écoulement T_{vf} et le rapport H2/H1 [52].

1.3.4 Influence des granulats de béton recyclé sur les propriétés mécaniques

L'incorporation de granulats recyclés dans le béton entraîne une perte de performance en termes de propriétés mécaniques. Plusieurs facteurs peuvent influencer ces propriétés, notamment le rapport E/C, le pourcentage de granulats naturels remplacés par les granulats recyclés et la quantité de mortier adhérent.

1.3.4.1 Résistance à la compression

L'effet de l'incorporation de granulats recyclés sur la résistance à la compression du béton dépend de différents paramètres, tels que la proportion du mélange, le pourcentage de remplacement ainsi que la taille et la qualité des granulats recyclés. En général un faible pourcentage de remplacement par des granulats recyclés (jusqu'à 50%) n'influence pas de manière significative la résistance à la compression [19].

Selon l'étude menée par Kou et al. [53], la résistance à la compression des mélanges préparés avec 75% et 100% de granulats fins recyclés a diminué de 10%, tandis qu'aucun changement significatif n'a été observé pour des taux de remplacement de 25% et 50%. De même Carro López et al. [52] ont observé une réduction de 8% à 47% de la résistance à la compression du BAP contenant des granulats fins recyclés avec un pourcentage de remplacement de 20% à 100%, comme le montre la figure 1.7.

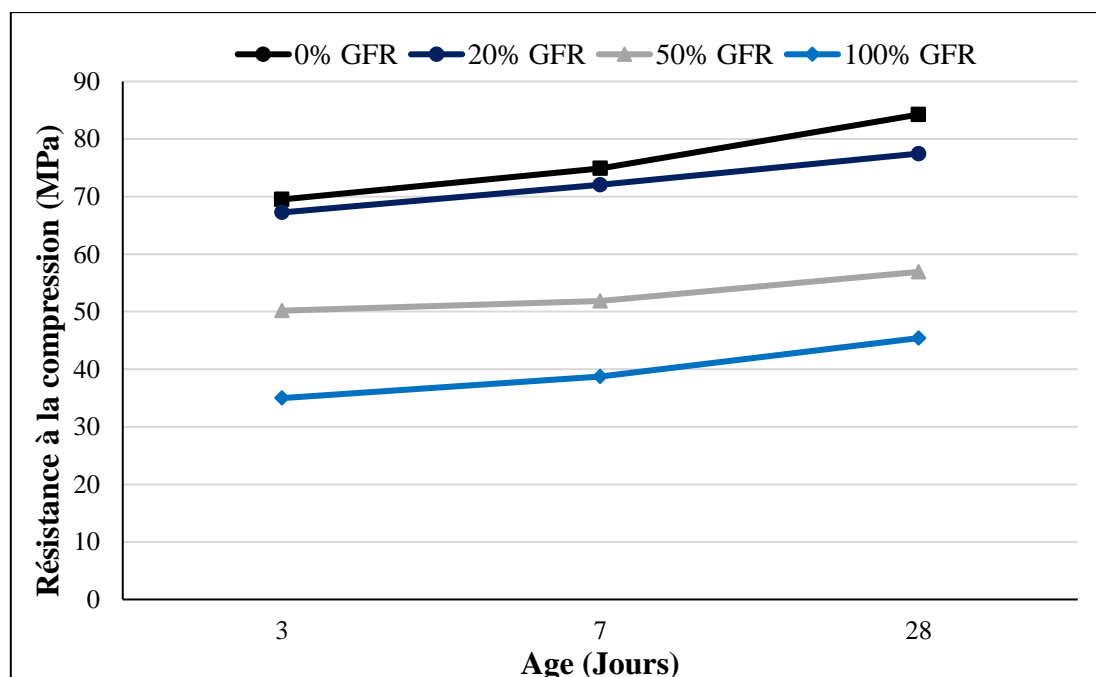


Figure 1.7 : Evolution de la résistance à la compression dans des échantillons de béton [52].

Gesoglu et al. [17] ont étudié les propriétés des bétons autoplaçants produits avec des granulats grossiers recyclés (GGR) et/ou des granulats fins recyclés (GFR) par rapport aux BAP avec des granulats naturels. Ils ont trouvé que l'incorporation de granulats recyclés a réduit la résistance à la compression de 11,8 à 16,9% dans la série II (100% GGR), de 15,8 à 26,9% dans la série III (100% GFR) et de 27,0 à 30,9% dans la série IV (100% GGR et GFR) par rapport à la série I (0% GGR et GFR). La réduction de la résistance peut être due à l'absorption d'eau élevée des GR, à la plus faible résistance des GR et à la plus faible qualité de zones de transition interfaciales [54], [55].

Nili et al. [56] ont observé que la résistance à la compression du BAP a diminué de 38,5 %, 30,7% et 25,2% à l'âge de 7, 28 et 91 jours respectivement avec 100% de granulat grossier recyclé (S100C). De plus, le remplacement de 50% des granulats fins recyclés (S50f) a réduit la résistance à la compression de 27,1%, 24% et 30,6% à l'âge de 7, 28 et 91 jours, respectivement. Les résultats indiquent que l'utilisation simultanée de granulats fins et grossiers recyclés (S100C50f) dans le BAP a entraîné une réduction de la résistance à la compression de 22,7 % à l'âge de 91 jours (Figure 1.8).

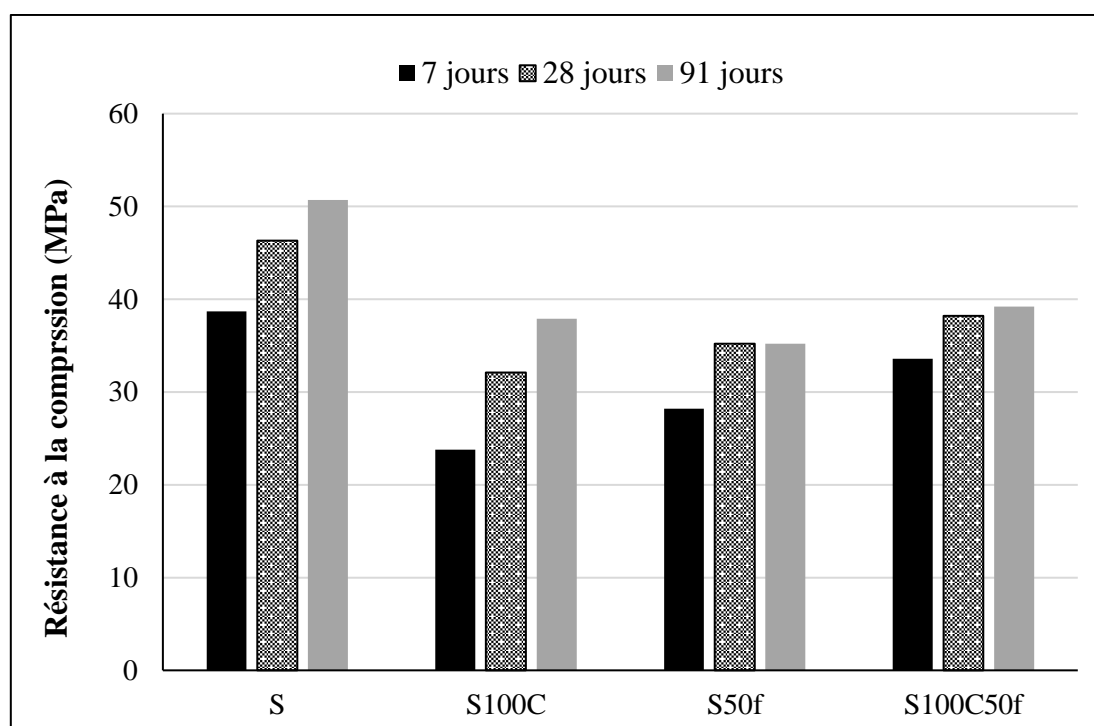


Figure 1.8 : Résultats de résistance à la compression à 7,28 et 91 jours du BAP [56].

Mo et al. [57] ont étudié l'effet du taux de remplacement des granulats recyclés sur les propriétés du béton autoplaçant durci. La figure 1.9 montre que la résistance à la compression diminue à tous les âges avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats recyclés (25, 50, 75 et 100%) en raison du mortier adhérent de mauvaise qualité et des microfissures dans les GR. La réduction de la résistance à la compression à 28 jours des mélanges contenant 25%, 50%, 75% et 100% de GR était de 1,8%, 4,4%, 12,8% et 14,5% respectivement par rapport au mélange témoin, avec une réduction minimale allant jusqu'à 50% de remplacement de GR.

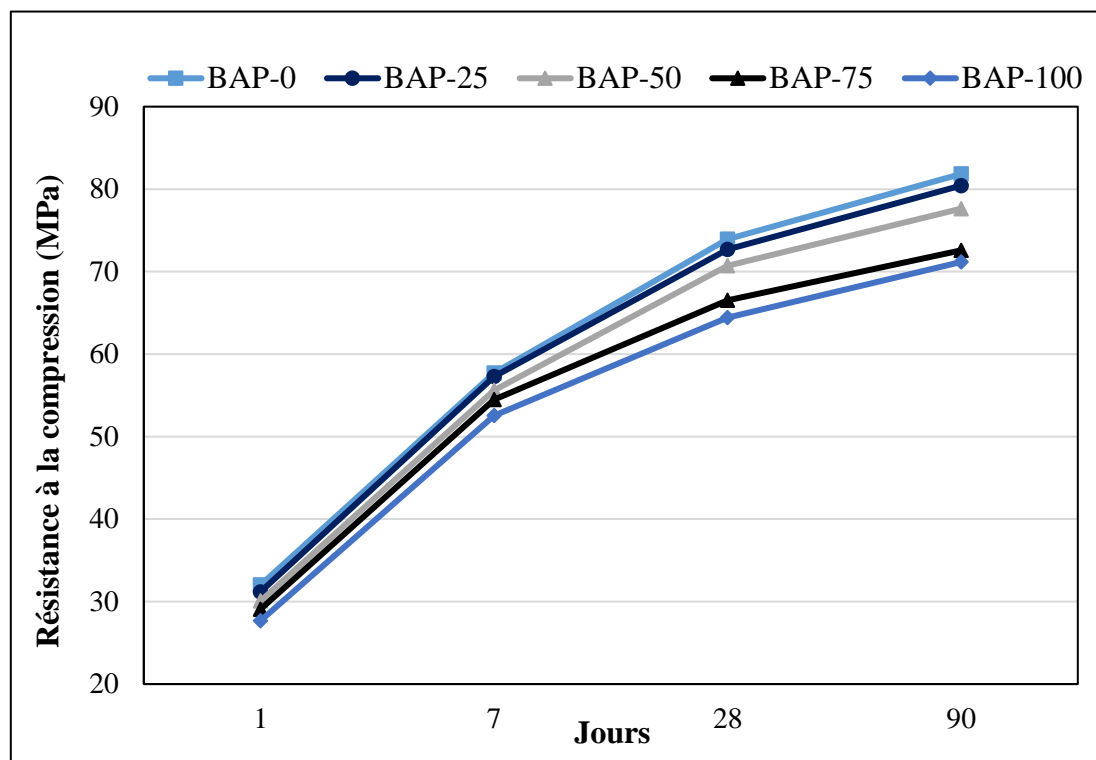


Figure 1.9 : Résistance à la compression du BAP avec et sans granulats recyclés [57].

Manzi et al. [58] ont étudié l'effet du faible taux de remplacement des granulats recyclés. Par contre Fiol et al. [59] ont analysé des mélanges de béton avec des pourcentages de 50% et de 100 % des granulats recyclés. Ils ont obtenu des valeurs de résistance à la compression supérieures à celles du mélange de référence (100% GN). Les auteurs ont expliqué leurs résultats en se référant à l'absorption d'eau plus élevée des GR, à la quantité d'eau constante ajoutée à tous les mélanges et à l'état sec des granulats. Tous ces facteurs ont conduit à un rapport E/C plus faible, favorisant ainsi une résistance à la compression accrue.

L'incorporation de faibles quantités de granulats de béton recyclé (fins et/ou grossiers) dans le béton (moins de 20% pour des granulats fins et moins de 50% pour des granulats grossiers) semble n'avoir aucun effet significatif sur la résistance à la compression, selon les études de Manzi et al. [58], qui ont utilisé des pourcentages de granulats recyclés fins compris entre 12% et 19%. Ces résultats ont été confirmés par Campos et al. [60], qui ont utilisé un pourcentage de substitution de 20% pour des granulats recyclés fins et grossiers, et n'ont observé qu'une légère diminution de la résistance à la compression, soit seulement 5%. Cependant, cet effet devient plus prononcé avec des taux de substitutions plus élevées, comme l'ont démontré Carrolópez et al. [52] avec un pourcentage de substitution de 100% de granulats fins recyclés, entraînant une réduction de la résistance à la compression d'environ 40% (Tableau 1.6).

Tableau 1.6 : Remplacement optimal de GR sur la base de résistance à la compression des bétons selon de nombreuses études

| N° | Référence | Pourcentage de remplacement | | Remplacement optimal (%) |
|----|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| | | Grossiers recyclés | Fins recyclés | |
| 1 | Ahmed et al. [61] | 0%, 30%, 50%, 70% et 100% | 0% | 30% |
| 2 | Pedro et al. [62] | 0%, 20%, 45% et 65% | 0% | 20% |
| 3 | Shirani et al. [63] | 0%, 15%, 30%, 50%, 70% et 100% | 0%, 15%, 30%, 50%, 70% et 100% | 30% |
| 4 | Javad et al.[64] | 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100% | 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100% | 20% |
| 5 | Sasanipour et al.[65] | 0%, 25%, 50%, 75% et 100% | 0% et 25% | 50% |
| 6 | Mefteh et al. [66] | 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100% | 0% | 40% |
| 7 | Medina et al.[33] | 0%, 25% et 50% | 0% | 50% |
| 8 | Senaratne et al. [67] | 0%, 30% et 100% | 0% | 30% |
| 9 | Bravo et al. [68] | 0%, 10%, 25%, 50% et 100% | 0%, 10%, 25%, 50% et 100% | 50% et 25% |
| 10 | Djelloul et al. [43] | 0%, 25%, 50%, 75% et 100% | 0%, 25%, 50%, 75% et 100% | 50% |
| 11 | Carrolópez et al. [52] | 0% | 0%, 20%, 50% et 100%. | 20% |

1.3.4.2 Résistance à la traction et à la flexion

En termes de résistance à la traction et à la flexion, il y a une diminution de sa valeur avec le remplacement de GN par GR. L'analyse de cette propriété prend en compte les aspects suivants : évolution de la résistance dans le temps, rapport E/C des mélanges, influence des agrégats et taux de remplacement maximal.

Les résultats de la résistance à la traction obtenus par Tuyan et al. [69] sont présentés sur la figure 1.10. Ils ont constaté que la résistance à la traction diminue à mesure que le taux de substitution par des GR augmente, ce qui a été expliqué par la faible résistance des GR par rapport aux GN, ainsi que par leur plus grande porosité. De plus, à mesure que le rapport E/C augmente, la résistance à la traction diminue de manière significative.

Bahrani et al. [70] ont observé une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation des taux de remplacement des granulats fins recyclés (GFR) et granulats grossiers recyclés (GGR) (Figure 1.11). À 28 jours, la résistance à la traction des mélanges contenant 25%, 50%, 75% et 100% de GFR a diminué d'environ 4.4%, 10.8%, 25.2% et 30.7%, tandis que les mélanges contenant 25%, 50%, 75% et 100% de GGR ont connu une diminution d'environ 2%, 6%, 24% et 32% respectivement par rapport au béton témoin. L'effet négatif des granulats recyclés sur le développement de la résistance des mélanges pourrait être lié à la qualité et à la densité inférieure des granulats fins recyclés et des granulats grossiers recyclés par rapport aux granulats naturels.

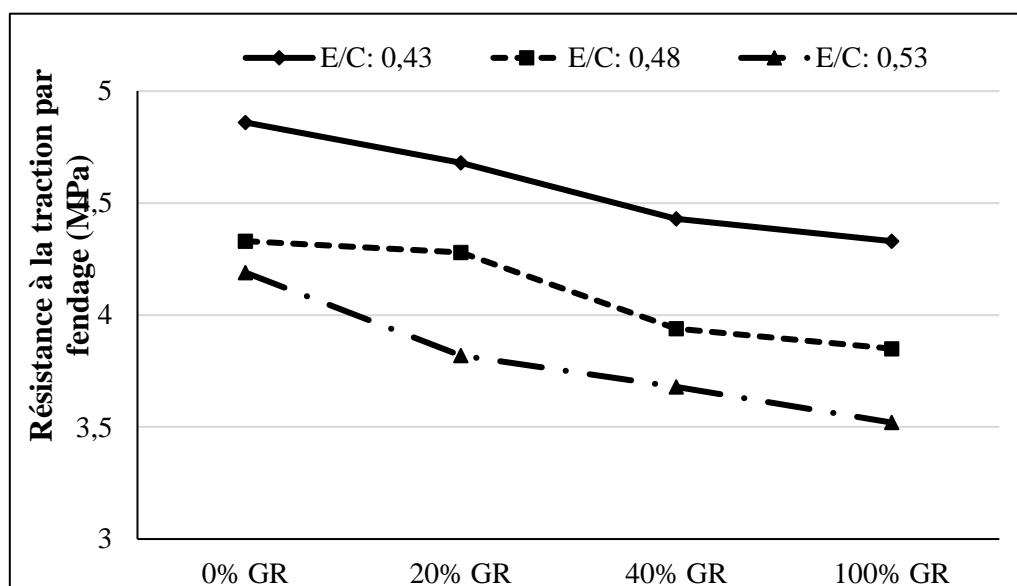


Figure 1.10 : Résistance à la traction par fendage des mélanges de BAP [69].

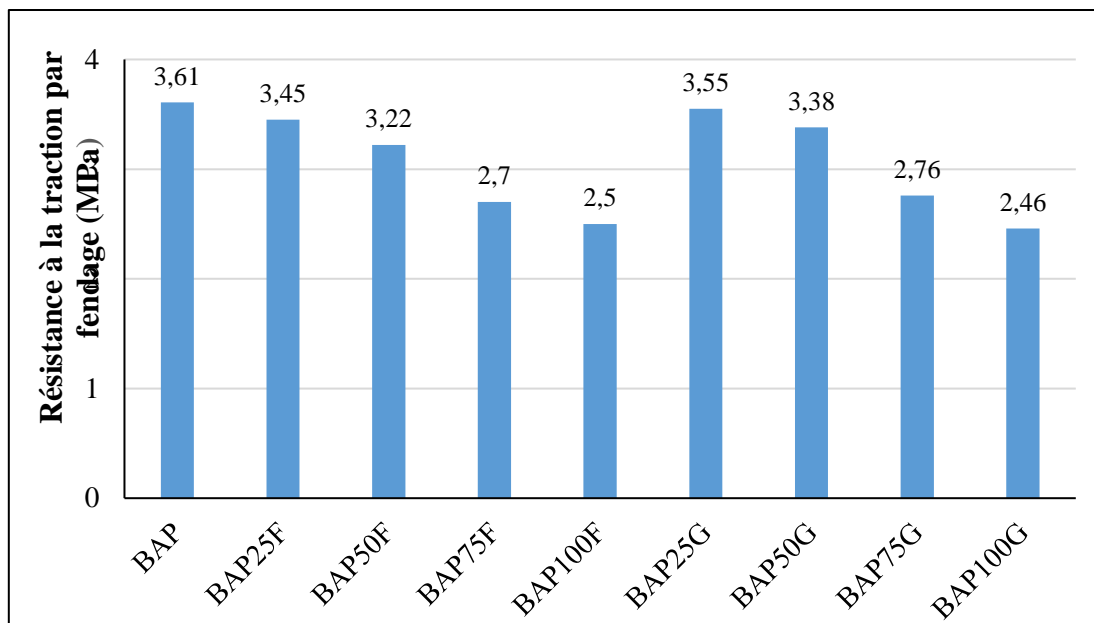


Figure 1.11 : Résultats de résistance à la traction par fendage des mélanges de BAPR [70].

Santos et al. [71] ont étudié l'effet des granulats recyclés provenant d'éléments de béton préfabriqués concassés des classes de résistance 45 et 65 MPa sur la résistance à la traction. La figure 1.12 montre que le remplacement des GN par des GR entraîne une réduction de la résistance à la traction de 9 à 27% pour les mélanges PC 65 et de 12 à 39% pour les mélanges PC 45 par rapport au BAP de référence (100% GN).

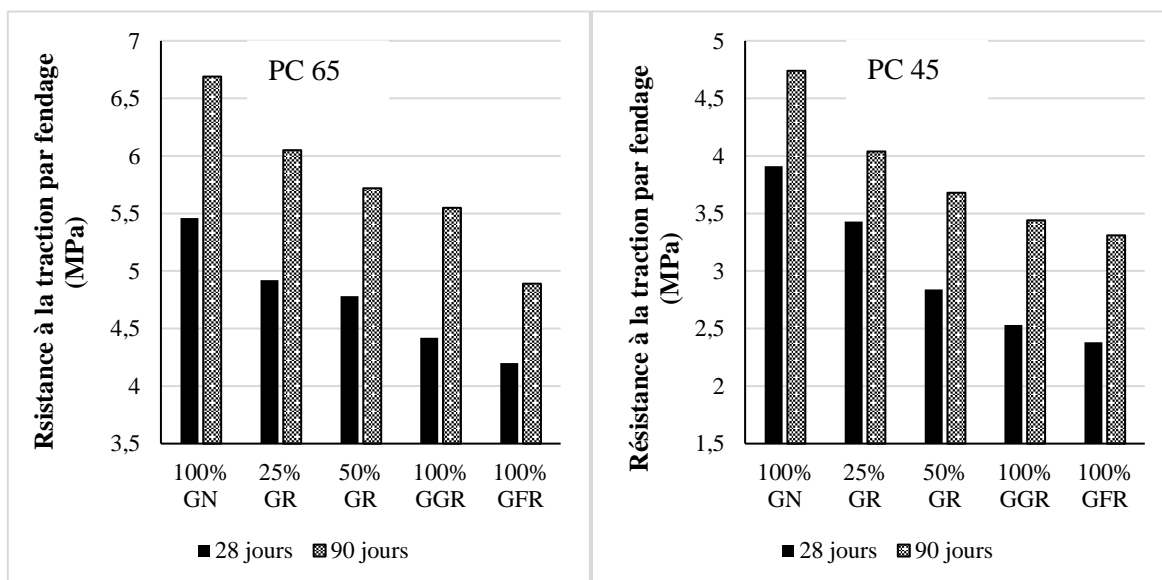


Figure 1.12 : Résistance à la traction par fendage des mélanges à 28 et 91 jours [71].

Les résultats de Panda et Bal. [72] ont montré que la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du temps de durcissement. Le BAP de référence fabriquée avec 100% de granulats naturels a obtenu la résistance à la flexion la plus élevée. Plus le taux de substitution de granulats recyclés est élevé, plus la résistance à la flexion est faible. La différence de résistance en flexion est également plus importante à 90 jours qu'à 28 jours. De même Grdic et al.[73] ont affirmé que la résistance à la flexion diminue à mesure que le taux de remplacement augmente et que la résistance à la flexion diminue lorsque le rapport E/C augmente.

Uygunoğlu et al. [74] ont étudié les propriétés du BAP avec l'incorporation de granulats naturels, de granulats recyclés et de granulats de déchets de marbre (DM). Ils ont trouvé que pour tous les mélanges de BAP (avec GN, GR et DM), la résistance à la traction diminue à mesure que le rapport E/C augmente. Le BAP avec DM présente une résistance à la traction moins élevée parce que ces types d'agrégats ont entraîné une diminution de l'adhérence entre la surface de granulats et la matrice de ciment hydraté (Figure 1.13).

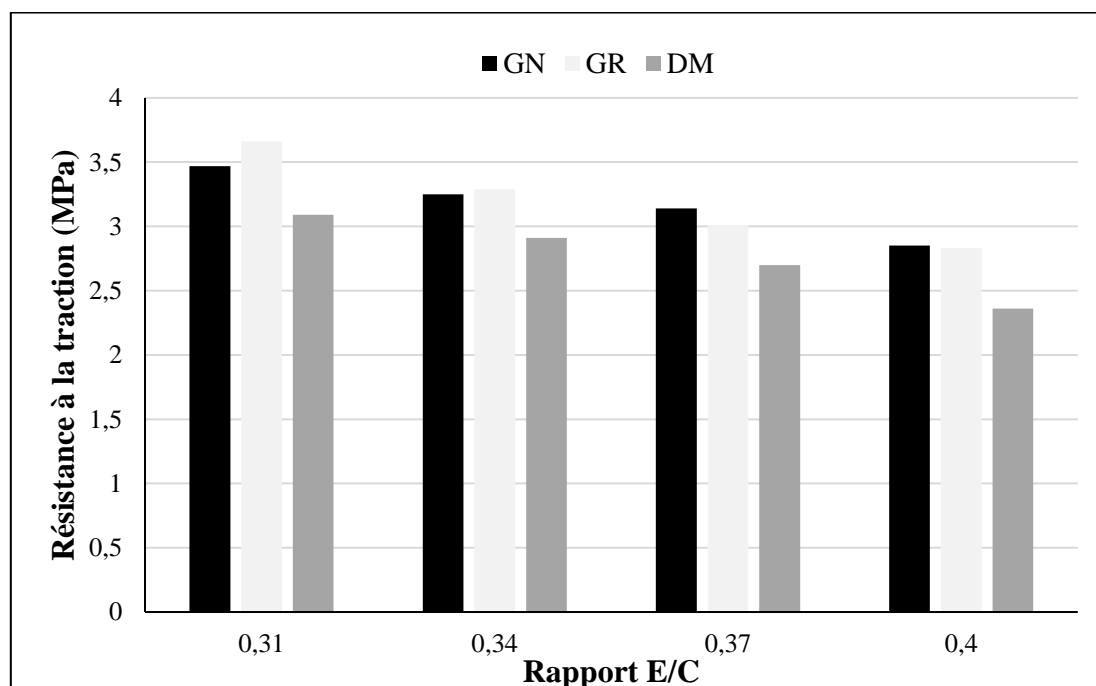


Figure 1.13 : Résistance à la traction à 28 jours [74].

1.3.4.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité définit le comportement de déformation du béton dans la zone élastique. Il est utilisé pour estimer la rigidité et par conséquent, les distributions de contraintes et de déformations dans les composants structurels doivent être soigneusement étudiées. Le module d'élasticité du béton avec 100% de GR est de 8% à 36% inférieur à celui du béton avec des GN [75], ce qui est principalement dû à la faible résistance et au module d'élasticité des GR avec la présence de l'ancien mortier poreux [76].

Wang et al. [75] ont étudié l'influence des granulats fins recyclés (GFR) sur les propriétés mécaniques du béton avec différents taux de remplacement de granulats grossiers recyclés (GGR). Deux types de GFR différents avec des propriétés différentes (Densité et absorption d'eau) et un seul type de GGR ont été utilisés. Ils ont constaté que le module d'élasticité diminue avec l'incorporation de GFR ou de GGR à 28 jours. Une incorporation complète de GGR à réduit le module d'élasticité du béton de 18.9% à 23.6%, tandis qu'un remplacement à 100% du sable naturel par du GFR a réduit le module d'élasticité de béton de 2.1 à 16%.

Pereira-de-Oliveira et al. [77] ont obtenu une réduction du module d'élasticité de 3% pour un remplacement de 40% (à 7 et 28 jours) et de 7.5% pour un remplacement de 100% par des GR à 28 jours. Cette réduction s'explique par une faible rigidité des GR par rapport aux GN, ce qui est due à la présence de vieux mortier adhérent aux granulats. Les auteurs ont également constaté que le module d'élasticité augmente avec le temps (Tableau 1.7).

Tableau 1.7 : Résultats des propriétés mécaniques du BAP [77]

| Mélanges | Résistance à la compression (MPa) | | Module d'élasticité dynamique (GPa) | |
|----------|-----------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|
| | 7 jours | 28 jours | 7 jours | 28 jours |
| BAP | 44 | 54 | 32 | 39 |
| BAP20 | 43 | 54 | 30 | 39 |
| BAP40 | 42 | 53 | 31 | 38 |
| BAP100 | - | 51 | - | 36 |

Fiol et al. [59] ont évalué le module d'élasticité statique et dynamique dans un BAP fabriqué avec de granulats grossiers recyclés. Ils ont conclu que les modules d'élasticité statique et dynamique diminuaient avec l'augmentation du remplacement des granulats recyclés. Ces diminutions sont dues à la plus faible rigidité du GR par rapport au GN (Figure 1.14).

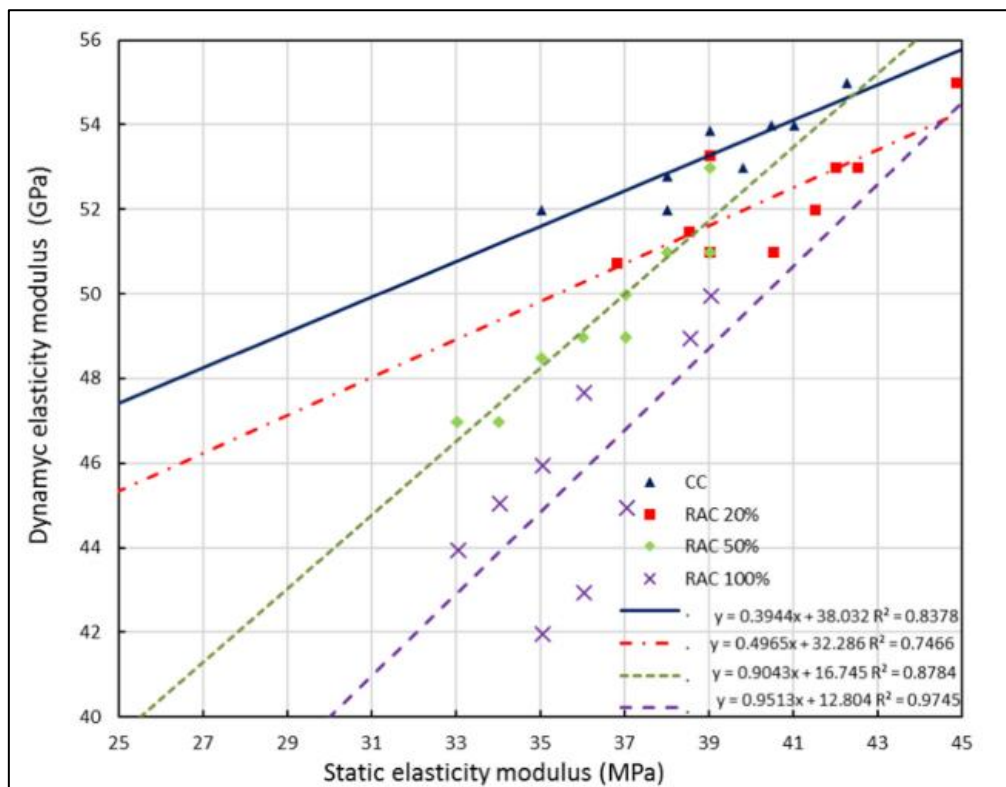


Figure 1.14 : Relation entre les modules d'élasticité dynamique et statique [59].

Salesa et al. [78] ont montré que le module d'élasticité dynamique et statique du béton témoin (non recyclés) est supérieur à celui des mélanges de béton multi recyclés (RC2 et RC3) et recyclés (RC1). De plus, à chaque cycle recyclage, le module d'élasticité diminue. En ce qui concerne le module d'élasticité dynamique, le module d'élasticité du béton témoin est également supérieure de 16.1%, 4.5% et 8.1% respectivement pour RC3, RC1 et RC2. Pour le module d'élasticité statique, le béton témoin a une valeur de 34.1GPa soit 17.2% de plus que RC3 et 11.2% de plus que RC1 et RC2.

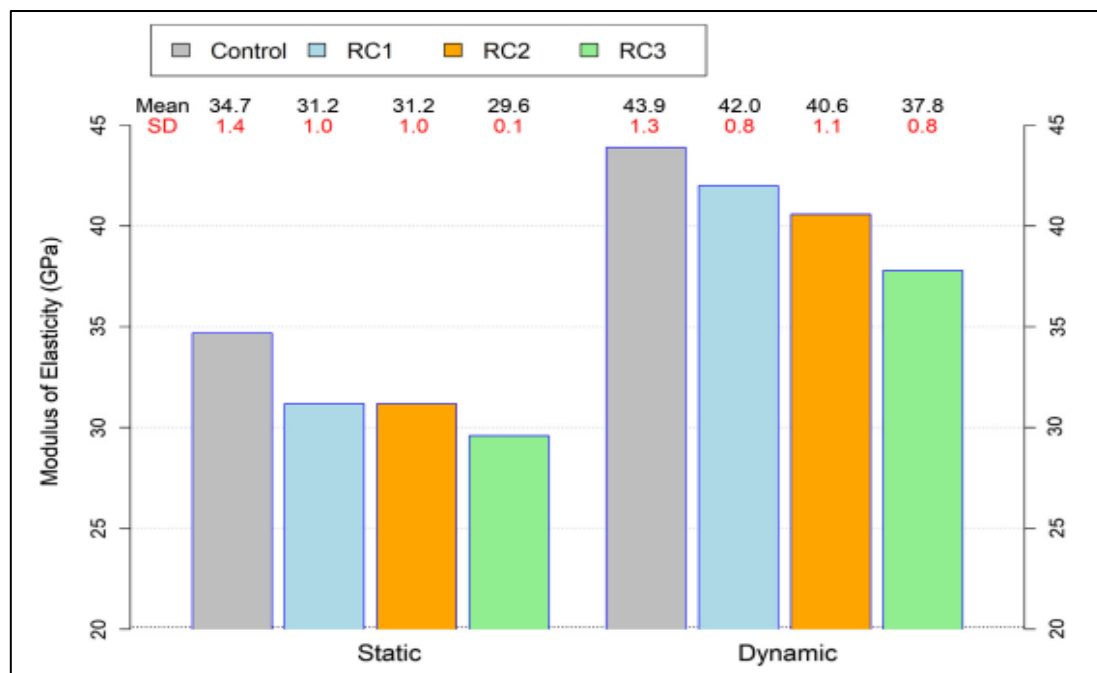


Figure 1.15 : Module d'élasticité statique et dynamique de différents types de béton [78].

1.3.5 Influence des granulats de béton recyclé sur la durabilité des bétons

En général, la durabilité du béton est mesurée par ses caractéristiques de perméabilité face aux agents agressifs présents dans l'environnement, tels que les sulfates, les chlorures, les acides, le dioxyde de carbone, l'oxygène, etc. Des études sur le béton contenant des granulats recyclés ont révélé que ses performances en termes de durabilité sont généralement inférieures à celles du béton conventionnel. La mauvaise performance de durabilité du béton est associée à la qualité inférieure des granulats recyclés en raison de la présence de nombreuses fissures et de pores à l'intérieur de leur structure.

1.3.5.1 Perméabilité

La perméabilité du béton est le facteur le plus important qui affecte sa durabilité. Des études antérieures ont examiné la perméabilité à l'oxygène et à l'eau, l'absorption par immersion et par capillarité, ainsi que la sorptivité de l'eau du béton contenant des granulats recyclés.

Djelloul et al. [43] ont mené une étude sur l'effet des granulats recyclés sur l'absorption d'eau du BAP (Figure 1.16). Dans cette étude le sable et le gravier ont été remplacés à des teneurs de 25%, 50%, 75% et 100%. Les résultats montrent que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés. L'absorption d'eau la plus élevée est notée pour les mélanges avec une teneur plus élevée en GR. Par exemple, la valeur d'absorption d'eau du BAP avec 100% GR est presque deux fois supérieure à celle du mélange témoin (SCCR0L0).

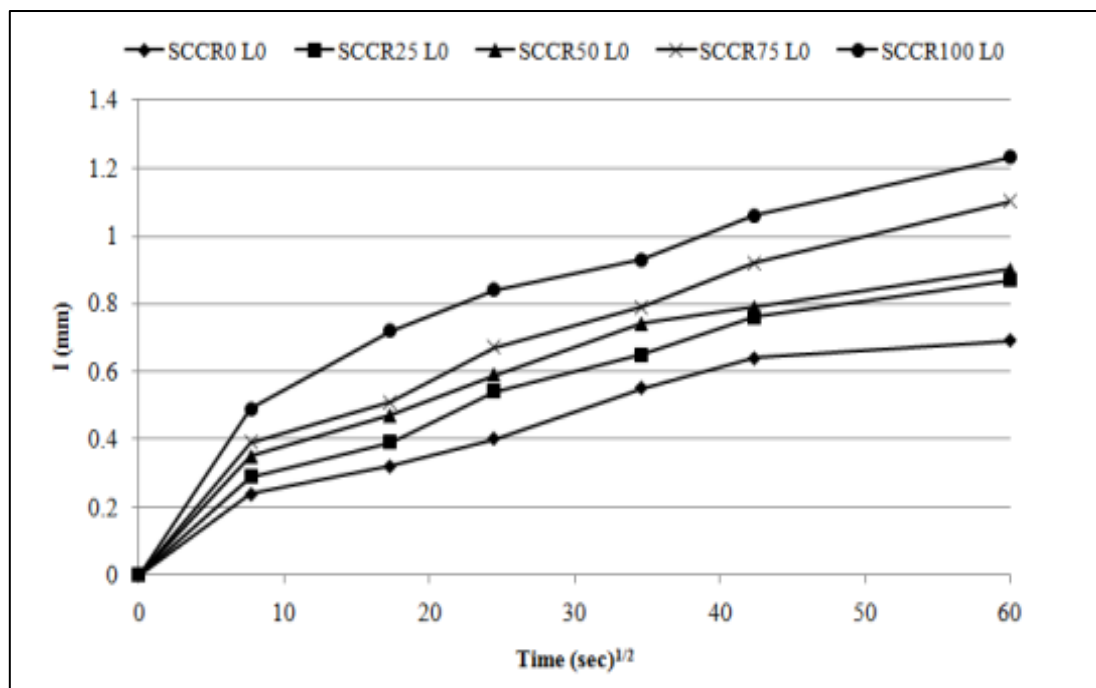


Figure 1.16 : Absorption d'eau des BAP contenant des quantités variables de GR [43].

Tuyan et al. [79] ont trouvé que l'absorption d'eau par immersion et par capillarité augmente avec l'augmentation du rapport E/C et le taux d'incorporation de GR. Même si cet effet dernier n'est pas significatif dans les mélanges avec un rapport E/C de 0.43. Les auteurs indiquent que le remplacement du granulat naturel par du GR entraîne une diminution du volume des micropores dans le béton.

Santos et al. [80] ont évalué l'absorption d'eau, à la fois par immersion totale et par capillarité, dans des mélanges contenant du GGR et du GFR à différents âges (28, 91 et 181 jours). Il a été également observé que l'absorption d'eau augmente avec des quantités croissantes de GR et le BAP avec 100% de GR (substitution uniquement avec GR grossier) présente des valeurs d'absorption d'eau inférieure à celles du BAP avec 50% de GR (substitution avec 50% de GR fin et grossier), ceci a été expliqué par le fait que les GGR ont des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus faible que les GFR.

D'autres résultats similaires ont été trouvés par Sasanipour et al. [81] où ils ont montré que l'absorption d'eau des bétons autoplaçants avec des granulats fins recyclés est plus élevée que celle des granulats grossiers recyclés. Un remplacement à 100% par des granulats grossiers a augmenté l'absorption d'eau de 28%, mais avec des granulats fins à 100%, l'absorption d'eau a augmenté de 87%.

D'autre part, Pereira-de-Oliveira et al. [77] ont constaté que l'incorporation de granulats recyclés grossiers n'a pas eu d'effet significatif sur l'absorption capillaire d'eau, même si une diminution de l'eau capillaire a été observée avec une augmentation des GR. Une diminution d'environ 12% a été justifiée par le volume élevé de pâte de ciment du BAP. Cette pâte enveloppe les granulats recyclés grossiers et pénètre leur structure poreuse (Figure 1.17).

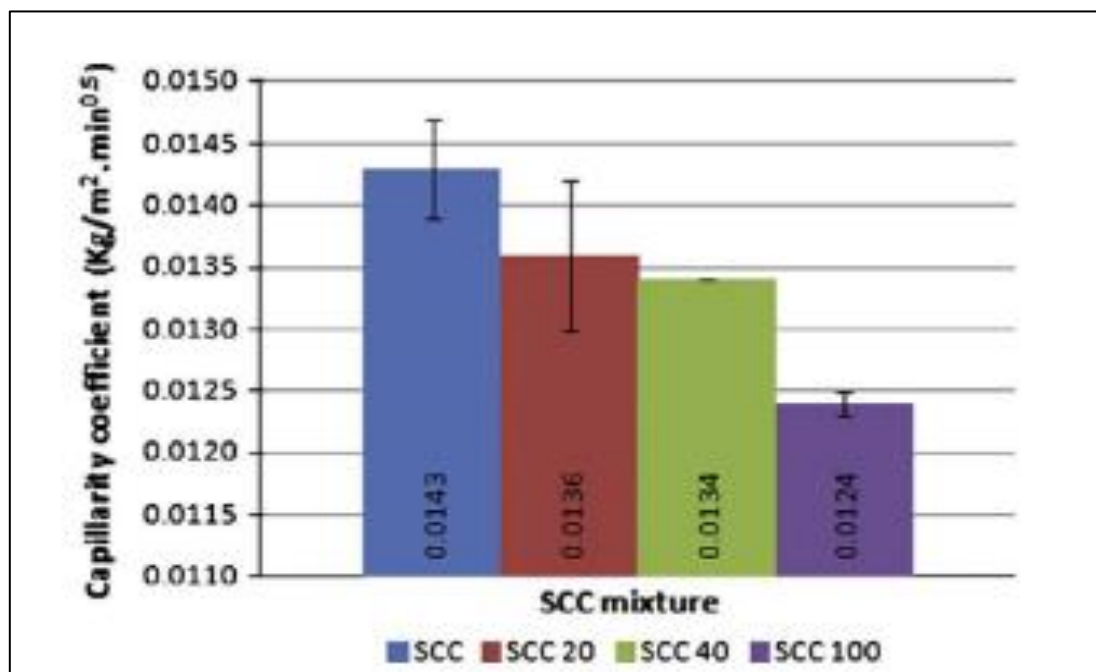


Figure 1.17 : Coefficient de capillarité de l'eau des mélanges de BAP [77].

L'étude menée par Bravo et al. [82] s'est concentrée sur l'investigation de la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés issus de déchets de construction et de démolition mélangés. Les auteurs ont spécifiquement examiné la perméabilité à l'oxygène d'échantillons de béton produits en utilisant différents pourcentages de granulats recyclés fins ou grossiers (0%, 10%, 50% et 100%). Ils ont observé que lorsque les granulats fins étaient entièrement remplacés par des granulats recyclés, la perméabilité à l'oxygène du béton augmentait de plus de 43% par rapport au béton témoin. De même, un remplacement complet des granulats grossiers par des granulats recyclés entraînait une augmentation plus importante de la perméabilité à l'oxygène, dépassant les 91% par rapport au béton témoin.

Thomas et al. [83] ont analysé la perméabilité à l'oxygène en fonction du rapport E/C du béton recyclé avec différents degrés de substitution et âges (Figure 1.18). Leurs résultats montrent une diminution de la perméabilité aux gaz avec le temps, notamment pour le béton avec un faible degré de substitution. De plus, la perméabilité à l'oxygène augmente avec l'augmentation du taux de substitution de GR.

La perméabilité aux gaz, y compris l'oxygène, dans le béton avec GR est influencée par la taille des particules des granulats recyclés. Par exemple, des GR de plus grande taille tendent à avoir une surface spécifique plus petite et une quantité moindre de mortier adhérent, ce qui réduit les besoins en eau mais augmente les défauts internes des particules de GR. Cette dynamique peut contribuer à une augmentation de la perméabilité aux gaz [84].

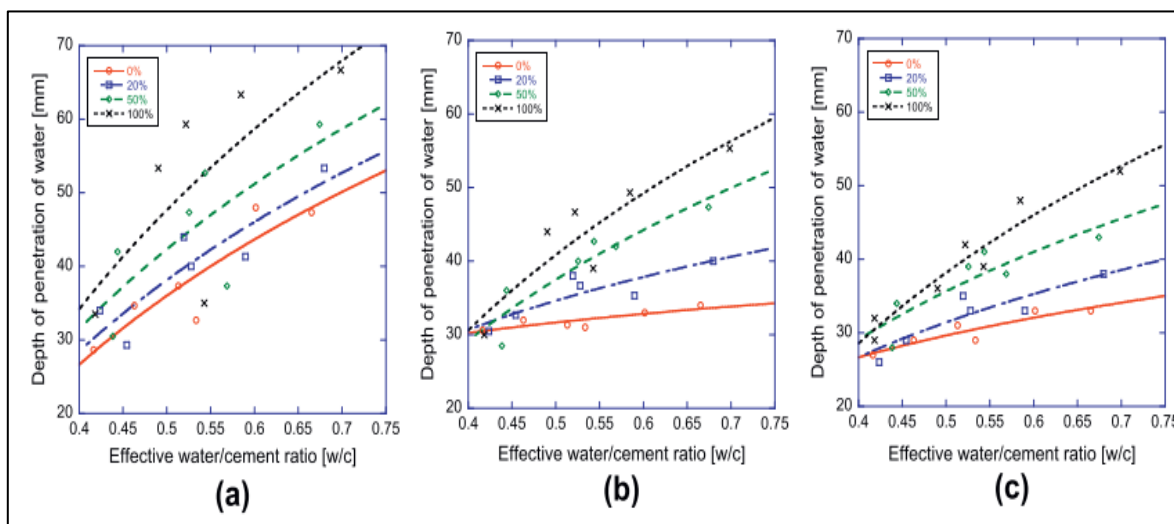


Figure 1.18 : Perméabilité à l'oxygène en fonction du rapport E/C pour différents degrés de substitution après 28 jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c) [83].

Ces résultats indiquent que l'introduction de granulats recyclés dans les mélanges de béton conduit à des valeurs de perméabilité plus élevées. Cela suggère que l'utilisation de granulats recyclés en remplacement des granulats naturels peut avoir un impact notable sur les propriétés de perméabilité du béton. Il est important de prendre en compte ces effets lors de la conception de mélanges de béton avec des granulats recyclés, car la perméabilité du béton joue un rôle crucial dans la détermination de sa durabilité et de sa résistance à divers facteurs environnementaux.

1.3.5.2 Résistance à la pénétration aux ions chlorure

La pénétration des ions chlorure est également l'une des principales causes de la corrosion des armatures en acier du béton armé. Elle est également fortement influencée par la perméabilité du béton, car l'ion chlorure est généralement transporté par l'eau. Par conséquent, la pénétration des ions chlorure dans le béton contenant des granulats recyclés est plus élevée que dans celui contenant des granulats naturels en raison de la porosité plus élevée des granulats recyclés.

Guo et al. [85] ont résumé l'influence du taux de remplacement du granulat recyclé grossier (c'est-à-dire le granulat de béton recyclé et le granulat mixte recyclé) sur la pénétration des ions chlorure (représentée par la charge totale relative passée). Ils ont remarqué que la charge totale relative passée augmentait à mesure que la proportion de granulats recyclés augmentait. Lorsque le taux de remplacement du granulat recyclé atteignait 100%, la charge totale passée dans béton à base de granulats recyclés pouvait être plus de deux fois supérieure à celle du béton à base de granulats naturels.

Kapoor et al. [35] ont étudié la résistance à la pénétration des ions chlorure de différents mélanges de BAP fabriqués avec 50% et 100% de granulats recyclés après 28, 56 et 120 jours de durcissement. Les résultats montrent qu'en comparaison avec le mélange témoin, l'utilisation de 100% de granulats recyclés dans les mélanges a entraîné une augmentation de la charge totale passée d'environ 12.9%, 11.4% et 13,8% respectivement aux âges de durcissement de 28, 56 et 120 jours (Figure 1.19). Cette augmentation de la pénétration des ions chlorure est attribuée à la porosité relativement plus élevée de ce béton en raison de la nature poreuse de la couche de mortier résiduelle entourant une particule de granulats recyclés.

Dans l'étude de Pedro et al. [86], la résistance à la pénétration des chlorures a été analysée en déterminant les coefficients de diffusion à 28 et 91 jours de béton fabriqué avec deux sources différentes de granulats recyclés (l'un produit en laboratoire BL et l'autre dans une usine de préfabrication BP). Les résultats présentés dans le tableau 1.8 montrent une augmentation des coefficients de diffusion avec l'augmentation de l'incorporation simultanée de GFR et de GGR. Ainsi, à 28 jours, les mélanges BL présentent des augmentations des coefficients d'environ 7%, 13% et 23% pour des taux de remplacement de 25%, 50% et 100%, respectivement. Pour les mélanges BP, les augmentations sont de 2%, 12% et 37%. A 91 jours, des tendances similaires sont observées. En ce qui concerne l'influence de l'âge, on observe une diminution des valeurs des coefficients en passant de 28 à 91 jours, entre 12% et 20% pour les deux familles (béton de laboratoire et préfabriqués). Cela peut s'expliquer par le temps de durcissement plus long des échantillons, qui favorise une plus grande hydratation du ciment et entraîne donc un volume de vides plus faible.

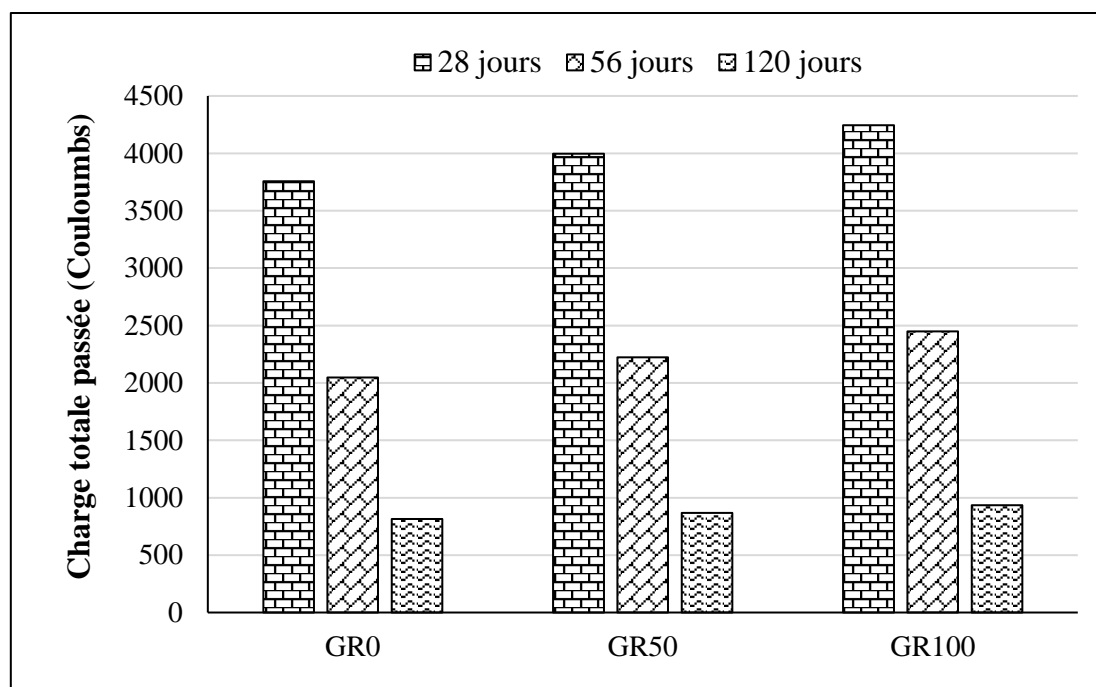


Figure 1.19 : Effet des granulats recyclés sur la résistance à la pénétration du chlorure du BAP [35].

Tableau 1.8 : Résultats de la diffusion des chlorures à 28 et 91 jours [86]

| Les mélanges | 28 jours | | 91 jours | |
|--------------|---|-------------------|---|-------------------|
| | D ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) | Δ_{GR} (%) | D ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) | Δ_{GR} (%) |
| Béton témoin | 9.2± 1.0 | 0.0 | 7.8±0.6 | 0.0 |
| G25F25- BL | 9.8±0.7 | 6.5 | 8.0±0.9 | 2.6 |
| G25F25- BP | 9.4±0.2 | 2.2 | 8.8±0.4 | 12.8 |
| G50F50- BL | 10.04±1.5 | 13.0 | 8.7±0.7 | 11.5 |
| G50F50- BP | 10.3±0.3 | 12.0 | 9.0±0.5 | 15.4 |
| G100F100- BL | 11.3±0.2 | 22.8 | 9.0±0.7 | 15.4 |
| G100F100- BP | 12.6±1.0 | 37.0 | 10.8±0.5 | 38.5 |
| 100F- BL | 10.7±1.5 | 16.3 | 8.9±1.0 | 14.1 |
| 100F- BP | 11.2±1.5 | 21.7 | 9.9±0.5 | 26.9 |
| 100C- BL | 10.2±0.1 | 10.9 | 8.1±1.1 | 3.8 |
| 100C- BP | 9.6±0.5 | 4.3 | 7.7±0.6 | -1.3 |

1.3.5.3 Attaque par les sulfates et les acides

Les granulats recyclés peuvent être contaminés par plusieurs types de substances telles que les sulfates, les chlorures et les carbonates. En général, l'attaque par les sulfates entraîne une détérioration importante du béton due à l'expansion du béton. L'expansion du béton se produit en raison de la formation de sulfate de calcium qui résulte de la réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium et le sulfate, ainsi que de la formation d'étringite, ce qui conduit à la formation de fissures conduisant à la rupture.

Plusieurs chercheurs ont étudié la résistance du béton à base de granulats recyclés à l'environnement exposé aux sulfates et aux acides. Koushkbaghi et al. [87] ont étudié l'influence du remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés sur la réduction de la résistance et la perte de masse du béton exposé à l'acide sulfurique (H_2SO_4) (Figure 1.20). Le facteur important qui affecte l'attaque acide est la perméabilité du béton, qui est influencée par la connectivité, la taille et la distribution des pores dans le béton. Le béton contenant des granulats recyclés présente une plus grande porosité, ce qui entraîne une lixiviation plus rapide du calcium des CSH et du $Ca(OH)_2$. Avec l'augmentation du taux de granulats recyclés, la décalcification augmente, entraînant une perte de masse plus élevée par rapport au mélange témoin.

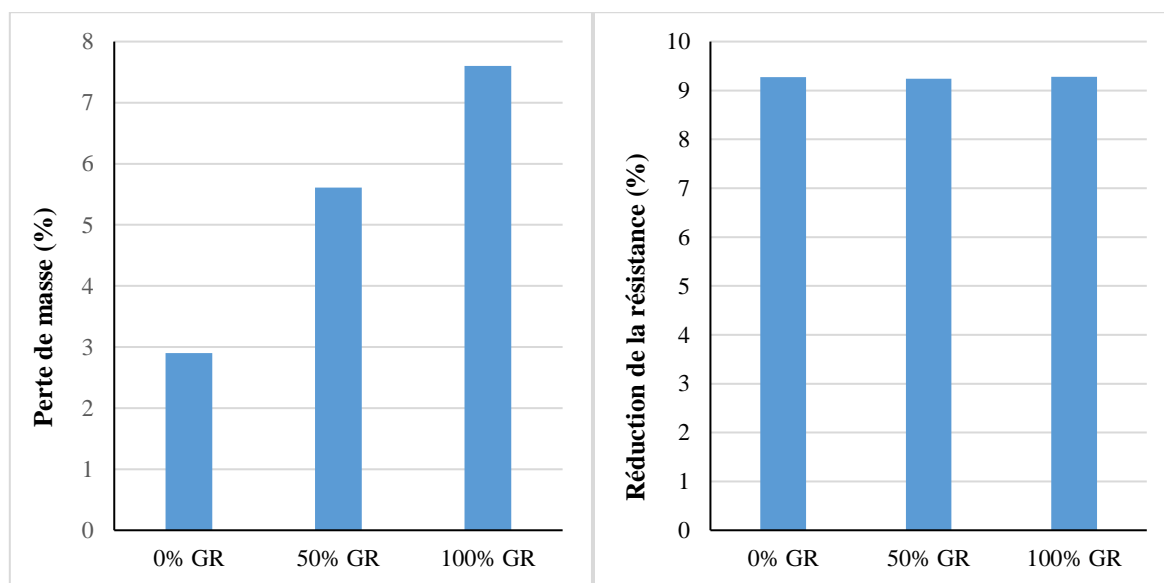


Figure 1.20 : Effet des GR sur la réduction de la résistance et la perte de masse [87].

Selon Ahmed et al. [88], la résistance à l'acide (H_2SO_4) a diminué avec la substitution des GR, atteignant une résistance à l'acide minimale à 60% de GR par rapport au mélange de contrôle. Les GR présentent plus de vides que les GN à travers lesquels l'acide peut facilement pénétrer dans le béton, ce qui entraîne une moindre résistance à l'acide.

Althoey et al. [89] ont examiné l'effet des granulats recyclés sur la résistance du béton à l'attaque d'acide. La résistance à l'attaque d'acide du béton a été évaluée en termes de perte de masse après 28, 56 et 90 jours d'immersion des échantillons dans H_2SO_4 . Ils ont constaté qu'avec l'augmentation de la proportion des granulats recyclés, la résistance du béton à l'acide diminue rapidement. Cette diminution est principalement attribuée à la présence de plus d'hydroxyde de calcium dans les granulats recyclés qui sont très sensibles à l'acide. De plus, la grande perméabilité des granulats recyclés permet une infiltration profonde d'agents nocifs dans la matrice de l'échantillon.

Limbachiya et al. [90], [91] ont rapporté dans leur étude que le béton contenant une quantité plus élevée de granulats recyclés a montré une résistance plus faible à l'attaque par les sulfates. De même, Hua et Song [92] ont signalé dans leurs études empiriques que le béton recyclé présente une faible résistance à l'attaque par les sulfates, car la perte de masse du béton augmente avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés dans le test de résistance aux sulfates.

1.3.5.4 Carbonatation

La carbonatation révèle la capacité du béton à permettre le passage du dioxyde de carbone à travers une section de béton. Cette propriété est réputée dépendre de la perméabilité du béton aux granulats recyclés, de la teneur en CO_2 de l'environnement et de l'humidité relative. Les résultats de la pénétration accélérée de la carbonatation évalués par divers chercheurs semblent être incohérents. Les mélanges de béton contenant 100% de granulats recyclés grossiers ont présenté des profondeurs de carbonatation de 1,3 à 2,5 fois supérieures à celles du béton ordinaire correspondant [93]. Silva et al. [94], [95] ont constaté que les profondeurs de carbonatation étaient deux fois plus élevées avec une teneur en granulats recyclés grossiers de 100% par rapport au béton ordinaire correspondant. Avec un remplacement de 100% par des granulats recyclés fins, la valeur de la carbonatation pourrait augmenter jusqu'à 8,7 fois, principalement en raison de l'absorption d'eau plus élevée des granulats recyclés fins par rapport aux granulats recyclés grossiers, ce qui entraîne une augmentation de la perméabilité du béton[96].

Kurda et al. [97] ont rapporté que les profondeurs de carbonatation étaient 2,7 fois plus élevées avec une teneur de 100% en granulats recyclés grossiers (Figure 1.21). Xiao et al. [98] ont signalé que la profondeur de carbonatation du BAP augmentait avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés grossiers jusqu'à 70%, puis diminuait lorsque le taux de remplacement dépassait 70%.

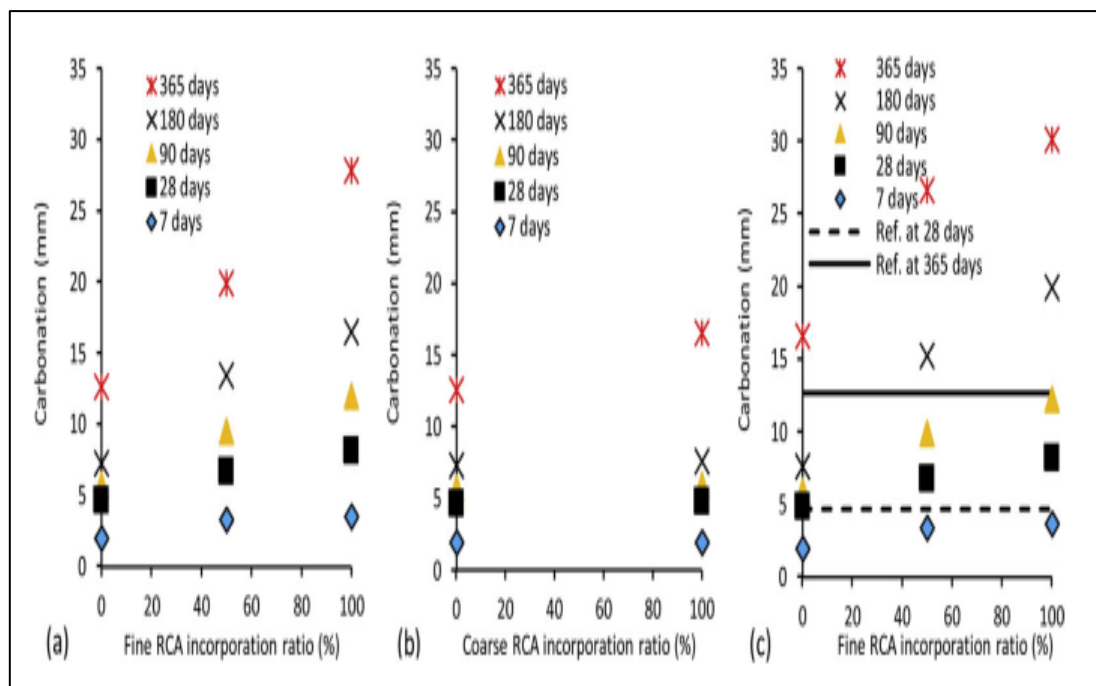


Figure 1.21 : Influence de l'incorporation de (a) GGR, (b) GFR et (c) GGR et GFR sur la profondeur de carbonatation des mélanges de béton [97].

Zhang et al. [99], sur la base de leur modèle prédictif, ont calculé la profondeur de carbonatation naturelle dans une structure en béton contenant une armature en acier recouverte d'une couche de béton jusqu'à 25mm. Ils ont suggéré que la carbonatation dans le béton ordinaire prendrait 49,3 ans pour atteindre une profondeur de 25mm, 41,9 ans pour le béton contenant 50% de granulats recyclés grossiers et 35,7 ans pour le béton contenant 100% de granulats recyclés grossiers.

Geng and Sun [100] ont constaté qu'avec une teneur en granulats recyclés fins de 40%, les profondeurs de carbonatation étaient trois fois plus élevées, et avec une teneur en granulats recyclés fins de 60%, elles augmentaient jusqu'à cinq fois plus élevées. Ils ont également constaté que la profondeur de carbonatation augmentait également avec la diminution de la taille des particules de granulats recyclés fins.

Evangelista et al. [101] ont trouvé que la profondeur de carbonatation était 1,53 fois plus élevée pour le béton contenant 100% de granulats recyclés fins à 90 jours, tandis qu'ils ont trouvé des profondeurs de carbonatation 30% plus élevées avec un remplacement de 100% par des granulats recyclés fins à 182 jours [102].

Les résultats trouvés par Adessina et al. [103] montrent que la profondeur de carbonatation augmente avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats recyclés. La réduction du rapport E/C jusqu'à 0,35 est suffisante pour compenser la perte de profondeur de carbonatation due à la présence des granulats recyclés. Il a été constaté que la profondeur de carbonatation béton à base de granulats recyclés peut atteindre celle du béton à base de granulats naturels grâce à l'ajustement du rapport E/C (Figure 1.22).

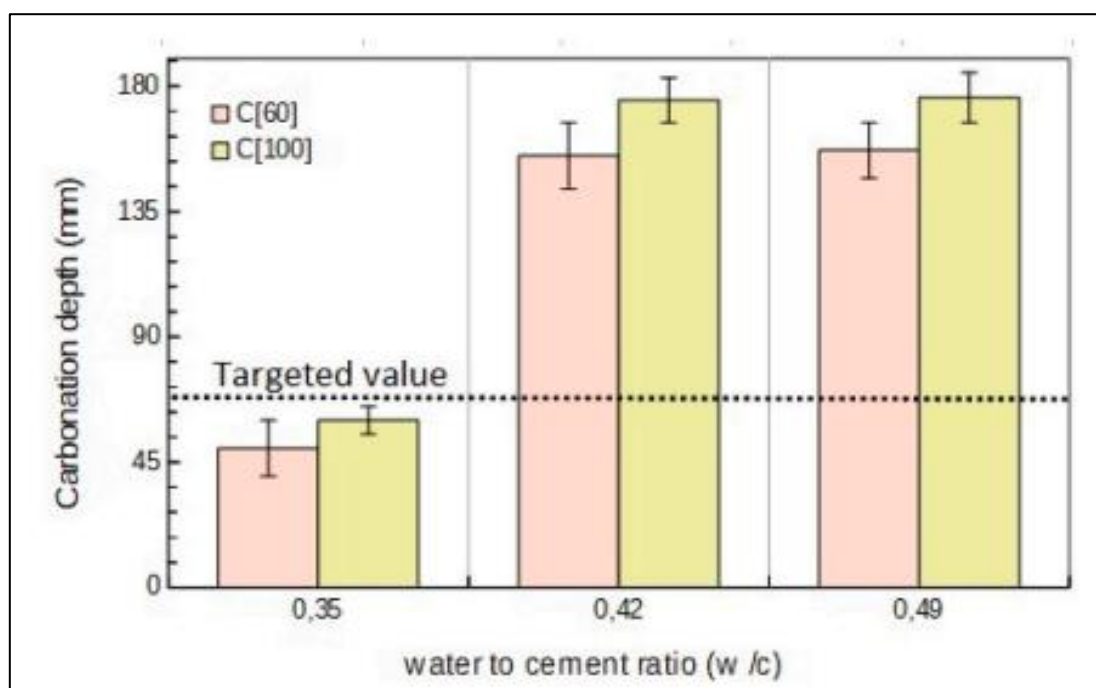


Figure 1.22 : Évolution de la profondeur de carbonatation de béton pour différents rapports eau-ciment à 28 jours [103].

Bravo et al. [82] ont également évalué la profondeur de carbonatation dans des mélanges avec des granulats fins et grossiers recyclés provenant d'une usine de recyclage des déchets de construction et de démolition. Ils ont observé qu'un remplacement complet des granulats naturels grossiers entraînait une augmentation de 22% de la profondeur de carbonatation après 28 jours. En revanche, un remplacement complet des granulats fins entraînait une augmentation de 182%.

1.4 Béton à base de granulats de béton recyclé et d'ajouts cimentaires

De nombreuses recherches antérieures ont confirmé les mauvaises performances du béton recyclé par rapport au béton normal. Pour surmonter les inconvénients du béton recyclé, plusieurs techniques ont été pratiquées par de nombreux chercheurs au cours des dernières décennies. Les propriétés du béton recyclé peuvent être considérablement améliorées en éliminant le mortier adhérent à la surface des granulats recyclés grâce à différents processus tels que la pré-imprégnation des granulats recyclés avec divers acides ou le traitement par concassage en deux étapes et broyage mécanique [85], [86]. De même, une amélioration substantielle des qualités des granulats recyclés a été observée en renforçant le mortier adhérent à l'aide de différentes techniques telles que le revêtement de la surface avec une laitance de ciment ou des solutions de matériaux pouzzolaniques [104], le traitement avec des émulsions polymères [105] et l'incorporation de bactéries dans le béton [106]. Les propriétés du béton recyclé ont également été modifiées en incorporant des nanoparticules [107]–[109].

Le développement de techniques de carbonatation accélérée [110] et l'utilisation de granulats recyclés traités au carbone [111] montrent un effet remarquable dans l'amélioration des qualités du béton recyclé. L'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau et d'une teneur légèrement plus élevée en ciment étaient d'autres moyens fructueux pour produire un béton recyclé aux propriétés de résistance similaires à celles du béton normal. De plus, les caractéristiques du béton recyclé ont été significativement améliorées par l'inclusion de plusieurs ajouts cimentaires tels que le métakaolin (MK), les cendres volantes (CV), le laitier, la fumée de silice (FS) en remplacement du ciment [112].

L'utilisation des ajouts cimentaires pour améliorer la qualité du béton recyclé est considérée comme pratiquement réalisable étant donné que la plupart des méthodes susmentionnées nécessitent une consommation supplémentaire d'énergie et de temps. Lorsque les ajouts cimentaires sont incorporés dans le béton, ils réagissent avec l'hydroxyde de calcium généré par le processus d'hydratation du ciment et modifient la microstructure du béton en formant un gel cimentaire additionnel C-S-H. De plus, les fines particules des ajouts cimentaires pénètrent dans les espaces entre les particules de ciment et contribuent au raffinement des pores dans la matrice cimentaire, réduisant la perméabilité à l'eau et à l'oxygène, la diffusion des ions chlorure, ainsi que les attaques acides et les attaques sulfatiques.

1.4.1 Influence des granulats recyclés et des ajouts cimentaires sur l'ouvrabilité

Tung et al. [113] ont réalisé une étude sur l'effet de laitier sur l'ouvrabilité du béton fabriqué avec 100% de granulats grossiers recyclés (GGR). Ils ont démontré que la quantité de laitier dans les mélanges de béton recyclé avait un impact sur l'ouvrabilité car la valeur d'affaissement a légèrement augmenté avec l'augmentation de la teneur en laitier, indiquant ainsi une amélioration de l'ouvrabilité (Figure 1.23). Cela pourrait être attribué à la texture sphérique et vitreuse de la surface des particules qui agit comme un lubrifiant et provoque une friction interne entre les composants du béton, influençant ainsi considérablement la fluidité du béton.

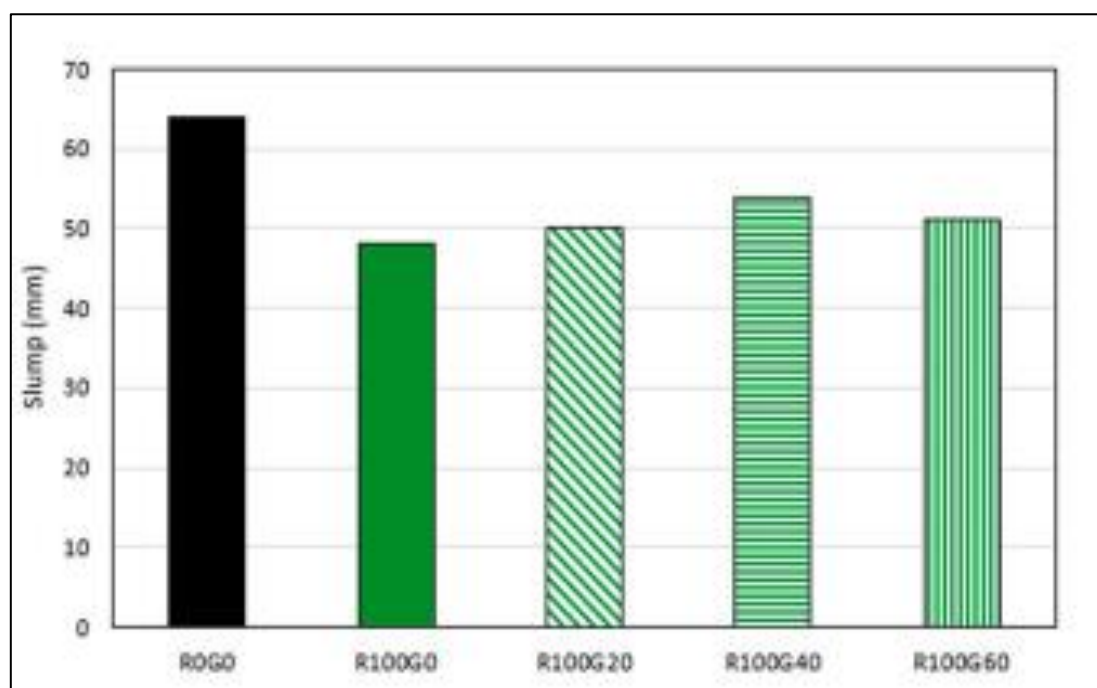


Figure 1.23 : Maniabilité du béton recyclé avec du laitier [113].

Ces résultats sont contradictoires avec l'étude menée par Habeeb et al. [114] (Figure 1.24). L'utilisation de laitier a un effet négatif sur la maniabilité des mélanges de granulats de béton recyclé, en particulier ceux ayant des taux de laitier plus élevés. Lorsque la teneur en laitier est de 5%, la maniabilité du mélange de granulats recyclés reste inchangée. Cependant, lorsque la teneur en laitier est de 10% et 15%, l'étalement diminue à 75 mm. Lorsque la teneur en laitier est de 20%, il a été constaté que la maniabilité est aussi réduite à 65 mm. La raison de la diminution de la maniabilité est probablement due à la surface plus élevée des particules de laitier par rapport à celles des particules de ciment.

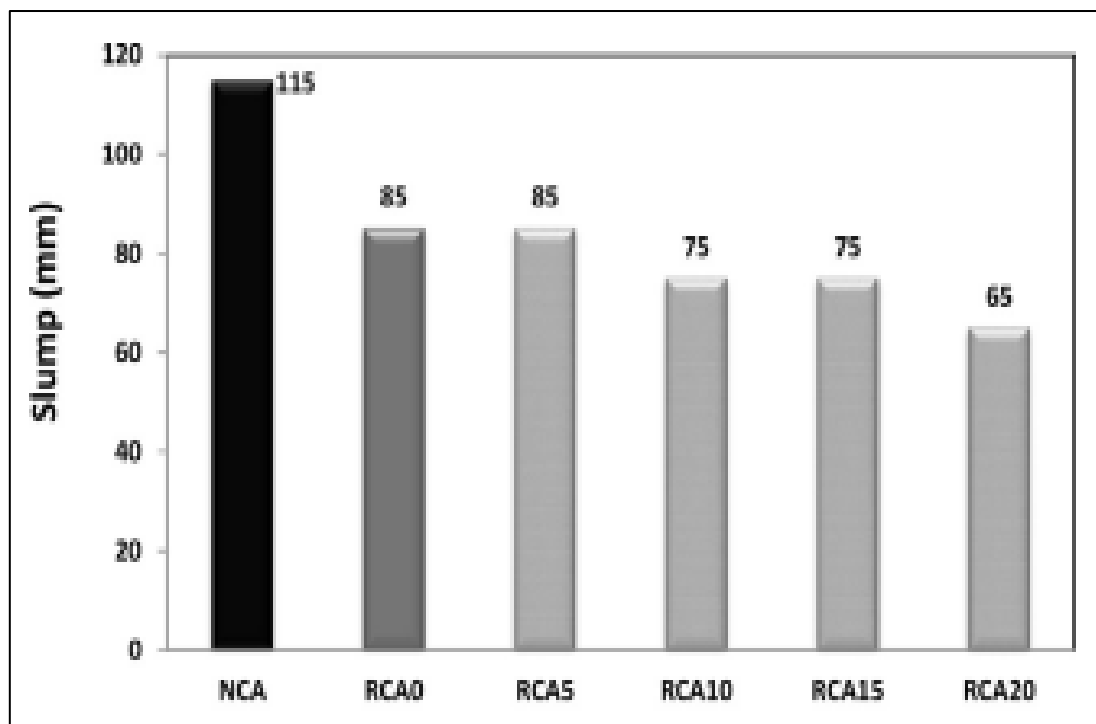


Figure 1.24 : Affaissement des mélanges de granulats de béton recyclé avec différents taux de laitier [114].

Omrane et al. [19] ont utilisé une pouzzolane naturelle (PN) et des granulats de béton recyclé en substitution partielle du ciment et des granulats naturels, respectivement. Ils ont observé que lorsque des granulats de béton recyclé étaient utilisés, les pourcentages de pouzzolane pouvaient être augmentés jusqu'à 20%, tandis que le pourcentage de pouzzolane ne pouvait pas dépasser 15% avec des granulats naturels si les exigences liées au test d'écoulement au cône d'Abrams devaient être satisfaites. L'efficacité de la pouzzolane naturelle était plus grande en combinaison avec du béton à base de granulats recyclés.

Une autre étude menée par Guo et al. [115] a utilisé des granulats de béton recyclés en remplacement des granulats naturels et des ajouts cimentaires (cendres volantes, laitier et fumée de silice) en remplacement du ciment (Figure 1.25). Ils ont constaté que la valeur d'étalement des mélanges de béton recyclé ternaires a augmenté avec l'augmentation de la teneur en ajouts cimentaires, indiquant que les cendres volantes et le laitier peuvent améliorer la capacité de remplissage des mélanges de béton recyclé. Les mélanges quaternaires ont présenté une valeur d'étalement plus basse, indiquant que la fumée de silice a réduit la capacité de remplissage.

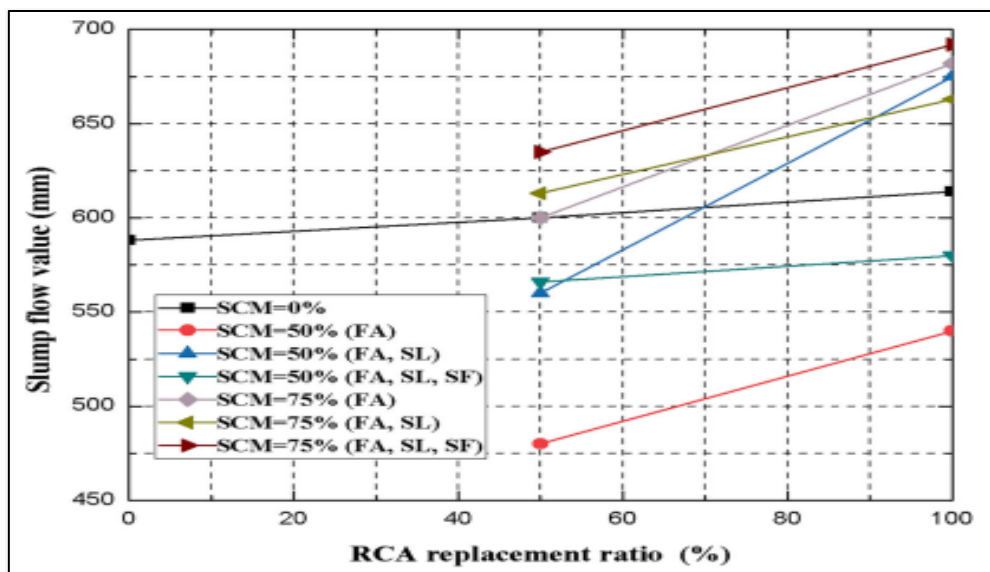


Figure 1.25 : Influence des granulats recyclés et des ajouts cimentaires sur l'étalement [115].

1.4.2 Influence des granulats recyclés et ajouts cimentaires sur les résistances mécaniques

1.4.2.1 Résistance à la compression

Parthiban and Saravana Raja Mohan [116] ont utilisé un mélange de silicate de sodium (Na_2SiO_3) et de solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) comme liquide de mélange au lieu de l'eau lorsqu'ils ont remplacé tout le ciment par du laitier. Cette étude a incorporé des granulats recyclés grossiers à 0%, 25%, 50%, 75% et 100% pour le mélange réalisé avec le laitier. L'utilisation de laitier avec l'activateur susmentionné a conduit à un béton de qualité supérieure (résistance à la compression plus élevée) à tous les niveaux de granulats recyclés mentionnés ci-dessus par rapport au béton fabriqué avec des granulats naturels.

Majhi et al. [117] ont étudié l'effet de 20%, 40% et 60% de laitier à faible indice d'activité sur la résistance à la compression du béton recyclé préparé avec 25%, 50% et 100% des granulats recyclés à 7, 28 et 90 jours. Les résultats indiquent que l'effet du laitier sur les différents bétons (béton naturel et béton recyclé) est similaire, une diminution de la résistance à la compression est observée. La réduction de la résistance à la compression des mélanges de béton recyclé avec différentes teneurs en laitier par rapport à leurs mélanges respectifs de béton recyclé témoins est moins importante en comparaison de la réduction de la résistance à la compression des mélanges de béton naturel avec les teneurs respectives en laitier par rapport au mélange de béton naturel témoin à des âges ultérieurs (Tableau 1.9).

Tableau 1.9 : Pourcentage de diminution de la résistance à la compression du béton recyclé avec l'ajout de laitier [117]

| GR | Laitier | | | | | | | | | | | |
|------|---------|------|------|------|----------|-----|------|------|----------|-----|-----|------|
| | 7jours | | | | 28 jours | | | | 90 jours | | | |
| | 0% | 20% | 40% | 60% | 0% | 20% | 40% | 60% | 0% | 20% | 40% | 60% |
| 0% | 0 | 11 | 16.6 | 28.8 | 0 | 7.3 | 11.3 | 23.2 | 0 | 4.9 | 7 | 14.3 |
| 25% | 0 | 11.1 | 18.5 | 26 | 0 | 6.8 | 11.8 | 22 | 0 | 4.4 | 7.7 | 12.6 |
| 50% | 0 | 7 | 13 | 24 | 0 | 3.2 | 5 | 16.4 | 0 | 2.0 | 2.3 | 7.5 |
| 100% | 0 | 11.1 | 20 | 28.8 | 0 | 8.2 | 13.1 | 21.3 | 0 | 4.4 | 6.8 | 9.2 |

Kapoor et al. [35] ont montré que l'utilisation de fumée de silice et de métakaolin en tant que substitution partielle de ciment permettait de compenser la perte de résistance lorsque les granulats naturels étaient remplacés par des granulats recyclés, le métakaolin était relativement plus efficace que la fumée de silice. Une étude menée par Dilbas et al. [118] a indiqué que l'ajout de fumée de silice améliore la résistance à la compression du béton contenant des granulats de béton recyclé. Sunayana et al. [119] ont trouvé que les résistances à la compression du béton recyclé avec 20 % et 30 % de cendres volantes étaient de 0,91 et 0,83 fois supérieures à celles du béton recyclé sans cendres volantes. Les cendres volantes à faible teneur peuvent être bénéfiques pour compenser les effets néfastes des granulats recyclés sur la résistance à la compression.

Pedro et al. [120] ont rapporté que la résistance à la compression du béton recyclé augmente de plus de 20% avec l'ajout de 5% de fumée de silice par rapport au béton recyclé témoin. En revanche, la résistance du béton recyclé avec 10% de fumée de silice diminuait d'environ 5% avec l'ajout de 10% de fumée de silice. De même, Shaikh [121] a démontré que 10% de fumée de silice est la teneur optimale pour améliorer les résistances mécaniques du béton recyclé contenant 40% de laitier. Cependant, l'ajout de 15% de fumée de silice n'entraînait pas d'amélioration remarquable de la résistance à la compression.

Younis et al. [122] ont examiné l'influence de l'utilisation de métakaolin (MK) sur la résistance à la compression des bétons fabriqués avec 100% de granulats recyclés (Figure 1.26). Les résultats ont montré que l'ajout de MK diminue la perte de résistance en raison de l'utilisation des granulats recyclés. Cette diminution de la perte de résistance dépend du taux de remplacement du MK. L'utilisation de 20% de MK dans les mélanges de béton à base des granulats recyclés peut compenser la perte de résistance causée par l'inclusion des granulats recyclés et sa résistance peut atteindre jusqu'à 90% de celle du béton à base des granulats naturels.

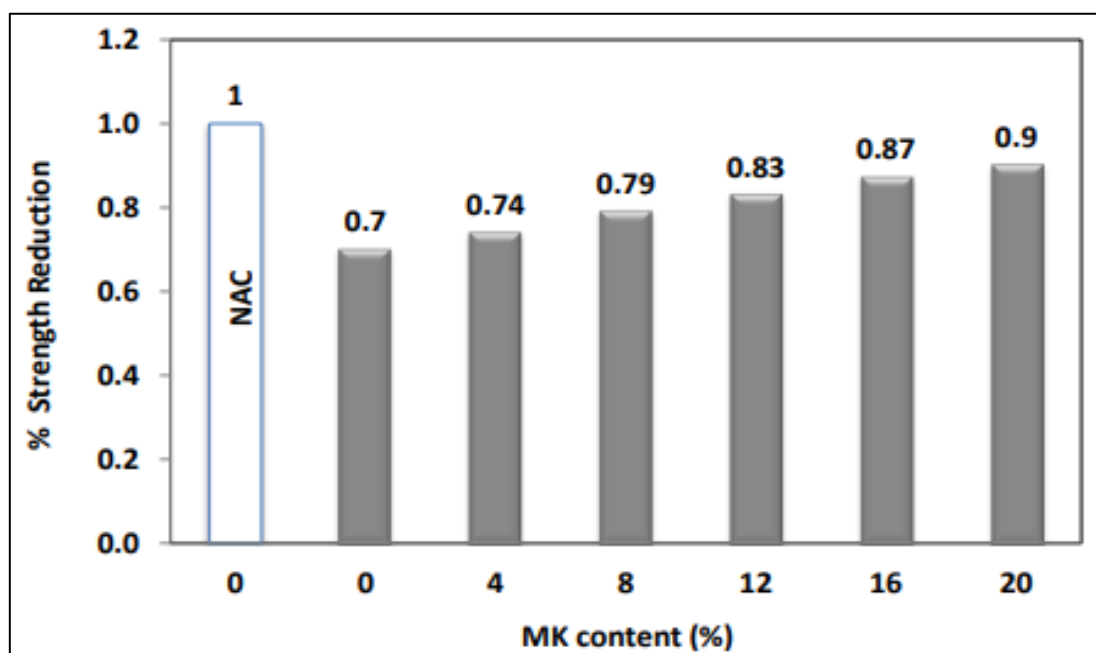


Figure 1.26 : Résultats de la résistance à la compression à 28 jours [122].

1.4.2.2 Résistance à la traction et à la flexion

Qureshi et al. [123] ont effectué une comparaison quantitative de l'influence des cendres volantes, des cendres de balle de riz, du laitier et de la fumée de silice sur les propriétés mécaniques du béton recyclés. L'ajout de ces matériaux cimentaires améliore la résistance à la traction par fendage du béton recyclé. Les cendres de balle de riz et la fumée de silice entraînent des améliorations maximales (8 à 14%) de la résistance à la traction du béton recyclé. L'incorporation de laitier et de cendres volantes conduit respectivement à des améliorations de 2 à 10% et 1 à 7% en fonction de l'âge des essais. Ali et al. [124] ont déterminé que les cendres volantes ont eu un effet positif sur les résistances mécaniques du béton recyclés. A 90 jours, les résistances en traction par fendage et en flexion du béton recyclé contenant 20% de cendres volantes ont augmenté de 5% à 7%.

Muduli and Mukharjee [125] ont évalué l'effet de différentes quantités de MK sur les caractéristiques mécaniques du béton recyclé contenant des quantités variables de granulats grossiers recyclés. Les propriétés mécaniques du béton recyclé, telles que la résistance à la traction par fendage et la résistance en flexion, s'améliorent considérablement avec l'utilisation de MK. La plus grande amélioration est enregistrée au taux d'incorporation de 15% de MK (Figure 1.27).

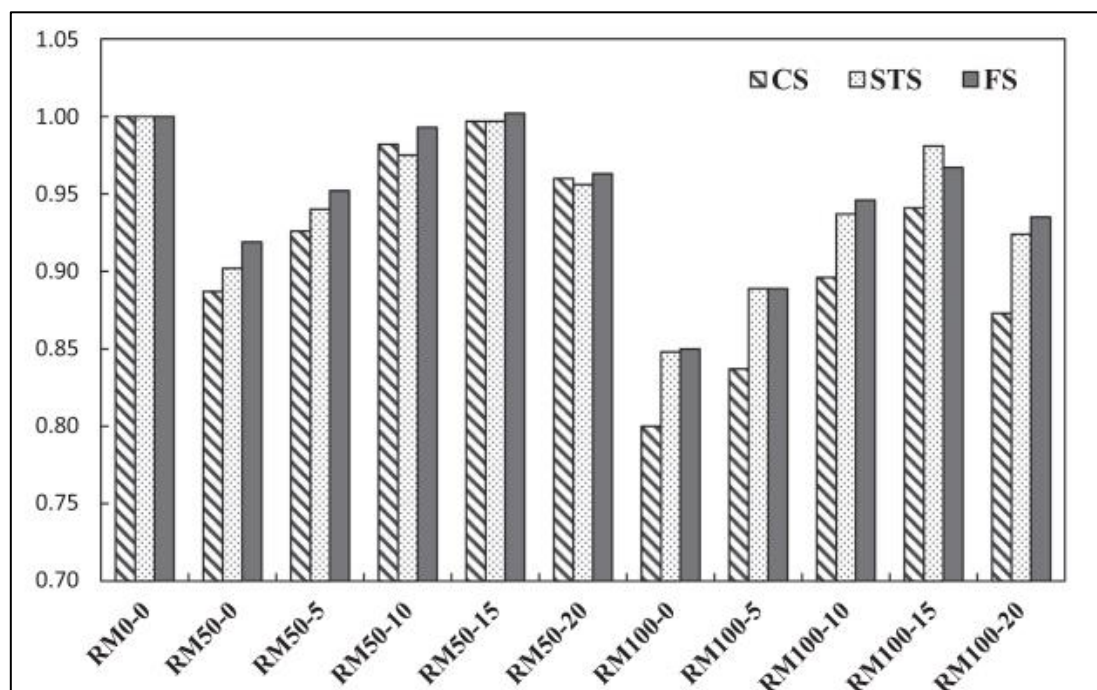


Figure 1.27 : Variation de la résistance à la compression (CS), de la résistance à la traction par fendage (STS) et de la résistance à la flexion (FS) par rapport au mélange de béton témoin[125].

Omrane et al. [126] ont étudié l'effet de la pouzzolane naturelle et des granulats de béton recyclé sur les propriétés physico-mécaniques des deux types de BAP (naturel et recyclé) à différents âges (Figure 1.28). Une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane naturelle dans les mélanges est observée à tous les âges.

Selon l'étude de Ahmad et al. [88], l'incorporation de laitier améliore la résistance à la traction du béton recyclé. La résistance à la traction du béton composé de 60% de granulats recyclés était d'environ 10% de plus que le mélange témoin avec une substitution de 20% de laitier. L'impact positif du laitier sur la résistance à la traction est dû à la réaction pouzzolanique de la silice dans le laitier avec l'hydrate de calcium du ciment, formant un gel cimentaire supplémentaire (c'est-à-dire le silicate de calcium hydraté (C-S-H)).

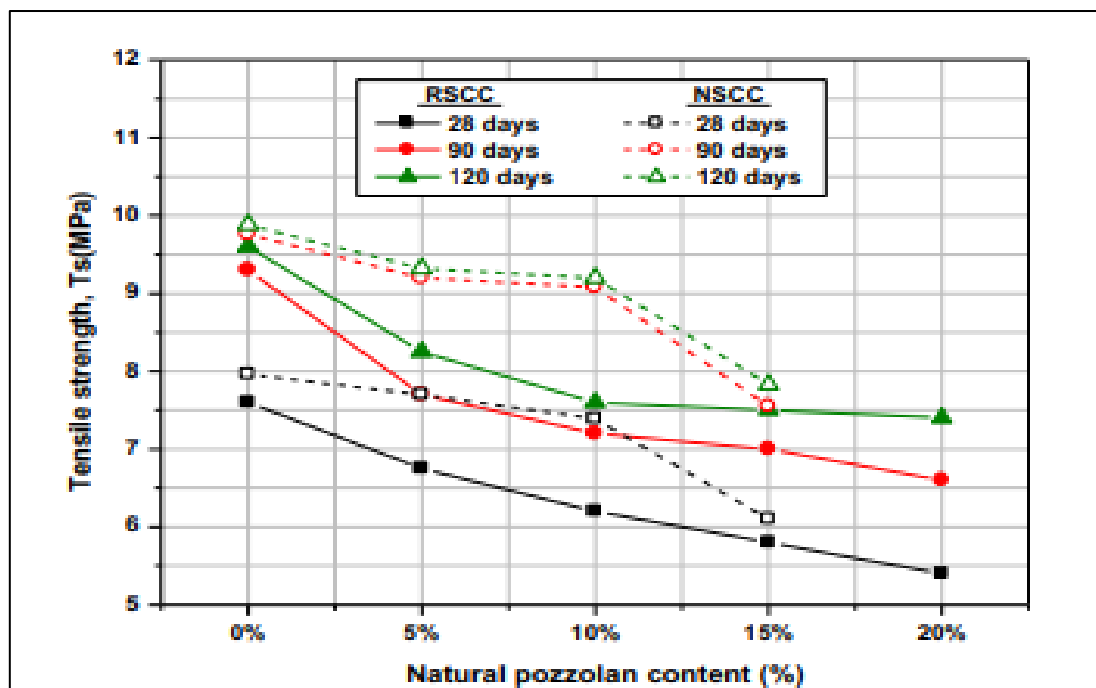


Figure 1.28 : Effets des granulats recyclés et de la teneur en pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction [126].

1.4.2.3 Module d'élasticité

Les résultats de Younis et al. [127] ont montré l'effet bénéfique de la substitution partielle du ciment par du MK sur le module d'élasticité du béton à base de granulats recyclés (Tableau 1.10). L'amélioration du module d'élasticité augmente à mesure que la teneur en MK augmente. Les valeurs les plus élevées ont été obtenues avec une teneur en MK de 20%. L'amélioration du module d'élasticité grâce à l'incorporation de MK pourrait être due à la modification de la surface des particules de GR. La grande surface spécifique des particules de MK contribue à combler les microfissures présentes dans les GR, ce qui conduit à obtenir des GR résistants.

Ju et al. [128] ont examiné les performances mécaniques du béton fabriqué avec des granulats fins recyclés produits commercialement, en utilisant trois types d'ajouts cimentaires, à savoir les cendres volantes, le laitier, et la fumée de silice. Les taux de remplacement de granulat recyclé sont de 50% et 100%. La quantité des ajouts cimentaires dans le béton prend en compte deux types de dosages : les dosages normaux (30%, 40% et 5%) et la moitié des dosages normaux. Les résultats montrent que les ajouts cimentaires améliorent le module d'élasticité du béton recyclés d'environ 45%. La moitié du dosage normal des ajouts s'est révélée plus efficace pour augmenter le module d'élasticité du béton R100 que pour le béton R50 (Figure 1.29).

Tableau 1.10 : Module d'élasticité (résultats et valeurs normalisées) [127].

| Groupe | GR | MK | Valeur (GPa) | Module d'élasticité | |
|--------|------|-----|--------------|------------------------|----------------------------------|
| | | | | Normalisé (Pour R0) | Normalisé (Pour R35/R70/R100) |
| G0 | 0% | 0% | 37.4 | 1.00 | - |
| | 35% | 0% | 32.1 | 0.86 | 1.00 |
| | 75% | 0% | 31.0 | 0.83 | 1.00 |
| | 100% | 0% | 30.1 | 0.80 | 1.00 |
| G1 | 35% | 4% | 33.9 | 0.91 | 1.06 |
| | 35% | 8% | 34.1 | 0.91 | 1.06 |
| | 35% | 12% | 35.0 | 0.94 | 1.09 |
| | 35% | 16% | 35.7 | 0.95 | 1.11 |
| | 35% | 20% | 36.8 | 0.98 | 1.15 |
| G2 | 70% | 4% | 33.6 | 0.9 | 1.08 |
| | 70% | 8% | 33.7 | 0.9 | 1.09 |
| | 70% | 12% | 34.4 | 0.92 | 1.11 |
| | 70% | 16% | 35.3 | 0.94 | 1.14 |
| | 70% | 20% | 36.0 | 0.96 | 1.16 |
| G3 | 100% | 4% | 31.1 | 0.83 | 1.03 |
| | 100% | 8% | 31.6 | 0.84 | 1.05 |
| | 100% | 12% | 32.7 | 0.87 | 1.09 |
| | 100% | 16% | 33.2 | 0.89 | 1.10 |
| | 100% | 20% | 33.3 | 0.89 | 1.11 |

Javad et al. [64] ont étudié l'influence des GR sur le module d'élasticité du BAP contenant du MK et du calcaire. Selon la figure 1.30, les GR réduisent le module d'élasticité du BAP. Le module d'élasticité le plus élevé du béton est associé à l'échantillon contenant 20% de GR avec du MK. Les résultats des essais mécaniques sur les bétons à base des granulats recyclés contenant du MK et du calcaire montrent que le MK a eu presque le plus grand impact sur l'augmentation des propriétés mécaniques (la résistance à la compression et à la traction et ainsi le module d'élasticité).

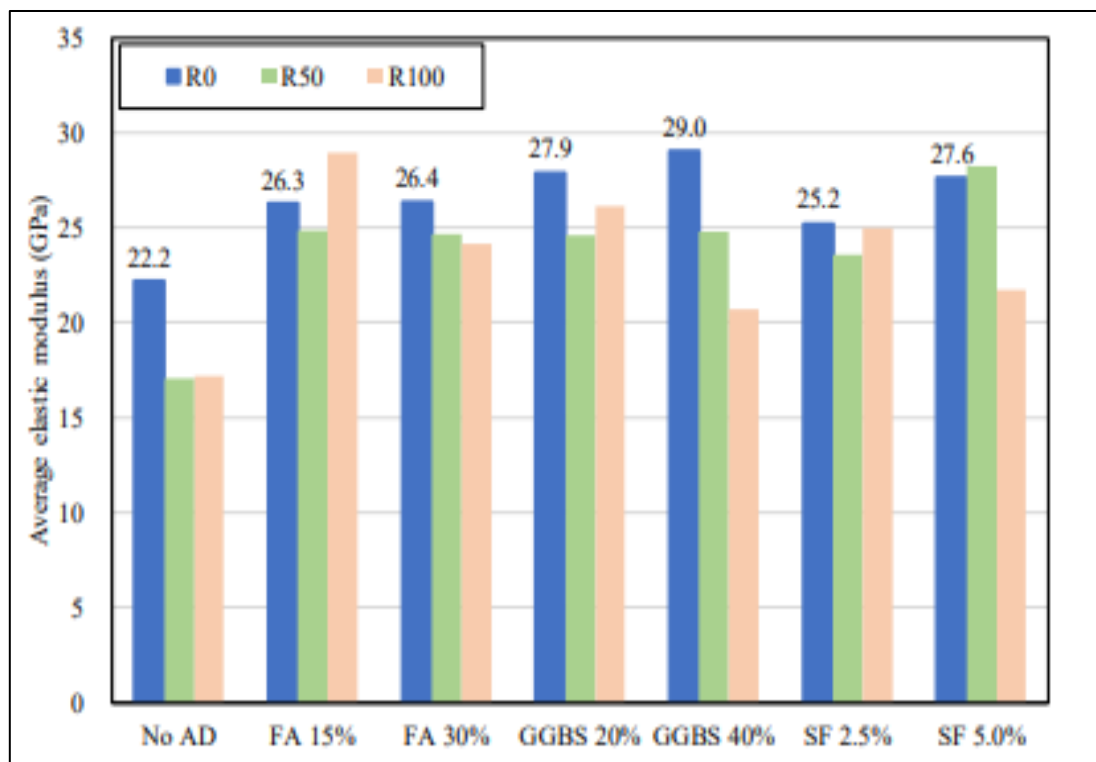


Figure 1.29 : Développement du module d'élasticité en fonction des ajouts cimentaires[128].

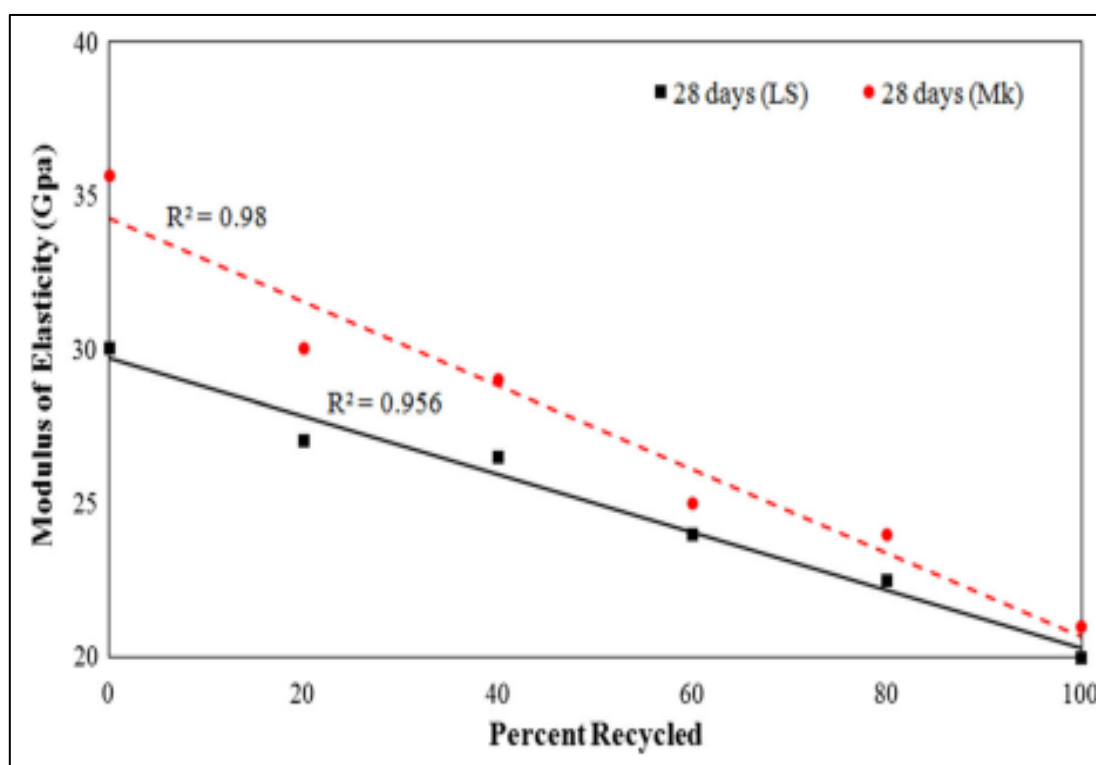


Figure 1.30 : Effet des granulats recyclés sur le module d'élasticité d'échantillons contenant du métakaolin et du calcaire [64].

1.4.3 Influence des granulats recyclés et des ajouts cimentaires sur la durabilité de béton

La notion de durabilité dans la construction devient de plus en plus cruciale. Les experts et les chercheurs travaillent sur le développement de nouveaux matériaux de construction alternatifs qui sont plus respectueux de l'environnement, nécessitent moins de matières premières rares et ont un impact moindre sur les écosystèmes. Parmi ces alternatives, on trouve des matériaux recyclés, des composites à base de fibres naturelles, des bétons à faibles empreinte carbone et d'autres matériaux innovants.

1.4.3.1 Perméabilité

Kubissa et al. [129] ont évalué l'effet de l'utilisation des cendres volantes, de la micro silice et du métakaolin en tant que substitution du ciment sur la perméabilité du béton à base de granulats recyclés (Tableau 1.11). Ils ont montré que la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés a augmenté la perméabilité, mais l'application des ajouts cimentaires a considérablement réduit cet impact négatif. D'autres résultats similaires ont été trouvés par Pedro et al. [130], où ils ont trouvé que l'absorption d'eau diminue pour les mélanges contenant des granulats recyclés avec l'utilisation de fumée de silice (Figure 1.31).

Tableau 1.11 : Résultats de l'absorption d'eau et la pénétration d'eau [129]

| Les mélanges | Absorption d'eau (%) | Sorptivité (cm/h ^{0.5}) | Pénétration d'eau (mm) |
|--------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Témoin | 5.70 | 0.152 | 37.3 |
| R | 8.35 | 0.168 | 83 |
| R-CV | 8.72 | 0.162 | 101 |
| R-CV-MS | 9.25 | 0.157 | 91 |
| R-CV-MK | 9.04 | 0.155 | 32.6 |

Selon Ali et al. [124], l'introduction des cendres volantes aide à réduire l'absorption d'eau du béton pour un niveau donné de granulats recyclés. L'absorption d'eau réduit de 9% lorsque les cendres volantes sont utilisées en remplacement partiel du ciment. Selon les auteurs, cette diminution est due à l'effet de remplissage des particules de cendres volantes.

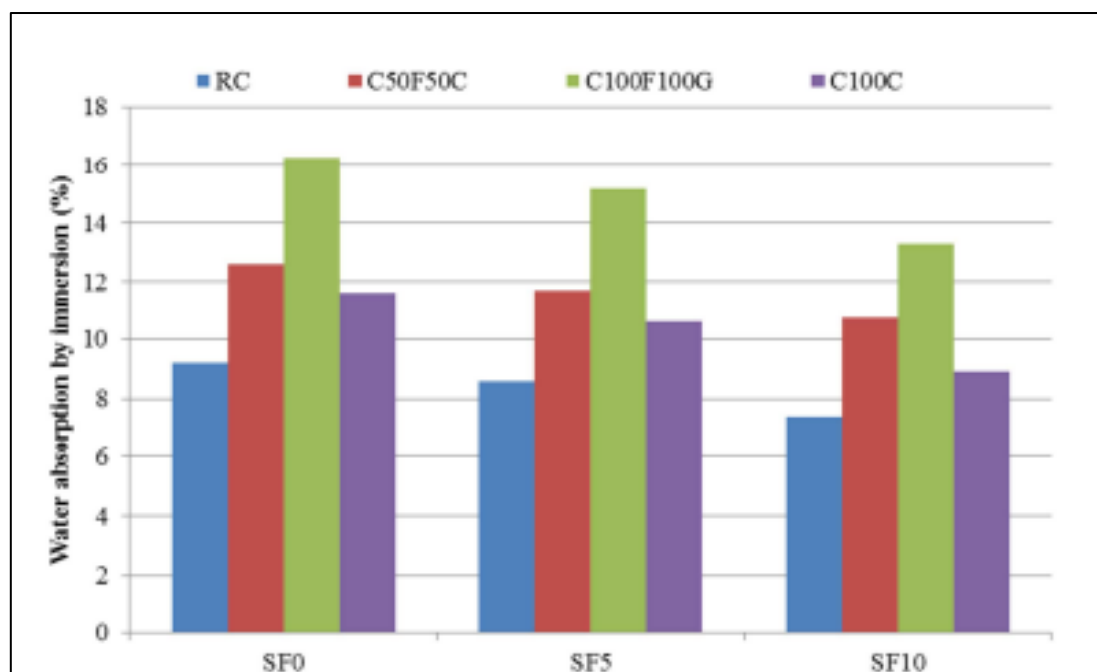


Figure 1.31 : Absorption d'eau de différents mélanges [130].

Sasanipour et al. [65] ont également montré que l'absorption d'eau dans les mélanges a été significativement réduite avec l'incorporation de la fumée de silice. L'utilisation de la fumée de silice dans les mélanges avec 25%, 50%, 75% et 100% de granulats de béton recyclé a entraîné une diminution de l'absorption d'eau de 32%, 18%, 35% et 33%, respectivement, par rapport à des mélanges similaires sans fumée de silice.

En effet, Xie et al. [131] ont montré, en étudiant l'influence du nano métakaolin sur la structure microporeuse du béton à base de granulats recyclés qu'avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats recyclés, le volume total des pores du béton a augmenté, et la surface spécifique a également augmenté. Après l'ajout de nano – métakaolin, le volume total des pores et la surface spécifique ont tous deux diminué (Figure 1.32).

D'après les résultats présentés par Djelloul et al. [43], la présence de laitier a engendré une amélioration remarquable de la résistance à la pénétration de l'eau du béton à base de granulats recyclés. La résistance à la pénétration de l'eau dans les mélanges préparés à base de 15% de laitier sont supérieures à celle des mélanges à base de 30% laitier (Figure 1.33). Selon les auteurs ce comportement est attribué à l'effet positif de laitier qui se traduit par l'amélioration de la structure des pores dans la zone de transition, réduisant ainsi la perméabilité.

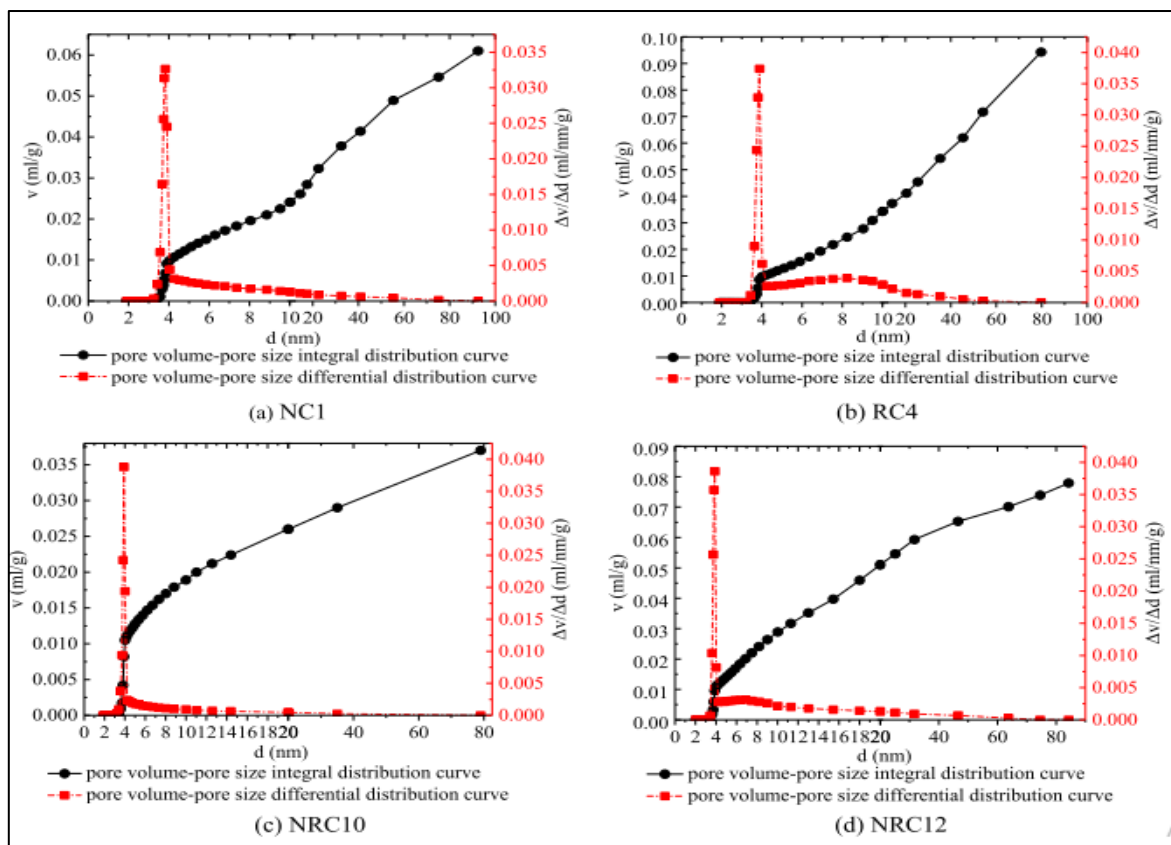


Figure 1.32 : Volume des pores – courbe de distribution différentielle et intégrale de la taille des pores [131].

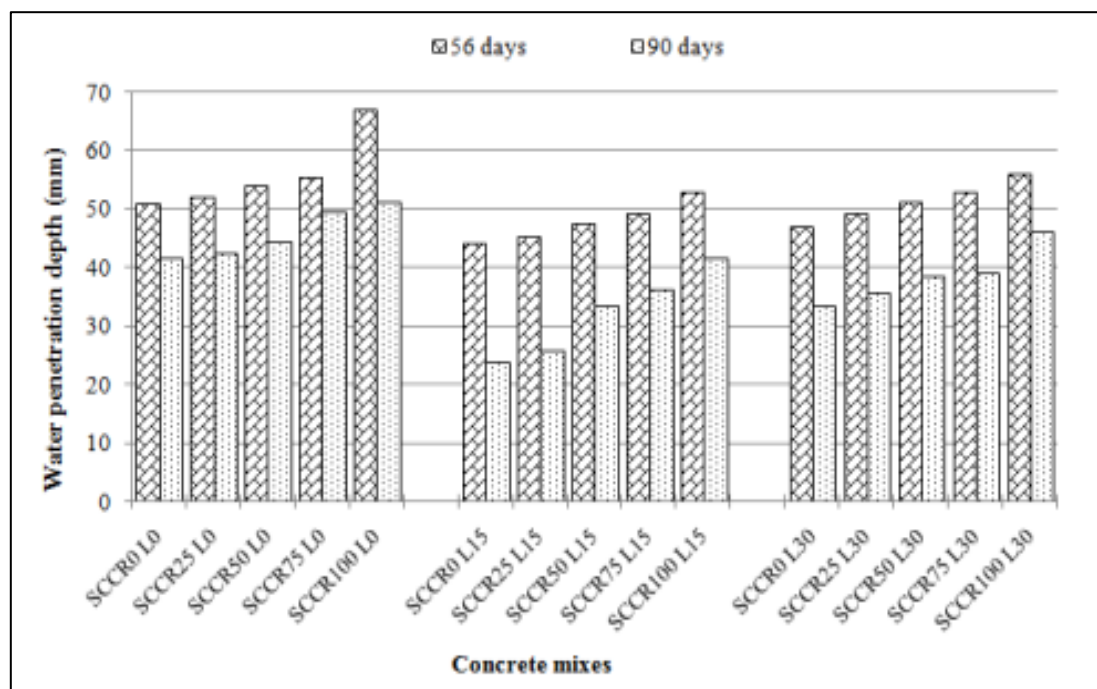


Figure 1.33 : Perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR [43].

1.4.3.2 Résistance à la pénétration aux ions chlorure

Les études menées par Sasanipour et al. [65] ont montré que par l'incorporation de la fumée de silice, la résistance à la pénétration des ions chlorure a augmenté de manière significative. La réduction de la totale charge passée pour un remplacement de 25%, 50%, 75% et 100% était respectivement de 65%, 50%, 48% et 28% avec l'incorporation de la fumée de silice. Les auteurs ont également montré que dans les mélanges contenant de la fumée de silice, la température des solutions pendant le test est inférieure à celle des mélanges sans fumée de silice. En effet, la fumée de silice affecte l'activité des ions. Plus la température des solutions augmente pendant l'expérience, plus l'activité et la pénétration des ions seront importantes (Tableau 1.12).

Tableau 1.12 : Résultats de l'essai de pénétration rapide des chlorures [65]

| Mélanges | Charge totale passée (Coulombs) | Température | | | | |
|-----------|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | | NaOH _i | NaCl _i | NaOH _f | NaCl _f | Temp de chambre |
| BAPR0F0 | 3565 | 24.5 | 24.5 | 50.7 | 50.7 | 24-26 |
| BAPR0F8 | 1429 | 23.7 | 23.3 | 30.7 | 30.6 | 25-26 |
| BAPR25F0 | 4149 | 24.6 | 24.1 | 54.6 | 57.2 | 24-25 |
| BAPR50F0 | 4280 | 27.4 | 25.5 | 58.4 | 57.3 | 24-25 |
| BAPR75F0 | 4490 | 24.5 | 24.4 | 69.6 | 68.6 | 25-26 |
| BAPR100F0 | 4170 | 24.1 | 23.8 | 58.5 | 59.8 | 25-26 |
| BAPR25F8 | 1445 | 22.1 | 21.2 | 45.4 | 46.9 | 24-25 |
| BAPR50F8 | 2125 | 21.8 | 21.7 | 35 | 35.1 | 24-25 |
| BAPR75F8 | 2330 | 24.2 | 24.3 | 35.6 | 39.1 | 25-26 |
| BAPR100F8 | 2989 | 23.8 | 23.4 | 43.4 | 42.2 | 25-26 |

Masood et al. [132] ont conclu que l'inclusion de bentonite en remplaçant le ciment dans les mélanges de béton contenant des granulats naturels et recyclés peut améliorer la résistance à la migration des ions chlorures. Ils ont trouvé que la pénétration du chlorure a diminué avec l'augmentation du taux de bentonite dans le béton (Figure 1.34). Ce comportement peut être attribué à l'amélioration de l'imperméabilité du béton.

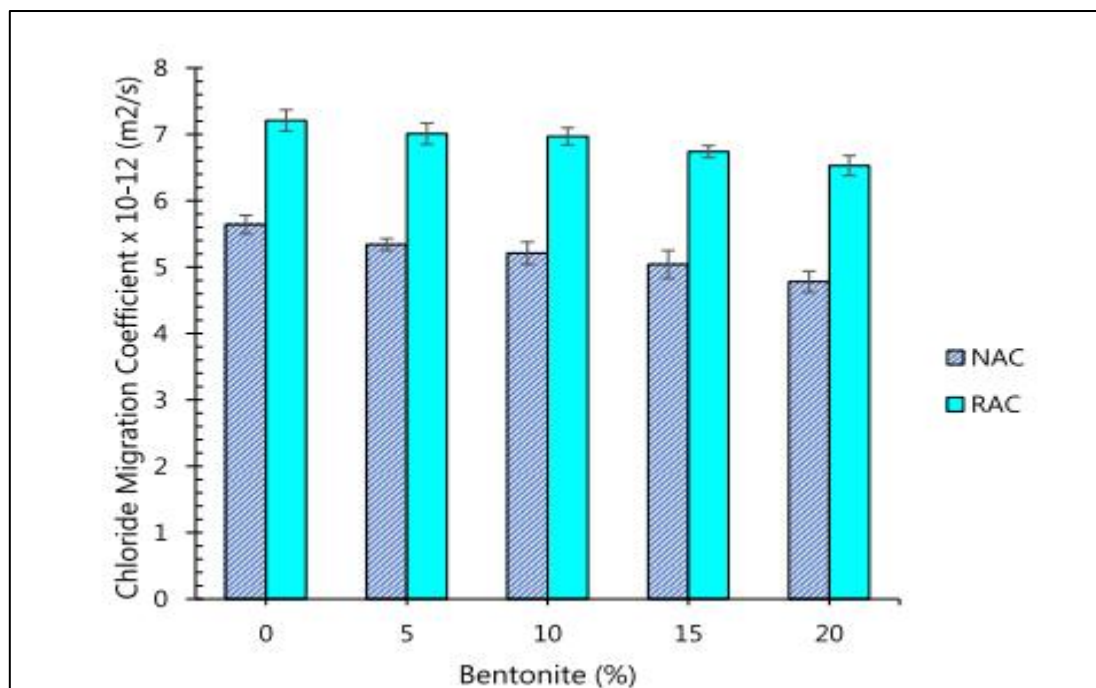


Figure 1.34 : Coefficient de migration des chlorures de béton contenant des granulats naturels et recyclés en fonction de taux de bentonite à 90 jours [132].

D'après Kapoor et al. [35], la fumée de silice et le métakaolin se sont révélés très efficace pour réduire la pénétration des ions chlorure dans les mélanges de BAP fabriqués avec des granulats recyclés. Lorsque le MK ou la FS étaient ajoutés, la pénétration des ions chlorure dans le BAP fabriqué avec des granulats recyclés en remplacement de tous les granulats naturels était significativement inférieure à celle du béton témoin fabriqué uniquement avec des granulats naturels.

Omrane et al. [19] ont évalué l'effet de la pouzzolane sur la profondeur de pénétration des ions chlorure de BAP contenant des granulats naturels et recyclés immergés en solution (3% NaCl). Ils ont constaté que la profondeur de pénétration des ions chlorure des BAP contenant de la pouzzolane naturelle est inférieure à celle du BAP sans pouzzolane, que ce soit pour les BAP à base des granulats naturels ou recyclés.

D'après les résultats présentés par Qureshi et al. [123], en utilisant les ajouts cimentaires, la résistance à la pénétration des chlorures du béton à base de granulats recyclés augmente de 21% à 46%. L'ordre d'amélioration (du plus bas au plus élevé) était la fumée de silice, les cendres de ball de riz, les cendres volantes et le laitier (Figure 1.35). L'amélioration de la résistance est attribuée à la perméabilité réduite de la matrice de liant en raison des réactions pouzzolaniques et de l'effet de remplissage.

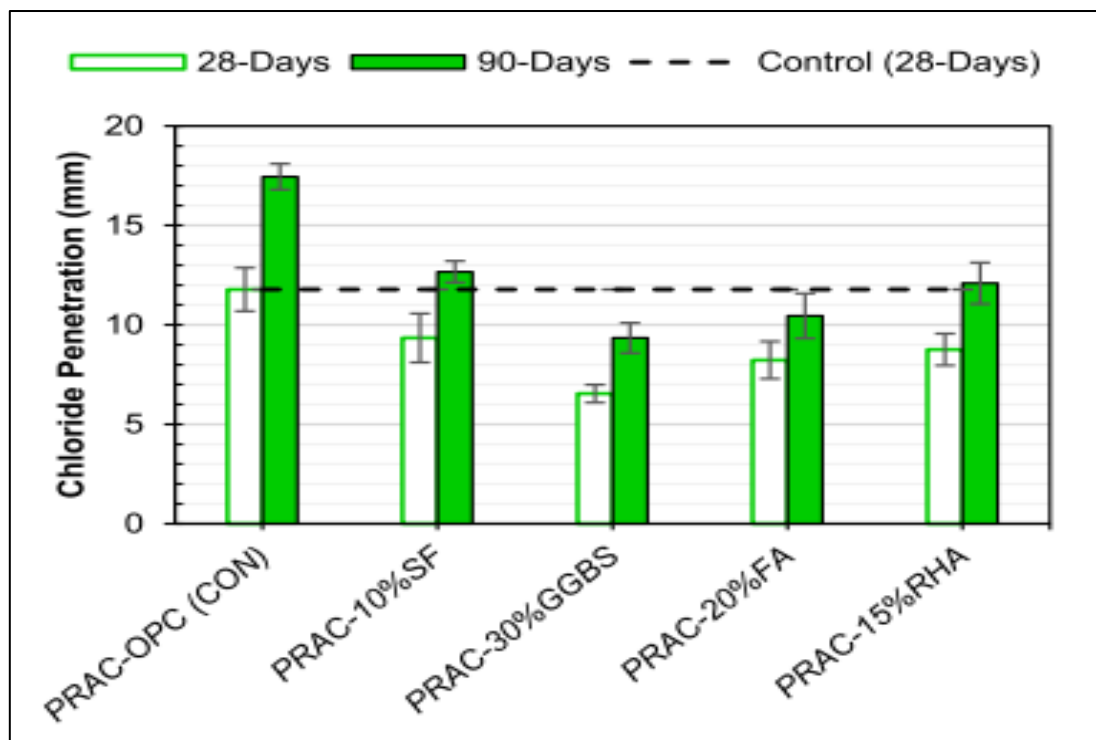


Figure 1.35 : Pénétration des chlorures après 28 et 90 jours d'immersion dans une solution à 10% de NaCl [123].

D'autres résultats similaires ont été trouvés par Muduli and Mukharjee [125], ou ils ont observé une amélioration progressive de la résistance à la pénétration des chlorures dans les mélanges de béton à base de granulats recyclés avec l'augmentation du pourcentage de MK à tous les âges. L'utilisation de métakaolin jusqu'à 15% améliore la résistance de béton recyclé contre la diffusion d'ions chlorures en affinant les vides et en arrêtant la continuité des pores capillaires dans le béton recyclé (Figure 1.36).

Shankar Biswal and Dinaka [133] ont examiné l'effet du laitier sur les performances en termes de corrosion du béton à base des granulats recyclés. Les granulats naturels grossiers ont été entièrement remplacés par des granulats recyclés grossiers. Six rapports E/C de 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65 et 0.75 ont été utilisés. Les résultats montrent que l'incorporation de laitier a eu un impact sur les coefficients de migration des chlorures. La résistance a augmenté avec la diminution du rapport E/C et les mélanges de béton à base de laitier ont très bien performé, montrant des valeurs presque moitié moins élevées que les mélanges de béton à base de ciment.

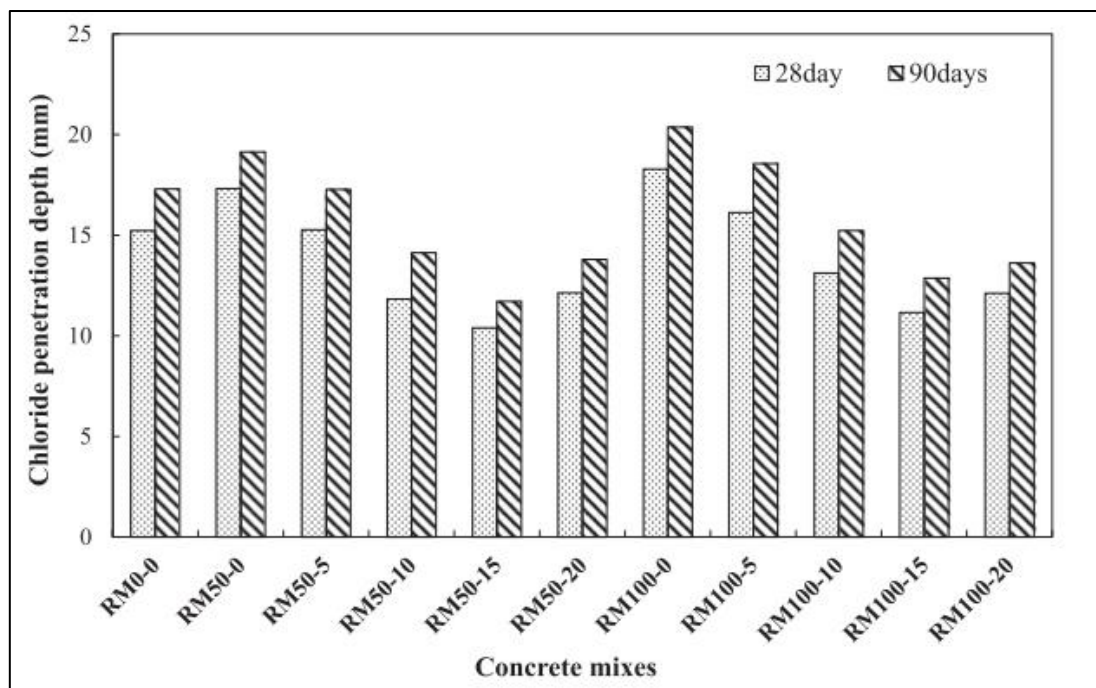


Figure 1.36 : Profondeur de pénétration des chlorures pour différents mélanges de béton [125].

1.4.3.3 Attaque par les sulfates et les acides

L'attaque externe par le sulfate de magnésium peut entraîner une perte de masse due à la détérioration du béton ainsi qu'une perte de résistance à la compression en raison de la destruction du CSH. De même, comme dans le cas de l'attaque par les sulfates, l'acide sulfurique attaque d'abord l'hydroxyde de calcium pour former le produit final connu sous le nom d'ettringite. À un stade avancé de l'attaque, l'acide sulfurique attaque la phase CSH de la pâte de ciment hydratée, rendant le CSH instable, ce qui entraîne une perte de cohésion entre les particules de pâte de ciment et contribue à la réduction de la résistance à la compression du béton. Par conséquent, l'acide sulfurique peut causer une attaque plus agressive et destructrice en raison de son double effet d'attaque acide et d'attaque par les sulfates. Cependant, l'effet de l'attaque par le sulfate de magnésium et l'acide sulfurique peut être réduit pour le béton ayant une perméabilité plus faible et une moindre disponibilité d'hydroxyde de calcium [134].

Althoey et al. [89] ont trouvé que l'incorporation de cendres de balle de riz a amélioré la résistance du béton à l'acide à chaque dose d'agrégats recyclés. Ces améliorations sont principalement attribuées à une diminution de la formation d'hydroxyde de calcium. De plus, les cendres de balle de riz réduit la sorptivité et la perméabilité de l'échantillon, ce qui entraîne une infiltration lente des produits chimiques acides dans l'échantillon.

Selon Koushkbaghi et al. [87], le béton incorporant des cendres de balle de riz présente une perte de masse et une réduction de la résistance plus faibles par rapport au béton sans remplacement par les cendres de balle de riz. Les cendres de balle de riz ont amélioré la résistance contre l'attaque acide dans presque tous les mélanges. Cela pourrait être dû à une teneur plus faible en hydroxyde de calcium dans le béton à base de cendres de balle de riz, ce qui rend le béton moins vulnérable à l'attaque acide. De plus, ils ont constaté que grâce à la réaction pouzzolanique, du CSH (silicate de calcium hydraté) a été formé et les pores ont été comblés par les particules de cendres de balle de riz. De l'étringite et du gypse sont observés après l'exposition à l'attaque acide. Ils ont observé que le comblement des pores par les cendres de balle de riz a réduit la connectivité du microstore, ce qui a augmenté la résistance à l'acide. Dans le béton avec des cendres de balle de riz, moins d'étringite se forme par rapport à l'échantillon de référence, ce qui résulte en une meilleure durabilité contre l'attaque acide par rapport au béton de référence (Figure 1.37).

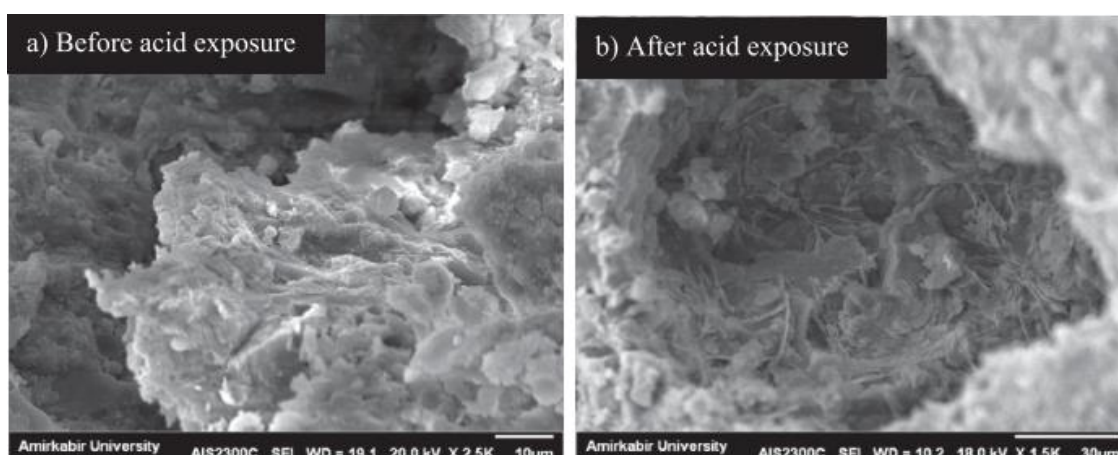


Figure 1.37 : Images MEB du béton avec des cendres de balle de riz avant (a) et après (b) exposition à l'acide [87].

Ahmed et al. [88] ont trouvé que lorsque du laitier a été ajouté au béton avec des granulats recyclés, la résistance à l'acide a augmenté grâce au comblement des vides et à la réaction pouzzolanique, ce qui a donné un béton plus dense à travers lequel l'acide ne pouvait pas facilement pénétrer. À 28 jours de durcissement, la résistance à l'acide du béton à 60% des granulats recyclés était de 5,0% de plus que celle du mélange de contrôle avec une substitution de 20% de laitier. Cependant, à une dose plus élevée de laitier (au-delà de 20% en poids du ciment), la résistance à l'acide a diminué en raison de la moindre ouvrabilité du béton, ce qui favorise la compaction et conduit à un béton plus poreux (Figure 1.38).

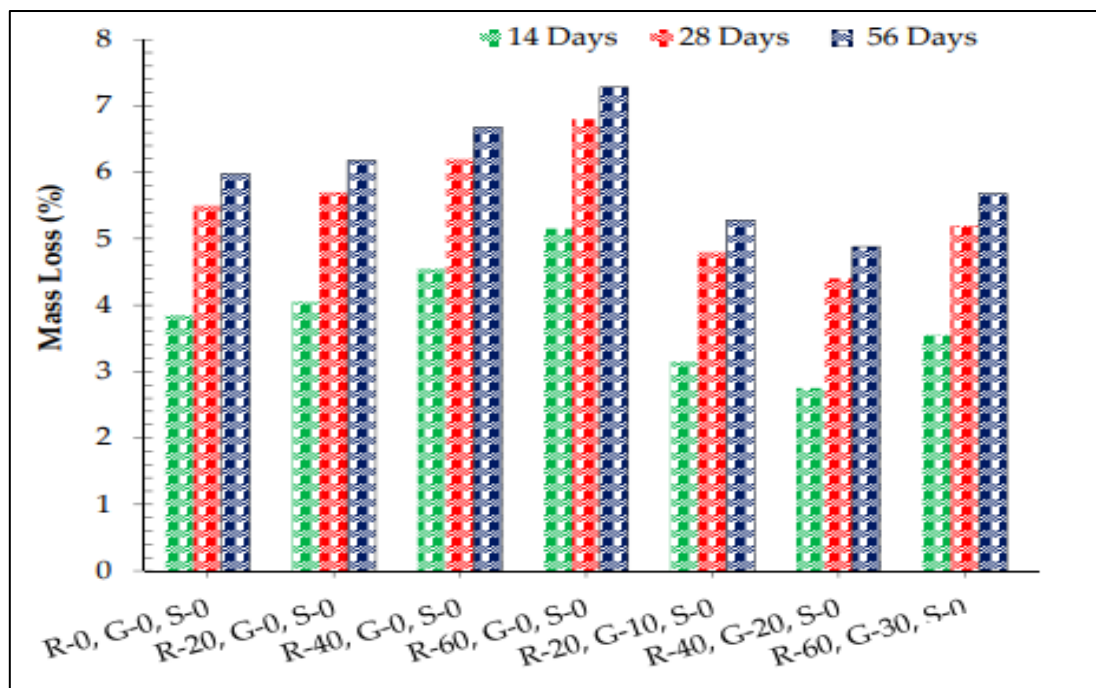


Figure 1.38 : Effet de laitier et de GR sur la résistance à l'acide du béton [88].

Ali et al. [124] ont étudié l'effet des cendres volantes sur la résistance aux attaques acides du béton recyclé. Dans cette étude, des échantillons ont été exposés à une solution de H_2SO_4 à 4%, et la perte de masse a été mesurée après 28, 56, 90 et 120 jours d'exposition, comme illustré dans la figure 1.39. Les résultats indiquent que les mélanges incorporant des granulats recyclés se détériorent plus rapidement que ceux sans granulats recyclés. Les granulats recyclés présentent une porosité plus élevée et une teneur en CH supérieure (présente dans l'ancien mortier) par rapport aux granulats naturels, ce qui rend le béton à granulats recyclés plus vulnérable aux attaques acides que le béton à granulats naturels.

Les résultats des essais d'attaque acide et sulfate indiquent que la solution acide a un effet plus néfaste sur le béton à granulats recyclés. Une perte de poids maximale de 3,12% et une perte de résistance de 10% ont été observées pour le béton recyclé à 100% après 90 jours d'exposition à la solution acide. L'effet adverse des sulfates sur le béton recyclé est beaucoup moins prononcé par rapport à l'attaque acide pendant les périodes expérimentales. L'incorporation de métakaolin améliore la résistance du béton recyclé contre ces effets, indiquant une moindre perte de résistance et de poids [125].

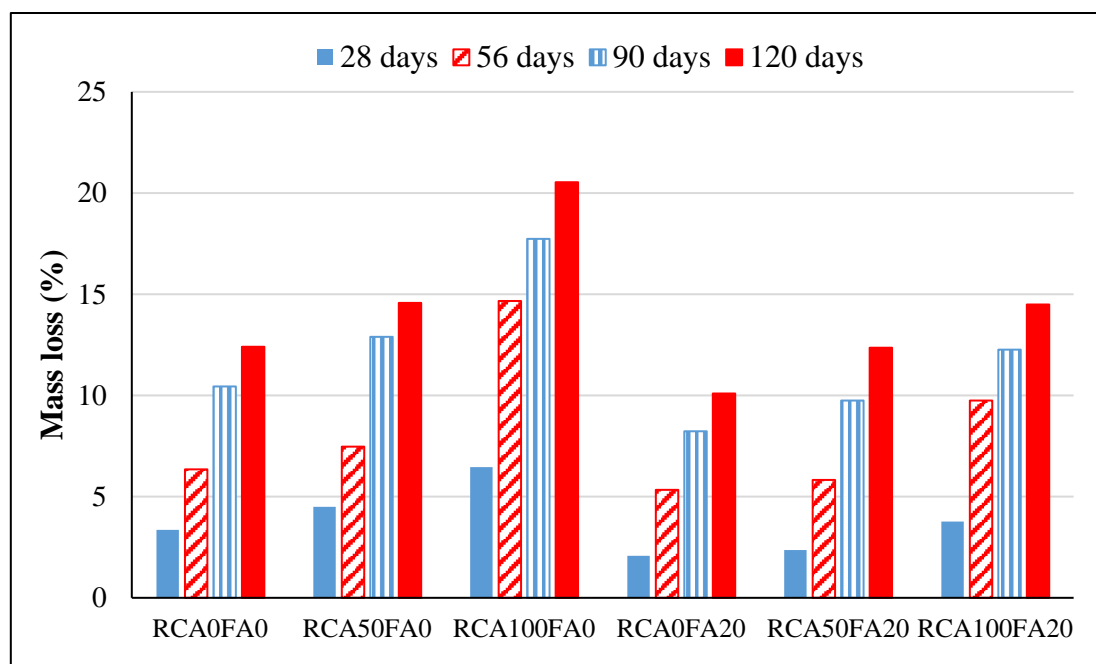


Figure 1.39 : Perte de masse due à l'attaque de H₂SO₄ à 28, 56, 90 et 120 jours [124].

1.4.3.4 Carbonatation

Les granulats recyclés, provenant de la démolition de structures en béton, contiennent souvent des résidus de pâte de ciment hydratée, ce qui augmente la porosité du béton recyclé et facilite la pénétration du dioxyde de carbone. Cela entraîne une augmentation de la profondeur de carbonatation, pouvant affecter la durabilité et la longévité du béton. Cependant, l'ajout de matériaux cimentaires supplémentaires tels que le métakaolin, les cendres volantes ou le laitier de haut fourneau peut atténuer cet effet négatif. Ces ajouts cimentaires réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des produits cimentaires secondaires, tels que le CSH (silicate de calcium hydraté), qui comblent les pores et réduisent la perméabilité du béton. Ainsi, l'utilisation de ces ajouts raffine la structure poreuse, améliore la compacité et réduit la profondeur de carbonatation. En résumé, bien que les granulats recyclés puissent augmenter la susceptibilité du béton à la carbonatation, l'incorporation judicieuse d'ajouts cimentaires permet de renforcer la résistance du béton à ce phénomène, assurant ainsi une meilleure durabilité de la structure. Muduli et al. [125] ont montré que la profondeur de carbonatation des mélanges de béton à base de granulats recyclés est significativement plus élevée que celle du béton naturel. Une augmentation maximale de l'ordre de 25% a été observée pour le béton recyclé à 100%. L'utilisation de métakaolin jusqu'à 15% améliore efficacement la résistance du béton recyclé contre la carbonatation en raffinant les vides et en bloquant la continuité des pores capillaires dans le béton recyclé.

Des résultats similaires ont été trouvés par Singh et al. [135], où ils ont mentionné que l'ajout de métakaolin dans les mélanges de béton autoplaçant contenant des granulats recyclés s'est révélé efficace pour compenser la diminution de la résistance à la carbonatation causée par la présence de granulats recyclés.

Selon Zhang et al. [136], l'ajout combiné de métakaolin et des cendres volantes améliore la résistance à la carbonatation du béton recyclé dû à l'effet des particules de métakaolin et des cendres volantes, qui améliore la zone de transition interfaciale entre le ciment et les granulats recyclés, réduisant efficacement la connexion entre les vides et empêchant plus de CO_2 d'envahir la matrice du béton.

Mardani-Aghabaglou et al. [137] ont montré que la carbonatation a deux effets différents sur le béton recyclé lorsque des matériaux cimentaires (métakaolin et cendres volantes) sont ajoutés. D'une part, l'effet microgranulaire et les caractéristiques d'effet actif peuvent améliorer la compacité et la fluidité du matériau, raffinant ainsi les pores internes du matériau et ralentissant la diffusion du CO_2 dans la matrice. D'autre part, l'hydratation de métakaolin, cendres volantes et du ciment produit des colloïdes supplémentaires de silicate de calcium hydraté qui accélèrent l'absorption de CO_2 .

1.5 Synthèse Bibliographique

Dans cette revue, nous avons axé notre recherche sur l'intérêt de l'incorporation des ajouts cimentaires dans l'amélioration des performances des bétons à base de granulats recyclés. La réutilisation des déchets de construction et de démolition comme matériau de construction est une méthode prometteuse pour réduire la quantité de ces déchets éliminés dans les décharges, diminuer la consommation de minéraux naturels et minimiser les impacts négatifs sur l'environnement. La littérature examinée rapporte que la présence de déchets de construction et de démolition comme granulats dans les mélanges de béton/mortier a des effets négatifs sur certaines propriétés du béton, telles que l'ouvrabilité, la résistance à la compression, la perméabilité, l'absorption et le retrait. L'utilisation de matériaux pouzzolaniques dans les systèmes cimentaires est une option viable pour améliorer la durabilité du matériau produit et réduire les émissions de CO₂. Les ajouts cimentaires, en réagissant avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment, forment des produits secondaires comme le silicate de calcium hydraté (CSH) qui raffinent la microstructure du béton, réduisant ainsi sa porosité et augmentant sa compacité.

Les analyses documentaires effectuées montrent que la majorité des études expérimentales se sont concentrées sur l'effet d'un seul ajout cimentaire, tel que le métakaolin, les cendres volantes ou le laitier de haut fourneau. Cependant, il y a un manque notable de travaux de recherche sur l'impact de la combinaison de deux ou plusieurs ajouts cimentaires, appelés systèmes ternaires et quaternaires. Cette lacune représente une opportunité importante pour des investigations supplémentaires. Notre recherche se concentrera donc sur l'influence de la combinaison du laitier et du métakaolin sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité des BAP à base de granulats recyclés. La combinaison de ces ajouts cimentaires pourrait offrir des synergies positives en améliorant les performances globales du béton recyclé tout en réduisant l'empreinte environnementale.

CHAPITRE 2

MATÉRIAUX ET ESSAIS

CHAPITRE 2 MATÉRIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, en première partie, on présente les matériaux utilisés pour la confection des bétons étudiés avec leurs caractéristiques. Par la suite, on s'intéressera à la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des bétons autoplaçants. Dans une seconde partie, on exposera les différentes procédures expérimentales de fabrication, les séquences de malaxage, de mise en place et de la conservation des différentes éprouvettes. Pour finir, on présentera les essais réalisés en laboratoire sur les bétons à l'état frais et à l'état durci.

2.2 Caractérisation des matériaux utilisés

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland (CEM II/B 42.5) conforme à la norme EN 197-1 [138]. Sa surface spécifique est de $3900 \text{ cm}^2/\text{g}$, sa densité est de 3,05. Les compositions chimiques et minéralogiques, ainsi que les propriétés physiques du ciment sont présentées dans le Tableau 2.1.

2.2.2 Laitier

Dans cette étude, un laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Wilaya d'Annaba) a été utilisé. Le laitier est obtenu par refroidissement par jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin. Il se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5mm. Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions du BAP, nous avons tout d'abord procédé à son étuvage à $50 \text{ }^\circ\text{C}$ afin d'éliminer toute éventuelle humidité et ainsi faciliter son broyage. Ensuite, un broyage total a été effectué à l'aide d'un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg pour obtenir une finesse comparable à celle de ciment. Enfin, la quantité finale de laitier obtenue après le broyage a été mélangée dans le but d'assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. Les caractéristiques chimiques et physiques du laitier sont données dans le tableau 2.1. La figure 2.1 montre les caractéristiques minérales de laitier déterminées par diffraction des rayons X (DRX). Lorsque le graphique DRX a été examiné, l'absence de raie de diffraction indique que le laitier présente une structure caractéristique amorphe. Un pic en forme de bosse dans l'intervalle 2θ entre 20° et 40° est dû à la présence de fractions vitreuses. Quelques phases cristallisées se présente sous forme de calcite, de fer, de quartz et de traces de merwinite et de mellilite.

2.2.3 Métakaolin

Le MK utilisé provient de gisement brut de Tamazirt, Jijel. La calcination du kaolin a été réalisée dans un four à une température de 850 C° pendant 3 heures pour transformer le kaolin en MK [139]. Ce processus de calcination entraîne la deshydroxylation et la destruction de la structure cristalline initiale de la kaolinite (kaolinite calcinée). Ensuite, le matériau obtenu a été soumis à un broyage dans un broyeur à boulets au laboratoire de l'université de Blida 1. Les compositions minéralogiques du MK ont été déterminées par diffraction des rayons X (DRX) et les résultats sont présentés dans la figure 2.2. Cette figure montre que la composition minérale qualitative du MK est constituée de quartz (Q) et de mica (M). L'absence de kaolinite indique que lors de la calcination, la kaolinite a été transformée en une phase amorphe potentiellement réactive avec le composant cimentaire $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Les propriétés chimiques et physiques du MK sont également présentées dans le tableau 2.1

Les figure 2.3 (A) et 2.3 (C) présentent les résultats de l'observation par microscope électronique à balayage (MEB) du laitier et du MK utilisés. Comme on peut le constater, les poudres présentent des tailles irrégulières, plus fins et semblent avoir des particules de forme moins angulaire. Les figures 2.3 (B) et 2.3 (D) présentent les spectres produits par l'étude Spectroscopie de Dispersion d'Énergie (EDS) pour le laitier et le MK, respectivement. Les données montrent que le Ca et le Si, sont les composants les plus abondants dans le laitier. Le MK est principalement composé de Si et de Al.

Tableau 2.1 : Compositions chimiques et propriétés physiques du ciment, du laitier et du métakaolin

| Composition (%) | Ciment | Laitier | Métakaolin |
|--|--------|---------|------------|
| SiO ₂ | 15.82 | 40.83 | 61.32 |
| Al ₂ O ₃ | 3.77 | 9.18 | 27.55 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.75 | 0.19 | 5.41 |
| CaO | 61.95 | 38.86 | 1.12 |
| MgO | 1.39 | 6.80 | 0.63 |
| K ₂ O | 0.52 | 0.55 | 2.53 |
| Na ₂ O | 0.01 | 0.08 | 0.10 |
| SO ₃ | 2.14 | 1.44 | 0.09 |
| Densité | 3.05 | 2.81 | 2.61 |
| Finesse de Blaine (cm ² /g) | 3900 | 4300 | 8500 |

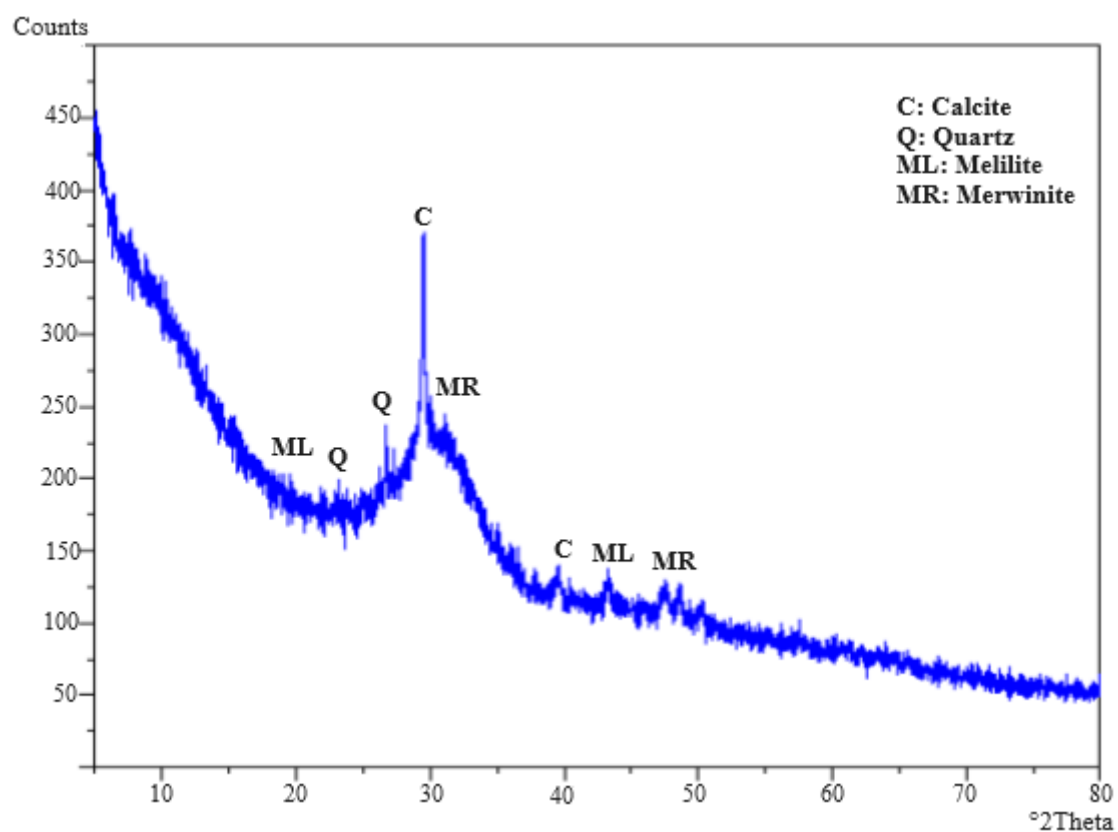


Figure 2.1 : Analyse minéralogique par DRX du laitier.

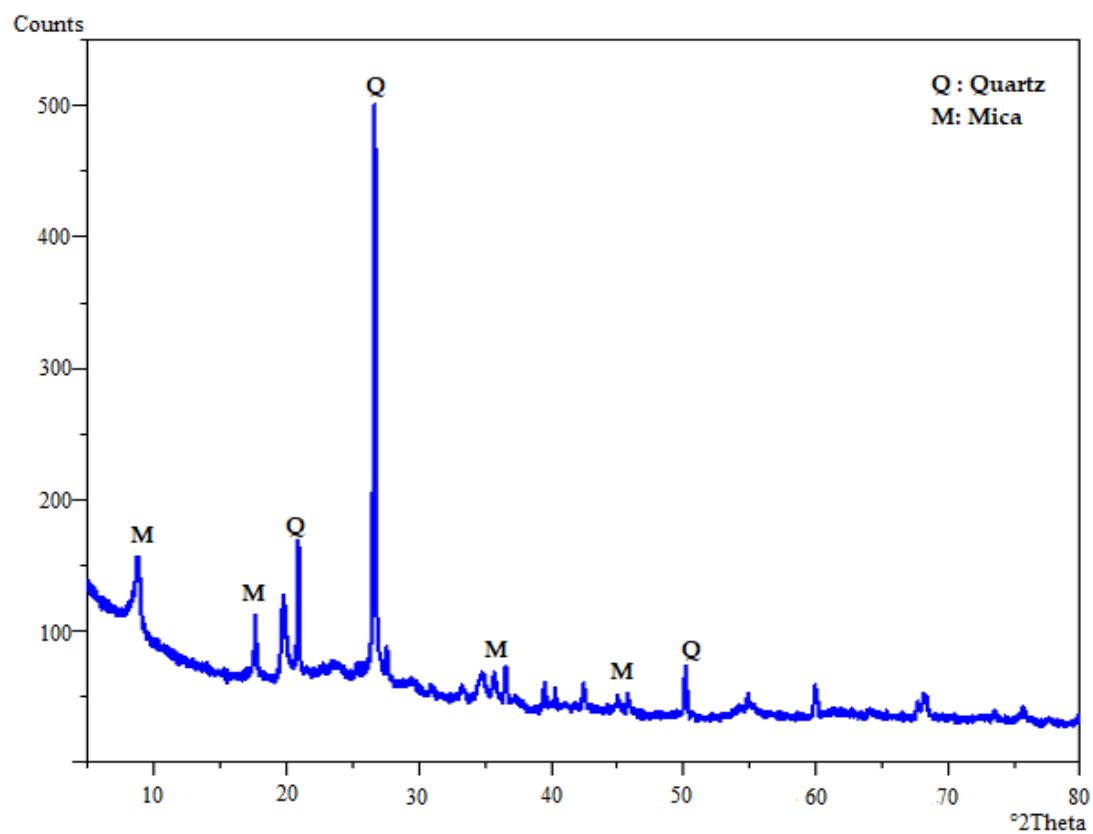
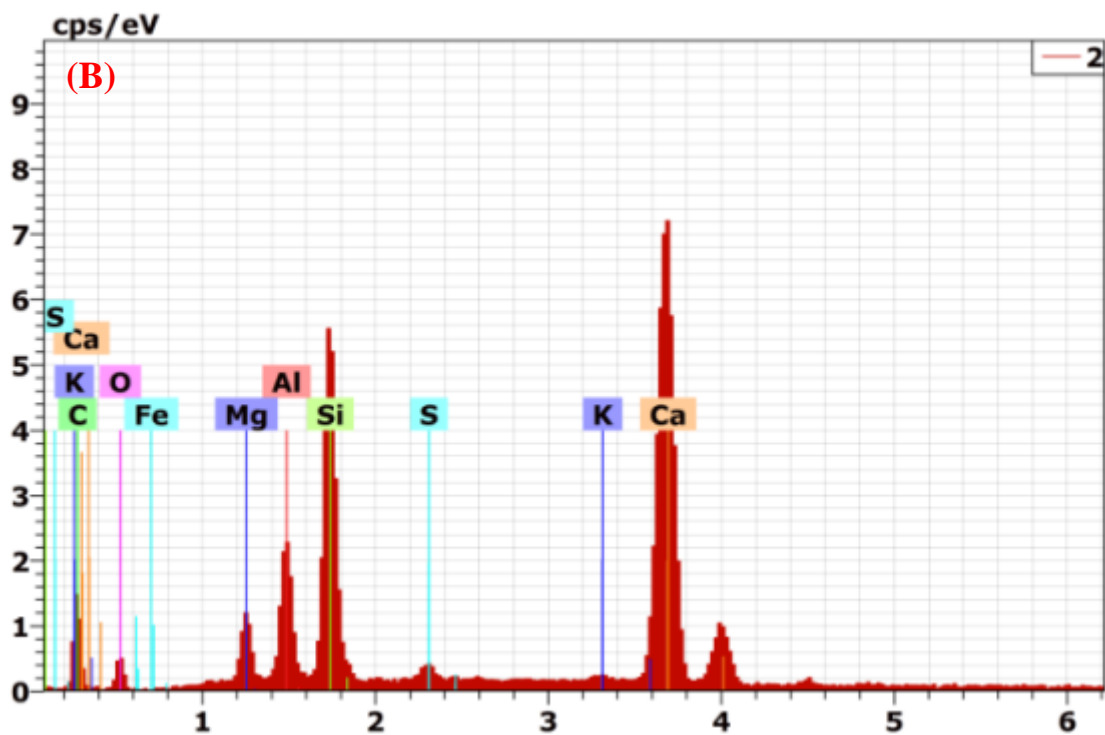
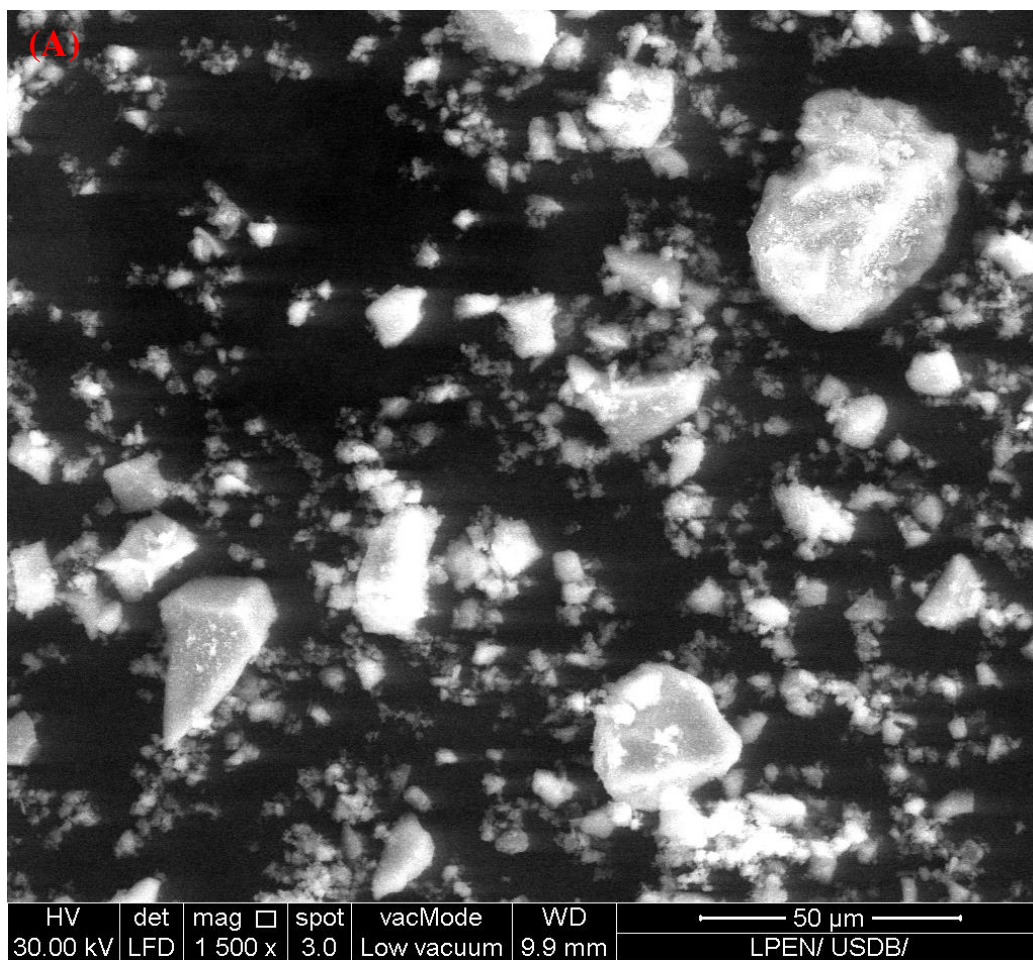


Figure 2.2 : Analyse minéralogique par DRX du métakaolin.



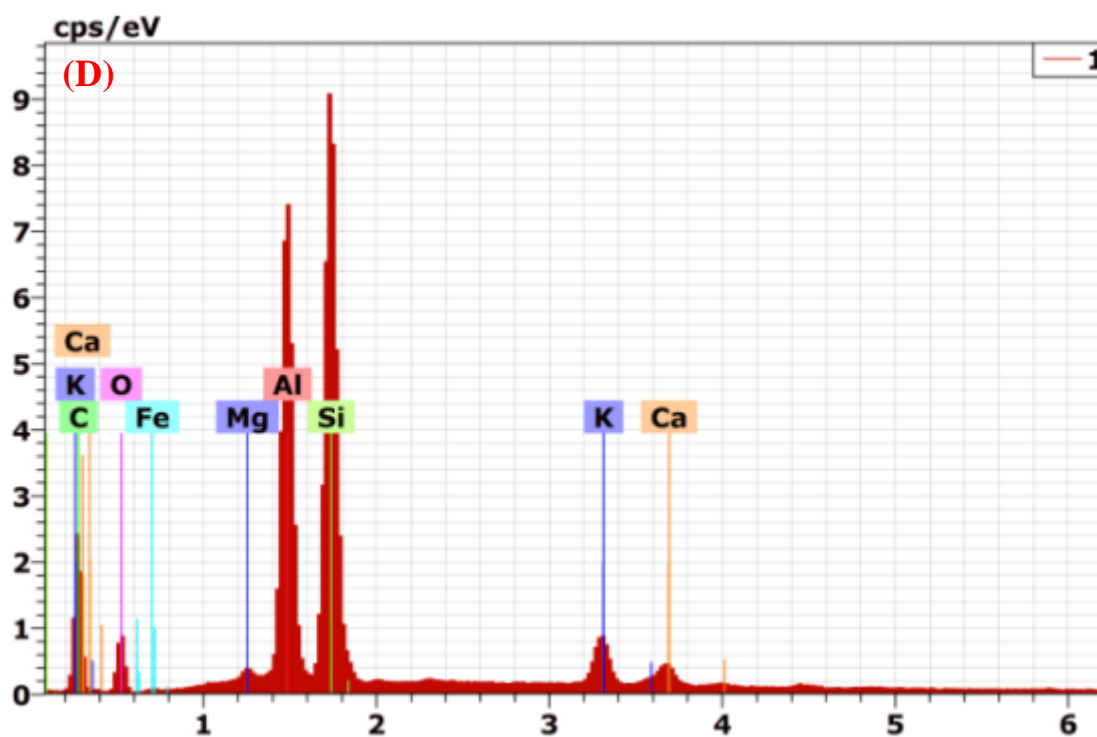
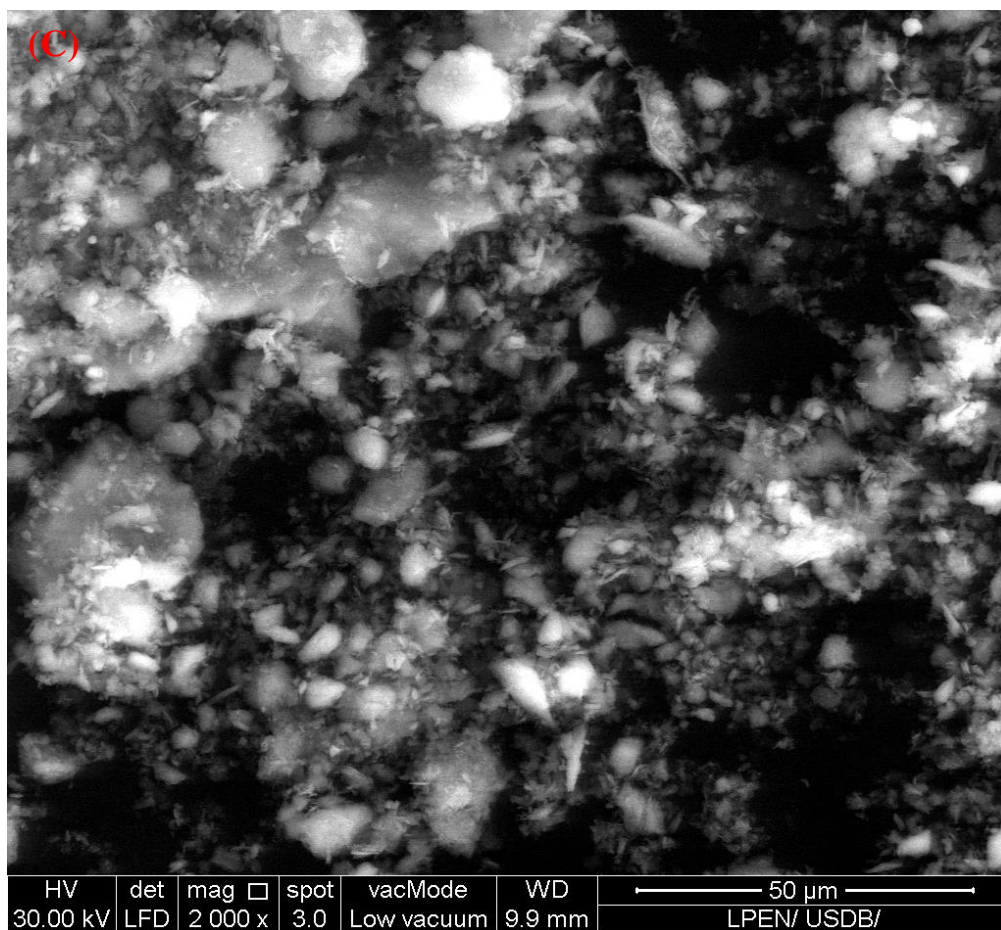


Figure 2.3 : Images MEB et spectres EDS de laitier (A et B) et de métakaolin (C et D).

2.2.4 Sable

Le sable utilisé dans notre travail est un sable de dune provient de la région d'Oued souf. La courbe de l'analyse granulométrique et les caractéristiques physiques de sable utilisé sont présentées dans la figure 2.4 et le tableau 2.2 respectivement.

2.2.5 Graviers

Deux graviers issus de concassage des roches calcaires (G 3/8 et G 8/15) sont utilisés dans cette étude. Les courbes de l'analyse granulométrique ainsi que les caractéristiques physiques des graviers sont également présentées dans la figure 2.4 et le tableau 2.2 respectivement.

2.2.6 Granulats recyclés

Les granulats recyclés (gravier et sable) ont été obtenus par un concassage d'une dalle de 8m × 4m et d'une épaisseur de 20 cm en béton. La dalle a été fabriquée et conservée pendant 28 jours à l'air libre afin de subir un concassage préliminaire qui a été fait avec un marteau piqueur, et un concassage final à l'aide d'un concasseur mécanique. Le matériau concassé a ensuite été passé à travers des tamis pour obtenir les différentes fractions de granulats recyclés. Les courbes granulométriques sont présentées dans la figure 2.5. Les caractéristiques des granulats sont résumées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés

| Caractéristiques | Granulats naturels | | | Granulats recyclés | | |
|--|--------------------|----------------|-----------------|--------------------|----------------|-----------------|
| | Sable | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 | Sable | Gravier 3/8 | Gravier 8/15 |
| Masse volumique absolue (kg/m ³) | 2650 | 2631 | 2610 | 2278 | 2348 | 2365 |
| Masse volumique apparente (kg/m ³) | 1500 | 1500 | 1500 | 1361 | 1253 | 1255 |
| Taux d'absorption d'eau (%) | 0.65 | 0.79 | 0.59 | 8.5 | 4.28 | 3.28 |
| Module de finesse | 2.24 | - | - | 2.85 | - | - |
| Équivalent de sable (%) | 84.49 | - | - | 78.57 | - | - |

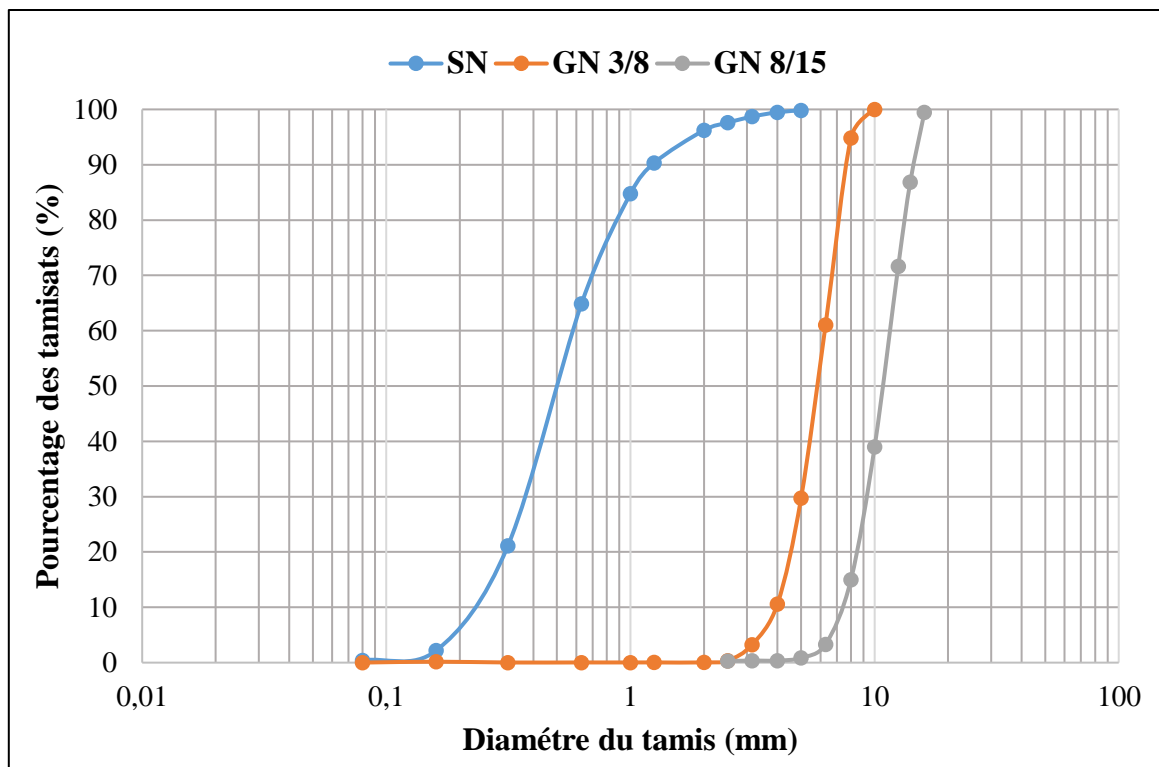


Figure 2.4 : Courbe granulométrique du sable et graviers naturels.

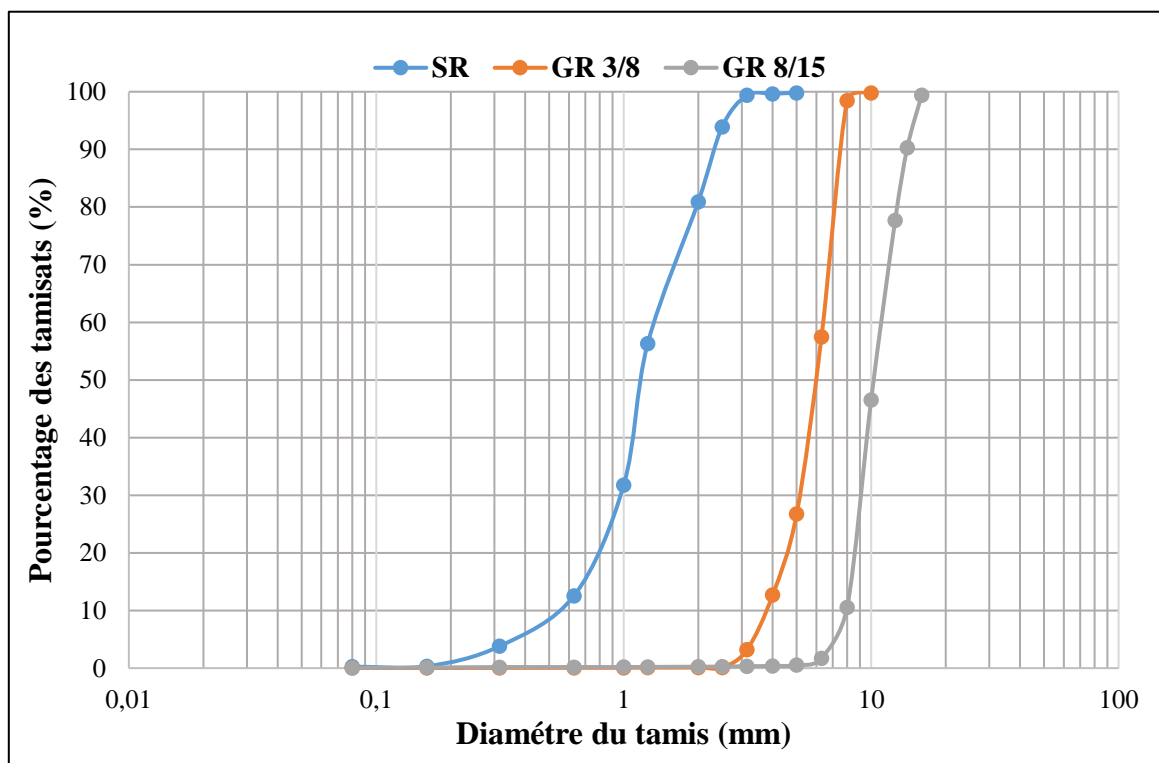


Figure 2.5 : Courbe granulométrique du sable et graviers recyclés.

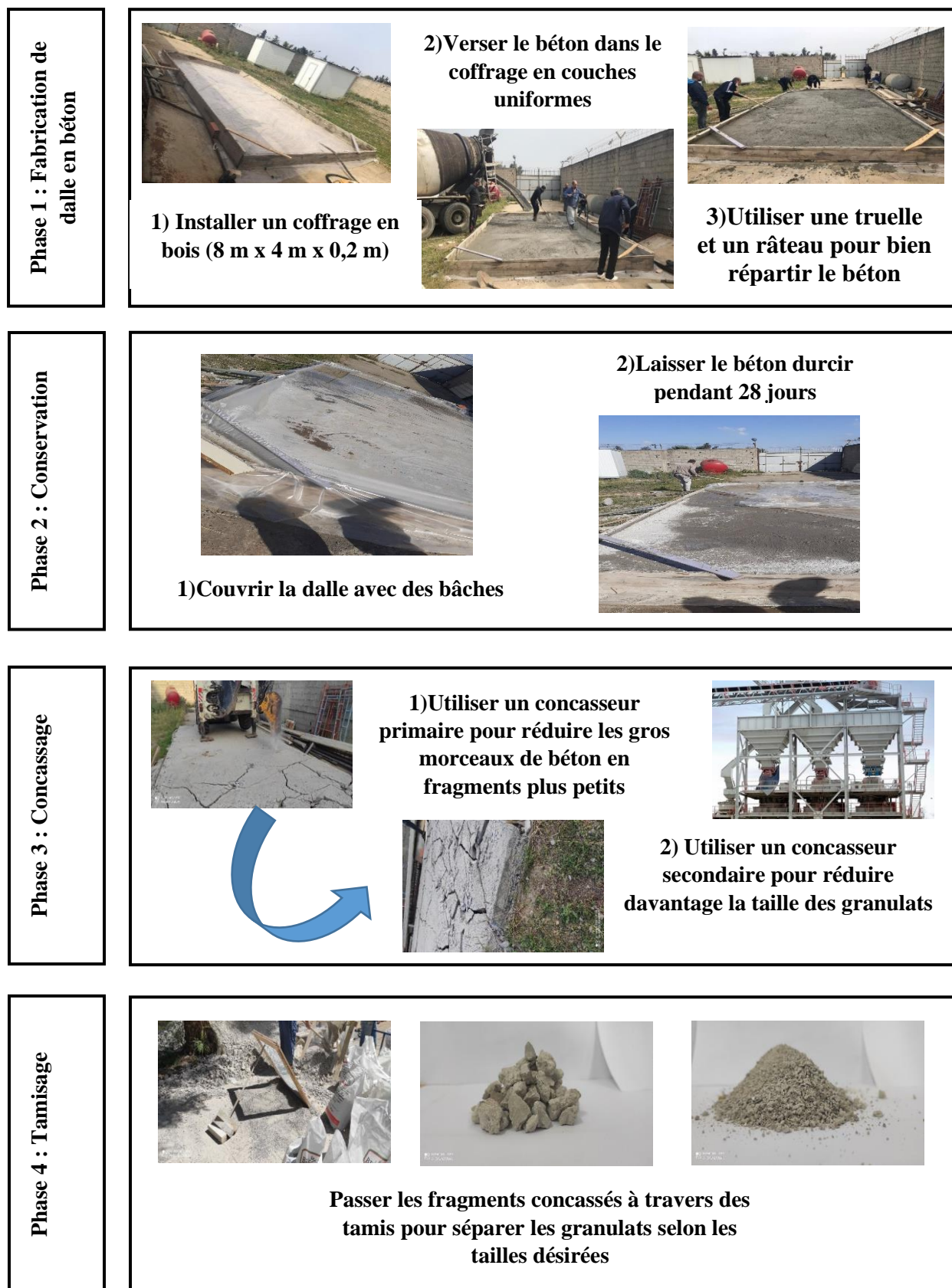


Figure 2.6 : Procédure de fabrication de granulats recyclés.

2.2.7 Superplastifiant

Pour obtenir la maniabilité souhaitée dans les mortiers et les bétons fabriqués, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fourni par l'entreprise Granitex commercialisé sous le nom de MEDAFLOW 30. Il s'agit d'un éther polycarboxylique modifié présenté sous forme liquide, avec une plage de dosage comprise entre 0.5% à 2% en masse de poudre. Sa densité est de 1.06, sa teneur en ions de chlorure est inférieure à 0.1% et il contient entre 28 et 31% d'extraits secs.

2.2.8 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire exempte d'impuretés.

2.3 Formulation

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire de chaque matériau du mélange afin d'obtenir le béton aux propriétés souhaitées. Il est important de noter qu'un béton est qualifié d'autoplaçant en raison de ses propriétés à l'état frais, notamment sa capacité de remplissage, sa capacité de passage et sa résistance à la ségrégation, plutôt que par sa composition. La formulation du BAP nécessite une étude précise, notamment dans le choix de ses constituants et l'optimisation des paramètres qui y influent, tels que les rapports Eau/Liant (E/L), le rapport Sable/Mortier (S/M), le dosage en superplastifiant (SP), le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons. Les principaux tests réalisés visent à caractériser le BAP en évaluant des termes qualitatifs tels que la fluidité, l'homogénéité, l'absence de blocage et la stabilité [140]–[142]. Dans notre étude, notre objectif principal est d'étudier l'influence du laitier et du MK, ainsi que des granulats recyclés sur les caractéristiques et performances du BAP. Pour ce faire, nous avons maintenu tous les autres paramètres constants, notamment la quantité de sable dans le mortier donc le rapport S/M, le rapport E/L, ainsi que le pourcentage de SP par rapport à la poudre.

2.3.1 Formulation du mortier autoplaçant

La phase du mortier autoplaçant (MAP) est une phase très importante, car elle assure la lubrification entre les particules des gros granulats, la viscosité et la mobilité du béton ainsi que la stabilité globale du mélange. Le béton et son mortier correspondant doivent présenter des propriétés rhéologiques similaires, notamment un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous l'effet de la gravité seule, ainsi qu'une viscosité plastique suffisante, afin

d'assurer une bonne résistance à la ségrégation du béton durant l'écoulement [143]. La sélection du rapport Sp/L et du rapport S/M est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre $27 \text{ cm} \leq d \leq 33 \text{ cm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 et 10 sec. Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A.

2.3.2 Formulation du béton autoplaçant

Les procédures des essais sur mortier sont des étapes primordiales, car elles permettent de fixer les rapports E/L (eau/liant), S/M (sable/mortier) ainsi que Sp/L (superplastifiant/liant). Les rapports E/L et Sp/L seront ajustés afin d'aboutir aux résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation ni ressuage. Une fois que les rapports seront déterminés, on procèdera aux différents essais sur béton frais et sur béton durci [143]. La formulation du béton autoplaçant a été basée sur la méthode japonaise dite la méthode générale. Pour la confection du béton autoplaçant, les proportions du mélange (sable, gravier, ciment, eau et Sp) ont été calculées d'après la composition du béton donné à l'annexe B. Les composants de différents mélanges de BAP sont illustrés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Composition des différents BAP étudiés

| Mélanges | Ciment (%) | Laitier (%) | Métakaolin (%) | Sable naturel (%) | Sable recyclé (%) | Gravier naturel (%) | Gravier recyclé (%) |
|----------------|------------|-------------|----------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 0/0R0L0MK | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| 50/50R0L0MK | 100 | 0 | 0 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100/50R0L0MK | 100 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 100 |
| 50/50R15L0MK | 85 | 15 | 0 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100/50R15L0MK | 85 | 15 | 0 | 50 | 50 | 0 | 100 |
| 50/50R15L5MK | 80 | 15 | 5 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100/50R15L5MK | 80 | 15 | 5 | 50 | 50 | 0 | 100 |
| 50/50R15L10MK | 75 | 15 | 10 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100/50R15L10MK | 75 | 15 | 10 | 50 | 50 | 0 | 100 |
| 50/50R15L15MK | 70 | 15 | 15 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 100/50R15L15MK | 70 | 15 | 15 | 50 | 50 | 0 | 100 |

100/50R15L15MK représente un taux de remplacement de granulats grossiers recyclés et granulats fins recyclés de 100% et 50% respectivement, et la teneur en laitier et en métakaolin est respectivement de 15% et 15%.

2.4 Procédure de malaxage

2.4.1 Mortier autoplaçant

Plusieurs auteurs décrivent la méthode de malaxage dans le but de recouvrir la surface de tous les granulats par la pâte de ciment et d'assurer le mélange le plus homogène possible des différents constituants. Nous avons opté pour la méthode proposée par Domone et Jin [144], qui comprend les étapes suivantes :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ 1 minute afin d'homogénéiser le mélange (nous avons utilisé un malaxeur à mortier de capacité de 5 litres) ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ($Eau1 = 70\% \text{ Eau}$) ;
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage ($Eau2 = 30\% \text{ Eau}$) mélangé avec le supe plastifiant ;
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

2.4.2 Béton autoplaçant

La séquence de malaxage et la composition du béton jouent un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à un béton performant et durable. Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres. Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences. Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la figure 2.7, elle comprend les étapes suivantes :

- Malaxer le sable, ciment et gravier ($3/8$ et $8/15$) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ($Eau1 = 70\% \text{ Eau}$) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage ($Eau2 = 30\% \text{ Eau}$);
- Malaxer le mélange pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Malaxer pendant 30 secondes ;
- Vérification visuelle de ressuage.



Figure 2.7 : Séquence de malaxage du BAP.

2.5 Essais sur mortier autoplaçant

2.5.1 Essai d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement ont été réalisés à l'aide d'un mini-cône. Le cône a été positionné au centre d'une plaque horizontale légèrement humidifiée. Une fois le cône rempli, il a été soulevé verticalement, permettant ainsi à la pâte de s'étaler sous l'effet de son propre poids pour former une galette plus ou moins circulaire. L'étalement moyen (D_{moy}) correspond à la moyenne de deux mesures perpendiculaires ($D1$ et $D2$) (Figure 2.8).



Figure 2.8 : Essai d'étalement pour mortier.

2.5.2 Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

La méthode consiste à remplir un mini-entonnoir en V par environ 1,1 litre de MAP tout en maintenant le clapet fermé. Ensuite, le clapet est ouvert, permettant au MAP de s'écouler à travers l'orifice. Le temps d'écoulement T_v est mesuré comme étant l'intervalle de temps entre l'ouverture du clapet et le moment où la lumière du jour devient visible depuis le haut du mini entonnoir.

2.6 Essais sur béton autoplaçant à l'état frais

2.6.1 Essai d'étalement et T500

Cet essai vise à évaluer la capacité du béton à se déformer sous son propre poids tout en résistant aux forces de friction, ce qui en fait un indicateur clé de la déformabilité du BAP. Les valeurs d'étalement et de temps d'écoulement T500 peuvent être classées conformément à la norme européenne (EN 12350-8) [145]. Après avoir humidifié la surface de la plaque pour éliminer l'excès d'eau à l'aide d'un chiffon, on place le cône au centre de la plaque et on équipe la partie supérieure du cône d'un entonnoir pour prélever un échantillon représentatif du béton. Ensuite, on soulève le cône verticalement avec précaution en utilisant les deux poignées, et on démarre le chronomètre dès le soulèvement du cône jusqu'à ce que le béton atteigne le cercle gradué de 50 cm sur la plaque, ce qui donne le T500.

Une fois que le béton s'est étalé sur la plaque, on mesure le diamètre final (D1 et D2) sur deux côtés perpendiculaires, et on examine visuellement s'il y a des signes de ségrégation du béton (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier). Les résultats sont exprimés en moyenne des deux valeurs obtenues (Figure 2.9).



Figure 2.9 : Essai d'étalement des BAP.

2.6.2 Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

La viscosité apparente, caractérisée par le V-funnel peut être classé selon la norme européenne EN 12350-9 [146], cet essai permet d'estimer le temps de vidange de béton sous son propre poids. Le temps mesuré indique la fluidité et la capacité de béton a passé dans des orifices qui sont petites (capacité de passage / blocage). Après avoir placé le V-funnel dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé, nous avons prélevé dans un seau un échantillon de béton représentatif d'environ de 12 litres pour remplir l'entonnoir avec le béton, et puis nous avons mis de seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir avec l'ouverture de clapet. Après cette opération, nous avons rempli l'entonnoir pour une deuxième fois de béton et nous avons mis le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir. Après une attente de 10 secondes, nous avons ouvert le clapet en lançant le chronomètre et quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, nous avons arrêté le chronomètre, cette mesure est l'équivalent de temps d'écoulement (Figure 2.10).

Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel) renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important.



Figure 2.10 : Essai de temps d'écoulement à l'entonnoir en V.

2.6.3 Essai de la boîte en L (L-Box)

L'aptitude à l'écoulement dans la boîte en L peut être classée selon la norme européenne EN 12350-10 [147], cet essai est réalisé en utilisant une boîte ayant une forme en L. Elle permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage H2/H1 (Figure 2.11).

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellent de granulats en aval de la grille. C'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Il est également possible d'exprimer le résultat de l'essai par la seule valeur de H1. Cette mesure est plus précise que le rapport H2/H1, mais son utilisation est moins répandue.

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H2/H1) doit être supérieur à 0,8 [148]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.



Figure 2.11 : Essai de la boîte en L.

2.6.4 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure 2.12). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm.

Des valeurs de l'indice de ségrégation (IS) variant entre 5% et 15% sont le signe d'une résistance satisfaisante à la ségrégation, inférieur à 5%, la résistance est considérée excessive, ce qui affecte la qualité des parements (mauvaise qualité des parements), entre 15% et 30%, la résistance est considérée critique, au-delà de 30%, la résistance est mauvaise [149].

L'indice de ségrégation est calculé selon l'expression :

$$IS (\%) = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \times 100 \quad (2.1)$$



Figure 2.12 : Essai de stabilité au tamis.

2.7 Essais sur béton autoplaçant à l'états durci

2.7.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée à 28 et 90 jours sur des éprouvettes cubiques (100×100×100 mm) conformément à la norme NF EN 12390-3 [150]. L'essai de compression a été effectué sur une presse hydraulique de capacité de 3000 kN, la vitesse de chargement de 0.5 kN/s. L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance en compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque mélange.

2.7.2 Essai de Vitesse d'auscultation sonore (VAS)

La mesure de la vitesse de propagation d'ondes se fait moyennant un appareil d'auscultation sonore (ultrason), et conformément à la norme ASTM C597-16 [151]. L'appareil génère des impulsions électriques traversant l'échantillon du béton à partir d'un transducteur émetteur appliqué sur une surface plane.

L'impulsion est captée par un transducteur récepteur également appliqué sur une surface plane en opposition et parallèle au premier (Figure 2.13).

Notons ici que ces surfaces doivent être préalablement lubrifiées par de la vaseline pour assurer une meilleure transmission des impulsions. Lorsque l'impulsion est captée par le récepteur, l'instrument affiche le temps de propagation. Connaissant la distance d entre les deux transducteurs.

La VAS est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{D}{T} \quad (2.2)$$

Où :

V : la vitesse d'auscultation sonore en m/s ;

D : la distance entre les deux transducteurs en m ;

T : le temps de propagation d'onde en s.



Figure 2.13 : Mesure de la vitesse d'auscultation sonore.

2.7.3 L'absorption par capillarité

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de béton moulées ou carottées, non saturées, mises en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de la sportivité, les éprouvettes sont préconditionnées selon les recommandations de la norme ASTM C 1585-11 [152].

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de (10 x 10 x 10 cm). Le protocole de cet essai consiste à sécher des éprouvettes cubiques à l'étuve à 50 ± 2 °C jusqu'à atteindre une masse constante. Les surfaces latérales des éprouvettes sont ensuite imperméabilisées à l'aide d'une matière plastique étanche, et ce pour assurer la remontée unidirectionnelle d'eau par capillarité. Les éprouvettes sont ensuite pesées soit M_0 (Figure 2.14).

Les mêmes éprouvettes sont posées dans un récipient et sont séparées d'au moins 1 cm de son fond. Le récipient est ensuite rempli en eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient partiellement immergées (environ 5 mm). Il faut noter que le niveau d'eau doit rester constant tout au long de l'essai. Les éprouvettes sont retirées et pesées régulièrement. L'essai est terminé après 24 h.

Le coefficient d'absorption par capillarité est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{M_t}{a \times d} \quad (2.3)$$

I: coefficient d'absorption (mm);

M : Masse d'eau absorbée (différence entre la masse sèche et la masse de l'éprouvette à l'état absorbé) en gramme ;

a : Section de la base de l'éprouvette en mm² ;

d: densité de l'eau.

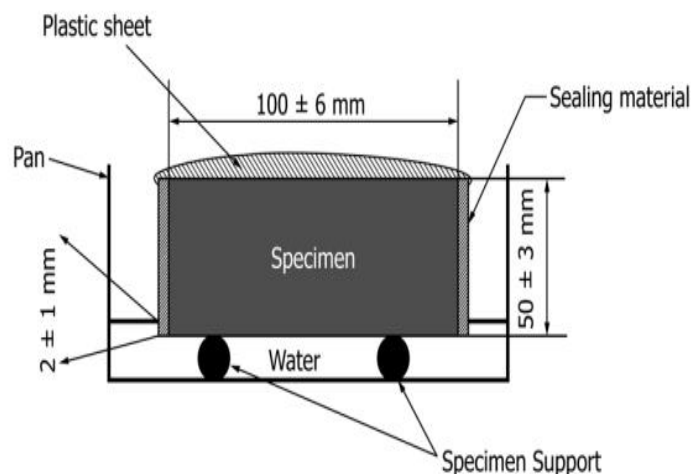


Figure 2.14 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.

2.7.4 Essai de Porosité

En terme de porosité, trois disques de 100×50 mm coupés dans des éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm et de hauteur 200 mm ont été sélectionnés pour évaluer la porosité accessible à l'eau après 90 jours selon la norme NF P18-459 [153]. L'essai consiste à faire sécher les éprouvettes à une température de 50 ± 5 °C jusqu'à masse constante. On détermine la masse sèche d'échantillon (M_{sec}) à l'aide d'une balance de précision de 0.1g, ensuite on place les éprouvettes dans une enceinte fermée (dessiccateur) sous une pression constante pendant 4h, 3h sous vides et une heure en introduisant l'eau jusqu'à saturation et recouvrement des éprouvettes d'environ 20mm, puis on déconnecte la pompe et les éprouvettes sont maintenu en saturation pendant 18 ± 2 h (Figure 2.15). Enfin on fait sortir les éprouvettes et on les pèse dans l'eau (M_{eau}) à l'aide d'une balance hydrostatique et on pèse à nouveau (M_{air}).

La porosité accessible à l'eau ε (%) est donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (2.4)$$

Où :

M_{eau} : la masse du spécimen immergé dans l'eau ;

M_{air} : la masse du spécimen pesé dans l'air ;

M_{sec} : la masse du spécimen sec.



Figure 2.15 : Essai de porosité.

2.7.5 Essai de Perméabilité aux ions chlorures

La perméabilité aux ions chlorures a été déterminée selon la norme ASTM C-1202 [154]. L'essai consiste à mesurer l'intensité du courant engendrée par une différence de potentiels égale de 60 Volts maintenue constante pendant 6 heures au moyen d'électrodes en acier inoxydable entre les deux cellules à deux compartiments. L'une des faces de l'éprouvette est au contact d'une solution de Na Cl dosée à 30 g/l (compartiment amont : cathode) et l'autre face est au contact d'une solution de NaOH 0.3N (compartiment aval : anode). Les électrodes immergées dans chaque compartiment sont constituées par un grillage métallique. Les spécimens cylindriques de diamètre de 10 cm et d'épaisseur de 5 cm sont obtenus en découpant des éprouvettes de 10 cm \times 20 cm à l'aide de scie de béton. Avant chaque essai, les éprouvettes sont soumises à une saturation d'eau après avoir été vidées de toute l'aire à l'intérieur des éprouvettes à l'aide d'une pompe à vide. La figure 2.16 représentés l'essai perméabilité aux ions chlorure

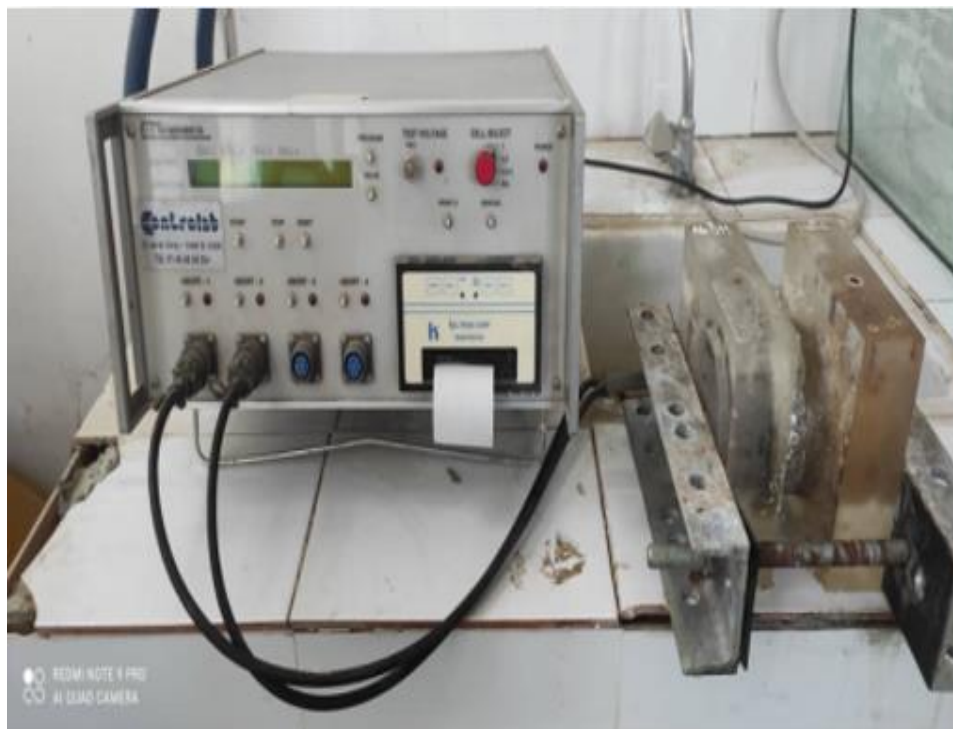


Figure 2.16 : Essai de perméabilité aux ions chlorure.

Le tableau 2.4 présente la classification de l'évaluation de la performance du béton en fonction de la perméabilité aux ions chlorure.

Tableau 2.4 : Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorure

| Charge totale passée | Qualité du béton |
|----------------------|------------------|
| >4000 | Elevée |
| 2000-4000 | Modérée |
| 1000-2000 | Faible |
| 100-1000 | Très faible |
| <100 | Négligeable |

2.7.6 Perméabilité à l'eau

L'essai de perméabilité à l'eau a été effectué selon la norme EN 12390-08 [155]. Cet essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de $72h \pm 2$ (Figure 2.17). L'essai a été réalisé à l'âge 90 jours sur des éprouvettes conservées dans l'eau à 20°C. la pression est appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette. Après 72 heures de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). A l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée. Les valeurs d'échelle de classement de la perméabilité à l'eau des bétons sont données par le tableau 2.5.



Figure 2.17 : Essai de perméabilité à l'eau.

Tableau 2.5 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau

| Pénétration d'eau (mm) | Perméabilité à l'eau |
|------------------------|----------------------|
| < 30 | Faible |
| 30 - 60 | Moyenne |
| >60 | Elevée |

2.8 Récapitulatif du programme des essais réalisés

Le programme expérimental suivi dans notre étude est divisé en deux parties. La première partie a été consacrée principalement à la formulation d'un BAP de référence. Initialement, des essais sur mortier ont été réalisés dans le but d'optimiser le dosage en superplastifiant. La procédure consiste à ajuster le pourcentage de superplastifiant jusqu'à obtenir l'étalement et le temps d'écoulement souhaité, sans la présence de phénomène de ressuage. Le dosage optimal en superplastifiant obtenu pour le mortier a été ensuite adopté pour le béton.

La deuxième partie a été consacrée à l'analyse de l'influence des granulats grossiers recyclés (GGR) et des granulats fins recyclés (GFR) dans différentes combinaisons de taux de remplacement (0%-0%, 50%-50% et 100%-50%) sur le comportement du BAP. Pour chaque mélange de béton autoplaçant recyclé, le ciment a été remplacé par du laitier à un niveau constant (15%), tandis que le MK a été substitué à différents niveaux 0%, 5%, 10%, et 15% en tant que poudre de mélange ternaire. Cela nous a permis d'étudier l'effet combiné du laitier et du MK sur les performances rhéologiques, mécaniques et la durabilité des BAPR.

Le diagramme suivant (Figure 2.18) résume les essais réalisés sur le béton à l'état frais et durci.

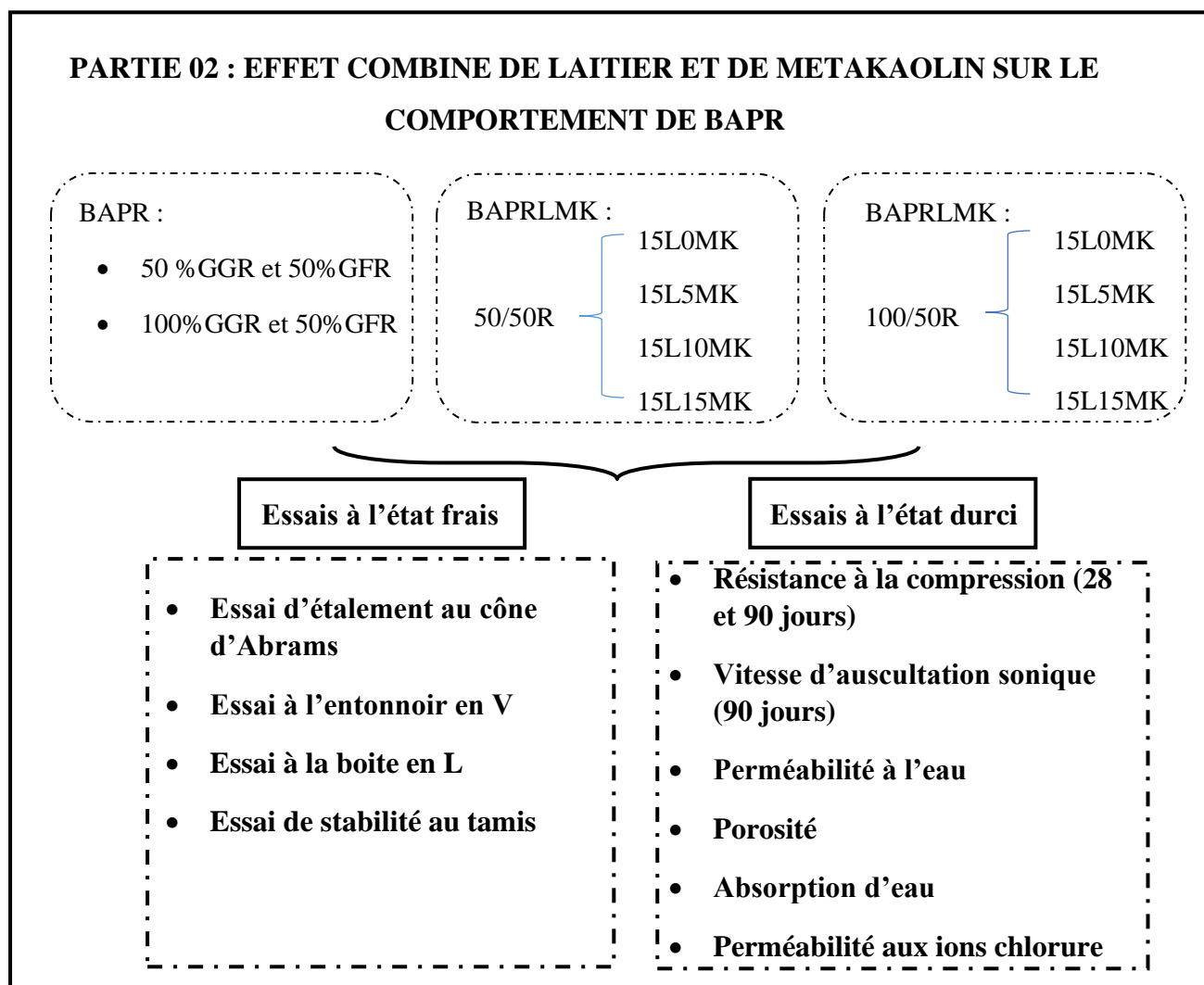
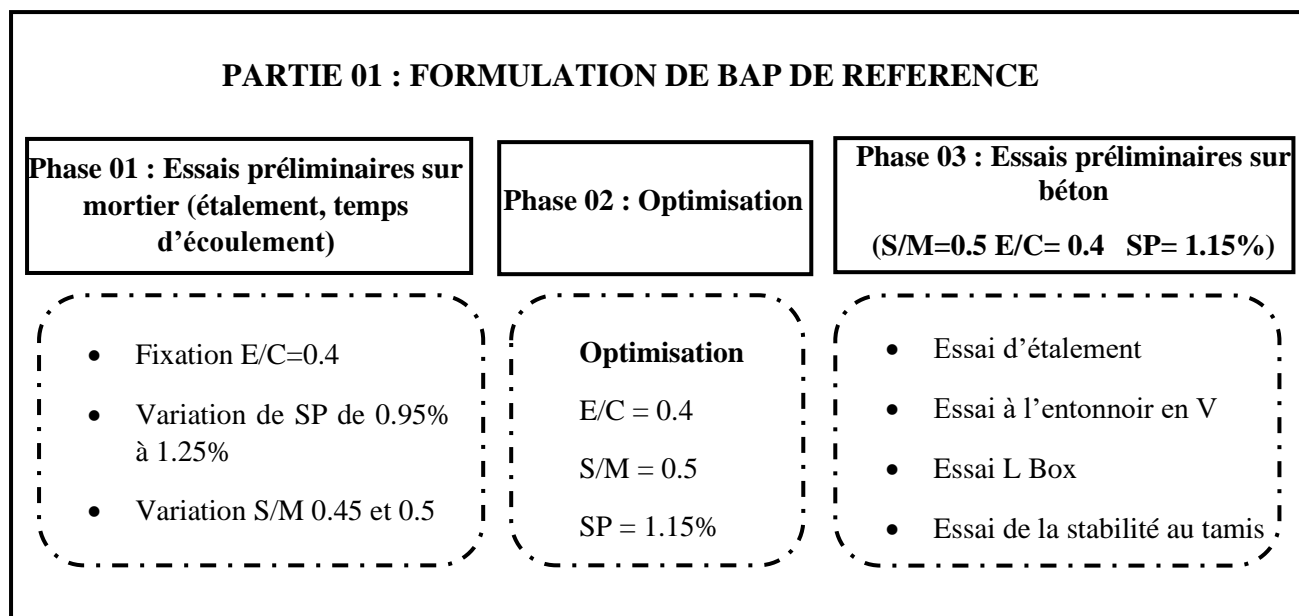


Figure 2. 18 : Organigramme de la procédure expérimentale.

CHAPITRE 3
RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET
DISCUSSION

CHAPITRE 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des différents essais effectués à l'état frais et durci sur les bétons autoplaçants à base de granulats recyclés, laitier et métakaolin. Nous avons commencé par les essais d'optimisation du rapport sable sur mortier (S/M) ainsi que le rapport superplastifiant sur liant (SP/L) afin d'obtenir un mortier autoplaçant adéquat pour la formulation ultérieure du béton autoplaçant. Ensuite nous avons examiné l'effet combiné du laitier et du métakaolin sur l'ouvrabilité, les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants recyclés (la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'eau, la diffusion et l'absorption).

3.2 Optimisation des rapports S/M et SP/L

L'optimisation des rapports S/M et SP/L consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer une meilleure performance du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports S/M de 0.45 et 0.5 tout en variant le dosage en SP (de 0.95% à 1.25%) et avec un rapport Eau/Liant fixe d'environ 0.4. Les rapports optimaux sont choisis de manière à obtenir un mortier de grande fluidité avec un étalement entre 270 et 330 mm, une viscosité appropriée avec un temps d'écoulement entre 2 et 10 sec et de grande résistance à la ségrégation et sans effet de ressuage (évalué visuellement). Les différentes compositions obtenues pour deux litres de mortier en fonction des rapports S/M et SP/L sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition du mortier en fonction des rapports S/M et SP/L

| Dosage en SP (%) | | 0.95 | 1.05 | 1.15 | 1.25 |
|------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Ciment (kg) | S/M=0.45 | 1.511 | 1.511 | 1.511 | 1.511 |
| | S/M=0.5 | 1.374 | 1.374 | 1.374 | 1.374 |
| Sable (kg) | S/M=0.45 | 2.350 | 2.350 | 2.350 | 2.350 |
| | S/M=0.5 | 2.611 | 2.611 | 2.611 | 2.611 |
| Eau (kg) | S/M=0.45 | 0.610 | 0.609 | 0.608 | 0.607 |
| | S/M=0.5 | 0.557 | 0.557 | 0.556 | 0.555 |
| SP (kg) | S/M=0.45 | 0.014 | 0.016 | 0.017 | 0.019 |
| | S/M=0.5 | 0.013 | 0.014 | 0.016 | 0.017 |

L'évolution de l'étalement et du temps d'écoulement des différents mortiers élaborés est présentée dans le tableau 3.2. On remarque que les mortiers préparés avec un rapport S/M de 0.5 sont caractérisés par une meilleure fluidité et résistance à la ségrégation avec l'utilisation d'un pourcentage en superplastifiant compris entre 1.05 et 1.15%. Pour un rapport S/M de 0.45, les mortiers obtenus sont extrêmement fluides et ne sont pas conformes aux recommandations de Domone et Jin [144]. Ces mélanges possèdent une faible viscosité, ce qui peut nuire l'homogénéité du BAP. Avec des rapports S/M=0,5 et SP/L=1.15%, un mélange fluide et homogène a été obtenu, ce qui nous conduit à choisir le rapport S/M de l'ordre de 0.5 pour la suite des essais.

Tableau 3.2 : Résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs du rapport S/M et SP/L

| | E/C= 0.4 | Etalement (mm) | | Temps d'écoulement (s) | | Observation | |
|--|--------------|----------------|-----|------------------------|-------|-------------|-----|
| | S/M SP(%) | 0.45 | 0.5 | 0.45 | 0.5 | 0.45 | 0.5 |
| MAP1 | 0.95 | 259 | 221 | 5.02 | 15.38 | F | F |
| MAP2 | 1.05 | 292 | 272 | 4.06 | 7.97 | H | H |
| MAP3 | 1.15 | 328 | 309 | 3.91 | 6.33 | R | H |
| MAP4 | 1.25 | 349 | 317 | 3.26 | 6.07 | R | R |
| F : Ferme ; H : Homogène ; R : Ressuage. | | | | | | | |

3.2.1 Effet du superplastifiant sur l'étalement au mini cône

La figure 3.1 présente les résultats de l'étalement effectué sur les mortiers autoplaçant, en faisant varier le dosage en superplastifiant avec un rapport E/L et S/M fixé à 0.4 et 0.5 respectivement. On remarque que l'étalement d'un mortier au mini cône augmente avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, le diamètre d'étalement augmente de 221 à 317mm lorsqu'on augmente le SP de 0.95 à 1.25%. Cela est due à l'utilisation du superplastifiant permet une meilleure lubrification des surfaces des particules conduisant par conséquent à une diminution de la résistance à l'écoulement, ce qui améliore l'étalement du mortier. En outre, l'effet dispersant du SP, qui libère l'eau piégée entre les grains du ciment, résulte une quantité d'eau libre dans le mélange qui augmente au fur et à mesure que le dosage en SP augmente, ce qui contribue à l'augmentation de l'étalement du mortier [156].

Les résultats de l'étalement montrent que tous les dosages vérifiés les exigences normatives (entre 270 et 330mm), à l'exception du dosage 0.95% qui a donné un étalement inférieur à la limite. Les observations visuelles pour le dosage 1.25% détectent une présence d'une laitance en périphérie de la galette du mortier.

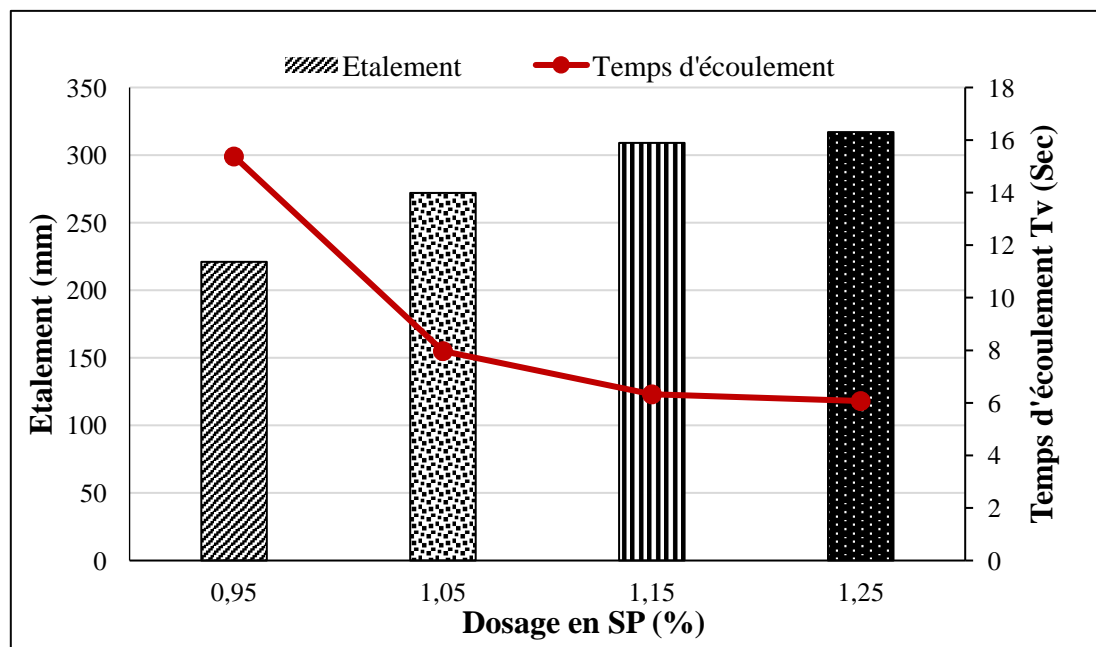


Figure 3.1 : Étalement et temps d'écoulement Tv de mortier en fonction de dosage en SP.

3.2.2 Effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel)

Les résultats de l'effet de dosage en superplastifiant sur le temps d'écoulement sont représentés dans la figure 3.1. On remarque une diminution du temps d'écoulement avec l'augmentation du dosage en superplastifiant. La diminution du temps d'écoulement est due principalement au mécanisme de dispersion de superplastifiant qui libère l'eau piégée entre les particules du ciment et améliore la fluidité du mortier. Les résultats de temps d'écoulement montrent que tous les dosages vérifient les exigences normatives ($2 < T_v < 10s$) à l'exception du dosage 0.95% qui a donné un temps d'écoulement au V- funnel plus élevé que 10s.

Les résultats obtenus par les essais de l'étalement et du temps d'écoulement montrent qu'un dosage en superplastifiant de 1.15% est considéré le dosage efficace vu qu'il donné le plus grand étalement et temps d'écoulement sans risque de ressuage ou de ségrégation.

3.3 Effet combiné des ajouts (laitier/MK) sur les propriétés des BAPR à l'état frais

3.3.1 Étalement au cône d'Abrams

Les résultats d'étalement des différents mélanges de BAP étudiés sont illustrés dans la figure 3.2. Les résultats montrent que les diamètres d'étalement de tous les mélanges de BAP se situent entre 650 et 765 mm, ce qui indique une bonne déformabilité des BAP. Les valeurs d'étalement sont acceptables par les recommandations EFNARC et sont classées dans la catégorie SF2-SF3, comme présenté dans le tableau 3.3 [149].

Tableau 3.3 : Valeurs recommandées pour les essais du BAP [149]

| Essai | | Classe | Valeurs limites |
|----------------------|---|---------|------------------------------|
| Essai d'Étalement | Étalement (mm) | SF1 | 550-650 |
| | | SF2 | 660-750 |
| | | SF3 | 760-850 |
| | Temps d'écoulement T_{500} (s) | VS1/VF1 | ≤ 2 |
| | | VS2/VF2 | ≥ 2 |
| Essai V-Funnel | Temps d'écoulement (s) | VS1/VF1 | ≤ 8 |
| | | VS2/VF2 | 9-25 |
| Essai L-Box | Rapport des hauteurs (H2/H1) | PA1 | ≥ 0.8 avec deux barres |
| | | PA2 | ≥ 0.8 avec trois barres |
| Essai de ségrégation | Laitance passant à travers le tamis (%) | SR1 | ≤ 15 |
| | | SR2 | ≤ 20 |

Une réduction de l'étalement a été remarquée lorsque les granulats naturels ont été remplacés par les granulats recyclés. Cette réduction peut être attribuée à l'absorption d'eau plus élevée des granulats recyclés par rapport à celle des granulats naturels en raison de leur texture de surface plus rugueuse, de leur teneur en vides plus élevée et de leurs pores plus ouverts [157]. Des résultats similaires ont été constatés par Kapoor et al. [49] qui ont trouvé que l'étalement du BAP diminue à mesure que la quantité de granulats recyclés augmente.

Ces résultats sont également conformes à ceux trouvés par Salman et al. [158] dans lesquels la maniabilité du béton a diminué à mesure que la proportion des granulats recyclés augmentait. L'étalement maximal a été atteint avec une substitution de 0% de granulats recyclés, tandis que l'étalement minimal a été obtenu avec une substitution de 100% de granulats recyclés.

Singh et al. [159] ont affirmé que le remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés a entraîné l'incorporation d'un plus grand nombre de pores dans le mélange, lesquels absorbent une plus grande quantité d'eau, réduisant la quantité d'eau disponible pour le mélange et, par conséquent, l'ouvrabilité.

Kumar et al. [160] ont observé que la valeur de l'étalement diminue lorsque le taux de substitution par les GR augmente dans le mélange. Cependant, le BAP contenant 33 % de GR présente une meilleure maniabilité par rapport au mélange de contrôle et aux autres mélanges contenant des GR. La valeur d'écoulement du BAP contenant 66 % et 100 % de GR est réduite respectivement de 4,58 % et 11 % par rapport au mélange de contrôle. La dégradation de la fluidité du béton frais est due à l'absorption élevée d'eau et à la densité plus faible des granulats recyclés, ce qui a augmenté le volume des granulats et réduit la teneur en eau libre dans le mélange.

L'ouvrabilité du BAP recyclé peut être considérablement améliorée par la substitution du ciment par 15% de laitier, comme le montre la figure 3.2. Par exemple les mélanges 50/50R15L0MK et 100/50R15L0MK ont montré un diamètre d'étalement supérieure de 3.38% et 6.9%, par rapport à la valeur d'étalement des mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK, respectivement. Ces résultats peuvent être attribués, d'une part, à la forme moins angulaire et moins grossière des particules de laitier, et d'autre part, à la faible densité de laitier par rapport au ciment, cela entraîne un volume de pâte plus important, ce qui permet d'écartier les particules des granulats fins les unes des autres. Cela conduit ainsi à la réduction des frictions inter-particulaires, à l'amélioration à la fois de la cohésion à l'interface pâte-agrégat et de la fluidité de mélange [161].

Djelloul et al. [43] ont étudié l'effet combiné du laitier et des granulats recyclés sur les performances du BAP. Ils ont montré que l'utilisation de 15% et 30% de laitier en remplacement du ciment a amélioré l'étalement du BAP, indépendamment du pourcentage de granulats recyclés. Le laitier a possédé évidemment un pouvoir de remplissage et crée un effet de lubrification entre les grains de ciment, les rendant ainsi plus mobiles. De plus leur activité inerte, à ce stade de l'hydratation, libère une partie d'eau de gâchage qui contribue à la lubrification des grains et à l'amélioration de l'ouvrabilité.

Ahmad et al. [88] ont conclu que l'augmentation de la maniabilité du béton à base de granulats recyclés grâce à l'incorporation du laitier est due aux particules fines et lisses de laitier qui remplissent les espaces entre les granulats grossiers, les granulats recyclés, le sable et le ciment. Cela conduit à un béton plus dense, ayant moins de vides, et donc plus de pâte est disponible, facilitant ainsi un meilleur écoulement du béton.

L'analyse des résultats montre également une diminution de la fluidité des BAP recyclés avec l'incorporation combinée de laitier et de MK, ce qui indique que l'incorporation de MK a réduit la capacité de remplissage des BAP. La valeur de l'étalement de 100/50R15L5MK, 100/50R15L10MK et 100/50R15L15MK a diminué de 0.8%, 2.1 % et 8%, respectivement, par rapport à celle du 100/50R0L0MK. Ce comportement est causé par la grande surface spécifique de MK, qui nécessite une plus grande quantité d'eau pour maintenir la maniabilité du béton [162]. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Younis [163].

Younis et al. [122] ont montré que l'ajout de MK a un effet négatif sur la maniabilité des mélanges réalisés avec des granulats recyclés. La maniabilité des mélanges de granulats recyclés diminue avec l'ajout de MK, et cette réduction dépend de la teneur en MK. Avec une teneur en MK de 4%, la maniabilité du mélange de granulats recyclés n'a montré aucun changement.

Selon Gill et al. [164] la réduction de la maniabilité peut être due à la taille des particules de MK, qui peuvent être classées comme ultrafines, ainsi qu'à une réactivité pouzzolanique plus élevée. Cela a entraîné une augmentation de la friction interne entre les grains. Par conséquent, cette friction entraîne une perte de fluidité.

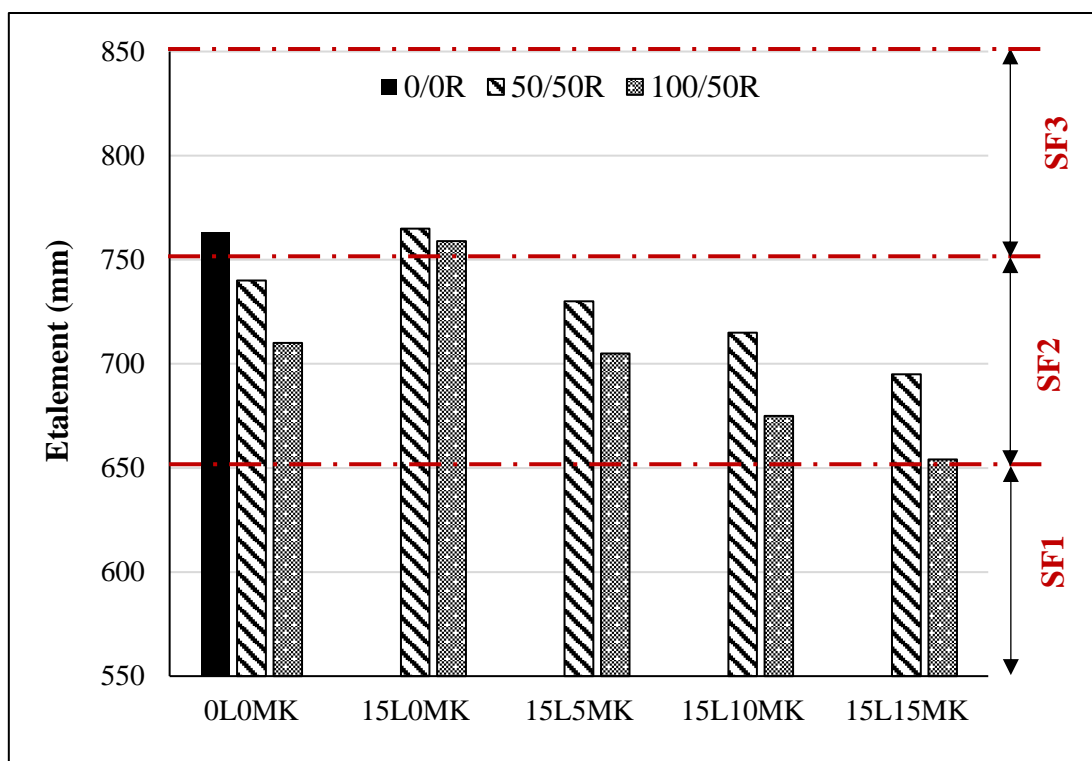


Figure 3.2 : Effet combiné du laitier et du MK sur l'étalement des BAPR.

3.3.2 Temps d'écoulement T500 et le temps à l'entonnoir en V

La viscosité de différents mélanges de BAP a été évaluée en utilisant le temps d'écoulement T500 et le temps à l'entonnoir en V. Les résultats de variation du temps d'écoulement T500 et à l'entonnoir en V sont présentés dans la figure 3.3. Cette figure montre que le temps d'écoulement T500 variait entre 1.12 et 3.63 secondes et le temps d'écoulement à l'entonnoir en V se situait entre 3.73 et 7.45 secondes. Il est clairement observé que les valeurs du temps T500 et du temps à l'entonnoir en V augmentent avec l'augmentation du taux de remplacement des GR, ce qui cohérent avec les résultats obtenus par Bahrami et al. [70]. La raison principale réside dans le fait que les granulats recyclés présentent une texture plus irrégulière et une surface plus rugueuse et davantage de pores que les granulats naturels, ce qui nécessite une plus grande de pâte pour les recouvrir [165].

Barrqueiro et al. [166] ont étudié la maniabilité du béton autoplaçant haute performance avec des granulats recyclés. Ils ont constaté que le temps T500 des mélanges avec un taux de remplacement de GR de 25%, 50% et 100% a augmenté de 27.7%, 44.4% et 111.1%, respectivement et le temps d'écoulement en V avec un taux de remplacement de GR de 25%, 50%, et 100% a augmenté de 18.6%, 22% et 115.3%, respectivement.

Sun et al. [167] ont trouvé que la valeur du temps d'écoulement T500 et du temps à l'entonnoir en V augmentait à mesure que le taux de remplacement des GR augmentait de 0% à 100%. La viscosité du mélange de BAP a augmenté en raison de la nature très poreuse des granulats recyclés.

Mandal et al. [168] ont montré que l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation du pourcentage de GR est due à l'augmentation de la friction entre les particules et à une diminution de la teneur en liquide efficace dans les mélanges de BAP à mesure que le mortier adhérent du GR absorbe plus d'eau en raison de la présence de pores.

De plus, la figure 3.3 montre également que les valeurs de T500 et d'entonnoir en V obtenues pour les mélanges de BAPR dans lesquels le ciment a été remplacé par le laitier et MK sont supérieures à celles obtenues pour les mélanges de BAPR avec substitution de ciment par le laitier seul, ce qui indique que l'ajout de laitier améliore la viscosité, tandis que l'ajout de MK a un effet néfaste sur la viscosité des mélanges de BAPR. La raison est la même que celle discutée pour le diamètre d'étalement, à savoir que l'ajout de laitier rend le béton moins visqueux et entraîne un temps d'écoulement plus faible, tandis que l'ajout de MK augmente la viscosité et entraîne un temps d'écoulement plus long. Uysal et Sumer [169] ont rapporté que la valeur de temps d'écoulement en V plus long représente une viscosité plus élevée du mélange et il est directement lié à une meilleure résistance à la ségrégation.

D'après Djelloul et al. [43] le temps d'écoulement en entonnoir en V_f pour les mélanges préparés avec 30% de laitier est plus élevé que le temps d'écoulement des BAP sans laitier ainsi que ceux des BAP contenant 15% de laitier. Ce comportement est dû à l'augmentation de la quantité de laitier, ce qui rend le mélange fluide et moins cohésif, et par conséquent le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir est plus long quel que soit le taux de GR. Le temps optimal est atteint pour 15% de laitier, ce qui représente le pourcentage optimal en termes d'ouvrabilité, tandis que le temps d'écoulement le plus court de 6.16 s a été mesuré pour le BAP contenant 50% de GR (15%L).

Kavitha et al. [170] ont montré que la perte de capacité de remplissage pourrait être due à deux raisons : la finesse et l'augmentation de la contrainte d'écoulement du MK. Les particules ultrafines du MK ont une réactivité élevée qui accélère l'hydratation et augmente la viscosité du mélange.

Al-Oran et al. [171] ont examiné les propriétés à l'état frais du BAP produit en utilisant du laitier et du MK comme substitution partielle du ciment. Le ciment a été remplacé par du MK à un taux constant de 10 % tandis que le laitier a été substitué au ciment à différents taux de 15 %, 20 %, 25 % et 30 % en tant que poudre de mélange ternaire. Ils ont constaté que la présence du MK en tant que substitution du ciment dans le mélange de BAP a entraîné une réduction de la capacité de remplissage par rapport au mélange normal de BAP. L'inclusion de laitier parmi les mélanges de BAP a amélioré les propriétés à l'état frais et a compensé la réduction causée par le MK. Le laitier a une taille de particules plus grande que le MK et le ciment, ce qui contribue à réduire la surface spécifique, à diminuer la réactivité et à faciliter le mouvement du béton (capacité de remplissage). De plus, le laitier présente une contrainte d'écoulement plus faible en raison de la diminution des forces internes au sein du mélange, ce qui favorise l'augmentation de la fluidité du béton [172].

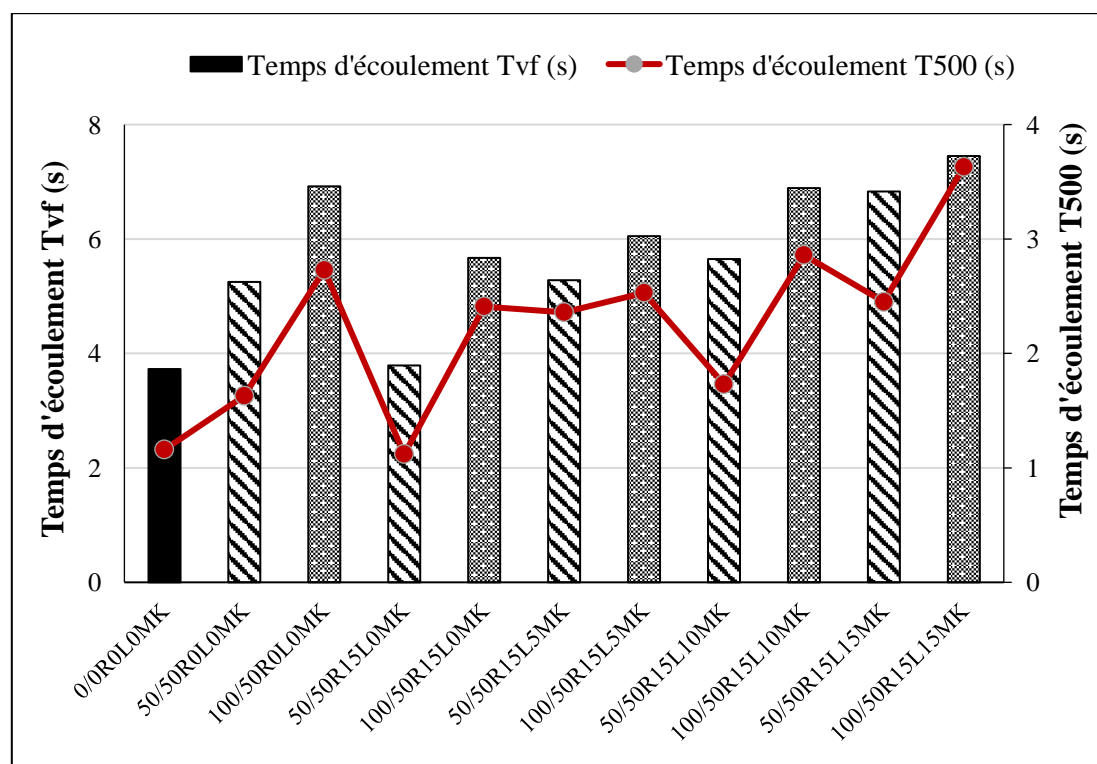


Figure 3.3 : Effet combiné du laitier et du MK sur le temps d'écoulement T500 et le temps à l'entonnoir en V de BAPR.

La relation entre le T500 et le temps d'écoulement à l'entonnoir en V du BAP est montrée sur la figure 3.4. Cette figure indique que les valeurs de temps d'écoulement à l'entonnoir en V des BAP contenant des GR, du laitier et du MK augmentent avec l'augmentation du T500, avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,84.

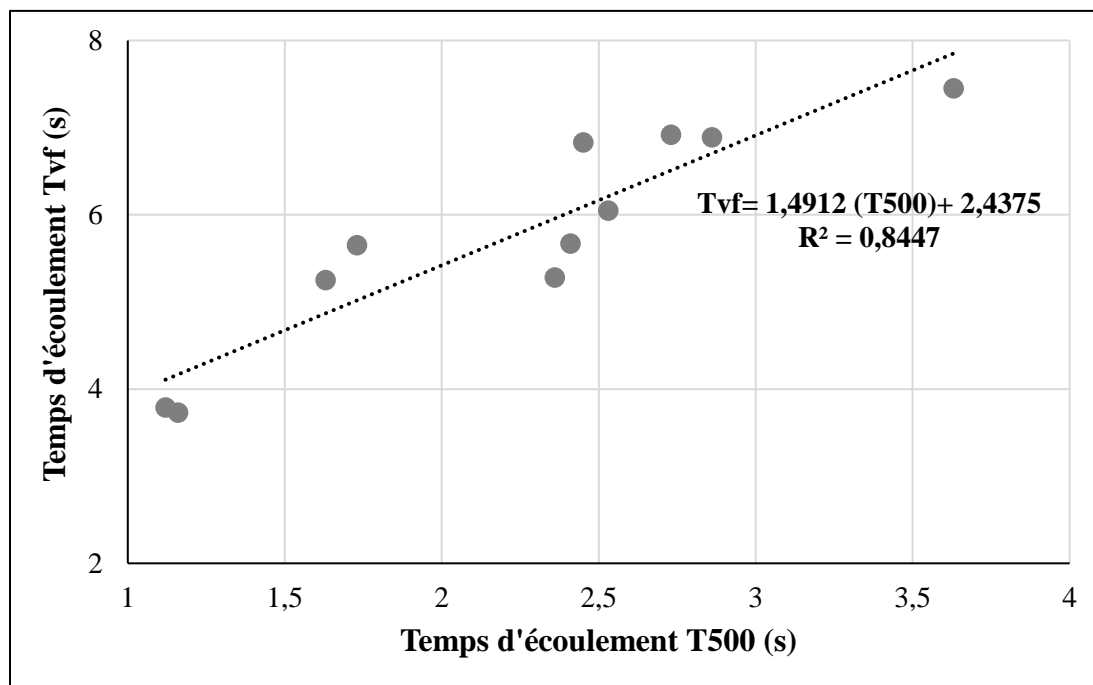


Figure 3.4 : Relation entre le temps d'écoulement à l'entonnoir en V en fonction du temps d'écoulement T500.

3.3.3 Mesure du rapport (H2/H1) de l'essai de la boîte en L (L-Box)

L'essai de la boîte en L a été réalisé pour évaluer la capacité de passage du BAP. La capacité de passage signifie la capacité du béton à traverser l'armature en acier congestionnée sans ségrégation ni blocage. La capacité de passage mesurée par l'essai de la boîte en L est exprimée en tant que rapport H2/H1. Une valeur de H2/H1 plus élevée indique une meilleure capacité de passage du mélange de béton.

Les résultats du rapport H2/H1 de différents mélanges de BAP à base de GR, laitier et MK sont présentés sur la figure 3.5. Selon l'EFNARC le rapport H2/H1 doit être compris entre 80 et 100% pour éviter le risque de blocage des BAP élaborés. Les résultats indiquent que les valeurs du rapport H2 / H1 variaient entre 82 et 97%, ce qui signifie que tous les mélanges des BAP étudiés se situent dans la plage ciblée et ont une bonne capacité de passage à travers les zones frottement ferrillées. Aucun signe de ségrégation ni blocage n'a été observé pour tous les mélanges.

On remarque que la substitution des granulats naturels par les granulats recyclés affecte la capacité de passage, et par conséquent le rapport $H2/H1$ a diminué. Cela est principalement dû au fait que lorsque les granulats naturels étaient largement remplacés par des GR, en raison des anciens mortiers de ciment adhérents et des nombreux angles vifs des GR, les particules de granulats étaient bloquées. Par conséquent, la tendance du béton à la résistance interne et au frottement augmentait, ce qui affectait négativement la capacité de passage du béton [173].

D'après, Sua-iam et al. [174], les mélanges de BAP incorporant 100% de GR ont montré une augmentation de l'indice de blocage, indiquant une capacité de passage relativement plus faible. De plus, l'utilisation de GFR et GGR en tant que substituts des granulats naturels fins ou grossiers a conduit à un mélange de béton rugueux et angulaire. La diminution peut être attribuée à une cohésion accrue, qui entrave la capacité de passage du béton.

Les résultats trouvés par Shivaprasad et al. [157] ont montré que les rapports de blocage de la boîte L ont diminué avec l'incorporation des granulats recyclés. Le remplacement de 10% et 50% de GR a atteint un rapport de 93.5% et 91.2%, respectivement. Tous les mélanges du BAP étaient dans la plage de spécifications EFNARC (0,8 à 1) pour le test L-box. Ainsi, les résultats ont montré que même les granulats recyclés présentent également une bonne capacité de passage.

Il est évident à partir de résultats que l'ajout de laitier a considérablement amélioré la capacité de passage des mélanges de BAP à base de granulats recyclés. L'amélioration de la capacité de passage pourrait être liée à la taille des particules de laitier, qui a un effet positif en réduisant la friction interne, ce qui contribue ensuite à l'amélioration de la fluidité et de la capacité de passage. Cependant, l'incorporation de MK dans les mélanges de BAP à base de granulats recyclé a diminué le rapport $H2/H1$. Plus la quantité de MK augmente, plus la résistance à l'écoulement augmente, ce qui réduit la capacité de passage du béton.

Djelloul et al. [43] ont noté que la capacité de passage des mélanges de BAP a diminué avec l'augmentation du dosage de laitier, quel que soit la teneur en GR. Les mélanges de BAP contenant un taux de substitution partiel d'environ 15% de ciment par du laitier ont montré un effet favorable sur la capacité de passage.

Singh et al. [175] ont étudié l'effet de l'incorporation du MK sur les propriétés des bétons autoplaçants. Les résultats montrent que la capacité de passage est diminuée lorsque le ciment est partiellement remplacé par le MK. Madandoust et al. [176] ont trouvé que le MK augmente la capacité de passage de béton avec l'augmentation de dosage en SP pour obtenir des rapports H2/H1 proches à celle de mélange de référence.

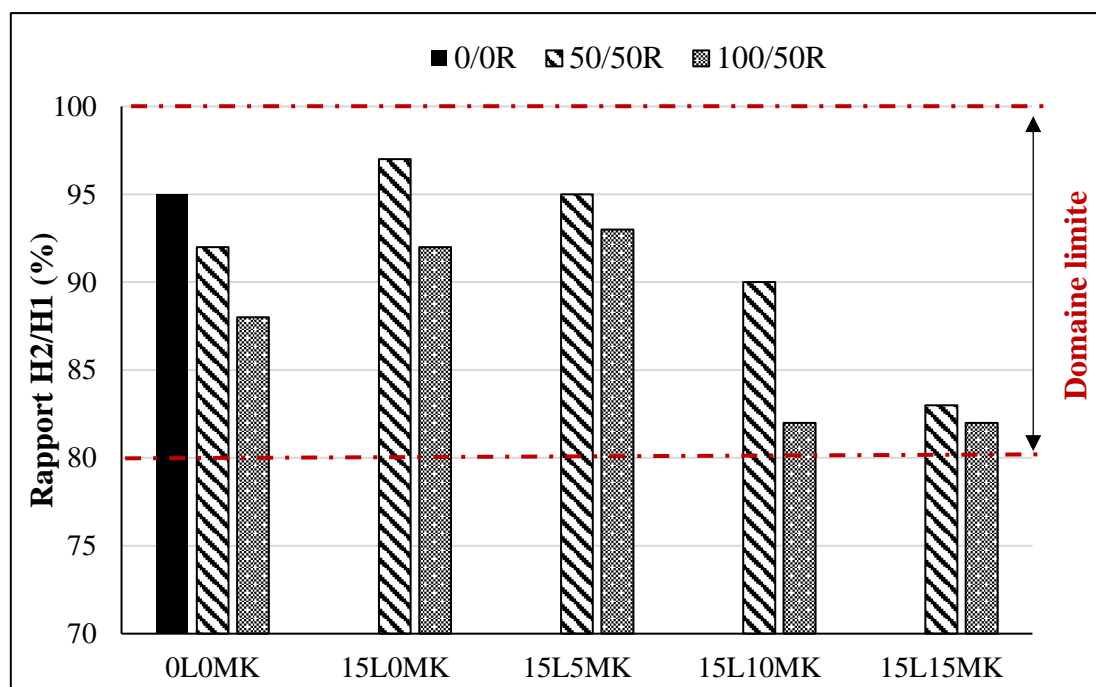


Figure 3.5 : Effet combiné du laitier et du MK sur le rapport H2/H1 de BAPR.

3.3.4 Résistance à la ségrégation

Les résultats de la stabilité au tamis sont présentés dans la figure 3.6. L'EFNARC recommande une valeur inférieure à 15%, jugée satisfaisante pour que le BAP ait une résistance à la ségrégation suffisante. Dans la présente étude, l'indice de ségrégation de différents mélanges de BAP variait entre 4% et 10%. L'incorporation de granulats de béton recyclé dans le BAP a amélioré sa résistance à la ségrégation, entraînant une diminution du pourcentage de laitance. La résistance à la ségrégation des mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK est améliorée de 22% et 30%, respectivement par rapport au mélange 0/0R0L0MK. Cela est probablement dû à la capacité d'absorption plus élevée des granulats recyclés. Des résultats similaires sont trouvés par Tang et al. [177].

De plus, l'ajout combiné de laitier et de MK a également amélioré la résistance à la ségrégation des mélanges de BAP à base de granulats recyclés. Les mélanges contenant de 15% de laitier et 15% de MK présentaient le taux de ségrégation le plus faible. Cela est principalement dû à la rétention d'eau et à la compacité du MK.

En effet, la diminution de la viscosité confère une bonne stabilité à la ségrégation du BAP. Safawi et al. [178] ont montré que le temps d'écoulement au V-funnel est un outil adapté pour décrire la tendance de la ségrégation. Ainsi, pour des temps d'écoulement très faibles (inférieures à 2 secondes), la tendance au béton à ségréger est très élevée, ce qui signifie que les mélanges à faible viscosité sont facilement ségrégués. Umehara et al. [179] ont rapporté que la diminution de la viscosité du béton est compatible avec la diminution de la stabilité.

Généralement, on peut dire que les résultats obtenus montrent que tous les BAP confectionnés présentent une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage. En outre, l'examen visuel des BAP révèle que ces derniers sont homogènes et stables.

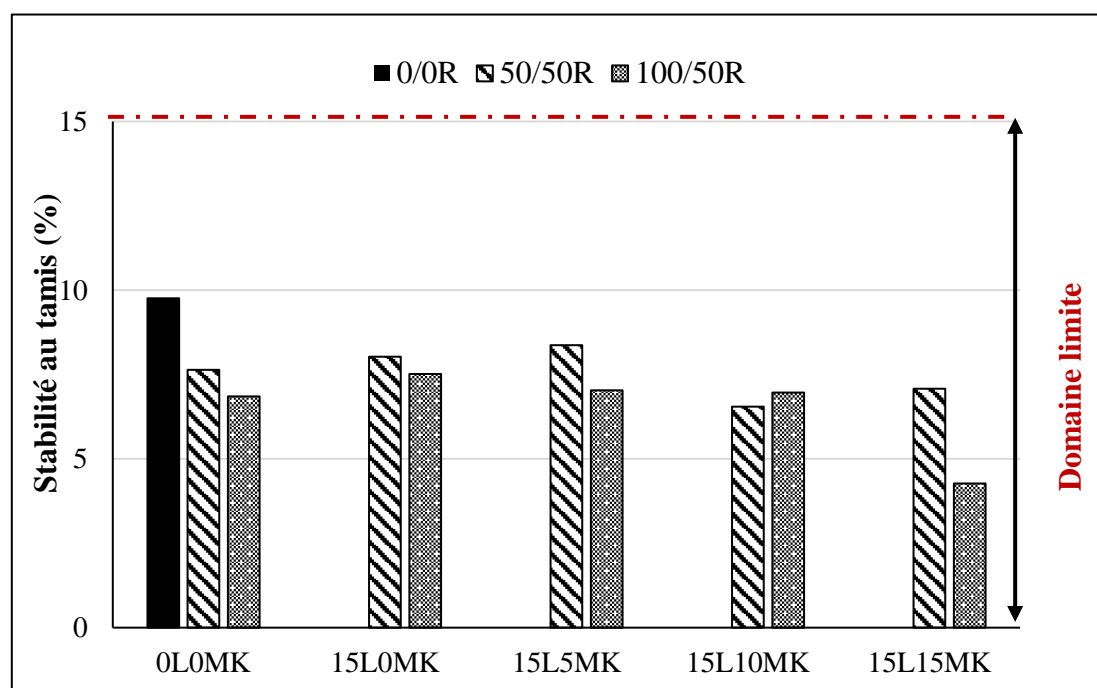


Figure 3.6 : Effet combiné du laitier et du MK sur la stabilité au tamis de BAPR.

3.4 Effet combiné des ajouts (laitier/MK) sur les propriétés des BAPR à l'état durci

3.4.1 Résistance à la compression

La variation de la résistance à la compression à 28 et 90 jours de tous les mélanges de BAP avec différents pourcentages de GR, de laitier et de MK est représentée dans la figure 3.7. A partir de cette figure, on remarque une diminution progressive de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de GR, quel que soit l'âge de durcissement. La résistance à la compression à 28 jours du mélange 0/0R0L0MK, est de 42,6 MPa, ce qui diminue à 38.8 MPa et 37,2 MPa pour les mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK, respectivement, ce qui représente une diminution de 8% et 13% de la résistance à la compression. A mesure que la réaction d'hydratation progresse, la résistance des mélanges de BAP commence à augmenter avec l'âge de durcissement. De même, la résistance à la compression à 90 jours des mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK a diminué de 18% et 24% respectivement, par rapport au mélange 0/0R0L0MK. Cette dégradation de résistance peut être liée à la mauvaise qualité du mortier adhérent présent à la surface du GR, qui se caractérise par des vides et des microfissures. Ce mortier poreux réduit la résistance de liaison entre les granulats et la pâte de ciment, formant une zone faible à l'interface où la défaillance commence lors de la charge [165].

Toghroli et al. [180] ont affirmé que la diminution de la résistance pourrait être attribuée à la qualité inférieure du GR par rapport au GN. De plus, le vieux mortier adhérent au GR ainsi que le nouveau mortier forment une double zone de transition interfaciale, ce qui diminue l'adhérence entre le GR et la pâte de ciment. De plus, le GR a une densité plus faible que celle du GN, ce qui peut être une autre raison de la réduction de la résistance. En outre, la procédure de production du GR entraîne la formation de nombreux pores et microfissures en raison du concassage des déchets de béton, ce qui se traduit par de mauvaises caractéristiques de la zone de transition interfaciale et réduit significativement la résistance.

De nombreux chercheurs [181], [182] ont signalé que les granulats recyclés avaient une microstructure plus mauvaise et une interface plus faible en raison d'ancien mortier adhérent, par rapport aux granulats naturels. Par conséquent les propriétés mécaniques des granulats recyclés étaient inférieures à celles des granulats naturels. Les Zones de transition interfaciale entre l'ancien mortier adhérent et le granulat d'origine, entre l'ancien mortier adhérent et le nouveau mortier, ainsi qu'entre le nouveau mortier et le granulat d'origine, ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés, ce qui a entraîné une diminution des propriétés mécaniques.

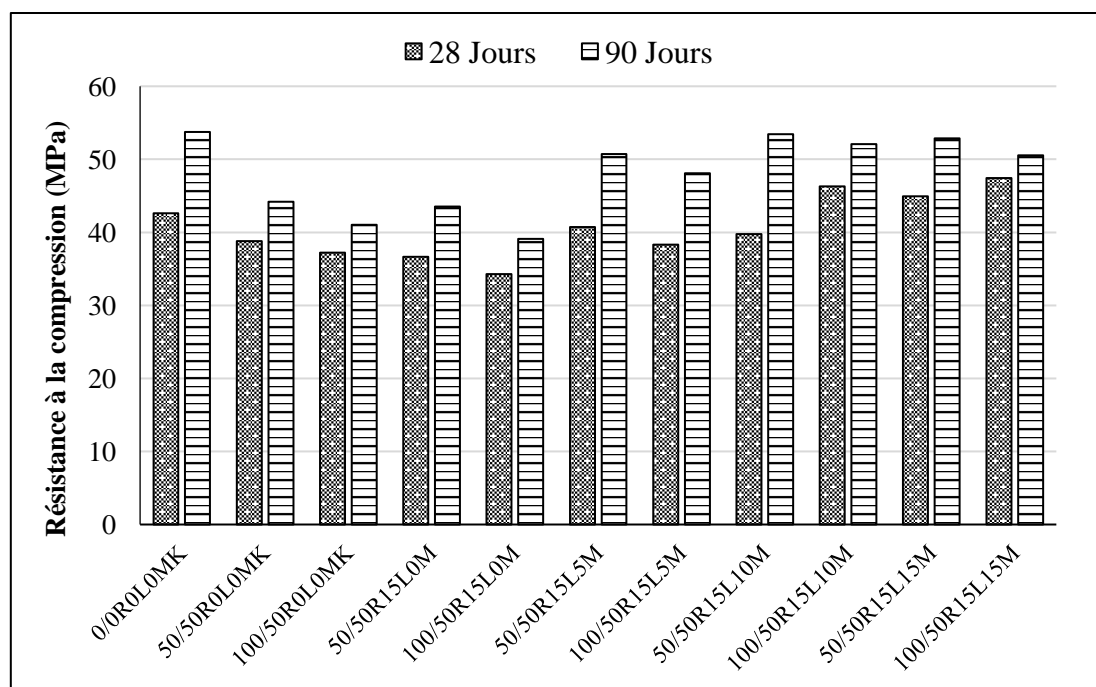


Figure 3.7 : Variation de la résistance à la compression en fonction du temps.

La comparaison des résultats de résistance à la compression à 90 jours de l'étude actuelle avec certaines études précédentes est présentée dans la figure 3.8. On observe que la diminution de la résistance à la compression des bétons recyclés préparé avec 50% GGR et 100% GGR est respectivement de 9.6% et 15.4% pour Muduli et al. [183], de 9.2% et 18.3% pour Majhi et al. [117], de 13.9% et 23% pour wang et al. [112], tandis que celle de l'étude actuelle est de 18% et 24%. Cela montre que le taux de diminution de l'étude actuelle est supérieur à celui rapporté dans les études précédentes en raison de l'utilisation combiné de GGR et GFR dans cette étude.

De plus, on remarque une légère diminution de la résistance à la compression du béton fabriqué avec des granulats recyclés avec l'incorporation du laitier. La valeur de la résistance à la compression du mélange 100/50R0L0MK a diminué de 37.2 MPa à 34.3 MPa et de 41MPa à 39.1 MPa lors de l'utilisation de laitier à 28 et 90 jours, respectivement. Cela peut être expliqué par la faible activité hydraulique du laitier. De plus le ciment Portland possède une forte activité hydraulique, donc lorsque la teneur en ciment est réduite, la résistance à la compression diminue plus que l'augmentation de résistance causée par l'ajout de laitier [117].

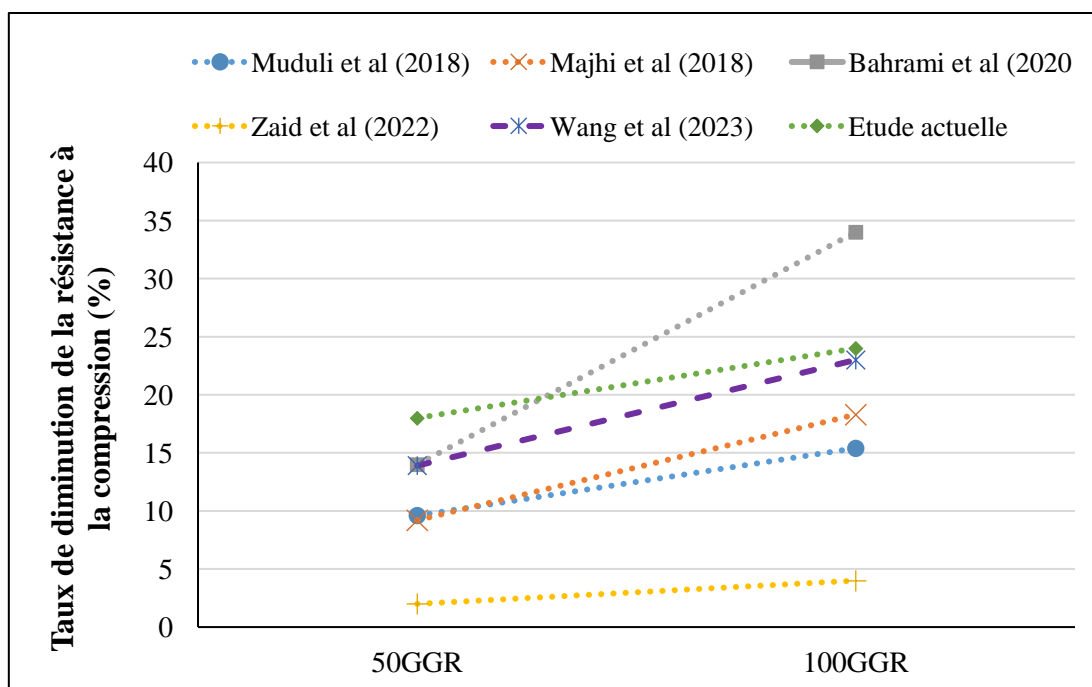


Figure 3.8 : Comparaison des résultats de résistances à la compression à 90 jours avec des études précédentes.

L'incorporation combinée de laitier et de MK pour remplacer partiellement le ciment a amélioré la résistance à la compression du BAPR par rapport à l'utilisation de laitier uniquement. La résistance à la compression à 90 jours du mélange 100/50R0L0MK a augmenté de 41MPa à 48.1 MPa, 52.1 MPa et 50MPa, lorsque le MK a été utilisé à des concentrations de 5%, 10% et 15%, respectivement. Cela peut être attribué à la capacité de remplissage des particules plus fines du MK qui aide à réduire les vides et à améliorer la zone de transition interfaciale entre les granulats et la pâte de ciment. De plus, une partie du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présent dans le mortier résiduel de GR devient disponible pour la réaction pouzzolanique, ce qui génère un gel C-S-H supplémentaire qui confère une résistance supplémentaire au BAP à base de granulats recyclés.

Wang et al. [112] ont étudié l'effet des ajouts cimentaires tels que le laitier, les cendres volantes, la fumée de silice et le métakaolin sur les propriétés mécaniques (la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage et la résistance à la flexion) du béton recyclé avec des mélanges binaires, ternaires et quaternaires. Ils ont trouvé que la résistance à la compression du béton recyclé a augmenté avec l'incorporation du laitier (L), des cendres volantes (CV), de la fumée de silice (FS) et du métakaolin (MK) et avec le même taux de remplacement de laitier, de fumée de silice et de MK, les résistances du béton recyclés avec CV-MK étaient beaucoup plus élevées que celles du béton recyclé avec CV-L ou CV-FS.

Selon Guo et al. [54], L'utilisation de 50 % et 75 % de cendres volantes a diminué la résistance à la compression du BAP à base de GR. Néanmoins, le BAP à base de GR avec 20 % de cendres volantes, 20 % de laitier de haut fourneau, 10 % de fumée de silice ou 30 % de cendres volantes, 30 % de laitier de haut fourneau, 15 % de fumée de silice en combinaison quaternaire a atteint une résistance comparable au BAP normal, ce qui indique que l'utilisation d'une combinaison de cendres volantes, de laitier de haut fourneau et de fumée de silice a compensé les effets négatifs des GR et amélioré les propriétés mécaniques des mélanges de BAP à base de GR .

De plus, en comparant avec le BAP témoin (comme illustré à la figure 3.9), il est observé que la résistance à la compression à 90 jours du mélange 50/50R15L15MK est similaire au BAP témoin (0/0R0L0MK), tandis que le mélange de BAP 100/50R15L15MK présente une résistance légèrement inférieure. On constate que les mélanges 50/50R ont une résistance à la compression plus élevée par rapport aux mélanges 100/50R, mais le mélange 100/50R15L15MK a été sélectionné comme le mélange optimal car il est comparable au mélange témoin. De plus, du point de vue environnemental et économique, il est préférable de produire du béton en utilisant le mélange 100/50R15L15MK, car une grande quantité de déchets de béton peut être utilisée sans affecter considérablement la résistance du béton.

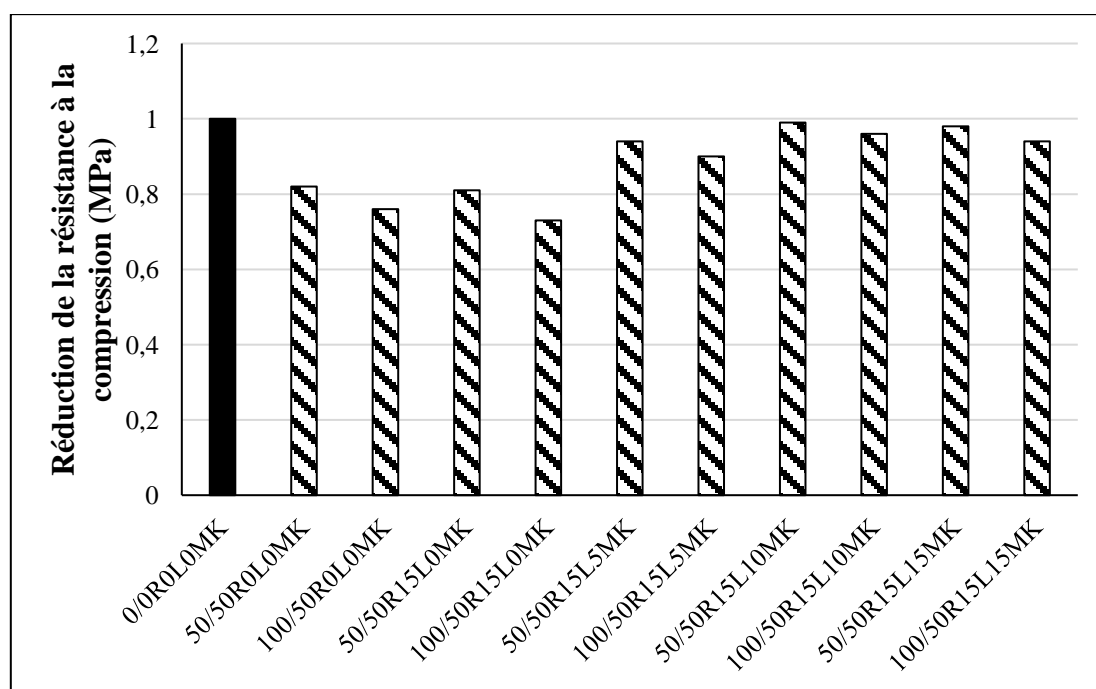


Figure 3.9 : Variation de la résistance à la compression à 90 jours par rapport au mélange de béton témoin.

3.4.2 Vitesse d'auscultation sonique

Les résultats de la vitesse d'auscultation sonique (VAS) à 90 jours de tous les mélanges de BAP obtenus sont illustrés dans la figure 3.10. On observe que les valeurs de VAS diminuent à mesure que le pourcentage de GR augmente. Une réduction de 4% et 5% des valeurs de VAS est observée respectivement pour les mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK. Etant donné que les valeurs de VAS dépendent de la densité, de l'homogénéité, des vides et des fissures dans le béton, la présence de mortier résiduel à la surface du GR augmente le système de pores, diminue la densité et perturbe l'homogénéité, offrant ainsi un trajet plus long pour le passage des ondes ultrasonores, ce qui réduit donc la vitesse d'auscultation sonique. La réduction de VAS avec l'introduction des GR est également observée dans des études antérieures [184].

Sahraei et al. [185] ont montré que les granulats recyclés réduisent la qualité du béton et par conséquent la vitesse d'auscultation sonique a diminué. En comparant la vitesse d'auscultation sonique dans les bétons contenant des granulats naturels et des granulats recyclés, une diminution de la qualité des bétons contenant des GR a été observée. Le remplacement de 50 et 100 % des GN par des GR a réduit la VAS de 4,31 à 4,11 et 4 km/s, respectivement. L'utilisation de GR peut augmenter la porosité du béton et réduire sa qualité en raison de leur structure poreuse. La diminution de la qualité de béton est principalement dû à l'augmentation des vides et des fissures avec le remplacement des granulats recyclés [186].

Haddad et al. [187] ont étudié les relations entre la VAS, le taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés et la porosité à différents états de saturation (100%, 40%, 15%, 2%, 1% et 0%). Ils ont trouvé que la VAS a diminué avec une augmentation de la teneur en GR pour tous les états de saturation. Cette diminution était liée à la porosité, qui augmentait avec la quantité de GR dans le béton. L'augmentation de la quantité de GR utilisée augmentait le nombre de pores à l'intérieur du béton, ce qui affectait la transmission des ondes ultrasonores.

D'après Chakradhara et al. [188], les GR se composent de granulats grossiers naturels résistants adhérant à un mortier de ciment plus poreux, ce qui réduit la densité du GR. De plus, lors du concassage des échantillons de béton normal testés, le GR est soumis à davantage de microfissures et le temps de propagation de la VAS dans un milieu solide dépend de la densité et des propriétés élastiques du matériau. La densité des GR est inférieure à celle des GN, ce qui augmente le temps de propagation des ondes ultrasonores. Par conséquent, la VAS du béton à base de GR est relativement plus faible par rapport à celle des bétons normaux.

Cependant, l'utilisation des ajouts cimentaires offre un chemin bénéfique pour améliorer les valeurs de VAS du BAPR. L'ajout combiné de laitier et du MK est plus efficace pour améliorer la VAS du BAPR que l'ajout de laitier uniquement. Il est observé que les valeurs de VAS des mélanges 100/50R15L0MK, 100/50R15L5MK, 100/50R15L10MK et 100/50R15L15MK sont supérieures à celles du mélange 100/50R0L0MK de 1%, 2%, 4% et 4%, respectivement. Il est évident que le laitier et le MK provoquent une densification de la microstructure et un affinement des pores dans la matrice de ciment et dans le GR. La capacité de remplissage des pores du laitier et du MK et la génération de C-S-H supplémentaires dans les microfissures par réaction pouzzolanique réduisent la porosité et améliorent finalement les valeurs de VAS.

Younis et al. [122] ont constaté que la vitesse d'auscultation sonore des mélanges avec granulats recyclés augmente avec l'utilisation du MK. Cette augmentation dépend de la teneur en MK. Les valeurs de la vitesse d'auscultation sonore passent de 4,01 km/s à 4,08, 4,10, 4,2, 4,31 et 4,35 km/s pour des teneurs en MK de 4, 8, 12, 16 et 20 %, respectivement.

De plus, il est possible de constater que les valeurs mesurées de VAS de tous les mélanges de BAP se situent entre 4676 et 4910 m/s, ce qui est supérieure à 4500 m/s. Par conséquent, tous les mélanges de BAP sont classés d'excellente qualité selon la norme IS 13311 (Partie 1) [189].

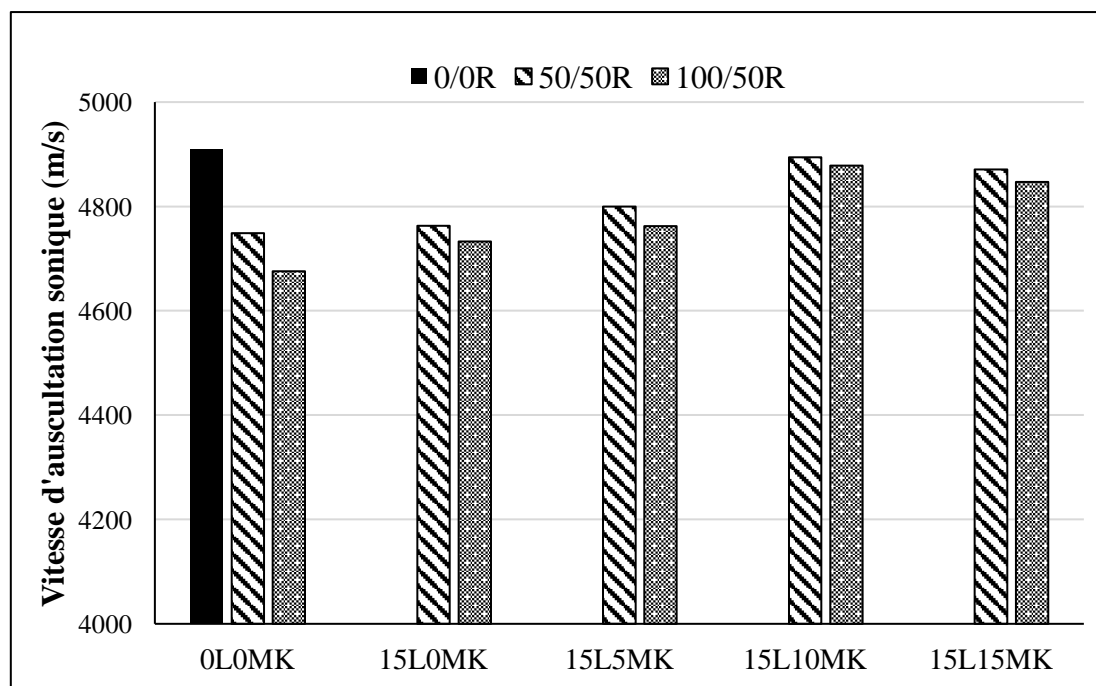


Figure 3.10 : Vitesse d'auscultation sonore des différents BAP.

3.4.3 Absorption d'eau par capillarité

La résistance du béton face à divers environnements agressifs dépend largement de la perméabilité de tout liquide à travers le système de pores. Dans le cas du béton, la vitesse d'absorption de tout liquide est principalement contrôlée par l'absorption capillaires. La méthode d'essai pour déterminer cette vitesse d'absorption d'eau est basée sur le phénomène connu sous le nom de " sorptivité d'eau." Ainsi, la sorptivité est définie comme la mesure de la vitesse d'absorption d'eau du béton sous l'action des pores capillaires. La sorptivité initiale de l'eau est évaluée pendant les 6 premières heures. Les résultats de l'absorption d'eau par capillarité et la sorptivité de différents mélanges de BAP sont illustrés sur les figures 3.11 et 3.12.

Comme le montre la figure 3.11, l'absorption d'eau par capillarité augmente avec l'augmentation de la teneur des granulats recyclés. L'absorption d'eau des mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK est respectivement de 0.751 mm et 2.136 mm, tandis que pour le 0/0R0L0MK, elle est de 0.576 mm. De même, la variation de sorptivité indiqué dans la figure I.12 montre que le mélange de 0/0R0L0MK présente un coefficient de sorptivité de 3.7, qui augmente à 4.8 et 14.6 pour les mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK, respectivement. Comme prévu, le résultat indique une augmentation de la valeur de la sorptivité avec le pourcentage de GR. Le taux d'absorption d'eau dépend de la quantité de petits pores capillaires interconnectés présents dans le béton, ce qui induit une pression capillaire facilitant ainsi l'écoulement de l'eau à travers eux. Il est évident que les GR possède de nombreux petits pores interconnectés sur le mortier attaché et dans la zone de transition. Cette disposition microstructurale des GR leur permet d'absorber davantage d'eau, ce qui entraîne une infiltration d'eau plus importante [190], [191].

Koushkbaghi et al. [87] ont constaté qu'une augmentation de la teneur en granulats recyclés de 0% à 100% a augmenté l'absorption d'eau de 43,8%. L'augmentation de l'absorption est due au mortier ancien perméable et poreux dans les granulats recyclés. La présence de vides dans le mortier ancien des granulats recyclés augmente la connectivité dans la microstructure. De plus, les fissures dans le mortier ancien créent un chemin pour l'écoulement de l'eau dans le béton. Ahmad et al. [88] ont trouvé que l'absorption d'eau a augmenté avec l'incorporation des granulats recyclés, présentant une absorption d'eau minimale avec 0 % de substitution de GR par rapport au mélange témoin. Les GR ont une nature poreuse qui absorbe plus d'eau du béton, ce qui entraîne une plus grande absorption d'eau.

Garcia-Troncoso et al. [191] ont montré que l'absorption d'eau et la perméabilité du BAP avec des granulats recyclés sont plus élevés que celles avec des agrégats naturels, car plus de pores et de fissures sont présents dans les granulats recyclés.

De plus, l'incorporation combinée de laitier et de MK dans le béton diminue l'effet des GR en compensant l'absorption capillaire élevée des mélanges de BAPR. L'utilisation de laitier et de MK ensemble montre une amélioration significative de la résistance à l'absorption d'eau du BAPR par rapport à l'utilisation de laitier seul. Le coefficient d'absorption de 100/50R15L15MK et 100L50R15L0MK a diminué d'environ 61 % et 47 % de plus que celui du BAPR après 6 heures d'observation. De même, l'effet bénéfique du laitier et du MK sur le coefficient de sorptivité des mélanges de BAPR est clairement observé à partir de la figure 3.12. Cela peut être due à la discontinuité des pores capillaires causée par l'effet de remplissage des particules de laitier et de MK. Les particules plus fines de laitier et de MK réduisent la taille des pores capillaires ainsi que l'épaisseur de la zone de transition, ce qui améliore les propriétés de transport du béton. De plus, les produits d'hydratation insolubles formés par la réaction pouzzolanique entraînent un affinement des pores dans le BAPR.

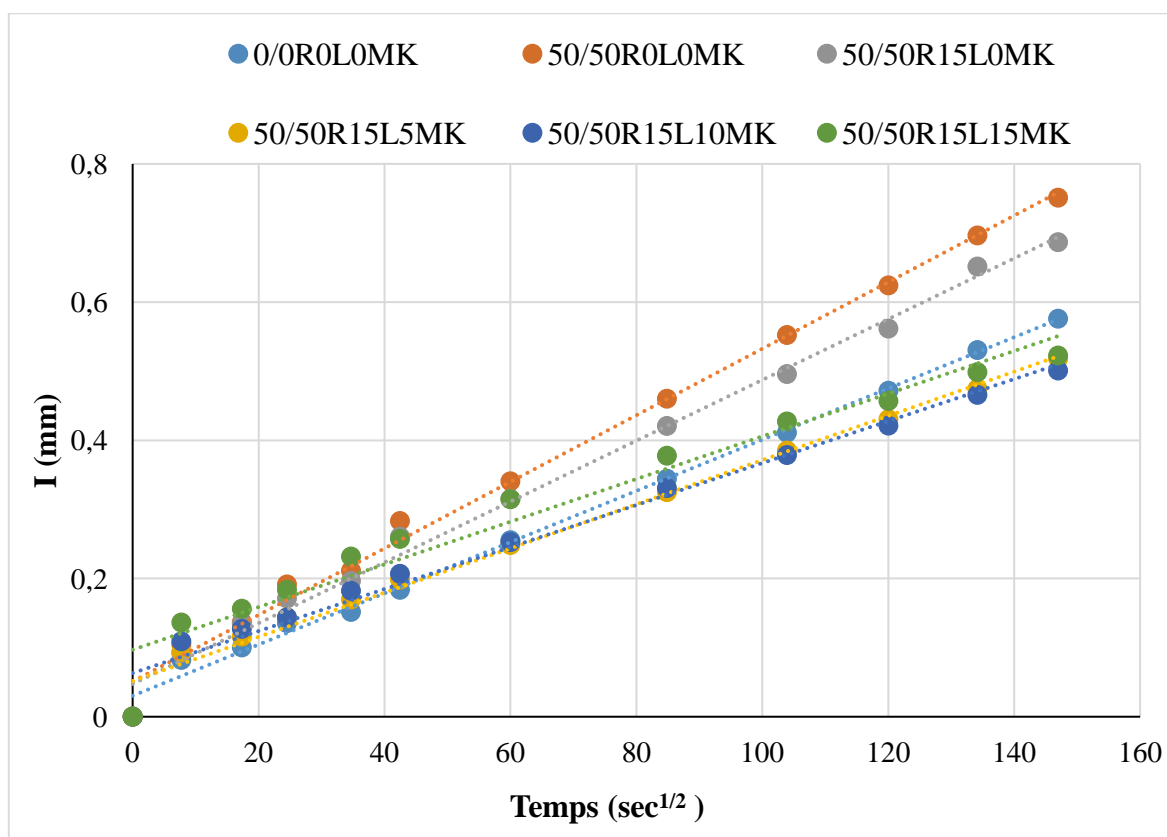
Selon Zaid et al. [192], la diminution de l'absorption d'eau du béton contenant des granulats recyclés avec l'ajout de laitier pourrait être attribuée à la capacité des particules de laitier de petite taille à pénétrer dans les pores des granulats recyclés et à combler les fissures qui existent initialement dans les granulats recyclés.

Des conclusions similaires ont été obtenues par Djelloul et al. [43], la présence du laitier a entraîné une diminution de l'absorption d'eau. La valeur optimale de l'absorption d'eau est obtenue dans des mélanges de BAP avec 15% de laitier. Une réduction de l'absorption d'eau de l'ordre de 20.23% et 13% a été enregistrée pour les mélanges de BAPR100L15 et BAPR100L30, respectivement, par rapport au BAPR100L0.

Majhi and Nayak [134] ont conclu que l'incorporation de 40% et 60% de laitier a significativement réduit les sorptivités des mélanges de béton à granulats recyclés. Cette réduction est due aux particules très fines de laitier qui rendent la microstructure de béton à granulats recyclés plus dense et offrent une meilleure homogénéité, ce qui entraîne une réduction de la continuité des pores dans le béton à granulats recyclés.

Sara et al. [193] ont constaté que l'utilisation de sable recyclé augmente l'absorption capillaire du mortier. L'incorporation de 20% de laitier a réduit l'absorption capillaire de 20%, 14%, 14%, 12% et 9% pour des taux de substitution de sable recyclé de 0, 25, 50, 75 et 100% respectivement. Pour une teneur en laitier de 40%, les valeurs d'absorption capillaire n'ont pas beaucoup varié par rapport à 20% de laitier.

Qureshi et al. [123] ont démontré que les ajouts minéraux ont un impact positif sur la résistance à l'absorption d'eau du béton à base de granulats recyclés. La résistance à l'absorption d'eau du béton recyclé s'améliore de 21 %, 13 %, 15 % et 17 % grâce à l'incorporation de 10 % de fumée de silice, 30 % de laitier, 20 % de cendres volantes et 15 % de cendres de balle de riz, respectivement. Cette amélioration de la résistance à la perméabilité du béton recyclé due à l'ajout des additions minérales peut être attribuée à la formation de C-S-H supplémentaires, ce qui réduit la taille et la connectivité des pores. En plus de la réaction pouzzolanique, l'effet de remplissage des additions minérales peut également réduire la taille des pores, interrompant les connexions entre les pores.



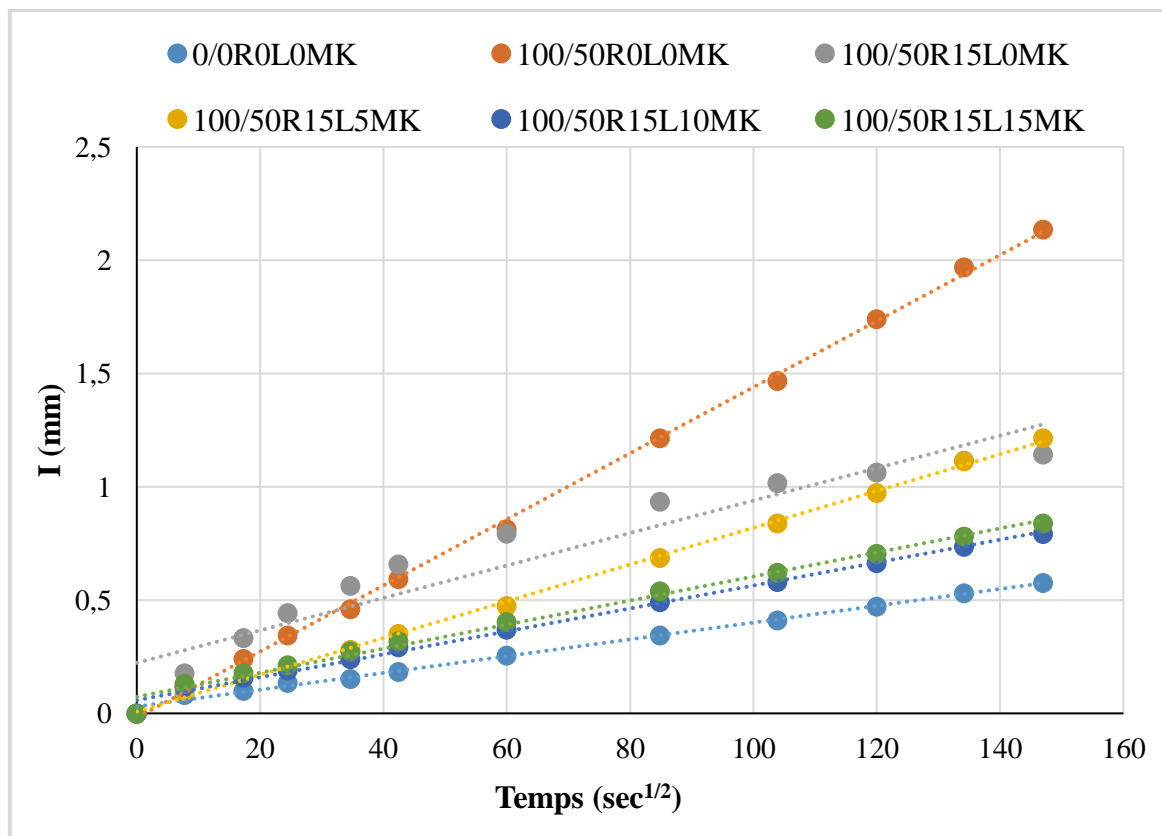


Figure 3.11 : Effet combiné du laitier et du MK sur l'absorption d'eau par capillarité du BAPR.

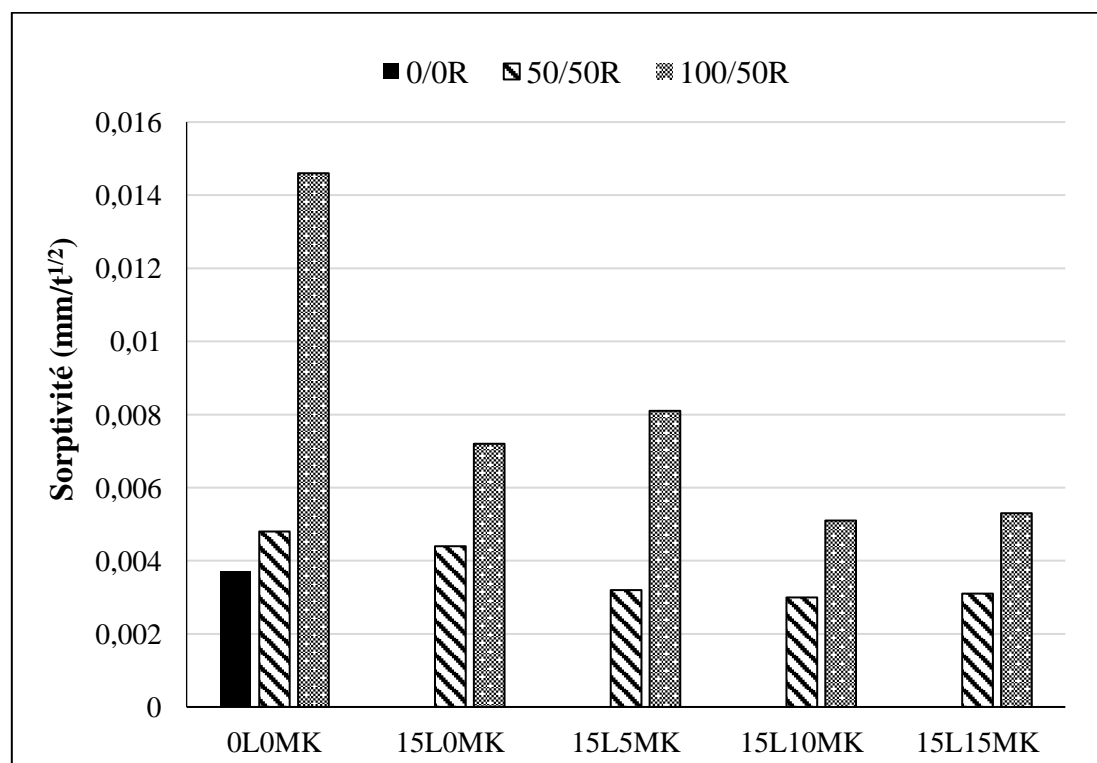


Figure 3.12 : Effet combiné du laitier et du MK sur la sportivité du BAPR.

3.4.4 Porosité

L'influence combiné du laitier et du MK sur le volume des vides de tous les mélanges de BAP à base de GR est déterminée à partir des résultats des essais de porosité et présenté dans la figure 3.13. Il est déduit de la figure que les valeurs de porosité des mélanges de BAP à base de GR sont nettement plus élevées que celles du BAP à base de GN. Pour le mélange 0/0R0L0MK, la porosité est de 9.27%, ce qui augmente à 13.41% et 15.87% pour les mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK, respectivement. Le volume plus élevé de vides pour les mélanges de BAPR est la conséquence d'un mortier attaché hautement poreux à la surface du GR. Cette tendance d'augmentation du volume des vides avec le pourcentage de GR est également observée dans des études antérieures [194].

Anastasio et al. [195] ont étudié l'effet des granulats fins et grossiers provenant du recyclage des déchets de béton d'une centrale à béton, donc sans aucune impureté ni dégradation chimique. Les résultats montrent que la porosité augmente considérablement lorsque les GR sont utilisés. L'observation microscopique a révélé que des détachements des granulats étaient observés tandis que des pores sphériques de 600 à 700 μm de diamètre étaient présents.

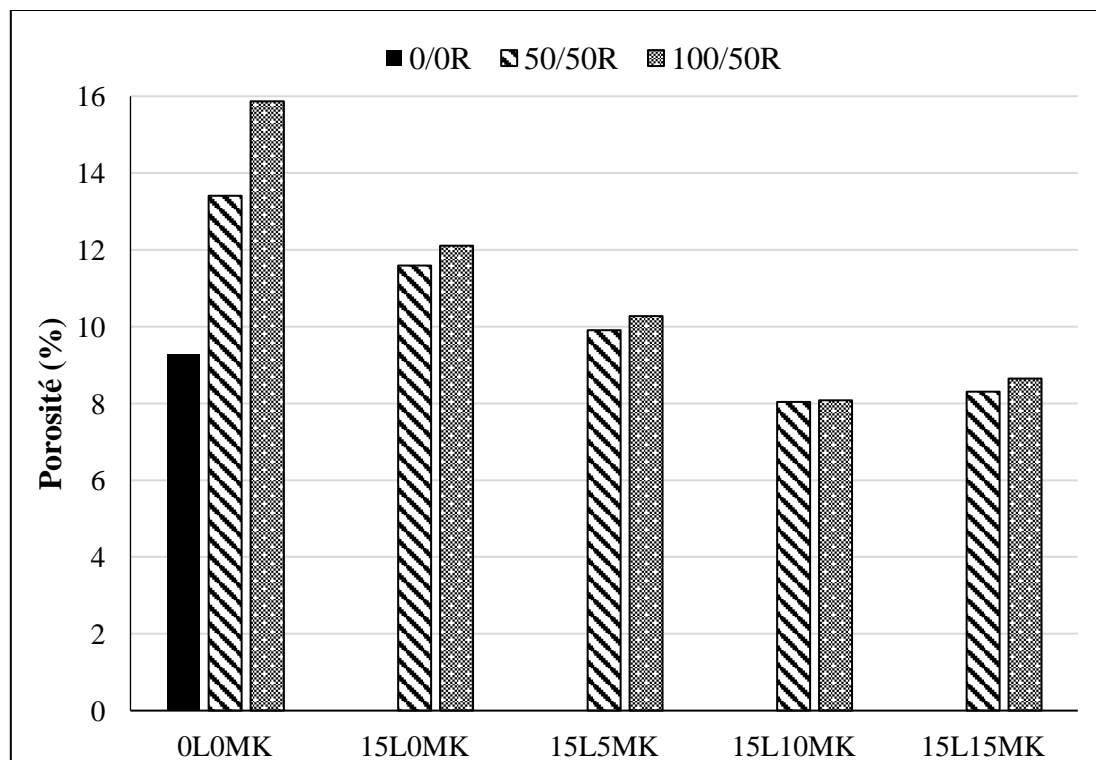


Figure 3.13 : Effet combiné du laitier et du MK sur la porosité du BAPR.

Lorsqu'une partie du ciment est substituée par du laitier, un effet bénéfique sur la porosité du BAPR est observé dans les résultats. Les valeurs de la porosité des mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK diminuent de 13.41% à 11.59% et de 15.87% à 12.11% avec l'utilisation de 15% de laitier. Les fines particules de laitier comblent les pores du mortier attaché des granulats recyclés et la zone de transition interfaciale du mélange de BAPR.

Sara et al. [193] ont trouvé que l'ajout du laitier dans le mortier a effet considérable pour corriger l'augmentation de la porosité causée par l'utilisation du sable recyclé. 20 % de laitier couvre l'augmentation de la porosité causée par l'utilisation de 75 % de sable recyclé, et 40 % de laitier peuvent compenser la porosité produite par l'utilisation de 100 % de sable recyclé. Le laitier incorporé dans le mortier modifie le squelette granulaire du mélange en compensant le déficit en particules fines. La matrice cimentaire devient plus dense en comblant une partie des vides. En plus de cet effet de remplissage, la réactivité à long terme du laitier produit de nouveaux hydrates qui participeront à une densification supplémentaire de la matrice et à une réduction de la porosité.

L'utilisation combinée de laitier et de MK dans le BAP a un grand effet sur la correction de l'augmentation de la porosité causée par l'utilisation des granulats recyclés. L'utilisation combinée de laitier et de MK pour remplacer le ciment était plus efficace pour réduire la porosité de BAPR que l'utilisation uniquement de laitier. Par exemple, La porosité de 100/50R15L15MK a diminué d'environ 46% de plus que celle du 100/50R0L0MK et a diminué d'environ 29% de plus que celle du 100/50R15L0MK. Cette réduction de la porosité est due au remplissage des vides dans le béton par les particules fines de laitier et de MK, ainsi que par les produits d'hydratation résultant de la réaction pouzzolanique.

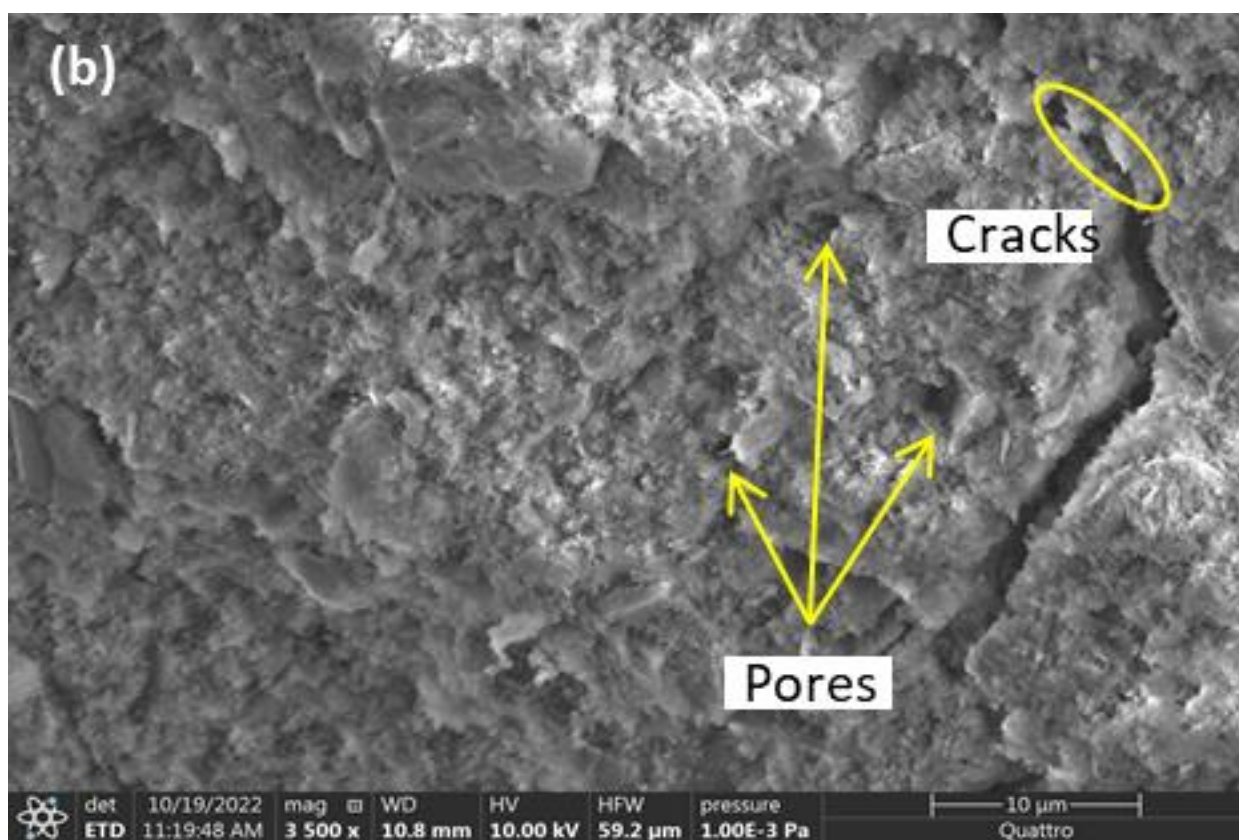
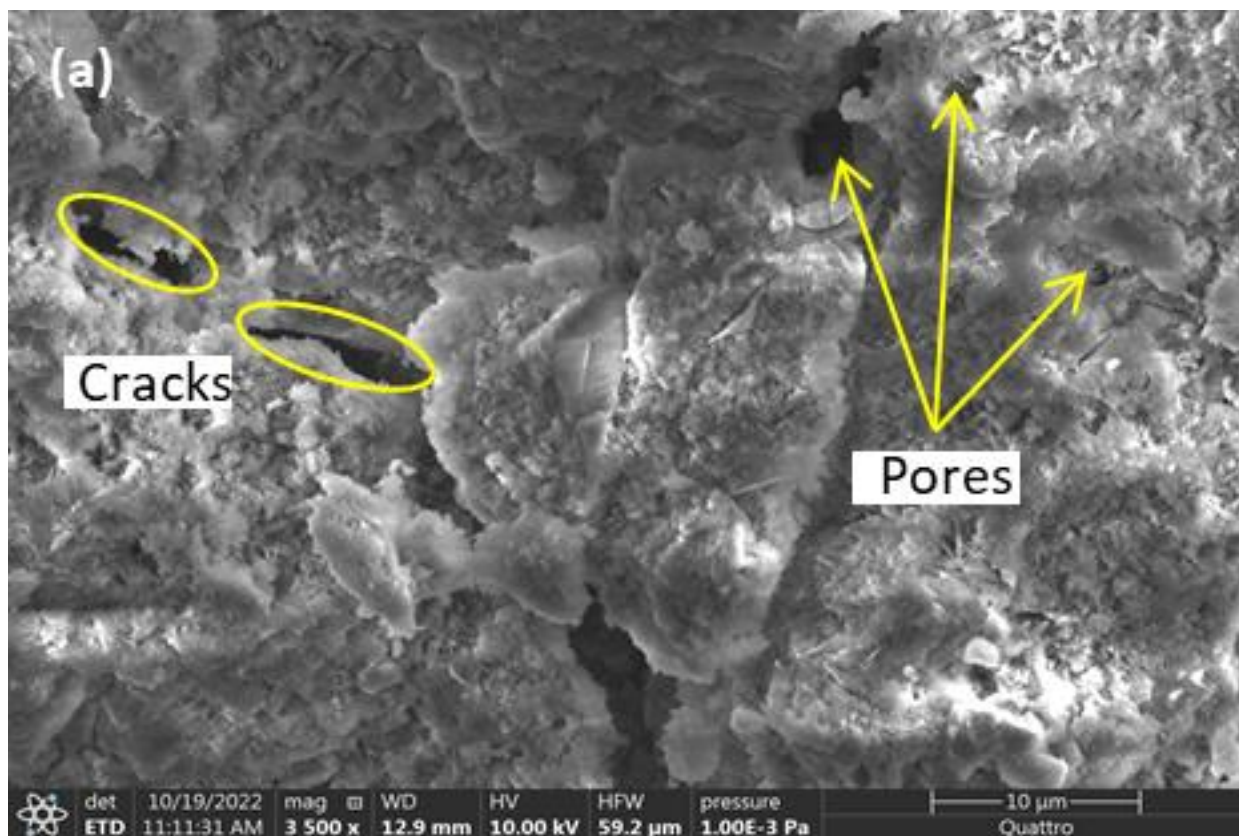
La faible porosité était enregistrée pour les mélanges contenant 15 % de laitier et 10% de MK. Cet abaissement de la porosité est également dû à la finesse du laitier et du MK, qu'ils occupent les espaces entre les grains les plus gros. C'est pourquoi, la porosité totale des mélanges a diminué progressivement tandis que la compacité augmentait, ce qui générerait des volumes de vides moindres. Quand les pores étaient complètement remplis, les grains fins ont commencé à prendre la place des particules les plus grosses, ce qui a conduit à une réduction de la compacité lorsque des quantités élevées ont été utilisées.

Selon Zhan et al. [196], les pores dans le béton peuvent être divisés en quatre types en fonction de leur taille : les pores inoffensifs (≤ 20 nm), les pores moins nuisibles (20-50 nm), les pores nuisibles (50-200 nm) et les pores très nuisibles (≥ 200 nm). L'incorporation combinée de poudre de laitier (PL) et de poudre de verre (PV) réduit la porosité totale du béton. Le mélange contenant 10 % de PV et 20 % de PL présente la porosité totale la plus faible. Comparé au béton recyclé témoin, les ajouts combinés de différentes teneurs en PV et de 20 % de PL réduisent remarquablement la porosité (≥ 100 nm) dans une certaine mesure. De plus, la porosité (≥ 100 nm) du béton recyclé contenant 20 % de PV et 30 % de PL diminue de 24,7 %.

Selon Sellevold [197], la réduction significative de la taille des pores dans les bétons contenant de la fumée de silice est attribuable à deux caractéristiques de cet ajout minéral. Premièrement, sa haute réactivité pouzzolanique permet le développement rapide d'un réseau de pores discontinu. Deuxièmement, les particules de silice agissent comme des sites de nucléation pour le C-S-H, permettant ainsi une meilleure distribution spatiale des hydrates.

Benachour et al. [198] ont remarqué que la taille moyenne des pores diminue de manière significative avec une teneur en MK allant de 15% à 45%, malgré qu'une augmentation de la porosité totale a été enregistrée avec des quantités élevées. L'incorporation des quantités de MK entraîne la formation d'une population de pore de taille particulièrement fine. La taille des molécules des ions chlorure est de (36.6 nm), est plus grande que la taille des molécules d'azote (N₂) qui est de (0.364 nm) [199], cela permet au gaz de traverser facilement les structures des pores, tandis que les ions chlorure ne peuvent pas les traverser aussi facilement, notamment en raison du phénomène d'absorption et les réactions chimiques [200].

Figure 3.14 montre les images de microscopie électronique à balayage (MEB) des mélanges 100/50R0L0MK, 100/50R15L5MK, 100/50R15L10MK et 100/50R15L15MK. Comme on peut le voir sur la figure 3.14 (a), plusieurs zones de pores et de fissures ont été observées dans l'image MEB du mélange 100/50R0L0MK, ce qui affecte négativement la cohésion entre la pâte et les agrégats. Cela peut expliquer la réduction des propriétés de résistance et de durabilité. Les mélanges préparés avec GGBFS et MK ont montré une microstructure uniforme et plus compacte avec une réduction du nombre de pores, comme le montrent les figures 3.14 (b), (c) et (d) pour les mélanges, 100/50R15L5MK, R15L10MK et R15L15MK respectivement. Cela est dû à l'effet de remplissage et à la réaction pouzzolanique hautement efficace de MK. En augmentant la teneur en MK dans le mélange, un degré plus élevé de raffinement des pores et une microstructure plus homogène ont été obtenus. L'utilisation combinée de 15 % de GGBFS et de 15 % de MK pourrait remplir les pores et combler les microfissures.



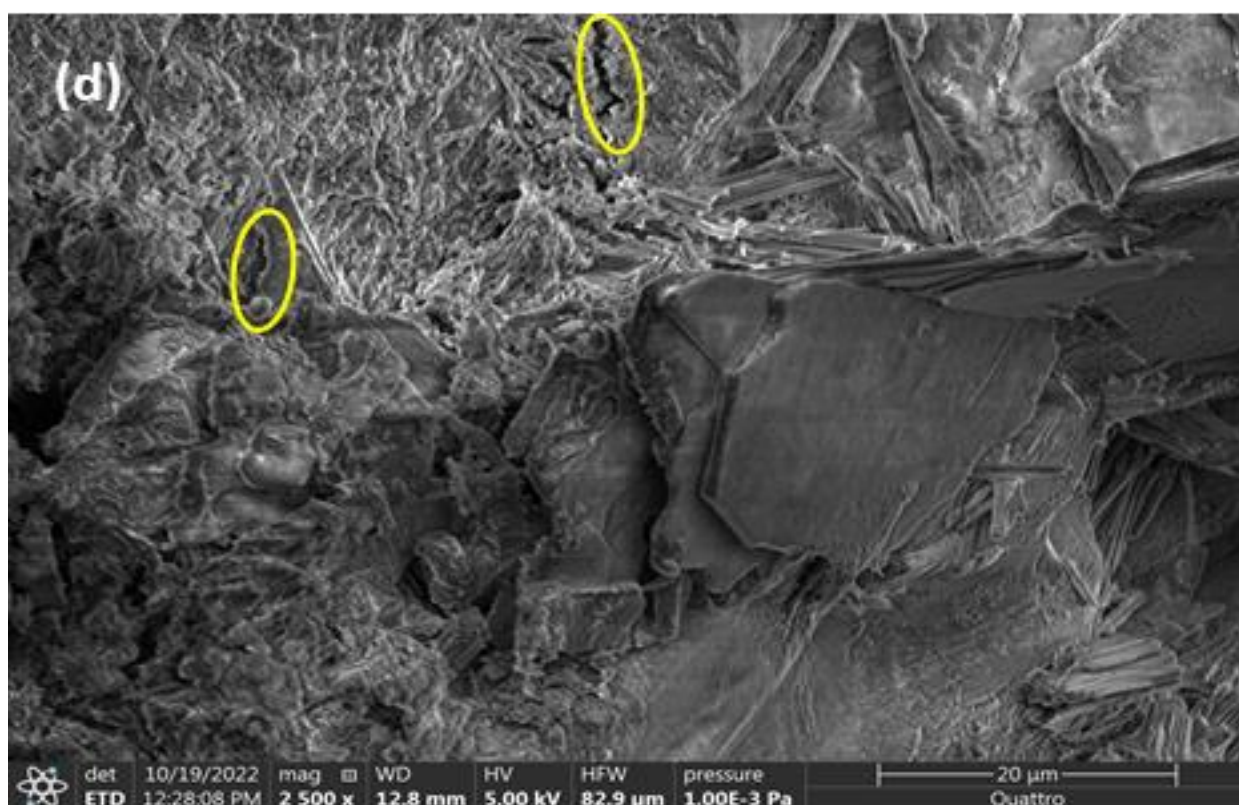
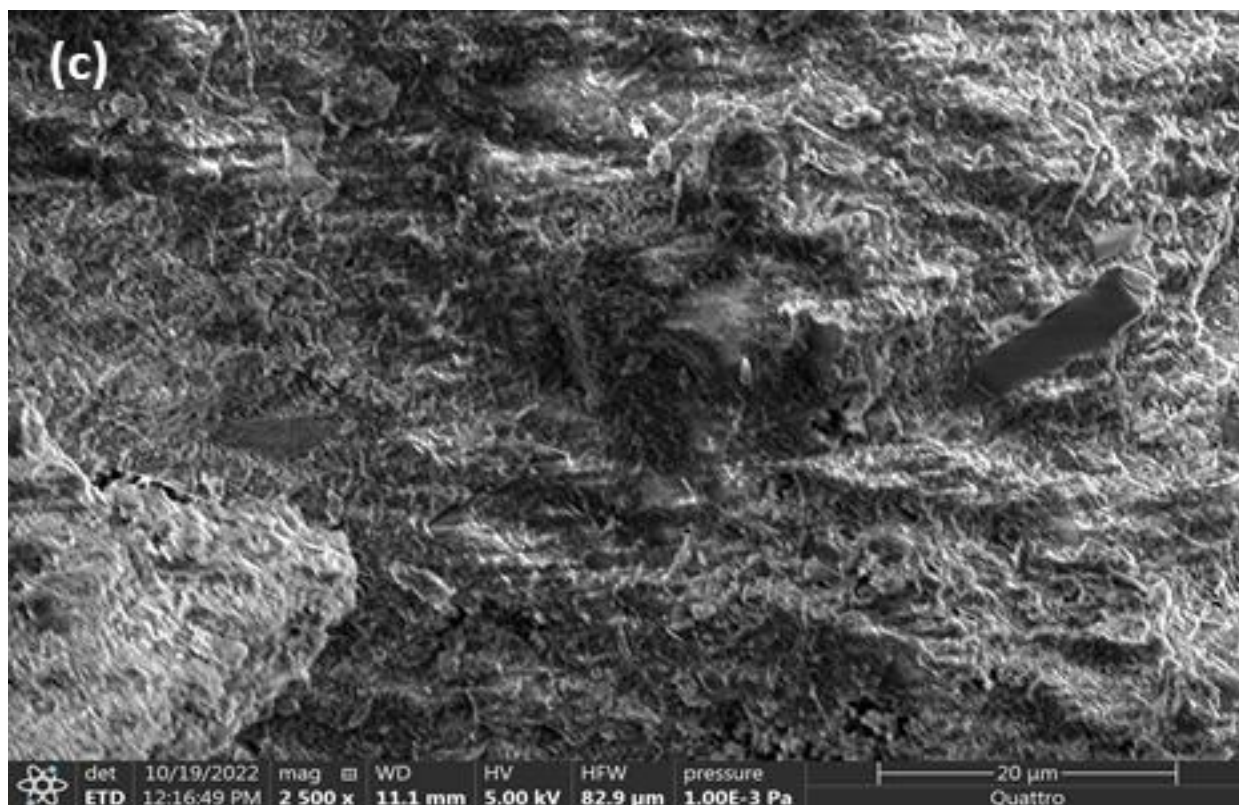


Figure 3.14 : Images au microscope électronique à balayage des mélanges : (a) 100/50R0L0MK, (b) 100/50R15L5MK, (c) 100/50R15L10MK et (d) 100/50R15L15MK.

3.4.5 Perméabilité à l'eau

Les résultats de la perméabilité à l'eau des BAP sont représentés dans la figure 3.15. Les résultats obtenus ont clairement montré que la profondeur de pénétration de l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en GR. La profondeur de pénétration du béton 0/0R0L0MK est de 47.5, ce qui augmente à 48.3 et 58.3 pour le béton 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK, respectivement. Cela est principalement dû à l'augmentation de la perméabilité du béton, résultant de la présence d'ancien mortier attaché aux granulats recyclés.

Behera and Rahman [201] ont trouvé que le mélange de contrôle a montré une profondeur de pénétration de 12,63mm. Cependant, lorsque les granulats naturels ont été remplacés à 100 % par des granulats recyclés, la résistance à la pénétration de l'eau a diminué de manière plus importante, avec une augmentation de la profondeur de pénétration jusqu'à 29,53 mm. Le remplacement par des GR a doublé la profondeur de pénétration de l'eau par rapport au béton de référence en raison du caractère poreux des GR et de leur tendance à absorber davantage d'eau près de la zone de transition entre les granulats recyclés et la matrice cimentaire.

Selon Bao et al. [202], l'utilisation des granulats recyclés dans le béton peut modifier la perméabilité du béton en raison de l'absorption d'eau élevée des GR, basée sur leur porosité de mortier plus élevée et la porosité de la zone de transition entre le GR et la matrice cimentaire. La durabilité du béton à base de granulats recyclés dépend de deux facteurs principaux : (1) l'absorption d'eau et la perméabilité des GR et (2) la taille maximale des GR.

Comme indiqué dans la figure 3.15 l'incorporation du laitier dans les mélanges de BAPR diminue les valeurs de profondeur de pénétration. Le taux de diminution est d'environ 11% pour le 50/50R15L0MK et de 14% pour le 100/50R15L0MK. Cette réduction de la profondeur de pénétration avec l'incorporation du laitier est due à l'utilisation de fines particules de laitier qui comblent les pores du mortier attaché, comme cela a été discuté précédemment.

Prajapati and Jamani [203] ont évalué l'effet de l'ajout de 20 %, 30 % et 40 % de substitution par du laitier de haut-fourneau dans le béton contenant 20 %, 35 % et 50 % de granulats recyclés. Comparé au béton de référence, la pénétration d'eau dans le béton contenant 20 % et 35 % de GR et 30 % de laitier a montré des profondeurs de pénétration plus faibles, qui ont été encore réduites avec l'ajout de 40 % de laitier de haut-fourneau. Cependant, le béton contenant 50 % de GR a montré des profondeurs de pénétration plus élevées avec l'ajout de 30 % et 40 % de laitier de haut-fourneau.

Dans l'étude de Djelloul et al. [43], on constate que la présence du laitier a engendré une amélioration remarquable de la résistance à la pénétration de l'eau du BAP à base de granulats recyclés. En comparant avec le béton de référence (BAPR0L0), la résistance à la pénétration de l'eau du béton avec 15% de laitier et 25-75% GR a diminué de 38%, 19% et 13% respectivement. Cependant le béton contenant 100% de GR et 15 % de laitier a montré une profondeur de pénétration comparable à celle du béton de référence.

L'incorporation simultanée du laitier et du MK pour remplacer partiellement le ciment a considérablement amélioré la résistance à la pénétration de l'eau du béton à base de granulats recyclés par rapport à l'utilisation individuelle du laitier. Par exemple, la résistance à la pénétration de l'eau de 100/50R15L15MK a augmenté de 28% de plus que celle de 100/50R15L0MK et a augmenté de 38% de plus que celle de 100/50R0L0MK. La résistance optimale à la pénétration de l'eau est développée pour un taux de remplacement de 15 % de laitier et 15% de MK, quelle que soit la proportion de GR. L'effet favorable du laitier et du MK sur la profondeur de pénétration est principalement dû au fait que l'utilisation du laitier et du MK provoque un affinement des pores par leur mécanisme pouzzolanique et de remplissage, ce qui inhibe l'entrée de l'eau dans le béton.

Kubissa et al. [204] ont évalué la pénétration de l'eau dans le béton à base de GR contenant 10 % de métakaolin et 36 % de cendres volantes. La pénétration de l'eau a diminué de 21,4 % avec l'ajout de 10 % de métakaolin par rapport à l'absence de métakaolin. Kapoor et al.[35] ont observé une augmentation de la pénétration de l'eau avec l'augmentation de la teneur en GR dans le béton autoplaçant sans l'ajout de MK, par exemple, à une teneur en GR de 50 %, la pénétration de l'eau était de 20 % plus élevée que celle des mélanges de référence à l'âge de durcissement de 120 jours, mais avec l'ajout de 10 % de métakaolin, la pénétration de l'eau a diminué de 13,3 %, même en dessous des mélanges de référence.

Comparant avec le béton témoin (0/0R0L0MK), il est observé que l'utilisation de laitier et de MK à des niveaux de remplacement de 15/5%, 15/10% et 15/15% dans les mélanges de 50/50R (50/50R15L5MK, 50/50R15L10MK et 50/50R15L15MK) montre une réduction de la profondeur de pénétration de 23%, 31% et 37%, respectivement. De même, pour les mélanges de béton incorporant 100/50 % de GR et la même quantité de laitier et de MK (100/50R15L5MK, 100/50R15L10MK et 100/50R15L15MK), la réduction correspondante des profondeurs de pénétration est observée à 12%, 23% et 24%, respectivement (Figure 3.16).

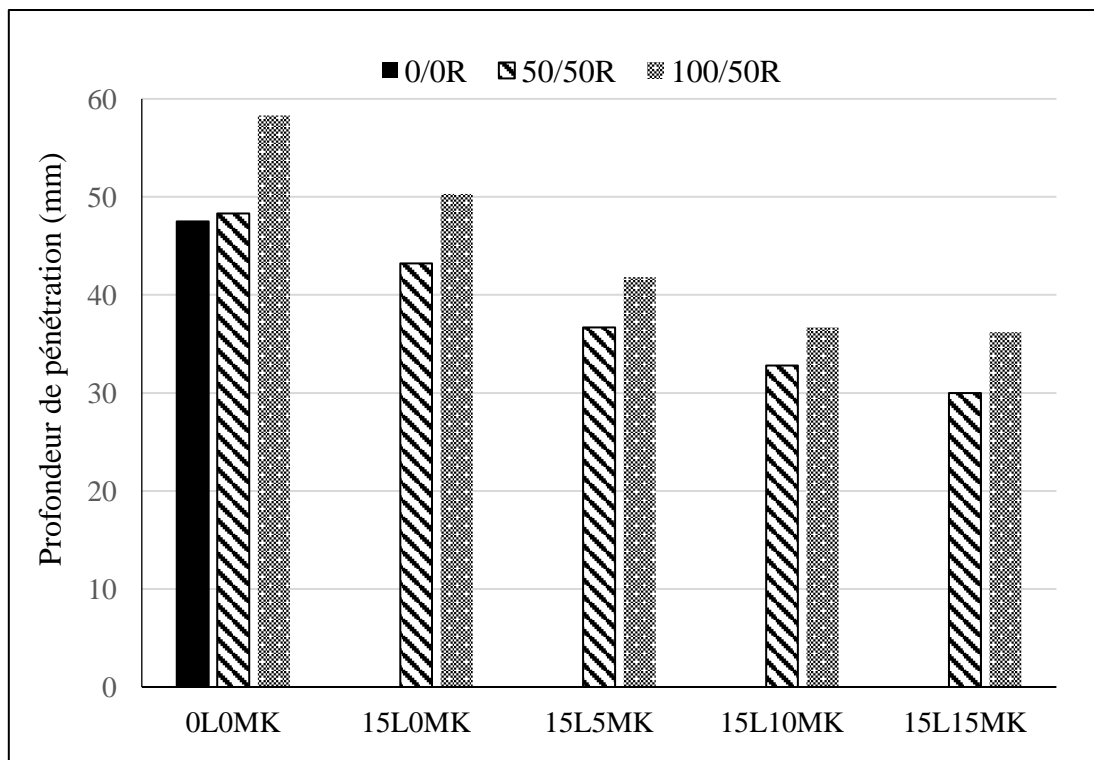


Figure 3.15 : Effet combiné du laitier et du MK sur la profondeur de pénétration d'eau du BAPR.

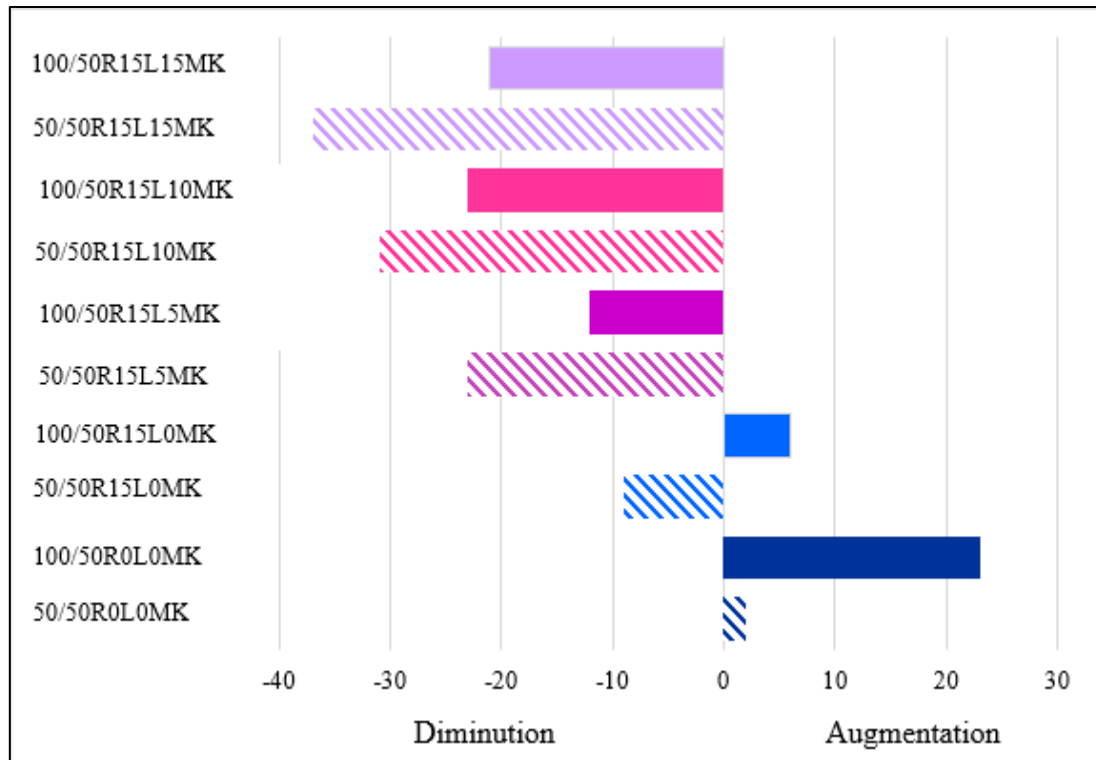


Figure 3.16 : Variation de la profondeur de pénétration par rapport au mélange de béton témoin (0/0R0L0MK).

3.4.6 Pénétration aux ions chlorures

La résistance à la pénétration de chlorure des mélanges de BAP est évaluée en termes de charge électrique totale (en Coulombs) passée à travers les éprouvettes cylindriques, et les résultats sont présentés dans la figure 3.17.

La figure montre que le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés entraîne une augmentation considérable de la charge totale passée. Le mélange 0/0R0L0MK présente une charge totale passée de 2531 Coulombs, qui augmente à 3175 Coulombs et 3837 coulombs pour les mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK, respectivement. Cela représente une augmentation 25% et 52% pour les mélanges de BAP 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK, respectivement. Selon la norme ASTM C1202 [154], ces niveaux de charge correspondent à une pénétration modérée. Cela peut être dû au fait que le BAPR est relativement plus perméable que le BAPN en raison de la présence de pores dans le mortier résiduel entourant le GR. Ces pores permettent la diffusion progressive des ions chlorures dans le BAP, ce qui diminue finalement la résistance à la pénétration du chlorure. Des résultats similaires à la présente étude ont également été rapportés dans des études précédentes [157], [205], [206].

Wang et al. [207] ont rapporté que la diminution de la résistance à la pénétration du chlorure s'explique par le fait que la surface des granulats recyclés retient une grande quantité de mortier de ciment, caractérisé par une forte absorption d'eau et une liaison faible avec le granulat, ce qui réduit la résistance du béton à base de granulats recyclés à la pénétration des ions chlorure.

Kurda et al. [208] ont indiqué que la résistance à la pénétration des chlorures des mélanges de béton diminuait avec l'augmentation de la teneur en GR. Amorim et al. [209] ont également rapporté que la résistance à la pénétration des chlorures du béton à base de GR était inférieure à celle du béton ordinaire. Cela peut être attribué aux microfissures produites par le GR lors de la production par concassage, ce qui entraîne la forte porosité du GR, conduisant ainsi à une structure interne insuffisamment dense du béton recyclé, réduisant ainsi la résistance à la pénétration des chlorures du béton recyclé.

Bao et al. [210] ont constaté que le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés a entraîné une augmentation significative de la teneur en chlorures libres en raison de la présence du vieux mortier attaché aux granulats recyclés. A titre exemple, la teneur en chlorures libres au du béton avec 30 %, 50 % et 100 % de GR était respectivement 26,27 %, 42,11 % et 67,64 % plus élevée que celle du béton témoin.

Le remplacement partiel du ciment par le laitier a amélioré la résistance à la pénétration du chlorure du BAP à base de granulats recyclés. La charge totale passée des mélanges 50/50R0L0MK et 100/50R0L0MK a diminué de 3175 coulombs à 2908 coulombs et de 3837 coulombs à 3024 coulombs avec l'utilisation de 15% de laitier. Les microfissures présentes dans le béton recyclé et les pores du granulat recyclé sont comblés par le laitier, dont la taille des particules est inférieure à celle du ciment.

L'influence de l'incorporation de laitier sur la résistance à la pénétration du chlorure du béton recyclé a été étudiée par Ann et al et Berndt [211], [212]. Ils ont constaté que la substitution de 50% à 70% de laitier de haut-fourneau (en poids) dans le ciment peut réduire la pénétration des ions chlorure de 18% à 49,8%. Saravanakumar and Dhinakaran [213] ont observé une réduction de 12% de la pénétration des ions chlorure dans le béton contenant de 25% à 100% des granulats recyclés et 50% de laitier.

Comme pour d'autres propriétés liées à la durabilité, l'utilisation combinée de laitier et de MK dans le BAP recyclé s'avère certainement bénéfique pour améliorer la résistance à la pénétration du chlorure du BAP recyclé. L'effet de l'incorporation simultanée du laitier et du MK pour remplacer partiellement le ciment sur l'amélioration de la résistance à la pénétration des chlorures du BAP à base de GR était plus significatif que celui du remplacement partiel du ciment par le laitier seulement. A titre exemple, la résistance à la pénétration du chlorure de 100/50R15L15MK a augmenté de 42% de plus que celle de 100/50R15L0MK. On constate que la résistance à la pénétration du chlorure des mélanges 50/50R15L0MK, 50/50R15L5MK, 50/50R15L10MK et 50/50R15L15MK a augmenté de 8%, 20%, 38% et 48% de plus que celle de 50/50R0L0MK. De même, pour les mélanges de BAP 100/50R et la même quantité de laitier et de MK (100/50R15L0MK, 100/50R15L5MK, 100/50R15L10MK et 100/50R15L15MK), l'augmentation correspondante de la résistance à la pénétration du chlorure est de 21 %, 29 %, 45% et 54% respectivement. Cette amélioration peut être attribuée à trois raisons principales : (1) l'augmentation de la teneur en alumine due à l'inclusion de laitier et de MK produit plus de C3A, qui lie efficacement les ions chlorures, (2) la réaction pouzzolanique, et (3) l'effet de remplissage de MK et de laitier qui peut combler les pores et compacter la microstructure [123].

Chen et al. [214] ont étudié l'effet synergique des cendres volantes et du laitier granulé de haut-fourneau sur la résistance à la pénétration des chlorures du béton à base de GR. Les cendres volantes et le laitier ont été incorporés séparément ou simultanément dans le béton recyclé contenant 0 %, 35 % et 50 % de GR pour remplacer partiellement le ciment. Les résultats ont montré qu'un rapport de remplacement optimal pouvait exister pour améliorer les propriétés du béton recyclé en remplaçant partiellement le ciment par les cendres volantes et le laitier. Le rapport de remplacement optimal pour l'incorporation simultanée des cendres volante et du laitier pour améliorer la résistance à la pénétration des chlorures du béton recyclé était respectivement de 10 % et 20 %. De plus, les effets synergiques de l'incorporation simultanée des cendres volantes et du laitier étaient plus efficaces que les effets de l'incorporation séparée des cendres volantes ou du laitier sur l'amélioration de la résistance à la pénétration des chlorures du béton recyclé.

Singh et al. [215] ont observé que l'incorporation de 12 % de MK a montré d'excellentes performances et a augmenté la résistance à la pénétration du chlorure de 68 % à 28 jours, de 71% à 90 jours et de 58% à 365 jours. Kavitha et al. [216] ont observé que l'ajout de 10 % de méta-kaolin (en poids) du ciment réduisait la perméabilité dans le béton autoplaçant et montrait une résistance efficace à la diffusion du chlorure et à l'absorption d'eau. Ilić et al.[217] ont suggéré qu'avec l'ajout de 20 % de méta-kaolin, une diminution de presque 90 % de la pénétration du chlorure était obtenue dans le béton.

D'après la figure 3.18, on peut constater qu'entre les huit mélanges de BAP contenant différentes fractions de GR, de laitier et de MK, les mélange de BAP 50/50R15L0MK et 100/50R15L0MK montrent une résistance à la pénétration du chlorure inférieure à celle du BAP témoin (0/0R0L0MK). Cependant, les mélanges 50/50R15L10MK, 50/50R15L15MK, 100/50R15L10MK et 100/50R15L15MK présentent une résistance à la pénétration du chlorure supérieure à celle du béton témoin. Les mélange 50/50R15L5MK et 100/50R15L5MK affichent une valeur comparable à celle du béton témoin.

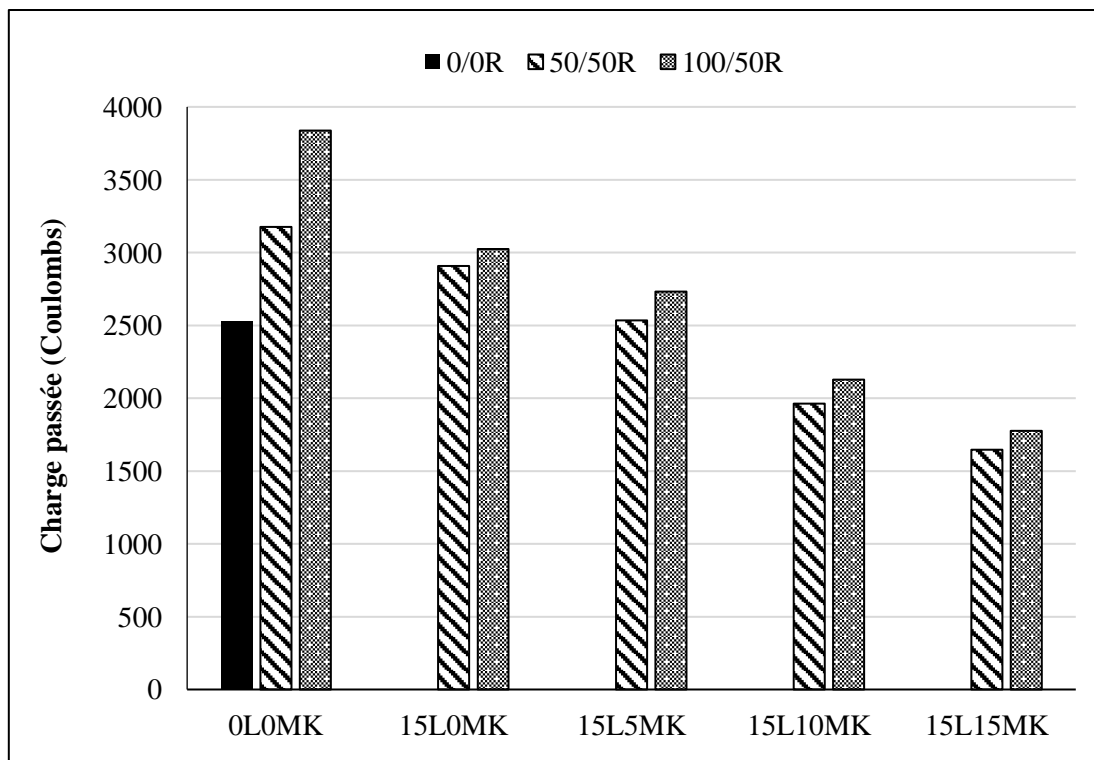


Figure 3.17 : Effet combiné du laitier et du MK sur la résistance à la pénétration du chlorure du BAPR.

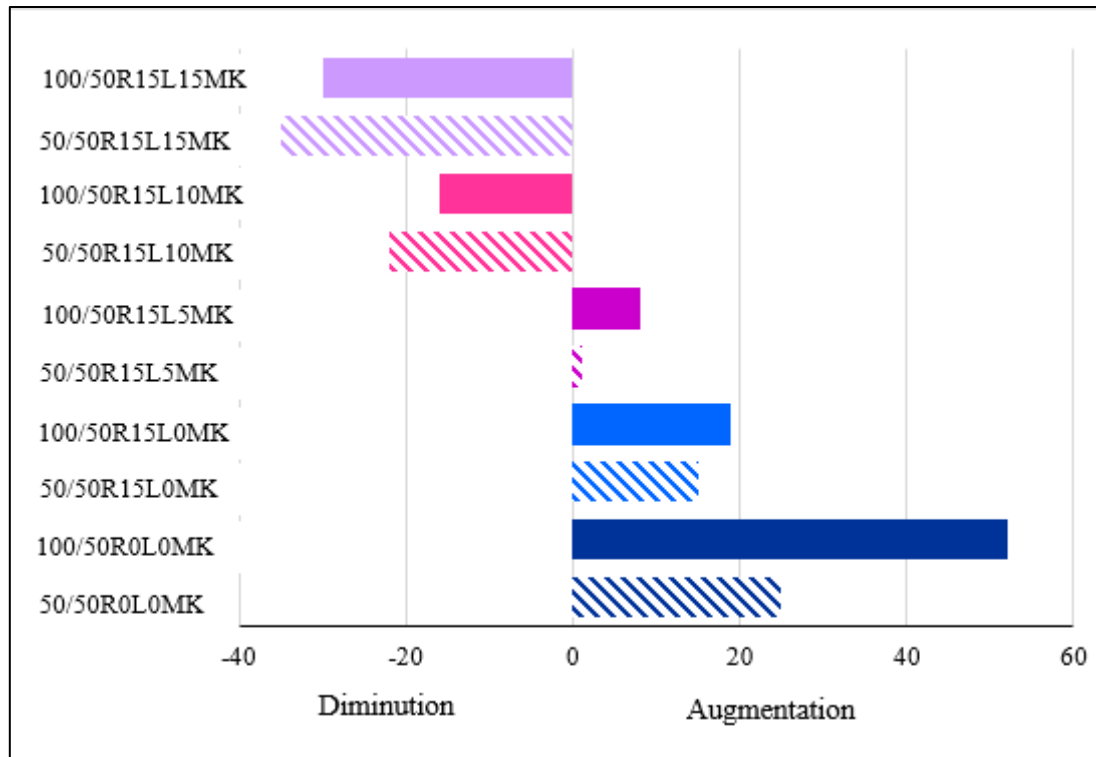


Figure 3.18 : Variation de la charge totale passée par rapport au mélange de béton témoin (0/0R0L0MK).

3.5 Corrélations entre les propriétés du béton autoplaçant

Plusieurs chercheurs sont en accord sur l'existence des relations ou modèles mathématiques entre les caractéristiques des bétons à l'état durci. Les résultats du BAP à l'état durci sont corrélés entre eux afin de mieux analyser le comportement du matériau, et aussi pour analyser les liens entre les différentes caractéristiques de ce matériau.

3.5.1 Corrélation entre la résistance à la compression et VAS

La VAS permet d'évaluer non seulement la qualité du béton (l'homogénéité, la présence des fissures et vides), mais de déterminer aussi la résistance à la compression d'une structure existante sans avoir recours à des essais qui peuvent affaiblir l'élément en béton tel que le carottage.

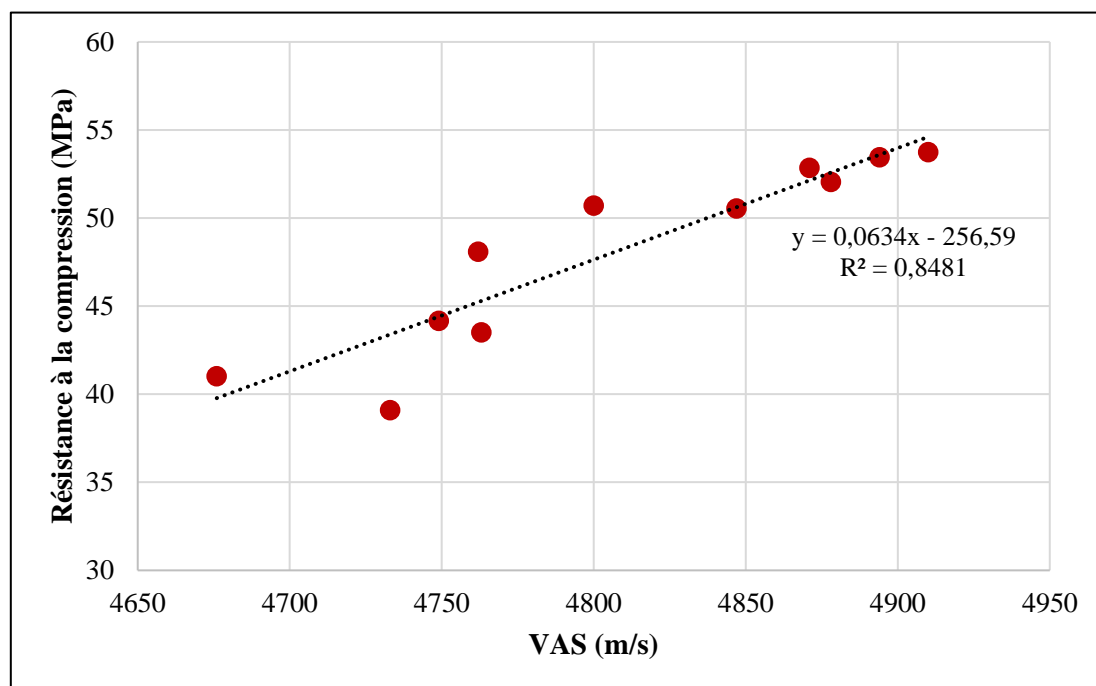


Figure 3.19 : Corrélation établie entre la résistance à la compression et VAS.

Les valeurs de VAS de toutes les mélanges de béton ont été corrélées avec les résultats de résistance à la compression, et il a été observé qu'une relation linéaire correspond le mieux aux données expérimentales. La relation est affichée dans la figure 3.19, avec la ligne de tendance, ayant un facteur de corrélation de 0,85, ce qui indique une acceptable corrélation entre les valeurs de VAS et la résistance à la compression à 90 jours de tous les mélanges de béton.

3.5.2 Corrélation entre résistance à la compression et la porosité

La variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité accessible à l'eau à 90 jours est illustrée sur la figure 3.20. Les résultats montrent une corrélation acceptable entre les deux paramètres. Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0.8 Il est clair que la relation entre ces paramètres est inversement proportionnelle, lorsque la résistance est augmentée, la porosité accessible à l'eau est diminuée.

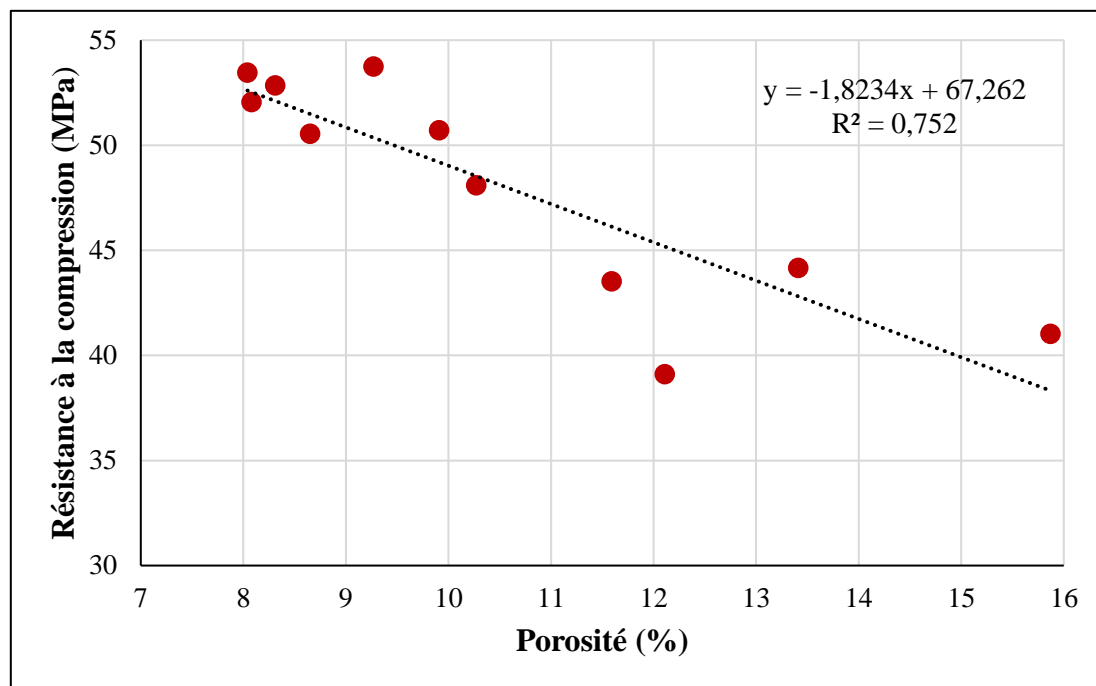


Figure 3.20 : Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité.

3.5.3 Corrélation entre la perméabilité aux ions chlorures et la porosité

Une bonne relation entre la perméabilité aux ions chlorures et la porosité accessible à l'eau à 90 jours est indiquée sur la figure 3.21. Les mélanges des BAP possèdent un coefficient de corrélation de l'ordre 0.9, sachant que l'augmentation de la porosité accessible à l'eau est associée à une augmentation des charges traversant le béton.

3.5.4 Corrélation entre la profondeur de pénétration et la porosité

La figure 3.22 montre une relation modérée entre la porosité accessible à l'eau et la profondeur de pénétration à 90 jours avec un coefficient de corrélation de l'ordre 0.7. D'après les résultats l'augmentation de la porosité conduit à une augmentation de la profondeur de pénétration.

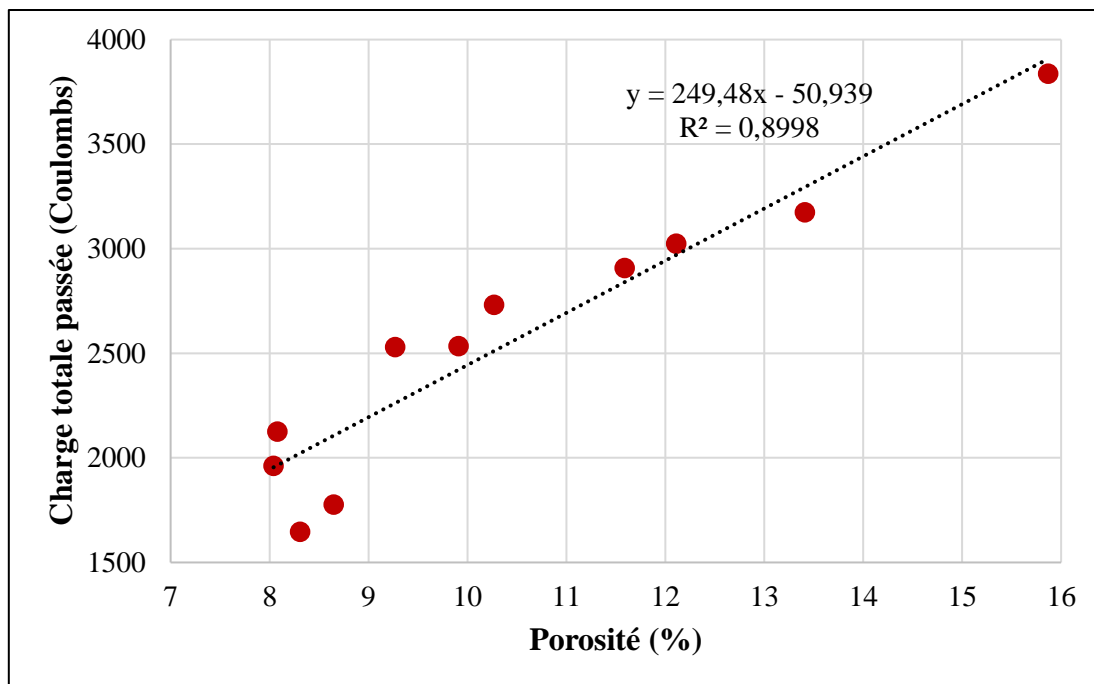


Figure 3.21 : Corrélation entre la porosité et la charge totale passée.

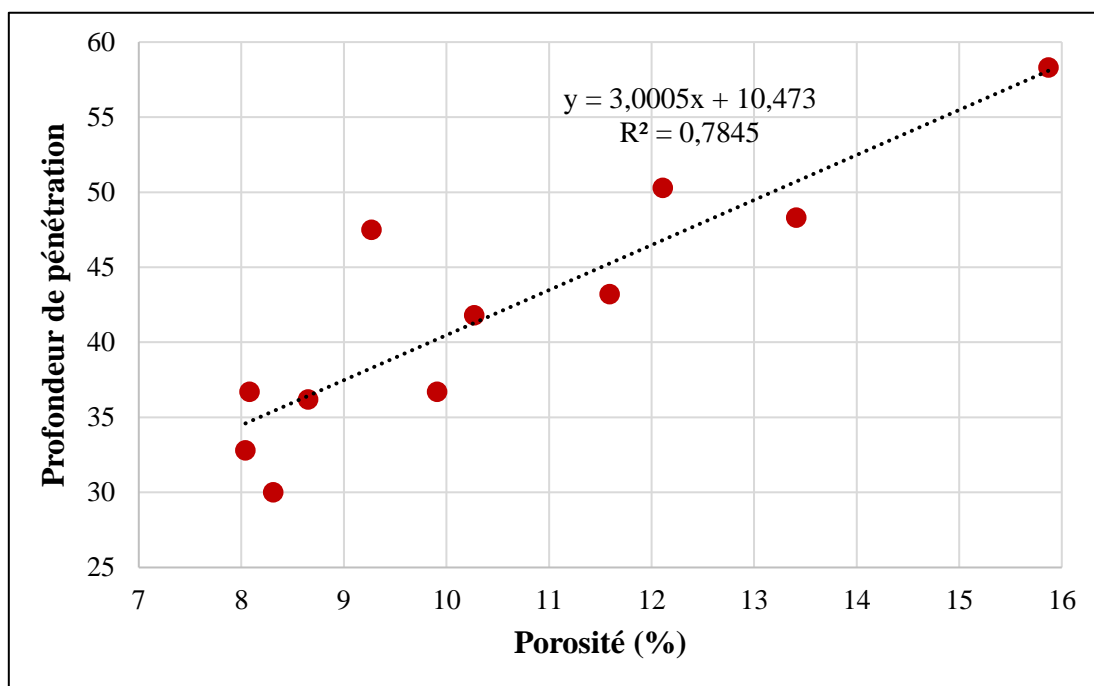


Figure 3.22 : Corrélation entre la porosité et la profondeur de pénétration.

3.6 Conclusion :

Les essais réalisés dans cette partie visent à évaluer l'effet combiné du laitier et du métakaolin sur les performances des béton autoplaçants recyclés. L'objectif principal de ce travail de recherche est d'améliorer les propriétés des granulats recyclés en utilisant le laitier et le métakaolin, et de développer un béton durable en utilisant ces matériaux.

Les résultats issus de cette étude expérimentale ont permis de conclure que l'ajout de granulats recyclés diminue les caractéristiques mécaniques à savoir la résistance à la compression et la vitesse d'auscultation sonique. Ceci est dû à la mauvaise qualité du mortier adhérent présent à la surface du GR, qui se caractérise par des vides et des microfissures. En termes de durabilité, la présence de granulats recyclés affecte négativement sur la structure poreuse de béton. L'utilisation de granulats de béton recyclé dans le béton augmente l'absorption d'eau, la pénétration de l'eau, la pénétration du chlorure et la porosité du béton autoplaçant.

L'effet de l'introduction combinée de laitier et de métakaolin est nettement bénéfique et considérable sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants recyclés. On obtient une diminution de l'absorption d'eau, de la pénétration de l'eau et du chlorure et la porosité, et augmentant ainsi le taux d'amélioration des résistances mécaniques. L'effet synergique du laitier et du métakaolin a permis d'améliorer les performances de BAPR. Les meilleures performances ont été observées pour les mélanges composés de 15% de laitier et 15% de MK.

Les résultats de différentes corrélations établies entre les propriétés du BAP à l'état durci révèlent que les relations entre les différents paramètres étudiés sont en bonne concordance et des acceptables coefficients ont été obtenus.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La présente étude vise à développer des matériaux de construction économiques, à faible impact environnemental et durables en préservant les ressources naturelles et en utilisant les déchets issus de la construction et de la démolition. En conséquence, différents mélanges de BAP sont préparés en utilisant diverses quantités de GR, de laitier et de MK et les effets combinés de laitier et de MK sur les propriétés rhéologiques, mécanique et la durabilité des BAPR sont étudiés. Les conclusions suivantes peuvent être déduites :

- Les essais réalisés avec le mini cône et le V-funnel sur le mortier visent à déterminer le dosage optimal en superplastifiant à utiliser. Le dosage nécessaire pour la formulation de BAP est de 1.15%.
- L'incorporation de granulats recyclés dans le BAP diminue sa fluidité à tous les niveaux de remplacement. Le diamètre de l'étalement diminue tandis que le temps d'écoulement T500 et le temps à l'entonnoir en V augmentent avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés. Aucun signe de ségrégation n'a été observé dans aucun des mélanges de BAP. L'utilisation des granulats recyclés, du laitier et du metakaolin a permis d'obtenir des BAP fluides, homogènes et stables qui répondent aux critères de fabrication des BAP.
- La résistance à la compression diminue avec l'utilisation de granulats recyclés dans le BAP pour tous les âges de cure, en raison de la qualité inférieure des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Cependant, l'incorporation combinée de laitier et de MK pour remplacer le ciment partiellement compense la réduction de la résistance à la compression du BAPR en améliorant sa résistance jusqu'à un maximum de 27% au niveau de remplacement de 15% de laitier et 10% de MK.
- La résistance à la compression des mélanges de BAPR peut être améliorée en utilisant du laitier et du MK, et peut atteindre des valeurs comparables à celles du BAP de référence.
- Les propriétés non destructives telles que la vitesse d'auscultation sonore des mélanges de BAPR montrent des valeurs plus faibles par rapport au mélange de BAP de référence, en raison de l'existence de pores dans les granulats recyclés qui réduit l'homogénéité et l'uniformité dans les mélanges de béton.

- L'utilisation des ajouts cimentaires offre une solution bénéfique pour améliorer les valeurs de VAS du BAPR. L'ajout combiné de laitier et de MK est plus efficace pour améliorer la VAS du BAPR que l'ajout de laitier uniquement, ce qui confirme la réduction des vides et la formation d'une microstructure dense et compacte grâce à l'utilisation combinée de laitier et de MK dans les mélanges de béton.
- L'existence de pores dans le mortier adhérent des granulats recyclés affecte considérablement les propriétés de perméabilité telles que l'absorption d'eau, la porosité et la perméabilité à l'eau. Ces propriétés augmentent avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés.
- L'utilisation combinée de laitier et de MK dans le BAP a un effet significatif sur la correction de l'augmentation des propriétés de perméabilité causée par l'utilisation des granulats recyclés. L'utilisation combinée de laitier et de MK pour remplacer le ciment était plus efficace pour réduire les propriétés de perméabilité de BAPR que l'utilisation uniquement de laitier.
- Les granulats recyclés ont considérablement réduit la résistance à la pénétration du chlorure du BAP. Cependant, le remplacement partiel du ciment par du laitier a amélioré la résistance à la pénétration du chlorure du BAPR. De plus, l'effet de l'incorporation simultanée du laitier et du MK pour remplacer partiellement le ciment et améliorer la résistance à la pénétration du chlorure du BAPR était plus significatif que celui du remplacement partiel du ciment par du laitier uniquement.
- La résistance à la pénétration des ions chlorure des mélanges fabriqués avec du laitier et du MK était significativement supérieure à celle du BAP de référence, ce qui peut être utilisé dans un environnement marin. Ainsi, l'incorporation de laitier et de MK s'est avérée bénéfique pour les propriétés de durabilité.
- L'analyse au Microscope Electronique à Balayage (MEB) a indiqué que l'utilisation combinée de laitier et de MK dans les mélanges de BAPR a conduit à une réduction de la porosité grâce au comblement des pores résultant de la formation de nouveaux hydrates par l'effet pozzolanique.

Dans le prolongement des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse de doctorat et à la lumière des résultats promoteurs obtenus, certains aspects demeurent à explorer pour répondre aux préoccupations soulevées, tout en mettant en évidence des points d'intérêt pour des recherches futures :

- L'effet combiné de laitier et de métakaolin en tant qu'ajout cimentaire en combinaison avec d'autres granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et durabilité des bétons ;
- L'effet du laitier et du métakaolin en tant que géopolymère sur les performances des bétons autoplacants à base de granulats recyclés ;
- Étude d'autres propriétés de durabilité telles que la carbonatation et la résistance aux agents agressifs ;
- Envisager une modélisation des résultats obtenus pour permettre des prévisions concernant des caractéristiques des bétons.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [1] K. Liu, J. Zheng, S. Dong, W. Xie, and X. Zhang, “Mixture optimization of mechanical, economical, and environmental objectives for sustainable recycled aggregate concrete based on machine learning and metaheuristic algorithms,” *J. Build. Eng.*, vol. 63, p. 105570, 2023, doi : 10.1016/j.job.2022.105570.
- [2] H. Momotaz, M. M. Rahman, M. R. Karim, Y. Zhuge, X. Ma, and P. Levett, “Properties of the interfacial transition zone in rubberised concrete—An investigation using nano-indentation and EDS analysis,” *J. Build. Eng.*, p. 107405, 2023, doi : 10.1016/j.job.2023.107405.
- [3] V. W. Y. Tam, H. Wattage, K. N. Le, A. Buteraa, and M. Soomro, “Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate : A critical review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, p. 121490, 2021, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.121490.
- [4] A. S. Alqarni, H. Abbas, K. M. Al-Shwikh, and Y. A. Al-Salloum, “Treatment of recycled concrete aggregate to enhance concrete performance,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 307, p. 124960, 2021, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.124960.
- [5] G. P. Peters, R. M. Andrew, J. G. Canadell, P. Friedlingstein, R. B. Jackson and J. I. Korsbakken, “Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies,” *Nat. Clim. Chang.*, vol. 10, pp. 3–6, 2020, doi : 10.1038/s41558-019-0659-6.
- [6] J. Wei and K. Cen, “Empirical assessing cement CO₂ emissions based on China’s economic and social development during 2001–2030,” *Sci. Total Environ.*, vol. 653, pp. 200–211, 2019, doi : 10.1016/j.scitotenv.2018.10.371.
- [7] M. G. Plaza, S. Martínez, and F. Rubiera, “CO₂ capture, use, and storage in the cement Industry : State of the art and expectations,” *Energies*, vol. 13, pp. 56–92, 2020, doi : 10.3390/en13215692.
- [8] Y Guo, L Luo, T Liu, L Hao, Y Li, P Liu and T. Zhu, “A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry,” *J. Environ. Sci.*, vol. 136, pp. 682–697, 2024, doi : 10.1016/j.jes.2023.01.021.
- [9] B. Bajželj, J. M. Allwood, and J. M. Cullen, “Designing climate change mitigation plans that add up,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 14, pp. 8062–8069, 2013, doi : 10.1021/es400399h.

- [10] R. Homayoonmehr, A. A. Ramezaniyanpour and M. Mirdarsoltany, “ Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues : A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, p.103011, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103011
- [11] Ministère du Commerce, “Etude de la filière ciment en algérie,” pp. 1–12, 2019.
- [12] H. Hafez, R. Kurda, R. Kurda, B. Al-Hadad, R. Mustafa, and B. Ali, “A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete,” *Appl. Sci.*, vol. 10, 2020, doi : 10.3390/app10031018.
- [13] F. de Andrade Salgado and F. de Andrade Silva, “Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete : A review,” *J. Build. Eng.*, vol. 52, p. 104452, 2022, doi : 10.1016/j.job.2022.104452.
- [14] K. Ouyang, J. Liu, S. Liu, B. Song, H. Guo, G. Li and C. Shi, “Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete : A review,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 188, p. 106717, 2023, doi : 10.1016/j.resconrec.2022.106717.
- [15] J. G. Bastidas-Martínez, F. A. Reyes-Lizcano, and H. A. Rondón-Quintana, “Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements : A review,” *J. Traffic Transp. Eng.*, vol. 9, pp. 725–741, 2022, doi : 10.1016/j.jtte.2022.08.001.
- [16] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, and B. Kasal, “A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 171, p. 105565, 2021, doi : 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [17] M. Gesoglu, E. Güneyisi, H. Öznur, I. Taha, and M. Taner, “Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 334–344, 2015, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.036.
- [18] S. Kenai, “Recycled aggregates,” *Waste Suppl. Cem. Mater. Concr.*, pp. 81–122, 2018, doi : 10.1016/B978-0-08-102156-9.00003-1.
- [19] M. Omrane, S. Kenai, E. Kadri, and A. Abdelkarim, “Performance and Durability of Self Compacting Concrete using Recycled Concrete Aggregates and Natural Pozzolan,” *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 415–430, 2017, doi : 10.1016/j.jclepro.2017.07.139.

- [20] G. Bai, C. Zhu, C. Liu, and B. Liu, "An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, p. 117978, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117978.
- [21] E. O. Fanijo, J. T. Kolawole, A. J. Babafemi, and J. Liu, "A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction : properties, performance, and sustainability," *Clean. Mater.*, vol. 9, p. 100199, 2023, doi : 10.1016/j.clema.2023.100199.
- [22] K. Kapoor and A. U. R. Bohroo, "Study on the Influence of Attached Mortar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate," *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 30, pp. 337–347, 2019, doi : 10.1007/978-981-13-6717-5_33.
- [23] A. Singh, Z. Duan, J. Xiao, and Q. Liu, "Incorporating recycled aggregates in self-compacting concrete : a review," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 9, pp. 165–189, 2019, doi : 10.1080/21650373.2019.1706205.
- [24] S. Omary, E. Ghorbel, and G. Wardah, "Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 108, pp. 163–174, 2016, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.
- [25] Z. H. Duan and C. S. Poon, "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars," *Mater. Des.*, vol. 58, pp. 19–29, 2014, doi : 10.1016/j.matdes.2014.01.044.
- [26] M. C. R. S. K. Bhattacharyya, "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete," *Mater. Struct.*, vol. 44, pp. 205–220, 2011, doi : 10.1617/s11527-010-9620-x.
- [27] J. Bao, S. Li, P. Zhang, X. Ding, S. Xue, Y. Cui and T. Zhao, "Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and chloride penetration into concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, p. 117845, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117845.
- [28] E. Güneysi, M. Gesoglu, Z. Algin, and H. Yazici, "Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 622–630, 2016, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.073.

- [29] J. Lavado, J. Bogas, J. de Brito, and A. Hawreen, “Fresh properties of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 233, p. 117322, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117322.
- [30] K. Pin, W. Ashraf, and Y. Cao, “Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 133, pp. 30–49, 2018, doi : 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.
- [31] O. K. Djelloul, “Performance structurale d’un béton autoplacant à base de granulats recyclés et laitier,” Université de Blida 1, Algérie, 2018.
- [32] M. Abed, R. Nemes, and B. A. Tayeh, “Engineering Sciences Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 32, pp. 108–114, 2018, doi : 10.1016/j.jksues.2018.12.002.
- [33] C. Medina, W. Zhu, T. Howind, M. I. S. de Rojas, and M. Frías, “Influence of mixed recycled aggregate on the physical–mechanical properties of recycled concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 68, pp. 216–225, 2014, doi : 10.1016/j.jclepro.2014.01.002.
- [34] K. P. Verian, “Using recycled concrete as coarse aggregate in pavement concrete.” Purdue University, United States, 2012.
- [35] K. Kapoor, S. Singh, and B. Singh, “Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 128, pp. 67–76, 2016, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026.
- [36] C. Thomas, J. Setién, Ja. Polanco, P. Alaejos, and M. S. De Juan, “Durability of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1054–1065, 2013, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.
- [37] M. G. Beltrán, A. Barbudo, F. Agrela, A. P. Galvín, and J. R. Jiménez, “Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths,” *J. Clean. Prod.*, vol. 79, pp. 124–133, 2014, doi : 10.1016/j.jclepro.2014.05.053.
- [38] Z. Zhao, S. Wang, L. Lu, and C. Gong, “Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 191–196, 2013, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.032.

- [39] A. A. M. Amer, K. Ezziane, and A. Bougara, "Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 123, pp. 300–308, 2016, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.107.
- [40] T. Vieira, A. Alves, J. De Brito, J. R. Correia, and R. V Silva, "Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware," *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 767–776, 2016, doi : 10.1016/j.matdes.2015.11.023.
- [41] D. Pickel, S. Tighe, and J. S. West, "Assessing benefits of pre-soaked recycled concrete aggregate on variably cured concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 141, pp. 245–252, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.140.
- [42] J. R. Roesler, D. Lange, A. Salas, A. S. Brand, and C. Arboleda, "Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements," 2013.
- [43] O. K. Djelloul, B. Menadi, G. Wardeh, and S. Kenai, "Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 6, pp. 103–121, 2018, doi : 10.12989/acc.2018.6.2.103.
- [44] R. V Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, "Fresh-state performance of recycled aggregate concrete : A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, pp. 19–31, 2018, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.
- [45] R. Wang, N. Yu, and Y. Li, "Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate : A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 242, p. 118164, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118164.
- [46] V. W. Y. Tam, A. Butera, K. N. Le, and W. Li, "Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete : A critical review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, p. 118903, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118903.
- [47] P. Mahakavi, R. Chithra, and K. Kavitha, "Effect of recycled coarse aggregate and foundry sand on the properties of self-compacting concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 71, pp. 449–460, 2019, doi : 10.1680/jmacr.17.00455.
- [48] W. Tang, "Fresh properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregate," *Adv. Mater. Res.*, vol. 602–604, pp. 938–942, 2013, doi : 10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.938.

- [49] K. Kapoor, S. P. Singh, B. Singh, and P. Singh, "Effect of recycled aggregates on fresh and hardened properties of self compacting concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 32, pp. 600–607, 2020, doi : 10.1016/j.matpr.2020.02.753.
- [50] M. A. Salam and M. Z. Jumaat, "Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 11, pp. 1023–1041, 2011, doi : 10.1016/S1644-9665(12)60093-4.
- [51] S. P. Revathi, R. S. Selvi, and S. S. Velin, "Investigations on Fresh and Hardened Properties of Recycled Aggregate Self Compacting Concrete," *J. Inst. Eng : Series A*, vol. 94, pp. 179–185, 2014, doi : 10.1007/s40030-014-0051-5.
- [52] D. Carro-lópez, B. González-fonteboa, J. De Brito, F. Martínez-abella, I. González-taboada, and P. Silva, "Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 491–501, 2015, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.091.
- [53] S. C. Kou and C. S. Poon, "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, pp. 622–627, 2009, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.
- [54] Z. Guo, T. Jiang, J. Zhang, X. Kong, C. Chen, and D. E. Lehman, "Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117115, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117115.
- [55] S. I. Mohammed and K. B. Najim, "Mechanical strength, fl exural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete," *Structures*, vol. 23, pp. 34–43, 2020, doi : 10.1016/j.istruc.2019.09.010.
- [56] M. Nili, H. Sasanipour, and F. Aslani, "The effect of fine and coarse recycled aggregates on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete," *Materials (Basel)*, vol. 12, p. 1120, 2019, doi : 10.3390/ma12071120.
- [57] K. H. Mo, T. Chai, and L. Quan, "Examining the Influence of Recycled Concrete Aggregate on the Hardened Properties of Self - compacting Concrete," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, pp. 1133–1141, 2020, doi: 10.1007/s12649-020-01045-x.

- [58] S. Manzi, C. Mazzotti, and M. C. Bignozzi, "Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate : Study of the long-term properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 582–590, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129.
- [59] F. Fiol, C. Thomas, C. Muñoz, V. Ortega-lópez, and J. M. Manso, "The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 309–323, 2018, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132.
- [60] R. S. Campos and M. P. Barbosa, "Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete," *Rev. Mater.*, vol. 23, p. 11946, 2018, doi : 10.1590/S1517-707620170001.0300.
- [61] H. Ahmed, M. Tiznobaik, S. B. Huda, M. S. Islam, and M. S. Alam, "Recycled aggregate concrete from large-scale production to sustainable field application," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 119979, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.119979.
- [62] D. Pedro, J. De Brito, and L. Evangelista, "Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 141–151, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030.
- [63] M. Shirani, M. Akbari, and O. Panahi, "Optimum mix design of recycled concrete based on the fresh and hardened properties of concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 32, p. 101483, 2020, doi : 10.1016/j.jobe.2020.101483.
- [64] A. S. Javad, B. Sahar, and A. Omid, "The Effect of Recycled Concrete Aggregates and Metakaolin on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Containing Nanoparticles," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 4, 2018, doi : 10.1007/s40996-018-0182-4.
- [65] H. Sasanipour, F. Aslani, and J. Taherinezhad, "Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116598, 2019, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324.
- [66] H. Mefteh, O. Kebäili, H. Oucief, L. Berredjem, and N. Arabi, "Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 54, pp. 282–288, 2013, doi : 10.1016/j.jclepro.2013.05.009.

- [67] S. Senaratne, D. Gerace, O. Mirza, V. W. Y. Tam, and W.-H. Kang, "The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibres as a sustainable, structural material," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 2318–2327, 2016, doi : 10.1016/j.jclepro.2015.10.041.
- [68] M. Bravo, J. De Brito, J. Pontes, and L. Evangelista, "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants," *J. Clean. Prod.*, vol. 99, pp. 59–74, 2015, doi : 10.1016/j.jclepro.2015.03.012.
- [69] M. Tuyan, A. Mardani-aghabaglou, and K. Ramyar, "Freeze – thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate," *Mater Desi*, vol. 53, pp. 983–991, 2014, doi : 10.1016/j.matdes.2013.07.100.
- [70] N. Bahrami, M. Zohrabi, S. Ali, and M. Akbari, "Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties," *J. Build. Eng.*, vol. 31, p. 101361, 2020, doi : 10.1016/j.job.2020.101361.
- [71] S. A. Santos, P. R. da Silva, and J. de Brito, "Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry," *Materials (Basel)*, vol. 10, p. 904, 2017, doi : 10.3390/ma10080904.
- [72] K. C. Panda and P. K. Bal, "Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate," *Procedia Eng.*, vol. 51, pp. 159–164, 2013, doi : 10.1016/j.proeng.2013.01.023.
- [73] Z. J. Grdic, G. A. Toplicic-Curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, pp. 1129–1133, 2010, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029.
- [74] T. Uygunoğlu, I. B. Topçu, and A. G. Çelik, "Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability," *J. Clean. Prod.*, vol. 84, pp. 691–700, 2014, doi : 10.1016/j.jclepro.2014.06.019.
- [75] Y. Wang, H. Zhang, Y. Geng, Q. Wang, and S. Zhang, "Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 215, pp. 332–346, 2019, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.212.

- [76] H. Zhang, X. Xu, W. Liu, B. Zhao, and Q. Wang, "Influence of the moisture states of aggregate recycled from waste concrete on the performance of the prepared recycled aggregate concrete (RAC) – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 326, p. 126891, 2022, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2022.126891.
- [77] L. A. Pereira-de-Oliveira, M. C. S. Nepomuceno, J. P. Castro-Gomes, and M. F. C. Vila, "Permeability properties of self- Compacting concrete with coarse recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 51, pp. 113–120, 2014, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061.
- [78] Á. Salesa, J. Á. Pérez-Benedicto, L. M. Esteban, R. Vicente-Vas, and M. Orna-Carmona, "Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects," *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 364–373, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.087.
- [79] K. Ramyar and J. Brit, "Freeze – thaw resistance, mechanical and transport properties of self- consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate," *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 983–991, 2014, doi : 10.1016/j.matdes.2013.07.100.
- [80] S. A. Santos, P. R. Da Silva, and J. De Brito, "Durability evaluation of self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry," *Mag. Concr. Res.*, vol. 71, pp. 1265–1282, 2019, doi : 10.1680/jmacr.18.00225.
- [81] H. Sasanipour and F. Aslani, "Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 236, p. 117540, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117540.
- [82] M. Bravo, J. De Brito, J. Pontes, and L. Evangelista, "Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants," *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 357–369, 2015, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103.
- [83] C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, and M. Sánchez De Juan, "Durability of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1054–1065, 2013, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.
- [84] K. McNeil and T. H. K. Kang, "Recycled Concrete Aggregates : A Review," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 7, pp. 61–69, 2013, doi : 10.1007/s40069-013-0032-5.

- [85] H. Guo, C. Shi, X. Guan, J. Zhu, Y. Ding, and T. Ling, "Durability of recycled aggregate concrete – A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 89, pp. 251–259, 2018, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008.
- [86] D. Pedro, J. de Brito, and L. Evangelista, "Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates : Mechanical, durability and long-term properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 294–309, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215.
- [87] M. Koushkbaghi, M. J. Kazemi, H. Mosavi, and E. Mohseni, "Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 266–275, 2019, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.224.
- [88] J. Ahmad et al., "Effects of steel fibers (Sf) and ground granulated blast furnace slag (ggbs) on recycled aggregate concrete," *Materials (Basel)*, vol. 14, p. 7497, 2021, doi : 10.3390/ma14247497.
- [89] F. Althoey et al., "Impact of sulfate activation of rice husk ash on the performance of high strength steel fiber reinforced recycled aggregate concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 54, p. 104610, 2022, doi : 10.1016/j.job.2022.104610.
- [90] M. Limbachiya, M. S. Meddah, and Y. Ouchagour, "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, pp. 439–449, 2012, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023.
- [91] M. Limbachiya, M. S. Meddah, and Y. Ouchagour, "Performance of Portland/Silica Fume Cement Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate.," *ACI Mater. J.*, vol. 109, p. 91, 2012, doi : 10.14359/51683574.
- [92] X. Li, "Recycling and reuse of waste concrete in China : Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, pp. 36–44, 2008, doi : 10.1016/j.resconrec.2008.09.006.
- [93] S.-C. Kou and C.-S. Poon, "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 12–19, 2013, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011.

- [94] R. V Silva, R. Neves, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 22–32, 2015, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017.
- [95] R. V Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete : A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 327–339, 2015, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102.
- [96] M. N. Soutsos, K. Tang, and S. G. Millard, “Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II : Concrete paving blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 3131–3143, 2011, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024.
- [97] R. Kurda, J. de Brito, and J. D. Silvestre, “Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO₂,” *J. CO₂ Util.*, vol. 29, pp. 12–19, 2019, doi : 10.1016/j.jcou.2018.11.004.
- [98] J. Xiao, B. Lei, and C. Zhang, “On carbonation behavior of recycled aggregate concrete,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 55, pp. 2609–2616, 2012, doi : 10.1007/s11431-012-4798-5.
- [99] K. Zhang and J. Xiao, “Prediction model of carbonation depth for recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 88, pp. 86–99, 2018, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2018.01.013.
- [100] J. Geng and J. Sun, “Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 814–820, 2013, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.090.
- [101] L. Evangelista and J. De Brito, “Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, pp. 9–14, 2010, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.
- [102] L. Evangelista and J. de Brito, “Durability of crushed fine recycled aggregate concrete assessed by permeability-related properties,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 71, pp. 1142–1150, 2019, doi : 10.1680/jmacr.18.00093.
- [103] A. Adessina, A. Ben Fraj, and J. F. Barthélémy, “Improvement of the compressive strength of recycled aggregate concretes and relative effects on durability properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 384, p. 131447, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.131447.

- [104] J. Li, H. Xiao, and Y. Zhou, "Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 1287–1291, 2009, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.019.
- [105] S. Kou, C. Poon, and F. Agrela, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, pp. 788–795, 2011, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009.
- [106] K. K. Sahoo, M. Arakha, P. Sarkar, R. D. P, and S. Jha, "Enhancement of properties of recycled coarse aggregate concrete using bacteria," *Int. J. smart nano Mater.*, vol. 7, pp. 22–38, 2016, doi : 10.1080/19475411.2016.1152322.
- [107] W. Li, Z. Luo, C. Long, C. Wu, W. H. Duan, and S. P. Shah, "Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading," *Mater. Des.*, vol. 112, pp. 58–66, 2016, doi : 10.1016/j.matdes.2016.09.045.
- [108] W. Li et al., "Mechanical strengths and microstructures of recycled aggregate concrete incorporating nanoparticles," *Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 7, pp. 188–205, 2018, doi : 10.1520/ACEM20160078.
- [109] W. Li, C. Long, V. W. Y. Tam, C.-S. Poon, and W. H. Duan, "Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 42–50, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.051.
- [110] D. Xuan, B. Zhan, and C. S. Poon, "Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 65, pp. 67–74, 2016, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018.
- [111] V. W. Y. Tam, A. Butera, and K. N. Le, "Carbon-conditioned recycled aggregate in concrete production," *J. Clean. Prod.*, vol. 133, pp. 672–680, 2016, doi : 10.1016/j.jclepro.2016.06.007.
- [112] J. Wang, Z. Che, K. Zhang, Y. Fan, D. Niu, and X. Guan, "Performance of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials (fly ash, GBFS, silica fume, and metakaolin): Mechanical properties, pore structure, and water absorption," *Constr. Build. Mater.*, vol. 368, p. 130455, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.130455.
- [113] T. M. Tung, O. E. Babalola, and D.-H. Le, "Experimental investigation of the performance of ground granulated blast furnace slag blended recycled aggregate concrete

exposed to elevated temperatures,” *Clean. Waste Syst.*, vol. 4, p. 100069, 2023, doi : 10.1016/j.clwas.2022.100069.

[114] M. M. Habeeb, K. H. Younis, F. F. Jirjees, S. M. Maruf, and T. K. Ibrahim, “Behaviour of sustainable slag enriched concrete : Effect of fully replacement of natural coarse aggregate with construction waste,” *Mater. Today Proc.*, vol. 57, pp. 806–811, 2022, doi : 10.1016/j.matpr.2022.02.389.

[115] Z. Guo et al., “Development of sustainable self-compacting concrete using recycled concrete aggregate and fly ash, slag, silica fume,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 26, pp. 1453–1474, 2022, doi : 10.1080/19648189.2020.1715847.

[116] K. Parthiban and K. Saravana Raja Mohan, “Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 65–72, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.050.

[117] R. K. Majhi, A. N. Nayak, and B. B. Mukharjee, “Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 417–430, 2018, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.118.

[118] H. Dilbas, M. Şimşek, and Ö. Çakir, “An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 61, pp. 50–59, 2014, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.057.

[119] S. Sunayana and S. V. Barai, “Partially fly ash incorporated recycled coarse aggregate based concrete : Microstructure perspectives and critical analysis,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 278, p. 122322, 2021, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.122322.

[120] D. Pedro, J. de Brito, and L. Evangelista, “Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates : Use of densified silica fume as cement replacement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 803–814, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.007.

[121] F. U. A. Shaikh, “Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing ternary blended cementitious materials,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, pp. 536–543, 2017, doi : 10.1016/j.ijse.2017.10.005.

[122] K. H. Younis, R. Alzebaree, A. J. Ismail, G. J. Khoshnaw, and T. K. Ibrahim, “Performance of Recycled Coarse Aggregate Concrete Incorporating Metakaolin,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 856, 2021, doi : 10.1088/1755-1315/856/1/012029.

- [123] L. A. Qureshi, B. Ali, and A. Ali, "Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120636, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.120636.
- [124] B. Ali, L. A. Qureshi, S. H. A. Shah, S. U. Rehman, I. Hussain, and M. Iqbal, "A step towards durable, ductile and sustainable concrete : Simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 251, p. 118980, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118980.
- [125] R. Muduli and B. B. Mukharjee, "Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin : A systematic approach," *Constr. Build. Mater.*, vol. 233, p. 117223, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117223.
- [126] M. Omrane and M. Rabehi, "Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 247, p. 118576, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118576.
- [127] K. H. Younis, A. A. Amin, H. G. Ahmed, and S. M. Maruf, "Recycled Aggregate Concrete including Various Contents of Metakaolin : Mechanical Behavior," *Adv. Mater. Sci. Eng. Work*, vol. 2020, 2020, doi : 10.1155/2020/8829713.
- [128] M. Ju, J. Jeong, and M. Palou, "Mechanical Behavior of Fine Recycled Concrete Aggregate Concrete with the Mineral Admixtures," vol. 10, pp. 1–15, 2020, doi : 10.3390/ma13102264.
- [129] W. Kubissa, R. Jaskulski, and M. Brodňan, "Influence of SCM on the permeability of concrete with recycled aggregate," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 60, pp. 583–590, 2016, doi : 10.3311/PPci.8614.
- [130] D. Pedro, J. de Brito, and L. Evangelista, "Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 93, pp. 63–74, 2018, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.002.
- [131] J. Xie, H. Zhang, L. Duan, Y. Yang, J. Yan, D. Shan, X. Liu, J. Pang, Y. Chen, X. Li and Y. Zhang, "Effect of nano metakaolin on compressive strength of recycled concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 119393, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.119393.

- [132] B. Masood, A. Elahi, S. Barbhuiya, and B. Ali, "Mechanical and durability performance of recycled aggregate concrete incorporating low calcium bentonite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 237, p. 117760, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117760.
- [133] U. Shankar Biswal and P. Dinakar, "Evaluating corrosion resistance of recycled aggregate concrete integrating ground granulated blast furnace slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 370, p. 130676, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.130676.
- [134] R. K. Majhi and A. N. Nayak, "Bond, durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 578–595, 2019, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.017.
- [135] N. Singh and S. P. Singh, "Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin," *Constr. Build. Mater.*, vol. 121, pp. 400–409, 2016, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.009.
- [136] C. Zhong, L. Zhang, W. Mao, S. Xing, J. Chen, and J. Zhou, "An investigation on mechanical properties and durability of metakaolin reinforced modified recycled concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 20, p. 2978, 2024, doi : 10.1016/j.cscm. 2024.e02978.
- [137] A. Mardani-Aghabaglou, C. Yüksel, A. Beglarigale, and K. Ramyar, "Improving the mechanical and durability performance of recycled concrete aggregate-bearing mortar mixtures by using binary and ternary cementitious systems," *Constr. Build. Mater.*, vol. 196, pp. 295–306, 2019, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.124.
- [138] NF EN 197-1, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Avril 2012.
- [139] M. Said-Mansour, E. H. Kadri, S. Kenai, M. Ghrici, and R. Bennaceur, "Influence of calcined kaolin on mortar properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 2275–2282, 2011, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.017.
- [140] H. Okamura and K. Ozawa, "Mix design for self-compacting concrete," *Concr. Libr. JSCE*, vol. 25, pp. 107–120, 1995, doi : 10.2208/jscej.1994.496_1.
- [141] H. Okamura and K. Ozawa, "Self-compactable high-performance concrete in Japan," *Spec. Publ.*, vol. 159, pp. 31–44, 1996.
- [142] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *Struct. Concr.*, vol. 1, pp. 3–17, 2000, doi : 10.3151/jact.1.5.

- [143] O. Boukendakdji, "Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires," Thèse de Doctorat, Université Blida-1, Algérie, 2010.
- [144] P. L. Domone and J. Jin, "Properties of mortar for self-compacting concrete," in Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete, 1999, pp. 109–120.
- [145] EN 12350-8, Testing fresh concrete, Part 8 : Self-compacting concrete, Slump-flow test, 2010.
- [146] EN 12350-9, Testing Fresh Concrete, Part 9 : Self-Compacting Concrete, V-Funnel Test, 2010
- [147] EN 12350-10, Testing Fresh Concrete, Part 10 : Self-Compacting Concrete, L-Box Test, 2010.
- [148] AFGC, Recommandations pour l'emploi des bétons auto plaçants, Document scientifique et technique, 2008.
- [149] EFNARC, "The European Federation of Specialist Construction and Concrete System" The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use", 2005.
- [150] EN 12390-3, Essai pour béton durci, Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Février 2003.
- [151] ASTM C597-16, Standard test method for pulse velocity through concrete, 2009.
- [152] ASTM C1585 – 11, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes, 2012.
- [153] NF P18-459, Essai pour béton durci : Essai de Porosité et de Masse Volumique, 2010.
- [154] ASTM C1202 – 12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2012.
- [155] EN 12390-08, Essai pour béton durci, Partie 8 : Profondeur de pénétration de l'eau sous pression, 2019.
- [156] W. Yahiaoui, "Durabilité du béton autoplaçant en climat chaud", Thèse de Doctorat, Université Blida-1, Algérie, 2018.

- [157] R. Shivaprasad, H. G. N. Chakravarthy, R. Chandru, and S. Kiran, "Behavior of self-compacting concrete by the addition of recycled aggregates and nano-silica," *Mater. Today Proc.*, vol. 88, pp. 77–84, 2023, doi : 10.1016/j.matpr.2023.04.658.
- [158] M. Salman, R. Rizwan, and A. Khan, "Strength and durability characteristics of binary blended recycled coarse aggregate concrete containing microsilica and metakaolin Ordinary Portland cement," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 5, p. 114, 2020, doi : 10.1007/s41062-020-00365-0.
- [159] N. Singh, T. Singh, M. Kumar, A. Singh, and P. Kumar, "Investigating the fresh state performance of concrete containing iron slag and recycled concrete aggregates," *Mater. Today Proc.*, vol. 65, pp. 1467–1477, 2022, doi : 10.1016/j.matpr.2022.04.462.
- [160] S. Kumar, A. Sahu, and A. K. L. Srivastava, "Effect of copper slag on recycled aggregate based self-compacting concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 93, pp. 480–488, 2023, doi : 10.1016/j.matpr.2023.08.151.
- [161] E. Özbay, M. Erdemir, and H. I. Durmuş, "Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 423–434, 2016, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153.
- [162] Y. Ouldkaoua, B. Benabed, R. Abousnina, E. H. Kadri, and J. Khatib, "Effect of using metakaolin as supplementary cementitious material and recycled CRT funnel glass as fine aggregate on the durability of green self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 235, p. 117802, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117802.
- [163] K. H. Younis, "Metakaolin modified recycled aggregate concrete containing recycled steel fibers," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 4689–4694, 2021, doi : 10.1016/j.matpr.2021.01.120.
- [164] A. S. Gill and R. Siddique, "Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete containing metakaolin and rice husk ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 51–64, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.088.
- [165] D. Gao, D. Ji, Z. Gu, H. Yan, and Y. Zhang, "Workability and mechanical properties analysis of hybrid fibers reinforced self-compacting concrete incorporating recycled aggregates based on acoustic emission technique," *Structures*, vol. 51, pp. 1722–1741, 2023, doi : 10.1016/j.istruc.2023.03.139.

- [166] T. Barroqueiro, P. R. da Silva, and J. de Brito, “High-performance self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry : Durability assessment,” *Buildings*, vol. 10, p. 113, 2020, doi : 10.3390/BUILDINGS10060113.
- [167] C. Sun, Q. Chen, J. Xiao, and W. Liu, “Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 161, p. 104930, 2020, doi : 10.1016/j.resconrec.2020.104930.
- [168] R. Mandal, S. K. Panda, and S. Nayak, “Evaluation of the rheological properties of self-compacting recycled aggregate concrete,” *Mater. Today Proc.*, vol. 93, pp. 170–175, 2023, doi : 10.1016/j.matpr.2023.07.114.
- [169] M. Uysal and M. Sumer, “Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 4112–4120, 2011, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032.
- [170] O. R. Kavitha, V. M. Shanthi, G. Prince Arulraj, and P. Sivakumar, “Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 114, pp. 370–374, 2015, doi : 10.1016/j.clay.2015.06.024.
- [171] A. A. A. Al-Oran, N. A. Safiee, and N. A. M. Nasir, “Fresh and hardened properties of self-compacting concrete using metakaolin and GGBS as cement replacement,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 26, pp. 379–392, 2022, doi : 10.1080/19648189.2019.1663268.
- [172] S. Dadsetan and J. Bai, “Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 658–667, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.158.
- [173] S. Malazdrewicz, K. A. Ostrowski, and Ł. Sadowski, “Self-compacting concrete with recycled coarse aggregates from concrete construction and demolition waste—Current state-of-the art and perspectives,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 370, p. 130702, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.130702.
- [174] G. Sua-iam and N. Makul, “Self-compacting concrete produced with recycled concrete aggregate coated by a polymer-based agent : A case study,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, p. 02351, 2023, doi : 10.1016/j.cscm. 2023.e02351.

- [175] H. Singh and R. Siddique, "Utilization of crushed recycled glass and metakaolin for development of self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 348, p. 128659, 2022, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2022.128659.
- [176] R. Madandoust and S. Y. Mousavi, "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 752–760, 2012, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109.
- [177] W. C. Tang, P. C. Ryan, H. Z. Cui, and W. Liao, "Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate," vol. 2016, 2016, doi : 10.1155/2016/2761294.
- [178] M. I. Safawi, I. Iwaki, and T. Miura, "A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1834–1845, 2005, doi : 10.1016/j.cemconres.2004.10.031.
- [179] H. Umehara, T. Uehara, Y. Enomoto, and S. Oka, "Development and usage of lightweight high performance concrete," in *Proceedings of International Conference on high Performance Concrete (supplementary papers)*, Singapore, American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, pp. 339–353, 1994.
- [180] A. Toghroli, P. Mehrabi, M. Shariati, N. T. Trung, S. Jahandari, and H. Rasekh, "Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 118997, 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118997.
- [181] J. Xiao, Y. Tang, H. Chen, H. Zhang, and B. Xia, "Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 366, p. 132895, 2022, doi : 10.1016/j.jclepro.2022.132895.
- [182] H. Liu et al., "Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 159, p. 106868, 2022, doi : 10.1016/j.cemconres.2022.106868.
- [183] R. Muduli and B. B. Mukharjee, "Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 209, pp. 398–414, 2018, doi : 10.1016/j.jclepro.2018.10.221.

- [184] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, pp. 565–573, 2012, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059.
- [185] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, and M. Abdalikia, "The effect of initial strength of concrete wastes on the fresh and hardened properties of recycled concrete reinforced with recycled steel fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, p. 124284, 2021, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.124284.
- [186] H. El-Hassan, J. Medljiy, and T. El-Maaddawy, "Properties of steel fiber-reinforced alkali-activated slag concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand," *Sustain.*, vol. 13, p. 8017, 2021, doi : 10.3390/su13148017.
- [187] K. Haddad, O. Haddad, S. Aggoun, and S. Kaci, "Correlation between the porosity and ultrasonic pulse velocity of recycled aggregate concrete at different saturation levels," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 44, pp. 911–917, 2017, doi : 10.1139/cjce-2016-0449.
- [188] M. Chakradhara Rao, "Properties of recycled aggregate and recycled aggregate concrete : effect of parent concrete," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 19, pp. 103–110, 2018, doi : 10.1007/s42107-018-0011-x.
- [189] IS 13311-1, Method of Non-destructive testing of concrete, Part 1 : Ultrasonic pulse velocity [CED 2 : Cement and Concrete], 1992.
- [190] G. Kaplan, O. Y. Bayraktar, A. Gholampour, O. Gencil, F. Koksall, and T. Ozbakkaloglu, "Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate," *Struct. Concr.*, vol. 22, pp. 2791–2812, 2021, doi : 10.1002/suco.202100028.
- [191] N. Garcia-Troncoso, L. Li, Q. Cheng, K. H. Mo, and T. C. Ling, "Comparative study on the properties and high temperature resistance of self-compacting concrete with various types of recycled aggregates," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00678, 2021, doi : 10.1016/j.cscm. 2021.e00678.
- [192] O. Zaid, F. M. Mukhtar, R. M-García, M. G. El Sherbiny, and A. M. Mohamed, "Characteristics of high-performance steel fiber reinforced recycled aggregate concrete utilizing mineral filler," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e00939, 2022, doi : 10.1016/j.cscm. 2022.e00939.

- [193] B. Sara, A. Mhamed, B. Otmane, and E. Karim, "Elaboration of a Self-Compacting mortar based on concrete demolition waste incorporating blast furnace slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 366, p. 130165, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2022.130165.
- [194] H. El-hassan, P. Kianmehr, and S. Zouaoui, "Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 164–175, 2019, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325.
- [195] E. Anastasiou, K. G. Filikas, and M. Stefanidou, "Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 154–161, 2014, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.037.
- [196] P. Zhan et al., "Strength, microstructure and nanomechanical properties of recycled aggregate concrete containing waste glass powder and steel slag powder," *J. Clean. Prod.*, vol. 341, p. 130892, 2022, doi : 10.1016/j.jclepro.2022.130892.
- [197] E. J. Sellevold and F. F. Radjy, "Condensed silica fume (microsilica) in concrete : water demand and strength development," *Spec. Publ.*, vol. 79, pp. 677–694, 1983, doi : 10.14359/6718.
- [198] Y. Benachour, C. A. Davy, F. Skoczylas, and H. Houari, "Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, pp. 727–736, 2008, doi : 10.1016/j.cemconres.2008.02.007.
- [199] C. Sun and B. Bai, "Diffusion of gas molecules on multilayer graphene surfaces : Dependence on the number of graphene layers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 116, pp. 724–730, 2017, doi : 10.1016/j.applthermaleng.2017.02.002.
- [200] J. Zhang, F. Bian, Y. Zhang, Z. Fang, C. Fu, and J. Guo, "Effect of pore structures on gas permeability and chloride diffusivity of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 402–413, 2018, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.111.
- [201] M. Behera and M. R. Rahman, "Evaluating the combined effect of recycled aggregate and rice husk ash on concrete properties," *Mater. Today Proc.*, vol. 61, pp. 370–378, 2022, doi : 10.1016/j.matpr.2021.10.127.
- [202] J. Bao et al., "Water transport in recycled aggregate concrete under sustained compressive loading : Experimental investigation and mesoscale numerical modelling," *J. Build. Eng.*, vol. 44, p. 103373, 2021, doi : 10.1016/j.job.2021.103373.

- [203] K. Prajapati and A. Jamani, "Influence of Metakaolin and GGBS in Ternary Blended Concrete With Recycled Coarse Aggregate," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, pp. 2198–2204, 2017.
- [204] W. Kubissa, R. Jaskulski, and P. Reiterman, "Ecological concrete based on blast-furnace cement with incorporated coarse recycled concrete aggregate and fly ash addition," *J. Renew. Mater.*, vol. 5, pp. 53–61, 2017, doi : 10.7569/JRM.2017.634103.
- [205] W. Yodsudjai and K. Nitichote, "Chloride Penetration Behavior of Concrete Made from Various Types of Recycled Concrete Aggregate," *Sustain.*, vol. 14, p. 2768, 2022, doi : 10.3390/su14052768.
- [206] W. Yuan, L. Mao, and L. Li, "A two-step approach for calculating chloride diffusion coefficient in concrete with both natural and recycled concrete aggregates," *Sci. Total Environ.*, vol. 856, p. 159197, 2023, doi : 10.1016/j.scitotenv.2022.159197.
- [207] X. Wang, Z. Liu, C. Liu, L. Wang, M. Chen, and G. Yue, "Study of mix design and performance of alkali-activated concrete with recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 400, p. 132882, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.132882.
- [208] R. Kurda, J. D. Silvestre, J. de Brito, and H. Ahmed, "Optimizing recycled concrete containing high volume of fly ash in terms of the embodied energy and chloride ion resistance," *J. Clean. Prod.*, vol. 194, pp. 735–750, 2018, doi : 10.1016/j.jclepro.2018.05.177.
- [209] P. Amorim, J. De Brito, and L. Evangelista, "Concrete made with coarse concrete aggregate : influence of curing on durability," *ACI Mater. J.*, vol. 109, pp. 195–204, 2012.
- [210] J. Bao, Y. Wang, P. Zhang, X. Zhang, and Y. Cui, "The role of internally incorporated nano-silica in recycled aggregate concrete : Modification of transport properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 371, p. 130790, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.130790.
- [211] K. Y. Ann, H. Y. Moon, Y. B. Kim, and J. Ryou, "Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials," *Waste Manag.*, vol. 28, pp. 993–999, 2008, doi : 10.1016/j.wasman.2007.03.003.
- [212] M. L. Berndt, "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 2606–2613, 2009, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011.

- [213] P. Saravanakumar and G. Dhinakaran, “Mechanical and durability properties of slag based recycled aggregate concrete,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 39, pp. 271–282, 2015, doi : 10.22099/IJSTC.2015.3134.
- [214] C. Chen et al., “Synergetic effect of fly ash and ground-granulated blast slag on improving the chloride permeability and freeze–thaw resistance of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 365, p. 130015, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2022.130015.
- [215] H. Singh and R. Siddique, “Long term durability assessment of self-compacting concrete made with crushed recycled glass and metakaolin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 400, p. 132656, 2023, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.132656.
- [216] O. R. Kavitha, V. M. Shanthi, G. P. Arulraj, and V. R. Sivakumar, “Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 124, pp. 143–149, 2016, doi : 10.1016/j.clay.2016.02.011.
- [217] B. Ilić, V. Radonjanin, M. Malešev, M. Zdujčić, and A. Mitrović, “Study on the addition effect of metakaolin and mechanically activated kaolin on cement strength and microstructure under different curing conditions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 243–252, 2017, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.068.

Annexes

Annexe A

Exemple de calcul de la composition du mortier

A.1. Les Données :

Pour un volume du mortier de $V=1.31$ (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_c=3050 \text{ kg/m}^3$
- Sable : $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant : $\rho_{sp}=1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau : $\rho_E=1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable $A_b= 0,65$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0.50$ (Par exemple)

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.4$ ou (par volume) $E/C = 1.22$

Le superplastifiant (MEDAFOW 01) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $\%Sp = 1.15 \%$ du poids de ciment (ou poudres).

A.2. Calcul d'humidité du sable :

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1=300 \text{ g}$ (par exemple), on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse $M_2 = 295 \text{ g}$ et on calcul l'humidité du sable μ_s

$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_s - A_b$$

A.3. Calcul des quantités de chaque constituant :

A.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment $C\%$:

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

La quantité de ciment C en kg :

$$C(kg) = \frac{V \times E / C_{par\ volume}}{100} \times \rho_c$$

A.3.2. Le sable

La quantité du sable en kg est S :

$$S(kg) = (1 + \frac{Correction}{100}) \times (\frac{V \times S / M \times \rho_s}{100})$$

A.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

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

A.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E₁, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E₂ (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

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

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

La quantité d'eau globale E en litre :

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

Eau 1 : E₁ = E × 0.7

Eau 2 : E₂ = E × 0.3

Annexe B

Exemple de calcul de la composition du béton

Les mêmes démarches de la composition du mortier (Annexe A) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant.

B.1. Les Données

Pour un volume de béton de $V= 40$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - Masse volumique apparente du gravier : $\rho_G = 1500 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du gravier : $\rho_{AG} = 2500 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 1500 \text{ kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du ciment $\rho_C = 3050 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
 - Coefficient d'absorption du sable : $Ab_S = 0.65$
 - Coefficient d'absorption du gravier : $Ab_G = 0.5$
- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.5$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A=1\%$ du volume du béton ;
- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}}=1.22$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volume}}/ \rho_C=0.40$ par unité de poids de ciment ;
- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) : $\%Sp= 0.95\%$ du poids de ciment.

B.2. Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_1 et un échantillon de gravier de masse M'_1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

- L'humidité du sable : $\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$
- L'humidité du gravier : $\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$

B.3. Calcul des différents composants

B.3.1. Gravier

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg}/\text{m}^3) \times V - M_2}{1000} \left[1 + \frac{\mu_{G-AbG}}{100} \right]$$

B.3.2. Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

- Le pourcentage du gravier dans le béton :

$$G(\%) = \frac{G(\text{kg}/\text{m}^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

- Le pourcentage du volume de mortier par rapport au volume de béton :

$$M(\%) = 100 - G(\%) - A(\%)$$

- Le pourcentage du sable dans le béton :

$$S(\%) = \frac{M(\%) \times S/M}{100}$$

- Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{S(\%) \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left[1 + \frac{\mu_{S-ABS}}{100} \right]$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

B.3.3. Ciment

- Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$P(\%) = M(\%) - S(\%)$$

- Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$C(\%) = \frac{1}{1 + \frac{E}{C_{Volume}}} \times P(\%)$$

- La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = C(\%) \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

B.3.4. Superplastifiant

- Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m³)

$$Sp(kg/m^3) = C(\%) \times \rho_C \times 10 \times \frac{S_p(\%)}{100}$$

- La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

B.3.5. Eau

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

- Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$E(\%) = \frac{\frac{E}{C_{Volume}}}{1 + \frac{E}{C_{Volume}}} \times P(\%)$$

Le calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

- L'eau contenue dans le sable : e₁

$$e_1(kg) = \frac{S(\%) \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left[\frac{\mu_{S-AbS}}{100} \right]$$

- L'eau contenue dans le gravier : e₂

$$e_2(kg) = \frac{G(\frac{kg}{m^3}) \times V}{1000} \left[\frac{\mu_{G-AbG}}{100} \right]$$

- L'eau contenue dans le superplastifiant : e₃

$$e_3(kg) = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

- L'eau à extraire : e

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E(kg) = \frac{E(\%) \times 10 \times V}{1000} - e$$