

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ DE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1

Faculté de Technologie Département de Génie Civil

MÉMOIRE DE MASTER

Spécialité : Matériaux en Génie civil

EFFET COMBINÉ DU LAITIER, CALCAIRE ET CENDRES DE BOUE SUR LES PROPRIÉTÉS DU MORTIER AUTOPLAÇANT À BASE DE SABLE RECYCLÉS

Réalisé par :

ZAIOUT LEILA

Devant les membres de jury

		U.S.D.B. 1	Président
		U.S.D.B. 1	Examineur
Mr MENADI Belkacem	Professeur	U.S.D.B. 1	Promoteur
Mme Maameri Nour Elhouda	M.C.A	U.S.D.B. 1	Co-Promoteur

2025

المخلص

من أجل تطوير مونة إسمنتية صديقة للبيئة وأقل تأثيرًا على التلوث، تم اعتماد منهجية إعادة التدوير في تصميم الخلطات. وقد تم تنفيذ 18 عينة مخبرية لدراسة تأثير مجموع الإضافات المعدنية على خصائص المونة المحتوية على نسبتي 0% و 50% و 100% من الركام المعاد تدويره. تم اعتماد ثلاث أنواع من الأنظمة: نظام ثنائي (يحتوي على 10% من رماد الحمأة فقط)، نظام ثلاثي (يضم 10% رماد حمأة و 15% خبث)، ونظام رباعي (يحتوي على 10% رماد حمأة، 15% خبث، بالإضافة إلى نسب مختلفة من الكلس (5%، 10%، و 15%). أظهرت النتائج أن الخلطة المكونة من 50% ركام معاد تدويره، 10% رماد حمأة، 15% خبث، و 10% كلس (M50%R10%B15%L10%C) قد حققت أداءً جيدًا من حيث قابلية التشغيل، وارتفاع المقاومة الميكانيكية، وانخفاض كل من المسامية وامتصاص الماء.

الكلمات المفتاحية: الخبث، رماد الحمأة، الحجر الجيري، رمل المعاد تدويره، الملاط ذاتي الضغط، قابلية التشغيل، القوة، الامتصاص الشعري.

RÉSUMÉ

Afin de développer un mortier respectueux de l'environnement et moins polluant, une approche de conception de mélange base sur le recyclage a été adoptée. Au total 18 éprouvettes de laboratoire ont été préparées pour étudier l'effet combiné des ajouts minéraux sur un mortier contenant 0,50 % et 100 % de granulats recyclés. Trois types de systèmes liants ont été considérés : un système binaire (contenant seulement 10% de cendres de boue), un système ternaire (composé de 10% de cendres de boues, 15% de laitier), et un système quaternaire (constitué de 10% de cendres de boue, 15% de laitier, et des proportions variables de poudre de calcaire : 5 %, 10 % et 15 %). Les résultats ont montré que le mélange contenant 50 % de granulats recyclés, de 10 % de cendres de boue, de 15 % de laitier et 10 % de calcaire (M50%R10%B15%L10%C) présentait une ouvrabilité améliorée, une résistance mécanique plus élevée, ainsi qu'une porosité et une absorption d'eau réduites.

Mots clés : laitier, cendres de boue, calcaire, sable recyclé, mortier autoplaçant, ouvrabilité, résistance, absorption capillaire.

ABSTRACT

In order to develop an environmentally friendly and less polluting mortar, a recycling-based mix design approach was adopted. A total of 18 laboratory specimens were prepared to investigate the combined effect of mineral additives on self compacting mortar containing 0% , ,50% and 100% recycled aggregates. Three types of binder systems were considered: a binary system (containing only 10% sewage sludge ash),a ternary system (composed of 10%sewage sludge ash, and 15%slag),and a quaternary system (consisting of 10% sewage sludge ash,15%slag,and varying proportions of limestone powder:5%,10%,and 15%).The results showed that the mix containing 50% recycled aggregates, 10% sewage sludge ash, 15% slag, and 10% limestone (M50%R10%B15%L10%C) exhibited improved workability, higher mechanical strength, and reduced porosity and water absorption.

Keywords: Slag, sewage sludge ash, limestone, recycled sand, self-compacting mortar, workability, strength, capillary absorption.

DEDICACES

Je m'incline devant Dieu le tout puissant qui m'a ouvert la porte du savoir et

M'aide à la franchir.

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère

Qui a fait de sacrifices pour me voir arriver ici.

A mon père

Pour l'effort et le soutien constants qu'il m'a toujours donné.

A ma grande mère à qui je souhaite une bonne santé.

A mes sœurs : Lilya, Lidya, Lina et Loubna.

A mon frère : Abdelrezak.

A mes amies : Manel, Manar, Asma et Maissa.

A toute ma famille qui m'a toujours encouragée à qui je souhaite plus de

Succès.

A toutes les personnes ayant contribué à ce travail de près ou de lo

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, de m'avoir donné le courage et la

Volonté de terminer ce travail, ainsi que mes parents pour leur soutien.

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de Géo matériaux et génie civil

De L'université de Blida 1, dirigé par Professeur Kenai, Professeur Menadi et la

Direction du Docteur Yahiaoui.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont

Contribue de près ou de loin à la réalisation de ce travail. En particulier, je

Remercie chaleureusement mon encadrant de mémoire de fin d'étude Professeur

Belkacem Menadi pour son accompagnement, ces précieux conseils et sa

Disponibilité tout au long de ce projet.

Je remercie également ma co-promotrice Dr Maameri Nour Elhouda pour

Son soutien, son engagement et ses orientations constructives qui ont

grandement enrichi ce travail.

Les jurys pour l'honneur qu'il m'ont accordé en acceptant de juger ce travail, ainsi

Dr Bensaci Hamza pour son aide, remarques et conseils.

Je tiens aussi à remercier les doctorantes Demerdji Ferial et Boutldja Ines pour

avoir dispensé une formation et pour ses aides à la réalisation du mémoire

Laboratoire, en particulier Madame Ahlam pour leur disponibilité et son

Professionnalisme.

Je remercie aussi le laboratoire de Ouled Yaich, Cimenterie Meftah, la société

Granitex et Lafarge qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

ملخص

RÉSUMÉ

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES

LISTE DE FIGURES

LISTE DES NOTATION ET ABREVIATIONS

I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Généralité sur les mortiers	4
I.2.1 Définition de mortier autoplaçants :	5
I.2.2 Constituants des mortiers autoplaçants.....	5
I.2.2.1 Le ciment.....	5
I.2.2.1.1 Constituants du ciment	5
I.2.2.1.2 Classification du ciment	6
I.2.2.1.3 Ciments en Algérie	8
I.2.2.2 Le sable	9
I.2.2.3 Eau de gâchage.....	9
I.2.2.4 Super-plastifiant :	9
I.2.3 Formulation des mortiers autoplaçants et leurs caractérisations	9
I.2.3.1 Méthode de Formulation Okamura	9
I.2.3.2 Caractérisation des mortiers autoplaçants à l'état frais.....	10

I.3	Recyclage des déchets de construction et démolition.....	10
I.3.1	Intérêt environnemental du recyclage.....	10
I.3.2	Production des granulats recyclés.....	11
I.3.3	Caractéristiques des granulats recyclés	12
I.3.3.1	Absorption d'eau et densité	12
I.3.3.2	Morphologie	14
I.3.3.3	Granulométrie.....	15
I.3.3.4	Teneur on fines.....	15
I.3.3.4.1	Teneur en air	16
I.4	Ajouts cimentaires	18
I.4.1	Définition des ajouts cimentaires	18
I.4.2	Importance des ajouts cimentaires dans l'industrie du béton	18
I.4.3	Différents types des ajouts cimentaires	19
I.4.3.1	Pouzzolanes :.....	19
I.4.3.2	Calcaire.....	19
I.4.3.3	Méta kaolin :.....	20
I.4.3.4	La fumée de silice	21
I.4.3.5	Le laitier de haut fourneau :	21
I.4.3.6	Les cendres volantes.....	22
I.4.3.7	Les cendres de boues.....	22
I.4.4	Les inconvénients d'utilisation des ajouts :	24
I.5	Influence de ciment binaire, ternaire et quaternaire sur les propriétés du béton ou mortier à base de granulats recyclés	24
I.5.1	Ouvrabilité :.....	24
I.5.2	Viscosité	27

I.5.3	Propriétés mécaniques	28
I.5.3.1	Résistance à la compression	28
I.5.3.2	Résistance à la traction par flexion :	32
I.5.4	Retrait de séchage	34
I.5.5	Module d'élasticité :	35
I.5.6	Durabilité :	36
I.5.6.1	Diffusion des ions de chlorure :	36
I.5.6.2	Absorption d'eau par capillarité et perméabilité à l'eau :	38
I.6	Conclusion	42
II.	MATERIAUX ET ESSAIS	44
II.1	Introduction	44
II.2	Caractéristiques des matériaux.....	44
II.2.1	Le ciment	44
II.2.2	Granulats :	45
II.2.2.1	Sable de baghlia.....	45
II.2.2.2	Sable de oued souf	46
II.2.2.3	Le sable recyclé	47
II.2.3	Eau de gâchage.....	48
II.2.4	Adjuvant.....	48
II.2.5	Les ajoutes cimentaires	48
II.2.5.1	Le laitier.....	48
II.2.5.2	Cendre de boues.....	50
II.2.6	Calcaire	51
II.3	Formulation de MAP	53

II.4	Essais à l'état frais des MAP	54
II.4.1.1	Étalement au mini cône	54
II.4.1.2	Temps d'écoulement.....	55
II.4.1.3	Moulage et conservation des éprouvettes	55
II.5	Essais à l'état durci MAP	56
II.5.1	La résistance à la traction par flexion	56
II.5.2	La résistance à la compression.....	57
II.6	Essais de durabilité	57
II.6.1	Absorption capillaire.....	57
II.6.2	Porosité accessible à l'eau.....	58
II.7	Organigrammes des essais.....	60
III.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	63
III.1	Introduction	63
III.2	Optimisation du dosage en superplastifiant	63
	La figure III.1et le tableau III. 1 représentent les résultats obtenues lors de la variation du dosage du superplastifiant.	63
III.3	Influence du sable Recyclé de démolition et ciment quaternaire a l'état frais :.....	64
III.3.1	Effet de granulats recycles sur le mortier autoplaçant a base de granulats recyclés	67
III.3.2	Effet de cendre de boue sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant à base de granulats recyclés	68
III.3.3	Effet de laitier sur le mortier autoplaçant à base de granulats recyclés	70
III.3.4	Effet de calcaire sur le mortier autoplaçant à base de granulats recyclés	71

III.4	Influence du sable de Recyclé de démolition et ciment quaternaire a l'état durci.....	73
III.4.1	Effet de granulats recyclés sur la résistance à la compression des MAP avec 50% et 100% de sable recyclé	74
III.4.2	Effet de cendre de boue sur la résistance à la compression de mortier à base de granulats recyclés	75
III.4.3	Effet de l'ajout de Laitier sur la résistance à la compression de mortier à base de granulats recycles	76
III.4.4	Effet de l'ajout de calcaire sur la résistance à la compression de mortier à base de granulats recyclés	77
III.5	Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à traction des d'efférents mortiers autoplacants.....	78
III.5.1	Effet de granulats recyclés sur le mortier autoplaçant sur la résistance à la flexion	79
III.5.2	Effet de cendre de boues sur la résistance a la traction par flexion de mortier à base de granulats recyclés.....	79
III.5.3	Effet de laitier sur la résistance à la traction par flexion de mortier à base de granulats recyclés	80
III.5.4	Effet de calcaire sur la résistance à la traction par flexion de mortier à base de granulats recyclés	81
III.6	L'influence de granulats recyclés, cendre de boues, laitier et le calcaire sur Absorption d'eau par capillarité.....	82
III.7	L'influence de granulats recyclés, cendre de boues, laitier et le calcaire sur la porosité	83
III.8	Conclusion.....	84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: Teneur moyenne des oxydes constitutifs du clinker[9].	6
Tableau I. 2: Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme	7
Tableau I. 3: Classes de résistance des ciments Portland [6].	8
Tableau I. 4: les ciments utilisés dans l'Algérie [10].	8
Tableau I. 5 : Caractérisation des mortiers autoplaçants à l'état frais [11], [12].	
Tableau I. 6 Consommation énergétique des granulats naturels et recyclés[15]	11
Tableau I. 7: La densité et l'absorption d'eau du sable recyclé et du sable naturel	13
Tableau I. 8: Courbes granulométriques des sables utilisés	15
Tableau I. 9 : Surface spécifique des fines de granulats recyclés	15
Tableau I. 10: Valeurs de la teneur en air [20].	16
Tableau I. 11: Compositions chimiques des sables recyclés.	17
Tableau I. 12: Classification des ajouts selon leur réactivité [30].	18
Tableau I. 13 constituant de filaire calcaire[39].	20
Tableau I. 14: Les constituant chimique de laitier [38].	22
Tableau I. 15: Compositions chimiques de cendres volantes [43].	22
Tableau I. 16: Analyse chimique de cendre de boues [42].	24
Tableau I. 17: l'ouvrabilité du béton PC-MK	27
Tableau I. 18 : pénétration des ions en chlorure des systèmes quaternaire [33], [55], [56].	38
Tableau I. 19 l'effet de différents systèmes liants quaternaires sur l'absorption capillaire des mortiers autoplaçants, en particulier ceux contenant des granulats recyclés.	41
Tableau II. 1: Composition chimiques du ciment.	44
Tableau II. 2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.	45

Tableau II. 3: Caractéristique physique de sable de Baghlia.	45
Tableau II. 4: Caractéristique physique de sable de oued souf.	46
Tableau II. 5: Caractéristiques physiques de sable corrigé.	46
Tableau II. 6: Caractéristiques physiques de sable recyclé.	48
Tableau II. 7: Les caractéristiques de superplastifiant [1].	48
Tableau II. 8: Composition chimique de laitier	49
Tableau II. 9: Caractéristiques physiques et mécaniques de laitier.	50
Tableau II. 10: Composition chimique de cendre de boue	51
Tableau II. 11: Caractéristiques physiques et mécaniques de cendre de boue.	51
Tableau II. 12 : Composition chimique de calcaire	52
Tableau II. 13: Caractéristiques physiques et mécaniques de calcaire	53
Tableau II. 14: Séquence de malaxage [2].	54
Tableau III. 1: Différentes compositions des MAP.....	65
Tableau III. 2: Résultats expérimentaux des essais sur l’ouvrabilité des d’efférents mortiers autoplacants	66
Tableau III. 3 : Résistance à la compression des d’efférents mortiers autoplacants	73
Tableau III. 4: Résistance à traction par flexion des d’efférents mortiers autoplacants.....	78

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Mélange de mortier [6].	5
Figure I. 2 :Les étapes de production des granulats recyclées [16].	12
Figure I. 3: Composition des BAP en fonction du taux de remplacement des granulats recyclés [18].	14
Figure I. 4: Teneur en air des différents mortiers [30].	16
Figure I. 5 ; Composition pour (a) 20 mm de gros granulats, (b) 10 mm de gros granulats[33].	17
Figure I. 6: Variations de la consistance normale des ciments étudiés (CRST et CRS+FC)[39].	20
Figure I. 7 : l'analyse granulométrique par laser de la boue effectuée au laboratoire de Bab Ezzouar (USTHB) [42].	23
Figure I. 8: Écoulement de l'affaissement du BAP étudié [43].	25
Figure I. 9: Diamètre d'écoulement de l'affaissement et temps T50 des mélanges SSC [9].	25
Figure I. 10: Temps d'entonnoir en V des mélanges SCC [9].	26
Figure I. 11: Ouvrabilité de béton à base 25% de granulats recycle et ciment Binaire et ternaire [44].	26
Figure I. 12 ; la viscosité en fonction du temps des bétons avec des matériaux cimentaires ternaires PC-FA+SF et quaternaires FA+GGBFS+SF [51].	28
Figure I. 13: Résistance à la compression des mélanges SCC [9].	29
Figure I. 14: Résistance à la compression des mélanges de béton à 7,14 et 28 jours [44].	29
Figure I. 15: La résistance à la compression des mélanges contenant du sable standard [51].	30
Figure I. 16 La résistance à la compression des mélanges contenant du sable Recyclé de béton [51].	31
Figure I. 17 Résultats de la résistance à la compression des mélanges SCC (M-40) [47].	31
Figure I. 18: Résistance à la traction des mélanges de béton à 28 jours [44].	32
Figure I. 19: Résistance à la traction [52].	33
Figure I. 20: Influence du laitier sur la résistance en flexion [53].	33
Figure I. 21 la résistance à la flexion de mélange quaternaire[54].	34
Figure I. 22: Valeurs de retrait des mélanges de mortier exposés au séchage des mélanges contenant du sable standard [51].	34

Figure I. 23: Valeurs de retrait des mélanges de mortier exposés au séchage des mélanges contenant du sable mélanges incorporant des granulats Recyclé de béton[51].	35
Figure I. 24: corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité et la résistance à la traction.[17].	36
Figure I. 25: Résultats des tests de pénétration des ions chlorure des mélanges de mortier [51].	36
Figure I. 26: Coefficient de migration des chlorures après application de durées de mise sous tension de 12,24 et 36 h[52].	37
Figure I. 27: Absorption pour des bétons contenant des quantités variables de RAC sans laitier [43].	39
Figure I. 28: Absorption pour des bétons contenant des quantités variables de RAC avec 15 % de laitier [43].	39
Figure I. 29: Capacités d'absorption d'eau des mélanges de mortier [51].	40
Figure I. 30: Profondeur de pénétration de l'eau dans les mélanges SCC [43].	40
Figure II. 1: Sable de Baghlia.	45
Figure II. 2: Sable de oued souf.	46
Figure II. 3: Courbes granulométriques des sables utilisés.	47
Figure II. 4: Sable recyclé a, concasseur de l'université de Saad dahleb blida 1,b	47
Figure II. 5: Laitier broyé.	49
Figure II. 6: Illustration représentant les échantillons de cendre de Boue non broyé (a) et broyé (b).	50
Figure II. 7:Calcaire.	52
Figure II. 8: Malaxeur à mortier.	53
Figure II. 9: Essai d'étalement au mini cône.	54
Figure II. 10: Essai de l'entonnoir en V.	55
Figure II. 11: Conservation des éprouvettes.	56
Figure II. 12: Essai de résistance à la traction.	55

Figure II. 13 : Essai absorption capillaire.	58
Figure II. 14: Appareillage de l'essai de porosité accessible à l'eau.	59
Figure II. 15: Essais préliminaire sur MAP et les dosages des ajouts utilise dans la formulation	60
Figure II. 16: Essais effectués a létat frais et durci.	61
Figure III. 1: Etalement et l'écoulement en fonction du SP du mortier autoplaçant témoin.	63
Figure III. 2 : Etalement du MAP à base de 50%R.....	68
Figure III. 3 : Effet de la cendre de boue sur l'étalement et le temps découlement des MAP à base de 50%et100% de sable recyclé.....	68
Figure III. 4 : Etalement du MAP à base de 50%R10%B.....	69
Figure III. 5: Effet combine de la cendre de boue et le laitier sur l'étalement et le temps découlement des MAP à base de 50%et100% de sable recyclé.....	70
Figure III. 6: Etalement du MAP à base de 50%R10%B15L%.	71
Figure III. 7: Effet combine de la cendre de boue (10%), laitier (15%) et calcaire (5,10,15%) sur l'étalement et le temps découlement des MAP à base de 50%et100% de sable recyclé... ..	71
Figure III. 8: Etalement du MAP à base 50%R10%B15%L10%C.....	72
Figure III. 9: Effet des granulats recyclés sur la résistance a la compression des MAP.....	74
Figure III. 10: Effet de la cendre de boue sur la résistance à la compression des MAP à base de50%et100% de sable recyclé.	75
Figure III. 11: Effet combiné de la cendre de boue et le laitier sur la résistance à la compression des MAP a base de 50% er 100% de sable recyclé.....	76
Figure III. 12: Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur la résistance à la compression des MAP a base de 50% er 100% de sable recyclé.....	77

Figure III. 13: Effet des granulats recyclés sur la résistance à la traction par flexion des MAP.	79
Figure III. 14: Effet de la cendre de boue sur la résistance à la compression des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé.	80
Figure III. 15: Effet combiné de la cendre de boue et le laitier sur la résistance a la compression des MAP à base de 50% et 100%de sable recyclé.	80
Figure III. 16 : Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur la résistance à la traction par flexion des MAP à base de 50% et 100%de sable recyclé.	81
Figure III. 17: Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur l'absorption capillaire des MAP à base de 50% et 100%de sable recyclé.	82
Figure III. 19 : Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur la porosité des MAP à base de 50% et 100%de sable recyclé.	83

LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS

- CEM I : Ciment Portland
- CEM II : Ciment Portland composé (avec ajouts)
- CEM III : Ciment de haut fourneau
- CEM IV : Ciment pouzzolanique
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres
- Al_2O_3 : Alumine
- C_2S : Silicate bicalcique (bélite)
- C_3A : Aluminate tricalcique
- C_3S : Silicate tricalcique (alite)
- C_4AF : Ferro-aluminate tétracalcique
- CaO : Oxyde de calcium
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Chaux hydratée
- CaCO_3 : Carbonate de calcium
- Cl : Chlore
- C_{abs} : Coefficient d'absorption
- CSH : Silicate de calcium hydraté
- CO_2 : Dioxyde de carbone
- Fe_2O_3 : Oxyde de fer
- GGBFS : Laitier granulé de haut fourneau moulu
- K_2O : Oxyde de potassium
- MgO : Oxyde de magnésium
- Na_2O : Oxyde de sodium
- SiO_2 : Dioxyde de silicium
- SP : Superplastifiant
- MAP : Mortier autoplaçant
- ITZ : Interfacial Transition Zone (Zone de transition interfaciale)
- SSA : Sewage Sludge Ash, Cendre de boues d'épuration
- SBR : Sable de béton recyclé

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur du génie civil joue un rôle fondamental dans le développement des infrastructures modernes, mais il est également l'un des grands contributeurs à la pollution environnementale, aux émissions massives de gaz à effet de serre, à l'exploitation intensive de ressources naturelles, à la production de déchets de chantier, dont l'industrie du ciment est actuellement responsable d'environ 8% de toutes les émissions de CO₂ dans l'atmosphère. L'utilisation de granulats naturels qui représentent environ 75 à 80 % du volume total du béton, a également une influence sur l'environnement, car l'extraction de roches naturelles affecte considérablement l'écosystème naturel. En plus, l'industrie de la construction et de la démolition produit 46 % de la quantité totale des déchets produits en Europe, 820 millions de tonnes de résidus dont environ 85 % correspondent aux matériaux à base de béton[1].

Dans le contexte de développement durable et de préservation de ressources naturelles, le secteur du bâtiment et des travaux publics en général a adopté des pratiques écoresponsables. Parmi celles-ci, le recyclage de déchets de construction, notamment le béton, représente une solution prometteuse : les GR de béton démolé offrent une alternative aux GN ce qui permettent non seulement de valoriser les déchets de construction, mais aussi de limiter l'extraction de ressources naturelles. Selon les estimations, l'utilisation de GR en remplacement des GN pour la construction de béton pourrait permettre d'économiser 10 % ~ 20 % du coût des matériaux. En outre, une évaluation du cycle de vie sur l'impact environnemental des granulats recyclés à Hong Kong a révélé que le recyclage des granulats grossiers provenant des déchets de construction et de démolition peut réduire de 65 % les émissions de gaz à effet de serre et économiser 58 % de la consommation d'énergie non renouvelable par rapport à la production de béton à base de granulats naturels. Néanmoins, l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques des bétons de GR, résistance à la compression, résistance à la traction et à la flexion et la durabilité sont généralement inférieures à celles du

béton de granulats naturels ce qui limite l'utilisation de ces granulats, grâce au mortier adhérent. [2].

Parmi les solutions utilisées pour améliorer les performances des bétons recyclés est l'addition des ajouts cimentaires, Tels que les cendres volantes, les fumées de silice et le laitier de haut fourneau. Ces matériaux permettent non seulement d'optimiser les performances mécaniques et la durabilité, mais aussi de réduire l'impact environnemental, qu'il soit écologique ou économique, on peut remplacer une quantité de ciment avec un seul ajout (binaire) jusqu'à trois ajouts (quaternaire), les ciments quaternaires sont effectivement moins étudiés par rapport au ciment binaire et ternaire. L'utilisation de ces ciments est particulièrement intéressantes dans le contexte de construction durable, ils offrent une alternative plus écologique aux ciments binaire et ternaire tout en maintenant des performances élevées dans divers applications.[3], [4], [5].

Pour atteindre notre objectif, Cette recherche est structurée en trois chapitres principaux. Le premier chapitre présente la partie bibliographique où sont abordées les théories, les travaux précédents et les références essentielles qui alimentent le cadre théorique de la recherche. Le deuxième chapitre décrit : essais et matériaux, c'est-à-dire les méthodes expérimentales, les outils utilisés pour cette recherche ainsi que les conditions dans lesquelles les expériences ont été menées. Le troisième chapitre expose les résultats et les discussions, où les données obtenues sont analysées et comparées avec les hypothèses et les résultats d'autres travaux de recherche. Cette partie permet de dégager une conclusion générale qui résume les principaux résultats de la partie expérimentale et des perspectives pour futur travaux de recherche.

CHAPITRE I :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, une revue bibliographie sur le mortier autoplaçant, ses éléments constitutifs et ses caractéristiques en présentée. Nous avons aussi discuté des procédures de recyclage en général, en portant une attention spéciale au recyclage des granulats de béton. Nous aborderons également quelques additifs cimentaires tels que le cendre de bouts, laitier et calcaire en expliquant leurs avantages et leur impact sur le comportement des mortiers autoplaçants. Une attention particulière et donnée à l'effet combine des ajouts cimentaires sur les propriétés à l'état frais et durci des mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés.

I.2 Généralité sur les mortiers

En général, une construction est réalisée à l'aide des composants, donc il est nécessaire d'assurer une connexion ou de les protéger avec un revêtement, des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, et ainsi de suite.

Toutes ces opérations se font à l'aide d'un mortier, on appelle mortier un mélange de liant (ciment, plâtre ou chaux), de sable humide à une quantité appropriée d'eau, auquel peuvent être ajoutés des adjuvants et des pigments, qui se différencie du béton par l'absence de gravillons.

$$(\text{Sable} + \text{Liant}) + \text{Eau} = \text{Mortier}$$

❖ Le mortier a plusieurs rôles essentiels :

- assurer la liaison et l'homogénéité des éléments de maçonnerie ;
- protéger les constructions contre l'humidité provenant des intempéries ou remontant du sol ;
- garantir la stabilité de l'ouvrage ;
- être utilisé comme matériau de base pour la production de blocs manufacturés, de carreaux, de tuyaux et Plusieurs composants moulés ;
- renforce certains sols de fondation par injections [6] ;



Figure I. 1: Mélange de mortier [6].

I.2.1 Définition de mortier autoplacants :

Les mortiers autoplacants « MAP » se caractérisent par leur fluidité exceptionnelle et leur capacité de remplissage élevée, tout en conservant une stabilité remarquable et assurant d'excellentes performances mécaniques ainsi qu'une durabilité accrue.

En effet, les études réalisées ces dernières années indiquent que les MAP sont formulés différemment des mortiers traditionnels : ils comprennent davantage d'éléments fins qui doivent nécessairement inclure au moins un adjuvant minéral, une forte concentration en superplastifiant et souvent un agent de viscosité [7].

I.2.2 Constituants des mortiers autoplaçants

I.2.2.1 Le ciment

Le ciment est une poudre finement moulue produit du clinker broyé à très haute température (1450 °C) de 80 % de calcaire et 20 % d'argile. Tous les ciments qui se conforment à la norme NF EN 197-1 sont employables pour la production du béton autoplaçant (BAP) [8].

I.2.2.1.1 Constituants du ciment

✓ Clinker

D'après la norme européenne NF EN 197-1, le clinker est un matériau obtenu par calcination d'un mélange d'acide silicique, d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux. Le rapport massique $(CaO)/(SiO_2)$ ne doit pas être inférieur à 2.0, la teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5 % en masse[8].

Tableau I. 1: Teneur moyenne des oxydes constitutifs du clinker[9].

Oxydes constitutifs	Teneur limites (%)	Valeur moyenne (%)
CaO	60 à 69	65
SiO ₂	18 à 24	21
Al ₂ O ₃	4 à 8	6
Fe ₂ O ₃	1 à 8	3
MgO	0 à 5	2
Alcali	0 à 2	1
SO ₃	0 à 3	1

✓ Sulfate du calcium

L'ajout de sulfate de calcium est nécessaire pour améliorer la qualité de la production de ciment.

Selon la norme NF EN 197-1, le sulfate de calcium est un retardateur de prise, c'est un composant secondaire particulièrement choisi représentant 5 % de volume de ciment, qui est le gypse (sulfate de calcium di hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou sulfate de calcium hydroxylé CaSO_4) [4].

I.2.2.1.2 Classification du ciment

✓ Selon leur composition

Les cinq types de ciments utilisés dans le domaine de construction de génie civil sont donnés dans le Tableau I.2 et classés comme suit :

- CEM I: Ciment Portland
- CEM II: Ciment Portland composé
- CEM III : Ciment de haut fourneau
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique
- CEM V : Ciment composé

Tableau I. 2: Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301[6].

Désignation	Types de ciment	Teneur en Clinker	Teneur en % en constituants	Matière secondaire
CPA – CEMI	Ciment portland	95 à 100%		0 à 5 %
CPJ –CEM II /A CPJ –CEM II /B	Ciment portland composé	80 à 94% 65 à 79%	-de 6 à 20 % (fumées de silice est limitée à 10 %) - de 21 à 35 % comme ci-dessus	0 à 5 %
CHF-CEMIII/A CHF-CEMIII/B CLK-CEMIII/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	-35 à 65 % de laitier de haut fourneau -66 à 80 % de laitier de haut fourneau -81 à 95 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
CPZ - CEMIV/A CPZ – CEIV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90 % 45 à 64 %	-10 à 35 % de pouzzolane, cendre siliceuse ou fumée de silice. 10 % -36 à 55 % comme ci-dessus	0 à 5 %
CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B	Ciment au laitier et à la cendre	20 à 39 % 40 à 64 %	-18 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30 % de cendre siliceuse ou de pouzzolane -31 à 50 % comme ci-dessus	0 à 5 %

✓ Selon leur résistance :

La classe de résistance de ciment, c'est la mesure de la résistance à la compression (exprimée en MPa), après la conservation des éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm dans l'eau à 20°C pendant 28 jours. Il existe trois classes de résistance d'un ciment : 32,5, 42,5 et 52,5. À chaque classe de résistance courante correspondent deux classes de résistance à court terme, une classe de résistance ordinaire notée N et une classe de résistance à court terme élevée notée R [6].

Tableau I. 3: Classes de résistance des ciments Portland [6].

Classe de résistance	Résistance à la compression (Mpa)				Temps de début de prise en (Min)	Stabilité (Expansion) en mm
	Résistance à court terme		Résistance à long terme			
	2 jours	7jours	28jours			
32 .5N	-	16 ,00	32,5	52 ,5	75	10
32 .5R	10 ,00	-				
42 .5N	10,00	-	42 ,5	62,5	60	
42 .5R	20 ,00	-				
52.5N	20,00	-	52 ,5		45	
52 .5R	30,00	-				

I.2.2.1.3 Ciments en Algérie

Le Tableau I. 4 représente les ciments utilisés dans l'Algérie

Tableau I.4: les ciments utilisés dans l'Algérie [10].

Type de ciment	Utilisation principale	Producteurs principaux
Ciment Portland	Béton armé, béton précontraint	Lafarge, GICA
Ciment Portland composé	Travaux courants, mortiers, bétons armés	Lafarge, GICA
Ciment Portland composé	Maçonnerie, chapes, béton non armé	Biskria, GICA, Amouda
Ciment haut fourneau	Ouvrages en milieu agressif (sulfates, mer)	Lafarge (Skikda)
Ciment pouzzolanique	Ouvrages hydrauliques, assainissement	Cilas (Biskra), GICA
Ciment composé (multi ajouts)	Grandes structures, ouvrages durables	Lafarge, GICA
Ciment Portland composé	Béton courants, chapes, fondations	Divers producteurs
Ciment Portland artificiel	Ouvrages d'art, structures à haute résistance	GICA (Chlef), Lafarge
Ciment blanc	Béton décoratif, parements architecturaux	Lafarge (M'sila), Cilas
Ciment naturel (rapide)	Fixation rapide, scellement	Importé ou rare localement

I.2.2.2 Le sable

Les agrégats de taille réduite dérivant de la désagrégation des roches sont appelés 'sables', et ceux-ci sont chimiquement inertes. Le sable, selon ses caractéristiques, joue un rôle essentiel dans la composition du béton et du mortier, il contribue à leur résistance et assure la cohésion du mélange.

Le sable doit contenir un mélange de grains fins et moyens pour obtenir une composition équilibrée ; il doit être propre et avoir une bonne granulométrie[11].

I.2.2.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage désigne la quantité totale d'eau utilisée pour la fabrication du béton ou du mortier. Elle remplit deux rôles essentiels : elle confère au mortier sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et garantit l'hydratation des particules de ciment pour une prise optimale.

Puisque l'eau joue un rôle crucial dans la préparation du mortier. Il est important de noter que toutes les sources d'eau ne sont pas adaptées à cet usage. Certaines peuvent contenir des impuretés excessives qui altèrent ses caractéristiques physiques et mécaniques (durcissement et consistance), ses propriétés esthétiques (taches, efflorescences), ainsi que sa durabilité (corrosion des barres d'armature, stabilité du mortier) [12].

I.2.2.4 Super-plastifiant :

La fonction principale de l'adjuvant superplastifiant est de former des agrégats dans les particules de ciment, compensant ainsi la répulsion électrostatique et/ou stérique à la surface des particules. Grâce à la longue chaîne moléculaire, l'eau emprisonnée par ces agrégats est libérée, facilitant ainsi le processus de mise en forme du béton et permettant la réalisation de bétons à très haute consistance, avec des rapports eau/ciment faibles[13].

I.2.3 Formulation des mortiers autoplaçants et leurs caractérisations

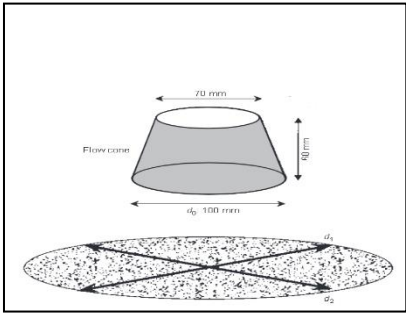
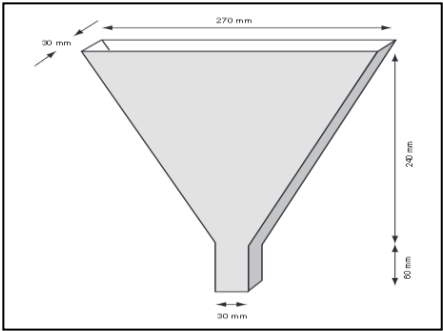
I.2.3.1 Méthode de Formulation Okamura

C'est une méthode consiste à déterminer le dosage de l'eau et du superplastifiant dans les mortiers autoplaçants. Elle est basée sur :

- Limiter la teneur en granulats : Le frottement entre les granulats déduit l'écoulement du mortier, donc l'optimisation de la pâte se fait sur mortier contenant une proportion de 40 % de sable.
- Utiliser un superplastifiant : La production des bétons ou des mortiers autoplacants nécessite l'usage d'un réducteur d'eau pour avoir une bonne fluidité.
- Un faible rapport eau/ciment : la quantité de ciment utilisée est déterminée par les caractères de résistance [11], [12].

I.2.3.2 Caractérisation des mortiers autoplacants à l'état frais

Tableau I. 5 : Caractérisation des mortiers autoplacants à l'état frais [11], [12].

Essai d'étalement au mini cône	Figure de l'essai
Selon l'EFNARC, Le diamètre de la galette du mortier doit être compris entre 270 et 330 mm pour avoir un mortier auto-plaçant	
Essai d'entonnoir en V	Figure de l'essai
Selon l'EFNARC, Le temps d'écoulement compris entre 6 et 10 s produit un MAP réussi	

I.3 Recyclage des déchets de construction et démolition

I.3.1 Intérêt environnemental du recyclage

Le monde subit de nombreux changements au niveau de l'environnement, Chaque étape du processus des projets de construction à un mauvais impact sur l'environnement, tel que les processus d'extraction des matériaux, le transport de ces matériaux vers le site de construction, le processus de construction lui-même et le processus d'enlèvement et d'élimination des déchets qui suit l'achèvement du projet. Donc il est essentiel de recycler ces déchets, en réduisant la consommation de matières premières et en préservant les ressources naturelles. Chaque tonne de granulat recyclée peut préserver 700 kilogrammes de pétrole brut, dans le cas d'aluminium, le recyclage d'un kilogramme peut économiser environ 8 kilogrammes de bauxite et 4 kilogrammes de produits chimiques, en plus de 14 kilowatts-heures d'électricité. Le recyclage du carton peut économiser 2,5 tonnes de bois pour chaque tonne recyclée, aussi, le recyclage du papier réduit considérablement la consommation d'eau, d'électricité et de bois. De plus, le recyclage réduit le volume des déchets produits, limitant ainsi la pollution de l'air et des Sols, et protégeant ainsi l'environnement et la santé publique. Certaines substances prennent très longtemps à se dégrader [14].

Tableau I. 6 : Consommation énergétique des granulats naturels et recyclés[15]

	Granulats naturels Par extraction	Granulats naturels Par concassage	Granulats recyclés
Énergie par combustion [MJ]	20	120	40
Énergie électrique [MJ]	9	50	15
Énergie totale [MJ]	29	170 - 27.77	29.15

I.3.2 Production des granulats recyclés

Le granulat recyclé a été défini comme un matériau produit par le concassage de matériaux non organiques ou minéraux précédemment utilisés dans les processus de construction pour protéger l'environnement, conformément à la norme UNI EN ISO 14040 : 2006, il est possible de réutiliser les déchets de béton dans la préparation de nouveaux matériaux de construction. L'origine de ces granulats résultent des opérations de démolition d'infrastructures en béton et sont disponibles dans différentes tailles. Le processus utilisé pour produire ces granulats comprend une étape de lavage pour éliminer tout matériau indésirable, ainsi que des étapes de concassage, de criblage et de broyage. Lorsque le béton démoli arrive sur le site, les agrégats produits sont séparés en fonction de leur taille lors du premier

processus de concassage. Les éléments les plus gros sont conservés pour être utilisés dans la fabrication de granulats pour le béton, et les éléments plus fins sont réservés pour une utilisation dans les travaux routiers.

Les éléments les plus gros subissent un processus de concassage secondaire qui permet de réduire la granulométrie des débris de béton obtenus lors de la première étape, selon le type de concasseur, on obtient des granulats recyclés réutilisables comme substitut des granulats naturels. Pour assurer le contrôle de la production de granulats recyclés, le producteur doit disposer d'un plan d'acceptation comprenant au moins : les critères d'acceptation ou de refus des matières premières ainsi que les méthodes et moyens de contrôle de tous les éléments constitutifs des matières premières livrées [16].

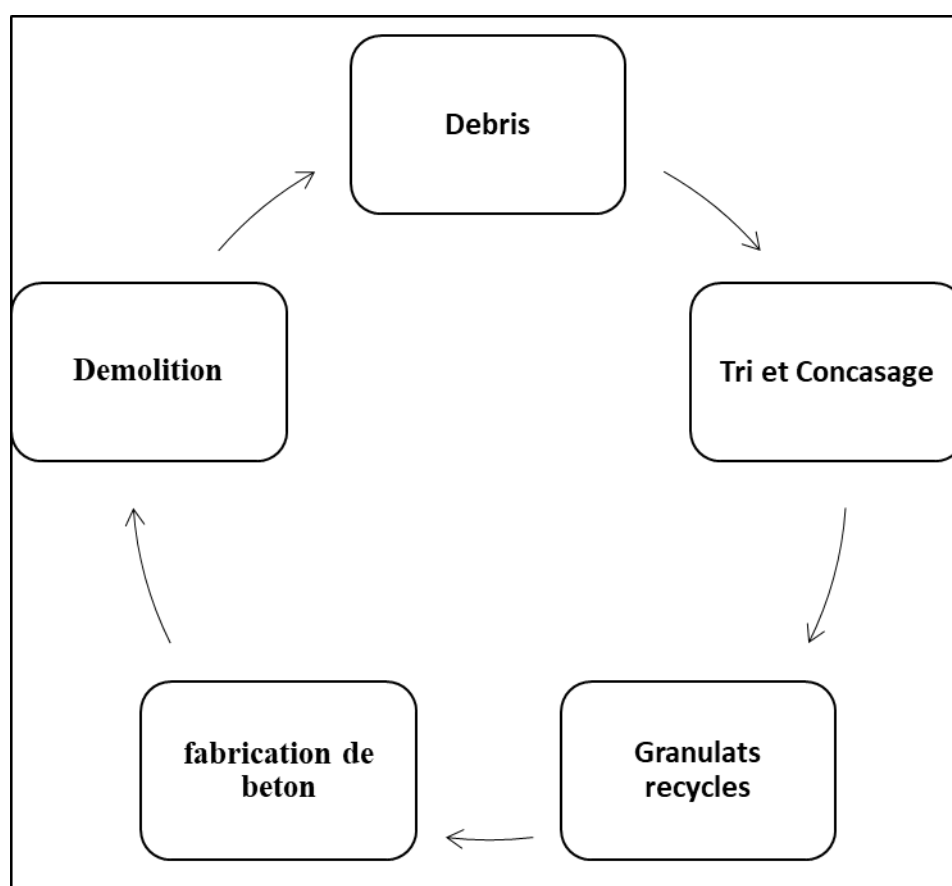


Figure I. 2 :Les étapes de production des granulats recyclées [16].

I.3.3 Caractéristiques des granulats recyclés

I.3.3.1 Absorption d'eau et densité

Selon les études présentes dans le tableau on peut dire que les granulats naturels sont plus denses et moins absorbent d'eau par rapport aux granulats recyclés à cause de la présence d'une quantité additionnel de mortier l'ancien attaché aux granulats d'origine.

Tableau I.7: La densité et l'absorption d'eau du sable recyclé et du sable naturel

Auteurs	Granulats et classe	Absorption d'eau en (%)	Densité kg/m3
José Gómez-Soberón.[17]	Sable Recyclé 0/5	8,16	2170
	Sable Naturel 0/5	1,49	2570
Kheira et al[18]	Sable recyclé0/3	1,8	2600
	Sable naturel 0/1	0 ,96	2680
Shaikh et al[19].	Sable recyclé	5 ,6	-
	Sable naturel	0,4	-
Al Ajmani et al.[20]	Sable Naturel	-	2356
	Sable recyclé	-	2408,7
	Sable recyclé	-	2389,9
	Sable recyclé	-	2259, 5
Zengfeng et al.[21]	Substitution du sable recyclé augmente (0%, 10 %, 20 %, 30 %, 50 % et 100 %)	-	Densité moindre

I.3.3.2 Morphologie

La morphologie de granulats recyclés est un élément obligatoire qui a un effet très important sur l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques du béton. Plusieurs études ont analysé la diversité entre les agrégats recyclés et les agrégats naturels en ce qui concerne leurs caractéristiques physiques, mais seules quelques recherches ont été menées sur les caractéristiques morphologiques des agrégats recyclés. [22], Selon deodonne. [23] et la Figure I.3, Les granulats recyclés présente une forme angulaire d'un côté et allongée de l'autre, circularité moindre que les granulats naturels à cause de la présence d'une quantité supplémentaire de pâte apportée par l'ancien mortier attaché aux granulats d'origine.

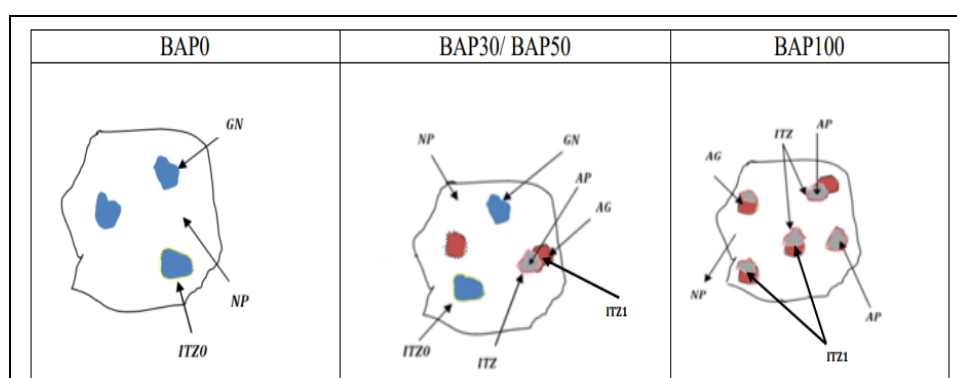


Figure I. 3: Composition des BAP en fonction du taux de remplacement des granulats recyclés [18].

NP: nouvelle pate

AP : ancienne pâte

GN : granulat naturel

AG : anciens granulats

ITZO : Zone de transition inter faciale entre NP et GN

ITZ : Zone interfacial de transition entre NP et AP

ITZ1 : Zone interfacial de transition entre AP et AG

I.3.3.3 Granulométrie

D'après les résultats de tableau I.8 ont remarqué que le sable recyclé est un sable grossier. Par rapport au sable naturel, présente les études granulométriques des sables (naturel, recyclé et normal).

Tableau I. 8: Courbes granulométriques des sables utilisés

Référence	Type de granulat	Module de finesse (MF)	Observations
Evangelista et Brito.[24]	Recyclé (fin)	3,1	Granulat plus fin, issu de béton concassé.
Evangelista et Brito.[24]	Naturel (sable)	2,6	Sable naturel lavé, plus homogène.
Silva et al.[25]	Recyclé (mélangé)	3,4	Contient mortier, brique, béton.
Kou & Poon .[26]	Recyclé (coarse + fine)	3,3	Présence de pâte de ciment résiduelle.
Pedro et al. [27]	Naturel (concassé granit)	2,7	Granulat de carrière avec distribution contrôlée.

I.3.3.4 Teneur on fines

Tableau I.9 montre que les surfaces spécifiques des granulats naturelles sont moins 4 fois que les granulats recyclés.

Tableau I. 9 : Surface spécifique des fines de granulats recyclés

Type de granulats	Surface spécifique m/g	Auteurs
SN (japon)	1.83	Fumoto et Yamada.[28]
SN (chine)	0.82	
SN broyé calcaire	0.74	
SR plateforme	4.08	
Démolition	4.42	
SR plateforme(France)	8.2	Zhao et al.[29]
SR laboratoire (France)	7.5	

I.3.3.4.1 Teneur en air

Al Ajmani et al. [20], ont découvert que les nombres de la teneur en air varient de 1,3 à 1,7 % avec la limite inférieure pour le BCHR (béton conventionnel à haute résistance) et qu'elles ont agrandi avec l'emploi des granulats recyclés (GR). Ce qui peut être expliqué par la présence de pores dans l'agrégat, ainsi que leurs formes irrégulières.

Tableau I.10: Valeurs de la teneur en air [20].

Les granulats	BCHR	GR 20	GR 50	GR 80
Teneur en air (%)	1,3	1,7	1,6	1,6

Zhao et al.[30] aussi ont trouvé que Lorsque le taux de remplacement du sable recyclé augmente MR0, MR10, MR20, MR30, MR50 et MR100, la quantité d'air occlus dans le mortier à l'état frais augmente 1,4 %, 1,8 %, 2,4 %, 3,0 % et 7,0 %, respectivement, Comme l'illustre la figure I.4.

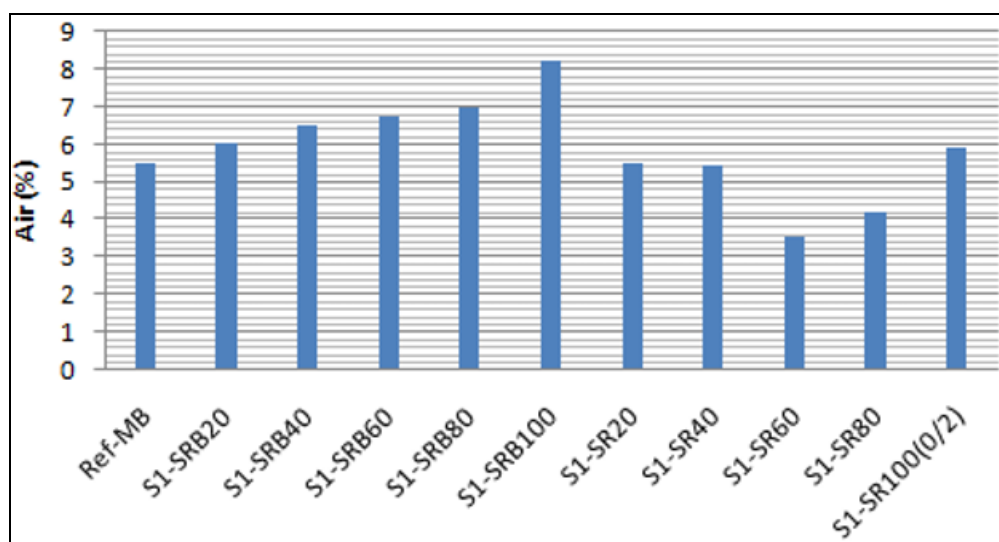


Figure I. 4: Teneur en air des différents mortiers [30].

Le tableau I.11 et la figure I.5, montrent que l'assemblage chimique des GBR est liée à la composition initiale du béton recyclé, par contre, Angulo et al.[31], ont indiqué que la composition chimique est spécialement influencée par la taille des particules et non par leur origine géographique.

Tableau I.11: Compositions chimiques des sables recyclés.

Auteurs	Sable et fraction analyse	Composition chimique
Angulo et al.[31]	Déchets de Construction Gravier, sable $\leq 37 \mu\text{m}$	SiO ₂ (48.0–84.2%), Al ₂ O ₃ (5.0–17.2%), CaO (2.4–13.9%)
Bianchini et al.[29]	Déchets de Construction (0.125–0.075 mm ; <0.075 mm)	SiO ₂ 39.9%, Al ₂ O ₃ 68.3%, Fe ₂ O ₃ 3.7% et CaO 20.76%
Lotfi and Rem.[32]	Déchets de Construction SBR $\leq 125 \mu\text{m}$	SiO ₂ 41.2%, Al ₂ O ₃ 6.4%, Fe ₂ O ₃ 3.0% et CaO 35.2%

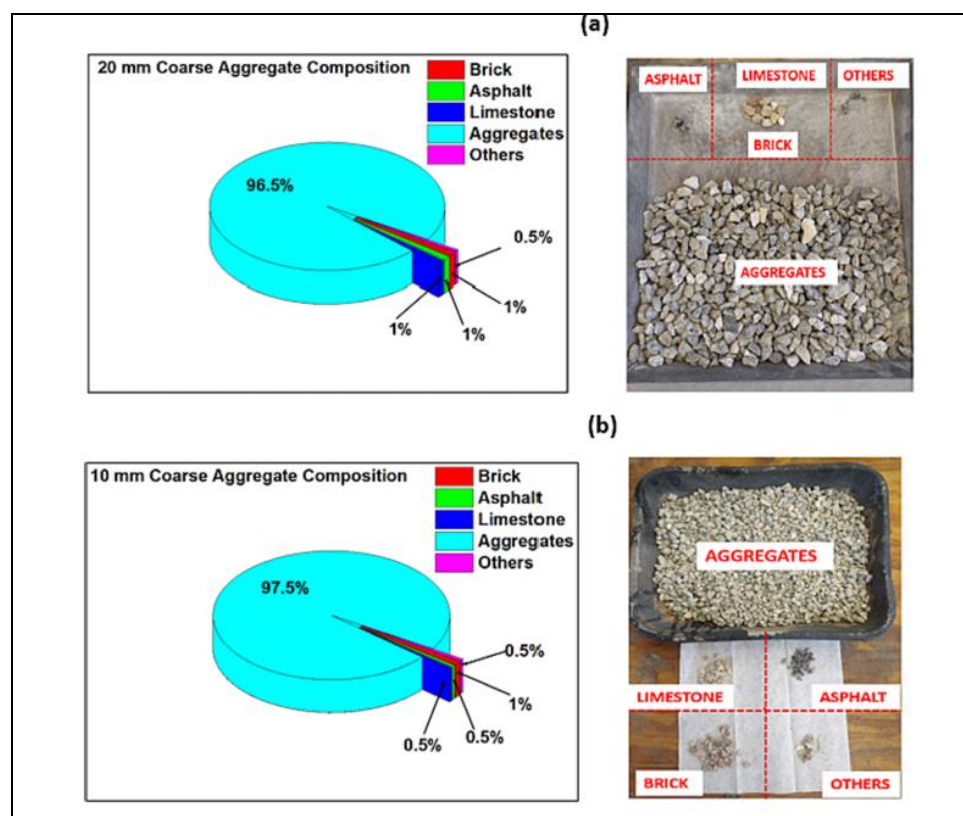


Figure I. 5 :Composition pour (a) 20 mm de gros granulats, (b) 10 mm de gros granulats[33].

I.4 Ajouts cimentaires

I.4.1 Définition des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des ajouts utilisés en rapports variables lors de la phase finale du processus de production du ciment, sont des matériaux qui peuvent améliorer les performances du mortier frais, du mortier hydraulique ou pouzzolanique ou des deux lorsqu'ils sont combinés avec du ciment Portland. Des exemples courants sont Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice. On peut utiliser un seul ajout (binaire) jusqu'à trois ajouts (quaternaire). Peuvent être naturels ou artificiels, inerte Ou actifs, les ajouts peuvent travailler au tant que matériau hydraulique, hydraulique latent et Pouzzolanique, ou sous forme de fillers [31].

Tableau I. 12: Classification des ajouts selon leur réactivité [30].

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux chaux hydraulique
Hydraulique latent		Laitier granulé, centre de volantes riche en calcium
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvres en calcium, pouzzolanes naturelles
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (calcaire...)

I.4.2 Importance des ajouts cimentaires dans l'industrie du béton

Pour comprendre l'importance de l'utilisation des ajouts cimentaires, soyons touchés par la situation environnementale et économique de notre environnement. Plusieurs études ont montré que l'utilisation du ciment a un effet défavorable. Par exemple, la préparation d'une tonne de ciment génère environ 0.85 tonne de CO₂, pour cette raison l'utilisation de ciment est responsable presque de 7% des émissions de ce gaz à effet de serre (CO₂), chaque 23000 millions de tonne de CO₂ sont produit chaque année par les activités humaines, la production

d'une tonne de ciment implique 2,6 et 2,88 tonnes de matières premières (argile et calcaire) [34], [35].

Aussi, les importations de clinker en Algérie qui ont augmenté entre 2015 et 2016 et arrivant à 601 109 tonnes, soit 35,42 millions de dollars, à 1,24 million de tonnes soit 59,51 millions de dollars. Le coût des 3,5 millions d'importations de ciment en 2016 était de 260 millions de dollars sur la facture, mais les 6 millions d'importations de ciment en 2015 s'élevaient à 448 millions de dollars. [36].

La solution idéale ce n'est pas d'éviter la construction de génie civil, mais de trouver des autres solutions. Par exemple, nous pouvons éliminer notre impact environnemental, minimiser l'utilisation de ciment pure et commencer à utiliser les substitutions. Pour cela, les ajouts cimentaire jouent un rôle très important dans la résolution de ces difficultés qui sont la réduction de l'émission de CO₂ et l'élimination des sous-produits de l'industrie, augmenter la maniabilité et réduire la demande en eau à l'état frais, améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité à l'état durci [37].

I.4.3 Différents types des ajouts cimentaires

I.4.3.1 Pouzzolanes :

Les Pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silicium (SiO₂) et en alumine (Al₂O₃) de 70 % à 80 %. Les ciments pouzzolaniques sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques avec du ciment Portland. Le rapport clinker/ajouts pouzzolaniques varie en fonction de l'activité de l'ajout. La réactivité de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃) leur permet de réagir facilement avec la portlandite [Ca(OH)₂] résultant de la réaction de l'hydratation du ciment. Cette réaction produit du silicate de calcium hydraté (CSH) et de l'aluminate de calcium hydraté (CAH) qui contribuent à la résistance et à la durabilité du béton [38].

I.4.3.2 Calcaire

C'est des fines obtenues par fragmentation d'une roche d'une couleur varie entre blanc, gris, aux jeunes brunes et même noire, qui dépend des impuretés et de la teneur en minéraux. Le calcaire est formé par du carbonate de calcium, fait effervescence à froid, avec les acides.

Suivant leur origine les calcaires divise en :

- Les calcaires d'étriques.
- Les calcaires d'origine chimiques.
- Calcaire dolomitique et dolomite. [34].

Les fillers calcaires peuvent jouer nombreux rôles, mais il faut noter que les fillers calcaires n'ont pas la même réactivité que le ciment. Le calcaire peut participer à une réaction de carbonatation, qui est généralement moins efficace pour former des hydrates durables et augmenter la résistance à long terme ; elle accélère le début d'hydratation, ce qui entraîne une augmentation de la résistance à jeune âge, et la consistance, plus le pourcentage de calcaire est élevé, plus la demande en eau nécessaire pour avoir une pâte à une consistance normalisée. L'accroissement de la finesse de filler de calcaire réduit le temps de prise de mélange, Cette réduction est due à l'accélération des réactions de l'hydratation du ciment [39].

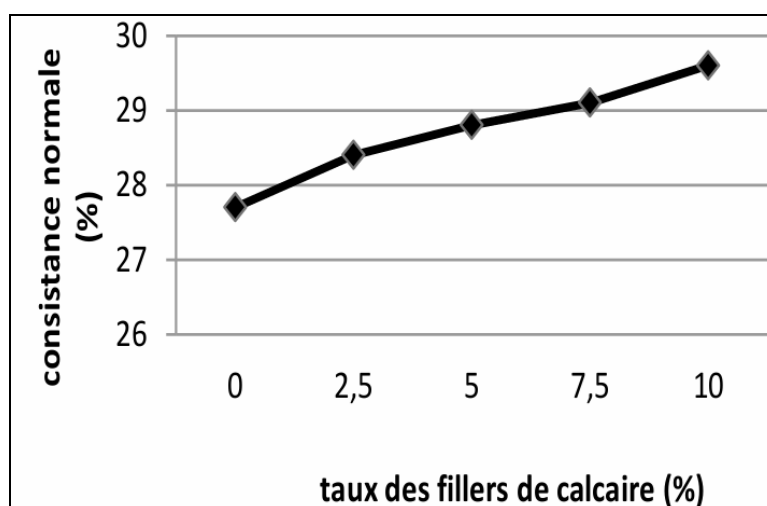


Figure I. 6: Variations de la consistance normale des ciments étudiés (CRST et CRS+FC)[39].

Tableau I3 : constituant de filaire calcaire[39].

Composant	SiO ₂	CaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Cl-
Contenue (%)	24.1	63.3	0.816	0.96	0.258	1.23	4.66	4.20	0.25	0.175

I.4.3.3 Méta kaolin :

Métakaolin est une poudre de grande surface spécifique obtenue par calcination, broyage ou le contraire d'une argile composée généralement de kaolinite connue sous le nom de kaolin (c'est un minéral argileux), Il existe deux types de métakaolins : ceux issus d'une calcination

en four horizontal et ceux issus d'une calcination flash. La pouzzolanité du cet ajout est comme de toute autre pouzzolane, réside dans sa capacité à réagir, en présence d'eau. La a degré de La température de calcination de Méta kaolin dépend du degré de pureté du kaolin, elle peut atteindre 1200 °C[40], [41].

I.4.3.4 La fumée de silice

La « fumée de silice », « fumée de silice amorphe », ou « fumée condensée de silice » sont des ultrafines composent de particules extrêmement fines sphériques (avec une taille moyenne d'environ 1µm) qui renferment une teneur élevée en silice amorphe. Les particules de quartz de grande pureté sont extraites par le charbon dans les fours à arc électriques utilisés pour la fabrication de silicium et d'alliages Ferro silicium [38].

I.4.3.5 Le laitier de haut fourneau :

Le laitier est une poudre grise ou blanche, composé essentiellement de chaux (CaO), de magnésie (MgO), de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃). Il peut se présenter sous deux formes minéralogiques différentes : le laitier vitrifié et le laitier cristallisé. Le laitier vitrifié obtenu par refroidissement rapide, possède une structure vitreuse et une hydraulité latente, et l'autre obtenu par refroidissement lent à l'air. A un aspect minéralogique stable et une possibilité hydraulique modeste. Ces deux formes diffèrent sensiblement en termes de cristallographie et de réactivité chimique, ce qui influence les propriétés des matériaux obtenus et donc automatiquement leur utilisation. Les propriétés mécaniques remarquables a l'état durci sont grâce au rôle chimique du laitier qui consiste à améliorer la microstructure due au Ca(OH)₂ dégagée par l'hydratation du laitier. Donc automatiquement un deuxième {CSH}. Le laitier est un ajout cimentaire aussi pouzzolanique due à la présence de SiO₂ et Al₂O₃ (tableau I.14) [9].

Tableau I. 14: Les constituent chimique de laitier [38]

Oxydes	Laitier français (%)	Laitier USA (%)	Laitier algérien (%)
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4	0,3 à 20	2,00
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
S	1,5	-	0,15
MgO	6	3 à 12	4,7

I.4.3.6 Les cendres volantes

C'est des Fines essentiellement composée de particules vitreuses de forme sphérique, résultant de la combustion du charbon pulvérisé avec ou sans combustible secondaire. Ces cendres se distinguent par leurs propriétés pouzzolaniques et sont principalement composées de SiO₂ et Al₂O₃, où la proportion active de SiO₂ doit représenter au moins 25 % du poids. Selon à la norme NF EN 450, Les cendres volantes sont classées comme des additions de type II selon la figure représente les compositions chimiques de cendres volantes [40].

Tableau I. 15: Compositions chimiques de cendres volantes [43].

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
%	43 à 54	22 à 32	1 à 8	4 à 15	1 à 3	0,5 à 1	2 à 5%	0,2 à 2

I.4.3.7 Les cendres de boues

Les cendres de boues sont des sous-produits contenant des boues d'épuration déshydratées, ayant une faible sphéricité, dont les grains ont un diamètre inférieur à 100 µm. Elles présentent également un caractère pouzzolanique riche en silicium et en aluminates, et peuvent être aussi utilisées avec du ciment selon un ratio fixe de 4:1 pour cendres : ciment, pour améliorer les propriétés physiques et la résistance. Il a été trouvé que La résistance à la compression non confinée des éprouvettes avec l'ajout de cendres/ciment est d'environ 3 à 7 fois supérieure à celle du sol non traité. En outre, le gonflement est également réduit dans une fourchette de 10

à 60 %, d'un accroissement constant de cendres de boues produites. Le manque de place en centre d'enfouissement rend le stockage apparaît comme une filière de gestion non satisfaisante [41].

En Algérie la production de cendre de boues est estimée à plus de 400 ,000 de tonnes de matière sèche (MS) par an, ça volume est amené à augmenter avec la construction et la mise en marche de nouvelles STEPS, la préparation de boues ce fait par les étapes suivantes :

- Etalé la boue fraîche à l'air libre pour le séchage, environ 3 à 4 jours.
- Incinération de la boue à 1000°C dans un four industriel ECEFERAL (Alger).
- Broyage de cendre de boue a l'Etat sèche.
- Tamisage de cendre de boue broyé avec le tamis de 0.08mm [42].

La figure présente Courbe de l'analyse granulométrique par laser de la boue effectuée au laboratoire de Bab Ezzouar (USTHB)

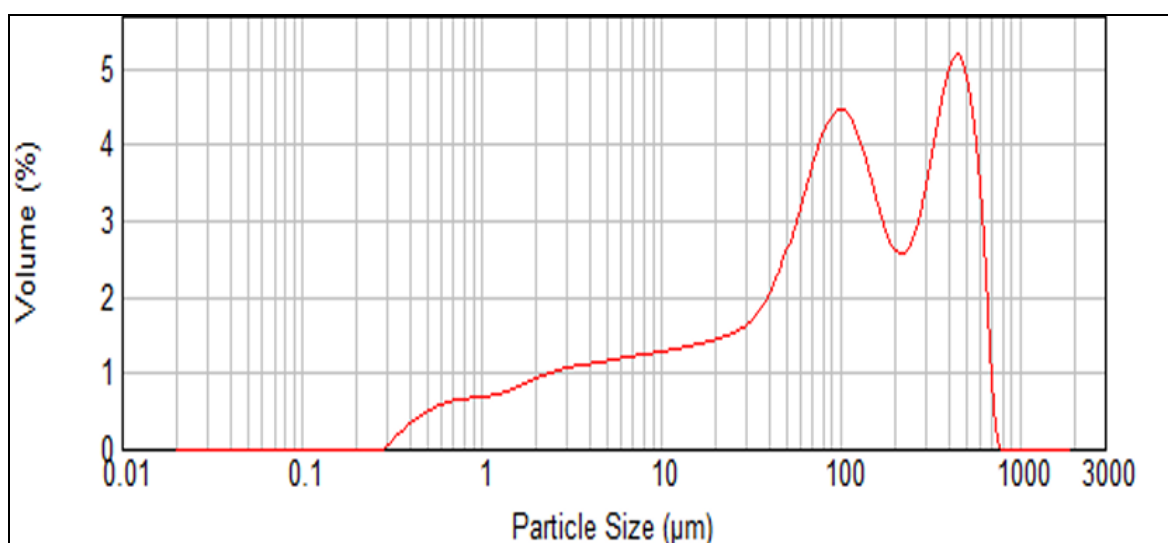


Figure I. 7 : l'analyse granulométrique par laser de la boue effectuée au laboratoire de Bab Ezzouar (USTHB) [42].

Tableau I. 16: Analyse chimique de cendre de boues [42].

Oxydes Content (%)	Content (%)
SiO ₂	34.94
Al ₂ O ₃	26.65
Fe ₂ O ₃	5.40
CaO	5.78
SO ₃	5.78
K ₂ O	0.74
MgO	3.51
P ₂ O	5.21
SrO	0.01
MnO	0.04
TiO ₂	1.20

I.4.4 Les inconvénients d'utilisation des ajouts :

- Retard de prise.
- La résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Durcissement plus long.
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher [35].

I.5 Influence de ciment binaire, ternaire et quaternaire sur les propriétés du béton ou mortier à base de granulats recyclés

I.5.1 Ouvrabilité :

Les résultats de Guessoum et al. [43] montrent qu'à 15 min après le malaxage, il n'y a pas un grand changement d'ouvrabilité du béton autoplaçant à base de granulats recyclés et calcaire, par rapport au béton autoplaçant témoin qui contient seulement des granulats recyclés naturels (0% RA). Cette conservation de l'ouvrabilité peut être attribuée à la présence de superplastifiants. Par contre, après 45 min de malaxage, le béton à base de 100 % de granulats recyclés perd sa fluidité. Ce changement peut s'expliquer par la présence de l'ancien mortier, ce qui augmente la demande en eau et affecte négativement l'ouvrabilité. Sachant que les fillers calcaires offrent plusieurs avantages dans les SCC. Ils contribuent à améliorer l'ouvrabilité du mélange et permettant une meilleure distribution des particules et le remplissage des vides, la figure I.8 représente les résultats obtenus.

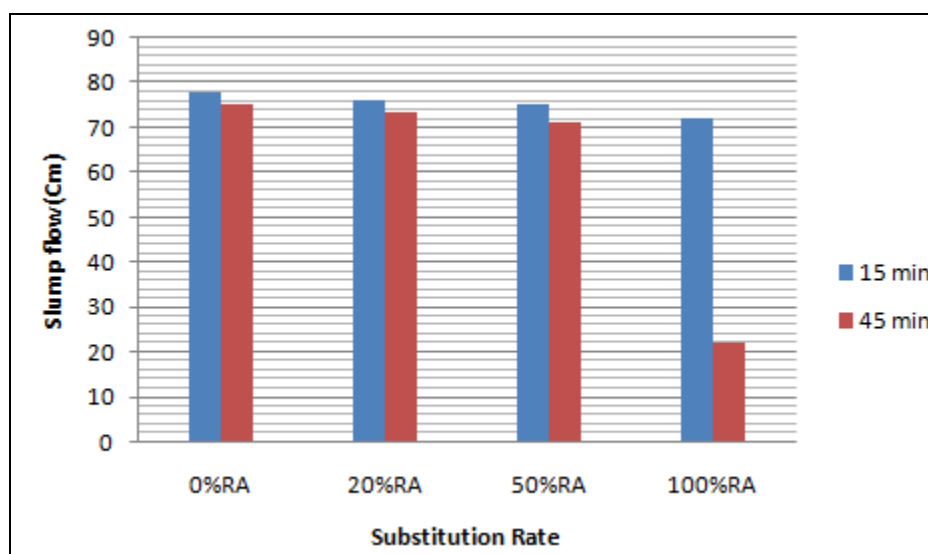


Figure I. 8: Écoulement de l'affaissement du BAP étudié [43].

Par contre O.K .Djelloul et al.[9], ont trouvé que quelle que soit la proportion du laitier remplacée, un accroissement d'ouvrabilité des mélanges des BAP à base de granulats recyclés, due un grand volume de la pâte, en raison de la plus faible densité du laitier [43],(figure I.9 et 10) .

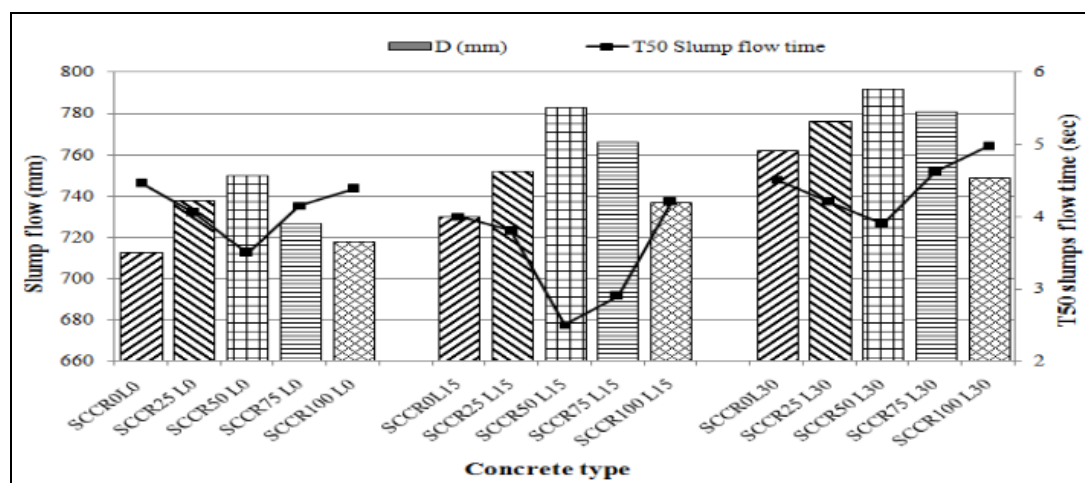


Figure I. 9: Diamètre d'écoulement de l'affaissement et temps T50 des mélanges SSC [9].

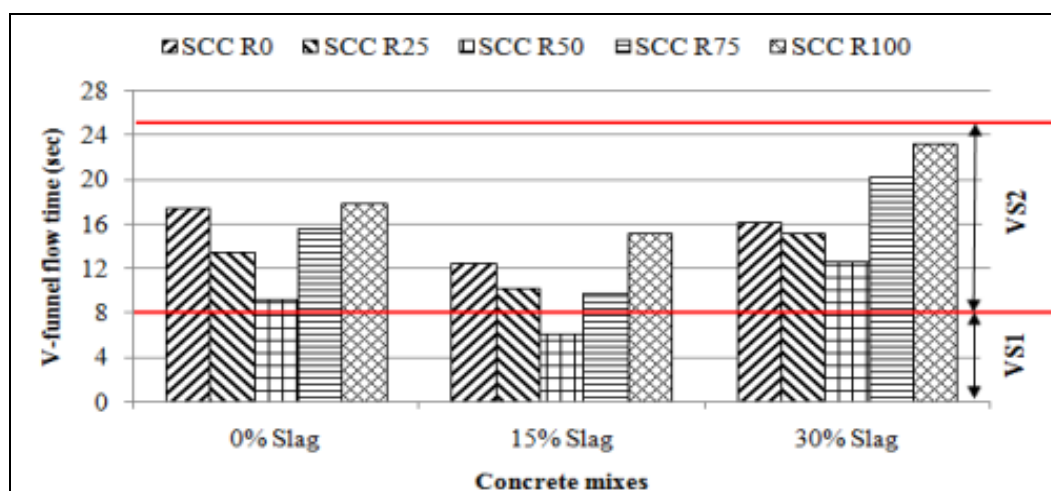


Figure I. 10: Temps d'entonnoir en V des mélanges SCC [9].

Aussi Nayak et al. [44], ont remarqué une réduction de l'ouvrabilité du BAP à base de 25 % de granulats recyclés dans les mélanges binaires (ciment + cendres de balle de riz) et ternaires (ciment + cendres de balle de riz + cendres de bagasse de canne à sucre). Les cendres de balle de riz et les cendres de bagasse de canne à sucre étant des matériaux fins, absorbant l'eau, voir la figure I.11.

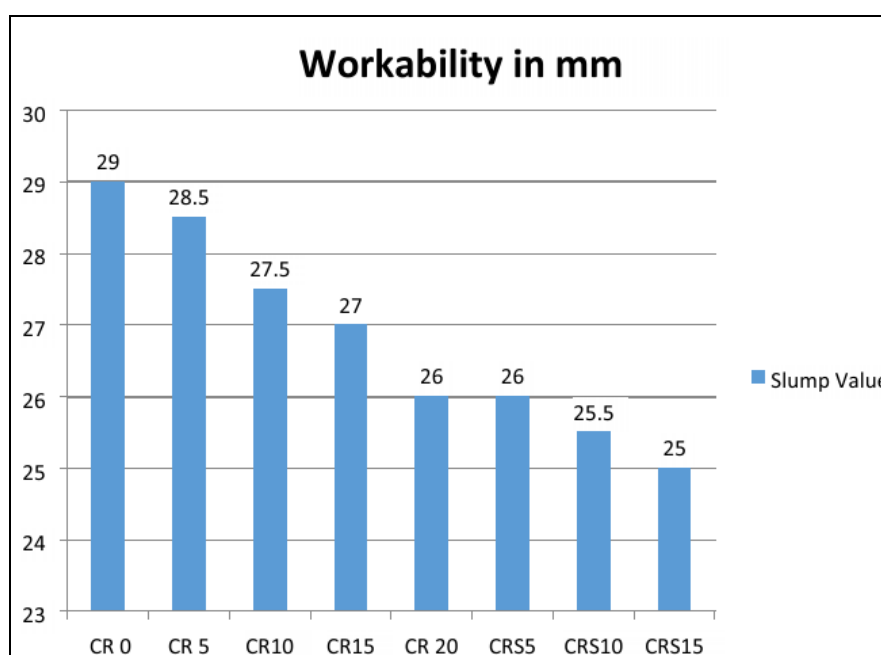


Figure I. 11: Ouvrabilité de béton a base 25% de granulats recycle et ciment Binaire et ternaire [44].

Pour Kinuthia et al.[45], l'ouvrabilité du BAP contient des combinaisons de cendres de combustible pulvérisées et de métakaolin (MK). Les résultats ont montré que l'ouvrabilité du

béton PC-MK diminuée avec l'augmentation de la teneur en MK due à la grande surface spécifique du MK. Des recherches similaires sont présentées dans le tableau suivant

Tableau I.17: l'ouvrabilité du béton PC-MK

Auteurs	Ajout	Résultats
Sabir et al.[46]	PC-MK	Diminution d'ouvrabilité
Daiana Goes et al[47]	PC-MK	Diminution d'ouvrabilité
Bui et al[48]	PC-MK	Diminution d'ouvrabilité
Khatib et Clay.[40]	PC-MK	Diminution d'ouvrabilité

Selon Ping hatel et al.[49] , L'utilisation d'un système quaternaire à faible teneur en ciment (30 %) en utilisant des matériaux cimentaires supplémentaires composés de laitier de haut fourneau granulé, de cendres volantes , fume de silice dans le BAP à base de granulats recyclés agrégats de verre recyclé ,était de 30 %, 50 % et 100 % en volume , Les résultats indiquent que l'ajout de Fumée de silice au mélanges à une influence sur l'ouvrabilité et la densité des composites, tout en conduisant à une réduction des coûts mais reste dans les normes grâce au laitier qui augmente l'ouvrabilité.

Selon Mehmet Gesog lu. [50] , le rapport de Tous les mélanges, à l'exception du béton de contrôle, respectent les exigences limitées par l'EFNARC, surtout les bétons avec des systèmes ternaires (PC + FA + GGBFS, PC + FA + SF, ou PC + GGBFS + FS) ont fourni une performance légèrement meilleure en termes de l'essai de la boîte en L Parraport au béton témoin et les mélanges contenant des mélanges binaires de FA, GGBFS et SF.

I.5.2 Viscosité

L'utilisation de la cendre de riz comme agent modificateur de viscosité dans les BAP, Les résultats des essais confirment la faisabilité du développement d'un BAP à faible coût à l'aide de RHA. A l'état frais, les différents mélanges de béton ont un affaissement de l'ordre de 595-795 mm, un rapport L-box allant de 0 à 1 et un temps d'écoulement allant de 2,2 à 29,3 s donc la cendre de riz améliore l'ouvrabilité de béton [49].

L'évolution de la viscosité en fonction du temps des bétons avec des matériaux cimentaires ternaires PC-FA+SF et quaternaires FA+GGBFS+SF à différentes vitesses de rotation est illustrée à la figure, tous les bétons ont présenté un comportement plus visqueux avec le temps[47]..

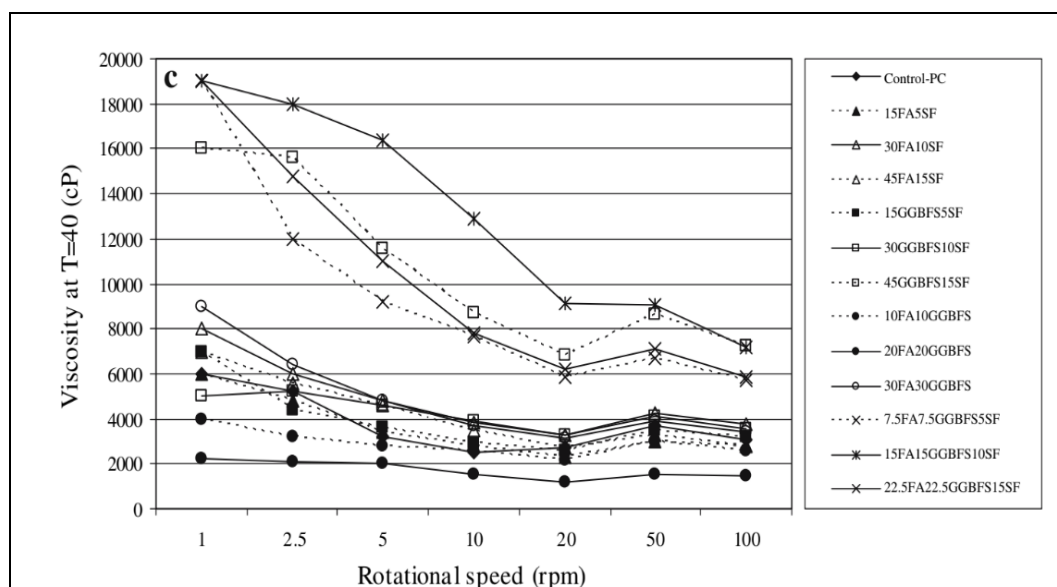


Figure I. 12 ; la viscosité en fonction du temps des bétons avec des matériaux cimentaires ternaires PC-FA+SF et quaternaires FA+GGBFS+SF [51].

I.5.3 Propriétés mécaniques

I.5.3.1 Résistance à la compression

Selon l'étude de Krishna et al.[52], l'utilisation de de 25% et 50% de granulats recyclés et 10 % de Métakaolin dans un béton autoplaçant donne des résultats de résistance à la compression similaires à celles du béton avec des granulats naturels a l'âges de 7, 28, et 56 jours due à la réactivité pouzzolanique de métakaolin, mais cette résistance diminue vite lorsque le remplacement des granulats recyclés dépasse 50%. La réduction de la résistance peut atteindre jusqu' à 50,45% pour un remplacement de 75% et 45,3% pour un remplacement de 100% à 7 jours, et environ 52,21% et 67% pour les jours 28 et 56, respectivement.

D'après O. K. Djelloul et al.[9], l'augmentation d'ajout du laitier a réduit la résistance à la compression des mélanges avec des granulats naturels ou recyclés à 7 et 28 jours, due à la faible activité de réaction pouzzolanique du GGBFS à jeune âge. A l'âge de 56 et 90 jours, on observe une amélioration de la résistance des mélanges 15 % et 30 % de remplacement du ciment par du laitier, par rapport au mélange de contrôle (figure I.13).

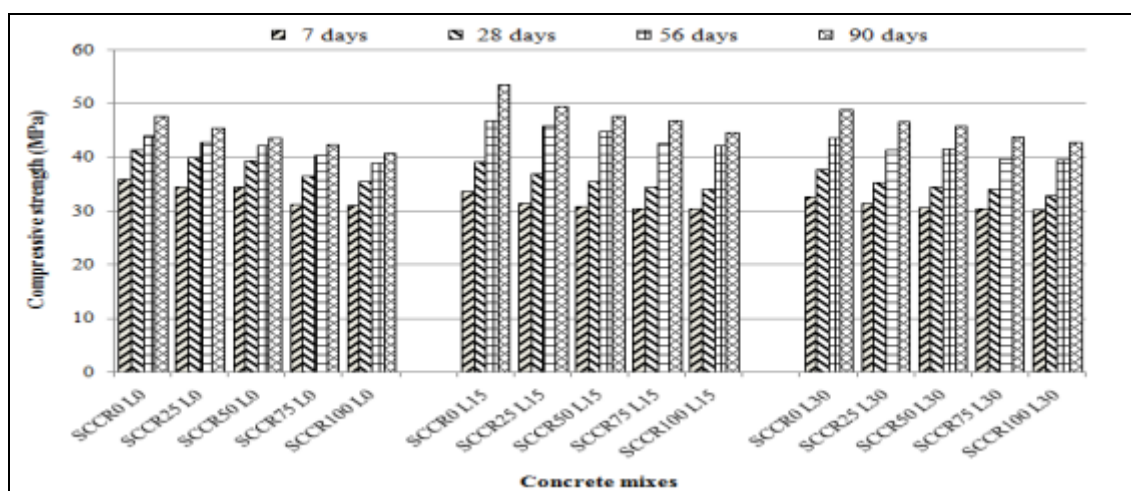


Figure I. 13: Résistance à la compression des mélanges SCC [9].

Selon Nayak et al.[44], Les mélanges binaires avec 15% de cendres de balle de riz et 25% de granulats recyclé possèdent des bonnes propriétés mécaniques. Alors que les mélanges ternaires avec 10% de cendres de bagasse de canne à sucre et 25% granulats recyclé, possèdent une bonne résistance a la compression. Cela est dû à l'augmentation de l'effet de remplissage en raison de la petite taille des cendres de balle de riz et de la bagasse de canne à sucre, qui améliorent la compacité (figure I.14).

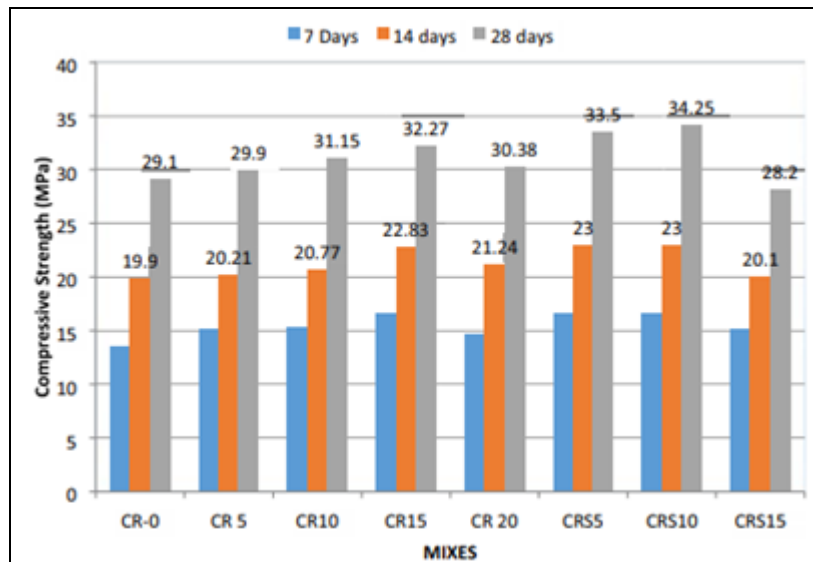


Figure I. 14: Résistance à la compression des mélanges de béton à 7,14 et 28 jours [44].

D'après Shaikh.[19], les propriétés mécaniques d'un béton contenant de CEMI et 50 % de granulats grossiers naturels, L'ajout de 10% de fumée de silice , 50 % de laitier ,50% de granulats recyclé et 10% de SP a amélioré la résistance à la compression a jeune âge (3 et 7 jours), et a 28 jours due à l'effet pouzzolaniques des ajouts .

Selon Ahmed et al.[45], à 7,28 et 56 jours les mélanges RC-SCC à Base de ciments binaires (PC-MK) et Ternaire (PC-MK-NS),(PC-MK-FA) et quaternaire(PC-MK-FA-NS) presque équivalente à celle des SCC sans granulats recyclé, ce qui démontre que les mélanges, y compris une combinaison de MK et FA ou MK et NS et le MK seul, améliorent les propriétés mécaniques des mélanges GR-SCC à Jeune et à long terme.

Mardani et al.[44], ont été utilisés dans un ciment comme substitution, les cendres de charbon (FA), fumée de silice (SF) et le métakaolin (MK). Plusieurs éprouvettes de mortier ont été préparée avec différents ajouts cimentaires, deux systèmes binaires (PC-SF et PC-MK) et deux systèmes ternaires (PC-SF-FA et PC-MK-FA), sans et avec granulats recyclé. Au-delà de 3 jours, les mélanges binaires incluant du méta kaolin ou de la fumée de silice ont montré une résistance à la compression plus élevée que les mélanges simples comme il est montré dans les tableaux I.15 et I.16.

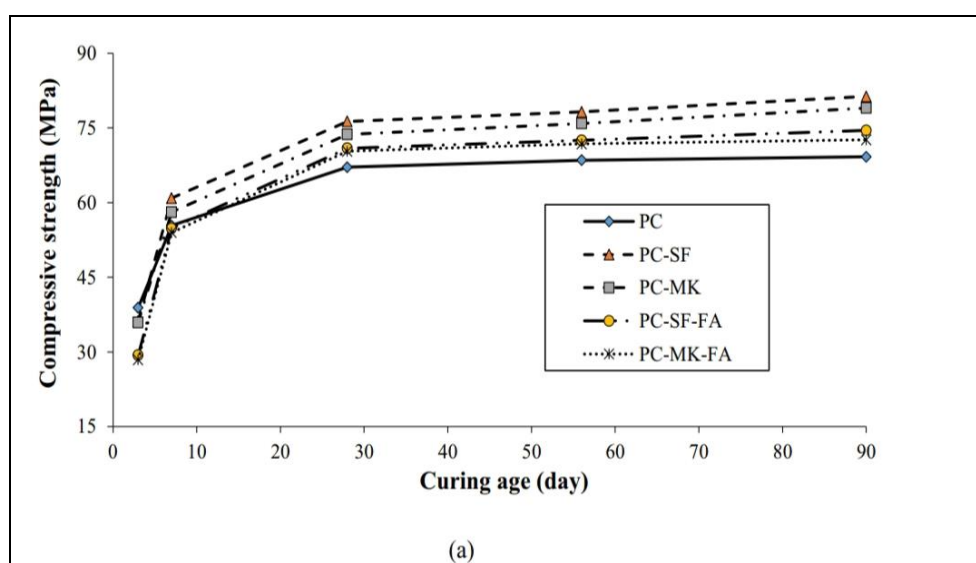


Figure I. 15: La résistance à la compression des mélanges contenant du sable standard [51].

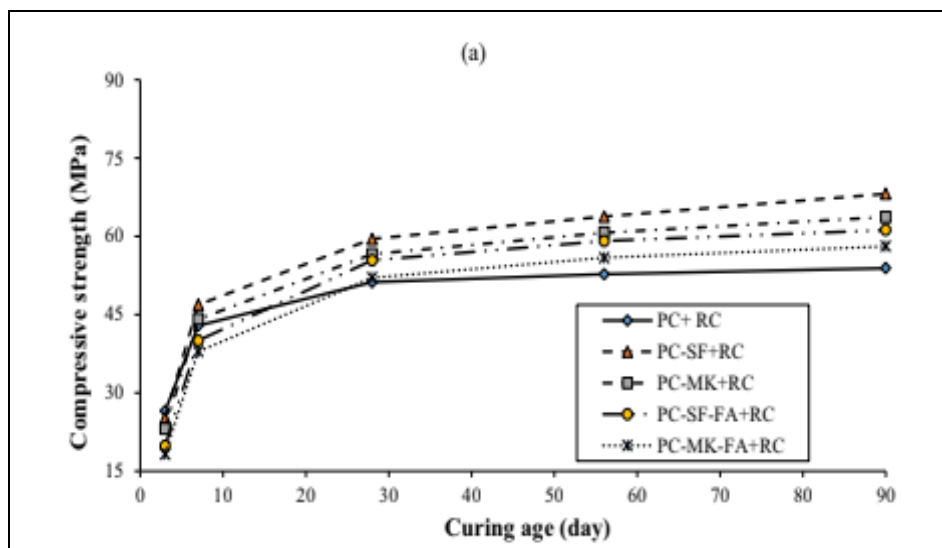


Figure I. 16 La résistance à la compression des mélanges contenant du sable Recyclé de béton [51].

L'utilisation binaire et ternaire et quaternaire de PC, FA et de GGBFS a également entré une résistance à la compression comparable à celle de béton témoin. De même, les bétons avec les mélanges quaternaires de PC, FA, GGBFS et SF présentaient une résistance à la compression inférieure à celle du béton témoin, Cependant, les mélanges ternaires de SF et de GGBFS ont permis d'obtenir une résistance à la compression de 87 MPa Les résultats des essais suggèrent que l'AF empêche la réduction de la résistance à la compression [47]. L'utilisation de 70%0PC+15%FA+7,5%SF+7,5%GGBS dans le béton autoplaçant offre une résistance A la compression dépasse le béton de contrôle, la figure représente les résultats de la résistance à la compression des mélanges SCC (M-40)[53].

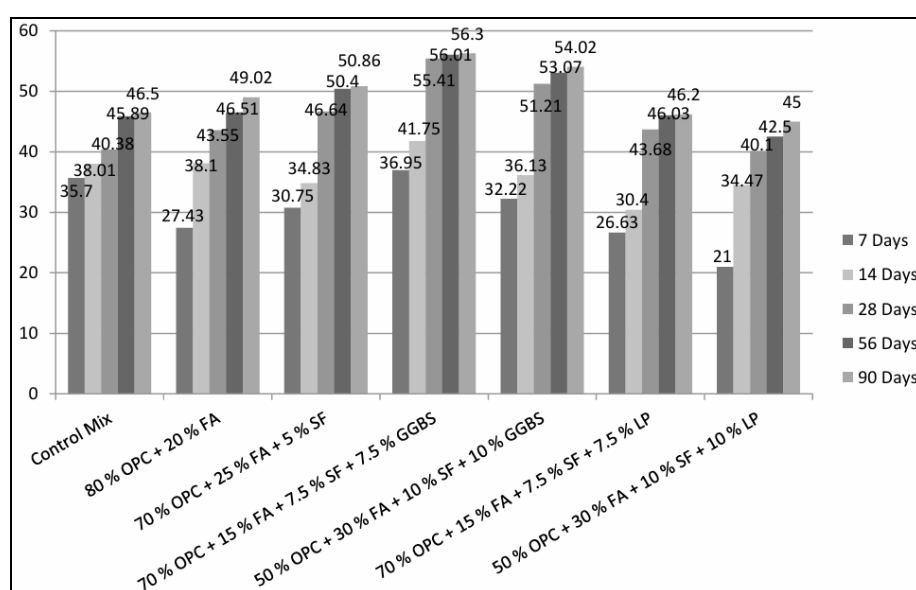


Figure I. 17 Résultats de la résistance à la compression des mélanges SCC (M-40) [47].

I.5.3.2 Résistance à la traction par flexion :

Les résultats de Nayak et al. [44] ,montrent que la résistance à la traction est augmentée de 16 % lorsque le ciment est remplacé de manière optimale par les cendres de balle de riz et les cendres de bagasse de canne à sucre, dû à l'effet filler de ces ajouts, (figureI.18).

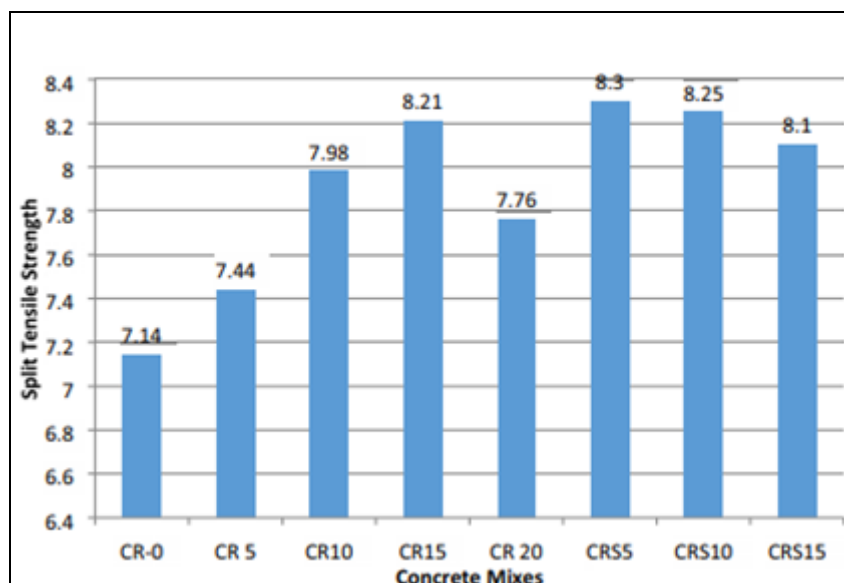


Figure I. 18: Résistance à la traction des mélanges de béton a 28 jours [44].

Selon Krishna et al.[51], La résistance à la traction des bétons autoplaçants (BAP) contenant 25 % et 50 % de granulats recyclés et 10 % de MK est presque équivalente à celle des BAP contenant des granulats naturels a 7,28,56 jours .

D'après G.Sua-iam et al.[40], l'incorporation de granulats recyclés (RCA) en combinaison avec SF et FA montre une augmentation légère de la résistance à la traction à certains niveaux de remplacement de la RCA, mais une diminution significative à des niveaux plus élevés. L'ajout de matériaux pouzzolaniques améliore la compacité du béton en comblant les vides donc la résistance augmente (figure I.19).

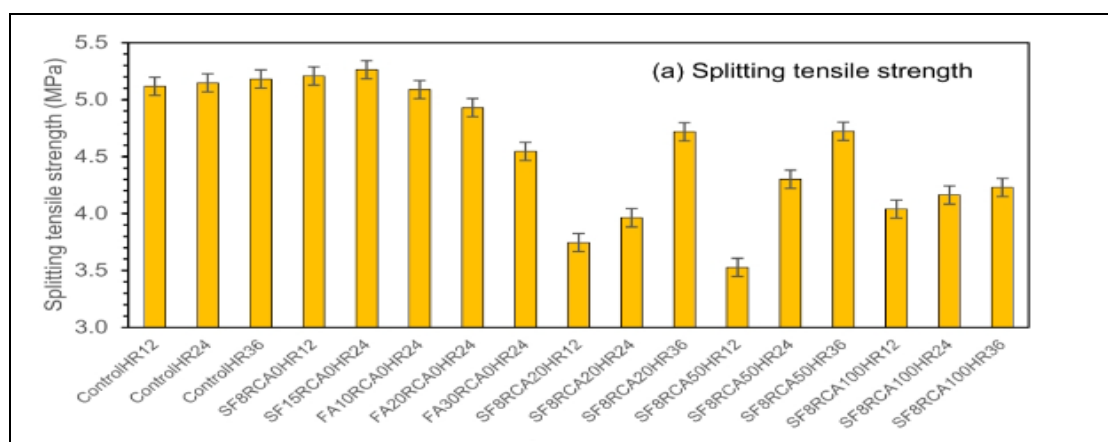


Figure I. 19: Résistance à la traction [52].

Khatib et al.[40],ont noté que l'incorporation de laitier dans le béton augmente la résistance a la flexion, a 90 Jours le béton avec 60% de laitier a développé sans ou avec ou plus de 10 % de Meta kaolin une résistance supérieure à celle du béton de contrôle, (figure I.20).

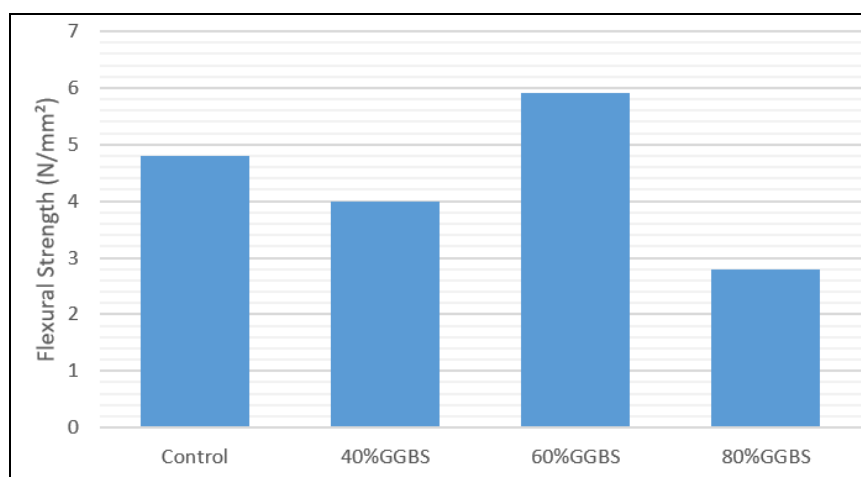


Figure I. 20: Influence du laitier sur la résistance en flexion [53].

La figure de Rajat Jain.[54] , montre que la résistance à la flexion de mélange quaternaire 70%0PC+15%FA+7,5%SF+7,5%GGBS présente des résultats maximale Parraport au mélanges ternaire et binaire.

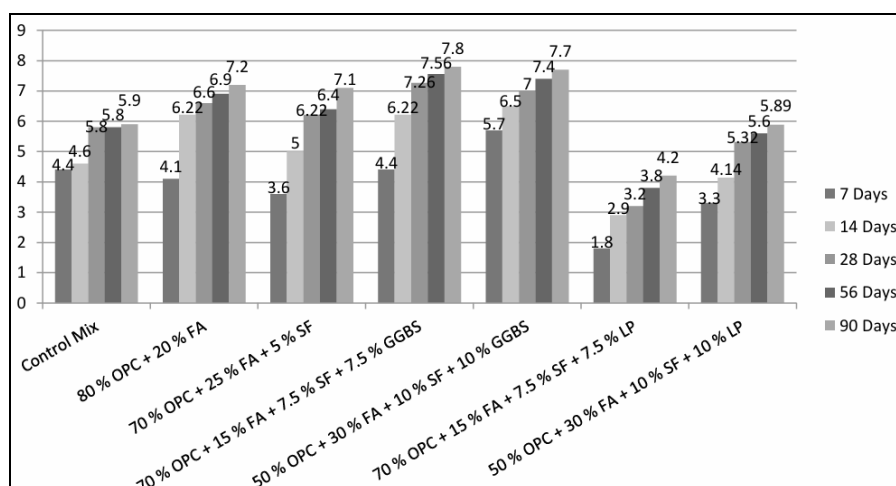


Figure I. 21 la résistance à la flexion de mélange quaternaire[54].

I.5.4 Retrait de séchage

Selon Mardani et al.[51], Une réduction des valeurs de retrait initial dans les mélanges de (PC-SF-FA-RC), (PC-MK-FA-RC) et (PC-MK-RC), (PC-SF-RC) comparées à celles des mélanges à base de sable naturel, due au caractère poreux du granulat recyclé, a contribué à réduire la pression interne. (FigureI.22, Figure I.23)

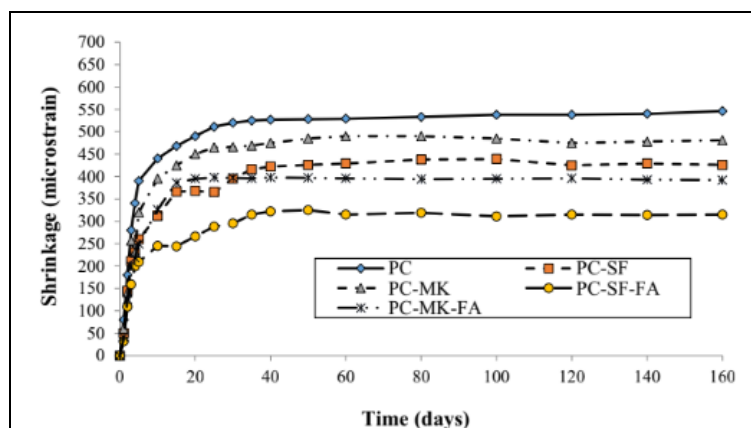


Figure I. 22: Valeurs de retrait des mélanges de mortier exposés au séchage des mélanges contenant du sable standard [51].

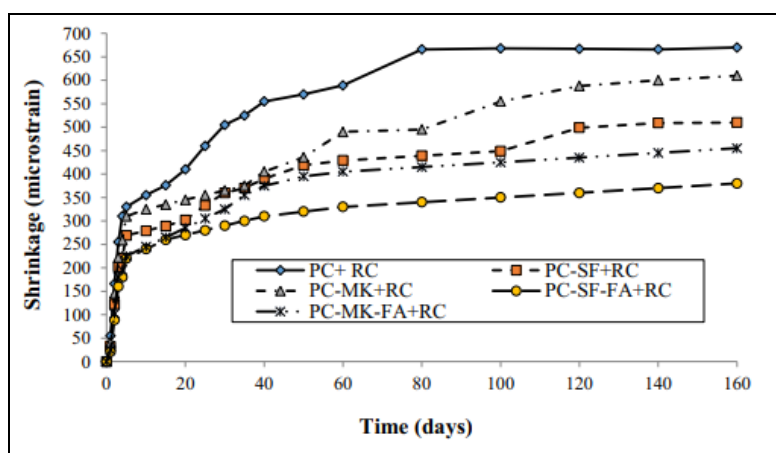


Figure I. 23: Valeurs de retrait des mélanges de mortier exposés au séchage des mélanges contenant du sable mélanges incorporant des granulats Recyclé de béton[51].

Pour étudier le retrait de séchage des BAP à base de ciments binaires, un total de 65 mélanges de béton autoplaçant (BAP) à base de ciments ternaires et quaternaires de cendres volantes (FA), de laitier granulé de haut fourneau moulu (GGBFS), de fumée de silice (SF) et de métakaolin (MK), on été préparé et étudié par Patel et al. [54]. Il a été observe que le retrait de séchage diminuait avec l'utilisation de FA, GGBFS et MK alors que l'incorporation de SF augmentait le retrait de séchage.

L'utilisation de filler calcaire peut avoir un effet bénéfique en réduisant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec précaution et dans une proportion appropriée [55]

I.5.5 Module d'élasticité :

D'après Shaikh et al.[17],l'ajout de 10% de fumée de silice , 50 % de laitier ,50% de granulats recyclé et 10% de SP a amélioré la résistance à la compression et le module d'élasticité du béton La figure I.24 montre une forte corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité et la résistance à la traction, l'augmentation du module d'élasticité et de la résistance à la traction indirecte avec l'augmentation de la résistance à la compression.

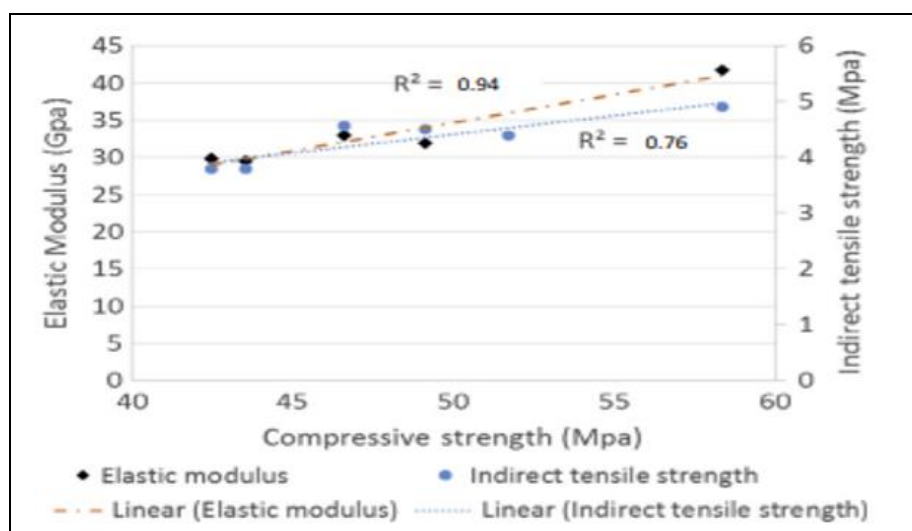


Figure I. 24: corrélation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité et la résistance à la traction.[17].

I.5.6 Durabilité :

I.5.6.1 Diffusion des ions de chlorure :

Mardani et al. [51] ont trouvé que l'ajout de ciments ternaire (*PC-MK-FA*), (*PC-SF-FA*) et binaire (*PC-MK*), (*PC-SF*) dans les MAP à base de granulats recyclés (RC) diminue la pénétration des ions en chlore due à leurs propriétés élevées de liaison, entraîne une réduction supplémentaire de la charge transmise par le mélange, voir la figure I.25.

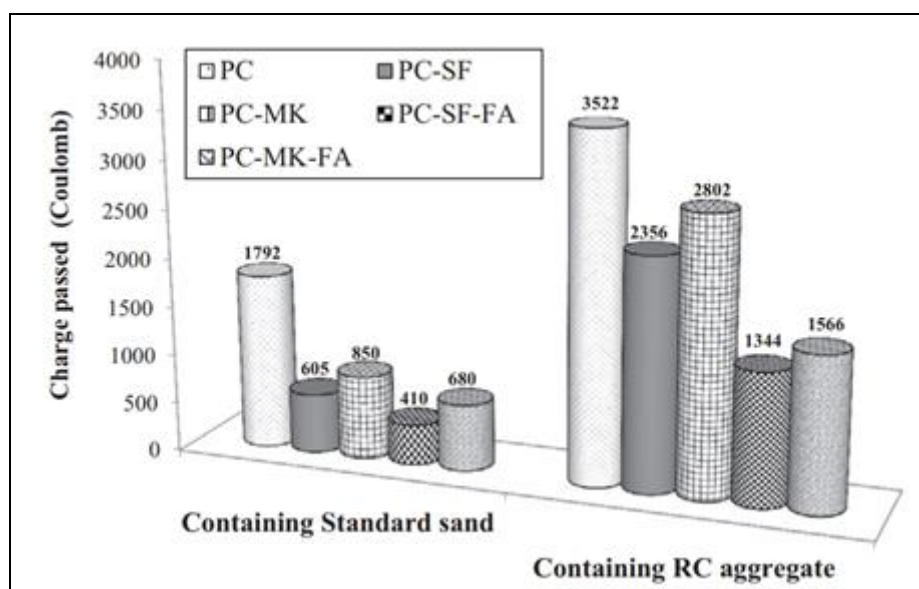


Figure I. 25: Résultats des tests de pénétration des ions chlorure des mélanges de mortier [51].

D'après G.Sua-iam et al.[52] , L'incorporation de RCA dans le BAP a eu un effet positif sur la résistance au chlorure. Lorsque la SF remplaçait 8 % du ciment, le coefficient de migration du chlorure diminuait de 22,5 % à 12 heures et de 59,9 % à 24 heures avec 15 % de remplacement du ciment, indiquant une résistance améliorée au chlorure. De même, un remplacement plus élevé de FA diminuait significativement le coefficient : avec des niveaux de remplacement de 20 % et 30 %, le coefficient diminuait de 43,3 % et 49,5 % à 36 heures, confirmant la capacité de la FA à améliorer la résistance du BAP à la migration du chlorure, voir la figure I. 26.

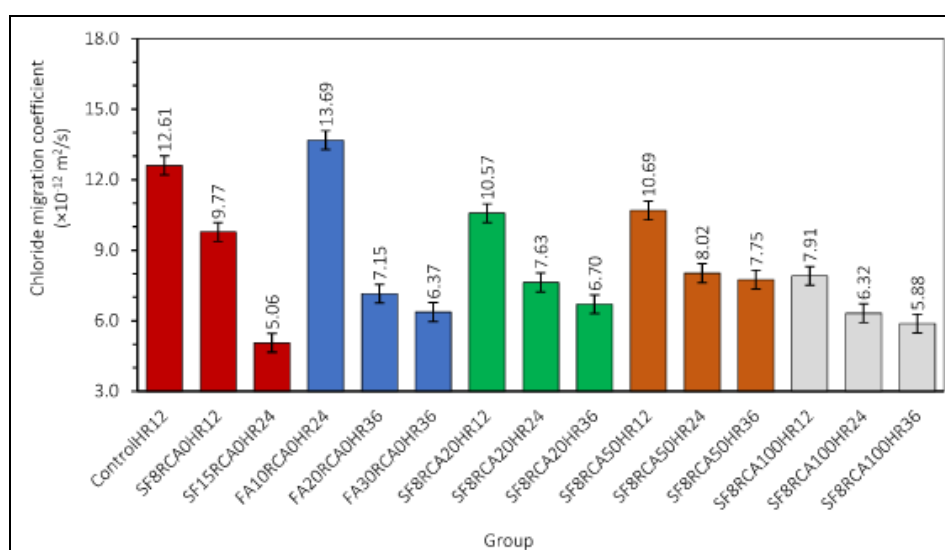


Figure I.26: Coefficient de migration des chlorures après application de durées de mise sous tension de 12,24 et 36 h[52].

La réduction de la charge totale indique une meilleure résistance à la pénétration d'ions de chlorure et une perméabilité plus faible dans les ciments quaternaires[54] .

Tableau I. 18 : pénétration des ions en chlorure des systèmes quaternaire [33], [55], [56].

Système liant quaternaire	Composition	Pénétration ions Cl^- (mm)	Résistance à la chloruration	Observations
CEM I	cendres volantes + laitier + fumée de silice	8 – 12	Moyenne	Amélioration modérée de la microstructure
CEM I	fumée de silice + laitier +calcaire	4 – 7	Élevée	Forte réduction de porosité capillaire
CEM I	cendres volantes + métakaolin +laitier	6 – 9	Bonne	Effet pouzzolanique + raffinement des pores
CEM I	Ciment + laitier + métakaolin +calcaire	5 – 8	Élevée	Bonne synergie entre MK et SL

I.5.6.2 Absorption d'eau par capillarité et perméabilité à l'eau :

D'après O. K. Djelloul et al.[45], l'ajout de laitier aux granulats de béton recyclé des mélanges SCC, diminue l'absorption d'eau capillaire Sadok et al. [56] aussi ont trouvé que tous les bétons autoplaçants à base de laitier, donnent des bonnes résultats, l'absorption d'eau et la perméabilité .Lorsque le ciment est remplacé par le laitier, il réagit avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) résolue de l'hydratation du ciment pour créer ,dans la matrice cimentaire. Du gel de silicate de calcium hydraté (CSH) additionnel. La matrice cimentaire résultante donne une bonne résistance chimique et une structure de pore plus raffinée et plus inaccessible à l'eau.

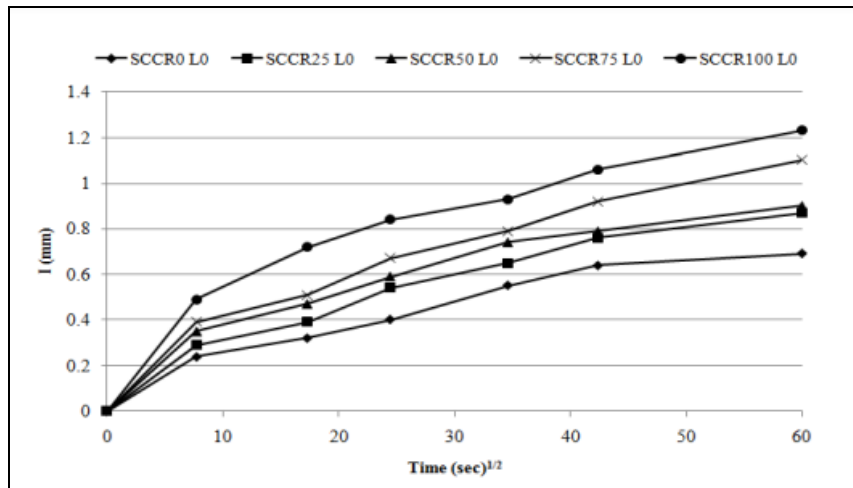


Figure I. 27: Absorption pour des bétons contenant des quantités variables de RAC sans laitier [43].

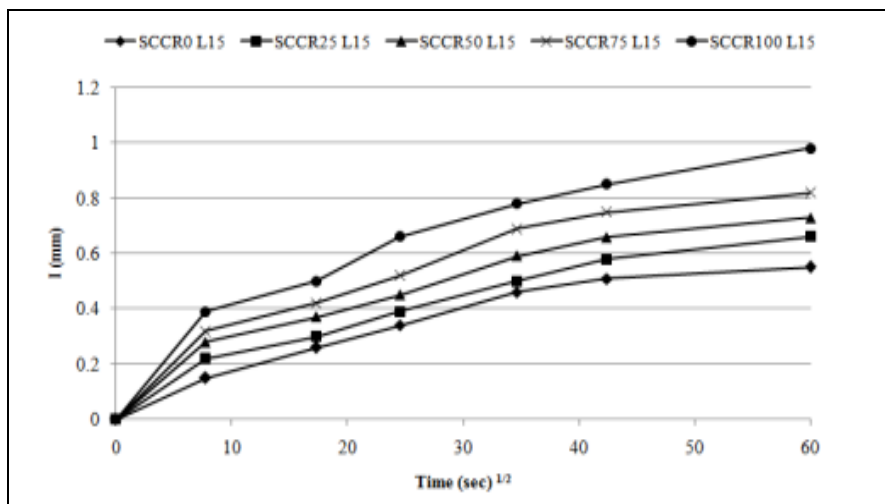


Figure I. 28: Absorption pour des bétons contenant des quantités variables de RAC avec 15 % de laitier [43].

Aussi, Mardani et al. [51]. Ont trouvé que, l'utilisation de systèmes ternaires dans les MAP à base de granulats recyclé réduit considérablement l'impact négatif des agrégats recyclés sur l'absorption capillaire des mélanges, cet effet étant particulièrement remarqué dans certains mélanges comme PC-SF-FA,

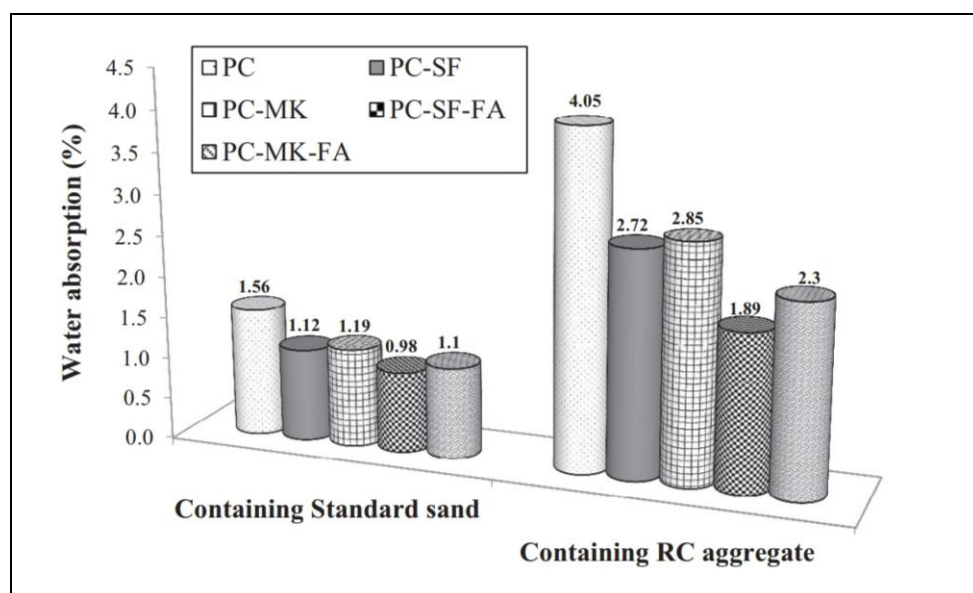


Figure I.29: Capacités d'absorption d'eau des mélanges de mortier [51].

D'après O.K.Djelloul et al.[43], une diminution de la profondeur de perméabilité à l'eau a été constatée lors de l'utilisation de mélanges RCA avec du laitier, (Figure I.).

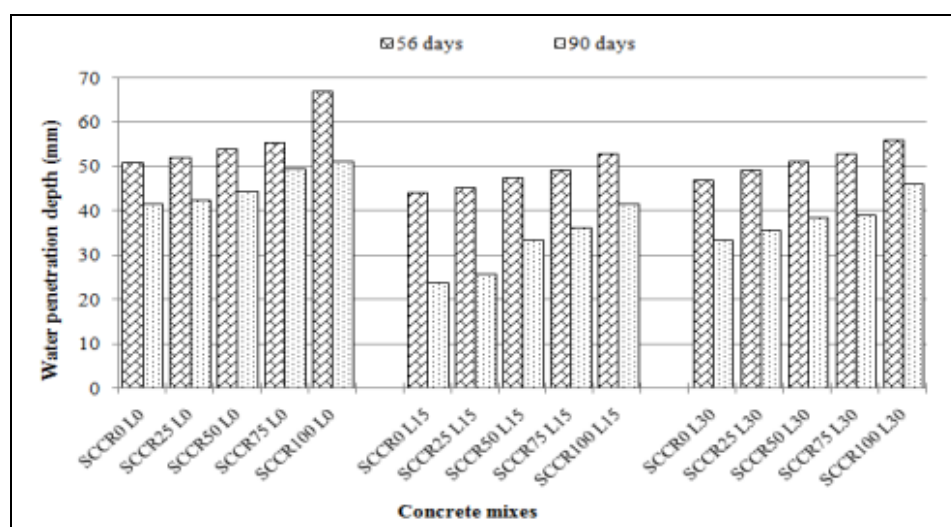


Figure I.30: Profondeur de pénétration de l'eau dans les mélanges SCC [43].

Dans les bétons quaternaires, la présence de Fumée de silice ainsi que des deux autres ajouts dans les mélanges quaternaires, a entraîné une réduction plus importante de la perméabilité. Par rapport aux mélanges binaires (tableau I.20).

Tableau I. 19 l'effet de différents systèmes liants quaternaires sur l'absorption capillaire des mortiers autoplacants, en particulier ceux contenant des granulats recyclés.

Référence	Composition du liant quaternaire	Effet sur l'absorption capillaire
Shetty et al.[57]	OPC + FFA + GGBS + CSSP	Réduction significative de l'absorption grâce à une microstructure plus dense.
Aly et al. [58]	OPC + Cendres volantes + Silice fumée + Métakaolin	Réduction notable de la capillarité et augmentation de la compacité.
Assi et al. [59]	OPC + GGBS + Fly Ash + Silica Fume	Absorption réduite de 30 à 50 % selon les taux de substitution.
Duan et al. [60]	OPC + Cendres volantes + Laitier + Poudre de verre	Amélioration de la densité de la pâte et réduction de l'absorption capillaire.

I.6 Conclusion

Dans cette partie nous avons étudié l'effet de plusieurs ajouts cimentaires tels que le calcaire, les cendres de boues, le métakaolin et le laitier, et les effets de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés des MAP et BAP l'état frais et durci.

L'utilisation de granulats recyclés dans le mortier au béton réduire l'ouvrabilité, due au vieux mortier attaché aux granulats qui absorbe l'eau de gâchage, mais le comportement lors de l'incorporation des ajouts cimentaire varie selon le taux de remplacement et le type d'ajouts cimentaire et la méthode de remplacement soit binaire ternaire au quaternaire et d'autres facteurs comme le dosage de sp. Notre objectif dans cette recherche bibliographique est de créer une base de données expérimentale visant à utiliser différents composants qui sont les granulats recyclés de démolition, calcaire cendre de boue et laitier et étudier le comportement du MAP avec ces matériaux afin de Préserver l'environnement et réduire la consommation des matières premiers.

.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

II. MATERIAUX ET ESSAIS

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés (sable, ajouts, ciment) ainsi que les différents essais réalisés, une description détaillée des matériaux et des essais est aussi donnée afin de mieux comprendre leur influence sur Les performances globale de mortier autoplaçant.

II.2 Caractéristiques des matériaux

Dans le cadre de cette étude, plusieurs matériaux sont utilisés pour la formulation de mortier autoplaçant, chaque matériau a été sélectionné pour ces propriétés spécifiques et son impact sur le mortier auto plaçant.

II.2.1 Le ciment

Un ciment composé de type CEM I, une résistance à la compression de 52,5 MPA, été utilisé de la cimenterie de LAFARGE. Les caractéristiques Chimiques, et physico-mécaniques de ce ciment sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau II. 1: Composition chimiques du ciment utilisé.

Composé	Valeur	Unité
MnO	0,035	%
MgO	3,374	%
Al ₂ O ₃	4,441	%
SiO ₂	17,994	%
P ₂ O ₅	0,127	%
SO ₃	2,746	%
Cl	0,192	%
K ₂ O	0,868	%
Na ₂ O	0,362	%
TiO ₂	0,263	%
PbO	0,000	%
Fe ₂ O ₃	3,207	%

Tableau II. 2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

Perte Au Feu	ρ_{Abs} (kg /m ³)	ρ_{app} (kg /m ³)	La finesse (cm ² /g)	Début de prise	Fin de prise
2,73	3170	927	3535	1h ; 30min	2h ; 00min

II.2.2 Granulats :

Nous avons utilisé deux types de sable : le sable naturel et le sable recyclé. Le sable naturel est constitué du sable de Baghlia et oued souf. Dont ils ont été mélangés afin d'obtenir un sable corrigé.

II.2.2.1 Sable de baghlia

C'est un sable grossier roulé de forme arrondie, surface lisse d'une classe granulaire (0/5) mm



Figure II.1: Sable de Baghlia.

Les principales caractéristiques physiques et la composition chimique de ce sable sont données dans le tableau 3 :

Tableau II.3: Caractéristique physique de sable de Baghlia.

ρ_{Abs} (kg /m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	Equivalent de sable visuel(%)	Equivalent de sable piston(%)	Module de finesse (MF)
2680	1537,773	82	93	2.9

II.2.2.2 Sable de oued souf

C'est un sable fin d'une classe granulaire (0/3) mm (Figure II.2).



Figure II.2: Sable d'oued souf.

Les principales caractéristiques physiques de ce sable est donnée dans les tableaux suivant

Tableau II. 4: Caractéristique physique de sable d'oued souf.

ρ_{Abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	Equivalent de sable visuel(%)	Equivalent de sable piston(%)	Module de finesse(MF)
2660	1598,646	73,684	72,8	1.5

NB : Les deux sables ont été mélangés dans l'objectif d'obtenir un sable corrigé, en présentant leur caractéristiques dans le tableau II.5 et la figure II.3 respectivement

Tableau II. 5: Caractéristiques physiques de sable corrigé.

ρ_{Abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	Module de finesse(MF)	Coefficient d'absorption(%)
2600	1613,12	2,05	2,22

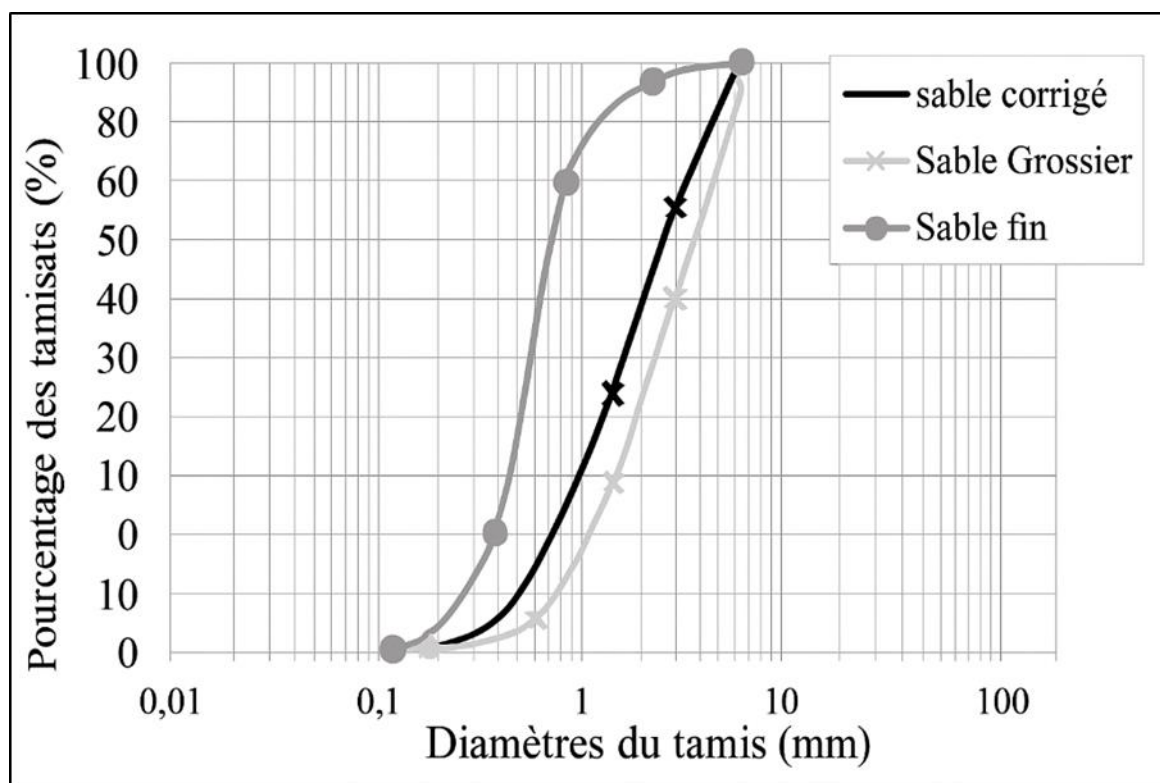


Figure II. 3: Courbes granulométriques des sables utilisés.

II.2.2.3 Le sable recyclé

Les granulats recyclés utilisés dans cette recherche expérimentale ont été récupérés à partir de démolition d'une dalle de béton de dimensions $8\text{ m} \times 4\text{ m} \times 0,02\text{ m}$ (Figure II. 4) avec une résistance à la compression de 30 MPa, celle-ci a été concassée dans un concasseur de laboratoire de l'université de Saad Dahleb Blida 1 et tamisée pour obtenir différentes fractions de granulat recyclé.



Figure II. 4: a) Sable recyclé, b) concasseur.

Tableau II. 6: Caractéristiques physiques de sable recyclé.

ρ_{Abs} (kg /m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	Module de finesse (MF)	Coefficient d'absorption	Equivalent de sable visuel(%)	Equivalent de sable piston(%)
2400	1537,77	3,5	8	72,2	78,55

II.2.3 Eau de gâchage

Une eau potable (eau du robinet) est utilisé pour les différents mélanges des mortiers autoplacants.

II.2.4 Adjuvant

Un superplastifiant haut réducteur d'eau : Sika qui améliore la qualité et les propriétés des mortiers autoplacants à l'état frais. Les caractéristiques détaillées de cet adjuvant sont présentées dans le tableau II.7

Tableau II. 7: Les caractéristiques de superplastifiant [61].

Caractéristique	Valeur
Aspect	Liquide
Couleur	Brun Clair
PH	6 – 6.5
Densité	1.07 ± 0.02 à 20°C
Teneur en chlorures	< 0.1 g/l (conforme EN 934-2)
Extrait sec	30 % ± 1%
Solubilité	Totalement miscible dans l'eau

II.2.5 Les ajoutes cimentaires

II.2.5.1 Le laitier

Le laitier granulé de haut fourneau et utilisé comme substitution du ciment provenant du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, wilaya d'Annaba, en premier lieu, nous avons procédé au séchage du laitier

à 50 °C dans un four .En second lieu, nous avons broyé se dernier-dans un broyeur à boulets d'une capacité de 5kg disponible au laboratoire Géo matériaux de génie civil de U.Blida 1(Figure II.5



Figure II. 5: Laitier broyé.

Tableau II. 8: Composition chimique de laitier.

Composé	Valeur (%)	Unité
TiO ₂	0,571	%
MgO	5,524	%
Al ₂ O ₃	11,196	%
SiO ₂	32,008	%
P ₂ O ₅	0,014	%
SO ₃	2,215	%
Cl	0,348	%
Na ₂ O	0,712	%
CaO	45,189	%
F	0,004	%
MnO	0,187	%
Fe ₂ O ₃	0,635	%
SnO	0,112	%
Y ₂ O ₃	0,010	%
ZrO ₂	0,046	%
BaO	0,145	%
WO ₃	0,024	%
K ₂ O	0,456	%

Tableau II.9: Caractéristiques physiques et mécaniques de laitier.

PAF	ρ_{Abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
6,16	2810	1645,78	3976

II.2.5.2 Cendre de boues

Pour transformer la boue en cendre utilisable, plusieurs étapes sont nécessaires .tout d'abord, la boue fraiches est étalés à l'air libre et laissée séchée environ 3 à 4 jours, ensuite elle est calcinée à une température de 825 °C dans une étuve au laboratoire géomatériaux de l'université de Blida 1(Figure II. 6).

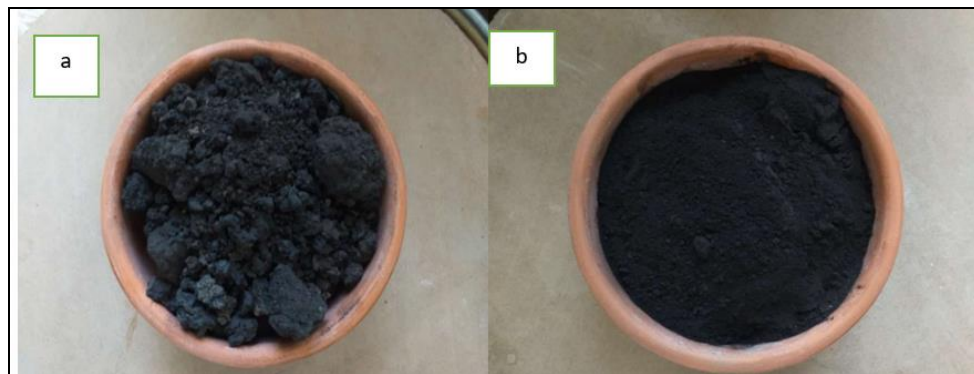


Figure II.6: Illustration représentant les échantillons de cendre de Boue non broyé (a) et broyé (b).

Tableau II. 10: Composition chimique de cendre de boue.

Composé	Valeur	Unité
Fe ₂ O ₃	6,704	%
MgO	2,527	%
Al ₂ O ₃	12,411	%
SiO ₂	36,401	%
P ₂ O ₅	5,893	%
SO ₃	5,645	%
Cl	5,945	%
K ₂ O	0,575	%
CaO	2,207	%
TiO ₂	24,269	%
Na ₂ O	1,119	%
MnO	0,064	%
PbO	0,024	%
NiO	0,014	%
CuO	0,014	%
ZnO	0,058	%
Br	0,238	%
Rb ₂ O	0,022	%
SrO	0,014	%
ZrO ₂	0,089	%
BaO	0,040	%
Au	0,027	%
Cr ₂ O ₃	0,034	%

Tableau II.11: Caractéristiques physiques et mécaniques de cendre de boue.

ρ Abs (kg/m ³)	ρ app (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
2380	634	3500

II.2.6 Calcaire

La poudre de calcaire obtenue de la cimenterie de Meftah (wilaya de Blida) contient une certaine humidité résiduelle qui doit être éliminée avant utilisation. Le séchage est réalisé à l'aide d'une étuve à une température 45 afin d'obtenir une poudre sèche. La composition et les caractéristiques du calcaire utilise après calcination sont données respectivement dans le tableau II.12 et 13.



Figure II.7: Calcaire.

Tableau II. 12 : Composition chimique de calcaire

Composé	Valeur	Unité
SiO ₂	1,50	%
Al ₂ O ₃	0,43	%
Fe ₂ O ₃	0,26	%
CaO	53,76	%
MgO	0,77	%
SO ₃	0,08	%
K ₂ O	0,08	%
Na ₂ O	0,04	%
TiO ₂	0,08	%
LSF	1098,90	-
Silica Ratio	2,17	-
Aluminum Ratio	1,65	-

Tableau II.13: Caractéristiques physiques et mécaniques de calcaire.

perte au feu	ρ Abs (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
42,19	2522,8	4328

II.3 Formulation de MAP

En premier ,nous avons optimiser la quantité optimale de superplastifiant pour que l'étalement du mortier reste dans l'intervalle entre 270 mm et 330 mm au mini-cône, et un temps d'écoulement à l'entonnoir en V entre 2 et 10 secondes, on utilisant la méthode japonaise Okamura. Le rapport Eau/Liant (E/L) fixé à 0,38 et le rapport Sable/Mortier (S/M) fixé à 0,5, ont été considérés dans cette formulation , Les quantités des composants du MAP ont été calculées via une feuille Excel en annexe, et le malaxage a été réalisé avec un malaxeur électrique à mortier selon une séquence spécifique décrite dans le tableau II.14.

Ensuite, nous avons substitué le sable naturel par 0%, 50%, et 100% de sable recyclé, après, ont remplacé une quantité du ciment par 10% de cendres de boues (ciment binaire), 15% de laitier (ciment ternaire), et 5%,10% et 15% de calcaire (ciment quaternaire).



Figure II.8: Malaxeur à mortier.

Tableau II. 14: Séquence de malaxage[53].

Les étapes	Sable + ciment +sable recyclé +laitier	Verser la quantité d'eau ($w_1 = 70\%$)	Verser SP dilué dans quantité d'eau ($w_2 = 30\%W_2 + SP$)
Temps de malaxage (s)	60	60	180
Vitesse de malaxage	Lente		

II.4 Essais à l'état frais des MAP

II.4.1.1 Étalement au mini cône

Le dispositif de l'essai d'étalement est illustré dans la figure II.9. L'essai d'étalement consiste à remplir le moule tronconique (mini cône), placé au centre d'une plaque horizontale en acier lisse. L'appareil se compose d'un moule tronconique creux de 60 mm de diamètre, d'une hauteur de 70 mm et d'une base de 100 mm de diamètre. Une fois le cône soulevé, le mortier s'écoule sur la plaque, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré dans deux directions perpendiculaires pour obtenir une moyenne (D_{moyen}).



Figure II.9: Essai d'étalement au mini cône.-

II.4.1.2 Temps d'écoulement

L'essai de l'entonnoir en V consiste à remplir l'entonnoir avec 1,1 litre de mortier, puis de mesurer le temps écoulé entre l'ouverture de l'entonnoir et l'apparition de la première lumière



Figure II.10: Essai de l'entonnoir en V.

II.4.1.3 Moulage et conservation des éprouvettes

Le moule contient 3 éprouvettes sont de forme prismatique avec des dimensions de 4x4x16 cm³, La surface des échantillons est nivelée et recouverte d'un film plastique pendant 24 heures. Après 24 heures les échantillons sont démoulés et placés dans un bac rempli d'eau saturée en chaux à une température de 20°C ± 2°C



Figure II.11: Conservation des éprouvettes.

II.5 Essais à l'état durci MAP

Selon la norme EN 196-1, et sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³, Les essais sont réalisés à 28 jours après la fabrication des échantillons en calculant la moyenne des résultats obtenus pour chaque essai.

II.5.1 La résistance à la traction par flexion

L'essai de flexion est une méthode permettant d'évaluer la résistance à la rupture du mortier. Une éprouvette prismatique de dimensions 4x4x16 cm est disposée sur deux appuis et une force croissante est appliquée au centre jusqu'à la rupture (Figure II.12) représente l'essai de résistance à la traction par flexion. , la contrainte de flexion est ensuite déterminée à l'aide de la formule suivante (2.1)

$$R_f = \frac{1.5PL}{b^3} \quad . \quad (2.1)$$

P : la force appliquée sur l'éprouvette (N).

L : la distance entre appuis (100mm).

B : la largeur de l'éprouvette (40mm).

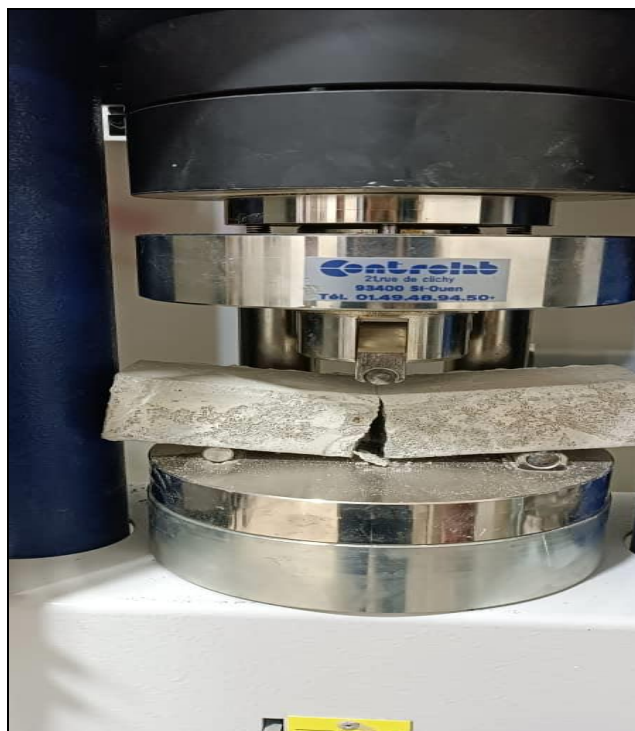


Figure II. 12: Essai de résistance à la traction.

II.5.2 La résistance à la compression

La résistance à la compression du mortier est évaluée selon la norme EN 196-1. Les éprouvettes obtenues après l'essai de flexion sont positionnées entre les deux plateaux de pression, ou elles subissent un test de compression appliqué sur les côtés de l'échantillon.

La contrainte de rupture est calculée en utilisant une formule spécifique (2.2).

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (2.2)$$

F_c : la force appliquée sur le demi-prisme.

B : la largeur de l'éprouvette

II.6 Essais de durabilité

II.6.1 Absorption capillaire

Conformément aux procédures de la norme ASTM C1585-11. Nous avons conservés les éprouvettes dans un four à 105 degrés jusqu'à ce que les variations de masse entre deux pesées consécutives soient inférieures à 0,1%. Une hauteur de 5 cm du côté des échantillons est enduite de résine pour permettre une pénétration unidirectionnelle de l'eau. L'échantillon est placé sur deux supports collés au fond d'un bac rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 2 ± 1 mm à partir de la base de l'échantillon. Les variations de poids des échantillons sont mesurés après les avoir essuyés pour enlever les gouttes d'eau de la surface immergée.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation (2.3)

$$I = \frac{mt}{a \cdot d} \quad (2.3)$$

On a tracé la courbe $I = f(\sqrt{t})$ en fonction de la racine carrée du temps, :

I : coefficient d'absorption (cm).

mt : La différence de masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g).

d : la masse volumique de l'eau exprimée en (g /cm³).

a : section de l'éprouvette (mm²).

La figure II.13 représente l'essai d'absorption capillaire.



Figure II.13 : Essai absorption capillaire.

II.6.2 Porosité accessible à l'eau

Porosité accessible à l'eau est effectuée selon la norme NFP-18-459, Il s'agit de la détermination par pesées de la masse apparente d'un échantillon dans l'eau qui est saturé sous vide.

Voici les étapes de l'essai :

1-les échantillons sont placés dans un endroit sec à une température de 80 ± 2 °C Jusqu'à ce que la masse soit stable ;

2-mesure de la masse sèche : nous déterminons la masse sèche de l'échantillon (M_{sec}) à l'aide d'une balance de précision de 0,1g ;

3-mise en marche de la pompe à vide : nous plaçons les échantillons dans un récipient fermé et mettons en marche la pompe à vide sous une pression constante (figure II.14), Après 4 heures, nous arrêtons la pompe à vide et maintenons les échantillons en état de saturation pendant $18\text{heurs} \pm 2\text{heurs}$;

4-Mesure de la masse dans l'eau et dans l'air : nous pesons les échantillons dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique, puis pesons la masse dans l'air (M_{air}) ;

La porosité accessible à l'eau $\xi(\%)$ est calculée par la relation (2.4) :

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

La masse volumique apparente est définie par l'expression (2.3)

$$P; \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times \rho_{\text{eau}} \quad (2.3)$$



Figure II. 14 : Appareillage de l'essai de porosité accessible à l'eau.

II.7 Organigrammes des essais

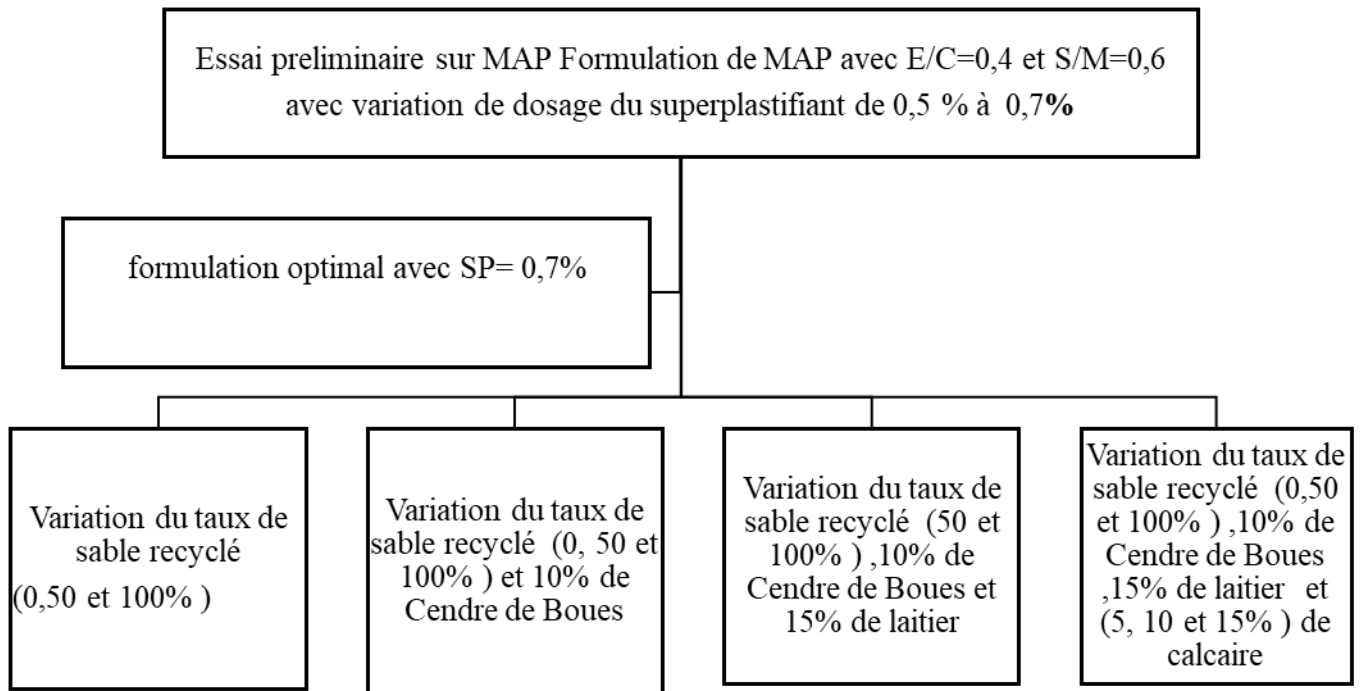


Figure II. 15: Essais préliminaire sur MAP et les dosages des ajouts utilisés dans la formulation.

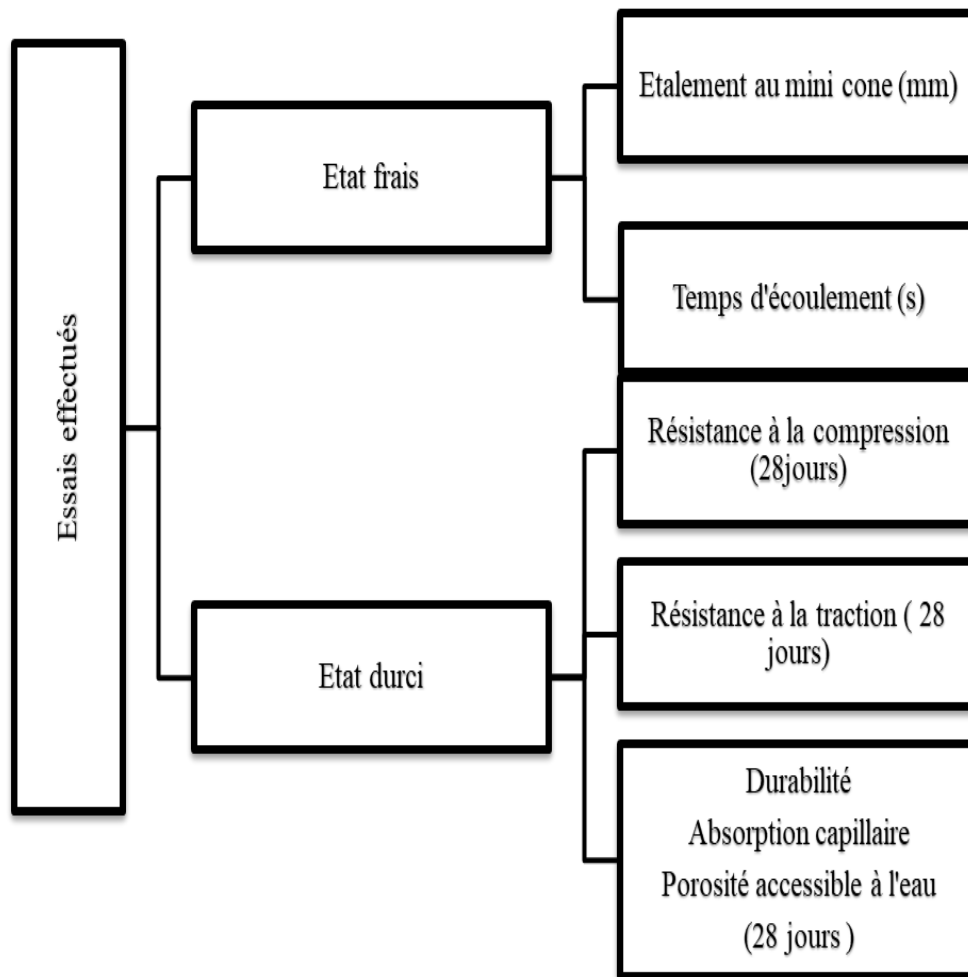


Figure II.16: Essais effectués à l'état frais et durci.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction

Ce chapitre représente les résultats expérimentaux obtenus à la suite des essais portant à la fois sur les propriétés à l'état frais (ouvrabilité) et à état durci (résistance à la compression, traction et durabilité) .

III.2 Optimisation du dosage en superplastifiant

La figure III.1 et le tableau III. 1 représentent les résultats obtenus lors de la variation du dosage du superplastifiant.

Tableau III. 1 : Optimisation du superplastifiant.

Dosage en SP (%)	0.5	0.6	0.7
Etalement (mm)	210	287	325
Ecoulement (s)	2	4	6
Observation	MAP adhérent	MAP adhérent	MAP adhérent

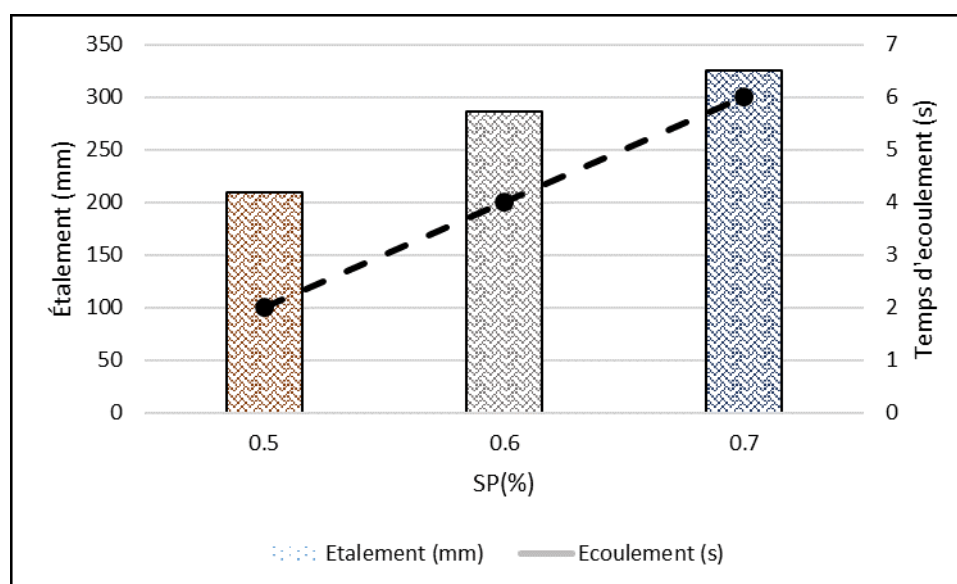


Figure III. 1: Etalement et l'écoulement en fonction du SP du mortier autoplaçant témoin.

L'optimisation du dosage en superplastifiant (Sp) a permis d'améliorer significativement les propriétés à l'état frais de mortier autoplaçant à base de granulats recyclés. Les essais réalisés ont montré qu'une augmentation de dosage en SP de 0.5% jusqu'à une valeur optimale 0.7% par rapport au poids du ciment, entraîne une diminution notable de l'eau de gâchage nécessaire, tout en augmentant l'affaissement du mortier autoplaçant de (210 mm à 325 mm) et une diminution de temps d'écoulement de (6 s à 2s). Cependant au-delà de cette dose optimale (0.7%), un effet de ressuage a été observé lors de la formulation

III.3 Influence du sable Recyclé de démolition et ciment quaternaire a l'état frais :

Dans cette étude, une première formulation de mortier témoin a été réalisée, sans aucune addition. En suite, deux autres mortiers ont été formulés en remplaçant les granulats naturels par des granulats recyclés de 0%, 50 % et 100 %. Par la suite, 10 %, puis du laitier 15 %, et le calcaire avec 5, 10 et 15 % (tableau III. 2). Ces ajouts ont permis de constituer des combinaisons binaires (MAP + cendres de boue), ternaires (MAP + cendre de boue, laitier) et quaternaires (MAP + laitier + calcaire). En complément, deux autres types de mortiers autoplaçants ont été formulés en remplaçant les granulats naturels par des granulats recyclés de 0%, 50%, 100%. Pour ces deux derniers cas, les mêmes systèmes de formulation (binaire, ternaire et quaternaire) ont été appliqués afin d'évaluer l'influence de ces matériaux recyclés sur les performances des mortiers autoplaçants.

Tableau III. 1: Différentes compositions des MAP(g)

Formulation	Ciment	E1	SP	SN	SR	Boues	Laitier	calcaire
M0%	1049	458	7	1950	/	/	/	/
M50%R	1049	510	7	975	900	/	/	/
M100%R	1049	559	7	/	1800	/	/	/
M0%10%B	944,1	458	7	1950	/	104,9	/	/
M50%R10%B	944,1	458	7	975	900	104,9	/	/
M100%R10%B	944,1	458	7	/	1800	104,9	/	/
M0%10%B15%L	786,75	458	7	1950	/	104,9	157,35	/
M50%R10%B15%L	786,75	458	7	975	900	104,9	157,35	/
M100%R10%B15%L	786,75	510	7	/	1800	104,9	157,35	/
M0%10%B15%L5%C	734,3	510	7	1950	/	104,9	157,35	52,45
M50%R10%B15%L5%C	734,3	510	7	975	900	104,9	157,35	52,45
M100%R10%B15%L5%C	734,3	510	7	/	1800	104,9	157,35	52,45
M0%10%B15%L10%C	681,85	510	7	1950	/	104,9	157,35	104,9
M50%R10%B15%L10%C	681,85	559	7	975	900	104,9	157,35	104,9
M100%R10%B15%L10%C	681,85	559	7	/	1800	104,9	157,35	104,9
M0%10%B15%L15%C	629,4	559	7	1950	900	104,9	157,35	157,35
M50%R10%B15%L15%C	629,4	559	7	975	900	104,9	157,35	157,35
M100%R10%B15%L15%C	629,4	559	7	/	1800	104,9	157,35	157,35

Les résultats expérimentaux des essais sur l'ouvrabilité des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclé et ajouts cimentaire sont donnés dans le tableau III.3 et la figure III.2.

Tableau III. 2: Résultats expérimentaux des essais sur l'ouvrabilité des différents mortiers autoplaçants

MAP	Temps d'écoulement en V-funnel (sec)	Étalement au mini cône (mm)
M0%	3,33	325
M50%R	16	285
M100%R	3	325
M0%10B	16	245
M50%R10%B	8	270
M100%R10%B	7	255
M0%10%B15%L	5,8	283
M50%R10%B15%L	9	270
M100%R10%B15%L	6	302
M0%10%B15%L5%C	6	262
M50%R10%B15%L5%C	4	298
M100%R10%B15%L5%C	3,8	310
M0%10%B15%L10%C	5,13	285
M100%R10%B15%L10%C	4	298
M50%R10%B15%L10%C	5,7	293
M0%R10%B15%L15%C	5,3	298
M50%10%B15%L15%C	4,6	278
M100%R10%B15%L15%C	5,3	298

III.3.1 Effet de granulats recyclés sur le mortier autoplçant a base de granulats recyclés

Les résultats expérimentaux des essais de 'ouvrabilité des d'ifférents mortiers autoplçants à base de granulats recyclé sont données dans la figure III.2.

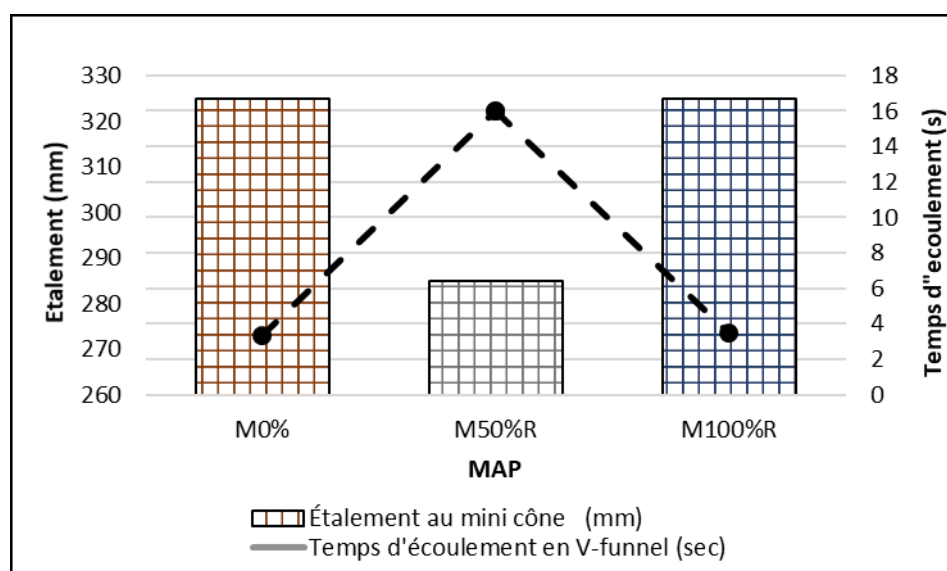


Figure III. 2 : Étalement et temps d'écoulement des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé

Les résultats de la figure III.2 ont montré que la substitution de 50 % de granulats naturels par des granulats recyclés diminue l'étalement au mini cône avec 60% Parraport au béton témoin et augmente le temps d'écoulement entonnoir en V avec 60%, par rapport au mortier témoin (0% granulats recyclés). En générale le mortier autoplçant recyclé présente des densités plus faibles que celles du béton de référence, Cette diminution de fluidité par rapport au mortier naturel est due principalement à la densité faible des granulats recyclés. Ceci peut s'expliquer aussi par la présence de fines provenant d'un ancien béton qui augmente la demande en eau et affecte négativement l'ouvrabilité, plusieurs études ont remarqué les mêmes résultats [64].

Mais, à 100% de granulats recyclés nous avons remarqué que l'étalement à augmenter et devenue le même que l'étalement de granulats naturel seulement (0% changement) peut être due aux granulats recyclés, contiennent souvent des fines (<0,125 mm) issues de l'ancienne matrice cimentaire. Ces fines jouent un rôle de lubrification le frottement entre deux surfaces

en contact et améliorant la fluidité et compensant l'absorption d'eau plus élevée des granulats recyclés [62], [63] , La figure III.3 représente l'étalement de mortier a base de 50% de granulats recyclé .



Figure III. 3 : Étalement du MAP à base de 50%R.

III.3.2 Effet de cendre de boue sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant à base de granulats recyclés

Les résultats expérimentaux des essais de 'ouvrabilité des d'efférents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclé sont données dans la figure III.4

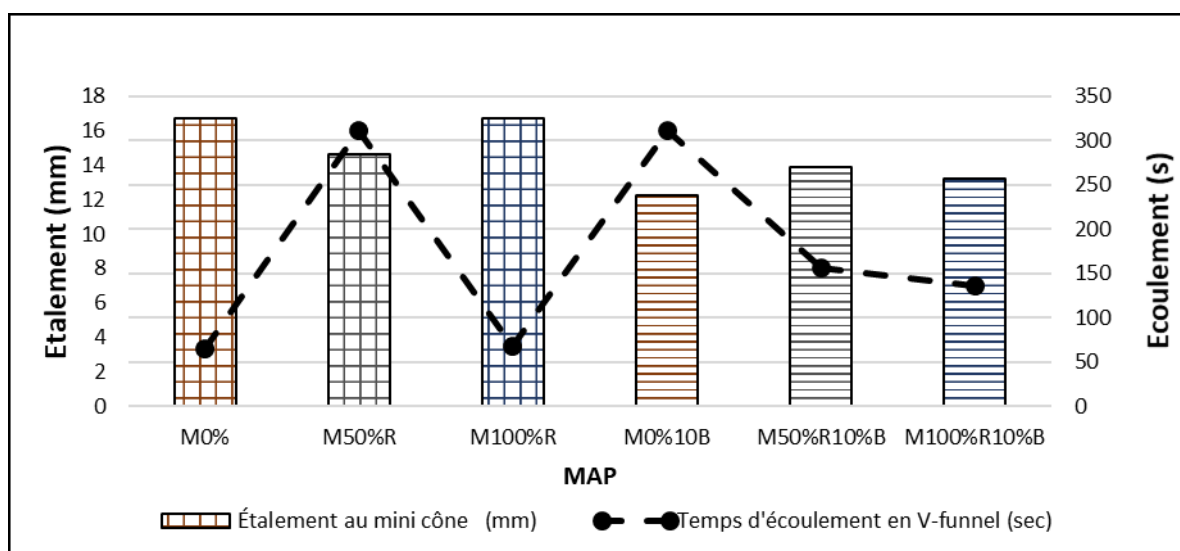


Figure III. 4 : Effet de la cendre de boue sur l'étalement et le temps découlement des MAP à base de 50%et100% de sable recyclé.

Les résultats de l'effet de la cendre de boue incorporée en tant que substitut partiel (10%) au ciment, dans des mortiers autoplaçants formulés avec des granulats recyclés (à hauteur de 50% et 100%) sur l'étalement et le temps de coulement sont représentés dans la figure III. 4. Les résultats montrent que l'ajout de cendre de boue influence plusieurs propriétés du mortier, notamment la fluidité de mélange. L'utilisation de système binaire 910% de cendre de boue avec des granulats recyclés (quelque soit 50% ou 100%) a permis de produire un mortier autoplaçant selon les normes, écologique et partiellement valorisant des déchets industriels, sachant que l'incorporation de cendre de boue aux mortiers influence significativement la rhéologie du mortier. A faibles taux (inférieurs à 10 %), la cendre de boue agit comme un filler, améliorant légèrement la fluidité grâce à sa finesse et à sa capacité à combler les vides entre les grains. Mais à des pourcentages plus élevés (notre cas c'est 10%), elle tend à absorber davantage d'eau en raison de sa porosité interne, ce qui peut réduire l'ouvrabilité du mélange. Cette baisse de fluidité est augmentée lorsqu'on utilise des granulats recyclés, eux-mêmes plus poreux et irréguliers que les granulats naturels. Ainsi un ajustement du superplastifiant ou du rapport eau/liant devient nécessaire pour maintenir une bonne ouvrabilité. [65], [66], [67] , La figure III.5 représente l'étalement de mortier à base de 50% de granulats recyclé

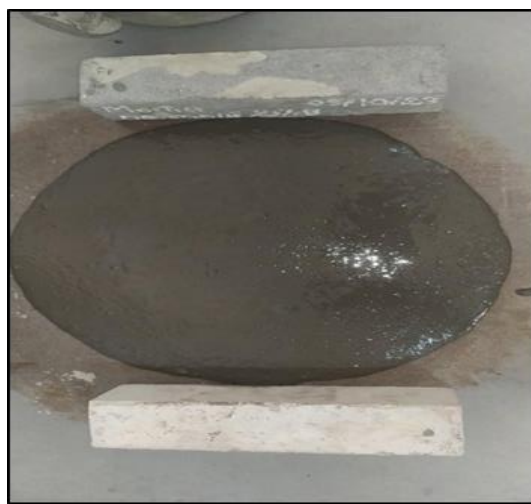


Figure III. 5 : Etallement du MAP à base de 50%R10%B.

III.3.3 Effet de laitier sur le mortier autoplaçant à base de granulats recyclés

Les résultats expérimentaux des essais de 'ouvrabilité des d'efférents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclé sont données dans la figure III.6

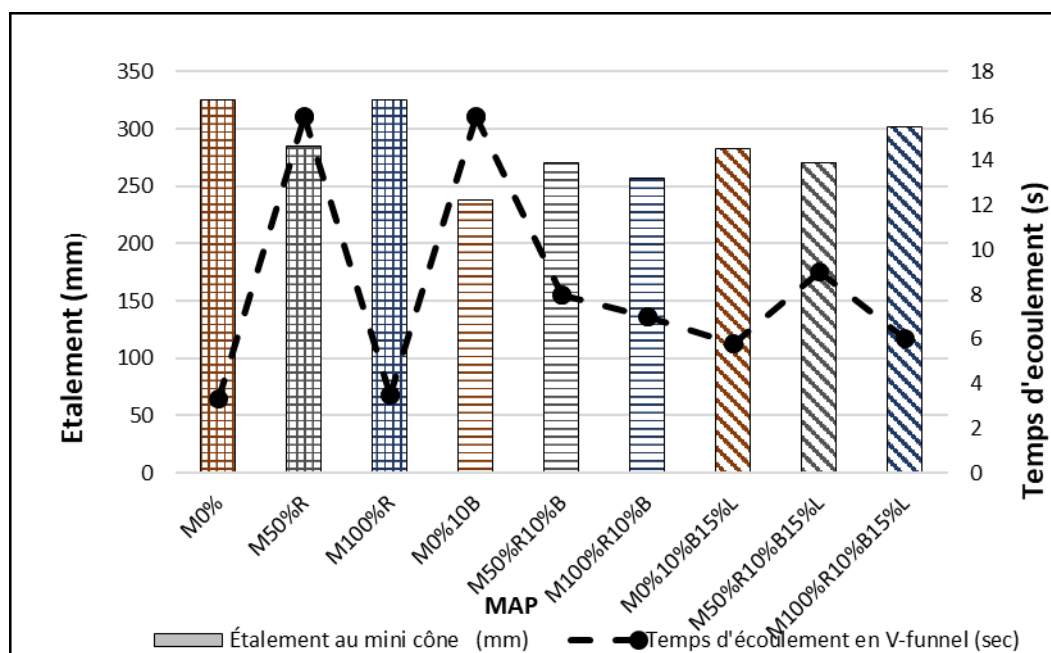


Figure III. 6: Effet combiné de la cendre de boue et le laitier sur l'étalement et le temps d'écoulement des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé.

D'après la figure III.6, L'incorporation de 10% de cendres de boue et de 15% de laitier dans un mortier à base de 50% et 100%, permet d'obtenir des résultats satisfaisants, l'addition de 15% du laitier améliore l'ouvrabilité des mortiers à base de 50% et 100% de granulats recyclés par rapport au mortier binaire sans laitier avec (22%, 16%, 20%) respectivement

Le laitier de haut fourneau moulu est composé de particules très fines et lisses. Ces deux caractéristiques ont un double effet :

-Moins de surface spécifique à mouiller :

Comparé à des grains plus rugueux, les particules lisses du laitier absorbent moins d'eau à leur surface. Cela laisse plus d'eau "libre" dans le mélange, ce qui réduit l'étalement et augmente le temps d'écoulement.

-Effet de remplissage

Les fines particules de laitier se glissent entre les grains de ciment et de sable, comblant les espaces vides. Cela permet une meilleure compacité du mélange et facilite son écoulement, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter beaucoup d'eau.[9], La figure III.7 représente l'étalement de mortier à base de 50% de granulats recyclé, 10% cendre de boue et 15% laitier.



Figure III. 7: Étalement du MAP à base de 50%R10%B15L%.

III.3.4 Effet de calcaire sur le mortier autoplaçant à base de granulats recyclés

Les résultats expérimentaux des essais de 'ouvrabilité des d'efférents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclé sont données dans la figure III.8

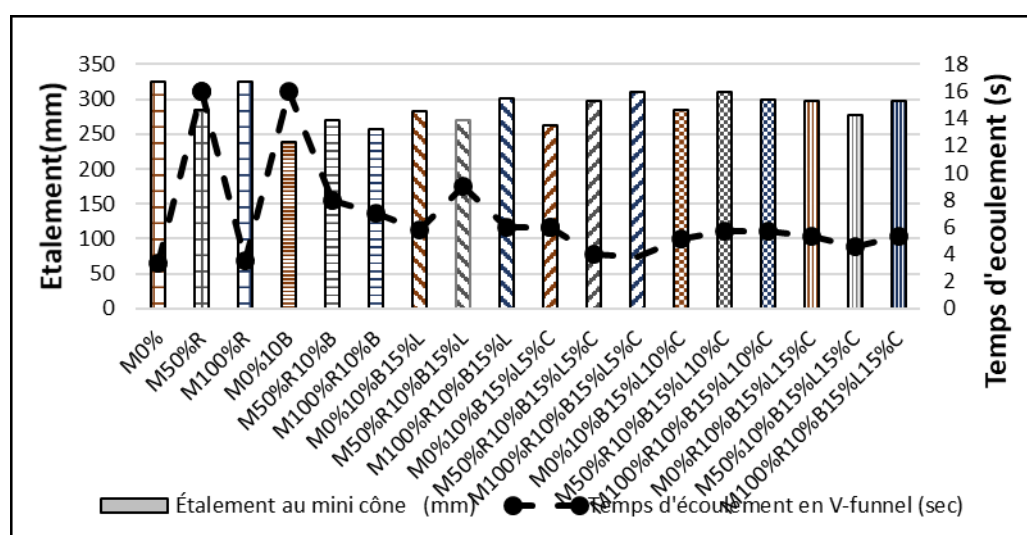


Figure III. 8: Effet combine de la cendre de boue (10%), laitier (15%) et calcaire (5,10,15%) sur l'étalement et le temps d'écoulement des MAP à base de 50%et100% de sable recyclé.

L'incorporation de l'ajout calcaire dans les systèmes ternaire (ciment+cendre de boue+laitier) à des taux de remplacement de 5 %, 10 % et 15 %, a montré un effet bénéfique sur l'ouvrabilité des mortiers fabriqués à partir de granulats recyclés.

L'ajout de 5% à 15% de calcaire augmente l'étalement de (45 % 42%, 46%), et (48% 46%, 50,6%) par rapport aux mélanges ternaires et binaires respectivement.

Le Temps d'écoulement varie entre Cette amélioration s'explique par plusieurs facteurs :

Tout d'abord, la poudre de calcaire, grâce à sa finesse et à sa forme généralement arrondie, agit comme un filler (agent de remplissage) entre les particules plus grossières de ciment et de granulats. Ce rôle de remplissage permet de densifier la matrice et de réduire les frottements internes dans le mélange ce qui facilite le passage et le remplissage du mortier sans vibration, en plus l'ajout de calcaire contribue à améliorer la compacité de la pâte, ce qui a pour effet de libérer une partie de l'eau emprisonnée dans les pores des granulats recyclés. Ces derniers, étant plus poreux et plus absorbants que les granulats naturels, ont tendance à réduire l'ouvrabilité du mortier. L'introduction du calcaire compense en partie cet effet défavorable[43] , La figure III.9 représente l'étalement de mortier à base de 50% de granulats recyclés, 10% cendre de boues, 15% calcaire et 10% ciment.



Figure III.9: Etalement du MAP à base 50%R10%B15%L10%C.

III.4 Influence du sable de Recyclé de démolition et ciment quaternaire a l'état durci

Les résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la compression des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés et ajouts cimentaires (binaire, ternaire et quaternaire) sont résumés dans le tableau III.4.

Tableau III. 3 : Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la compression des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés et ajouts cimentaires

La Résistance à la compression (MPa)	
MAP	À 28 jours
M0%	61.4
M50%R	58.4
M100%R	40
M0%10%B	60
M50%R10%B	60
M100%R10%B	45
M0%10%B15%L	40
M50%R10%B15%L	39
M100%R10%B15%L	38
M0%10%B15%L5%C	60.1
M50%R10%B15%L5%C	48.7
M100%R10%B15%L5%C	34.2
M0%10%B15%L10%C	65.5
M50%R10%B15%L10%C	50.01
M100%R10%B15%L10%C	41.1
M0%R10%B15%L15%C	65.1
M50%10%B15%L15%C	50
M100%R10%B15%L15%C	39.2

III.4.1 Effet de granulats recyclés sur la résistance à la compression des MAP avec 50% et 100% de sable recyclé

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la compression des différents mortiers autoplacants à base de granulats recyclés sont présentés dans le tableau III.10.

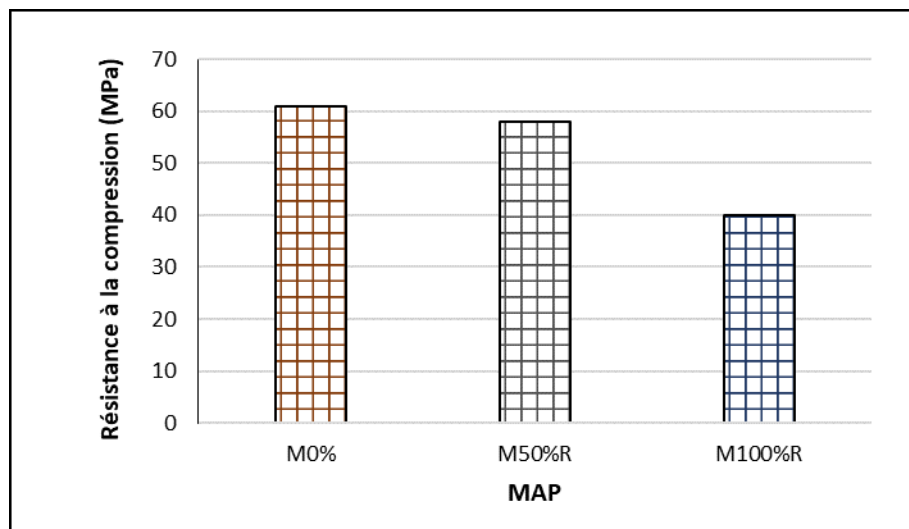


Figure III. 10: Effet des granulats recyclés sur la résistance à la compression des MAP.

L'incorporation de sable recyclé de démolition de béton à (50 % et 100 %) provoque une réduction de la résistance à la compression par rapport au mortier de contrôle avec (30 %, 50%) respectivement. Cette diminution dépend du pourcentage de remplacement. Cela peut s'expliquer par la présence de mortier attaché aux granulats recyclés, ce qui gêne l'hydratation du ciment et absorbe l'eau de gâchage nécessaire pour les réactions de l'hydratation de ciment, Moins de CSH entraînant une diminution de la résistance. La même remarque a été observée par d'autres chercheurs [64].

III.4.2 Effet de cendre de boue sur la résistance à la compression de mortier à base de granulats recyclés

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la compression des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés et la boue sont présentés dans le tableau III.11.

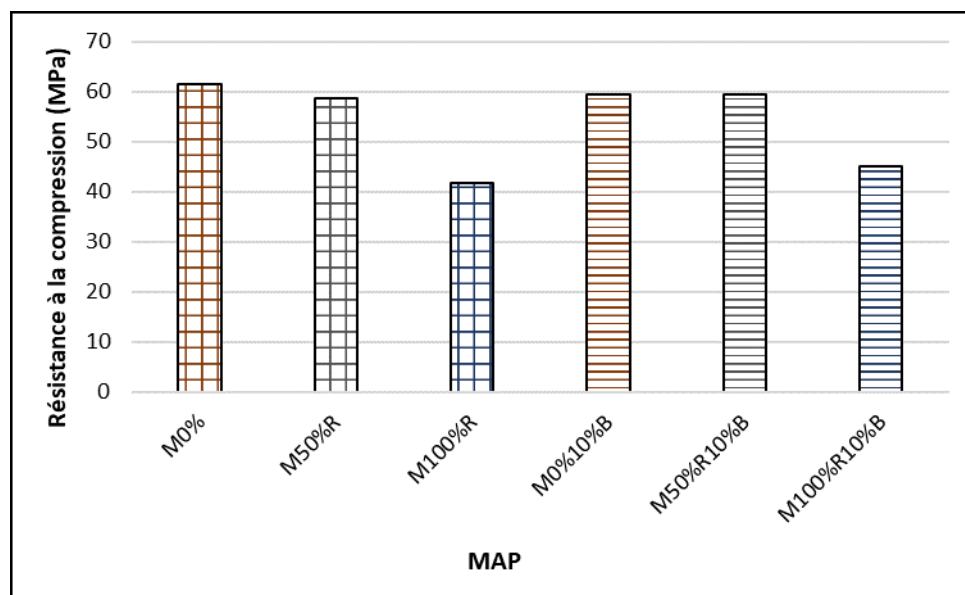


Figure III. 11: Effet de la cendre de boue sur la résistance à la compression des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé.

D'après la figure III.11 À 28 jours, la résistance à la compression du mortier contenant 10 % de cendre de boue est influencée légèrement par les réactions pouzzolaniques entre la cendre et les produits d'hydratation du ciment. Lors de l'hydratation du ciment Portland une augmentation de (12% 15% 20%) Par rapport au mortier sans ajouts, (0% 50% et 100% de granulats recyclés) respectivement les composés principaux (comme le silicate tricalcique – C_3S – et le silicate dicalcique – C_2S) réagissent avec l'eau pour former du silicate de calcium hydraté (C-S-H), responsable de la résistance mécanique, et de la chaux libre ($Ca(OH)_2$). La cendre de boue, n'a pas comme un autre ajouts avec une grande réactivité pouzzolanique, si elle contient quantité suffisante de silice amorphe (SiO_2) ou d'alumine (Al_2O_3), peut réagir chimiquement avec cette chaux libre

selon la réaction suivante :



Cette réaction forme un gel C-S-H supplémentaire, qui densifie la matrice du mortier, réduit sa porosité et améliore son comportement mécanique à long terme. Ainsi, à 28 jours, le mortier avec 10 % de cendre de boue peut montrer une résistance similaire, voire supérieure, à celle d'un mortier sans addition, en fonction de la réactivité de la cendre utilisée. Il est important que la cendre de boue soit bien calcinée, pour éliminer les matières organiques et activer la silice, afin de maximiser cet effet pouzzolanique [65], [66].

III.4.3 Effet de l'ajout de Laitier sur la résistance à la compression de mortier à base de granulats recyclés

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la compression des différents mortiers autoplacants à base de granulats recyclés, la boue et le laitier sont présentés dans le tableau III.12.

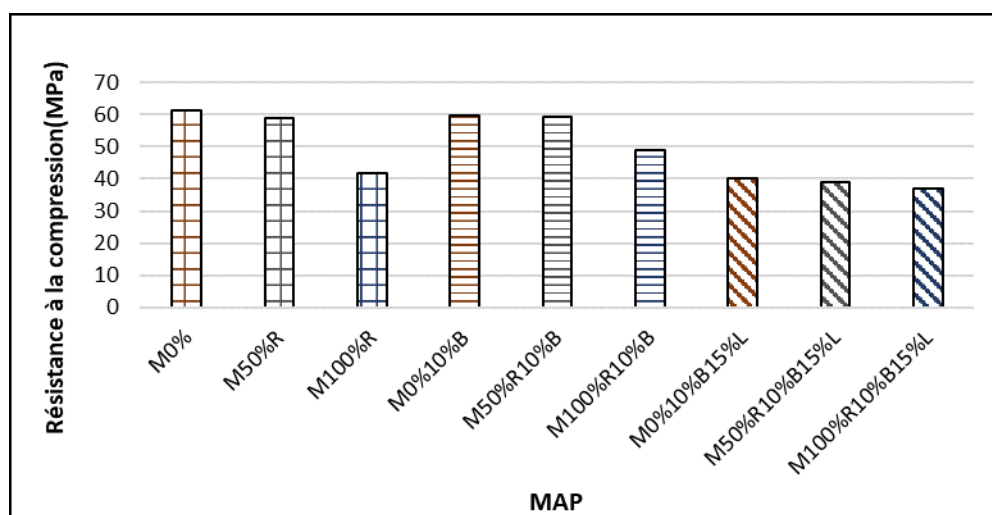


Figure III. 12: Effet combiné de la cendre de boue et le laitier sur la résistance à la compression des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé.

Selon et la figure III.12, l'ajout de laitier granulé de haut fourneau peut améliorer la résistance à la compression du béton mais pas à 28 jours à long terme due à la faible réactivité pouzzolanique. Cette augmentation due à l'effet de laitier qui améliore la portlandite dégagée par le ciment, formant ainsi un deuxième silicate de calcaire CSH, ce qui confère une meilleure résistance par rapport au ciment sans laitier. Pour plusieurs raisons techniques liées à sa nature chimique et sa réactivité, le laitier est un ajout hydraulique et pouzzolanique en même temps, il a besoin d'un environnement alcalin (fourni par l'hydrolyse du ciment portland) pour commencer sa réaction, cette dernière est beaucoup plus lente que celle du clinker du ciment portland, clinker contient beaucoup de C3S (silicate tricalcique) qui réagit rapidement, le laitier n'en contient pas, donc il ne produit pas autant de CSH rapidement,

responsable de la résistance à jeune âge. Donc à jeune âge c'est surtout le ciment portland qui contribue à la résistance. [9].

III.4.4 Effet de l'ajout de calcaire sur la résistance à la compression de mortier à base de granulats recyclés

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la compression des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés, la boue, laitier et le calcaire ont présentés dans le tableau III.13

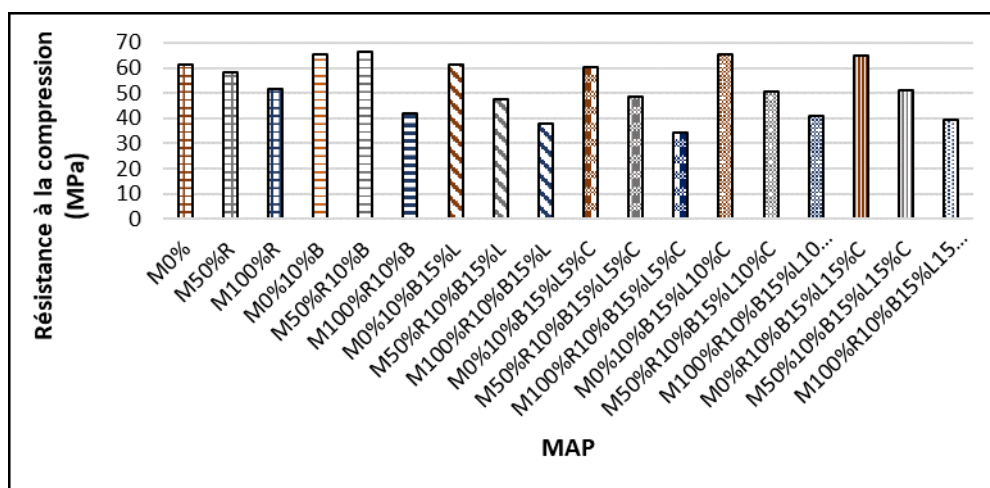


Figure III. 13: Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur la résistance à la compression des MAP a base de 50% et 100% de sable recyclé.

La figure III.13 montre que l'incorporation de 10% calcaire dans les systèmes ternaires (ciment cendre de boue+laitier) à des taux de remplacement de 5%, 10 % et 15 %, a montré un effet bénéfique la résistance à la compression des mortiers conçus à partir de granulats recyclés et système binaire et ternaire avec (30%32%,54%),(35%40%55%) respectivement. Cette amélioration s'explique par plusieurs facteurs :

Tout d'abord, la poudre de calcaire, grâce à sa finesse et à sa forme généralement arrondie, agit comme un filler (agent de remplissage) entre les particules plus grossières de ciment et de granulats. Ce rôle de remplissage permet de densifier la matrice et de réduire les frottements internes dans le mélange ce qui facilite le passage et le remplissage du mortier.

Ensuite, l'ajout de calcaire contribue à améliorer la compacité de la pâte, ce qui a pour effet de libérer une partie de l'eau emprisonnée dans les pores des granulats recyclés. Ces derniers, étant plus poreux et plus absorbants que les granulats naturels, ont tendance à réduire

l'ouvrabilité du mortier. L'introduction du calcaire compense en partie cet effet défavorable[39]

III.5 Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à traction des différents mortiers autoplaçants

Les résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la traction des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés et ajouts cimentaires (binaire, ternaire et quaternaire) sont résumés dans le tableau III.5.

Tableau III. 4 : Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la traction des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés et ajouts cimentaires

La résistance à la traction (MPa)	
MAP	à 28 jours
M0%	1.61
M50%R	1.56
M100%R	1.41
M0%10%B	1.55
M50%R10%B	1.50
M100%R10%B	1.22
M0%10%B15%L	1.54
M50%R10%B15%L	1.55
M100%R10%B15%L	1.4
M0%10%B15%L5%C	1.5
M50%R10%B15%L5%C	1.59
M100%R10%B15%L5%C	1.58
M0%10%B15%L10%C	1.40
M50%R10%B15%L10%C	1.61
M100%R10%B15%L10%C	1.42
M0%R10%B15%L15%C	1.60
M50%10%B15%L15%C	1.59
M100%R10%B15%L15%C	1.42

III.5.1 Effet de granulats recyclés sur le mortier autoplaçant sur la résistance à la flexion

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la traction des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés sont présentés dans le tableau III.14.

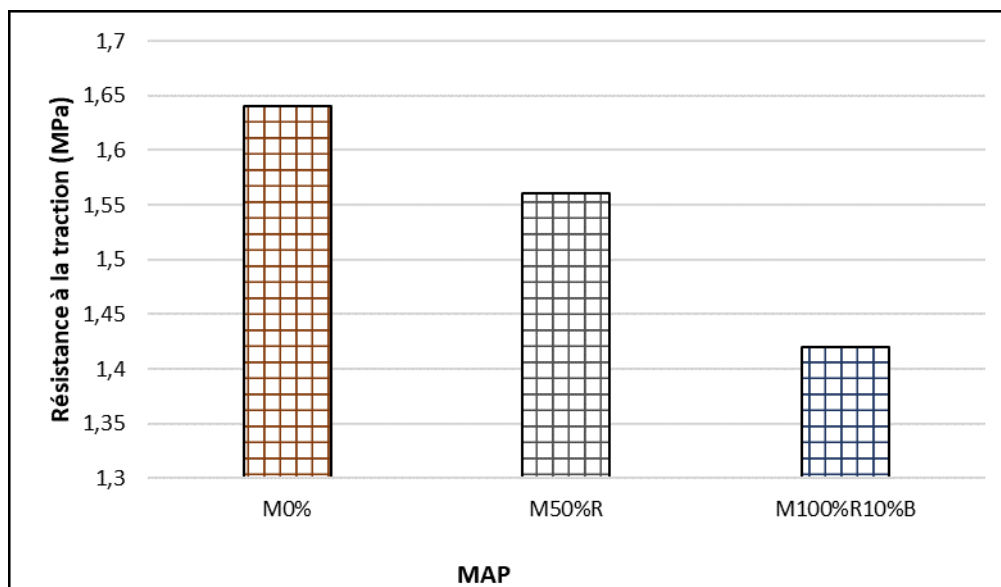


Figure III. 14: Effet des granulats recyclés sur la résistance à la traction par flexion des MAP.

Une diminution a été remarquée (40%,51%) de la résistance à la traction lorsque le remplacement des granulats recyclés augmente de 50 % à 100 %. Cette diminution notable est due à la faible structure des granulats recyclés et aux microfissures qu'ils contiennent, ce qui entraîne une baisse de la résistance. Il est important de noter que le mortier déjà à une faible résistance à la traction

III.5.2 Effet de cendre de boues sur la résistance à la traction par flexion de mortier à base de granulats recyclés

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la traction des différents mortiers autoplaçants à base de granulats recyclés et la boue sont présentés dans le tableau III.15.

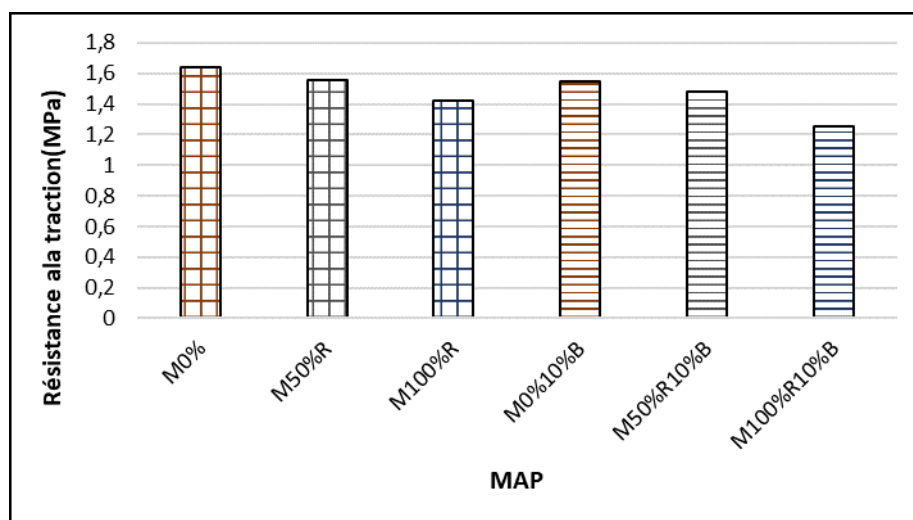


Figure III. 15: Effet de la cendre de boue sur la résistance à la compression des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé.

D'après la figure III.15, cendre de boues diminue la résistance à la traction avec (20%, 25%, 39%), cette baisse est principalement due aux particules fines présentes dans la boue, qui ont un effet négatif sur la cohésion interne du mélange et altèrent l'adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats, même résultats trouvés par [67], [74].

III.5.3 Effet de laitier sur la résistance à la traction par flexion de mortier à base de granulats recyclés

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la traction des différents mortiers autoplacants à base de granulats recyclés, la boue et le laitier sont présentés dans le tableau III.16.

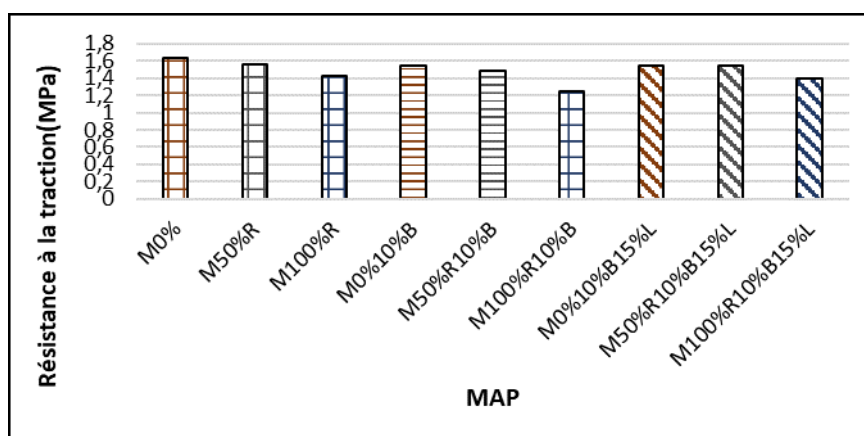


Figure III. 16: Effet combiné de la cendre de boue et le laitier sur la résistance à la compression des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé.

Selon la figure III.16, après 28 jours de cure humide, les résultats montrent une légère augmentation de la résistance à la flexion à 28 jours avec (11%), L'ajout de ces matériaux (laitier) améliore la compacité des mortiers à base de granulats recyclés, ce qui signifie qu'il devient plus dense, avec moins de vides (pores), le vrai effet de laitier est remarquable à long terme (après 56 jours). Un mortier plus dense est plus résistant et moins susceptible aux fissures. [52], [73].

III.5.4 Effet de calcaire sur la résistance à la traction par flexion de mortier à base de granulats recyclés

Résultats expérimentaux des essais sur la résistance à la traction des différents mortiers autoplacants à base de granulats recyclés sont présentés dans le tableau III.17.

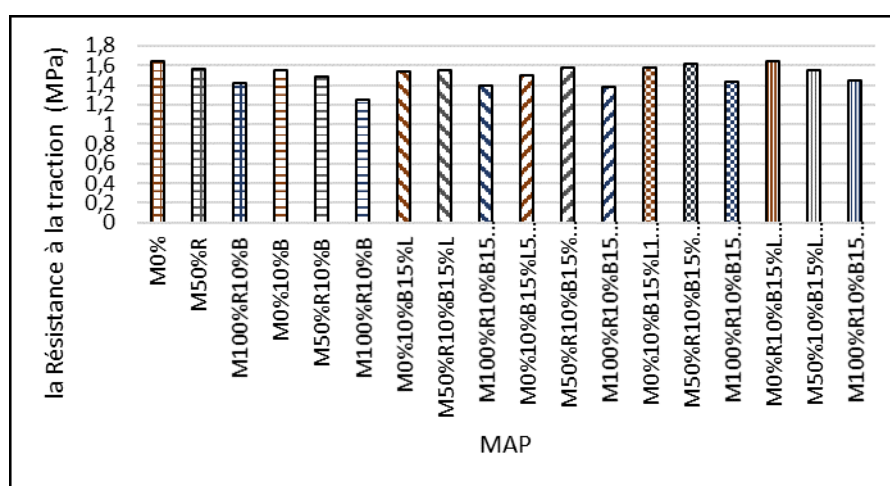


Figure III. 17 : Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur la résistance à la traction par flexion des MAP à base de 50% et 100%de sable recyclé.

Selon la figure III.17, Le mélange quaternaire, 10 % cendres de boues, 15% de laitier et 10 % calcaire, avec 50% de granulats recyclés a une résistance à la flexion élevée Avec (40%,25%) Par rapport au ciment binaire et ternaire respectivement due au ajouts cimentaires , la présence de 10 % calcaire dans la pâte conduit à une meilleure cohésion et a entraîné une matrice de mortier plus résistante par l'effet de remplissage entre la pâte de ciment et les granulats (zones de transition) , 10%, la boue peut améliorer la dispersion des particules fines sans trop affecter la compacité , aussi le laitier un effet positif sur la compacité de mortier sachant même résultats trouvé par[39].

III.6 L'influence de granulats recyclés, cendre de boues, laitier et le calcaire sur Absorption d'eau par capillarité

Résultats expérimentaux des essais sur l'absorption capillaire des différents mortiers autoplaçants sont présentés dans le tableau III.18.

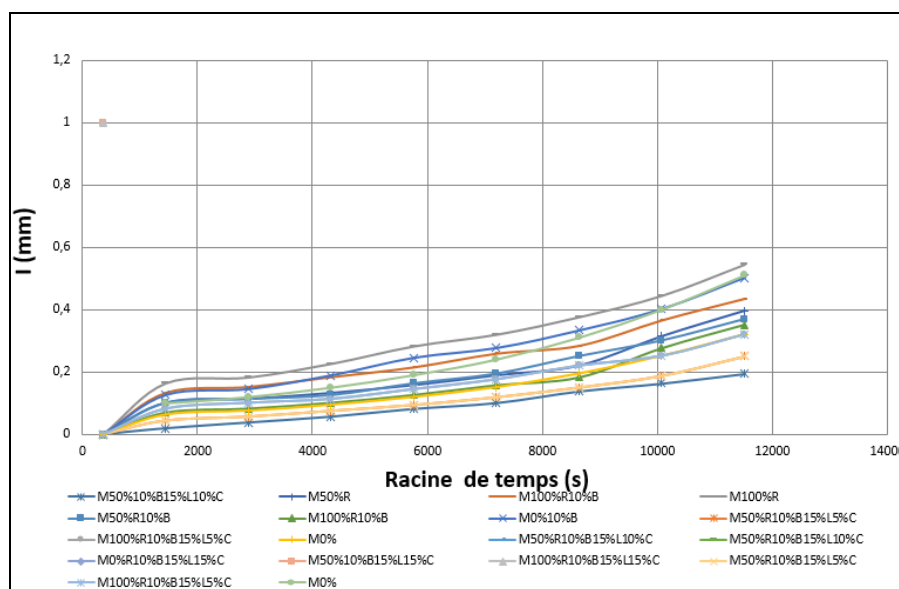


Figure III. 18: Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur l'absorption capillaire des MAP à base de 50% et 100% de sable recyclé.

La figure III .18 représente les variations d'absorption des mortiers à base de granulats recyclés et les systèmes ternaire binaire et quaternaire. D'après la figure III .19, une augmentation de l'absorption a été observée pour les mélanges à base de granulats recyclés, à chaque fois que le remplacement des granulats recyclés augmente (50 % et 100 %) avec (25,8% , 50,1%) respectivement, car ils absorbent l'eau due à la pâte supplémentaire liée avec granulats recyclés e [23], [24]. L'ajout de 10 % cendre de boues, 15 % de laitier et 10 % calcaire, avec 50% de granulats recyclés diminue l'absorption d'eau par rapport aux mélanges avec granulats recyclés seulement et le système binaire et ternaire. L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) issu de l'hydratation du ciment réagit avec 10 % de cendre de boue pour créer dans la pâte du gel de silicate de calcium hydraté (CSH) additionnel qui augmente la résistance chimique et physique et donne une structure de pore plus raffinée et plus inaccessible à l'eau a amélioré la résistance l'absorption des mortiers, le calcaire finement broyé agit comme un remplissage des pores, aussi le laitier, Même résultats que [52], [68].

III.7 L'influence de granulats recyclés, cendre de boues, laitier et le calcaire sur la porosité

Résultats expérimentaux des essais sur la porosité des différents mortiers autoplaçants sont présentés dans le tableau III.19.

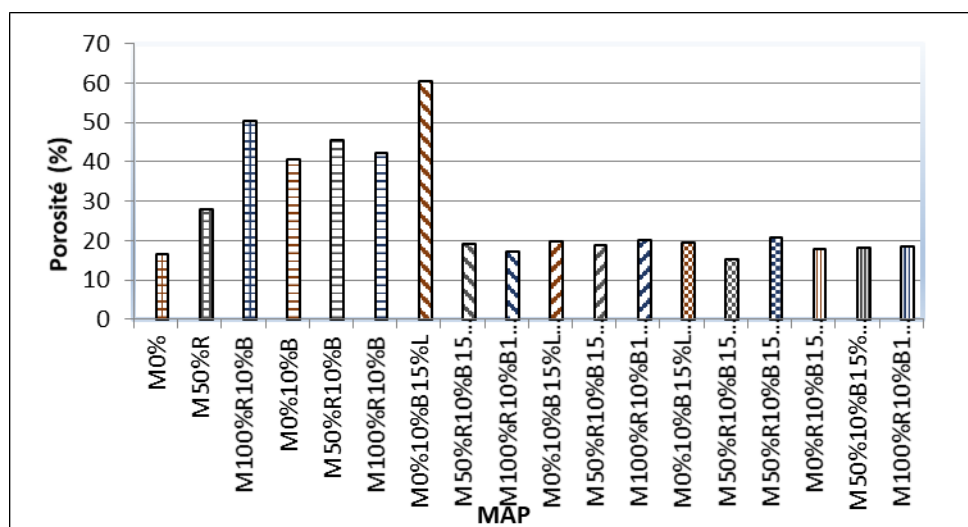


Figure III. 19 : Effet combiné de la cendre de boue, laitier et calcaire sur la porosité des MAP à base de 50% et 100%de sable recyclé.

La figure III.19 montre que les granulats recyclés (50%R,100%R)augmentent la porosité due à la présence de mortier attaché qui est caractérisée par une forte teneur de vide avec (23%,50%) respectivement, le volume et la taille des pores influent sur les capacités de transfert du mortier, [25]. L'ajout de 50% de granulats recyclés ,10 % de cendre de boue ,15 % de laitier et 10 % de calcaire donne des résultats comparables au mortier de contrôle. En raison de l'effet de remplissage des ajouts, sachant que la boue issue des stations dépollution ou des déchets industriels contient des particules très fines, ces particules généralement ont une surface irrégulière et une structure interne poreuse qui a augmenté la porosité des mélanges binaire , mais la présence de calcaire et laitier qui ont un bon effet de remplissage. Donc l'utilisation de ces ajouts dans les mortiers à base de granulats recyclés provoque également une diminution de la porosité par rapport au mortier à base de granulats recyclés sans et avec laitier, et des résultats presque équivalentes au mortier de contrôle. Cette diminution est due à la finesse élevée des ajouts qui entre dans les pores remplacent l'air donc automatiquement la porosité diminue. Des recherches similaires ont été entreprises par [52].

III.8 Conclusion

Nous avons conclu que l'utilisation de granulats recyclés diminue l'ouvrabilité, les résistances mécaniques ainsi que la durabilité du mortier autoplaçant. Cependant, l'ajout de matériaux cimentaires permet d'améliorer les performances du mortier à l'état frais et durci. En particulier, les systèmes quaternaires se sont révélés très efficaces. Nos résultats prouvent qu'il est possible d'utiliser jusqu'à 50 % de granulats recyclés combinés à 35 % d'ajouts (10 % de B, 15 % de L et 10 % de C) tout en obtenant un mortier de bonne qualité.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Après avoir réalisé l'ensemble des essais conformément aux normes en vigueur, relative aux granulats recyclés dans le mortier autoplaçant à base des ajouts cimentaire, et en tenant compte des caractéristiques spécifiques des matériaux utilisés ; les résultats expérimentaux obtenus de la présente étude peuvent être résumés comme suit :

-L'utilisation de 50% et 100% de granulats recyclés tend à réduire l'ouvrabilité des mélanges avec 60%, par rapport au mortier témoin (0% granulats recycles) et diminué la résistance à la compression et traction avec (30 %,50%) , (40%,51%) respectivement et augmentent la absorption et la porosité

-l'ajout de 10% de la boue elle tend à absorber davantage d'eau en raison de sa porosité interne, ce qui peut réduire l'ouvrabilité du mélange et augmente la résistance à la compression (12% 15% 20%) Parraport au mortier sans ajouts,(0%50% et100% de granulats recyclés) gtrace a l'effet pouzzolanique de la boue par contre à la traction une réduction a était remarquer lors de l'utilisation de la boue due au particules fines présentes dans la boue, qui un effet négative sur la cohésion interne du mélange et une porosité élevé due au teneur en vide élevé .

-L'ajout du laitier un effet positif à l'état frais avec (22%,16%,20%) parrapport aux mortiers à base de 50% et 100% de granulats recyclés et mortier binaire sans laitier mais négligeable en ce qui concerne la résistance de compression à 28 jours due à sa lente réactivité pouzzolanique.

-l'ajout de 10 % de cendre de boue 15 % de laitier et 10 % de filler calcaire permet de compenser ces effets et donne un mortier autoplaçant équilibré et conforme aux normes, avec une ouvrabilité satisfaisante, ainsi que des performances optimales en termes de résistance à la compression, à la traction, d'absorption d'eau et de porosité, par rapport aux systèmes binaires et ternaires avec (42% 46%) , (32%40%) ,(40%,25%)respectivement due au morphologie et effet filler de calcaire et les autres ajouts ,

- **Recommandations pour des travaux futurs**

- Etudier et analyser la résistance du mortier autoplaçant à base de ciment quaternaire et granulats recyclés à long terme (90 et 180 jours).
- Etudier le comportement du béton recyclé à base de ciment quaternaire.
- Étudier la résistance au gel/dégel du mortier autoplaçant contenant du ciment quaternaire et granulats recyclés.
- Etudier l'aspect microscopique des mélanges quaternaires (Analyse MEB/DRX).

ANNEXES

ANNEXE A-EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

Feuille Excel donnant la composition du MAP

Feuille Excel donnant composition et résultats des essais					
Essais sur Mortier		Entrer data dans cellules en rouge Valeurs calculées dans cellules en noir			
Référence du mélange	Essai N°	CEM I 42,5 +	Date	11/06/2025	
		0 % de Mg			
		0 % de Poudre de marbre			
volume de mortier (litres)		1500,00			
sable/mortier vol		0,50			
E/P par vol.	1,115	poudre vol (%)	23,641	Eau volume (%)	26,359
composition Poudre(vol %)		type			
ciment portland		100			
Mg		0			
Poudre de Marbre		0			
superplast - MEDAFLOW30	0,70	% (Sp/P)			
Densité relative de la poudre	2,785				
teneur en eau du sable					
		humidité (%ab)	absorption(%)	correction (%)	
poids humide (g)	200	0,00	5,11	-5,11	
poids sec (g)	200				
Materiaux	Volume litres	Densité kg/m³	Masse kg	Contenance d'eau % kg	
poudre	354,610	2785	987,589		
Ciment	354,610	2785	987,589		
Mg	0,000	2685	0,000		
Poudre de marbre	0,000	2700	0,000		
Eau	395,390	1000	395,4		
superplastifiant MEDAFLOW 30		1070	6,91	70	4,839
Sable	750,000	2500	1875,000	-5,11	-95,813
Total	1500,000				
E/P poids = 0,400					

ANNEXE B-FICHE TECHNIQUE DE SIKA



NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

DOMAINES D'APPLICATION

- Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.

AGRÈMENTS / NORMES

Marquage CE et NF selon la norme NF EN 934-2 tab 3.1 et 3.2.
PV CNERIB : DTEM/108/2017

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	• Fût de 230 kg • Cubi de 1100 kg • Vrac
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact.
Conditions de Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Aspect / Couleur	Liquide brun clair à foncé
Densité	1,06 ± 0,01
Valeur pH	4,5 ± 1,0
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage

Plage de dosage : 0,2 à 3,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus



Notice produit
Sika® ViscoCrete® TEMPO-12
Juillet 2023, Version 01.03
021301011000000110

SikaViscoCreteTEMPO-12-fr-DZ-(07-2023)-1-3.pdf



REFERENCE

- [1] F.Ghomari and A.Bendi-Ouis, “Science des matériaux de construction.” Université de Aboubekr belkaid, 2008.
- [2] Bo Wang et Libo, “A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete.” 2021. [Online]: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
- [3] H. Bekki, Z. Rennak, A. Draoui, N. Kerroum, and H. Serbah, “Variation du dosage des déchets de brique sur la résistance en compression d’un mortier ”.
- [4] “I. Aouf et I. Cheriet, “Propriétés fraîche et durcie et durabilité de mortier auto-plaçant produit avec de poudre de céramique comme substituant du ciment. ”, Mémoire de Master 2, faculté de sciences et la technologie, Université de Ghardaia, 2023.”
- [5] P. Quiroga and D. Fowler, “The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete,” International Centre for Aggregates Research;, Jan. 2004.
- [6] ACI Committee 237, “237R-07: Self-Consolidating Concrete.” 2007.
- [7] M.Haifi, “formulation des bétons autoplaçant,,” mémoire de magister en génie civil, université de mentouri, Constantine, 2011.
- [8] E. N. NF, “Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants .” p. 38, 2012.
- [9] Ah. Sadok, Mh. S.Kenai, and D.Touil, “Résistance et durabilité des betons au laitier de haut fourneau pour les ouvrages hydrauliques ,” vol. 16, no. 28. pp. 29-37, 2016.
- [10] YOuada, “Historique de la production du ciment en Algérie.” 2011. [Online]. Available:<http://ouada-yazid.over-blog.com/article-historique-de-la-production-du-ciment-en-algerie-74033560.html>
- [11] M. B. I. Yahi, “Etat d’art et essais préliminaires sur l’influence de sable de fonderie sur les mortiers autoplaçants .”

- [12] E. N. NF, “au de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.” france, 1008.
- [13] S. Refrafi, “Influence des ajouts sur les caractéristiques physicomécaniques des mortiers et des bétons.”
- [14] P. T. A. Loukili, “Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants: Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques,” *Rev. Fr. Génie Civ*, vol. 7, no. 4, pp. 425-450, Apr. 2003, doi: 10.1080/12795119.2003.9692503.
- [15] S. Romagnosi, “Influences des granulats recyclé sur le comporteent a haute temeperature des betons.”
- [16] Rb. H.Colina, “Comment recycler le béton dans le béton - Recommandations du projet national RECYBETON.” 2018.
- [17] J. M. Gómez-Soberón, “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study,” vol. 32. p. 8, 2002.
- [18] Z. Kheira, “Effet des granulats recyclés sur le développement de la microstructure des bétons autoplaçants (BAP),” vol. 36, no. 1. p. 9, 2015.
- [19] F. U. A. Shaikh, “Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing ternary blended cementitious materials,” *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, no. 2, pp. 536-543, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.ijbe.2017.10.005.
- [20] H. A. Ajmani, F. Suleiman, I. Abuzayed, and A. Tamimi, “Evaluation of Concrete Strength Made with Recycled Aggregate,” *Buildings*, vol. 9, no. 3, p. 56, Mar. 2019, doi: 10.3390/buildings9030056.
- [21] Z. Zengfeng, “Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars,” vol. 81. p. 186, 2015.

- [22] B. Layachi, M. Laurent, N. Van-Minh, and M. Houria, “Étude expérimentale de la formulation des mortiers à base de sable recyclé ,” vol. 34, no. 1. 2016.
- [23] K. Deodonne, “Etudes des caractéristiques physico-chimiques des bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental ,” in Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université de strasbourg, France, 2015.
- [24] Evangelista et Brito, “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites.” 2009.
- [25] Silva et al, “Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. Construction and Building Materials, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>.” 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>
- [26] Kou et Poon, “Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. Construction and Building Materials.” Kou et Poon, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>
- [27] Pedro et al, “Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste – Influence of the crushing process.” 2014.
- [28] T. F. M. Yamada, “Influence of quality of recycled fine aggregate on properties of concrete »,” Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, vol. 43, 2002.
- [29] Z. Zhao, S. Rémond, D. Damidot, and L. Courard, “Une nouvelle méthode de caractérisation des granulats recuclés industriels: application aux mortiers,” no. November. pp. 1-12, 2015.
- [30] H. Zhao, Q. Xiao, D. Huang, and S. Zhang, “Influence of pore structure on compressive strength of cement mortar ».” p. 12, 2014. doi: 10.1155/2014/247058.
- [31] S. C. Angulo, C. Ulsen, V. M. John, H. Kahn, and M. A. Cincotto, “Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo,

- Brazil »,” Waste Manag, vol. 29, no. 2, pp. 721-730, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.07.009.
- [32] S. L. P. Rem, “Recycling of end of life concrete fines into hardened cement and clean sand »,” J. Environ. Prot, vol. 07, no. 06, pp. 934-950, 2016, doi: 10.4236/jep.2016.76083.
- [33] Tang et al, “Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field. ACI Materials Journal.” 1992.
- [34] Am. Y. Babouche, “Comment l’Algérie est passée du statut de pays importateur à celui d’exportateur de ciment ” algeria watch, 2017, [Online]. Available: <https://algeria-watch.org/?p=15927>
- [35] N. Anigbogu, “Impact of construction activities on the environment” p. 9, 2005.
- [36] M. S. Boughlada, “Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux ” Thèse de Doctorat en Génie Civil, Mostefa Ben Boulaid,Batna, vol. 2, 2019.
- [37] F.Benghoulia et S.Amir, L’“influence de l’ajout de filler de calcaire sur les Caractéristiques physico- mécaniques de brique crue à base de sable de dunes , Memoire de master 2 , Université Kasdi Merbah Ouargla ,2020.
- [38] Ab. N.Nagoudi, “Etude expérimentale d’un mortier avec ajouts minéraux »,” in Mémoire de Master 2 ,faculté de sciences et la technologie, Université kasdi Merbeh Ouargla, 2014.
- [39] A. Bouzid and M. N. Oudjit, “L’effet des fillers de calcaire sur les propriétés physico-chimiques du mortier à base de CRS,” 2012.
- [40] J. Khatib and R. Clay, “Absorption characteristics of metakaolin concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 19–29, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00188-1.
- [41] P.H.A.U.Z.A., “Le Métakaolin flash ” paris, 2018.

- [42] D. Hamza, O. Kamel, and S. Nacira, “Valorisation de la boue de station d’épuration de d’Oued Hous (Bouira) dans les mortiers de ciment”.
- [43] M. Guessoum, F. Boukhelf, and F. Khadraoui, “Full Characterization of Self-Compacting Concrete Containing Recycled Aggregates and Limestone” *Materials*, vol. 16, no. 17, p. 5842, Aug. 2023, doi: 10.3390/ma16175842.
- [44] M. Nayak, A. Shukla, and S. K. Vaishnav, “Effect of binary and ternary blending of cement on properties of recycled aggregate concrete ” *J. Phys. Conf. Ser*, vol. 2484, no. 1, p. 012014, May 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2484/1/012014.
- [45] J. M. Kinuthia, S. Wild, B. B. Sabir, and J. Bai, “Self-compensating autogenous shrinkage in Portland cement—metakaolin—fly ash pastes,” *Advances in Cement Research*, vol. 12, no. 1, pp. 35–43, 2000, doi: 10.1680/adcr.2000.12.1.35.
- [46] B. B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, no. 6, pp. 441–454, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).
- [47] D. G. Cavalcante, M. G. dos S. Marques, J. de A. M. Filho, and R. P. de Vasconcelos, “Influence of the levels of replacement of portland cement by metakaolin and silica extracted from rice husk ash in the physical and mechanical characteristics of cement pastes,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 94, pp. 296–306, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.001>.
- [48] Bui Khanh et Van, “Development of limestone modified cements for high performance concretes. University of Wollongong” 2009. [Online]. Available: Thesis. <https://hdl.handle.net/10779/uow.27647022.v1>
- [49] P. Htet, W. Chen, H. Hao, et F. Shaikh, “Physical and mechanical properties of quaternary blended concrete with recycled coarse aggregates and crushed waste glass.” *Constr. Build. Mater.*, vol. 353, p. 129016, 2022.

- [50] M. Gesoğlu and E. Özbay, “Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems,” *Mater Struct*, vol. 40, no. 9, pp. 923–937, Oct. 2007, doi: 10.1617/s11527-007-9242-0.
- [51] N. Dave, A. K. Misra, A. Srivastava, A. K. Sharma, and S. K. Kaushik, “Green quaternary concrete composites: Characterization and evaluation of the mechanical properties” *Structural Concrete*, vol. 19, no. 5, pp. 1280–1289, Oct. 2018, doi: 10.1002/suco.201800073.
- [52] S. S. R. Krishna, V. S. Vani, and S. K. V. Baba, “Studies on mechanical properties of ternary blended self compacting concrete using different percentages of recycled aggregate” vol. 9, no. 1672–1680. 2018. [Online]. Available: <http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp>
- [53] K. O. M. Ouchi, “Self-compacting concrete” *Struct. Concr*, vol. 1, no. 1, p. 15, 2000.
- [54] M. Patel, R. Jain, N. Kumar, and K. Gupta, “Binary, Ternary and Quaternary Blends in Self-Compacting Concrete,” *International Journal of Engineering Research*, vol. 8, no. 03.
- [55] Limbachiya et al, “Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*” 2000.
- [56] Gastaldi et al, “Influence of supplementary cementitious materials on chloride penetration. *Cement and Concrete Composites*.” 2015.
- [57] Shetty et al, “Synergic effect of sustainable quaternary binder on quantitative and qualitative aspects of high strength mortar.” 2025.
- [58] Aly et al, “Prévision de l’efficacité de fumée de silice et du métakaolin dans le béton par l’utilisation d’un réseau de neurones artificiels.” 2012.
- [59] Assi et al, “Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review. Disponible.” 2018.

- [60] Duan et al, "L'utilisation de la poudre de verre dans la composition du béton" 2013.
- [61] I. Benguedda and A. Zergua, "Effet de deux superplastifiants (MEDAFLUID 40 & MEDAFLOW 30) sur les propriétés des bétons à haute performance (BHP)," Mémoire de Master, 2022.
- [62] T. R. Sonawane and S. S. Pimplikar, "Use of Recycled Aggregate in Concrete," International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 2, no. 10, 2013.
- [63] D. heng, A. Cheema, J. Bains, M. Jaquiz, and L. Lane, "A Comprehensive Literature Review of Using Recycled Concrete Aggregates in Concrete Pavement." California Pavement Preservation Center, California State University, Chico, 2019.
- [64] S. Kenai and F. Debieb, "Characterization of the Durability of Recycled Concretes Using Course and Fine Crushed Bricks and Concrete Aggregates." 2011.
- [65] C. Duran, Y. Fayolle, Y. Pechaud, A. Cockx, and S. Gillot, "Impact des propriétés des boues activées sur leur comportement rhéologique et sur le transfert d'oxygène dans les bioréacteurs aérés," DURAN SFGP, 2013.
- [66] F. N. Chergui, "Caractérisation et valorisation des boues de la station d'épuration de la ville de Boussaâda." 2020.
- [67] F. Abbes and A. Chetouani, "Optimisation des paramètres rhéologiques et hydrauliques de la boue de forage afin de minimiser les pertes de charge dans le puits." 2017.
- [68] J. Skocek, A. Ouzia, E. V. Serrano, and N. Pato, "Recycled sand and aggregates for structural Concrete: Toward the Industrial Production of High-Quality Recycled materials with low water absorption », Sustainability, vol. 16, no. 2, p. 814, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16020814.