



Université De Blida 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

PERFORMANCE D'UN MORTIER AUTOPLAÇANT A BASE DE SABLE RECYCLÉ DE BRIQUE

Présenté par :

M^r AZROU-ISGHI Abdelkader Oussama

M^r LABRI Khaled

Devant les membres de jury

M^r BENSACI Hamza	M.C.B	U.S.D.B. 1	Président
M^r MENADI Belkacem	Professeur	U.S.D.B. 1	Examineur
M^r SI-AHMED Mohammed	M.C.A	U.S.D.B. 1	Promoteur
M^r KENAI Saïd	Professeur	U.S.D.B. 1	Co-Promoteur

Blida, juillet 2022

REMERCIEMENTS

Nous tenons d'abord exprimer notre gratitude à notre dieu "**ALLAH**" pour nous avoir donné le courage et la force d'accomplir ce travail.

Nous voudrions dans un premier temps remercier notre promoteur monsieur le **Dr Mohammed Si-Ahmed** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous désirons également remercier notre Co-promoteur le **Pr Saïd Kenai** qui nous a donné l'opportunité de travailler dans laboratoire de recherche géomatériaux de l'université de Blida 1 à partir duquel nous avons réalisé ce travail.

Nous tenons à remercier également madame **Nadia Bentlemsan** pour sa disponibilité, sa présence et son aide durant la réalisation de ce travail.

Nous n'oublions pas de remercier monsieur le **Dr Walid Yahiaoui** et le **Dr Hamza Bensaci** qui nous ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous souhaitons adresser notre reconnaissance aux doctorantes et les techniciens du laboratoire de géomatériaux et génie civil de l'université de Blida 1 pour leurs assistance et aides.

Nos remerciements s'adressent aux membres de jury **Professeur Menadi** et **Dr Bensaci** qui nous ferons le plus grand honneur de porter leur précieux jugement sur notre travail.

Nous souhaitons enfin, remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

DEDICACE

En signe de respect et reconnaissance je dédie ce modeste travail à :

- A mes chers parents pour l'amour qu'ils m'ont donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études.
- A mes frères et ma sœur pour tous les sacrifices qu'ils n'ont cessé de m'apporter tout au long de mes années d'études. Que dieu leur apporte le bonheur, les aide à réaliser tous leurs vœux et leur offre un avenir.
- A mon binôme "Khaled" pour sa patience et ses efforts.
- A mes amis leurs encouragements et soutiens qu'ils ont consentis à mon égard.

Oussama

En signe de respect et reconnaissance je dédie ce modeste travail à :

- A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenue durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents !
- A mes sœurs et mon frère Mourad.
- A toute ma famille, sans exception.
- A mon binôme "Oussama" pour sa patience et ses efforts ainsi que sa famille qui a été toujours présente à nos côtés.
- A tous mes amis (es), mes cousins (es).
- A toute la promotion 2022 de master2 génie civil.
- A tous les médecins qui sont confrontés à la crise de COVID-19.

Khaled

RESUME

L'utilisation de granulats recyclés dans les mortiers offre des avantages économiques et écologiques indéniables. Le but de ce travail est de formuler et d'analyser l'effet du sable recyclé de déchets de brique sur la performance des mortiers autoplaçants. Le sable de brique utilisé dans cette étude est obtenu par concassage et broyage de déchets de brique issu d'une unité de fabrication locale. Les taux de substitutions du sable naturel par le sable recyclé sont de 0%, 10%, 20%, 30% et 40%.

Les résultats observés montrent une diminution d'ouvrabilité avec l'augmentation des taux de substitutions par le sable de déchets brique. La substitution de 40% de sable naturel par la brique ne donne pas un mortier autoplaçant. Des résistances mécaniques comparables par rapport aux mélanges à base de sable naturel ont été observées à court et à moyen terme pour les mélanges contenant du sable recyclé de déchets de brique. L'absorption a été réduite tandis que la porosité ouverte a été augmentée pour les mélanges à base de sable de brique comparé aux mélanges à base de sable naturel.

Mots clés : mortier autoplaçant, déchet de brique, sable recyclé, ouvrabilité, résistance mécanique, absorption capillaire, porosité ouverte.

ABSTRACT

The use of recycled aggregates in mortars offers undeniable economic and ecological advantages. The purpose of this work is to design and analyze the effect of recycled brick waste as sand substitution on the performance of self-compacting mortars. The recycled brick sand used in this study is produced by crushing and grinding brick waste from a local manufacturing unit. The substitution rates for natural sand by recycled sand are 0%, 10%, 20%, 30% and 40%.

The results observed show a decrease in workability with the increase in the rate of substitution by recycled brick sand. The substitution of 40% natural sand by the brick does not give a self-compacting mortar. An improvement in the mechanical strength was observed in the short and middle term for the mixtures containing recycled brick sand. Capillary water absorption as well as water-accessible porosity were reduced for all mixtures.

Keywords: Self-compacting mortar, brick waste, recycled sand, workability, mechanical strength, capillary absorption, porosity.

ملخص

يوفر استخدام الركام المعاد تدويره في الملاط مزايا اقتصادية وبيئية لا يمكن إنكارها. الغرض من هذا العمل هو صياغة وتحليل تأثير رمل نفايات الطوب المعاد تدويره على أداء الملاطات ذاتية الضغط. يتم إنتاج رمل الطوب المستخدم في هذه الدراسة من خلال سحق وطحن نفايات الطوب من وحدة تصنيع المحلية. معدلات إحلال الرمل الطبيعي بالرمل المعاد تدويره هي 0%، 10%، 20%، 30%، 40%.

أظهرت النتائج التي تمت ملاحظتها انخفاضاً في قابلية التشغيل مع زيادة معدل الاستبدال برمل الأجر. إن استبدال 40% من الرمل الطبيعي بالطوب لا يعطي ملاط مضغوط ذاتياً. لوحظ تحسن في المقاومة الميكانيكية على المدى القصير والمتوسط للمخاليط المحتوية على رمل القرميد. تم الحصول على نتائج محسنة لجميع المخاليط فيما يتعلق بامتصاص الماء الشعري وكذلك المسامات التي يمكن الوصول إليها بالماء.

الكلمات المفتاحية: ملاط ذاتي التماسك، نفايات الأجر، رمل معاد تدويره، قابلية التشغيل، القوة الميكانيكية، الامتصاص الشعري، المسامية المفتوحة.

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE D'ABREVIATIONS ET NOTATIONS

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction	3
I.2 Les mortiers autoplçants	3
I.2.1 Généralités	3
I.2.2 Structure du mortier autoplçant	4
I.2.3 Constituants du mortier autoplçants	5
I.2.3.1 Le ciment.....	5
I.2.3.2 Le sable	5
I.2.3.3 L'eau de gâchage	5
I.2.3.4 Superplastifiant	6
I.2.3.5 Les ajouts minéraux	7
I.2.4 Méthode de formulation des mortiers autoplçants.....	10
I.2.4.1 Méthode d'Okamura	10
I.2.4.2 Méthode suédoise.....	11
I.2.4.3 Méthode française	11
I.3 Les déchets dans le génie civil	11
I.3.1 Définition des déchets	11
I.3.2 Classification des déchets.....	11
I.3.2.1 Les déchets inertes	12
I.3.2.2 Déchets industriels banals (DIB)	12

I.3.2.3 Déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD).....	12
I.3.3 Les déchets de construction et de démolition.....	13
I.4 Les sous-produits industriels.....	15
I.4.1 La terre cuite.....	15
I.4.2 Le mâchefer.....	15
I.4.3 Scories.....	16
I.5 Recyclage des déchets.....	16
I.5.1 Le recyclage des déchets en Europe.....	17
I.5.2 Valorisation des déchets en Algérie.....	18
I.6 Granulats recyclés.....	19
I.6.1 Granulats recyclés de démolition.....	20
I.6.2 Principales caractéristiques des granulats recyclés.....	21
I.6.2.1 Caractéristiques morphologiques.....	22
I.6.2.2 Masse volumique et porosité.....	22
I.6.2.3 L'absorption d'eau.....	22
I.6.3 Influence du vieux mortier attaché aux granulats recyclés.....	23
I.7 Déchet de brique.....	23
I.7.1 Principaux constituants de la brique.....	24
I.7.2 Effet de brique recyclé sur les performances des mortiers et bétons.....	25
I.7.2.1 Comportement des mortiers et bétons à l'état frais.....	25
I.7.3 L'influence de l'incorporation de déchet de brique sur le retrait des bétons.....	27
I.7.4 Résistance à la compression.....	29
I.7.5 Résistance à la traction par flexion.....	31
I.7.6 Absorption capillaire.....	32
I.7.7 Porosité et densité.....	34
I.7.8 Carbonatation.....	35

I.7.9 Diffusion des ions chlorures	37
I.7.10 Resistance aux sulfates	37
I.8 Récapitulatif de la recherche bibliographique sur l'effet des fines de brique	38
I.9 Conclusion.....	40
CHAPITRE II:LES MATERIAUX ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL	
II.1 Introduction.....	41
II.2 Caractéristiques des matériaux utilisés	41
II.2.1 Ciment.....	41
II.2.2 Sable.....	42
II.2.2.1 Sable naturel.....	42
II.2.2.2 Sable recyclé de déchet de brique	45
II.2.3 L'eau de gâchage	47
II.2.4 Superplastifiant	47
II.3 Les essais réalisés	48
II.3.1 Formulation de mortier autoplaçant.....	48
II.3.2 Essais à l'état frais sur le mortier autoplaçant	49
II.3.2.1 Etalement au mini cône	49
II.3.2.2 Temps d'écoulement (V-Funnel)	50
II.3.3 Moulage et conservation des éprouvettes	51
II.3.4 Essais à l'état durci sur le MAP	52
II.3.4.1 Résistance à la traction par flexion	52
II.3.4.2 Résistance à la compression.....	53
II.3.5 Essais sur les indicateurs de durabilité	53
II.3.5.1 Absorption capillaire	53
II.3.5.2 Porosité accessible à l'eau.....	55
II.4 Organigrammes des essais :	57

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1	Introduction.....	59
III.2	Optimisation du dosage en superplastifiant	59
III.2.1	Influence de superplastifiant sur l'étalement au mini cône	59
III.2.2	Effet du superplastifiant sur l'écoulement en V-Funnel.....	60
III.3	Influence du sable de déchet de brique a l'état frais	60
III.3.1	Influence de sable de déchet de brique sur l'étalement au mini cône.....	61
III.3.2	Influence de sable de déchet de brique sur le temps d'écoulement	62
III.4	Influence de sable de déchet de brique à l'état durci	63
III.4.1	Résistance à la compression	63
III.4.2	Résistance à la flexion	65
III.5	Influence de sable de déchet de brique sur la durabilité.....	66
III.5.1	Absorption capillaire.....	66
III.5.2	Porosité accessible à l'eau et masse volumique.....	73
III.6	Conclusion	75
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....		77
REFERENCES		
ANNEXES		

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: Les ajouts minéraux selon leur réactivité	9
Tableau I. 2 : Le procéder de formulation des BAP selon la méthode japonaise	10
Tableau I. 3 : Répartition de la Production des déchets de Chantier au Pays-Bas (en Milliers de Tonnes)	14
Tableau I. 4 : Taux de recyclage en Europe	17
Tableau I. 5 : Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie	19
Tableau I. 6 : Classification des Gros Granulats Recyclés par la RILEM	20
Tableau I. 7 : Les composants chimiques de brique terre cuite (rouge).....	25
Tableau I. 8 : récapitulation des résultats des effets de déchet de brique sur les mortiers et bétons	39
Tableau II. 1: Compositions chimiques du ciment	41
Tableau II. 2: Compositions minéralogiques du ciment	42
Tableau II. 3: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	42
Tableau II. 4: Caractéristique physiques de sable de Baghlia.....	43
Tableau II. 5: Caractéristique chimique de sable de Baghlia (%).....	43
Tableau II. 6: Caractéristiques physiques de sable de Boughezoul	43
Tableau II. 7: Composition chimique de sable de Boughezoul (%)	44
Tableau II. 8: Caractéristiques physiques de sable corrigé.....	45
Tableau II. 9: Caractéristiques physiques de déchets de brique	46
Tableau II. 10: Compositions chimiques de déchets de brique.....	46
Tableau II. 11: Les caractéristiques de Superplastifiant MEDAFLOW 30	47
Tableau II. 12: Séquence de malaxage	49
Tableau III. 1: Valeurs d'étalement au mini cône en fonction du dosage en SP	59
Tableau III. 2: Valeurs d'étalement au mini cône en fonction du dosage en SP	60
Tableau III. 3: Composition des différents MAP par un Volume de 1,5 litre	61
Tableau III. 4: Valeur de l'étalement au mini cône des différents MAP	61
Tableau III. 5: Valeur de l'écoulement en V-Funnel des différents MAP	63
Tableau III. 6 : Regroupement des résultats obtenus par l'essai d'étalement et d'écoulement.....	63

Tableau III. 7: Résistance à la compression des MAP	64
Tableau III. 8: Résistance à la flexion des MAP	65
Tableau III. 9: Les valeurs moyennes d'absorption d'eau des différents MAP après 7 jours de cure humide.....	66
Tableau III. 10: Sorptivité des MAP après 7 jours de cure humide.....	69
Tableau III. 11: Les valeurs moyennes d'absorption d'eau des différents MAP après 28 jours de cure humide.....	69
Tableau III. 12: Sorptivité des MAP a 28 jours	73
Tableau III. 13: Regroupement des résultats de masse volumique et porosité accessible à l'eau à 7 et 28 jours de cure humide	74

LISTE D'ABREVIATIONS ET NOTATIONS

- Al_2O_3 : Alumine
- ASTM: Anciennement American Society for Testing and Materials
- BAP : Béton autoplaçant
- BTP : Bâtiments et travaux publics
- C abs : Coefficient d'absorption
- CaO : L'oxyde de calcium
- CaOH : Chaux hydratée
- CaOH : Chaux hydratée
- CH : Méthylidyne
- Cl :Chlore
- CO_2 :dioxyde de Carbone
- CSH : Silicate de calcium hydrate
- D : Diamètre d'étalement
- DB : Déchets de briques
- DCD : Déchets de construction et de démolitions
- DMA : Déchets ménagers et assimilés
- E/L : Rapport eau sur liant
- E/C : Rapport eau sur ciment
- ESP : Equivalent de sable Piston
- ESV : Equivalent de sable visuel
- Fe_2O_3 : Oxyde de fer
- G : Pourcentage de sable
- I : l'absorption par capillarité
- K_2O : Oxyde de potassium
- MAP : Mortier autoplaçant
- MF : Module de finesse
- MgO : Oxyde de magnésium
- Na_2O_3 : Carbonate de Sodium
- PB : Poudre de brique
- PNS : Polynaphtalènes sulfonates
- PMS: Les polymélamines sulfonates

- SD : Sable de dune
- Rc28 : Resistance à la compression à 28 jours
- Rc : Refus cumulé sous les tamis
- Rp : Etalement relative
- S : Sorptivité
- S/M : Rapport sable sur Mortier
- SP : Superplastifiant
- SiO₂ : Dioxyde de silicium
- SO₃ : Trioxyde de soufre
- SS : Sulfate de sodium
- Tv : Temps d'écoulement
- ρ_{abs} : Masse volumique absolue
- ρ_{app} : Masse volumique apparente
- ξ : porosité ouverte

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Constituants des mortiers	3
Figure I. 2 : Phénomène de défloculation.....	6
Figure I. 3: Composition des déchets du bâtiment	12
Figure I. 4: Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition	13
Figure I. 5: Répartition des déchets par secteurs sources	14
Figure I. 6: Répartition de différents types de Déchets de construction et de démolition	15
Figure I. 7: Composition moyenne des DMA- 4 saisons Algérie- 2018/2019	18
Figure I. 8: Répartition des recycleurs par Wilayas	19
Figure I. 9: Composition des granulats recyclés de béton	21
Figure I. 10: Interface granulats naturels / pâte de ciment d'un granulats recyclés de béton...	23
Figure I. 11: Déchets de brique de fabrication déposés aux alentours de la briquetterie ...	24
Figure I. 12: Effet des fines de briques sur la fluidité des MAP	25
Figure I. 13: Effet des fines de brique sur l'étalement du MAP.....	26
Figure I. 14: Effet des fines de brique sur le temps d'écoulement de MAP (V-Funnel) ...	27
Figure I. 15 : Effet de taux de substitution des fines de brique sur le temps d'écoulement	27
Figure I. 16: Effet des déchets de brique sur le retrait des bétons.....	28
Figure I. 17: Profilés de retrait pour béton contenant déchet de brique	28
Figure I. 18: Effet de taux de substitution des fines de brique sur la résistance à la compression des MAP	29
Figure I. 19: Variation de la résistance à la compression avec la teneur en poudre (F1 3900=cm ² /g)	30
Figure I. 20: Variation de la résistance à la compression avec la teneur en poudre (F2=4300 cm ² /g)	30
Figure I. 21: Variation de la résistance à la compression avec la teneur en poudre (F3=5200 cm ² /g)	30
Figure I. 22: Variation de la résistance à traction par flexion avec la teneur en poudre (F3=5200 cm ² /g)	31
Figure I. 23: Résistance à la traction par flexion des MAP	32
Figure I. 24: Effet du taux de substitution des fines de brique sur l'absorption des mortiers à court terme	32

Figure I. 25: Effet du taux de substitution des fines de brique sur l'absorption des mortiers à long terme	33
Figure I. 26: Absorption d'eau des MAP à 28 jours.....	33
Figure I. 27: Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la densité des mortiers	34
Figure I. 28: Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la porosité des mortiers	34
Figure I. 29: variation de la porosité du béton à base de brique recyclé	35
Figure I. 30: Relation entre la profondeur de carbonatation et le taux de remplacement de brique recyclé	36
Figure I. 31: Relation entre la profondeur de carbonatation et le rapport E/C.....	36
Figure I. 32: Profondeur de carbonatation des MAP en fonction du temps	36
Figure I.33 : Taux de diffusion des chlorures pour les mortiers avec charge calcaire et déchets de brique	37
Figure I. 34: Variation de la masse des mortiers en fonction de taux de substitution de ciment en fines de briques	38
Figure I. 35: Détérioration des éprouvettes des mortiers en fonction de la teneur en fine de brique due aux attaques sulfatiques	38
Figure II. 1: Ciment type CEMII/B-L 42,5N	41
Figure II. 2: Sable de Baghlia.....	42
Figure II. 3: sable de Boughezoul	43
Figure II. 4: Sable corrigé	44
Figure II. 5: Courbe granulométrique	45
Figure II. 6: Sable de déchet de brique après concassage	46
Figure II. 7: Courbes granulométriques du sable corrigé et des déchets de brique.....	47
Figure II. 8: Malaxeur à mortier.....	48
Figure II. 9: Etalement au mini cône.....	49
Figure II. 10: Dimensionnement de mini cône.....	50
Figure II. 11: Dimensionnement de l'entonnoir en V.	50
Figure II. 12: Moules prismatiques pour mortier	51
Figure II. 13: Conservation des éprouvettes.....	51
Figure II. 14: Essai de résistance à la traction par flexion	52
Figure II. 15: Essai de résistance à la compression.....	53

Figure II. 16: Dispositif de l'essai d'absorption capillaire.....	55
Figure II. 17: Absorption capillaire.....	55
Figure II. 18: appareillage de l'essai de porosité accessible à l'eau	57
Figure II. 19: procédé de formulation des MAP	57
Figure II. 20: Les essais réalisés.....	58
Figure III. 1: Etalement au mini cône en fonction du dosage en SP.....	59
Figure III. 2: Temps d'écoulement en V-Funnel en fonction du dosage en SP.....	60
Figure III. 3: Etalement au mini cône en fonction du taux de substitution du sable de brique	62
Figure III. 4 : Temps d'écoulement en fonction du taux de substitution du sable de brique	62
Figure III. 5: Evolution de la résistance à la compression à 7 et 28 jours	64
Figure III. 6 : L'évolution de la résistance à la flexion à 7 et 28 jours	65
Figure III. 7: Absorption d'eau par capillarité des MAP après 7 jours de cure humide. ...	67
Figure III. 8: Sorptivité du MB0 après 7 jours de cure humide	67
Figure III. 9: Sorptivité du MB10 après 7 jours de cure humide	68
Figure III. 10: Sorptivité du MB20 après 7 jours de cure humide	68
Figure III. 11: Sorptivité du MB30 après 7 jours de cure humide	68
Figure III. 12: Sorptivité des différents MAP à base de déchet de brique d'après 7 jours de cure humide.....	69
Figure III. 13: l'absorption d'eau par capillarité après 28 jours de cure humide.....	70
Figure III. 14: Sorptivité du MB0 après 28 jours de cure humide	71
Figure III. 15: Sorptivité du MB10 après 28 jours de cure humide	72
Figure III. 16: sorptivité du MB20 après 28 jours de cure humide.....	72
Figure III. 17: sorptivité du MB30 après 28 jours de cure humide.....	72
Figure III. 18: Sorptivité des différents MAP à base de déchet de brique d'après 28 jours de cure humide.....	73
Figure III. 19: Evolution de la masse volumique des différents MAP après 7 et 28 jours de cure humide.....	74
Figure III. 20: Evolution de la porosité accessible à l'eau des différents MAP après 7 et 28 jours de cure humide.....	74

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La valorisation et le recyclage des déchets est un moyen efficace pour protéger l'environnement et répondre au déficit entre production et consommation. Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles [1].

Les déchets de construction et de démolition (DCD) sont l'un des plus importants dans le monde, il existe un flux de déchets important et, générant plus de 800 millions de tonnes par an, représentant environ 25 à 30 % de la quantité totale de déchets générés. Les DCD résultent d'activités telles que la construction, la démolition partielle ou complète de bâtiments et d'infrastructures civiles, la construction et l'entretien des routes, le béton, la brique, le gypse, le bois, le verre, le métal, le plastique, les solvants, l'amiante, les excavations dont beaucoup peuvent être recyclés [2].

Le recyclage des déchets comme granulats dans le béton aide à résoudre les problèmes de stockage des déchets, à réduire la pollution de l'environnement, à économiser les ressources naturelles, à réduire les coûts de construction et, en fin de compte, à résoudre les problèmes d'approvisionnement en sable et en gravier [3].

Les déchets de produits céramiques (argiles cuites) ont fait l'objet de plusieurs études de recherche dans l'industrie du béton en tant qu'additifs et granulats. Certaines études ont montré que les argiles cuites présentent plusieurs caractéristiques positives, à savoir la réactivité avec le ciment et son effet sur la résistance du béton [4]. **Zeghad et al. [5]** ont montré que l'utilisation des déchets de briques réfractaires dans la composition du béton armé à haute performance améliorent certaines propriétés.

La brique d'argile cuite est le matériau le plus utilisé dans la maçonnerie dans les chantiers en Algérie. La brique est fabriquée tout en faisant calciner un mélange d'argile à une température de cuisson comprise entre 650°C et 1000°C et par conséquent lorsque broyée elle peut être utiliser comme substitution au ciment ou du sable [6].

Cette étude a pour objectif de la valorisation de sables de brique recyclés dans les mortiers autoplaçant (MAP) sur leurs propriétés physiques et mécaniques et leur durabilité, ainsi que leurs effets sur le comportement rhéologique.

Le mémoire est composé de trois chapitres. Le premier chapitre contient un aperçu bibliographique sur les mortiers autoplaçants, leurs propriétés à l'état frais et durci, leur durabilité, ainsi que divers aspects du comportement rhéologique des mortiers à base de granulats recyclés. Le deuxième chapitre présente le programme expérimental et la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation d'un MAP à base de sable de déchet de brique recyclé. Le troisième chapitre est consacré à l'analyse générale et discussion des résultats obtenus. Enfin une conclusion générale ainsi que des recommandations sont données pour les futurs travaux de recherche.

CHAPITRE I
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous donnons une généralité sur les mortiers autoplaçants (MAP) et leurs constituants, leurs caractéristiques, ainsi que la réglementation concernant les déchets et en fin le comportement de MAP à base de déchet de brique.

I.2 Les mortiers autoplaçants

I.2.1 Généralités

Le mortier est l'un des matériaux de construction utilisés pour interconnecter les éléments, assurer la stabilité du travail et combler les vides entre les blocs de construction. En général, le mortier est un mélange de sable, de liant (ciment ou chaux) et d'eau et est produit dans des proportions spécifiques qui varient selon les performances et les additifs [7].

Le mortier auto-remplissant ou autoplaçant "MAP" présente une excellente fluidité et capacité de remplissage, et stable et garantit également d'excellentes performances mécaniques et de durabilité [8]. Le MAP est formulé différemment du mortier ordinaire. Il contient au moins des additifs minéraux, des agents réducteurs d'eau et des éléments plus fins qui doivent souvent contenir des actifs colloïdaux. De plus, la plupart des bétons en Algérie sont entièrement constitués de sable alluvial. Cependant, dans de nombreuses régions du pays, il y a une pénurie importante de sable alluvial adéquat. De plus, les contraintes environnementales, la charge des coûts, l'épuisement des sédiments alluviaux et l'éloignement des chantiers de ces sédiments sont des facteurs qui encouragent l'exploration d'autres types de sable [7]. La **Figure I.1** représente les compositions d'un mortier autoplaçant et mortier normale.

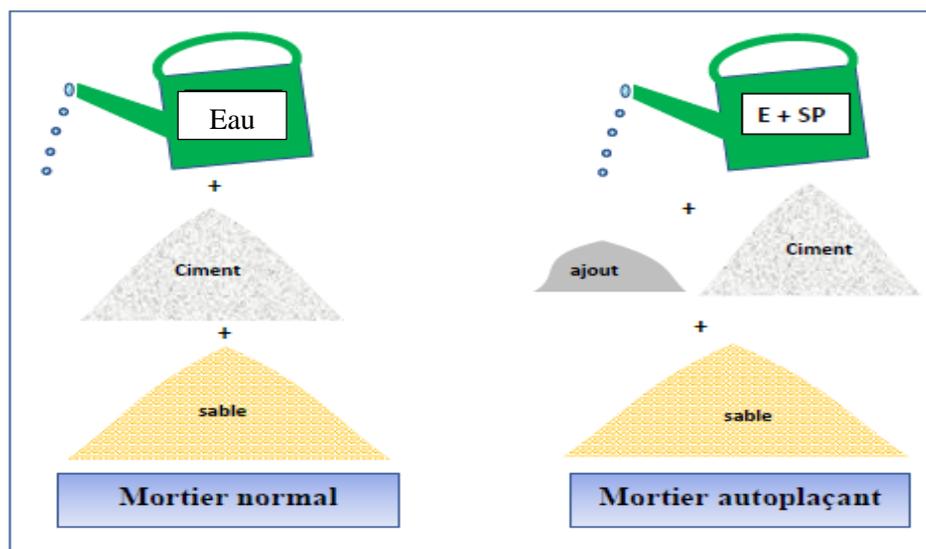


Figure I. 1: Constituants des mortiers [9]

I.2.2 Structure du mortier autoplaçant

La formulation de mortier autoplaçant doit offrir un comportement optimal vis-à-vis de la stabilité et de l'écoulement.

Le rôle de l'expérimentateur ainsi que la démarche expérimentale de l'élaboration de la pâte de ciment sont deux éléments importants, compte tenu de la sensibilité du comportement de cette dernière. La pâte de ciment est confectionnée à partir des quatre composantes (ciment, filler, plastifiant, eau.) [9].

✓ Un volume de pâte élève

Les frottements entre les grains de sable limitent l'écoulement des mortiers. C'est pourquoi, le MAP contient un volume de pâte important dont le rôle est d'écarter les grains de sable les uns des autres [10].

✓ Une quantité importante de fines

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, le MAP contient une quantité de fines supérieures à celle des mortiers ordinaires. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire [11].

✓ Un fort dosage de superplastifiant

L'introduction de dosage relativement important de superplastifiant dans les MAP et BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé, proche ou supérieur au dosage de saturation peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage [12].

✓ Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal

Bien que non systémique, dans la plupart des cas, le MAP et BAP contient des agents colloïdaux [13]. Comme les particules fines, ce produit évite le ressuage et limite le risque de décollement des agrégats, épaississant ainsi la pâte. En règle générale, il est judicieux d'utiliser ce produit pour les bétons à fort rapport eau/liant. En effet, les petites particules ne suffisent pas toujours à fixer l'eau dans le béton. D'un autre côté, cela ne semble pas nécessaire. Pour les MAP à faible rapport massique eau/liant, leur résistance dépasse 50 MPa. Les avantages doivent être confirmés au cas par cas. Il est bien connu que les

substances colloïdales peuvent réduire la sensibilité de MAP et BAP aux changements de teneur en eau associés à la séparation et au ressuage [14 -15].

I.2.3 Constituants du mortier autoplaçants

I.2.3.1 Le ciment

C'est un liant hydraulique qui durcit rapidement et atteint sa résistance maximale en quelques jours.

Après durcissement, la pâte conserve sa résistance et sa stabilité dans l'eau. Il s'agit d'une poudre qui est généralement mélangée à de l'eau ajoutée. Le ciment est un composant important du béton, 7 à 15 % du mélange, ce qui lui confère de nombreuses propriétés, notamment sa résistance [16].

Le ciment est obtenu en broyant le clinker Il s'agit d'un produit obtenu en le faisant calciner jusqu'à une température de 450°C. Un mélange de calcaire et d'argile (CaO), de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃) pour l'homogénéiser, puis en le faisant fondre partiellement (clinkirisation). Le mélange est généralement composé de produits naturels de carrière [17].

I.2.3.2 Le sable

Le sable est un matériau granulaire inerte qui entre dans la composition du béton et du mortier. Un bon sable ayant une excellente granulométrie doit contenir des grains fins et moyens. Les grains fins ont pour but de remplir les pores qui se situent entre les gros grains de matériaux [18]. Le sable améliore la maniabilité en augmentant la densité du mortier et du béton. Cependant, si le sable rond est plus malléable, le sable de forme angulaire ayant la particularité de rendre le béton plus résistant. Certains sables, sont à éviter, sables très fins, les dunes contenant des sels nocifs pour les composants du ciment ou les sables marins qui sont en revanche à proscrire. Le dosage en sable se fait souvent en poids plutôt qu'en volume pour éviter les erreurs dues à l'augmentation du volume de sable humide [18].

I.2.3.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage généralement a le rôle d'hydrater le ciment et d'autre part, elle permet de maintenir une certaine ouvrabilité du mélange de la pâte. Elle ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés physiques et mécaniques comme la résistance, la prise, la consistance, ainsi que la durabilité [17].

I.2.3.4 Superplastifiant

Les superplastifiants sont des agents réducteurs d'eau à haute performance, ils sont souvent utilisés pour obtenir une maniabilité des bétons et des mortiers satisfaisants. Ils empêchent les particules de ciment de s'agglomérer et libère l'eau emprisonnée.

Le mode d'action des superplastifiants peut se faire de trois manières à savoir

✓ Par adsorption

Les molécules de superplastifiant sont fixées par adsorption à l'interface entre les particules du ciment et eau de gâchage. Lorsque le flux est adsorbé, il forme une charge négative autour de chaque grain de ciment, ils se repoussent. Sa dispersion en conséquence, la viscosité plastique de la pâte de ciment diminue en augmentant l'ouvrabilité du mélange. L'adsorption des superplastifiants à la surface des particules de ciment est liée à un potentiel de surface important [19].

✓ Par défloculation

La répulsion électrostatique est fréquente dans le cas des molécules de superplastifiant à structure linéaire. En plus, une densité de charge importante du polymère permet une adsorption forte et une bonne répulsion électrostatique [19]. (Figure I.2) .

✓ Par dispersion

La répulsion stérique est aussi fréquente quand les molécules de superplastifiant sont utilisées, la dispersion des grains de ciments observés est principalement due aux répulsions stériques. les forces électrostatiques jouent un rôle important dans le mécanisme de dispersion pour des superplastifiants de types PNS et PMS, tandis que les forces stériques sont critiques pour un superplastifiant de type PC [19].

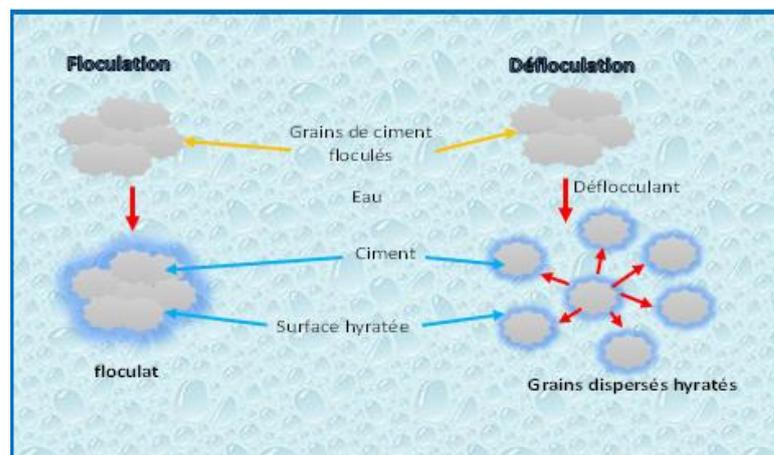


Figure I. 2 : Phénomène de défloculation [20]

I.2.3.5 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. ils peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers [21].

Une classification normalisée dans un contexte de leur utilisation dans l'industrie cimentaire qui prime l'aspect fonctionnel des ajouts, selon la norme NF EN 206-1, il existe deux types d'additions, par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux répondant à la définition d'additions pour béton hydraulique à savoir :

❖ Les additions quasiment inertes (type I)

✓ Les fillers calcaires

Les fillers calcaires diffèrent par leur origine, leur composition chimique et minéralogique, et les taux d'impuretés qu'elles peuvent contenir. D'autres paramètres tels que la finesse, la porosité, la qualité de surface, la dureté et la forme des particules affectent également leur diversité [6].

❖ Les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (type II)

✓ La pouzzolane

La pouzzolane est un matériau naturel ou artificiel ajouté au ciment qui peut réagir avec l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment en présence d'eau afin de former d'autres hydrates plus stables (C-S-H). Ensuite, la pouzzolane contribue à améliorer diverses propriétés du mortier et du béton.

Les pouzzolanes sont principalement composées de silice et d'alumine et peuvent être naturelles, généralement volcaniques ou artificielles si elles ont des propriétés pouzzolaniques. Dans ce dernier cas, un traitement thermique est nécessaire pour fournir les principales propriétés pouzzolaniques [6].

✓ La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la production de silicium. La silice est réduite à composer gazeux, SiO, qui s'échappe vers le haut du four. Il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO₂. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. La fumée de silice est essentiellement composée de silice amorphe. Elle a une forme microscopique sphérique et sa dimension moyenne est 100 fois

plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1 à 10 microns [6].

✓ **Les cendres volantes**

Les cendres volantes sont des particules fines engendrées par les systèmes de dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Chimiquement elles peuvent avoir de grandes variations, dépendant des impuretés que contient le charbon que l'on brûle dans les centrales thermiques. Physiquement elles peuvent avoir des formes très différentes, une granulométrie semblable aux ciments avec une forme sphérique. Leur finesse varie entre 2500 et 6000 cm²/g. L'utilisation de cendres volantes peut améliorer certaines propriétés des mortiers et bétons comme le retrait. Elle peut réduire aussi la vulnérabilité des bétons vis-à-vis des solutions agressives en fixant progressivement la chaux [6].

✓ **Les laitiers de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau, ou laitier broyé, est un sous-produit de la production de fonte refroidie brusquement. Lorsqu'il est activé, il devient un matériau hydraulique. Il se présente sous forme de grumeaux dont la composition chimique est de l'ordre de 40 à 50 % d'oxyde de calcium, de 25 à 35 % de silice, de 12 à 30 % d'alumine, d'oxydes de magnésium et autres. Tous ces éléments sont très similaires à ceux du clinker.

Les laitiers peuvent être introduits dans les matrices cimentaires avec différents taux de substitution. Ils ont la capacité de se combiner avec la chaux, ce qui peut améliorer la durabilité du mortier et du béton. Ils offrent également une meilleure résistance aux agressions chimiques [6].

✓ **Le métakaolin**

Le métakaolin est une pouzzolane synthétique issue du traitement thermique d'une argile, qui appartient à une famille de particules ultrafines de taille inférieure à 10 µm utilisées dans le béton pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité.

Le métakaolin (MK) est obtenu par la calcination de la kaolinite à une température entre 500°C et 950°C. Industriellement il existe essentiellement deux modes de calcination, une calcination lente d'environ cinq heures dans des unités de production et une calcination flash très rapide en comparaison avec la calcination lente.

Le métakaolin est considéré comme un matériau pouzzolanique, c'est-à-dire qu'il réagit en présence de chaux pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des silico-aluminates de calcium hydratés [22].

✓ Schiste calciné

Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. En raison de la composition des matériaux naturels et du procédé de production, le schiste calciné contient des composants identiques au clinker, principalement du silicate bi-calcique et de l'aluminate monocalcique. Il contient également, outre de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes ayant des propriétés pouzzolanique, notamment le SiO₂. En conséquence, le schiste calciné finement broyé présente, outre des effets pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques, comme le ciment Portland [23]. Le **tableau I.1** présente les différents ajouts minéraux en fonction de leurs réactivités.

Tableau I. 1: Les ajouts minéraux selon leur réactivité [7]

Types	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	Fortement réactif	<ul style="list-style-type: none"> • Ciments spéciaux chaux hydraulique
Hydraulique latent		<ul style="list-style-type: none"> • Laitier granulé cendres volantes riche en calcium (calcique)
Pouzzolaniques	Fortement réactif	<ul style="list-style-type: none"> • Cendres volantes pauvre en calcium pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcaniques, terres diatomées)
	Moyennement réactif	<ul style="list-style-type: none"> • Scories cristallines
Inerte	Non réactif	<ul style="list-style-type: none"> • Fillers (farines calcaire ...) fibres, pigments, dispersions synthétiques.

I.2.4 Méthode de formulation des mortiers autoplaçants

Il existe plusieurs approches pour la formulation des MAP, dans ce qui suit. Nous allons citer les méthodes les plus connues.

I.2.4.1 Méthode d’Okamura

C’est la formulation des MAP par l’approche développée à l’université de Kochi au Japon [24]. Cela se fait en priorisant la quantité de pâte par rapport aux granulats. Cette procédure de formulation est basée à la fois sur un dosage théorique et expérimental. Le dosage en eau et en adjuvant se fait par la méthode décrite dans le **tableau I.2** suivant :

Tableau I. 2 : Le procédé de formulation des BAP selon la méthode japonaise [24-25]

Choix du dosage en ciment	❖ La quantité du ciment dépend du cahier des charges et des performances désirées (résistance, durabilité...).
Désignation du volume d’air	❖ Le volume d’air occlus est égal à 2 %.
Détermination du dosage du sable	❖ Le volume de sable est posé forfaitairement égal à 40% du volume du mortier.
Détermination du dosage minimal en eau	❖ La demande en eau passe par la conception de la composition de la pâte. En effet des essais d’étalement au mini- cône sont réalisés en faisant varier le rapport Eau/Liant avec le dosage choisi en liant
<p>En traçant la courbe d’Eau/Liant en fonction de l’étalement relatif « Rp » (équation.1), on détermine le point d’intersection avec l’axe des ordonnées « βP » qui permet de déterminer le besoin en eau minimale nécessaire pour cimenter les additions minérales :</p> $R_p = \frac{d^2 - 100^2}{100^2} = \left(\frac{d}{100}\right)^2 - 1 \dots\dots\dots \text{(Equation 1)}$ <p>Rp : l’étalement relatif. D : diamètre d’étalement moyen en mm de la galette.</p>	

I.2.4.2 Méthode suédoise

La méthode suédoise est basée sur le principe de fluidité en milieux confinés. C'est une méthode d'évolution en fonction du risque de blocage du MAP et BAP. Il estime la quantité critique de pâte conduisant au blocage pour chaque rapport G/S.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite afin d'obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement ainsi que la résistance à la compression visée. Cette méthode améliore l'optimisation du squelette granulaire, mais les critères de blocage ne sont pas communs à tous les types d'agrégats [26].

I.2.4.3 Méthode française

C'est la méthode développée par le laboratoire central des ponts et chaussées. Elle est basée sur le concept du modèle de suspension solide. Ce modèle est un modèle analytique permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire à partir des caractéristiques des constituants, des proportions du mélange et de la distribution granulaire. Un arrangement idéal du squelette granulaire permet d'obtenir une résistance accrue et une meilleure fluidité. La formulation peut être établie selon les procédures suivantes :

- ✓ Une combinaison de liants est à priori fixée pour laquelle le dosage en superplastifiant est choisi. La demande en eau du liant est évaluée en présence du superplastifiant.
- ✓ Les calculs sont élaborés en utilisant le modèle de suspension solide en tenant compte du confinement. La viscosité relative est arbitrairement fixée à 5.104 Pa.S.
- ✓ Le rapport additions minérales/ciment est maintenu constant alors que les proportions des granulats et de liant sont optimisées.
- ✓ Le dosage en superplastifiant est ajusté de façon à obtenir l'étalement désiré qui est de 60 à 70 cm [27].

I.3 Les déchets dans le génie civil

I.3.1 Définition des déchets

Un déchet est une substance indésirable qui est rejetée, ou une substance ou un produit qui doit être éliminé car il a été endommagé, ou contaminé [3].

I.3.2 Classification des déchets

Les sources des matériaux recyclés proviennent des déchets de construction et de démolition (C&D). Ces déchets de chantier peuvent être constitués de résidus des procédés de production et de transformation comme les déchets chimiques d'emballages ou autres. C'est

pourquoi il est indispensable de distinguer les différentes catégories des déchets industriels [30].

I.3.2.1 Les déchets inertes

Ces déchets sont principalement générés par les chantiers de bâtiment, les travaux publics ou l'industrie de transformation des matériaux de construction [31].

Ce sont des déchets qui ne sont pas affectés par des changements physiques, chimiques ou biologiques importants et ne provoquent pas des réactions physiques ou chimiques susceptibles de contaminer ou de nuire à la santé humaine [31].

I.3.2.2 Déchets industriels banals (DIB)

Ils comprennent tous les déchets banals du commerce, de l'artisanat, des services et de la gestion, de la métallurgie, des peintures, des fabricants et entreprises de la chimie et de la pétrochimie. Il s'agit de déchets d'emballages, de déchets d'entretien, de vieux matériels. Certains déchets Inactifs sont broyés, triés, et réutilisés dans les travaux publics.

I.3.2.3 Déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD)

Contrairement aux DIB, ces déchets sont traités selon un procédé différent et contiennent des substances nocives pour l'homme et l'environnement, et leur stockage et leur traitement sont soumis à une réglementation stricte [31].

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets. La **figure I.3** et **I.4** montrent la composition des déchets (C&D)

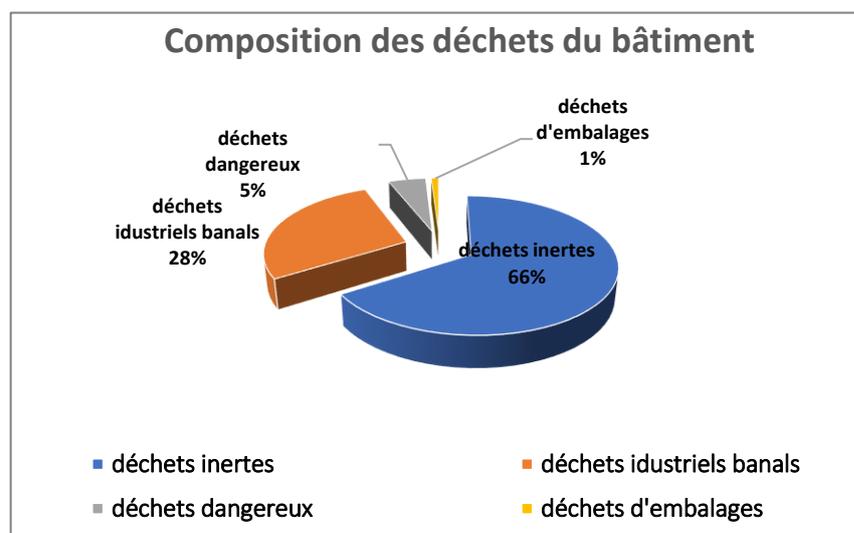


Figure I. 3: Composition des déchets du bâtiment [32]

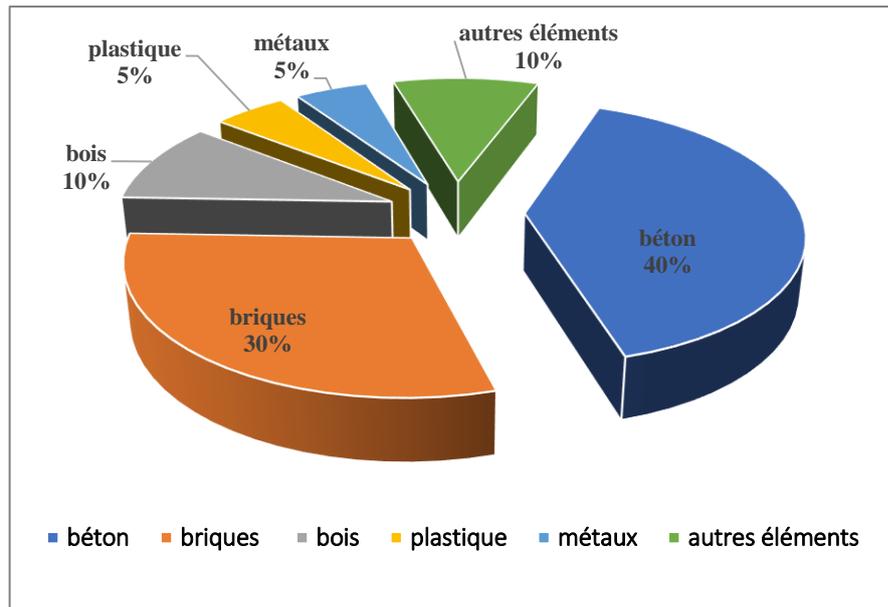


Figure I. 4: Répartition des quantités de déchets de chantiers ou de démolition [32]

I.3.3 Les déchets de construction et de démolition

Les principales sources de déchets utilisés dans le génie civil sont les déchets de construction et de démolition (C & D) ainsi que les sous-produits industriels [33].

Les déchets de construction et de démolition (C & D), sont tous les deux lourds, encombrant et se produisent en grande quantité dans le monde.

- ✓ Aux Etats-Unis, 31,5 millions de tonnes de déchets de construction sont produites chaque année. Ce qui représente près du quart des déchets municipaux solides.
- ✓ En Europe, 259 millions de tonnes de déchets de construction sont produites chaque année comme le montre **la figure 1.5**.
- ✓ Au Royaume-Uni, 24 millions de tonnes de matériaux de démolition et de débris de construction sont produites chaque année.
- ✓ En Allemagne, en 1992, 43 millions de tonnes de matériaux de démolition ont été obtenus.
- ✓ Au pays bas, en 1993, plus de 12 millions de tonnes de déchets de chantier sont produites comme la montre **le tableau 1.3** [33].

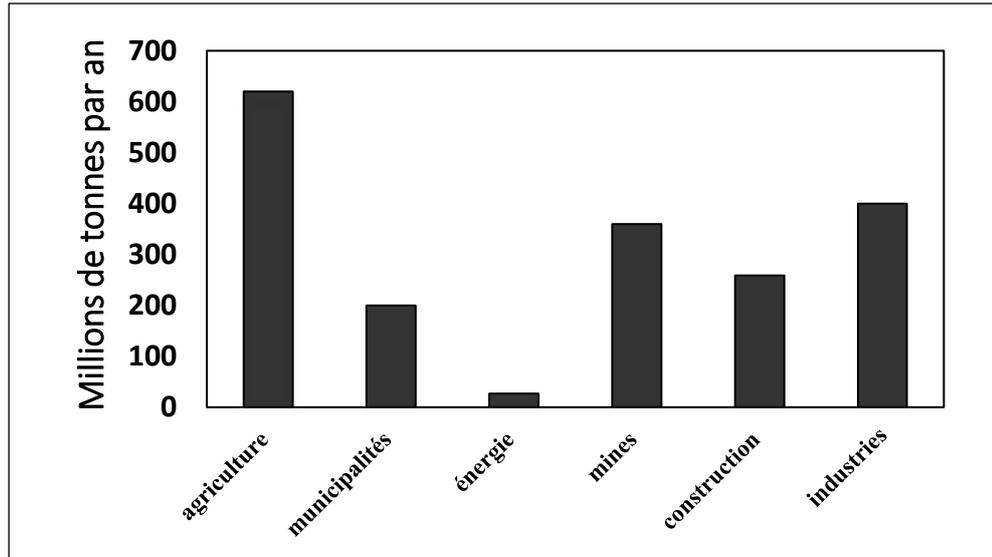


Figure I. 5: Répartition des déchets par secteurs sources [33]

Tableau I. 3 : Répartition de la Production des déchets de Chantier au Pays-Bas (en Milliers de Tonnes) [3]

Origines	Bâtiments		Travaux routiers et hydrauliques	Total déchets de chantier	Sol
	Résidentiels	Non résidentiels			
Construction	848	766	NC	-	-
Rénovation	1354	524	NC		-
Démolition	552	4163	NC		-
Total	2754	5453	4170	12377	3100

Les travaux de construction, de rénovation et de démolition génèrent des grandes quantités de matériaux tels que : béton, béton armé, briques, pierre de taille, plâtre, bois, métaux, verre, matières plastiques, céramiques, papiers, etc. Ce sont plus ou moins composites suivant la nature des ouvrages et l'âge de leur construction [33]. La **Figure I.6** montre la répartition de ces différents types de déchets.

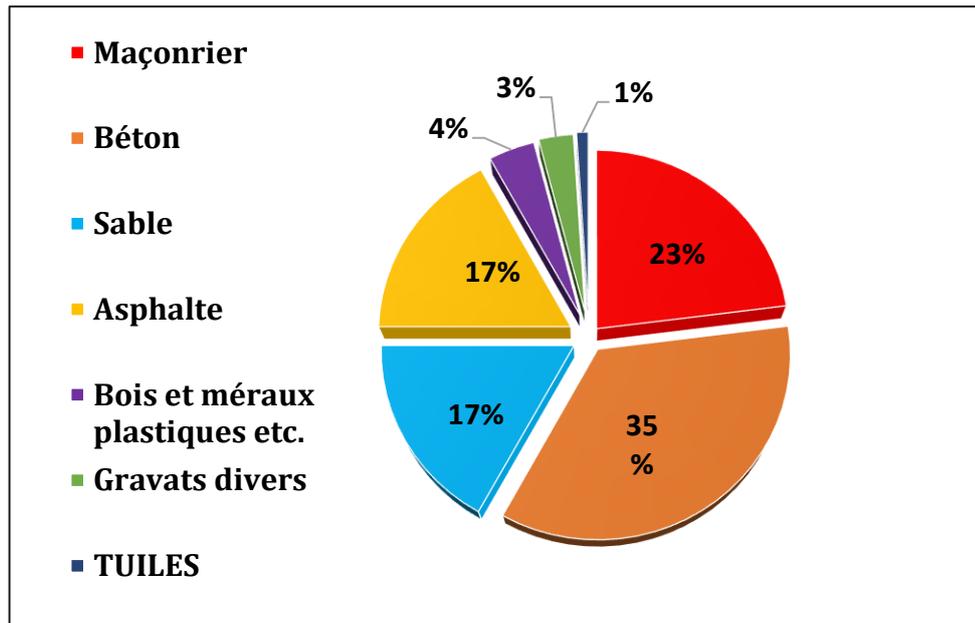


Figure I. 6: Répartition de différents types de Déchets de construction et de démolition [3]

I.4 Les sous-produits industriels

Les activités industrielles constituent la source principale des sous-produits et de déchets à valoriser dans le génie civil. Des quantités importantes sont produites en cours dans l'augmentation occupants des grandes surfaces conduisant à la pollution de l'environnement avec toutes ces conséquences.

Le génie civil est une source importante de consommation des déchets industriels, ayant un impact environnemental. De nombreux sous-produits et déchets résiduels pouvant remplacer des matières premières naturelles sont utilisés pour une large gamme de matériaux de construction [33].

I.4.1 La terre cuite

Il s'agit des déchets de la fabrication de la terre cuite comme l'argile cuite non moulée (chamotte), les briques concassées, les surcuits et les incuits de briqueteries, ainsi que les débris de briques contenus dans les déchets de démolition, qui sont désignés sous le nom collectif de débris de terre cuite [34].

I.4.2 Le mâchefer

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Principalement utilisé pour la fabrication de blocs de béton. Etant donné que le

mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé [35].

À la sortie du four d'incinération les mâchefers sont généralement humides et contiennent des éléments grossiers. Ils se répartissent en trois catégories selon leurs propriétés physico-chimiques :

- Mâchefers de catégorie « V » à faible fraction lixiviable (fraction d'éléments solubles dans un solvant).
- Mâchefers intermédiaires de catégorie « M » .
- Mâchefers avec forte fraction lixiviable de catégorie « S » [35].

I.4.3 Scories

Ces résidus représentent environ 2,5 % de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion est similaire à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton.

Les quatre catégories des scories désignées selon leur procédé de fabrication sont : les scories FOP (Four à Oxygène Pur), les scories FAE (Four à Arc Electrique), les scories HF (Haut Fourneau) et les scories FP (Four Proche). L'utilisation des scories dans le but de séquestrer le CO₂ est importante si on considère qu'il se produit actuellement 14 millions de tonnes au Canada, 21 Mt aux Etats Unis et 350 Mt de scories dans le monde dont 190 Mt de type HF [35].

I.5 Recyclage des déchets

Le recyclage est le processus de traitement des déchets industriels et ménagers, et les matériaux qui les composent peuvent être réintroduits dans le cycle de production des nouveaux objets. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures :

La réduction des quantités de déchets et la préservation des ressources naturelles. Ce sont des activités économiques de la société de consommation. Certains processus sont simples et bon marché, tandis que d'autres sont complexes, coûteux et non rentables. Dans ce domaine, les objectifs écologiques et de consommation sont alignés, mais ils peuvent aussi diverger lorsque les législateurs interviennent. Par conséquent, le recyclage est devenu une

activité importante dans les économies et les conditions de vie des pays développées à partir des années 1970 [32].

I.5.1 Le recyclage des déchets en Europe

En 2018, l'entreprise des travaux publics Eurovia a conforté sa position « leader dans la production » des granulats avec un réseau de 350 carrières, produisant environ 82 millions de tonnes en 2018 et construisant 150 usines de recyclage et de valorisation des déchets. Ses réserves sont de 3,1 milliards de tonnes, soit l'équivalent de plus de 50 ans de production.

En France, les déchets du BTP sont estimés à 227 millions de tonnes dont 93 % d'inertes. Sur les 211 millions de tonnes de déchets inertes, 148 millions de tonnes sont recyclées ou valorisées. Ils peuvent être réutilisés directement, recyclés ou récupérés via des remblais de carrière.

Un taux de 70% de déchets de BTP est recyclé par l'Union européenne en 2020. Qui couvre 28 % de l'ensemble des besoins de construction en France. On propose aujourd'hui d'aller plus loin vers un taux de recyclage de 90% d'ici 2025 [36]. Le **tableau I.4** montre le taux de recyclage en Europe.

Tableau I. 4 : Taux de recyclage en Europe [37]

Pays	Déchets de démolition en millions de tonnes par an	Matériaux recyclés en millions de tonnes par an	Pourcentage de recyclage par rapport à la production de déchets	Pourcentage de recyclage par rapport à la production des granulats naturels
Pays-Bas	12.2	8.5	73	2.6
Royaume-Uni	24	11	45.8	3.8
Allemagne	58	14.9	34.6	3.6
Belgique	7.5	2.2	29	5.8
Danemark	0.5	1.25	25	4.25
France	25	03	13	0.75
Espagne	13.5	0.5	3.7	0.2
Total	145	42	Moyenne = 31	21

I.5.2 Valorisation des déchets en Algérie

Le recyclage des déchets en Algérie est une opportunité importante pour la protection de l'environnement. Les déchets ménagers représentent environ 13,5 millions de tonnes par an. Environ 45 % de ces déchets, soit 6,1 millions de tonnes, sont recyclables. Parmi ces 6,1 millions de tonnes figurent 1,8 million de tonnes de papier, 1,2 million de tonnes de plastique, 1,6 million de tonnes de fibres et 300 000 tonnes de métal. Correspondant à une valeur d'environ 23 milliards de DA. Cependant, il n'y a que 247 micro-entreprises activement engagées dans le recyclage des déchets.

L'état est fortement dépendant du développement de l'industrie de la collecte et du recyclage. Il est au cœur du programme national de gestion des déchets urbains, premier cadre de référence dans une perspective de gestion et de valorisation des déchets ménagers [9-39]. La **Figure I.7** montre la composition des déchets ménagers en Algérie (DMA) et la **figure I.8** élucide la répartition des recycleurs par Wilaya

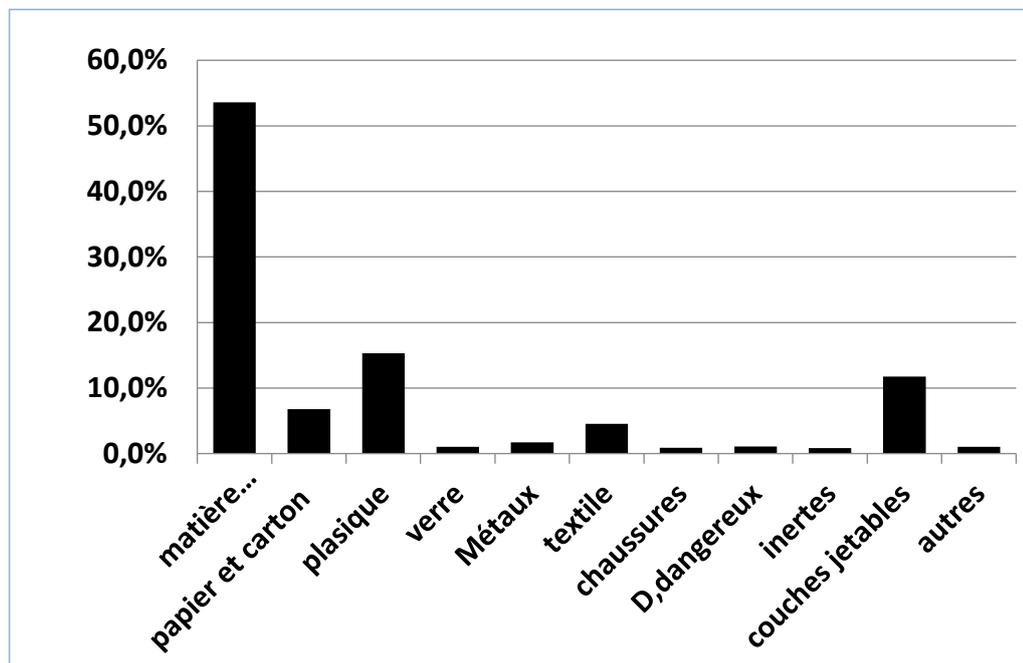


Figure I. 7: Composition moyenne des DMA- 4 saisons Algérie- 2018/2019 [40]

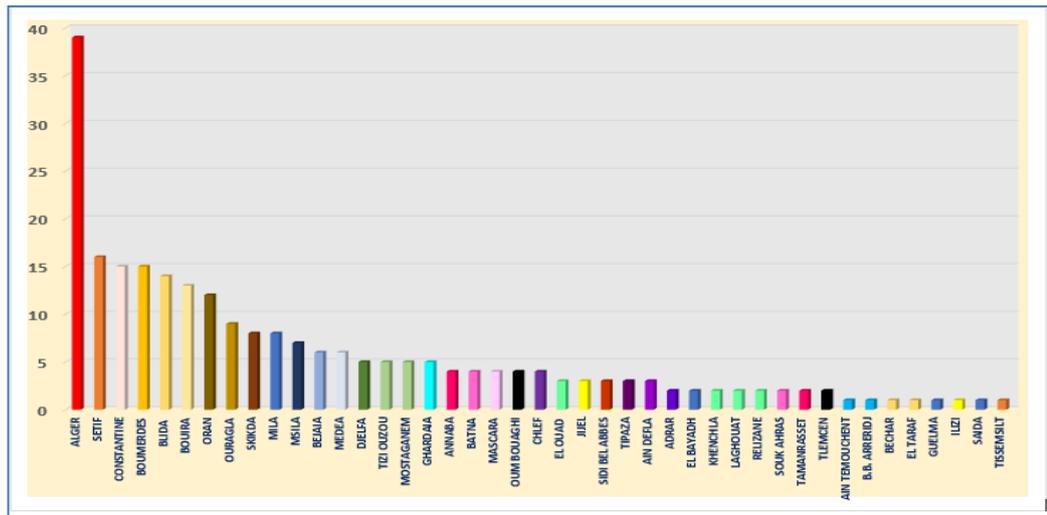


Figure I. 8: Répartition des recycleurs par Wilayas [40]

Le **tableau I.5** suivant présente les statistiques publiées en 2003 par la commission de l’Aménagement du Territoire et de l’Environnement (C.A.R.T.E) sur l’urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie

Tableau I. 5 : Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie [41]

Lieu	Date	Dégâts
El Asnam – Chlef (séisme)	10 octobre 1980	2900 logements détruits
Mascara (séisme)	18 aout 1998	1000 habitations détruites
Skikda (explosion gazoduc)	3 mars 1998	10 maisons détruites et 50 maisons endommagées
Ain-Temouchent (sièisme)	22 septembre 1999	600 habitations détruites et 1200 sérieusement endommagées
Bab El-oued Alger	9 et 10 novembre 2001	22400 logements endommagés et 300 à détruire complètement

I.6 Granulats recyclés

Les granulats sont des fragments de roche destinés à la fabrication d'ouvrages, de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Leur nature et leur forme dépend de leur provenance

et des techniques de production. Leurs dimensions sont comprises entre 0 et 125 mm. Le **tableau II.6** montre la classification des granulats recyclés selon leurs compositions [32].

Tableau I. 6 : Classification des Gros Granulats Recyclés par la RILEM [3]

Type des granulats	Composition
Type I	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de maçonnerie
Type II	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de bétons
Type III	Un mélange d'au moins 80% des granulats naturels, pas plus de 10% des granulats recyclés de type I (jusqu'à 20% des granulats recyclés de type II)

Les granulats recyclés sont obtenus en concassant et en recyclant des matériaux de chantiers de démolition, ou en recyclant des sous-produits de l'industrie tels que les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers ou d'autres déchets comme les briques et le verre. Après concassage, lavage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours [32].

I.6.1 Granulats recyclés de démolition

Il s'agit de matériaux provenant de la démolition de bâtiments et de routes. Leur matière première utilisée pour les fabriquer est constituée également par des granulats purs ou combinés avec des liants (dans les bétons et les enrobés routiers). Le secteur routier est en pointe puisque plus de 90 % des granulats recyclés proviennent du décapage de routes.

Le recyclage sur place des granulats constituant les couches d'assises des routes est très répandu : les granulats retirés de l'ancienne voie sont concassés et triés dans une installation mobile de concassage et criblage, positionnée sur le chantier routier, avant leur réutilisation immédiate [31].

Les granulats de béton recyclé ont une composition différente des granulats naturels. En effet, le granulat de béton recyclé est un matériau constitué de deux composants. (**Figure I.9**)

- Des granulats naturels concassés partiellement.
- De la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.



Figure I. 9: Composition des granulats recyclés de béton [42]

Les composants de ces granulats régénérés sont présents dans des proportions différentes. En effet, Le taux de pâte de ciment présent dans les granulats recyclés de béton varie en fonction de leur origine c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton d'origine.

I.6.2 Principales caractéristiques des granulats recyclés

La principale caractéristique des granulats issus du recyclage du béton est la présence d'une ancienne gangue de ciment liée aux principaux granulats naturels. Cette particularité a une influence significativement sur le comportement du béton à base de granulats recyclés car elle influence fortement les propriétés géométriques (forme, état de surface) et physiques (porosité, absorption d'eau). Les propriétés mécaniques (résistance à l'écrasement, résistance aux chocs, résistance à l'usure) et physico-chimiques de ces granulats qui peuvent être réactifs.

Si les granulats recyclés sont issus de produits de démolition, une autre caractéristique apparaîtra. La présence de divers types de polluants indésirables. Minéraux : gypse, verre, chlorure, brique ou matières organiques : papier, bois, plastique etc. Cette présence

d'impuretés introduit une hétérogénéité importante des granulats recyclés et pose des problèmes liés à l'échantillonnage ainsi que la représentativité des résultats lors de leur caractérisation, mais aussi des problèmes liés à la durabilité des bétons incluant ces granulats [43].

I.6.2.1 Caractéristiques morphologiques

En général, les granulats recyclés se caractérisent par un fuseau granuleux continu et homogène, mais le sable recyclé est considérablement plus grossier que le sable naturel utilisé dans le béton ordinaire.

Un autre aspect important de la granulométrie est la teneur en fines. Les fines présentes dans les granulats recyclés sont essentiellement constituées de ciment ancien et peuvent influencer aussi bien les caractéristiques des bétons frais comme la demande en eau, maniabilité, temps de la prise, que celles des bétons durcis comme l'adhérence de la nouvelle pâte de ciment-aux granulats.

La propreté des sables caractérise la teneur en fines argileuses car les fines argileuses peuvent rendre la mise en place du béton plus difficile et peuvent altérer l'adhérence des grains à la pâte de ciment [43].

I.6.2.2 Masse volumique et porosité

En raison de sa faible densité, de sa grande porosité et de sa faible teneur en impuretés dans les granulats recyclés, ont une densité plus faible que les granulats naturels couramment utilisés dans le béton, en raison de porosité des granulats recyclés qui est beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels.

Une étude a été menée en utilisant un prosimètre à mercure pour mesurer la porosité de diverses fractions de sable recyclé. La porosité des fractions inférieures à 1 mm était de l'ordre de 14 % et la porosité des fractions supérieures à 1 mm était de 11,5 %. La porosité globale du sable a été évaluée à 13 %. En effet, la porosité totale joue un rôle secondaire sur le comportement des granulats dans le béton. Le facteur principal est la distribution de la taille des pores qui affecte directement le coefficient d'absorption d'eau du granulat [44].

I.6.2.3 L'absorption d'eau

Les granulats recyclés ont une capacité d'absorption supérieure par rapport aux granulats naturels en raison de leur faible masse volumique et une porosité élevée. Cela conduit à une diminution de l'ouvrabilité du béton ainsi que la formation de réseau poreux dans le béton

et par conséquent, les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci seront affaiblies.

Le concassage peut avoir une influence sur la capacité d'absorption de granulats recyclés. En effet les fissures de concassage contribuent à l'augmentation d'eau et les fissures dans la partie hydratée du vieux mortier conduit à la forte absorption d'eau [32].

La **figure I.10** montre une photo MEB des fissures de l'interface pâte, granulats recyclés dans le béton.

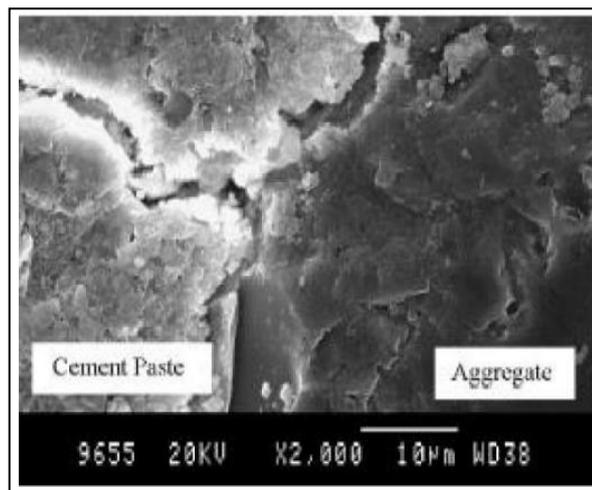


Figure I. 10: Interface granulat naturel / pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton [32]

I.6.3 Influence du vieux mortier attaché aux granulats recyclés

Les granulats recyclés sont différents, principalement des granulats naturels en raison de l'existence du vieux mortier de ciment qui y est accroché. Ce mortier de ciment est la cause de la baisse des caractéristiques des granulats recyclés conduisant à une densité plus faible, absorption d'eau plus élevée, teneurs en sulfates et en alcalins plus élevées. La teneur en vieux mortier dépend du cycle de concassage du béton est directement liée à la taille du granulat. D'autres études montrent que les caractéristiques du vieux mortier dépendaient des performances du béton d'origine [32].

I.7 Déchet de brique

Les briques sont l'un des plus anciens matériaux de construction, ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois en ajoutant des additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle [32]. La production de la brique génère des déchets de production comme le montre la **figure I.11**.



Figure I. 11: Déchets de brique de fabrication déposés aux alentours de la briquèterie [6]

I.7.1 Principaux constituants de la brique

Les briques réfractaires sont fabriquées à partir de différentes sortes d'argiles comme l'argile illitique d'une couleur brune grisâtre à rouge après cuisson, kaolin très brillant, les bravais tiques orangées à rose plus ou moins sous forme d'oxydes hydratés. Contenant principalement le dioxyde de silicium (SiO_2) et l'aluminium (Al_2O_3) [55]. Les éléments colorants dont la proportion détermine la couleur de la brique en plus du degré de cuisson et un autre facteur déterminant de cette couleur. Ces éléments sont :

- L'oxyde de fer.
- L'oxyde de titan.
- L'oxyde de manganèse. - les "fondants", de deux types.
- Les oxydes alcalins : oxydes de sodium et de potassium.
- Les oxydes alcalino-terreux : chaux et magnésie.

Le **tableau I.7** donne les composants chimiques de la brique.

Tableau I. 7 : Les composants chimiques de brique terre cuite (rouge) [50]

Natures des éléments	Formulations	Tolérances (%)
Silice	SiO ₂	35 – 85
Alumine	Al ₂ O ₃	9 – 25
Chaux	CaO	0 – 25
Magnésie	MgO	0 – 5
Oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	1 – 5
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	3 – 9
Oxyde de titan	TiO ₂	0.3 – 2
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 – 3
Gaz carbonique	CO ₂	0 – 13
Eau de combinaison	H ₂ O	5 – 11

I.7.2 Effet de brique recyclé sur les performances des mortiers et bétons

I.7.2.1 Comportement des mortiers et bétons à l'état frais

I.Irki et al. [46] ont étudié l'effet des fines de brique sur l'étalement du MAP avec différents taux de substitution. Lorsque la finesse de la poudre de brique recyclée reste constante, l'étalement diminue en fonction de l'augmentation des taux de substitution en fines de brique par rapport au MAP de référence (**Figure I.12**), les mélanges avec 20 % de poudre de brique donnent le résultat le plus faible tout en respectant les limites d'un MAP. La diminution de l'étalement moyen est d'environ 3 % par rapport au mortier de référence, avec F1 = 3900cm²/g, F2 = 4300cm²/g, et F3 = 5200cm²/g.

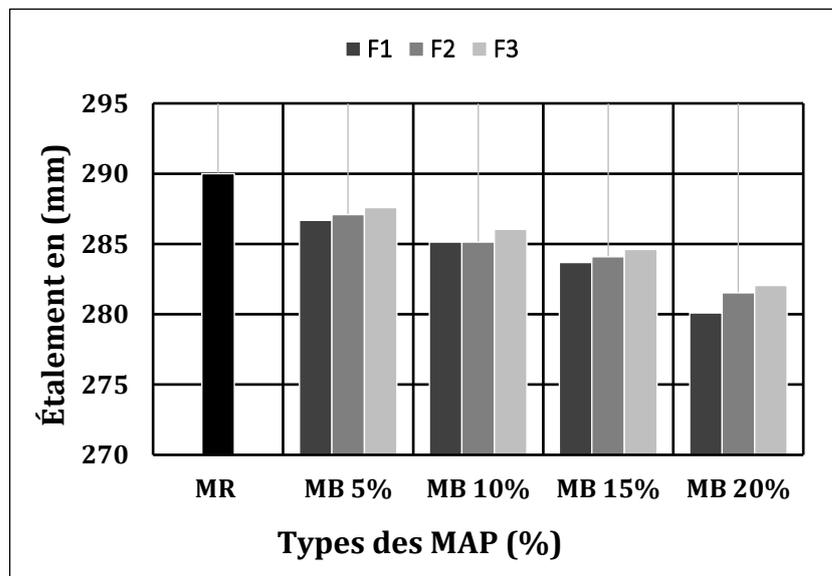


Figure I. 12: Effet des fines de briques sur la fluidité des MAP [46]

Si-Ahmed et Kenai.[47] ont trouvé une légère augmentation du diamètre de l'étalement par rapport au MAP de référence à 15% de remplacement de ciment par les fines de briques. Par contre une diminution de diamètre de l'étalement a été remarquée à partir de 20% de remplacement des fines de brique. La formulation de MAP a été possible obtenue jusqu'à 25% de taux de substitution maximum par des fines de brique. Le taux de substitution de 15% de ciment en fine de déchets de brique a donné le meilleur temps d'écoulement au v-Funnel , par contre la substitution de 20% à 25% réduit l'écoulement en restant à la limite qui conditionne le MAP. (**Figure I.13**)

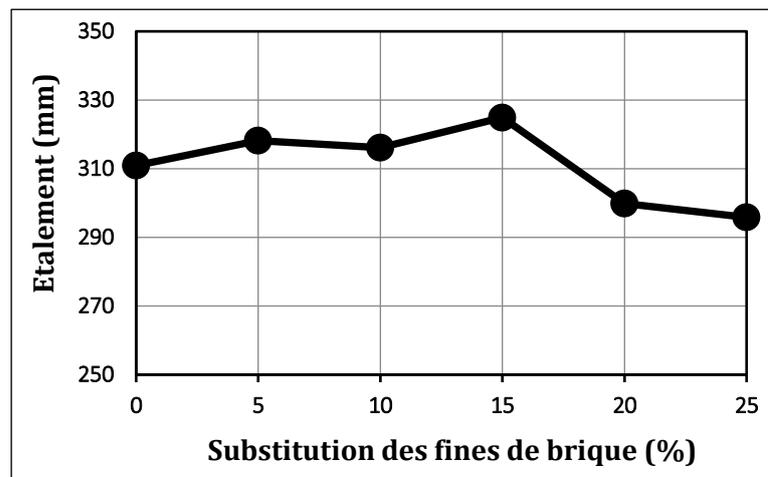


Figure I. 13: Effet des fines de brique sur l'étalement du MAP [47]

Irki et al .[46] ont trouvé à partir de 5% du remplacement de ciment par les fines de brique recyclée a différentes finesses , une convergence de temps d'écoulement a été observée par rapport au MAP de référence, avec l'augmentation de remplacement des fines de brique recyclée. D'autre part l'augmentation de leur finesse provoque la diminution du temps pour tous les mélanges de MAP (**Figure I.14**). **Si-Ahmed et Kenai.[47]** ont trouvé par contre qu'une substitution de 15% de ciment par les fines de déchets de brique (DB) donne un meilleur temps d'écoulement (**Figure I.15**).

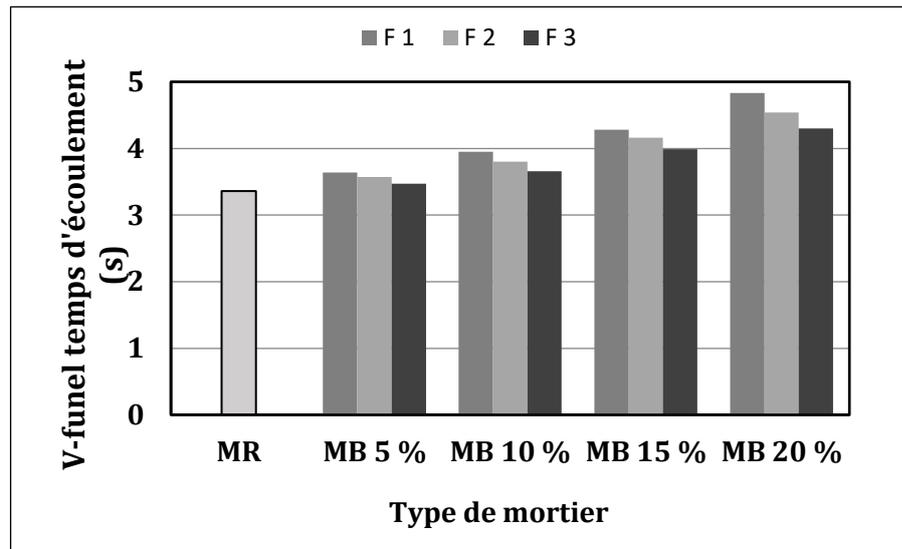


Figure I. 14: Effet des fines de brique sur le temps d'écoulement de MAP (V-Funnel) [46]

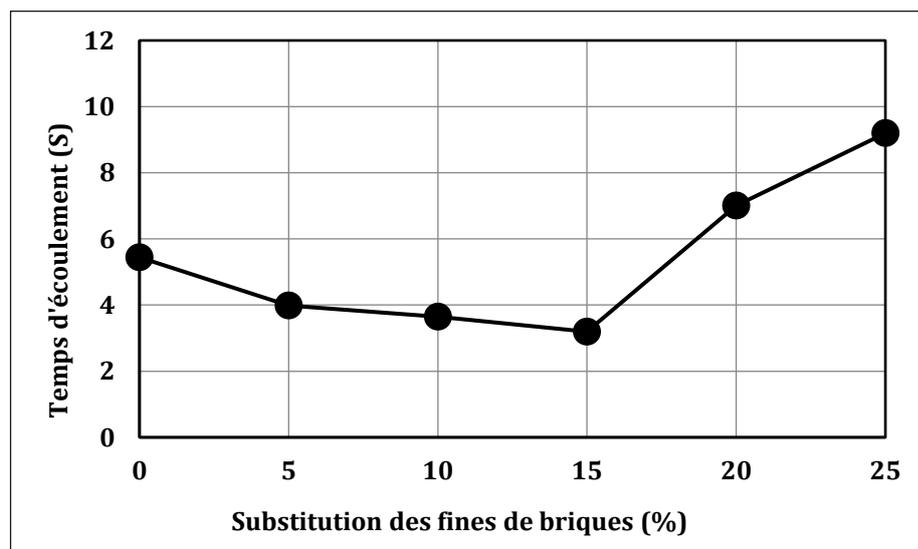


Figure I. 15 : Effet de taux de substitution des fines de brique sur le temps d'écoulement [47]

I.7.3 L'influence de l'incorporation de déchet de brique sur le retrait des bétons

Bektas et al. [48] ont constaté que la substitution à 10% de sable de brique donne la plus grande contraction, par contre à 20% de substitution, la plus petite valeur de retrait a été observée avec un faible écart (Figure I.16).

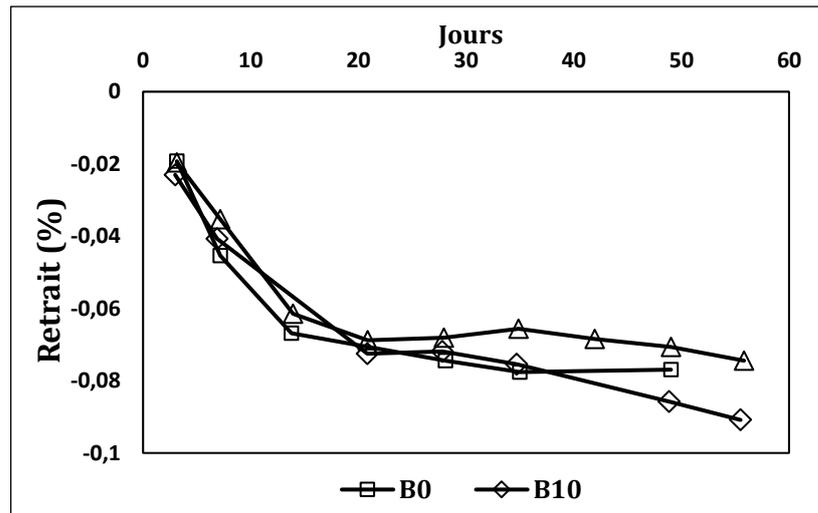


Figure I. 16: Effet des déchets de brique sur le retrait des bétons [48]

Khatib [49] a observé que plus le taux de remplacement de sable par les déchets de briques est élevé, plus le retrait est faible. Cela s'explique par la réaction pouzzolanique qui absorbe l'eau. Les particules de brique retiennent plus longtemps l'eau initialement absorbée par le mélange dans les pores de la brique, retardant ainsi l'hydratation et le retrait de séchage dû à la présence d'humidité interne (Figure I.17).

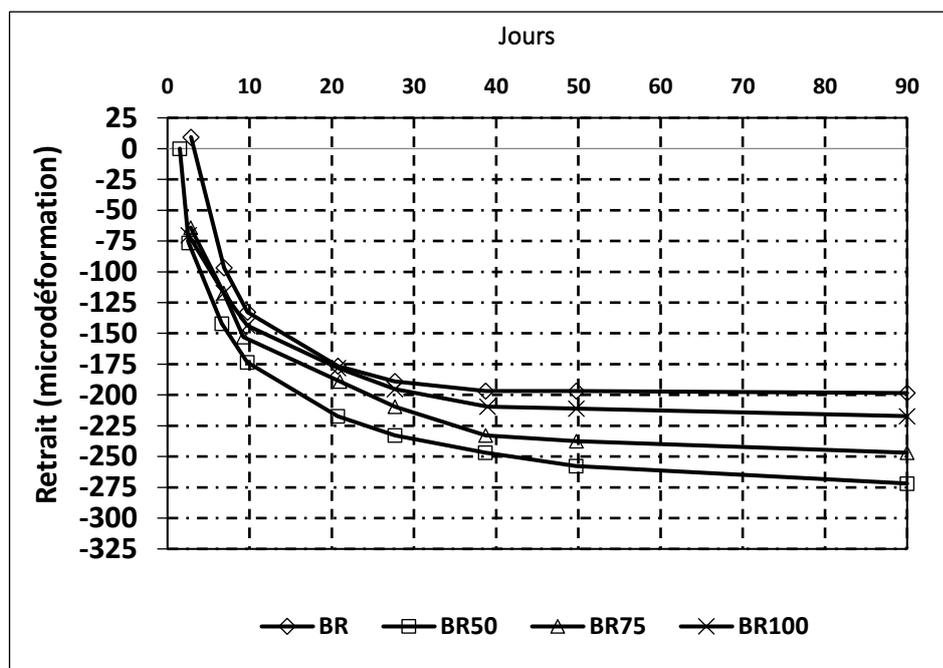


Figure I. 17: Profilés de retrait pour béton contenant déchet de brique [49]

I.7.4 Résistance à la compression

Si-Ahmed et Kenai [47] ont trouvé que la résistance à la compression diminue au jeune âge par rapport au MAP de référence avec l'augmentation du taux de substitution du ciment (CEM II) par les fines de déchets de brique. Par contre une résistance améliorée a été obtenue à long terme à des taux de remplacement de 5% et 10% de ciment par les fines de brique. Cela peut être lié à l'hydratation du ciment à long terme, et à la réaction de calcaire présentant dans le (CEM II) avec les aluminates apportés par les fines de brique. Cette réaction confère au MAP des hydrates supplémentaires contribuant à la réduction de sa porosité, et par conséquent à l'augmentation de la résistance à la compression (**Figure I.18**).

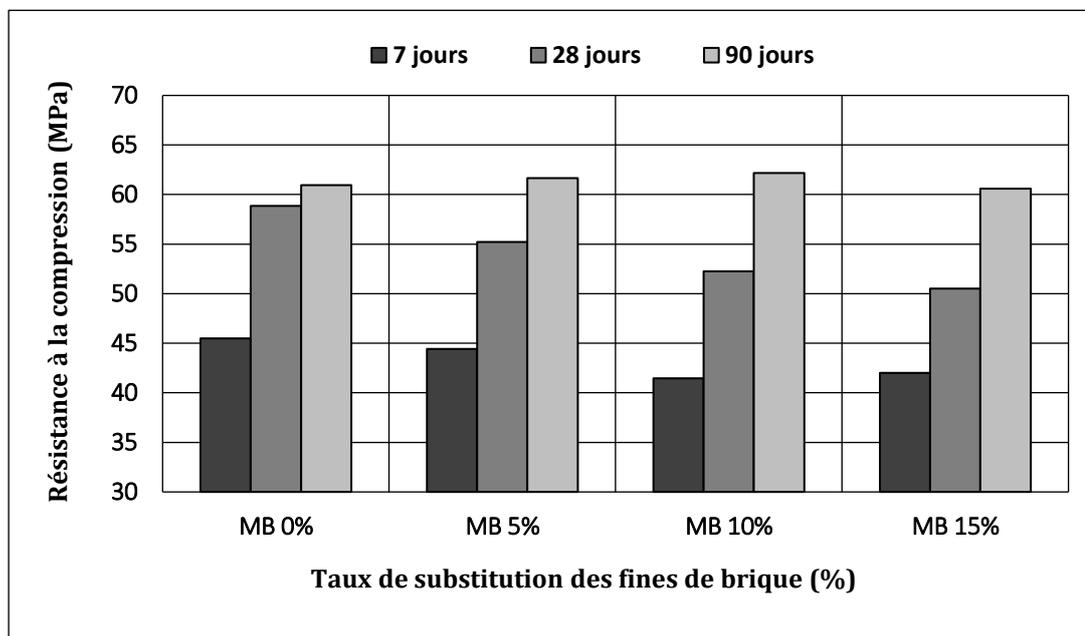


Figure I. 18: Effet de taux de substitution des fines de brique sur la résistance à la compression des MAP [47]

I.Irki et al [46] ont trouvé que la résistance à la compression augmente pour les MAP à base de 5% de substitution de ciment par les fines de brique pour l'ensemble des finesse de déchet de briques par rapport au MAP de référence. Pour ceux qui ont une finesse de $3900\text{cm}^2/\text{g}$ réduit la résistance à la compression à partir de 10% de taux de substitution. Par contre la finesse de déchet de brique de 4300 et $5200\text{cm}^2/\text{g}$ ont donné des résistances supérieures par rapport à celles de MAP de référence. Cela est probablement lié à la réaction pouzzolanique qui se produit par une combinaison de ces fines de brique avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment en réduisant la porosité des MAP ce qui le rend plus résistant (**Figure I.19 ; Figure I.20 ; Figure I.21**).

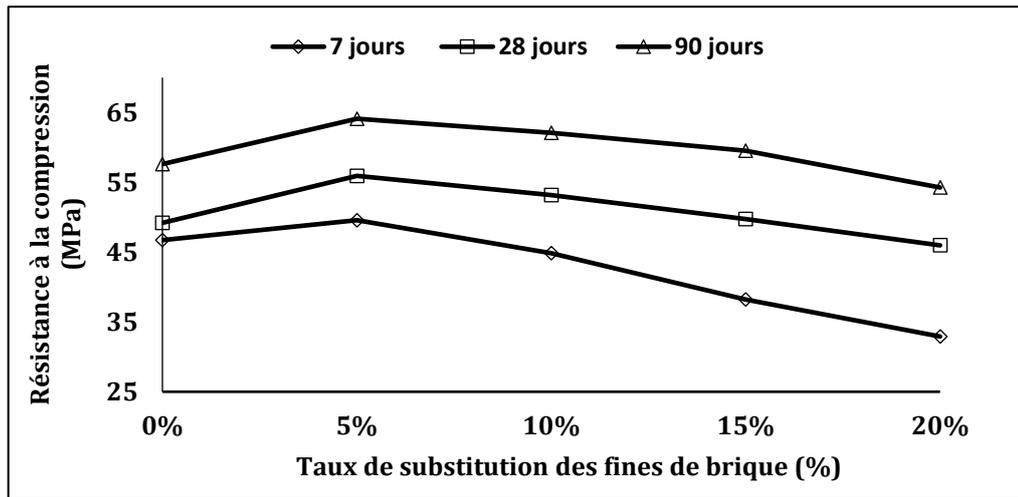


Figure I. 19: Variation de la résistance à la compression avec la teneur en poudre (F1 3900=cm²/g) [46]

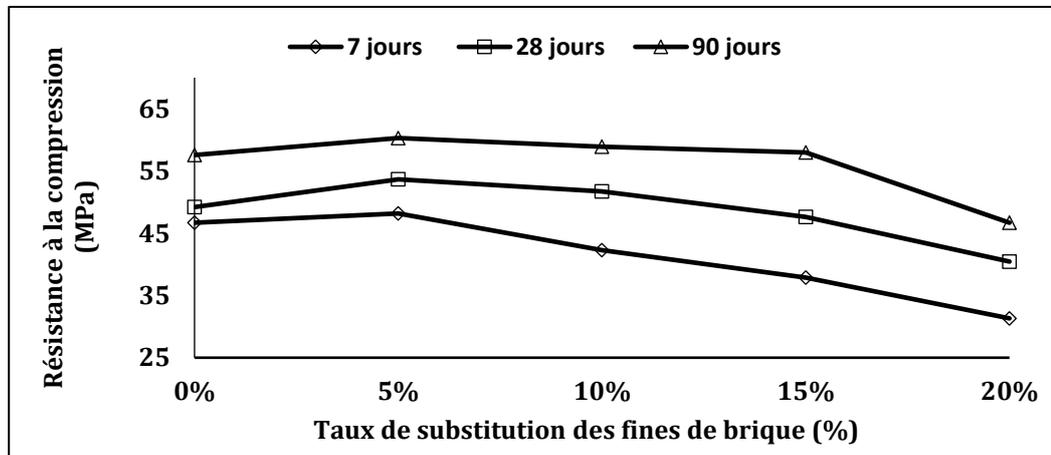


Figure I. 20: Variation de la résistance à la compression avec la teneur en poudre (F2=4300 cm²/g) [46]

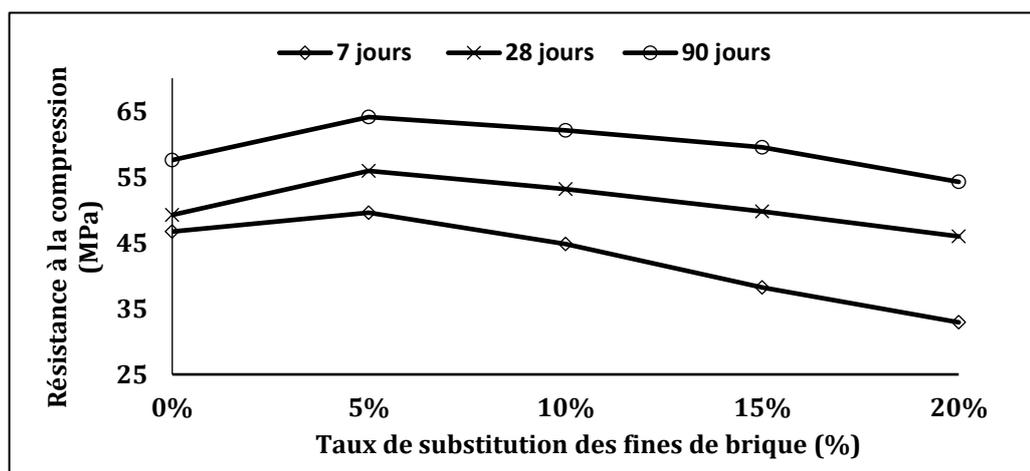


Figure I. 21: Variation de la résistance à la compression avec la teneur en poudre (F3=5200 cm²/g) [46]

I.7.5 Résistance à la traction par flexion

Irki et al [46] ont trouvé que la résistance à la flexion varie semblablement à celle de la compression selon le taux de substitution des fines de brique et leur finesses Blaine. La valeur optimale de la résistance a été enregistrée pour la finesse la plus élevée ($F_3=5200 \text{ cm}^2/\text{g}$). Les résistances à la traction par flexion des MAP à 10, 15 et 20% de substitution du ciment par les fines de brique sont supérieures à celles de MAP de référence pour la finesse Blaine de 4300 et 5200 cm^2/g à long terme (**Figure I.22**).

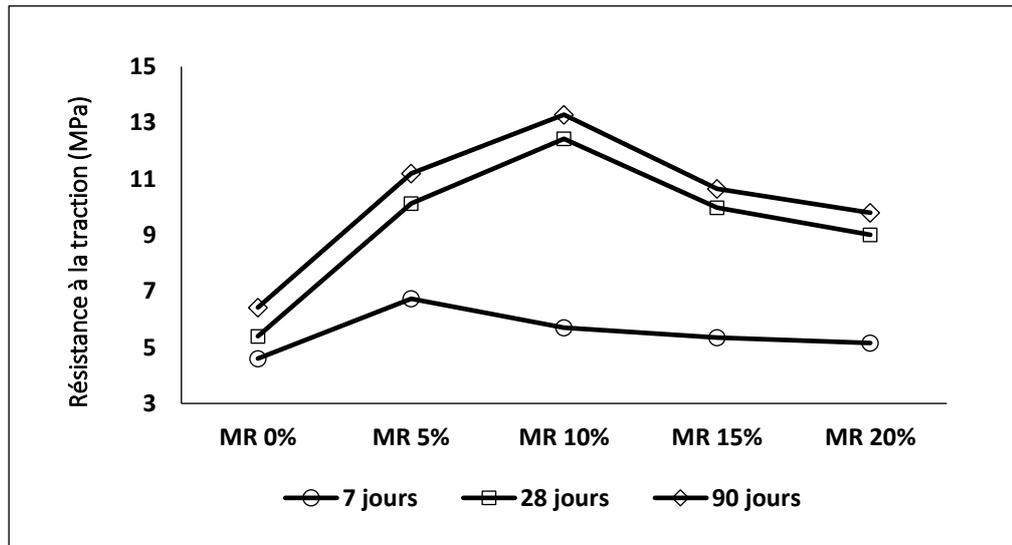


Figure I. 22: Variation de la résistance à traction par flexion avec la teneur en poudre ($F_3=5200 \text{ cm}^2/\text{g}$)[46]

La diminution des résistances à court terme peut être attribuée à l'activité pouzzolanique des déchets de brique. La pouzzolane artificielle (poudre de brique) ajoutée au ciment améliore visiblement la résistance mécanique du mortier à long terme. La variation des résistances dépend du taux de remplacement du ciment par les fines de déchets de briques et de l'âge des mortiers. Les mortiers contenant 5 et 10 % de briques recyclées ont une résistance plus élevée, et pour ceux qui ont 15 et 20 % de briques ont une résistance moins importante à 90 jours.

Karatas et al.[50] Ont étudié l'effet des fines de brique (DB) sur la résistance à la compression et à la flexion des MAP. Les résultats de la résistance à la flexion sont obtenus à partir de la moyenne de trois mélanges. La résistance a augmenté pour la majorité des mortiers pendant les 7 premiers jours d'hydratation. La résistance des mortiers qui contiennent 5% de poudre de DB a augmentée par rapport aux mélanges témoins. Pour les

mortiers contenant 10, 15 et 20 % de poudre de DB leur résistance a augmenté pendant 7 jours, puis elles sont baissées par rapport aux mortiers témoins (**Figure I.23**).

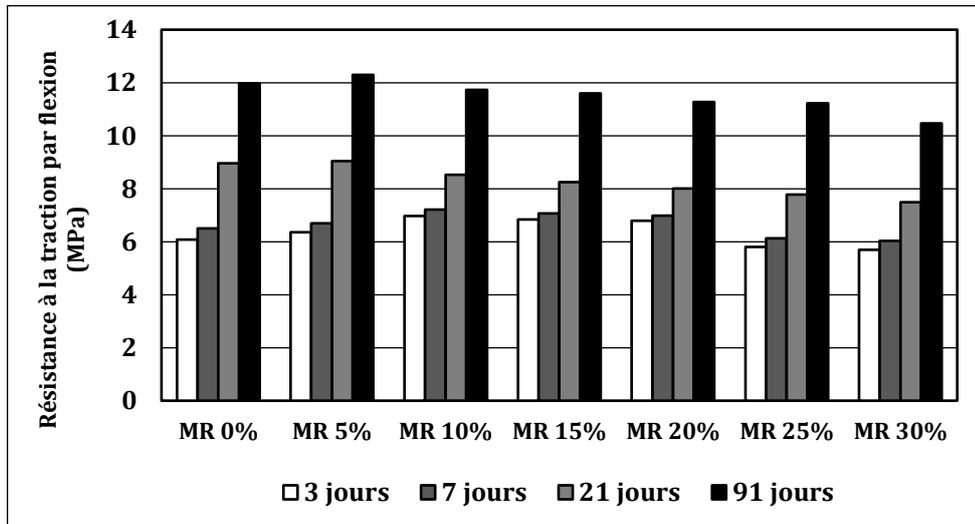


Figure I. 23: Résistance à la traction par flexion des MAP [50]

I.7.6 Absorption capillaire

Amjadi et al.[51] ont observé que l’absorption d’eau par capillarité à court terme augmente en fonction de l’augmentation de taux de substitution du ciment par des fines de briques. Le taux de 10% donne les résultats les plus élevés d’absorption par rapport au MAP de référence (**Figure I.24**). Concernant l’absorption à long terme, les résultats sont semblables à ceux qui ont été observés à court terme (**Figure I.25**). Cela est lié à la forte absorption des fines de briques utilisées. La structure des pores des fines de brique est un facteur important pouvant réduire ou augmenter l’absorption d’eau.

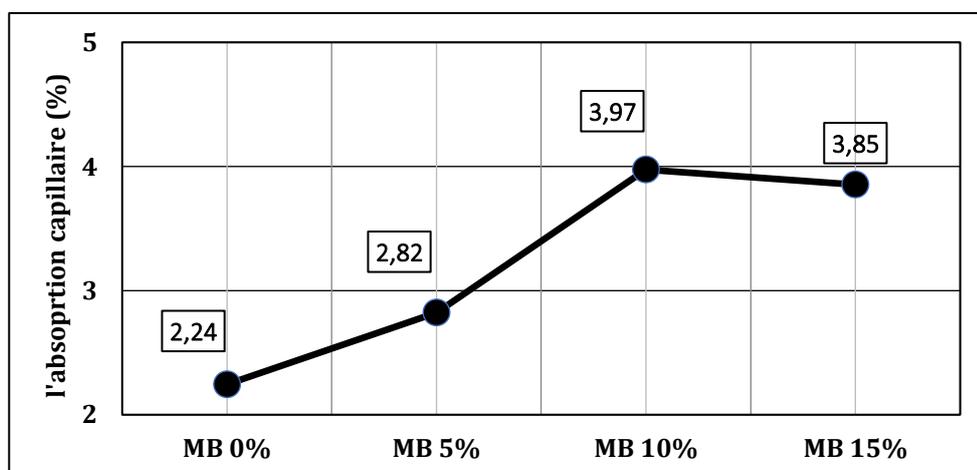


Figure I. 24: Effet du taux de substitution des fines de brique sur l’absorption des mortiers à court terme [51]

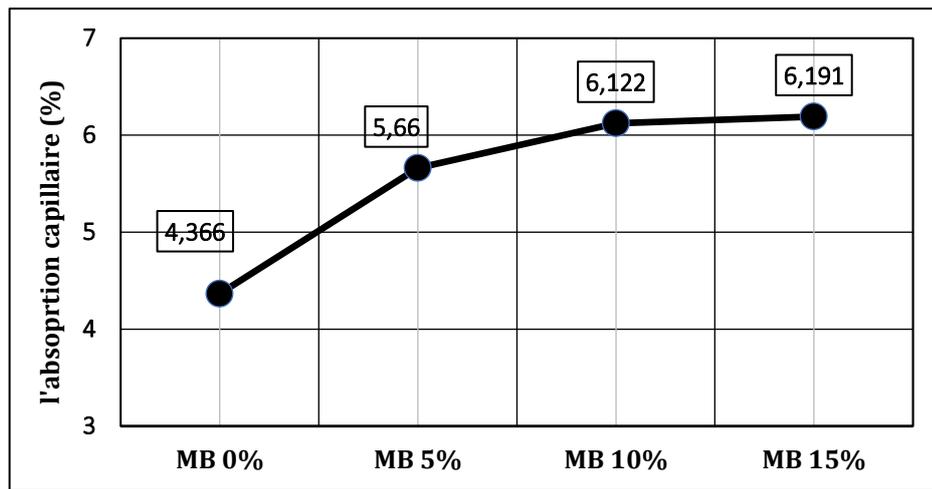


Figure I. 25: Effet du taux de substitution des fines de brique sur l'absorption des mortiers à long terme [51]

Zengfeng et al [52] ont étudié l'effet des fines de brique sur l'absorption d'eau des MAP par une substitution des fillers calcaires. Ils ont observé que les valeurs d'absorption d'eau sont comparables concernant la série des MAP suivante : M-BP 0 (MAP avec 100% FL + 0% WBP), M-BP50 (50% FL+ 50% WBP) et M-BP100 (0% FL + 100% WBP). Par contre pour la série de M-BPWA50 (MAP avec 50% FL + 50% WBP + 5% eau additionnelle) et M-BPWA100 (0% FL +100% WBP + 10% eau additionnelle) ont donné des valeurs légèrement supérieures à celles de la série M-BP. Cela s'explique par une teneur en eau additionnelle induit un rapport E/C plus élevé à celui de la série M-BP conduisant à une porosité plus élevée. Cela peut être compensée à long terme par la réaction pouzzolanique des fines de DB avec la portlandite $Ca(OH)_2$ (Figure I.26).

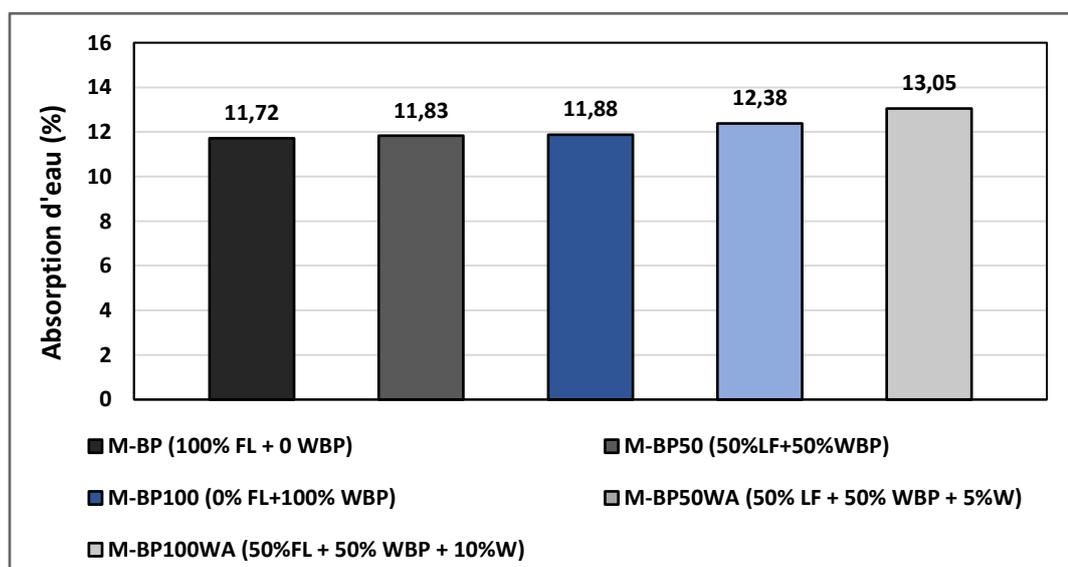


Figure I. 26: Absorption d'eau des MAP à 28 jours [52]

I.7.7 Porosité et densité

Gonçalves et al. [54] ont étudiés les effets des fines de brique et de métakaolin sur la porosité et la densité des mortiers (**Figure I.27** et **Figure I.28**). Ils ont constaté que le remplacement du ciment par de la brique d'argile calcinée DB n'a pas modifié la densité et la compacité des mortiers testés. Un remplacement de 10% donnait le bon résultat en comparant avec le mortier de référence. D'autre part, dans le cas des échantillons de deux types de métakaolin (MK1 et MK2), des augmentations de la densité sont observées. Cela est dû à la finesse des MK et leur pouzzolanité qui améliore la compacité de ces mélanges. **Zakaria et Cabrera [54]** ont trouvé que la porosité de béton à base granulats de DB diminue en fonction de l'âge, cette réduction de porosité est probablement liée à la réaction pouzzolanique entre le DB et le ciment contribuant à la formation des C-S-H de la deuxième génération qui remplissent les pores du béton (**Figure I.29**).

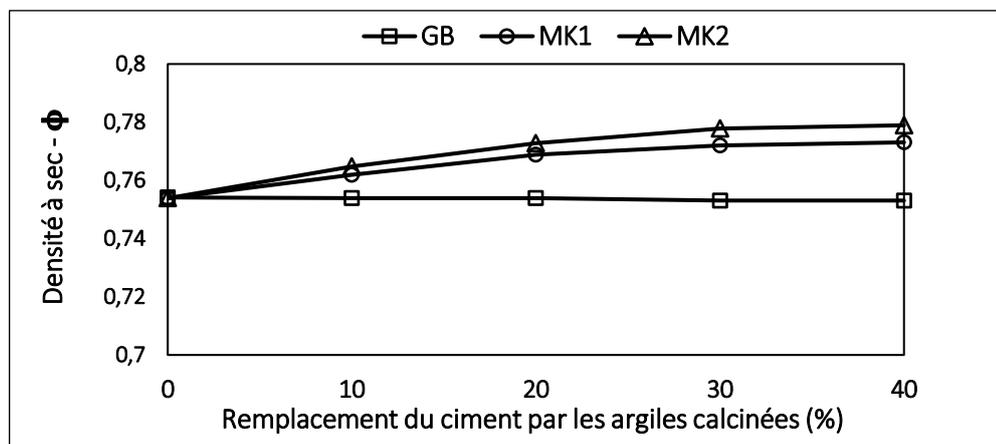


Figure I. 27: Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la densité des mortiers [53]

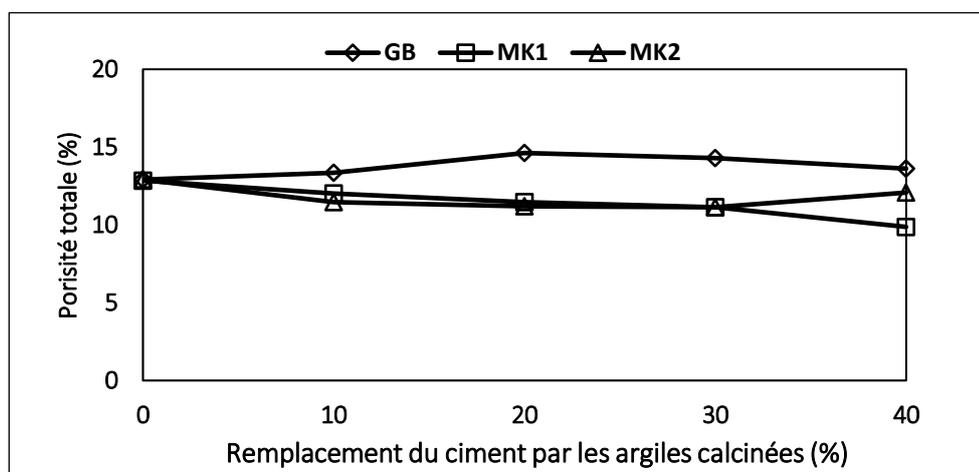


Figure I. 28: Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la porosité des mortiers [53]

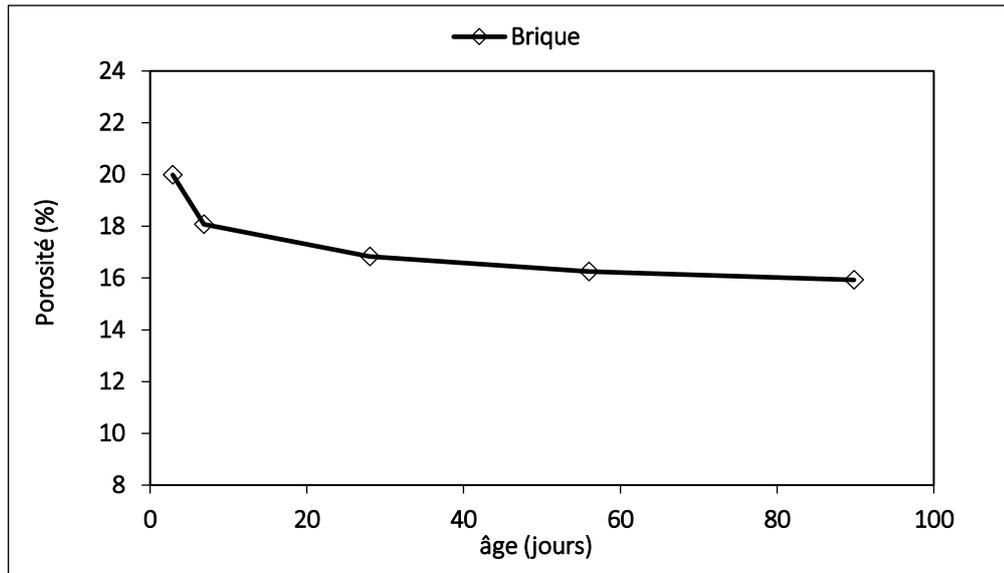


Figure I. 29: variation de la porosité du béton à base de brique recyclé [54]

I.7.8 Carbonatation

Yasong et al.[55] ont étudié les effets de déchets de brique sur la profondeur de carbonatation du béton en trois taux de substitution de sable et de gravier par les déchets de brique (35%,40%,45%) avec différents rapports E/C. Il a été remarqué que cette profondeur augmente avec l'augmentation de ces taux de remplacement après 28 jours d'hydratation. (**Figure I.30 et figure I.31**).

Zengfeng et al [52] ont constaté que la profondeur de carbonatation augmente avec le temps pour tous les mortiers à base des fines de brique par rapport au mortiers de références M-BP0 .

La carbonatation est accélérée dans ces mortiers en raison de la réaction entre le dioxyde de carbone et l'hydroxyde de calcium, des silicates de calcium hydratés produits lors de l'hydratation. La teneur en fines de brique a légèrement augmenté le taux des pores ouverts, ce qui a favorisée la pénétration du CO₂ et, par conséquent la carbonatation. Les résultats obtenus avec la série de mortiers M-BPWA (mortiers à base des fines de brique avec une teneur en eau additionnelle E/C= 0,5) ont montré une profondeur de carbonatation plus élevée que celle de la série de mortiers M-BP0, ce qui est dû là encore à une porosité plus élevée de ces types de mortiers (**Figure I.32**).

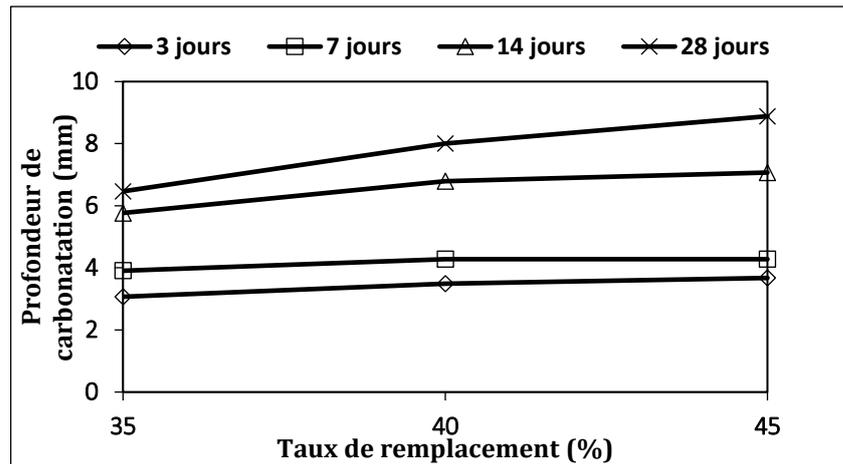


Figure I. 30: Relation entre la profondeur de carbonatation et le taux de remplacement de brique recyclé [55]

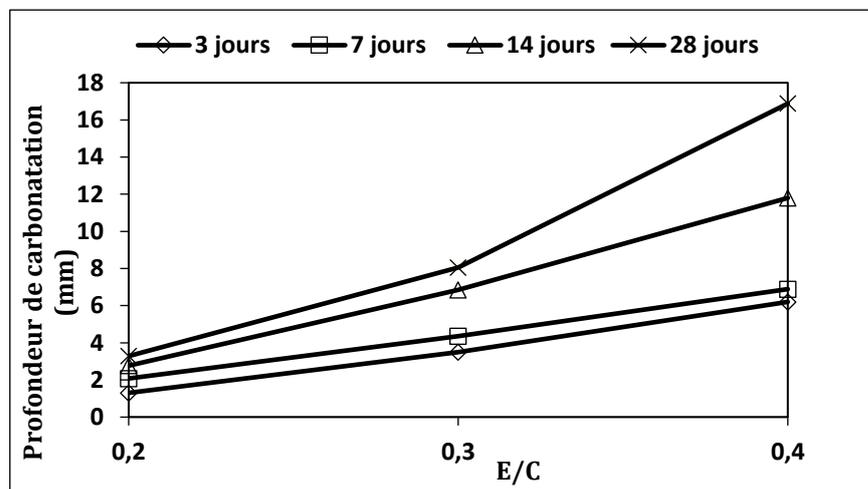


Figure I. 31: Relation entre la profondeur de carbonatation et le rapport E/C [55]

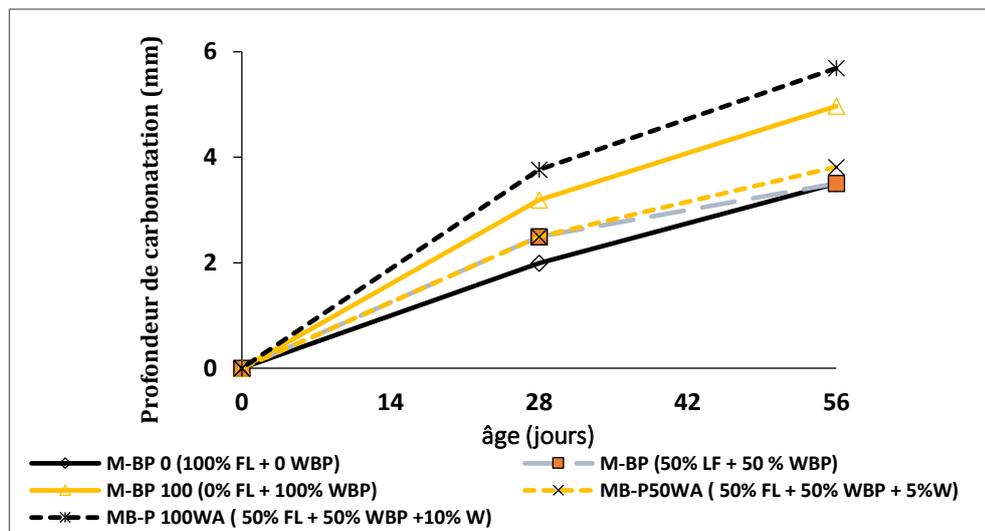


Figure I. 32: Profondeur de carbonatation des MAP en fonction du temps [52]

I.7.9 Diffusion des ions chlorures

Zengfeng et al [52]. La diffusion des ions chlorures à travers le mortier de référence a été observée et après 16 semaines d'essai. Un coefficient de $4,01 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ a été obtenu. Les coefficients de diffusion des chlorures des mortiers contenant des fines de brique sont similaires à ceux du mortier de référence à l'exception du mortier M-BP100WA qui présente une valeur légèrement supérieure, ce qui peut être dû à la plus grande porosité du mortier M-BP100WA. Concernant le mortier M-BP100 présente la valeur la plus faible, ce qui peut être dû à l'effet pouzzolanique et à un raffinement de la structure des pores (**Figure I.33**).

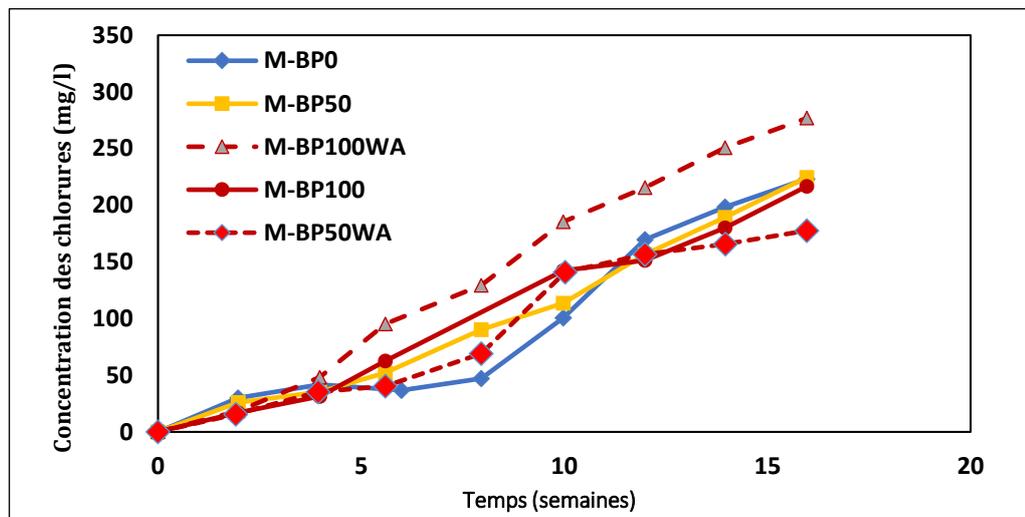


Figure I.33 : Taux de diffusion des chlorures pour les mortiers avec charge calcaire et déchets de brique [52]

I.7.10 Résistance aux sulfates

Schackow et al.[56] ont étudié la résistance aux attaques sulfatiques sur les mortiers contenant différents taux de substitution du ciment par des fines de brique recyclées. Ils ont constaté que la fissuration et l'expansion des mortiers de référence sont plus faibles par rapport aux mortiers contenant les fines de briques, parallèlement aussi à l'augmentation en taux de substitution. La structure plus poreuse du mortier de référence semble être capable de s'adapter aux réactions expansives par la formation d'hydrates ettringite, ($\text{C}_3\text{A}_3\text{CS.H}_{32}$) qui se produisent lors de l'exposition du matériau durci sous l'effet de sulfates (**Figure I.34** et **Figure I.35**).

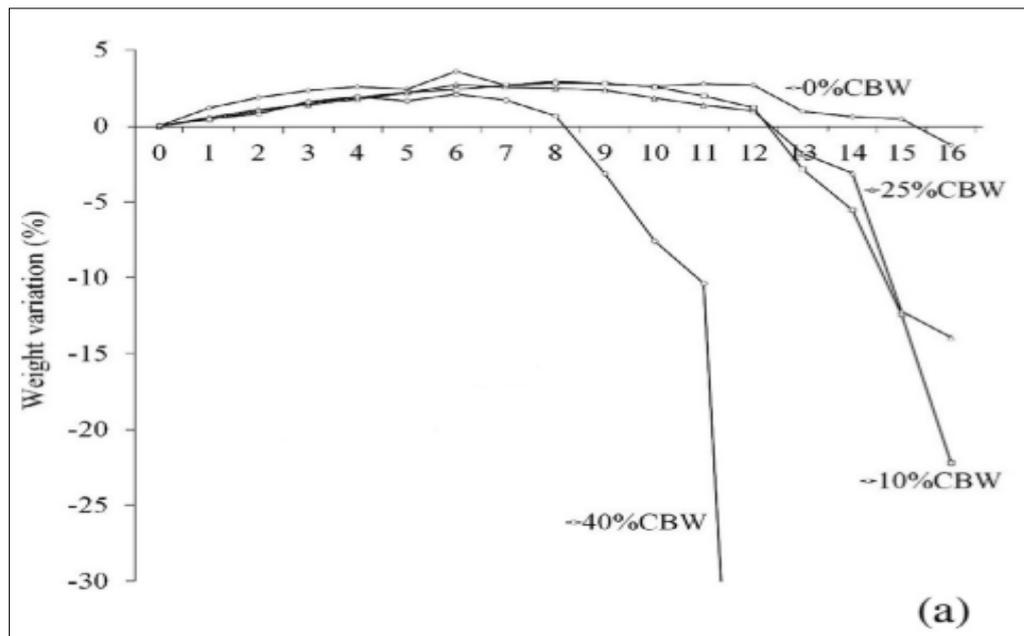


Figure I. 34: Variation de la masse des mortiers en fonction de taux de substitution de ciment en fines de briques [61]

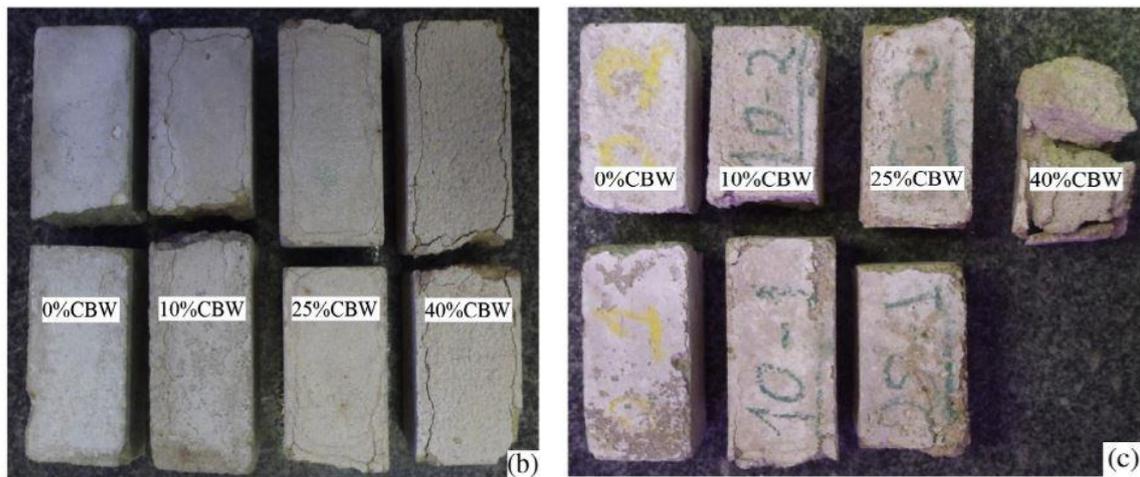


Figure I. 35: Détérioration des éprouvettes des mortiers en fonction de la teneur en fine de brique due aux attaques sulfatiques [56]

I.8 Récapitulatif de la recherche bibliographique sur l’effet des fines de brique

Dans cette partie, un résumé sous forme de tableau concernant les effets de déchet de brique sur le comportement des mortiers et bétons. (Tableau I.8)

Tableau I. 8 : récapitulation des résultats des effets de déchet de brique sur les mortiers et bétons

Les paramètres des mortiers et bétons	Observation	Substitution	Chercheurs
Ouvrabilité	Diminue de 5% à 20%	Ciment	• Irki et al. [46]
	Augmente de 5 à 15% Diminue de 15% à 25%	Ciment	• M.Si-Ahmed et S.Kenai.[49]
Retrait	Augmente à 10%. Diminue à 20%.	Sable	• Bektas et al. [48]
	Diminue de 50% jusqu'à 100%	Sable	• Khatib [49]
Résistance à la compression	Augmente à long terme de 5% jusqu'à 15% Diminue à court terme de 5% à 15%	Ciment	• M.Si-Ahmed et S.Kenai.[47]
	Augmente à 5% Diminue de 10% à 20%	Ciment	• Irki et al. [46]
Résistance à la traction	Augmente de 5% à 10% Diminue de 10% à 20%	Ciment	• Irki et al. [46]
	Augmente à long terme à 5% puis diminue de 10% à 30%. Augmente à court terme à 5% puis diminue de 10% à 30%	Ciment	• Karatas et al.[50]
Absorption capillaire	Augmente à court terme de 5% à 15%. Augmente à long	Ciment	• R. Amjadi et al.[51]

	terme à 10% puis diminue à 15%.		
Absorption capillaire	Une légère Augmentation	Filler calcaire	<ul style="list-style-type: none"> • Zhao, Zengfeng et al [52]
Porosité et densité	Pas de changement	Ciment	<ul style="list-style-type: none"> • Gonçalves et al.[53]
	Diminue au cours du temps	Gravier	<ul style="list-style-type: none"> • M.Zakaria et J.G.Cabrera [54]
Profondeur de carbonatation	Augmente de 35% à 45% au cours du temps	Granulats légers	<ul style="list-style-type: none"> • Yasong Zhao et al. [55]
	Augmente au cours du temps	Filler calcaire	<ul style="list-style-type: none"> • Zhao, Zengfeng et al [52]
Diffusion des ions chlorures	Augmente par rapport au MAP de référence	Filler calcaire	<ul style="list-style-type: none"> • Zhao, Zengfeng et al [52]
Résistance aux attaques sulfatiques	Diminue de 25% à 40%	Ciment	<ul style="list-style-type: none"> • A. Schackow et al. [56]

I.9 Conclusion

Cette revue bibliographique a été réalisée pour examiner l'état des connaissances concernant le comportement des mortiers et des bétons influencés par le remplacement des granulats de briques recyclés.

Cette revue bibliographique a démontré que de nombreux paramètres peuvent être pris en considération dans l'étude du béton et du mortier afin d'améliorer certaines propriétés ou pour leur conférer de nouvelles propriétés. En effet, le comportement de ces bétons et mortiers se distingue selon le pourcentage de substitution de briques recyclés.

C'est dans ce cadre que notre recherche vise à établir une base de données expérimentale de l'utilisation de différents composants sous différents modes de préservation, et aux paramètres de composition qui peuvent être exploités et complétés par certaines propriétés des matériaux élaborés.

CHAPITRE II
LES MATERIAUX ET PROTOCOLE
EXPERIMENTAL

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la partie de l'étude expérimentale portant sur la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation des différents mortiers, ainsi que des essais et des techniques expérimentales à l'état frais et durci. Le choix des matériaux a été principalement basé sur leur disponibilité au niveau locale.

II.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

Dans le cadre de cette étude, nous avons formulé les MAP en utilisant les matériaux locaux suivants :

II.2.1 Ciment

Le type de ciment choisi est un CEM II/B 42,5 N provenant de la cimenterie de Lafarge M'sila (**Figure II.1**).



Figure II. 1: Ciment type CEMII/B-L 42,5N

Les **tableaux II.1, II.2 et II.3** représentent respectivement la compositions chimiques et minéralogiques ainsi que les caractéristiques physique et mécanique du ciment.

Tableau II. 1: Compositions chimiques du ciment [7]

Composition chimiques (%)									
CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Perte au feu
67,59	4,59	2,85	1,68	0,67	0,15	0,15	16,60	0,22	7,87

Tableau II. 2: Compositions minéralogiques du ciment[7]

Composition minéralogiques (%)			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
67,85	2,29	7,33	8,67

Tableau II. 3: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment[7]

Classe vraie (MPa)	ρ_{Abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)	Début de prise (h,min)	Fin de prise (h,min)
43	2970	1089	4155	1h 5min	4h 25min

II.2.2 Sable

Nous avons utilisé dans cette étude deux types de sable, à savoir le sable naturel et le sable recyclé. Le sable naturel est composé par le sable de Baghlia et le sable de Boughezoul

II.2.2.1 Sable naturel

✓ Sable de Baghlia

Il s'agit d'un sable grossier roulé de forme arrondie et de classe granulaire (0/5) mm, provenant de la wilaya de Boumerdes (**Figure II.2**). Les principales caractéristiques physiques de ce sable sont données dans le **tableau II.4** et la composition chimique dans le **tableau II.5**.

**Figure II. 2:**Sable de Baghlia

Tableau II. 4: Caractéristique physiques de sable de Baghlia

ρ_{Abs} (kg/m^3)	ρ_{app} (kg/m^3)	ESv (%)	ESp (%)	Module de finesse
2650	1610	84	82	3,26

Tableau II. 5: Caractéristique chimique de sable de Baghlia (%) [7]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Perte au feu
47,57	6,80	5,60	20,70	1,40	0,04	0,80	0,45	0,001	16,64

✓ **Sable de Bougezoul**

Il s'agit d'un sable fin de classe granulaire (0/3) mm, provenant de la wilaya de Médéa (**Figure II.3**). Les caractéristiques physiques de ce sable sont présentées dans le **tableau II.6** et sa composition chimique dans le **tableau II.7**.



Figure II. 3: sable de Bougezoul

Tableau II. 6: Caractéristiques physiques de sable de Bougezoul

ρ_{Abs} (kg/m^3)	ρ_{app} (kg/m^3)	ESv (%)	ESp (%)	Module de finesse
2528	1552	75	70	1,69

Tableau II. 7: Composition chimique de sable de Boughezoul (%) [7]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Perte au feu
96,06	1,82	0,42	1,63	0,33	0,01	0,34	0,05	0	0

NB : Les deux sables ont été mélangés dans l’objectif d’obtenir un mélange (**Figure II.4**) ayant un module de finesse (MF = 2,25), en présentant leurs caractéristiques dans le **tableau II.8**.

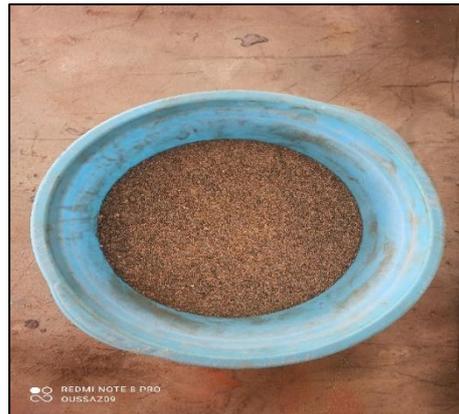


Figure II. 4: Sable corrigé

- MF1 = 3,2 Module de finesse du sable grossier de Baghlia.
- MF2 = 1,7 Module de finesse du sable fin de Boughezoul.
- MF = 2,3 Le module de finesse souhaité.

On applique la règle d’Abrams pour la correction des finesesses, on obtient ce qui suit :

$$G_1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} = 35\% \dots\dots\dots Eq (1)$$

$$G_2 = \frac{MF_1 - MF}{MF_1 - MF_2} = 65\% \dots\dots\dots Eq (2)$$

G1 : Pourcentage du sable grossier de Baghlia : 35%

G2 : Pourcentage du sable fin de Boufgezoul : 65 %

Le **tableau II.8** ainsi que la **figure II.5** donnent respectivement les propriétés physiques et l'analyse granulométrique de sable corrigé.

Tableau II. 8: Caractéristiques physiques de sable corrigé

ρ_{Abs} (kg/m^3)	ρ_{app} (kg/m^3)	Coeff abs (%)	Module de Finesse
2500	1597	1,5	2,3

La **figure II.5** représente la courbe granulométrique des deux sables (Baghlia, Boughezoul) et celle du sable corrigé.

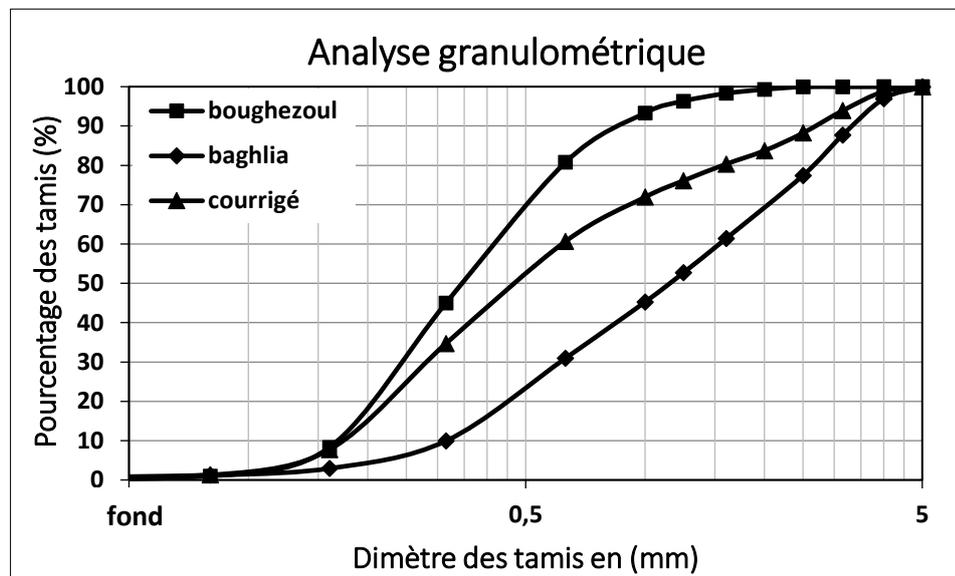


Figure II. 5: Courbe granulométrique

II.2.2.2 Sable recyclé de déchet de brique

Les déchets de brique utilisée pour les recycler en sable proviennent d'une usine de fabrication locale de Sidi Rached (Wilaya de Tipaza).

Les déchets de brique ont fait l'objet d'un concassage pour les transformer en sable (**Figure II.6**). Les caractéristiques physiques de la brique utilisée sont présentées dans le **tableau II.9** ainsi que leurs compositions chimiques dans le **tableau II.10**.



Figure II. 6: Sable de déchet de brique après concassage

Tableau II. 9: Caractéristiques physiques de déchets de brique

ρ_{Abs} (kg/m^3)	ρ_{app} (kg/m^3)	Coeff abs (%)	Module de Finesse
2400	1160	1,76	3,70

Tableau II. 10: Compositions chimiques de déchets de brique[7]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Perte au feu
58,85	14 ,5	6,69	9,24	3,9	0,11	2,43	0,6	0,014	3,69

Afin d'obtenir le sable de brique, les déchets de brique récupérés ont été concassés en deux étapes. La première consiste à faire passer la brique préalablement concassé et réduite en granulats de 3 à 4 cm de diamètre maximum à l'aide d'un marteau dans un concasseur à mâchoires. Le sable de déchets de brique a été obtenu par un concassage léger, ensuite passé dans le tamis de 5 mm afin d'obtenir un sable de classe 0/5 mm. La **figure II.7** présente les deux courbes de l'analyse granulométrique de déchet de brique et de sable corrigé.

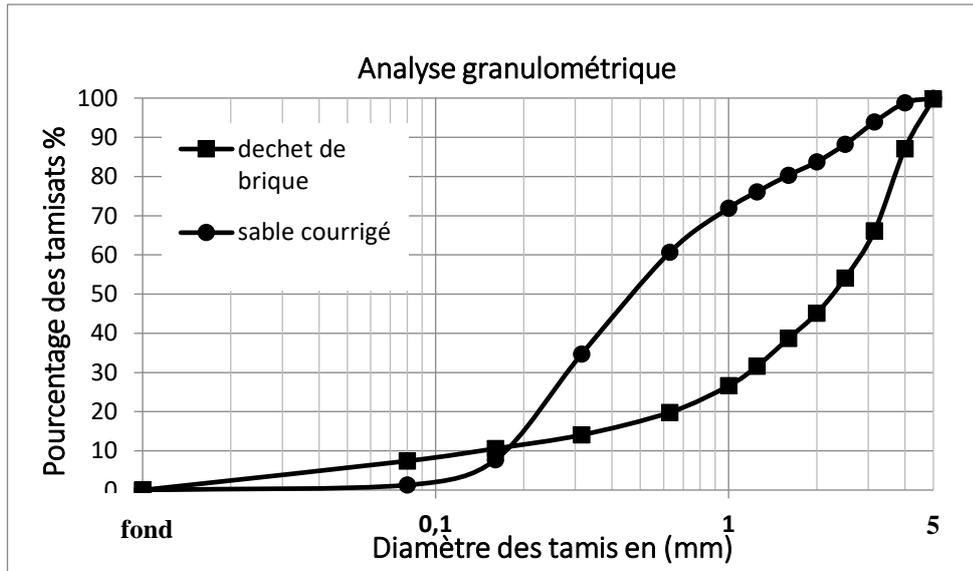


Figure II. 7: Courbes granulométriques du sable courrigé et des déchets de brique

II.2.3 L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour le malaxage du mortier est l'eau robinet.

II.2.4 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est le **MEDAFLOW 30**. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de poly-carboxylates d'Ether qui améliorent considérablement la qualité et les propriétés a l'état frais des mortier et bétons. Ses caractéristiques sont représentées dans le **tableau II.11**

Tableau II. 11: Les caractéristiques de Superplastifiant MEDAFLOW 30

Aspect	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlorures	Extrait sec	Dosage
Liquide	Brun clair	6-6,5	1,07 ±0,01	< 0,1 g/l	30%	0,5 à 2%

II.3 Les essais réalisés

II.3.1 Formulation de mortier autoplaçant

Nous nous sommes basés sur la méthode d'Okamura qui a pour but de déterminer la quantité optimale pour chaque constituant. Pour obtenir un MAP ayant les propriétés désirées avec une substitution de 0%, 10%, 20% et 30 % du sable naturel par le sable recyclé de déchets de brique. Les paramètres les plus importants qui ont été pris en considération dans cette formulation dont le rapport Eau/ liant (E/L), qui est fixé à 0,38 et le rapport sable / mortier (S/M) qu'est fixé à 0,5.

Nous avons optimisé le dosage en superplastifiant par des essais d'ouvrabilité à l'état frais en faisant varier le pourcentage dans le but d'obtenir un mortier autoplaçant avec un étalement au mini cône compris entre 270 mm et 330 mm et un temps d'écoulement en V-funnel compris entre 2 et 10 secondes.

Nous avons calculé les quantités des constituants de MAP en utilisant une feuille de calcul Excel figurée dans l'**annexe**. Le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur électrique à mortier (**Figure II.8**). La séquence de malaxage est donnée dans le **tableau II.12**.



Figure II. 8: Malaxeur à mortier

Tableau II. 12: Séquence de malaxage

Les étapes	Sable + ciment + déchet de brique	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.3.2 Essais à l'état frais sur le mortier autoplaçant

II.3.2.1 Etalement au mini cône

Cet essai permet de déterminer la capacité de l'écoulement de MAP dans un milieu non confiné en remplissant le mini cône posé sur une plaque métallique en acier lisse. Une fois le cône est soulevé le diamètre de l'étalement est mesuré suivant deux directions perpendiculaire afin de retenir la moyenne (**Figure II.9**). Les dimensions du mini cône sont données dans la **figure II.10**.



Figure II. 9: Etalement au mini cône.

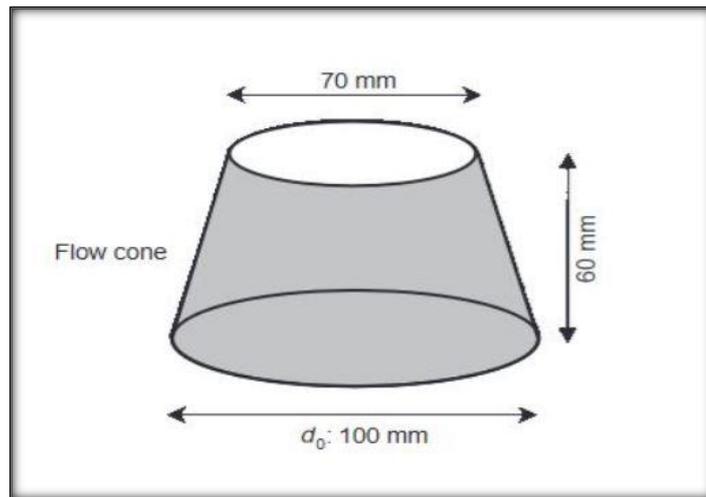


Figure II. 10: Dimensionnement de mini cône[24]

II.3.2.2 Temps d'écoulement (V-Funnel)

Cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du mortier dans l'entonnoir entre l'instant de l'ouverture de l'orifice et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. La **Figure II.11** représente le dispositif de l'essai à l'entonnoir en V.

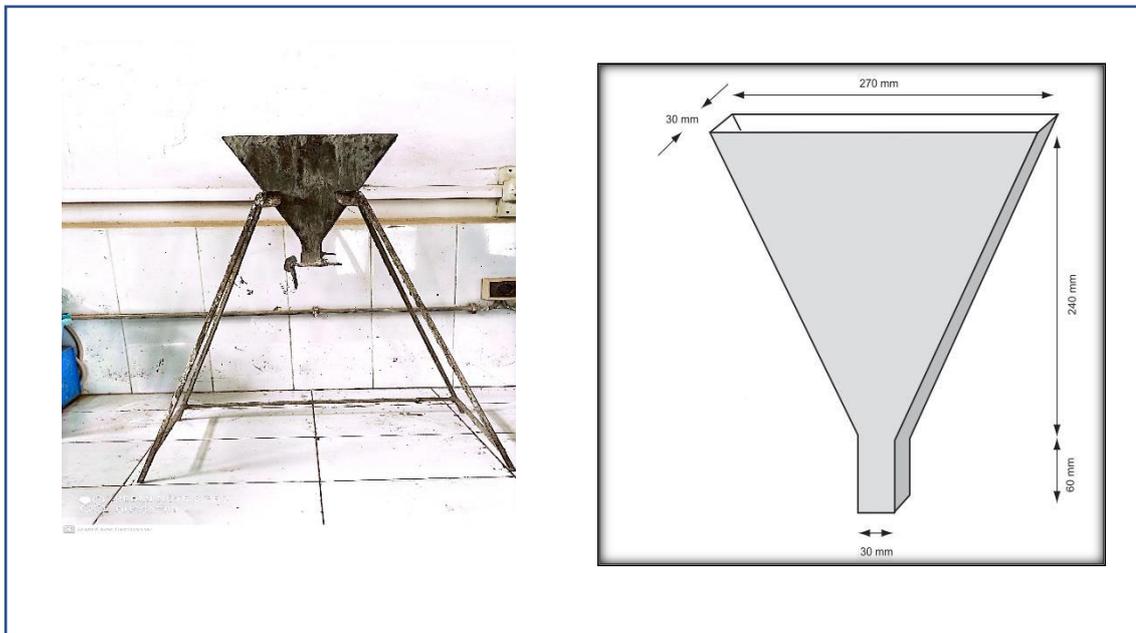


Figure II. 11: Dimensionnement de l'entonnoir en V[24]

II.3.3 Moulage et conservation des éprouvettes

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes de mortiers sont de forme prismatique de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ pour tous les essais à l'état durci comme indiqué dans la **figure II.12**.



Figure II. 12: Moules prismatiques pour mortier

Les moules métalliques sont pré-huilés, ensuite le MAP est introduit sans vibrations en deux couches pour garantir l'homogénéité des spécimens. Le surplus de mortier est enlevé par arasage à l'aide d'une règle. La surface des échantillons est lissée et recouverte par un film plastique durant 24 heures. Après le démoulage les éprouvettes sont placées dans un bac d'eau saturé en chaux avec une température de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ afin d'assurer une cure normalisée (**Figure II.13**).



Figure II. 13: Conservation des éprouvettes.

II.3.4 Essais à l'état durci sur le MAP

Les essais mécaniques sont réalisés sur des échantillons prismatique de 4x4x16 cm³. Ces éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'échéance de l'eau. Les essais sont effectués à 7 et 28 jours d'âge en prenant la moyenne des résultats des échantillons pour chaque essai.

II.3.4.1 Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion (**R_f**) est mesurée sur les éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ (**Figure II.14**). Cet essai est réalisé conformément à la norme **NF EN 196-1 [57]**.

Les résultats obtenus correspondent à la moyenne des valeurs de trois éprouvettes. La contrainte de flexion est calculée suivant la formule ci-dessous :

$$R_f = \frac{1,5PL}{b^3} \dots\dots\dots \text{Eq (3)}$$

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

L : la distance entre appuis (100mm).

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



Figure II. 14: Essai de résistance à la traction par flexion

II.3.4.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers est effectuée sur les demi-prismes issus de la rupture en flexion des trois éprouvettes de 4x4x16 cm³. Les demi-prismes sont centrés entre les deux surfaces du dispositif et soumis à un essai de compression sur les côtés de la pièce moulée, comme le montre la **figure II.15**. Les essais sont réalisés conformément à la norme **NF EN 196-1** [57]. La contrainte de la rupture est calculée suivant la formule ci-dessous :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \dots\dots\dots \text{Eq (4)}$$

F_c : la force appliquée sur le demi-prisme.

b : la largeur de l'éprouvette.



Figure II. 15: Essai de résistance à la compression

II.3.5 Essais sur les indicateurs de durabilité

II.3.5.1 Absorption capillaire

Cet essai est l'un des indicateurs les plus importants qui caractérisent la durabilité des mortiers et bétons. Il permet de mesurer le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire sur des échantillons en béton et mortier non saturés qui se mettent en contact avec l'eau sans

aucun gradient de pression (**Figure II.16**). Les éprouvettes de (4x4x16cm³) sont préconditionnées selon la procédure de la norme **ASTM C1585-11 [58]**.

Les éprouvettes sont immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur de 5mm à l'aide des cales (**Figure II.17**). A chaque échéance les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées puis remise en contact avec d'eau. Les échéances sont les suivantes : 1min, 5min ,10min 20min, 30min, 1h, 2h, 3h,4h ,5h ,6h, 1jour ,2 jours, 3jours, 4jours, 5jours, 6jours ,7jours ,8jours.

Les résultats obtenus à chaque échéance sur deux éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés sous la forme de la moyenne des valeurs mesurées.

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé par la formule suivante selon la Norme **ASTM C1585- 11 [58]**.

$$I = \frac{mt}{a \times d} \dots\dots\dots \text{Eq (5)}$$

I : coefficient d'absorption capillaire exprimé en (mm).

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

d : la masse volumique de l'eau exprimée en (g/mm³).

a : section de l'éprouvette en (mm²).

- Le coefficient de sportivité est déterminé comme suit :

$$S = \frac{Q/A}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots \text{Eq (6)}$$

A : surface du spécimen en contact avec l'eau en cm².

Q : le volume d'eau absorbé en cm³.

t : temps écoulé en (s).

S : coefficient de sportivité du spécimen en cm/ \sqrt{s} .

On trace Q/A en fonction de \sqrt{t} , puis on trace la régression linéaire entre Q/A et \sqrt{t} , puis on calcule les deux pentes des deux lignes droites qui donnent le coefficient de sportivité (s)

des grands pores et des petits pores.

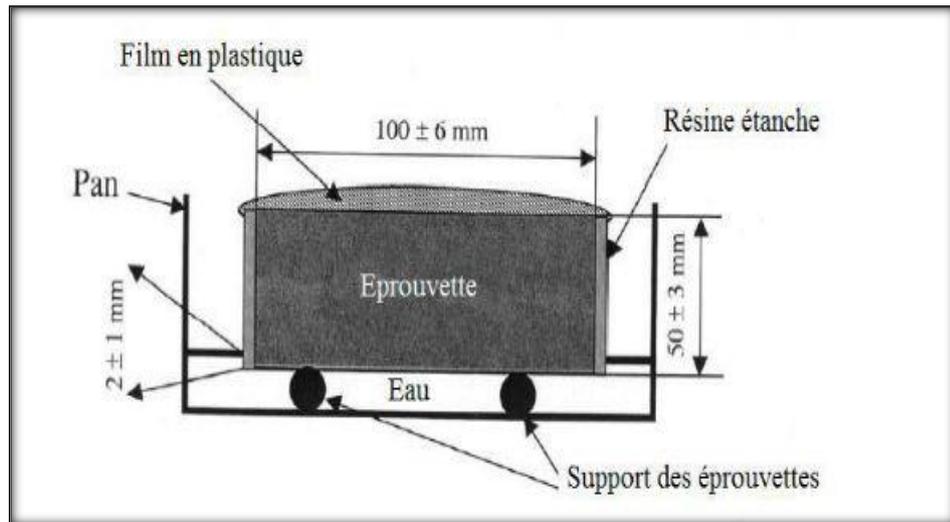


Figure II. 16: Dispositif de l'essai d'absorption capillaire[58]

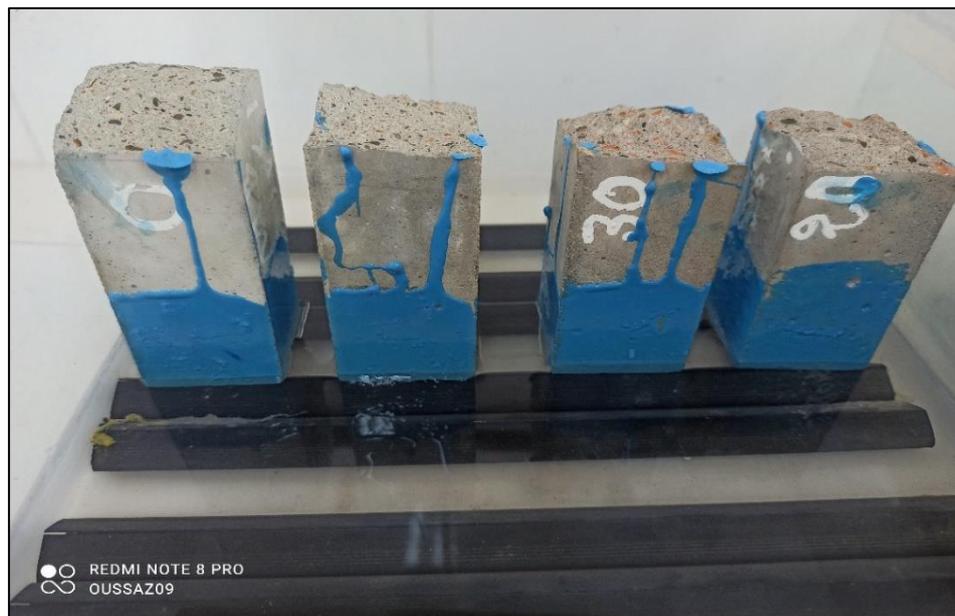


Figure II. 17: Absorption capillaire

II.3.5.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est réalisée conformément à la norme **NF P-18-459** [59]. Cet essai correspond par définition au pourcentage de volume vide (V_v) par rapport au volume total (V_t). Il s'agit de la détermination de la porosité ouverte ainsi que la masse apparente d'un échantillon du mortier après immersion dans l'eau par une saturation sous vide.

L'essai consiste à faire sécher les éprouvettes à une température de 80 ± 2 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Nous déterminons la masse sèche de l'échantillon (**Msec**) à l'aide d'une balance de précision de 0.1g, ensuite nous mettons les éprouvettes dans une enceinte fermée, et nous faisons en marche la pompe à vide sous une pression constante. Après 3h nous introduisons l'eau dégazée progressivement jusqu'à couverture les éprouvettes d'environ 2 cm. Après 4 heures nous arrêtons la pompe à vide en maintenant les éprouvettes en saturation durant $18h \pm 2h$ (**Figure II.18**). Ensuite nous sortons les éprouvettes du dessiccateur et nous effectuons une pesée dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique (**Meau**). On passe une éponge sur les éprouvettes, pour absorber l'eau sur les faces des éprouvettes et on pèse à nouveau dans l'air pour déterminer (**Mair**). (**Figure II.20**)

- La porosité accessible à l'eau ξ (%) est calculée par la relation suivante :

$$\xi = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \dots\dots\dots Eq (7)$$

Avec :

ξ : Porosité accessible à l'eau en (%).

Meau : la masse du spécimen immergé dans l'eau.

Mair : la masse du spécimen pesé dans l'air.

Msec : la masse du spécimen sec.

- La masse volumique apparente est définie par l'expression suivante :

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times \rho_{eau} \dots\dots\dots Eq (8)$$

Avec :

ρ : la masse volumique apparente en (g/cm³).

ρ_{eau} : la masse volumique de l'eau (1g/cm³).



Figure II. 18: appareillage de l’essai de porosité accessible à l’eau

II.4 Organigrammes des essais :

Dans ce qui suit, les organigrammes résumant l’ensemble des essais expérimentaux sont donnés.

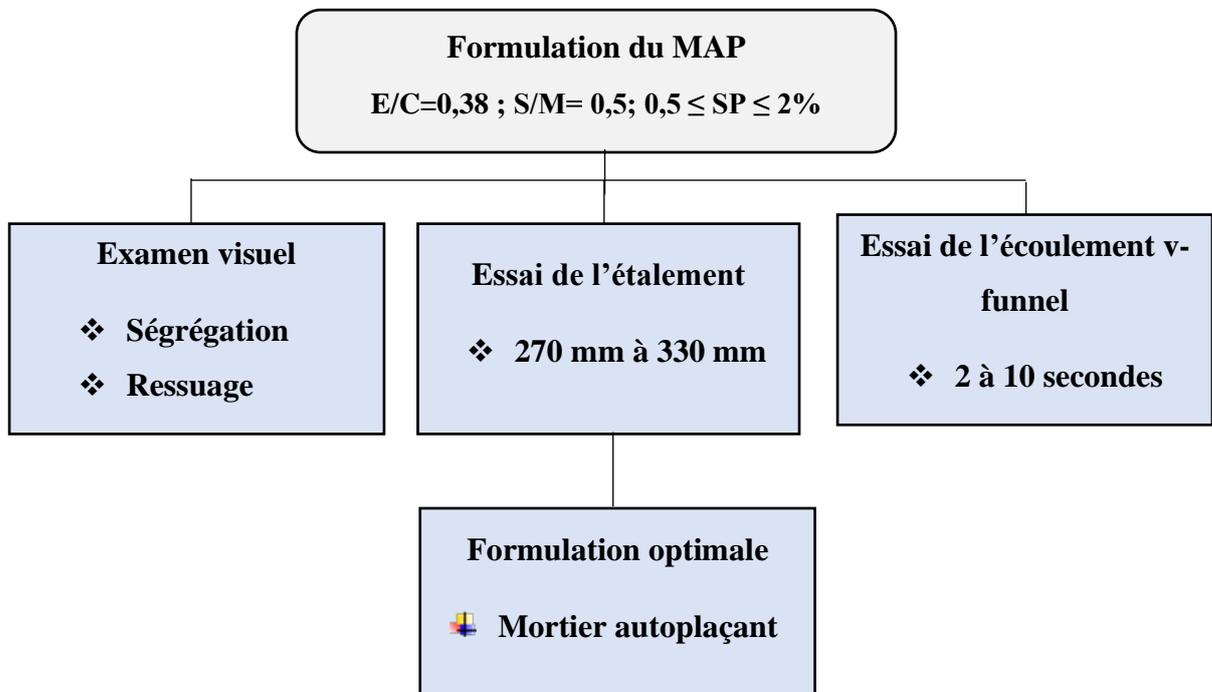


Figure II. 19: procédé de formulation des MAP

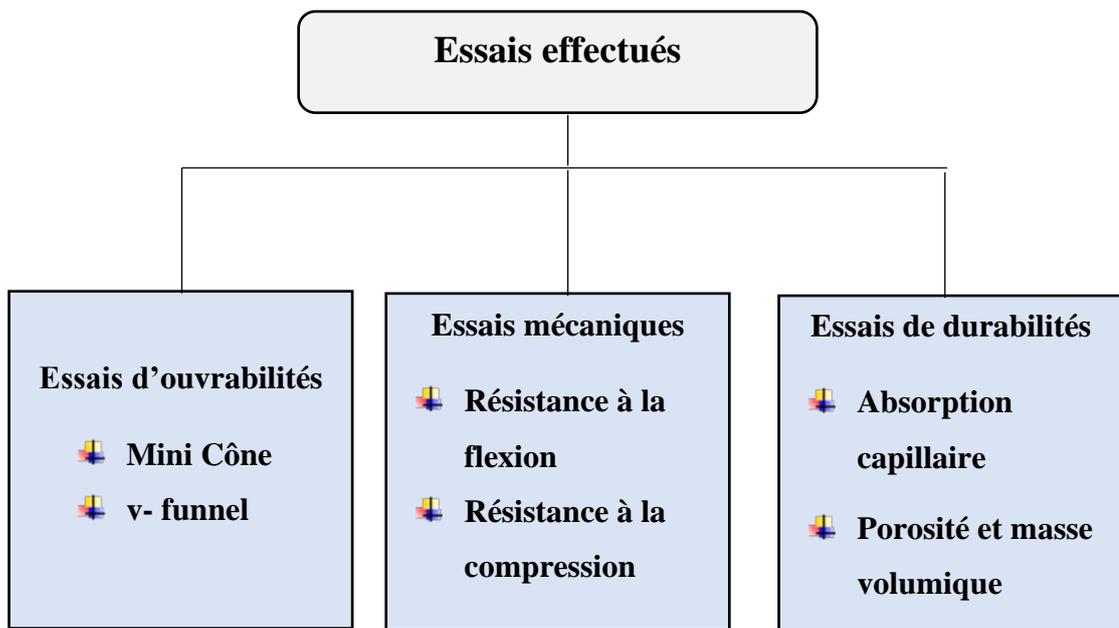


Figure II. 20: Les essais réalisés à 7 et 28 jours de cure humide

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Introduction

Ce chapitre, présente les différents résultats des essais effectués concernant l'influence du sable de déchet de brique sur le comportement des MAP.

III.2 Optimisation du dosage en superplastifiant

Les superplastifiants (SP) améliorent les propriétés rhéologiques du mortier. L'optimisation de dosage est effectuée en évaluant la fluidité et la stabilité du mortier de référence tout en comparant les différents dosages.

III.2.1 Influence de superplastifiant sur l'étalement au mini cône

La sensibilité du MAP au superplastifiant et la température ambiante a conduit à répéter les essais plusieurs fois avant de valider le dosage optimal. Les résultats de l'essai d'étalement au mini cône sur mortier sont présentés dans le **tableau III.1** et la **figure III.1**.

Tableau III. 1: Valeurs d'étalement au mini cône en fonction du dosage en SP

Dosage en SP (%)	1,05	1,10	1,15
Etalement (mm)	312.5	332	334.6

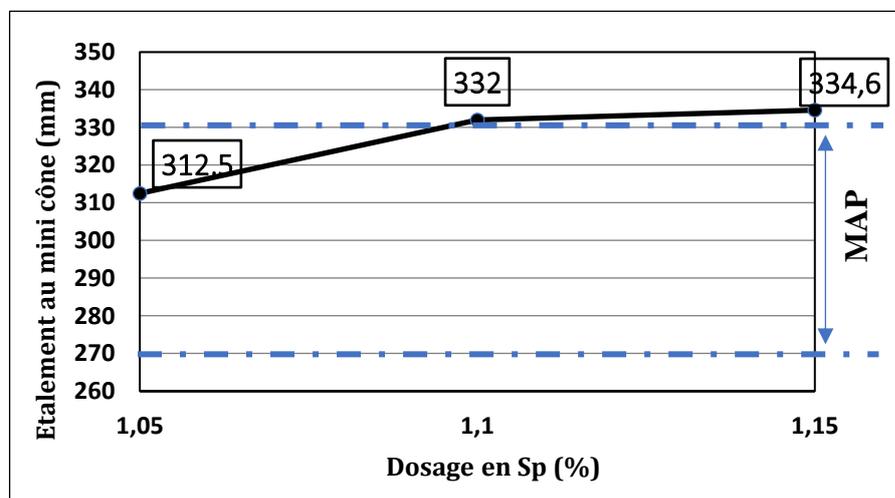


Figure III. 1: Etalement au mini cône en fonction du dosage en SP

L'augmentation du dosage en SP conduit à une augmentation de l'étalement du mortier de référence.

Ces résultats ont montré que le dosage de 1,05% donne un MAP avec un étalement compris entre 270 et 330 mm.

III.2.2 Effet du superplastifiant sur l'écoulement en V-Funnel

Ce dispositif permet le remplissage de l'entonnoir de 1 litre de mortier et mesurer le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir : Plus la fluidité du mortier est importante et plus le temps d'écoulement est réduit. Les résultats dus à l'effet de dosage en superplastifiant sur le temps d'écoulement des mortiers de référence sont présentés dans le **Tableau III.2** et la **Figure III.2**

Tableau III. 2: Valeurs d'étalement au mini cône en fonction du dosage en SP

Dosage en SP (%)	1,05	1,10	1,15
Temps d'écoulement (s)	3,93	2,28	1,98

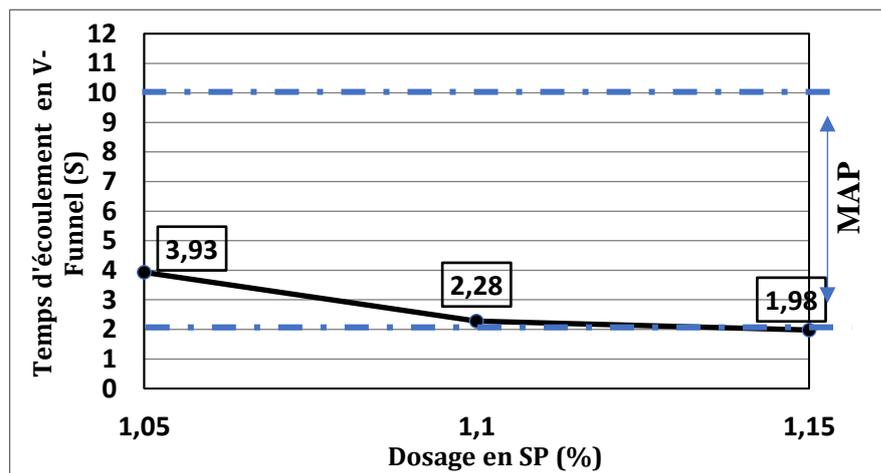


Figure III. 2: Temps d'écoulement en V-Funnel en fonction du dosage en SP

On remarque que le temps d'écoulement en V-Funnel diminue en fonction de l'augmentation du dosage en SP. Ces résultats indiquent que la valeur donnée pour les dosages 1,05 % et 1,15% respectent la limite d'un MAP. En combinant les résultats de l'essai au mini cône et l'essai de temps d'écoulement en V-Funnel. En conclusion, il est possible d'obtenir un MAP seulement avec le dosage de 1,05 %.

III.3 Influence du sable de déchet de brique a l'état frais

Après avoir déterminé le dosage optimal en SP pour le MAP, on passe à l'étude de l'influence de sable de déchets de brique sur l'ouvrabilité. La formulation adoptée est

caractérisée par les paramètres suivants : $S/M=0,5$, $E/L=0,38$ et $Le\ SP=1,05\%$. Cinq compositions ont été élaborées en substituant une partie de sable par le même taux de sable de déchets de brique (DB) à savoir : 0% (B0), 10% (B10), 20% (B20), 30% (B30), 40% (B40). La composition des différents MAP est regroupée dans le **Tableau III.3**.

Tableau III. 3: Composition des différents MAP par un Volume de 1,5 litre

Constituants	MB0	MB10	MB20	MB30	MB40
Ciment (g)	1087	1087	1087	1087	1087
DB (g)	0	177,31	354,62	531,93	709,24
Sable (g)	1847	1669,69	1492,38	1315,07	1137,76
Eau (g)	404	404	404	404	404
SP (g)	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41

III.3.1 Influence de sable de déchet de brique sur l'étalement au mini cône

Le **Tableau III.4** regroupe les résultats obtenus de l'essai d'étalement au mini cône. La **Figure III.3** représente la variation de l'étalement des différents MAP en fonction de taux de remplacement de sable naturel par le sable de déchet de brique.

Tableau III. 4: Valeur de l'étalement au mini cône des différents MAP

Mortier	MB 0	MB 10	MB 20	MB 30	MB 40
Etalement (mm)	312,5	307,5	290,8	287,5	263,5

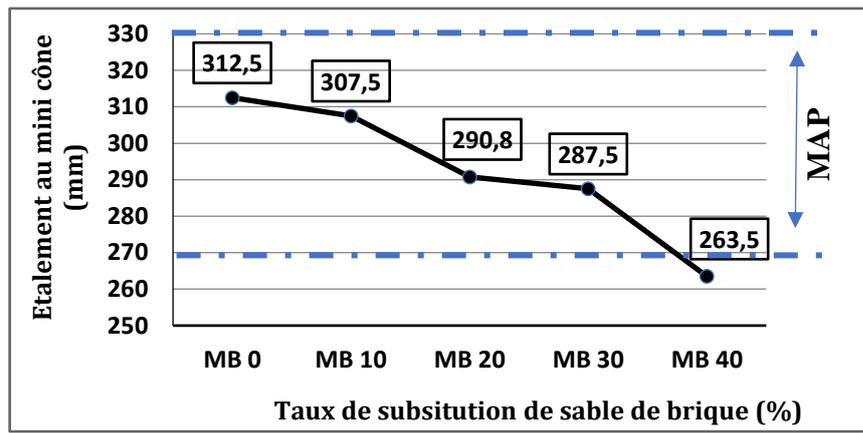


Figure III. 3: Étalement au mini cône en fonction du taux de substitution du sable de brique

On observe que les diamètres d'étalement des mortiers diminuent parallèlement avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de brique. Les mortiers MB0, MB10, MB20 et MB30 sont dans l'intervalle des MAP avec un l'étalement de 270 à 330 mm. Par contre, le "MB40" a donné un étalement inférieur à la limite de 270 mm.

III.3.2 Influence de sable de déchet de brique sur le temps d'écoulement

Le Tableau III.5 et la Figure III.4 représentent les résultats de la variation du temps d'écoulement en V-Funnel en fonction de pourcentage de remplacement du sable naturel par le sable de déchet de brique.

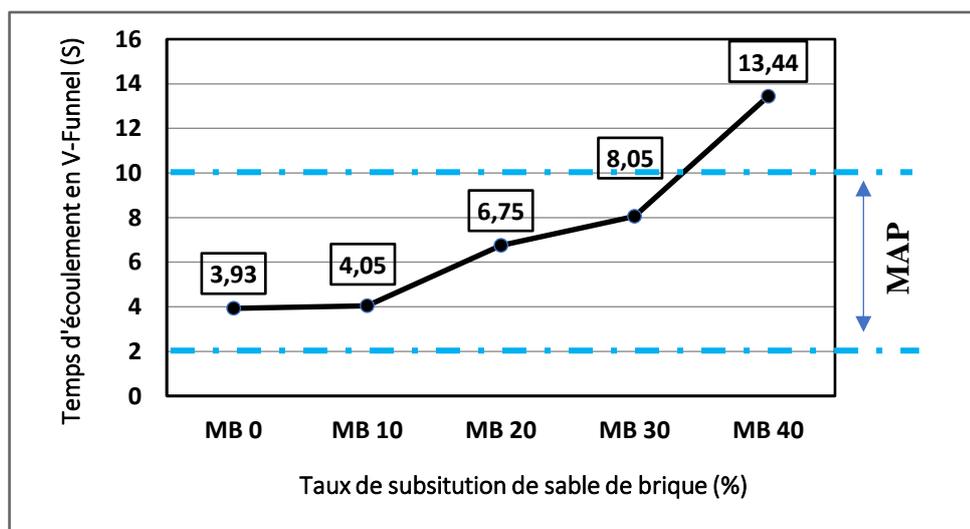


Figure III. 4 : Temps d'écoulement en fonction du taux de substitution du sable de brique

Tableau III. 5: Valeur de l'écoulement en V-Funnel des différents MAP

Mortier	MB 0	MB 10	MB 20	MB 30	MB 40
Temps d'écoulement (S)	3,9	4,0	6,7	8,0	13,4

Ces résultats montrent que le temps d'écoulement augmente parallèlement à l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de brique. Le temps d'écoulement du MB0 jusqu'à MB30 reste toujours inférieur à la limite supérieure d'un MAP (10 secondes), et le temps d'écoulement pour le MB40 dépasse cette limite de plus de 2 secondes. On conclut que les mortiers MB0, MB10, MB20 et MB30 sont des MAP, par contre avec 40% de substitution de sable naturel par le sable de déchets de brique, on obtient un mélange ferme avec un temps d'écoulement élevé, dépassant l'intervalle d'un MAP. La diminution de l'ouvrabilité des mélanges à base de brique est due à l'absorption d'eau de la brique en raison de sa porosité élevée. La même tendance a été observée par de nombreux chercheurs. [46-47] Le **Tableau III.6** regroupe tous les résultats obtenus concernant les essais de formulation des différents mélanges.

Tableau III. 6 : Regroupement des résultats obtenus par l'essai d'étalement et d'écoulement

Mortier	MB 0	MB 10	MB 20	MB 30	MB 40	Limite inférieure	Limite Supérieure
Etalement (mm)	312,5	307,5	290,8	287,5	263,5	270	330
Temps d'écoulement (S)	3,9	4,0	6,7	8,0	13,4	2	10
Remarque	MAP	MAP	MAP	MAP	Ce n'est plus un MAP		

III.4 Influence de sable de déchet de brique à l'état durci

III.4.1 Résistance à la compression

Le **Tableau III.7** et la **Figure III.5** représentent les résultats obtenus concernant la résistance à la compression pour les différents mortiers à base de sable de déchet de brique en fonction de taux de remplacement par le sable naturel et en fonction de leur âge.

Tableau III. 7: Résistance à la compression des MAP

Age	Résistance (MPa)			
	MB0	M10	MB20	MB30
7 jours	54,2	54,3	53,1	52,1
28 jours	65,95	63,85	66,9	64,2

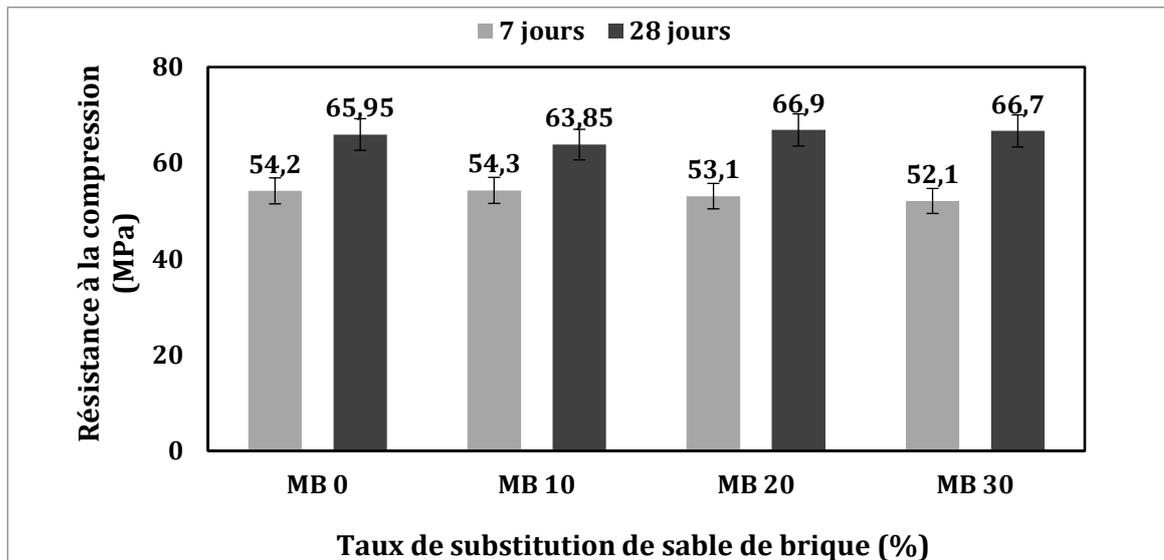


Figure III. 5: Evolution de la résistance à la compression à 7 et 28 jours

Après 7 jours de cure humide, les résultats montrent une légère diminution de la résistance à la compression des MAP "MB20 et MB30" par rapport au MAP de référence. Tandis qu'à 28 jours, la résistance a diminué pour le mélange de MB 10. Alors qu'une augmentation pour les mélanges de MB 20 et MB 30 par rapport au MAP de référence. Ces différents résultats sont légers et on peut dire que les résultats sont comparables par rapport au mortier de référence.

Ces résultats ont montré que le remplacement de sable naturel par le sable de déchets de brique jusqu'à 30% ne provoque pas une perte importante de résistance au jeune âge et à 28 jours d'hydratation. Les résultats sont comparables ou légèrement supérieurs pour les différents MAP à base de sable de DB. Cette tendance a été observée par d'autres chercheurs. [47- 48] .

Les fines de DB présentes dans le sable recyclé de brique peuvent réagir avec le ciment CEM II/B pour former plus d'hydrates effectivement l'alumine présente dans les fines de brique

réagissent avec les fillers calcaires du CEM II/B pour former les monocarboaluminats et ce qui conduit à avoir plus d'hydrates dans les mélanges à base de DB à partir de 28 jours.

III.4.2 Résistance à la flexion

Le **Tableau III.8** regroupe les résultats obtenus de la résistance à la flexion. Ainsi la **Figure III.6** présente les valeurs de la résistance à la flexion des différents MAP en fonction des taux de substitution de sable naturel par le sable de déchet de brique.

Tableau III. 8: Résistance à la flexion des MAP

Age	Résistance			
	MB0	M10	MB20	MB30
7 jours	6,21	5,3	5,77	6,29
28 jours	7,76	7,62	6,84	7,09

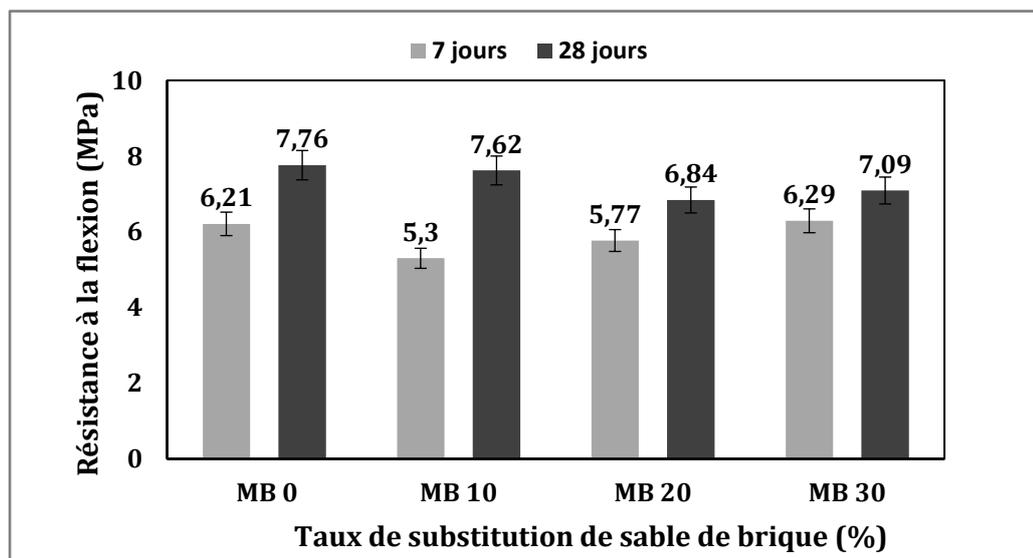


Figure III. 6 : L'évolution de la résistance à la flexion à 7 et 28 jours

Ces résultats montrent que la résistance à la flexion après 7 jours de cure humide diminue légèrement pour l'ensemble des MAP à base de sable de déchet de brique par rapport au MAP de référence, à l'exception pour le mélange de MB 30 qui donne une légère augmentation de la résistance à la flexion par rapport au MAP de référence. À 28 jours de cure humide, la résistance diminue légèrement en fonction de taux de substitution pour tous les mélanges des MAP à base de DB. Ces résultats restent comparables pour l'ensemble des

mélanges et dans notre cas les déchets de brique ne semblent pas à améliorer l'adhésion de la pâte liante et les granulats [44].

III.5 Influence de sable de déchet de brique sur la durabilité

III.5.1 Absorption capillaire

Le **Tableau III.9** et la **Figure III.7** représentent les résultats des différents MAP après 7 jours de cure.

Tableau III. 9: Les valeurs moyennes d'absorption d'eau des différents MAP après 7 jours de cure humide

\sqrt{t}	Temps (S)	Abs (mm)	MB0	MB10	MB20	MB30
7,74	60	I (1mins)	0,15	0,11	0,13	0,31
17,32	300	I (5mins)	0,26	0,21	0,24	0,37
24,49	600	I (10mins)	0,34	0,29	0,32	0,44
34,64	1200	I (20mins)	0,48	0,41	0,44	0,51
42,42	1800	I (30mins)	0,59	0,52	0,54	0,59
60	3600	I (1h)	0,79	0,73	0,73	0,72
84,85	7200	I (2h)	1,12	1,01	1	0,91
103,92	10800	I (3h)	1,33	1,22	1,17	1,05
120	14400	I (4h)	1,49	1,38	1,3	1,16
134,16	18000	I (5h)	1,64	1,53	1,39	1,24
146,96	21600	I (6h)	1,76	1,64	1,48	1,31
293,93	86400	I (1j)	2,72	2,78	2,16	1,93
415,69	172800	I (2j)	3,15	3,39	2,59	2,36
509,11	259200	I (3j)	3,39	3,74	2,84	2,58
657,26	432000	I (5j)	3,83	4,26	3,24	3,08
720	518400	I (6j)	3,96	4,41	3,34	3,09
777,68	604800	I (7j)	3,98	4,45	3,39	3,1
831,38	691200	I (8j)	4,08	4,55	3,48	3,19

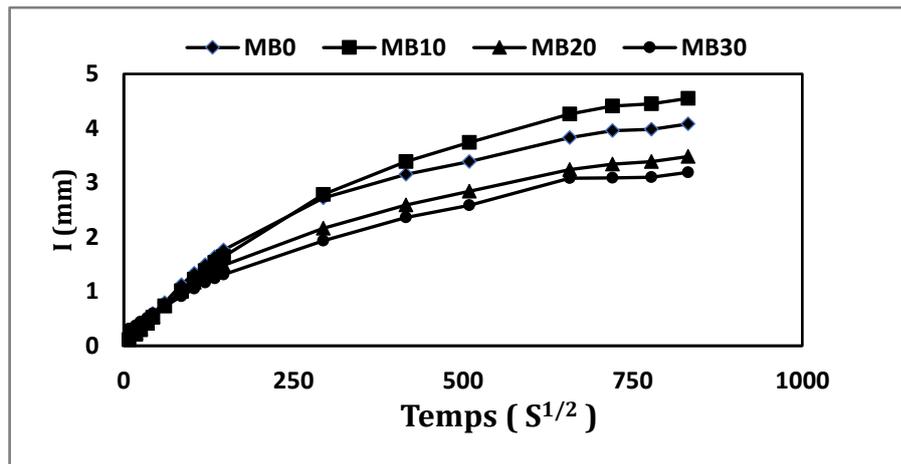


Figure III. 7: Absorption d’eau par capillarité des MAP après 7 jours de cure humide.

Ces résultats indiquent une diminution de l’absorption capillaire pour les mélanges MB20 et MB30 par rapport au MAP de référence, à l’exception du mélange MB10, qui donne la valeur la plus élevée. Les figures (III.8, III.9, III.10 et III.11) donnent les sorptivités après 7 jours d’hydratation respectivement pour le MB0, MB10, MB20 et MB30. On remarque que la sorptivité entre 0 et 6h augmente légèrement pour MB10 et MB20 et elle est comparable pour le MB30 par rapport au mortier de référence. Au-delà de 6h, on constate que la sorptivité diminue avec l’augmentation de substitutions du sable naturel par le sable de brique. Le MB30 donne une sorptivité de 0,0027 cm/s^{1/2} alors que le mortier de référence sa sorptivité est de 0,0032 cm/s^{1/2} ce qui représente une diminution d’environ 18%.

À court terme le sable recyclé de brique semble provoqué une augmentation des macropores et une diminution des micropores ce qui a conduit à une augmentation de sorptivité entre 0 et 6h et sa diminution au-delà de 6h d’absorption au jeune âge.

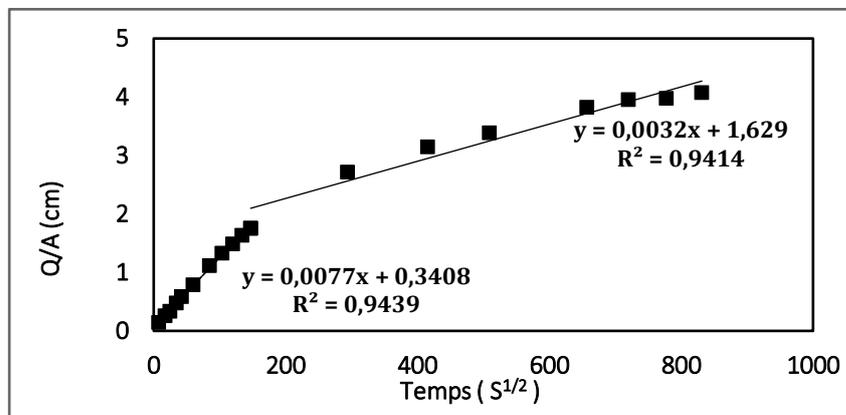


Figure III. 8: Sorptivité du MB0 après 7 jours de cure humide

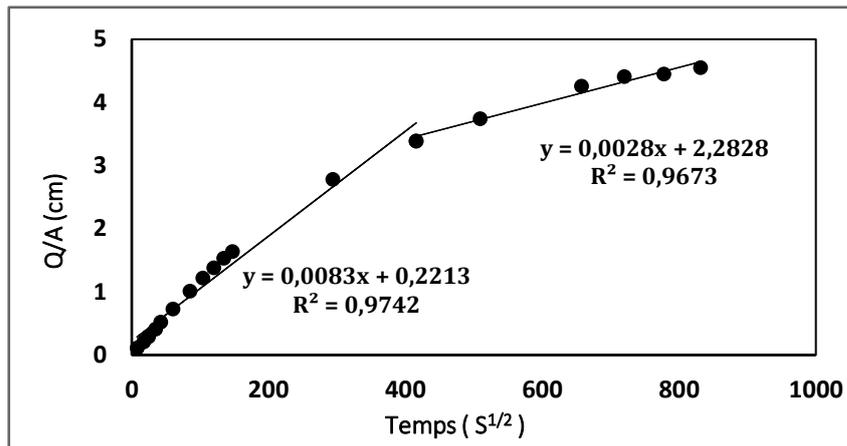


Figure III. 9: Sorptivité du MB10 après 7 jours de cure humide

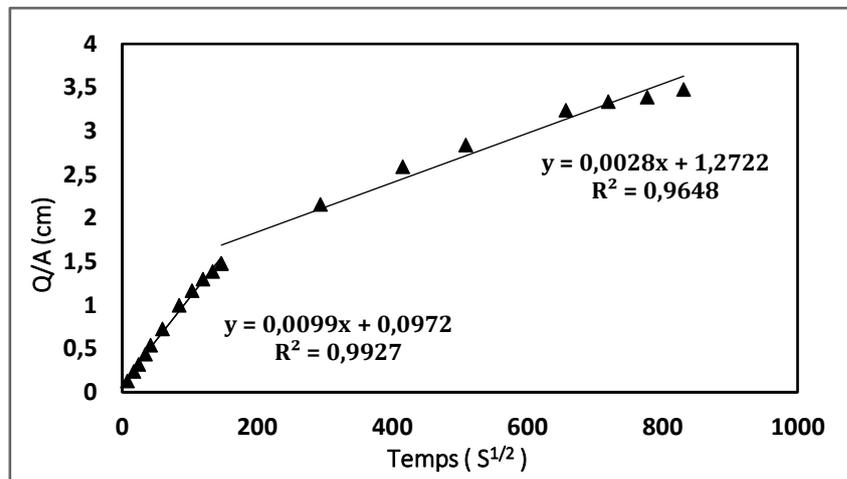


Figure III. 10: Sorptivité du MB20 après 7 jours de cure humide

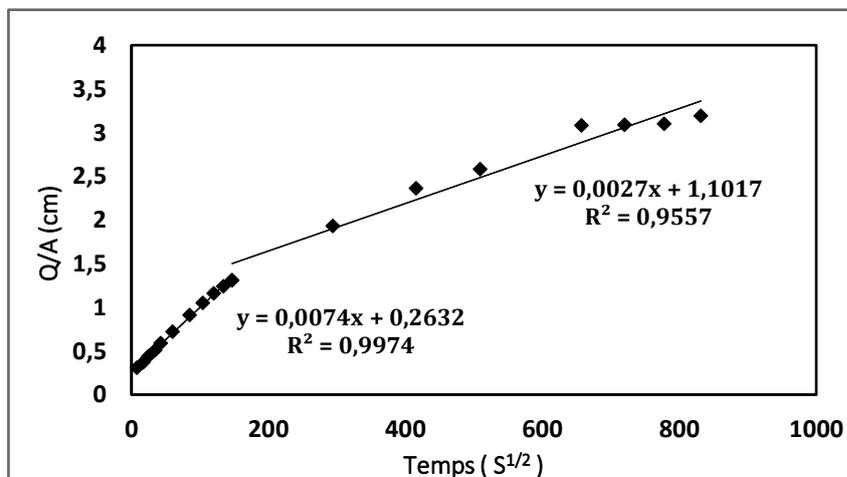


Figure III. 11: Sorptivité du MB30 après 7 jours de cure humide

Les résultats de sorptivité d’après 7 jours de cure humide des différents MAP sont présentés dans le **Tableau III.10**, et **Figure III.12**.

Tableau III. 10: Sorptivité des MAP après 7 jours de cure humide

	MB0	MB10	MB20	MB30
Sorptivité ($s^{1/2}$) $0 \leq t \leq 6h$	0,0077	0,0083	0,0099	0,0074
Sorptivité ($s^{1/2}$) $t > 6h$	0,0032	0,0028	0,0027	0,0027

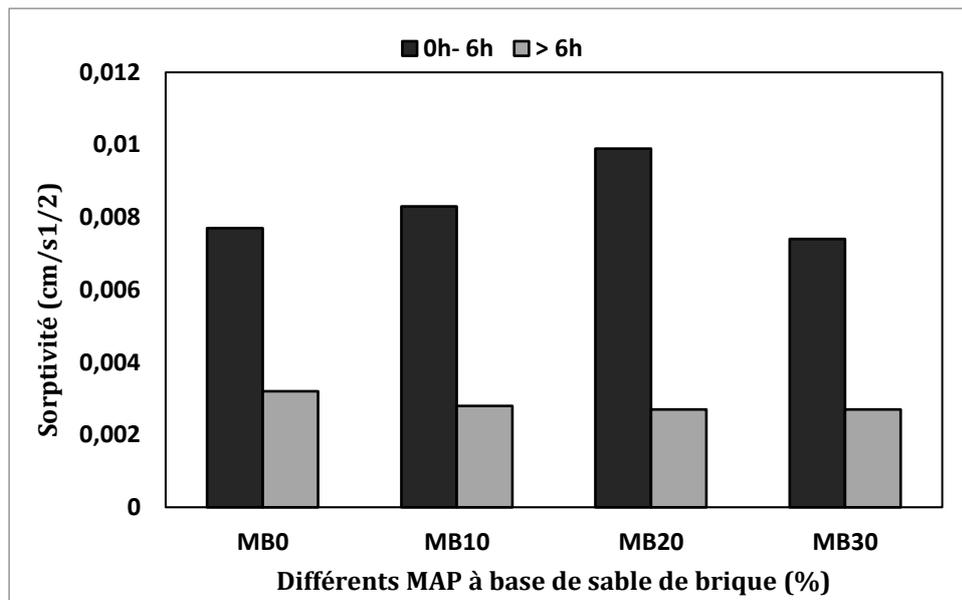


Figure III. 12: Sorptivité des différents MAP à base de déchet de brique d’après 7 jours de cure humide

Tableau III. 11: Les valeurs moyennes d’absorption d’eau des différents MAP après 28 jours de cure humide

\sqrt{t}	Temps (S)	Abs (mm)	MB0	MB10	MB20	MB30
7,74	60	I (1mins)	0,1	0,12	0,09	0,09
17,32	300	I (5mins)	0,19	0,19	0,13	0,14
24,49	600	I (10mins)	0,25	0,27	0,17	0,21
34,64	1200	I (20mins)	0,35	0,38	0,21	0,29
42,42	1800	I (30mins)	0,44	0,44	0,27	0,33

60	3600	I (1h)	0,71	0,68	0,41	0,53
84,85	7200	I (2h)	0,81	0,76	0,46	0,59
103,92	10800	I (3h)	1	0,9	0,54	0,7
120	14400	I (4h)	1,14	0,98	0,61	0,79
134,16	18000	I (5h)	1,24	1,06	0,66	0,92
146,96	21600	I (6h)	1,33	1,13	0,71	1,11
293,93	86400	I (1j)	2,25	1,72	1,11	1,51
509,11	259200	I (3j)	2,81	1,99	1,43	1,9
657,26	432000	I (5j)	2,87	2,02	1,44	1,96
720	518400	I (6j)	-	-	-	-
777,68	604800	I (7j)	2,95	2,09	1,49	2,06
831,38	691200	I (8j)	-	-	-	-

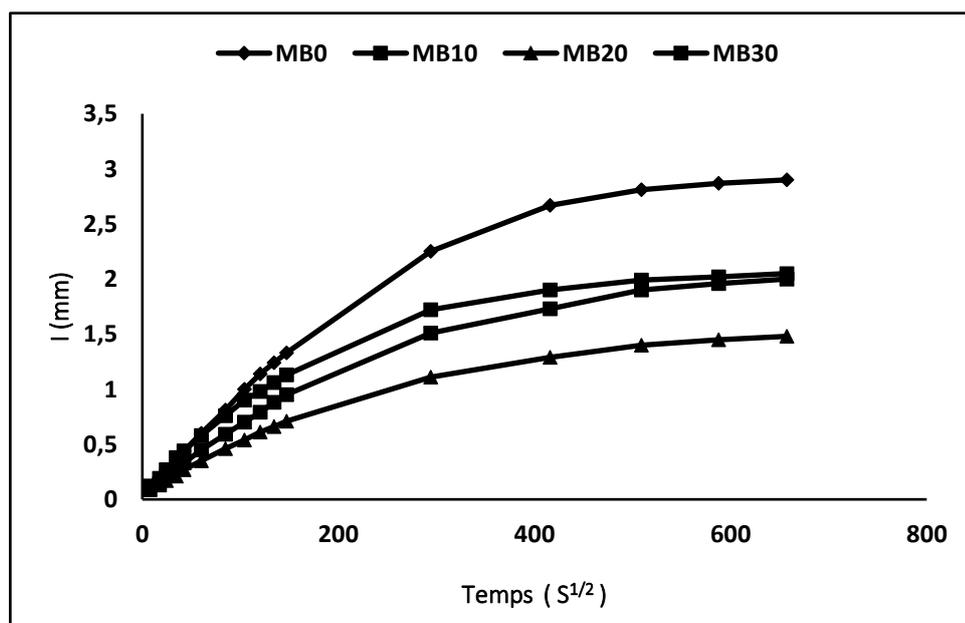


Figure III. 13: l'absorption d'eau par capillarité après 28 jours de cure humide

Ces résultats montrent que l'absorption capillaire après 28 jours de cure diminue en fonction de taux de remplacement de sable naturel par le sable de brique. On remarque que le mélange à base de sable de brique provoque une diminution de l'absorption par rapport au mélange de référence. Le MB20 a donné la valeur d'absorption la plus faible.

La sorptivité de 0 à 6h diminue pour l'ensemble des mélanges à base de sable de brique par rapport au mortier de sable naturel.

Le MB20 donne une meilleure performance avec sorptivité de $0,0031 \text{ cm/s}^{1/2}$ comparer $0,0077 \text{ cm/s}^{1/2}$ pour le mortier de référence ce qui représente une diminution de 60%.

La sorptivité au-delà de 6h diminue également pour l'ensemble des mélanges à base de sable de brique. Le MB20 et MB10 donne les meilleurs résultats avec une diminution de la sorptivité de 53%

La diminution des macropores à 28 jours contrairement à 7 jours d'hydratation est probablement due à la réaction d'hydratation qui est améliorée à long terme à travers la formation des monocarboaluminates grâce à la présence de la brique. Cela conduit à une meilleure compacité des mélanges à base de sable recycle de brique.

Les figures (III.14, III.15, III.16, III.17) représentent la variation de la sorptivité des différents MAP après 28 jours d'hydratation.

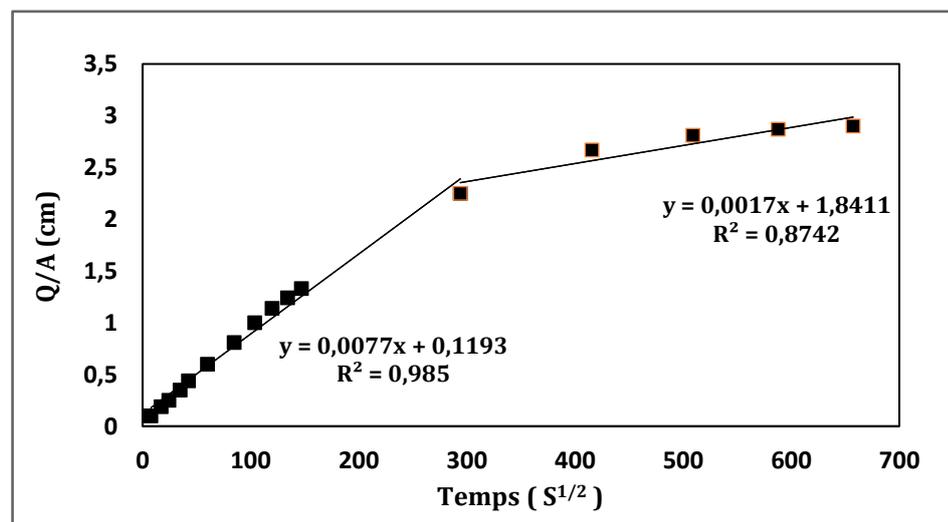


Figure III. 14: Sorptivité du MB0 après 28 jours de cure humide

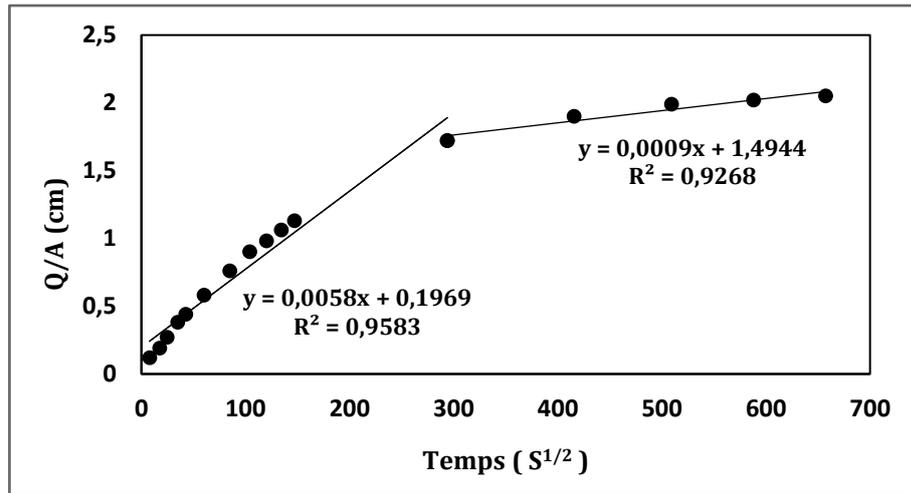


Figure III. 15: Sorptivité du MB10 après 28 jours de cure humide

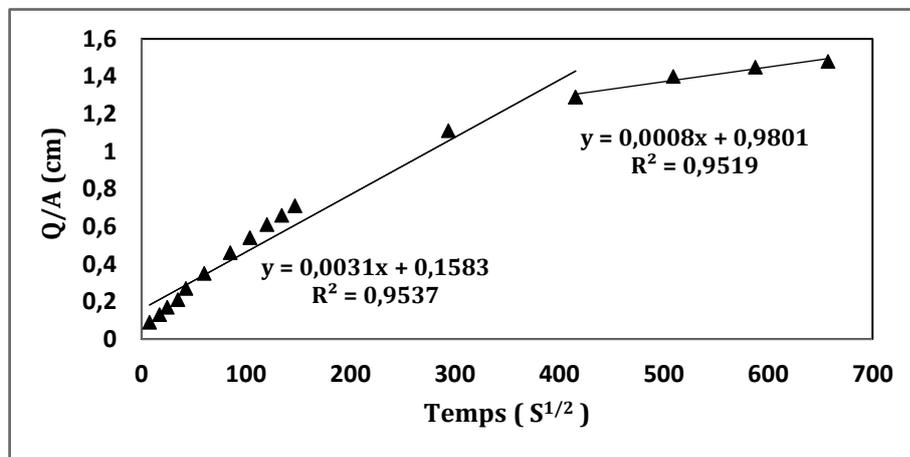


Figure III. 16: sorptivité du MB20 après 28 jours de cure humide

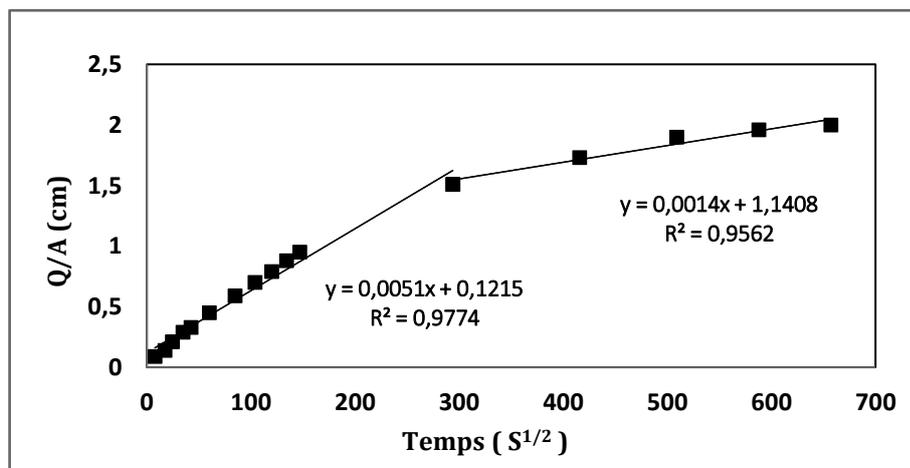


Figure III. 17: sorptivité du MB3 après 28 jours de cure humide

Les résultats de sorptivité d'après 28 jours de cure humide sont présentés dans le **Tableau III.12** et la **figure III.18**.

Tableau III. 12: Sorptivité des MAP a 28 jours

	MB0	MB10	MB20	MB30
Sorptivité ($s^{1/2}$) $0 \leq t \leq 6h$	0,0077	0,0058	0,0031	0,0051
Sorptivité ($s^{1/2}$) $t > 6h$	0,0017	0,0009	0,0008	0,0014

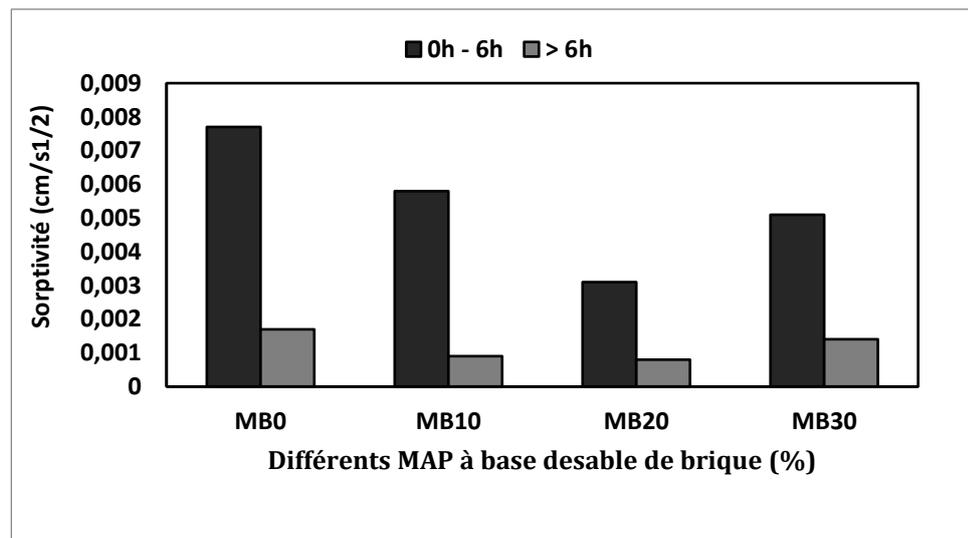


Figure III. 18: Sorptivité des différents MAP à base de déchet de brique d'après 28 jours de cure humide

III.5.2 Porosité accessible à l'eau et masse volumique

Les résultats des essais de masse volumique et de porosité accessible à l'eau après 7 et 28 jours de cure humide sont regroupés dans le **Tableau III.13** et **Figures III.19** et **III.20**

Ces résultats montrent une légère diminution de la masse volumique des MAP au jeune âge en fonction des taux de remplacement de sable naturel par le sable de déchet de brique. Les résultats sont comparables ou légèrement inférieurs par rapport au MAP de référence. Le MB30 donne le plus faible résultat avec une masse volumique de : $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$ comparé au MB0 $\rho = 2,14 \text{ g/cm}^3$.

La porosité après 7 jours de cure humide augmente dans les mélanges à base de sable de brique par rapport au mortier de référence. Le MB10 et MB30 ont une porosité de 11,8 % comparé au MB0 qui a une porosité de 11,35% à cet âge ce qui correspond à une augmentation de 4% de la porosité.

Tableau III. 13: Regroupement des résultats de masse volumique et porosité accessible à l'eau à 7 et 28 jours de cure humide

Age	Mortier	MB 0	MB 10	MB 20	MB 30
7 jours	ϕ (%)	11,35	11,85	11,76	11,80
	ρ (g/cm ³)	2,139	2,142	2,073	2,018
28 jours	ϕ (%)	3,22	5,35	4,34	3,71
	ρ (g/cm ³)	2,283	2,190	2,126	2,089

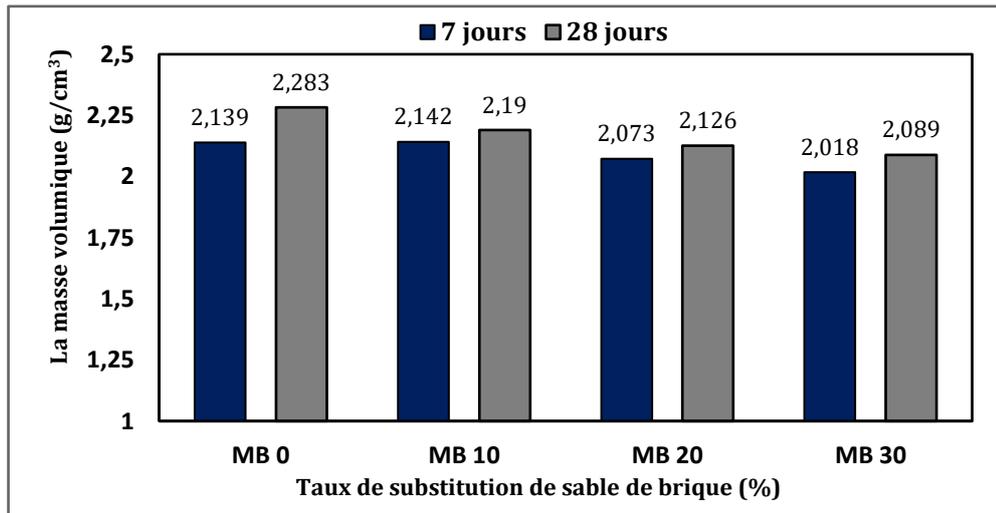


Figure III. 19: Evolution de la masse volumique des différents MAP après 7 et 28 jours de cure humide

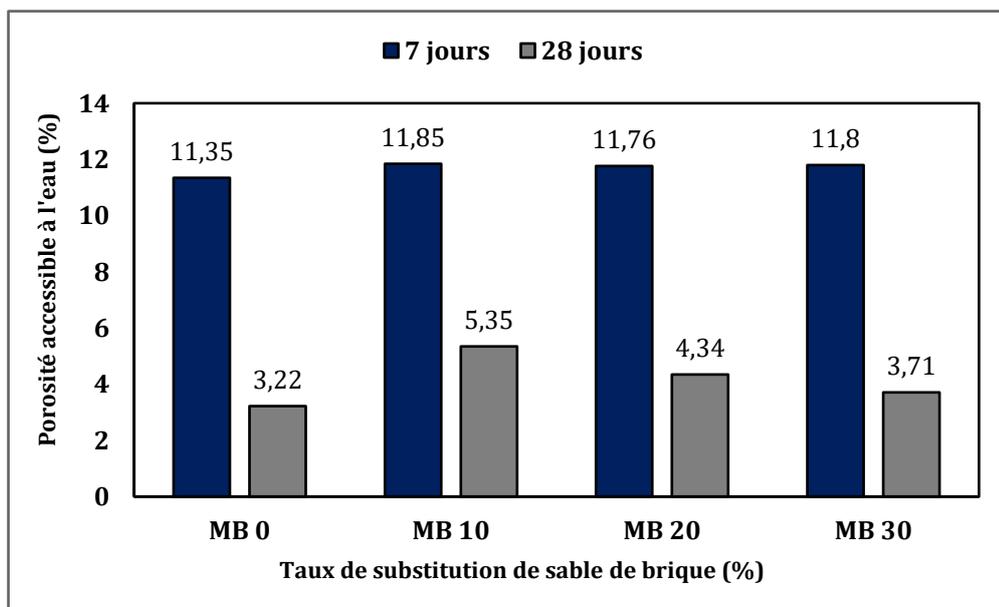


Figure III. 20: Evolution de la porosité accessible à l'eau des différents MAP après 7 et 28 jours de cure humide

La même tendance est observée après 28 jours d'hydratation ou la masse volumique diminue avec l'augmentation de la substitution du sable naturel par le sable recycle de brique.

Concernent la porosité, on observe à cet âge une augmentation là aussi à la porosité pour l'ensemble des mélanges contenant le sable de brique par rapport au mortier de référence.

Cette porosité diminue en fonction de l'augmentation de taux de substitution du sable naturel par le sable de brique.

Le MB30 donne le meilleur résultat avec un taux de porosité de 3,71% comparé au MB10 qui a une porosité de 5,35% ce qui représente une diminution de 30%.

Cela peut être expliqué d'une part par la porosité du sable de brique qui conduit à une diminution de la masse volumique et une augmentation de la porosité des MAP en générale. D'autre part la réaction des fines de brique avec le ciment à 28 jours pour former les monocarboaluminates à conduit à une diminution de la porosité et la masse volumique dans le MB30 comparé au MB10.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats concernant le travail expérimental sur l'effet du sable recyclé de déchets de brique sur le comportement du MAP. On peut alors tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible de formuler un MAP par substitution du sable naturel par le sable recyclé de déchets de brique jusqu'à 30% maximum. Le taux de substitution de 40% ne produit pas un MAP.
- La substitution du sable naturel par le sable recyclé de brique provoque une perte d'ouvrabilité pour l'étalement au mini-cône ainsi que V-funnel. Plus le taux de substitution augmente et plus la perte de fluidité augmente aussi.
- La substitution du sable naturel par du sable recyclé de brique jusqu'à un taux de 30% donne des résultats de résistance à la compression comparable aux mortiers de référence. Une légère amélioration de la résistance à la compression a été observé après 28 jours de cure humide ou le MB20 semble donné le meilleur résultat.
- La résistance à la flexion à 7 jours d'âge, diminue légèrement pour le MB10 et MB20 et augmente pour le MB30. Après 28 jours d'hydratation, la résistance à la flexion diminue légèrement pour l'ensemble des mélanges à base de déchets de brique.

- L'absorption d'eau par capillarité a été réduite par utilisation du sable recyclés de brique à 7 jours et à 28 jours d'âge. La sorptivité a été aussi diminuée après 28 jours de cure jusqu'à 60% pour le MB20, tandis qu'à 7 jours la sorptivité a été baissée uniquement au-delà de 06 heures d'essai indiquant une diminution des micropores à cet âge.

La porosité augmente pour les mélanges à base de sable recyclés de brique au jeune âge et à 28 jours. L'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable de déchets de brique diminue la porosité ouverte ou la différence avec le mortier témoins est seulement de 4%.

**CONCLUSION GÉNÉRALE
ET PERSPECTIVES**

Conclusion générale

Notre étude expérimentale a été élaborée pour formuler des MAP à base de sable recyclé de déchets de brique et analyser leur effet sur les propriétés physiques, rhéologique, mécaniques ainsi que la durabilité. Les taux de substitution du sable naturel par du sable de déchets de brique sont de : 0%, 10%, 20%, 30%, 40%. Les résultats obtenus lors de cette étude, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible d'utiliser du sable recyclé de déchets de brique jusqu'à 30% de substitution du sable naturel pour la formulation d'un MAP.
- La substitution du sable naturel par le sable recyclé de brique provoque une perte d'ouvrabilité des différents MAP.
- La substitution du sable naturel par du sable recyclé de brique donne des résultats de résistance à la compression comparables avec les mélanges de sable naturel.
- La résistance à la flexion donne des résultats comparables avec une légère diminution pour les mélanges contenant les déchets de brique.

L'absorption d'eau par capillarité et la sorptivité ont été réduite par utilisation du sable recyclés de brique avec une diminution atteignant les 60% pour un taux de substitution de 20%.

La porosité augmente et la masse volumique diminue pour les mélanges à base de sable recyclés de brique au jeune âge et à 28 jours et le mélange avec 30% de substitution (MB30) donne la porosité la plus faible.

Perspectives

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire peut être complété par d'autres travaux. A cet effet nous recommandons les sujets de recherches suivants :

- ✓ Effet des granulats recyclés de brique sur les performances des BAP
- ✓ Effet du climat chaud sur les performances des BAP à base de granulats recyclés de brique.
- ✓ L'effet de la finesse de déchets de brique sur les performances des MAP.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. Elhadja, B. Akram, S. Eddine, S. Hamza, and K. El-hadj, "Rheological study of self-compacting mortars based on ternary cements etude rhéologique des mortiers autoplaçants à base des ciments ternaires," MATEC Web of Conferences vol. 01057, pp. 1–6, 2018.
- [2] A. Attanasio and A. Largo, "valorization of construction and demolition wastes: re4 building solutions," Proscience, vol. 4, pp. 1–12, 2017, doi: 10.14644/amamicam.2017.002.
- [3] F. Debieb, "valorisation des déchets de briques de démolition comme agregats de béton , Mémoire de Magister," Université Saad Dahleb Blida, 2000.
- [4] D. Aboutaleb, B. Safi, K. Chahour, and A. Belaid, "Use of refractory bricks as sand replacement in self-compacting mortar," cogent Eng., vol. 21, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1080/23311916.2017.1360235.
- [5] M. Zeghad, J. Mitterpach, B. Safi, B. Amrane, and M. Saidi, "Reuse of refractory brick wastes (rbw) as a supplementary cementitious material in a concrete," Periodica Polytechnica Civil Engineering pp. 75–80, 2017, doi: 10.3311/ppci.8194.
- [6] M. Si-ahmed, "Formulation et comportement d'un béton fluide à base de granulats recyclés de brique , Thèse De Doctorat," Université Saad Dahleb Blida, 2018.
- [7] A. Chériguène and A. Baali, "Formulation d'un mortier autoplaçant à base de sable de déchets de brique , Mémoire de Master," Université Daad Dahleb de Blida, 2021.
- [8] A. Gherzouli and L. Rahali, "Etude des caractéristiques rhéologique et mécanique d'un mortier auto-plaçant a base de fillers calcaire , Mémoire de Master," Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2019.
- [9] K. Yahiaoui and M. Sadki, "Propriétés de mortier autoplaçant à base de différents types de sables , mémoire de master," Université Ziane Achour Djelfa, 2017.
- [10] A. Ragaa and A. Gacem, "Formulation et caractérisation des mortiers autoplaçants à base de silice et calcaire , Mémoire de Master," Université Ziane Achour de Djelfa, 2019.
- [11] E. Brinis and E. Redjem, "Effet du sable fin de boussaâda sur le mortier auto nivelant à base de sable de djamaa , mémoire de master," Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2021.
- [12] F. De larrard, F. Bosc, C. Catherine, and f. Deflorenne, "La nouvelle méthode des coulis de l'afrem pour la formulation des bétons à hautes performances" bull. Des lab. Des ponts chaussées, vol. 202, pp . 61-69," 1996.

- [13] T. Sedran, "Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants," Thèse de Doctorat, Ecole National Des Ponts et Chaussées., 1999.
- [14] T. Shindoh, Y. Matsuoka, S. Tangtermsirikul, and J. Sakamoto, "Effect of variation of material quality on properties of super workable concrete," trans. Japan concr. Inst., vol. 14, pp. 71–78, 1992.
- [15] S. Kuroiwa, Y. Matsuoka, M. Hayakawa, and T. Shindoh, "Application of super workable concrete to construction of a 20-story building," Spec. Publ., vol. 140, pp. 147–162, 1993.
- [16] N. M. Dehbi and C. Chaibet, "Comportement rhéologique et physico-mécanique des mortiers autoplaçants avec ajouts minéraux , Mémoire de Master," Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2019.
- [17] C. Lemaitre, "Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction. Editions eyrolles.2012.
- [18] M. Benali and I. Yahi, "Etat d'art et essais préliminaires sur l'influence de sable de fonderie sur les mortiers autoplaçants , Mémoire de Master," Université Saad Dahleb Blida, 2020.
- [19] M. I. F. Zohra and I. F. Charif, "Etude rhéologique de l'interaction entre les additions minérales et organiques sur des mortiers , Mémoire de Master," Université Aboubeker Belkaid Tlemcen, 2016.
- [20] B. Benamarouch and L. Idir, "Durabilité du béton autoplaçant à base d'un ciment à la pouzzolane naturelle , Mémoire de Master," Université Saad Dahleb Blida, 2012.
- [21] M. S. Bouglada, "Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux , Thèse de Doctorat," Université Mostefa Ben Boulaid Batna, 2019.
- [22] S. Belmenaouar, "Recherche bibliographique sur la valorisation de métakaolin dans les matériaux de construction , Mémoire de Master," Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2016.
- [23] b. C. Beni-remour, "Matériaux pouzzolainique: étude physicochimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane," Mémoire fin d'étude Ingéniorat-igcm oran, 1993.

- [24] H. Okamura and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003, doi: 10.3151/jact.1.5.
- [25] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *struct. Concr.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 2000.
- [26] A. Menadi and I. Kabilene, "Performance du béton autoplaçant à base de sable de concassage de différentes sources , Mémoire de Master," Université Saad Dahleb Blida, 2020.
- [27] S. Hammat, "Influence du laitier et de la pouzzolane sur le retrait des mortiers autoplaçants , Mémoire de Magister," Université Saad Dahleb Blida, 2012.
- [28] B. Benabed, e. H. Kadri, L. Azzouz, and S. Kenai, "Properties of self-compacting mortar made with various types of sand," *cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 10, pp. 1167–1173, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007.
- [29] A. R'mili, "Étude de formulation et de comportement des bétons auto-plaçants: incorporation du sable de concassage et du sable du désert". France, Noor publishing, pp. 228. 2016.
- [30] A. Grondin, "Valorisation des granulats recyclés de béton: étude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton. Thèse de Doctorat," INSA de strasbourg, 2011.
- [31] M. Oumaza and I. Temar, "Comportement d'un mortier autoplaçant à base de fines de déchet de brique , Mémoire de Master," Université Saad Dahleb Blida, 2020.
- [32] N. Bourmatte, "Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques , Thèse de Doctorat," Université Des Frères Mentouri Constantine, 2017.
- [33] A. Barkat, "Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton , Mémoire de Magister," Université Kasdi Merbah Ouargla, 2006.
- [34] A. Kleinlogel, "L'influence des divers éléments physicochimiques sur les bétons. DUNOD, pp. 410. 1960.
- [35] M. Serifou, " Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation, Thèse de Doctorat," Université de Bordeaux, 2013.

- [36] N. Perkins, A. Ajir, and L. El ouazzani, “ Rapport sur la gestion des déchets solides au Maroc,” réseau régional d’échange d’informations d’expertise dans le sect. Des déchets dans les pays du mashreq du maghreb. Dtsch. Gesellschaft für int. Zusammenarbeit gmbh, 57p, 2014.
- [37] M. Quebaud, “Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats, Thèse de Doctorat,” Université de Lille, 1996.
- [38] K. Bouali, “Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d’ajouts de déchets de briques réfractaires , Mémoire de Master,” Université de Boumerdès, 2015.
- [39] H. Fouzia and K. Imane, “L’utilisation de la brique recyclée et de la céramique dans la formulation des m ortiers, Mémoire de Master,” Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2019.
- [40] National waste agency, "Caractérisation des déchets ménagers et assimilés", vol. 213, no. 1, pp 11-28. 2019.
- [41] E. Broughton, “Catastrophes naturelles. Les capacités de gestion des états en question,” in les états submergés, paris: institut français des relations internationales, 2011, pp. 92–95. Doi: 10.3917/ifri.demon.2011.01.0092.
- [42] M. S. De juan and p. A. Gutiérrez, “Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate,” constr. Build. Mater., vol. 23, no. 2, pp. 872–877, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.
- [43] R. Hadjieva-Zaharieva, “Durabilité des bétons à base de granulats recyclés, Thèse de Doctorat,”Université de Lille, 1998.
- [44] H.-A. Mesbah, “Amélioration du comportement des mortiers à base de granulats recyclés par adjonction de fibres,” Rilem, pp, 147, 1997.
- [45] I. Hireche, “Effets des hautes températures sur le comportement du béton de poudre reactive à base des déchets de brique rouge , Mémoire de Master,” Université Mohamed Khider Biskra, 2020.

- [46] I. Irki et al., “Effect of blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 4243, no. November, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1080/01694243.2017.1393202.
- [47] M. Si-ahmed and S. Kenai, “Behavior of self-compacting mortars based on waste brick powder,” *curr. Mater. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 39–44, oct. 2020, doi: 10.2174/2666145413666200219091459.
- [48] F. Bektas, K. Wang, and H. Ceylan, “Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability,” *constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1909–1914, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006.
- [49] J. M. Khatib, “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate,” Elsevier, vol. 35, no. June 2004, pp. 763–769, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.017.
- [50] M. Karatas, K. Turk, M. Acikgenc, and Z. C. Ulucan, “Effect of elazig region waste brick powder on strength and viscosity properties of self compacting mortar,” *international congress on advances in civil engineering, trabzon, turkey*, vol. 37, no. 3. September, pp. 27–30, 2010.
- [51] R. Amjadi, M. Monazami, E. Mohseni, and H. A. Balgouri, “Effectiveness of different recycled materials in self-compacting mortar,” *European journal of environmental and civil engineering*, vol. 81, no. 1. May, 2016, doi: 10.1080/19648189.2016.1175974.
- [52] Z. Zhao, A. Grellier, M. El, K. Bouarroudj, and f. Michel, “Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars : properties and durability,” *J. Build. ENG.*, vol. 43, no. June, pp. 102-898, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102898.
- [53] J. P. Gonçalves, L. M. Tavares, R. D. T. Filho, and E. M. R. Fairbairn, “Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick,” *constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1971–1979, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027.
- [54] M. Zakaria and J. G. Cabrera, “Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates,” *waste manag.*, vol. 16, no. 1, pp. 151–158, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/s0956-053x\(96\)00038-4](https://doi.org/10.1016/s0956-053x(96)00038-4).
- [55] Y. Zhao, J. Gao, F. Chen, C. Liu, and X. Chen, “Utilization of waste clay bricks as coarse and fine aggregates for the preparation of lightweight aggregate concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 201, pp. 706–715, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.103.

- [56] A. Schackow, D. Stringari, L. Senff, S. L. Correia, and A. M. Segadães, “Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars,” *cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 82–89, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019.
- [57] NF EN 196-1 Septembre 2016, “Partie 1 : Détermination des résistances - Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances ”.
- [58] ASTM C1585 - 13–2013, “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes”.
- [59] NF, P." P 18-459: Béton-Essai pour béton durci-Essai de porosité et de masse volumique". Mars 2010.

ANNEXES