

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département génie civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : génie civil

Spécialité : matériaux

Par

- **Dahoumane faycel**
- **Boudache abd basset**

Intitulé

Etude du comportement physique, mécanique et durabilité des mortiers de ciment contenant des fines de béton démolé et des nouvelles Additions

Soutenu le : 27/06/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Ammar Noui</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Kessal Oussama</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Ben Ammar Abdelhafid</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Benoudeh Abdellatif</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENT

Mes sincères remerciement et reconnaissance pour mon encadreur

Dr.BELKADI AHMED ABDERRAOUF *qui m'a guidé durant la*

préparation de mon mémoire et qui m'a accordé tout le temps et les

instructions nécessaires pour accomplir ce travail, à qui je serai

toujours reconnaissante

A tous mes professeurs chacun en son nom, je vous remercie du fond

du cœur pour votre dévouement et pour vos conseils.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de

ce projet de fin d'étude.

A monsieur **Dr.KESSEL OUSSAMA** qui m'a accordé tout le temps

et les conseils nécessaires dans la réalisation de ce projet de fin

d'étude

DÉDICACES

"وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت واليه أنيب"

Je dédions ce travail à :

*A mes parents pour leur soutien, leur patience, leur encouragement
durant mon parcours scolaire. À l'âme et soutiens mes frères et sœurs.*

A ma compagne Racha

Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

Résumé

La transformation des déchets de construction et de démolition en matières premières secondaires est l'une des priorités de politique environnementale et stratégie d'économie circulaire. Cette étude a analysé l'effet de remplacement du ciment par deux types de déchets (fines de béton et de verre provenant de déchets de construction) sur le comportement physique et mécaniques des mortiers eco-efficace en utilisant différentes méthodes d'analyse. Dans ce travail, on remplace le ciment par ces déchets avec des pourcentages variables (10 %, 15 %, 20 %). Des performances mécaniques et physiques des matériaux cimentaires ont été étudiées (Etalement, Densité humide, résistance à la compression et à la flexion, vitesse de l'ultrason, l'absorption). Les résultats obtenus par ce travail montrent que les fines recyclés (verre ou fine de béton) ont un effet significatif sur les performances des mortiers cimentaires.

De plus la présence de 10% de poudre de verre et fine de béton démolis provoque une augmentation de la résistance à la compression et à la flexion jusqu'à 15% par rapport au mortier sans ajouts.

A partir ces résultats on va attester de la viabilité scientifique du recyclage de ces produits en tant qu'ajouts minéraux dans la fabrication d'éco-ciment et, par conséquent, d'éliminer le besoin de stocker ces matériaux dans des usines de recyclage/stockage.

Mots clés

Fine de béton démolis, poudre de verre, eco-mortier, résistance à la compression, résistance à la flexion, absorption d'eau.

ABSTRACT

The transformation of construction and demolition waste into secondary raw materials is one of the priorities of environmental policy and circular economy strategy. This study analysed the effect of replacing cement with two types of waste (fine concrete and glass from construction waste) on the physical and mechanical behaviour of eco-efficient mortars using different analytical methods. In this work, cement is replaced by this waste with varying percentages (10%, 15% and 20%). Mechanical and physical performance of cementitious materials have been studied (Flatness, Wet density, resistance to compression and bending, ultrasonic speed, absorption). The results obtained by this work show that recycled fines (glass or fine concrete) have a significant effect on the performance of cement mortars.

In addition the presence of 10% glass powder and fine demolished concrete causes an increase in the resistance to compression and bending up to 15% compared to mortar without additions.

On the basis of these results, the scientific viability of recycling these products as mineral additions in the manufacture of eco-cement will be demonstrated and, consequently, the need to store these materials in recycling/storage plants eliminated.

Key words

Fine demolished concrete, glass powder, eco-mortar, compressive strength, flexural strength, water absorption.

ملخص

ويمثل تحويل نفايات البناء والهدم إلى مواد خام ثانوية إحدى أولويات السياسة البيئية واستراتيجية الاقتصاد الدائري. حللت هذه الدراسة تأثير استبدال الأسمنت بنوعين من النفايات (الخرسانة الدقيقة والزجاج من نفايات البناء) على السلوك المادي والميكانيكي لمدافع الهاون ذات الكفاءة البيئية باستخدام طرق تحليلية مختلفة. في هذا العمل، يتم استبدال الأسمنت بهذه النفايات بنسب متفاوتة (10٪، 15٪، 20٪). تمت دراسة الأداء الميكانيكي والمادي للمواد المسمانية (التسطيح والكثافة الرطبة ومقاومة الانحناء والانحناء وسرعة الموجات فوق الصوتية والامتصاص). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من هذا العمل أن الغرامات المعاد تدويرها (الزجاج أو الخرسانة الدقيقة) لها تأثير كبير على أداء مدافع الهاون الإسمنتية بالإضافة إلى ذلك، يؤدي وجود

مسحوق زجاجي بنسبة 10٪ وخرسانة دقيقة مهدمة إلى زيادة مقاومة الضغط والانحناء بنسبة تصل إلى 15٪ مقارنة بقذائف الهاون بدون إضافات وعلى أساس هذه النتائج، سيتم إثبات الجدوى العلمية لإعادة تدوير هذه المنتجات كإضافات معدنية في صناعة الأسمنت الإيكولوجي، وبالتالي إزالة الحاجة إلى تخزين هذه المواد في مصانع إعادة التدوير/التخزين.

الكلمات الدالة

الخرسانة المهدمة بشكل جيد ، مسحوق الزجاج ، الملاط البيئي ، قوة الانضغاط ، قوة الانحناء ، امتصاص الماء.

sommaire

Introduction générale.....	7
CHAPITRE I: Etat de l’art sur les déchets recyclés	
1.1. Introduction	3
1.2. Importance des fines recyclées	3
1.3 Différents types de fines recyclées	4
1.3.1. Laitier de haut fourneau	4
1.3.2. Déchets issus de la démolition de construction	6
1.3.2.1. Poudre de verre et de béton recyclé	6
1.3.2.2. Déchet de brique.....	10
1.3.2.3 Déchet de marbre	12
1.4. Conclusion.....	15
CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et méthodologie d’essai	
Introduction	17
2.1. Matériaux de construction de base	17
2.2. Sable.....	17
2.1.1.1 Analyse granulométrique.....	17
2.1.1.2 Masse volumique absolue et apparente des granulats	18
2.1.1.3 Caractéristiques physico-chimiques	18
2.1.2 Ciment	18
2.1.3 Déchets recyclés	19
2.1.4 Eau de gâchage.....	19
2.2 Composition des différents mélanges.....	19
2.3 Essais de caractérisations.....	20
2.3.1 Préparation des échantillons.....	20
2.3.2 Essais à l’état fais	21
2.3.3 Résistances mécaniques	21
Résistance à la compression et à la flexion	21
2.3.4. Absorption d’eau.....	22
2.3.4. Attaque acide sulfurique	22
2.4 Conclusion.....	22
CHAPITRE III: Résultats et discussion	
3.1. Introduction	23

3.2. Propriétés à l'état frais	23
3.2.1. Etalement	23
3.2.2. Masse volumique au jeune âge	24
3.3. Propriétés à l'état durci	24
3.3.1. Résistance à la flexion	24
3.3.2. Résistance à la compression.....	25
3.3.3. Corrélation entre la résistance à la flexion et à la compression	26
3.3.4. Vitesse de l'ultrason.....	27
3.3.5. Corrélation entre la vitesse de l'ultrason et la résistance à la compression	28
3.3.6. Absorption d'eau.....	29
3.3.7. Masse volumique sèche	30
3.3.8. Corrélation entre la masse volumique et la vitesse ultrasonique	31
3.4. Conclusion	31
Conclusion générale	31

Liste des figures	
Figure 1.1 déchets de démolition	4
Figure 1.2 Le laitier de haut fourneau	4
Figure 1.3. Résistance à la compression des différents mélanges à base de laitier.	5
Figure 1.4. Résistance à la flexion des différents mélanges contenant laitiers et filler calcaire.	6
Figure 1.5 déchet de verre et poudre de verre	8
Figure 1.6 présente le pourcentage de l'ettringite et C_4AH_{13} et C_4AcH_{11} .	9
Figure 1.7 Etalement de différents mortiers contenant la poudre de verre.	9
Figure 1.8 Résistance à la compression des bétons contenant de la poudre de verre.	10
Figure 1.9 Déchet de brique.	10
Figure 1.10 la résistance de poudre de brique	11
Figure 1.11 Efficacité de recyclage du mortier contenant de la poudre brique recyclée.	12
Figure 1.12 Déchet de marbre	13
Figure 1.13. Schéma de la distance entre l'emplacement de la cimenterie et les fournisseurs de déchets de marbre (Google Maps).	15
Figure 1.14 Coûts estimés du ciment et MP utilisés dans le mortier (en \$/tonne).	15
Figure 2. 1 Courbe granulométrique du sable d'Oeud souf.	18
Figure 2. 2 Méthode de malaxage et le mode de conservation.	20
Figure 2. 3 Le test de fluidité selon la norme ASTM C 1437–20 (C1437-20, 2020).	21
Figure 2. 4 Appareilles de l'essai de compression et de flexion.	21
Figure 2. 5 l'essai d'absorption d'eau	22
Figure 2.6 le béton au milieu sulfurique	22
Figure 3.1. Diamètre de l'étalement de différents mélanges.	23
Figure.3.2. Masse volumique humide de différents mélanges.	24
Figure 3.3. Résistance à la flexion des différents mortiers utilisés.	25
Figure 3.4 Résistance à la compression des différents mortiers.	26
Figure 3.5 Corrélation entre la résistance à la compression et à la flexion des différents mortiers.	27
Figure 3.6 Vitesse de l'ultrason de différents mortiers confectionnés.	28
Figure 3.7 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique des différents mortiers.	29
Figure.3.8. Absorption d'eau des différents mélanges.	30
Figure.3.9. Masse volumique sèche des différents mélanges.	30
Figure.3.10 Corrélation entre la masse volumique et la vitesse ultrasonique des différents mortiers	31

Liste des tableaux	PAGE
Tableau 2. 1 Valeurs des masses volumiques du sable	18
Tableau 3. 1 Valeurs de l'équivalent de sable	18
Tableau 3. 2 Caractéristiques chimiques et physique du ciment utilisé.	19
Tableau 3. 3 Composition chimique et physique du fumé de silice.	19
Tableau 3. 5 Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.	19

Introduction générale

Introduction générale

En raison de l'impact environnemental élevé de la production de ciment, les conceptions actuelles des ciments visent à réduire leur empreinte carbone. Ceci est partiellement réalisé en utilisant des matériaux cimentaires supplémentaires comme un substituant du clinker. La poudre de verre issue du broyage de verre des vitres (V). En 2005, la production mondiale totale de déchets de verre était de 130 Mt, dont l'Union européenne, la Chine. Étant de nature non biodégradable, l'élimination du verre en décharge a des impacts sur l'environnement et peut également être coûteuse. La pratique de la construction durable signifie la création et la gestion responsable d'un environnement bâti sain en tenant compte de l'efficacité des ressources et de l'écologie (Islam et al., 2017). Polyvalent et économique, le béton est devenu un matériau de construction de choix dans le monde entier, cependant, il a des impacts sur l'environnement (Naik, 2008). La consommation de ciment (ingrédient clé utilisé pour la fabrication du béton) est une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre. L'utilisation de matériaux cimentaires supplémentaires pour compenser une partie du ciment dans le béton est une méthode prometteuse pour réduire l'impact environnemental de l'industrie. Plusieurs sous-produits industriels ont été utilisés avec succès comme ajouts cimentaires, notamment la fumée de silice, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les cendres volantes. Ces matériaux sont utilisés pour créer des ciments composés qui peuvent améliorer la durabilité du béton, la résistance à court et à long terme, la maniabilité et l'économie. Un autre matériau qui a un potentiel en tant qu'ajout cimentaire, cependant, n'a pas encore obtenu le même succès commercial est le gaspillage verre (Rashad, 2015). Les recherches ont indiqué que le verre a une composition chimique et phase comparables à celles des ajouts traditionnels. Il est abondant, peut-être de faible valeur économique (Byars et al., 2003). Fraisage de verre à la taille des particules à l'échelle micrométrique, pour améliorer les réactions entre les hydrates de verre et de ciment, peuvent apporter des avantages énergétiques, environnementaux et économiques majeurs lorsque le ciment est partiellement remplacé par des déchets de verre broyés pour la production du béton (Rashad, 2015). Des études ont également porté sur l'utilisation des déchets de verre comme agrégat dans la production de béton (Rashad, 2015). Étude sur la durabilité du béton avec des déchets de verre a montré des meilleures performances à long terme contre la perméabilité au chlorure. Une bonne pouzzolane fonctionne à la fois pour atténuer le phénomène d'alcali réaction et consommer la chaux pour réduire considérablement efflorescence. Par conséquent le remplacement partiel du clinker par du (V) réduit les coûts et l'empreinte de CO₂ du matériau et améliore également sa performance physique et chimique.

Dans le cadre de cette étude, fines issues du béton démolé et poudre de verre ont été utilisées en remplacement partiellement du ciment. L'approche est essentiellement expérimentale et comporte un seul axe principal :

Le premier axe concerne l'étude de l'effet de l'introduction des fines recyclées sur les performances à l'état frais et durci des mortiers cimentaires.

Ainsi, le mémoire de thèse se compose de deux grandes parties.

✚ La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, elle se décompose en un seul chapitre qui est consacré à des généralités sur les ajouts dans les matériaux cimentaires, suivi de leur comportement vis-à-vis de différents phénomènes (Résistance à la compression ...etc)

✚ La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle est structurée comme suit :

✚ Une description détaillée de tous les matériaux utilisés et regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus. Ceci constitue le deuxième chapitre.

✚ Le troisième chapitre s'intéresse à l'étude de l'influence des fines recyclées sur le comportement des mortiers.

Chapitre I : Etat de l'art sur les déchets recyclés

1.1. Introduction

L'augmentation de la population de la planète et l'amélioration générale du niveau de vie moyen des habitants a conduit à une augmentation de la production de biens de consommation, tout en générant un flux de déchets de plus en plus important. Cette accumulation de déchets dont la durée de vie est de plusieurs milliers d'années a posé de gros problèmes à notre société de consommation car elle pollue l'environnement et cause parfois des dommages au cadre de vie. De plus, la production d'une tonne de ciment provoque une tonne de CO₂ ainsi elle consomme des ressources naturelles et de l'énergie, mettant en danger les économies de certains pays.

En effet, la diminution des réserves récupérables des déchets provenant du béton ou du verre ont conduit à rechercher d'autres voies d'approvisionnement en fine pour l'industrie du ciment.

C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme la solution d'avenir pour combler le déficit entre production, consommation et protéger l'environnement. Dans le premier chapitre, nous visons à faire le point sur les connaissances actuelles les plus pertinentes sur les fines recyclées comme substitut aux ciments sur le sujet de recherche.

1.2. Importance des fines recyclées

Actuellement, la plupart des fines utilisés sur le marché sont des fines naturelles issues de carrières ou de l'extraction des montagne (filler calcaire). Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. A titre d'exemple on prend la France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats (Chen & Chen, 2011).

Selon (Charlot-Valdieu, 1993) en France, les pourcentages des déchets de démolition proviennent des industrielles (40%), logement (35%) et travaux publics (25%). Ces déchets sont constitués de 50 % maçonnerie, 30 % de béton, 5 % d'asphalte et 15 % autres matériaux (bois, métal, verre, plastique...). Recycler les déchets pour les utiliser comme des fines pour les matériaux de construction a eu plusieurs avantages :

- Économie des ressources naturelles ;
- Transport de matériel réduit et donc moins de consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre;
- Mise en œuvre rapide pour minimiser les inconvénients pour les résidents ;

- Réduire la quantité de matériaux envoyés à l'enfouissement. Sur le plan environnemental, le recyclage complet du béton permet de minimiser l'impact monoxyde de carbone car : Le béton concassé peut capter le CO₂.



Figure 1.1 déchets de démolition (site web).

1.3 Différents types de fines recyclées

1.3.1. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte. Le laitier est ensuite lentement refroidi à l'air libre pour obtenir un matériau cristallin et le matériau dense appelé "laitier refroidi à l'air" est soit rapidement refroidi et traité par jets d'eau pour obtenir un matériau léger appelé "laitier développé". Le laitier refroidi à l'air convient comme agrégat pour le béton (Zhou et al., 2013).

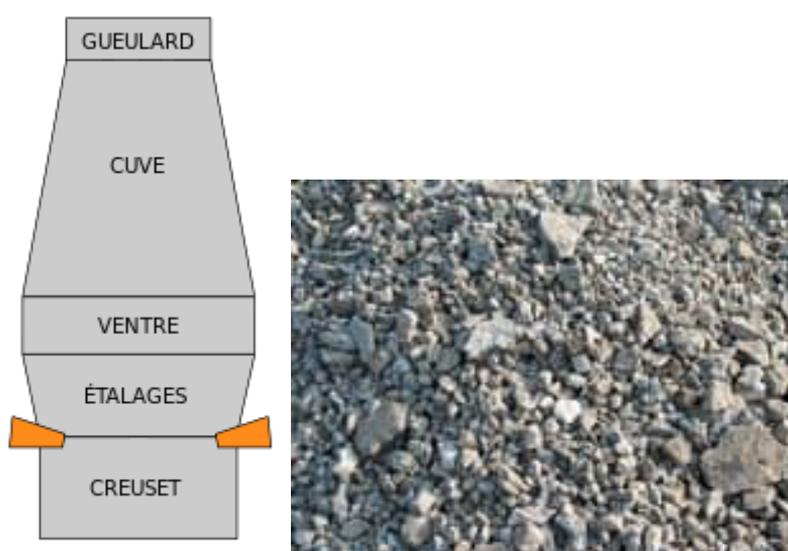


Figure 1.2 Le laitier de haut fourneau (Zhou et al., 2013)

(Douaïssia et al., 2021) ont montré que l'ajout du laitier et de la pouzzolane n'implique pas un changement significatif dans la quantité d'eau. De plus ils ont constaté que la pouzzolane provoquent une augmentation de 2% du volume d'eau, le laitier granulaire réduit le volume d'eau de 4 %. Ceci est dû à la composition chimique et minérale des ajouts minéraux, car le laitier granulaire est plus riche en CaO que la pouzzolane naturelle. Il convient de noter que CaO affectera le phénomène d'hydratation absorbant la quantité d'eau due à l'hydratation de la chaux Z. Douaïssia et al.

Dans une autre étude de (Douaïssia et al., 2021) qui ont montré que la présence de laitier dans les mortiers cimentaires provoque une diminution de la résistance à la compression. Cependant le mélange qui contient 10% de laitier subit une légère augmentation de la résistance par rapport au témoin. Cette amélioration est probablement due au l'effet de remplissage des pores (effet physique). La figure 1.4 présente la variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de substitution.

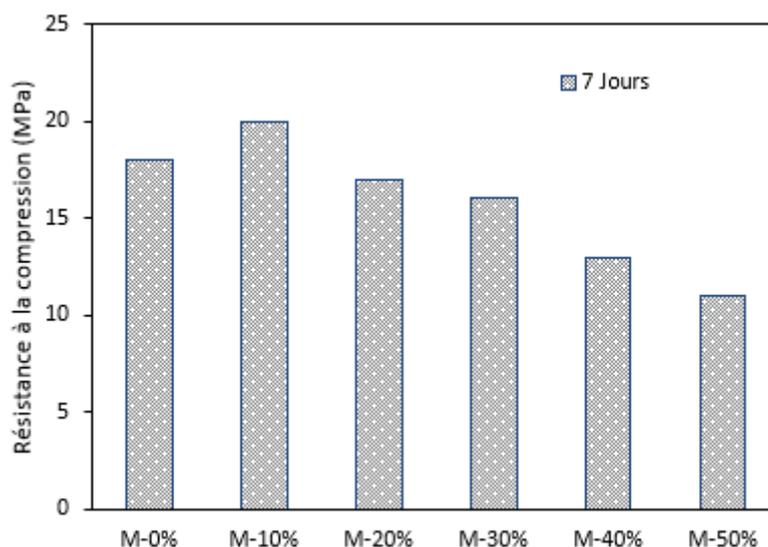


Figure 1.3. Résistance à la compression des différents mélanges à base de laitier (Douaïssia et al., 2021).

D'après ces résultats on constate que l'introduction des produits pouzzolaniques a eu un effet négatif sur les performances mécaniques des matériaux cimentaires au jeune âge.

(NOUI, 2018) ont étudié l'effet de laitier à haut fourneau et de filler calcaire dans le mortier cimentaire. Il a conclu que la présence de laitier avec filler provoque une augmentation de la résistance à la flexion à 3 ans d'âge (figure 1.4).

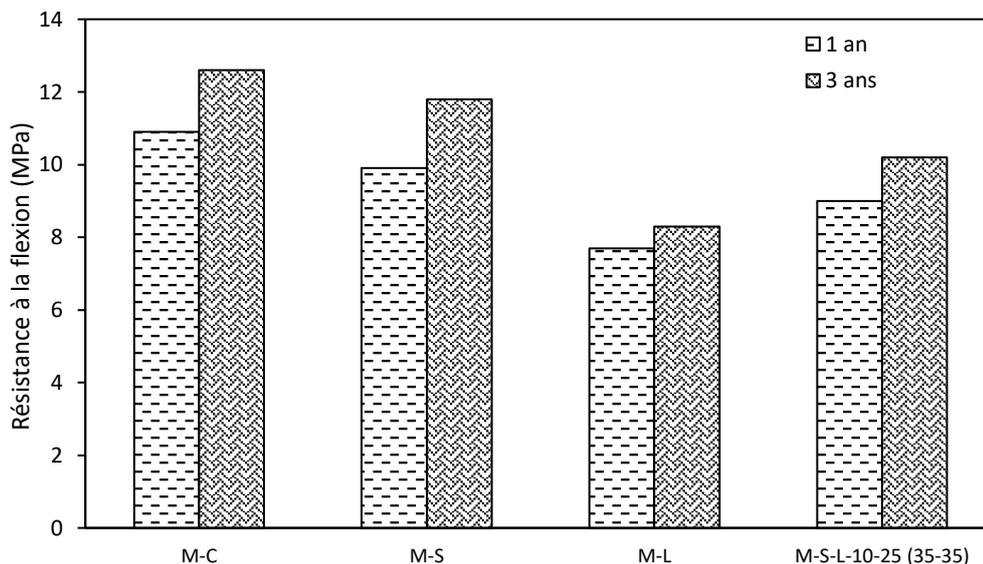


Figure 1.4. Résistance à la flexion des différents mélanges contenant laitier et filler calcaire (NOUI, 2018).

1.3.2. Déchets issus de la démolition de construction

1.3.2.1. Poudre de verre et de béton recyclé

Portée par un engagement à se conformer aux stratégies environnementales telles que l'économie circulaire, le pacte vert ou les objectifs de développement durable (Belkadi et al., 2022), l'industrie cimentière recherche activement de nouvelles pouzzolanes éco-efficaces pour tenter de réduire son empreinte carbone (qui actuellement représente 5 à 7 % des émissions totales de CO₂ dans le monde) (Charlot-Valdieu, 1993). Ces dernières années, l'accent a été mis sur les déchets de construction et de démolition, à la lumière des grandes quantités générées chaque année. La production estimée de ces déchets en Europe s'élève à 800Mt/an soit près de 50 % du total des déchets solides générés.

Selon les données disponibles, 43 % de ces déchets sont stockés dans des décharges (Islam et al., 2017). Les matériaux concernés n'étant pas biodégradables, cette situation pose d'importants problèmes environnementaux, sociaux, techniques, problèmes économiques et de santé publique. La complexité de la résolution de ces problèmes est accentuée par la composition inorganique mixte des déchets en cause (béton, produits de maçonnerie, verre, plastique, tissu), qui nécessite une séparation sélective dans les usines de gestion. Malgré ces inconvénients et conformément aux directives de construction circulaire, le déchet de construction est utilisé comme matière première secondaire principalement de deux manières : a) en tant que granulats grossiers de béton recyclé à (Mohajerani et al., 2017) différents taux de remplacement, en fonction des codes et des applications

2 ; et b) en tant qu'ajout de ciment actif, comprenant principalement des granulats de maçonnerie mixtes (béton + brique de terre cuite, tuile, etc.) dans lesquels la terre cuite ou le composant céramique agit comme une pouzzolane.

La taille (<5 mm) et la composition chimique de la fraction fine de CDW générée lorsque le béton est concassé et tamisé pour produire des granulats grossiers de béton recyclé empêchent son utilisation industrielle (Shi & Zheng, 2007). De ce fait, ils sont stockés à l'usine de gestion, même si, en tant que déchets à forte teneur en ciment, ils pourraient potentiellement être utilisés comme appoint matériau cimentaire dans la fabrication d'éco-ciment. Une étude préliminaire menée par (Frías et al., 2020) ont détecté la formation dans ces déchets fins de faibles quantités des phases hydratées caractéristiques de l'hydratation du ciment portland, confirmant leur pouzzolanisme et donc leur réactivité. Du gel C-S-H, de l'ettringite, du C_4AH_{13} et du C_4AcH ont été générés lors de la réaction pouzzolanique dans un système de déchets de béton fin pur/chaux. Aucune des phases hydratées en cause n'a été identifiée dans les fractions initiales de béton fin. Le verre feuilleté est un autre type de flux de déchets inorganiques de construction et de démolition qui n'est actuellement pas exploité. D'après la littérature, ce type de déchets représente 0,3 % du CDW total, ce qui signifie en termes absolus qu'environ 24 Mt sont générées chaque année en Europe (C. Zhang et al., 2020). Contrairement au verre CDW, d'autres types de déchets de verre (bouteilles, pare-brise, verre filtrant, lampes fluorescentes) ont été largement étudiés pour leur pouzzolanisme dans les matrices cimentaires mélangées (G. Liu et al., 2018). Lorsqu'il est préparé avec du verre à des taux de remplacement allant jusqu'à 20 %, de telles matrices ont été présentant une résistance mécanique à long terme supérieure ou égale à les valeurs observées dans la matrice de référence non additionnée. Dans le court terme, cependant, leur forte teneur en sodium (9% à 15% Na_2O) peut induire la réaction alcali-agrégat. Pour contrer cet effet néfaste, du verre de très petite granulométrie (<300 μm) est ajouté au ciment pour s'assurer que le gel issu de la réaction alcali-silice (gel ASR) n'est pas expansif (Zheng, 2016). Cette étude a recherché de nouvelles connaissances sur la réactivité de la pâte de ciment dans ciment mélangé avec 5 %, 7 % ou 10 % de fractions fines de béton recyclé ou de verre feuilleté.



Figure 1.5 Déchet de verre et poudre de verre (site de web).

Dans le but de minimiser les impacts environnementaux de déchet de verre l'élimination dans les décharges, ce déchet a donné des résultats satisfaisants en tant qu'ajout supplémentaire dans le ciment (Rossignolo et al., 2017). Des réactions pouzzolaniques se retrouvent de manière significative entre la teneur élevée en dioxyde de silicium du verre et l'hydroxyde de calcium du ciment, améliorant les performances du béton. En raison de la composition chimique du verre comme d'autres produits riches en silice, favorisant le développement de la résistance à des âges plus avancés, réduisant la perméabilité, atténuant l'admission d'agents nocifs, améliorant la fluidité et également, contribuant à réduire l'empreinte carbone du béton. Ceci convient pour une substitution de 10% à 30% du ciment.

Par ailleurs, pour un volume plus élevé de la poudre de verre (au-delà de 30 % de remplacement), l'hydroxyde de calcium devienne insuffisant pour la réaction pouzzolanique, diminuant la résistance à la compression. Les améliorations des performances du béton dépendent de la taille des particules de verre. Une réactivité pouzzolanique plus élevée est obtenue avec l'augmentation de la surface spécifique. La réaction alcali-silice a également une forte corrélation avec la teneur du verre (Moreno-Juez et al., 2020). Une marge critique de la taille des particules a été observée entre 4800 μm et 300 μm , où se produisent les expansions maximales. Cependant une diminution de l'expansion concernant les particules de verre inférieur à 300 μm . L'ASR n'est pas observée dans les échantillons de mortier et de béton avec 30 % de remplacement du ciment par du verre avec sa finesse est égale 75 μm .

(Frías et al., 2021) ont fait une étude sur les changements structurels et minéralogiques qui se produisent dans la pâte de ciment additionnée de déchet de construction (verre et fine du béton recyclé) pour déterminer la viabilité de l'utilisation de ces déchets dans la fabrication d'éco-ciment. Ils ont conclu que si la teneur en calcaire dans les débris du béton recyclé est élevée, ce déchet agit initialement comme un filler, mais après 28 j la réaction pouzzolanique prévaut, avec la génération

du gel C-S-H et de l'ettringite. De plus, le verre présente une réactivité plus faible que les deux autres types de déchets et induit la formation de C_4AcH_{11} .

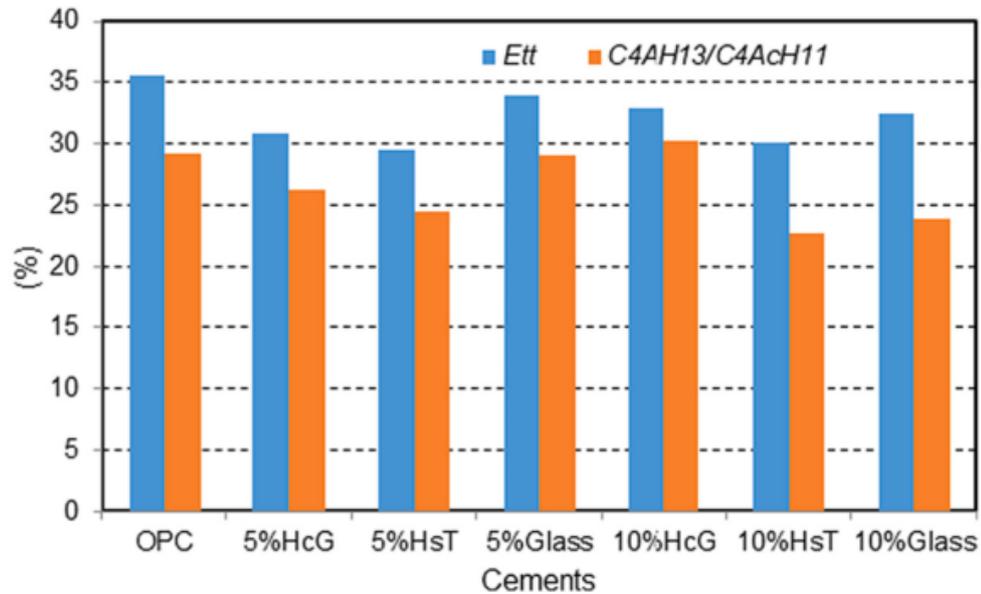


Figure 1.6 présente le pourcentage de l'ettringite et C_4AH_{13} et C_4AcH_{11} (Frías et al., 2021).

Selon (Islam et al., 2017) l'utilisation de déchets de verre broyés dans le béton en remplacement partiel du ciment pourrait constituer une étape importante vers le développement de systèmes d'infrastructure durables (respectueux de l'environnement, économes en énergie). Ils ont trouvé que l'utilisation des fines de verres dans le béton provoque des réaction pouzzolanique avec les hydrates de ciment, formant du silicate de calcium hydraté secondaire (C-S-H). De plus l'augmentation de l'ajout de verre, l'écoulement du mortier a légèrement augmenté tandis qu'un effet mineur sur l'ouvrabilité du béton a été noté.

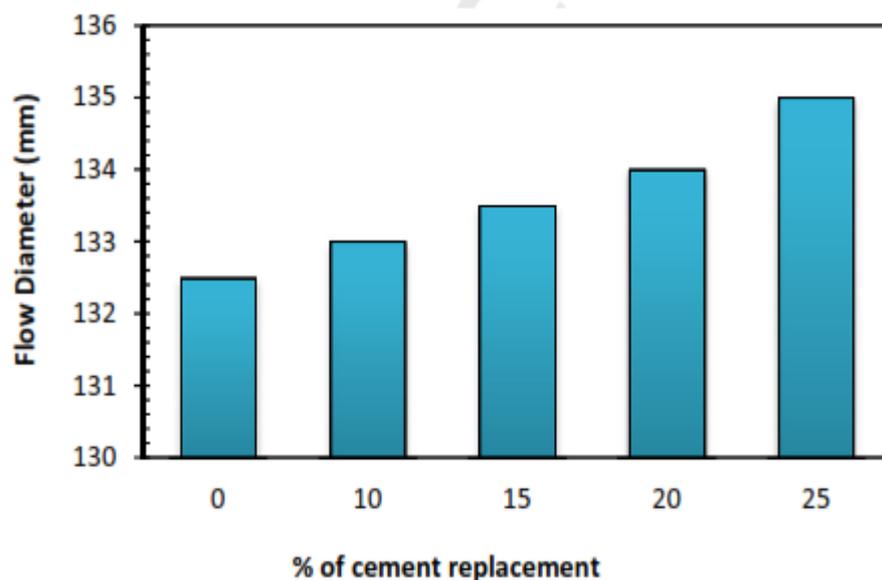


Figure 1.7 Etalement de différents mortiers contenant la poudre de verre (Islam et al., 2017).

Ainsi, les résultats des tests de résistance à la compression ont indiqué que le mortier et le béton de verre recyclé offraient une meilleure résistance par rapport aux échantillons témoins (Figure). Un remplacement de 20 % du ciment par des déchets de verre s'est avéré convaincant compte tenu du coût et de l'environnement.

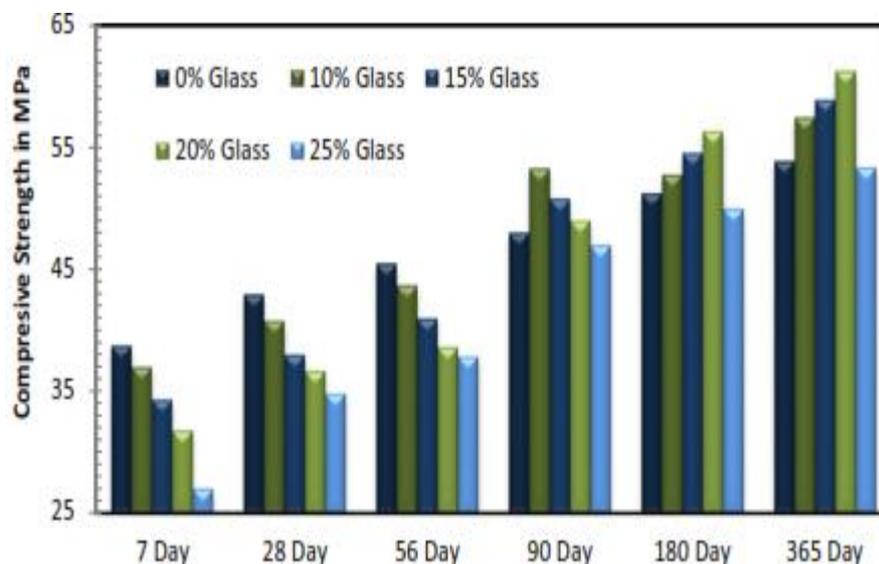


Figure 1.8 Résistance à la compression des bétons contenant de la poudre de verre (Islam et al., 2017).

1.3.2.2. Déchet de brique

À l'heure actuelle, les bâtiments construits dans les années 1970 et 1980 sont la principale source de déchets de démolition en Algérie. Au cours des années 70 et 80, la plupart des bâtiments étaient construits avec des briques d'argile frittées ; par conséquent, la teneur en ce déchets de démolition est aussi jusqu'à 60 %, en particulier dans les zones rurales.

Cependant, les déchets de brique ne sont convenus pas pour être utilisés comme granulats recyclés afin de fabriquer du béton à cause de sa faible résistance et de sa grande porosité, ce qui conduit à une mauvaise fluidité, une perte de résistance sévère et une mauvaise durabilité des bétons à base de granulats en brique recyclé.



Figure 1.9 Déchet de brique (site webe).

La littérature suggère que la poudre de brique broyée peut être utilisée comme ajout cimentaire en raison des riches ingrédients pouzzolaniques dans ses compositions minérales (Turanli et al., 2003). Ainsi, il est possible de remplacer le ciment par ce déchet. De plus, certains chercheurs ont montré que la poudre de brique a été ajoutée au béton avec des proportions appropriée afin d'améliorer les propriétés mécaniques du béton. Au cours des dernières recherches, des tests expérimentaux d'activité pouzzolanique ont confirmé que différents types de briques d'argile de différents pays européens présentaient de grandes activités pouzzolaniques. Une autre enquête a rapporté que la poudre de brique était largement utilisée dans les blocs de maçonnerie stabilisés au ciment. Les recherches de Ge ont exploré que la finesse du grain de la poudre de brique affecte la résistance du mortier.

(Q. Liu et al., 2020) a montré qu'un remplacement du ciment avec la poudre de brique est un moyen intéressant d'obtenir de bonnes propriétés de durabilité dans le béton.

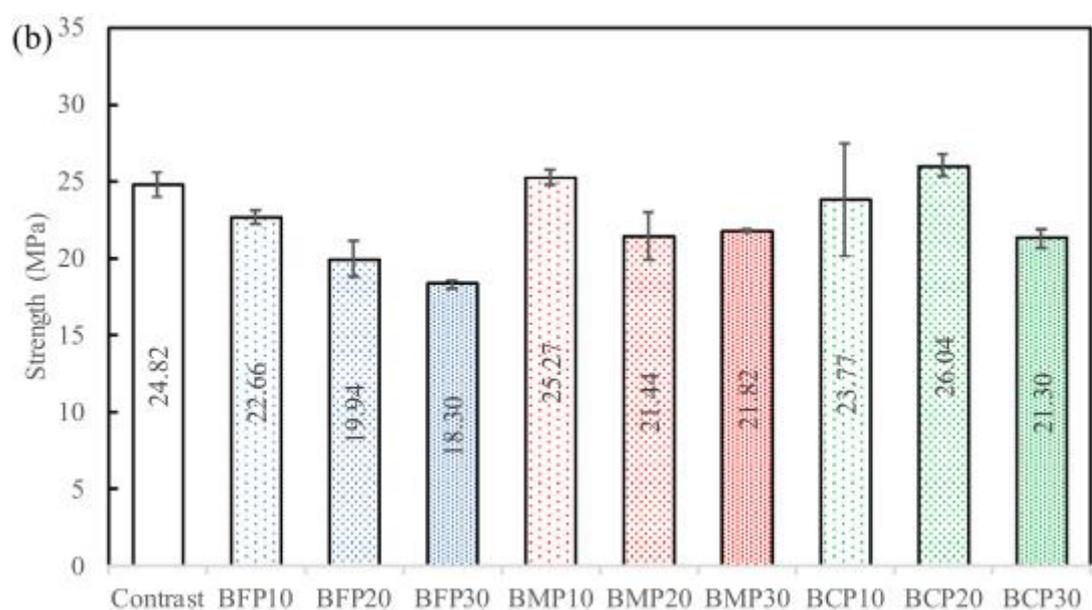


Figure 1.10 la résistance de poudre de brique (Q. Liu et al., 2020).

Selon (Q. Liu et al., 2020) la présence de 10% de poudre de brique peut améliorer la résistance des composites à base de ciment. Ainsi, plus la poudre recyclée est fine, plus elle consomme d'énergie pour la produire. Cependant, la poudre recyclée plus fine peut signifier une meilleure application grâce à une activité plus élevée et un meilleur effet de remplissage. Pour quantifier l'effet d'application, une efficacité de recyclage (R_e) est définie en divisant la résistance du mortier contenant poudre recyclée à la consommation d'énergie dans la préparation de cette poudre.

$$R_e = S_r/E$$

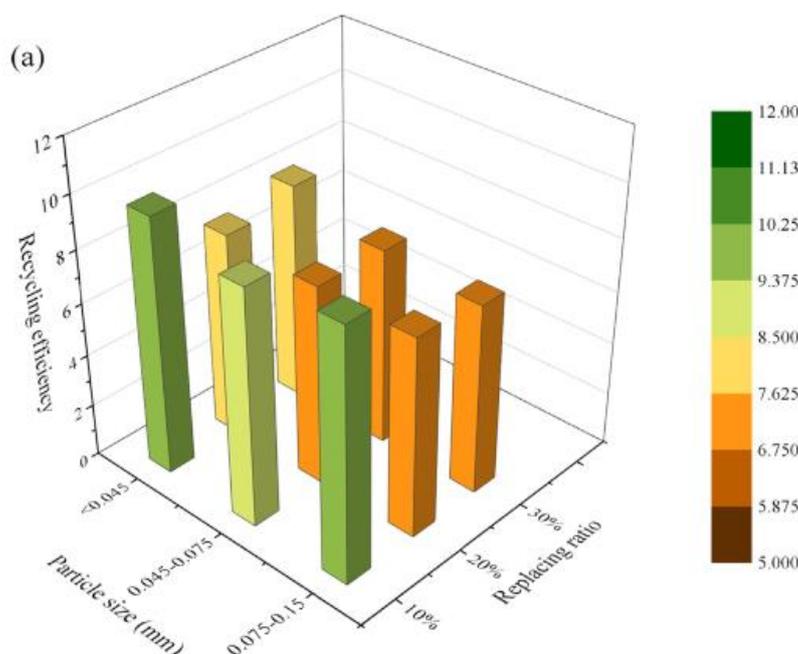


Figure 1.11 Efficacité de recyclage du mortier contenant de la poudre brique recyclée (Q. Liu et al., 2020).

1.3.2.3 Déchet de marbre

Le marbre a été couramment utilisé comme matériau de construction depuis l'Antiquité. L'élimination des déchets de l'industrie du marbre, composé de poudres très fines, est l'un des problèmes environnementaux à travers le monde.

Toutefois, ces déchets peuvent être utilisés économiquement avec succès pour améliorer certaines propriétés du béton frais et durci. Toutes les pierres naturelles qui peuvent être transformées industriellement comme coupées à la taille, polies, utilisées à des fins décoratives et économiquement précieuses sont appelées comme un marbre. Les États-Unis, la Belgique, la France, l'Espagne, la Suède, l'Italie, l'Égypte, le Portugal et la Grèce sont parmi les pays ayant une réserve considérable de marbre. La Turquie compte à elle seule 40% de réserve totale dans le monde. (Hebhoub et al., 2011) le produit marbriers algériens sont extraits et transformés

conformément aux normes européennes. Le taux de déchets est de 50.000 m³ (carrier à bloc) et 12000 tonne dérivés de marbre à Oran, 10.000m³ (carrière à bloc) à Guelma et 8.000m² (usine de transformation) à Sig. Dans cette recherche nous avons introduit les poudres de marbre du gisement de Fli-Fila.



Figure 1.12 Déchet de marbre (site webe).

De plus, la poussière du marbre est non biodégradable, ce qui génère divers risques environnementaux (Ali & Hashmi, 2014; Chahour & Safi, 2020; Kore et al., 2020). Dans cette optique, l'incorporation de ce déchet en remplacement partiel du ciment pour préparer des composites cimentaires écologiques, économiques et durables est de plus en plus acceptée. (S. Zhang et al., 2020)montrent que la substitution de 5 % de ciment par poudre de marbre (PM) est bénéfique pour améliorer les résistances à la compression et à la traction du béton de 15 % et 5 %, respectivement. De plus, il est conclu que le ciment peut être remplacé par du PM jusqu'à 10 %. En revanche, (Mashaly et al., 2016) ont remplacé le ciment par de la poudre de marbre de 0 % à 40 % et précisent que 20 % de MP améliorent les propriétés physiques et mécaniques du béton. Par ailleurs, (Benjeddou et al., 2020) ont constaté que le remplacement de 5 % de MP donnait les mêmes performances mécaniques qu'un mortier 100 % ciment, mais au-delà de ce taux, les résistances à la compression restaient inférieures par rapport au mortier témoin, expliquées par une

carence en quantité de silice réactive due à un niveau de remplacement plus élevé. Cette diminution, selon ces auteurs, la teneur en silice réactive a conduit à une diminution de la quantité de produits d'hydratation, essentiellement des CSH. Cependant, ils ont également trouvé une diminution associée de la résistance à la compression des mortiers avec l'augmentation de la finesse du MP. Selon (Li et al., 2018), les bétons contenant 10 % de MP montrent une augmentation des résistances à la compression, à la flexion et à la traction de 9,7 %, 16,94 % et 24,28 %, respectivement. De plus, (Danish et al., 2021) déclarent que presque toute la littérature publiée suggère que l'incorporation de MP en remplacement du ciment dans les composites cimentaires augmente les propriétés de durabilité telles que la carbonatation, la résistance à l'attaque des sulfates, la migration des chlorures et la réaction alcali-silice. Cela est dû à la diminution de la porosité des composites à base de MP. Ces auteurs estiment que l'incorporation de 5 % à 10 % de MP en remplacement du ciment peut réduire le coût de production des composites cimentaires jusqu'à 10 USD/m³.

D'après l'étude technique de l'effet de la présence de PM dans les mortiers à base de ciment, on constate que la résistance à la compression du mortier diminue légèrement avec l'augmentation de le contenu PM (Belkadi et al., 2022). En général, les mortiers ne sont pas utilisés dans les applications structurelles. Par conséquent, la réduction des effets nocifs sur l'environnement par la substitution du ciment par des déchets PM est valable et doit être effectuée dans des endroits proches des mines de marbre.

De plus, l'objectif de cette section est d'analyser économiquement la présence de déchets de marbre dans les mortiers. Pour cela, la cimenterie (Hadjar-soud skikda, Algérie) la plus proche de la carrière de marbre (Institut National de la Marbrerie Usine Enamarbre, Skikda, Algérie) a été choisie (Fig. 13). Cet emplacement est privilégié pour calculer les distances entre les fournisseurs de matériaux et où les déchets peuvent être utilisés.

Les frais de transport d'une tonne de déchets de marbre compte tenu de la distance et de la quantité de gasoil (<https://www.globalpetrolprices.com/As/>) qui sera consommée sont de 0,8 \$ pour 55 km. La figure 14 présente des estimations des coûts du nouveau ciment contenant différentes teneurs en PM.

D'après la Fig. 14, on peut voir que l'introduction de 20% PM réduit le coût total de fabrication du ciment à 24% selon les prix pratiqués en Algérie.



Figure 1.13. Schéma de la distance entre l'emplacement de la cimenterie et les fournisseurs de déchets de marbre (google Maps).

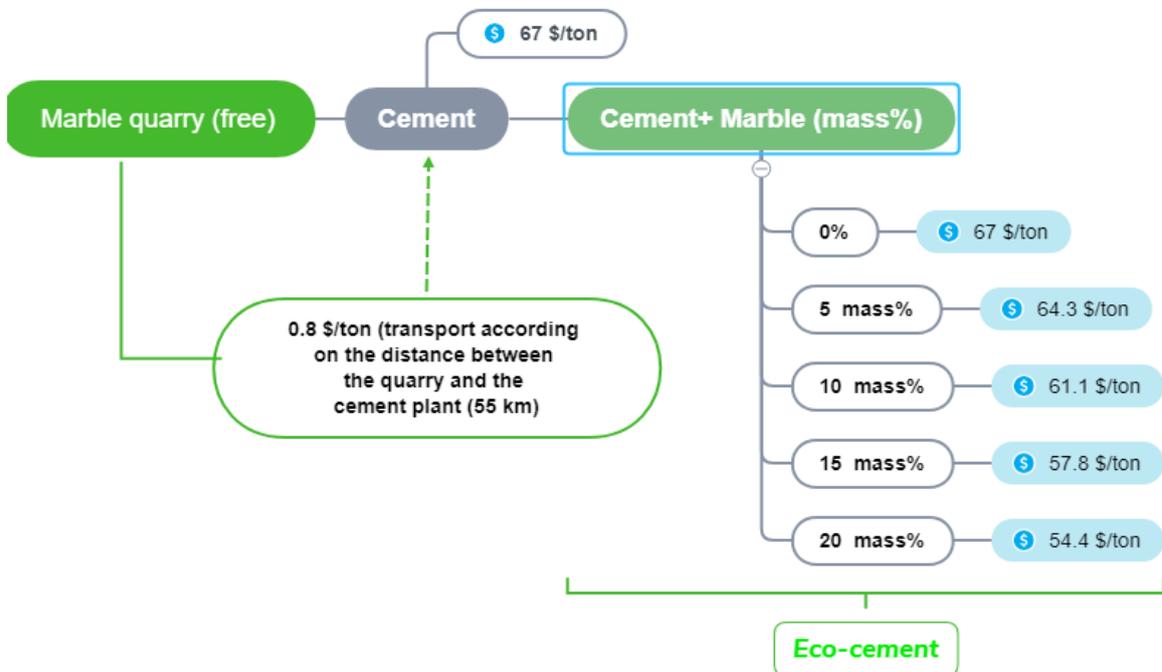


Figure 1.14 Coûts estimés du ciment et MP utilisés dans le mortier (en \$/tonne) (Belkadi et al., 2022).

1.4. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif définir les déchets recyclés et leur influence sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaire à court et à long terme. Les conclusions suivantes ont été tirées

1. L'ajout et l'augmentation successive de la quantité des déchets tels que verre et brique n'impliquent pas une variation significative de la quantité de l'eau de gâchage pour l'obtention d'une pâte de ciment à consistance normalisée.
2. la présence du verre dans les matériaux cimentaires provoque une diminution des performances mécaniques à jeune âge.
3. L'utilisation des déchets pouzzolaniques révèle une augmentation des performances mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) de mortier à long terme. Ceci est dû à la réaction pouzzolanique entre la silice et la portlandite.

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et méthodologie d'essai

Introduction

Dans ce chapitre on va faire une description détaillée sur des matériaux de bases et des essais expérimentaux utilisés afin de réaliser le programme expérimental de notre travail de recherche.

On utilise une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement pour confectionner des mortiers à base de laitier et de verre. Les différents composants utilisés sont :

- CEM I/42.5
- Laitier à haut fourneaux
- Poudre de verre
- Sable d'Oued Souf,
- Eau du robinet des réseaux urbains,
- Produit chimique CaCl_2 .

2.1. Matériaux de construction de base

2.2. Sable

La norme (NF P18-541) montre que le sable présente des caractéristiques, pouvant lui permettre d'être utilisé pour la confection des mortiers. De plus, le sable utilisé dans le domaine de bâtiments doit répondre à des exigences de qualité et à des caractéristiques spécifiques à chaque usage. Il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire. Le sable utilisé est de provenance du gisement d'Oued Souf, qui se situe à 620 Km au sud-est d'Alger, c'est un sable naturel (sable de dune), il est constitué principalement de petites particules de silice, propre dont les grains sont généralement de forme arrondie de dimension variant entre 0,08 et 3 mm.

2.1.1.1 Analyse granulométrique

Essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau (gravier ou sable) en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes et tracer la courbe granulométrique. La courbe granulométrie pour le sable utilisé est présentée dans la Figure 3.1.

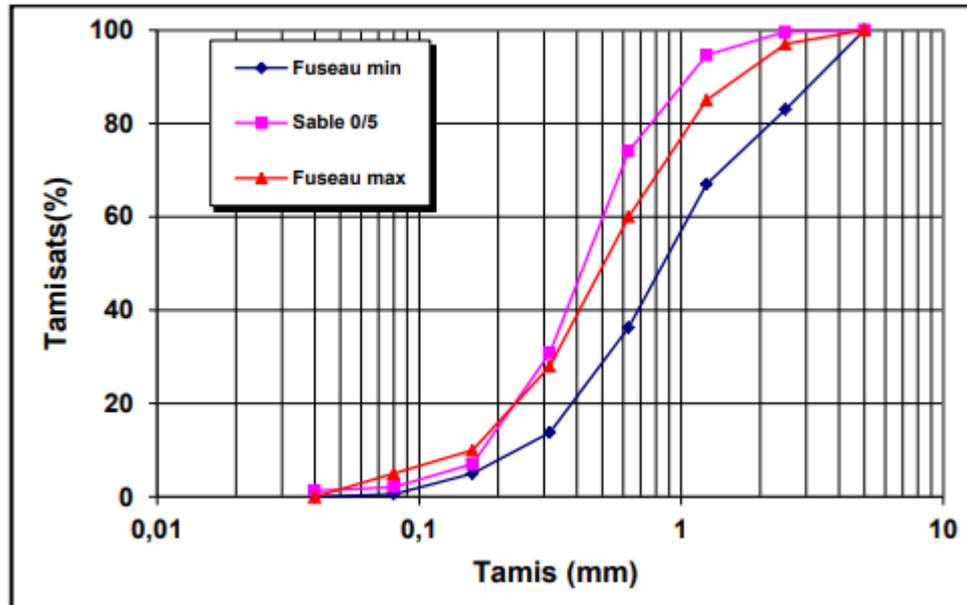


Figure 2. 2 Courbe granulométrique du sable d'Oeud souf.

2.1.1.2 Masse volumique absolue et apparente des granulats

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Différentes masses volumiques peuvent être définies pour les granulats : masses volumiques apparente et absolue (NF EN 1097-3). La masse volumique absolue (γ_{ab}) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Le Tableau 3.2 montre les masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé.

Tableau 2. 1 Valeurs des masses volumiques du sable.

	Absolue (kg/m ³)	Apparente (kg/m ³)
Sable	2608	1617

2.1.1.3 Caractéristiques physico-chimiques

L'équivalent de sable est un essai pour caractériser la propreté d'un sable. Le principe de cet essai est consisté à séparer le sable des particules fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette. Le tableau 3.2 montre les résultats de l'équivalent de sable (933-8+A1, 2015).

Tableau 2. 4 Valeurs de l'équivalent de sable.

	ESV/ESP
Sable	87; 85

2.1.2 Ciment

Le ciment utilisé est de type CEM I/ 42,5 provenant de Biskra. Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques fournis par la

cimenterie. Les résultats de la composition chimique du clinker du ciment sont représentés dans le tableau 2.5.

Tableau 2. 5 Caractéristiques chimiques et physique du ciment utilisé.

Elément	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Densité absolue (kg/m ³)	Densité apparente (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
CEMI 42.5	61,60	20,40	/	1,73	5,53	/	/	3,54	2,29	3100	/	3600

2.1.3 Déchets recyclés

Les déchets recyclés que nous avons utilisées dans notre étude sont caractérisées par une finesse inférieure à 80µm. De plus, poudre issue du béton démolis a été utilisée. Ainsi une poudre de verre issue du broyage de verre des vitres. Il a été fourni sous forme de pièces de dimension d'environ 5 cm, nettoyant de ses impuretés. Le déchet de verre a été introduit dans un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg et broyé jusqu'à l'obtention d'une poudre.

Les principales caractéristiques sont représentées dans le Tableau 2.6.

Tableau 2. 6 Composition chimique et physique du fumé de silice.

Elément	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	F ₂ O ₃	S	D	D	L
									ensité absolue (kg/m ³)	ensité apparente (kg/m ³)	a	finess e (cm ² /g)
Verre	8.81	7.07	1.485	2.62	1.52	0.42	/	0.31	0.16	2400	1000	4000

2.1.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau de robinet, qui alimente les laboratoires : de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

2.2 Composition des différents mélanges

Notre étude expérimentale a consisté à ajouter une teneur de 30% par rapport au poids du ciment des additions (laitier et verre). Le rapport ciment/sable (C/S) utilisé était de 1/3 (en poids). Le rapport (E/C) utilisé pour la fabrication des mortiers témoins était de 0,5. Les composants des mortiers ont été mélangés selon la norme EN 196-1. Afin de déterminer les paramètres mécaniques et physiques, les moules contenant les mortiers ont été recouverts d'un film plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Les échantillons ont été démoulés après 24 h et conservés dans l'eau à 20 ± 3°C jusqu'aux tests à 7, 28 et 60 jours. Les différentes compositions de nos mélanges sont données dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.

Quantité (kg/m ³)	MT	M-10V	M-15V	M-20V	M-10R	M-15R	M-20R	M-5V-5R	M-7.5V-7.5R	M-10V-10R
Ciment	450	405	382.5	360	405	382.5	360	405	382.5	360
Fine Recyclée	-	-	-	-	45	67.5	90	22.5	33.7	45
Verre	-	45	67.5	90	-	-	-	22.5	33.7	45
Sable	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Eau	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225

2.3 Essais de caractérisations

2.3.1 Préparation des échantillons

Le schéma suivant montre les principales procédures utilisées pour confectionner différents mortiers.



Méthode de malaxage :

- Introduction du ciment + l'eau+CaCl₂ (30 secondes vitesse lente)
- Introduction du sable (30 secondes)
- 90 secondes pose
- 60 secondes vitesse rapide

Mode de conservation 6 jours dans l'eau, ainsi à l'air.

Figure 2. 2 Méthode de malaxage et le mode de conservation.

2.3.2 Essais à l'état fais

La fluidité des matériaux cimentaires est la caractéristique généralement utilisée sur les chantiers pour juger de leur comportement rhéologique et notamment leur consistance. À ce stade, le test de fluidité a été réalisé en utilisant le test de la table à secousses, selon la norme ASTM C 1437–20 (C1437-20, 2020) avec un moule tronconique qui répond aux exigences de la norme (diamètres de 70 et 100 mm, hauteur de 50mm). Trois essais ont été réalisés par composition.

Les masses volumiques humides des mélanges ont été déterminés en utilisant le moule 4 x 4 x 16cm³. Ainsi, les masses volumiques apparentes sont les masses du volume apparent du produit durci des échantillons préparés de dimensions (40x40x160 mm³).



Figure 2. 3 Le test de fluidité selon la norme ASTM C 1437–20 (C1437-20, 2020).

2.3.3 Résistances mécaniques

2.3.3.1. Résistance à la compression et à la flexion

L'évaluation de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion a été effectuée à 7, 28 et 60 jours, selon la norme EN 196-1 (196-1, 2018) sur des échantillons de dimensions (40 × 40 × 160 mm³).



Figure 2. 4 Appareilles de l'essai de compression et de flexion.

2.3.4. Absorption d'eau

L'absorption d'eau a ensuite été étudiée. C'est un paramètre important lors de l'évaluation et de la prévision de la durabilité des structures en mortier. L'objectif de ce test est donc de suivre la masse d'eau absorbée par les mortiers dans le temps pour mettre en évidence une éventuelle différence de porosité ouverte de nos mélanges. Ce test a été réalisé à 28 jours selon la procédure décrite dans la norme (EN 1015-18) (1015-18, 2002).

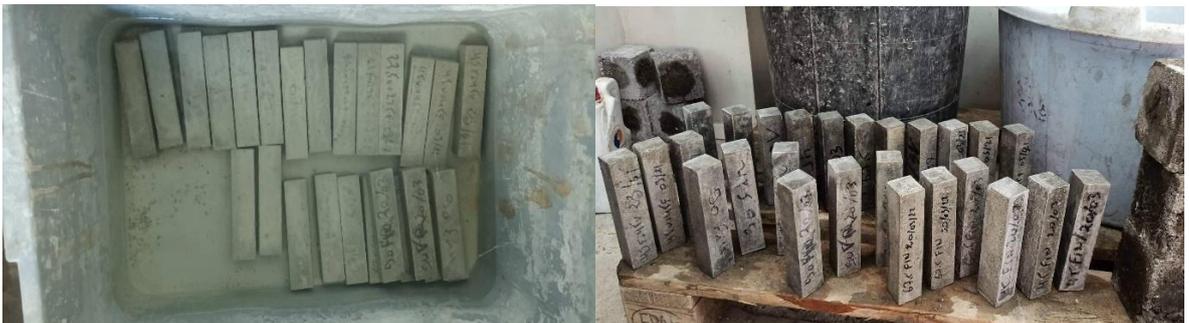


Figure 2. 5 l'essai d'absorption d'eau

2.3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les essais de caractéristique des matériaux de base des différents mélanges. Les constituants sont conformes aux normes et recommandations pour leur utilisation dans les mortiers hydrauliques. Ce qui nous facilite l'adoption d'une approche de formulation adéquate. Ces caractéristiques intrinsèques des différents constituants nous permettent de comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges sous différentes sollicitation.

Chapitre III : Résultats et discussion

3.1. Introduction

Le travail suivant s'intéresse aux performances à l'état frais et durcis telles que : Etalement, la densité humide, mécaniques et physico-chimiques des mortiers cimentaires à base de fines issues des bétons recyclés ou de verre.

3.2. Propriétés à l'état frais

3.2.1. Etalement

L'essai de l'étalement est un test important qui évalue les propriétés à l'état frais des mortiers. Figure 4.1 présente les résultats du diamètre de l'étalement des mortiers confectionnés.

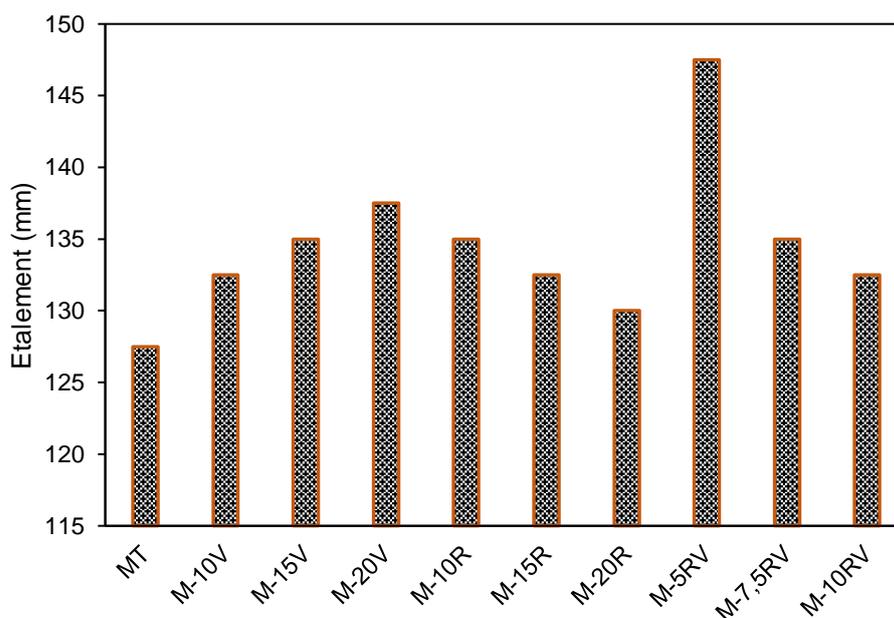


Figure 3.1. Diamètre de l'étalement de différents mélanges.

D'après la figure 4.1 on constate que l'introduction des fines de verre provoque une augmentation de l'étalement des mortiers. Cette augmentation est variée en fonction de la teneur de la poudre de verre à titre d'exemple les mélanges M-10V, M-15V et M-20V présentent un étalement est égal 132mm, 135mm, 138 mm respectivement. Cependant l'effet des fines recyclées est le contraire que celle du verre. Pour être plus précis, les mélanges M-10R, M-15R et M-20R révèlent un étalement est égal 137 mm, 132 mm, 130 mm respectivement. Ceci est dû à l'absorption d'eau élevée de fines recyclées. Quant aux mélanges M-5RV, M-7.5RV et M-10RV nous a donné une augmentation de l'étalement des mortiers.

3.2.2. Masse volumique au jeune âge

La détermination de la masse volumique humide se fait selon les directives de la norme EN 12390-7 :2009.

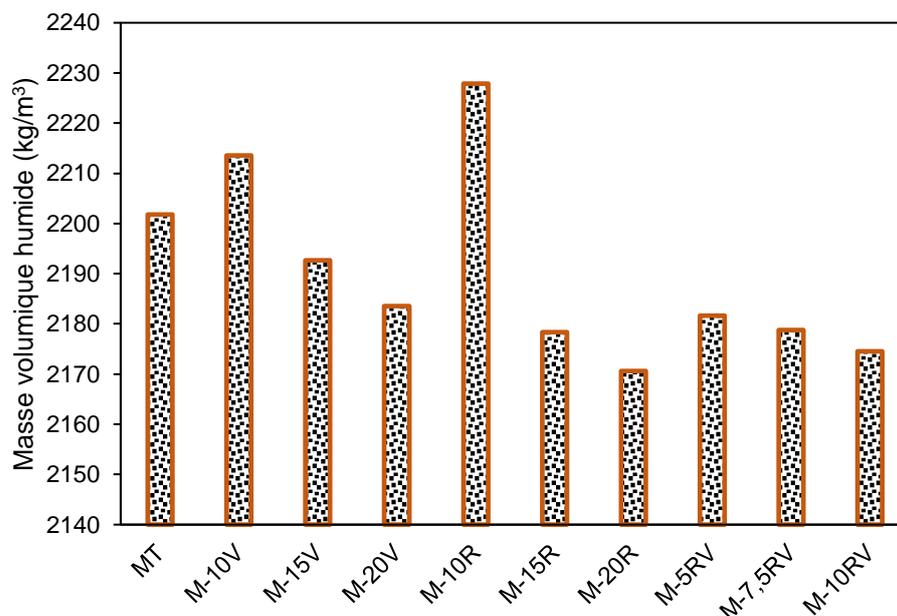


Figure.3.2. Masse volumique humide de différents mélanges.

D'après les résultats de la figure 4.2, on remarque une diminution quasi-linéaire des masses volumiques des mortiers en fonction de la poudre de verre et de fine recyclés. Cependant la présence de 10% de FN et V présente une légère augmentation de la densité. Ceci est probablement dû à l'effet de remplissage qui améliore la compacité du mélange. L'introduction plus de 10% des ces poudres provoque une diminution de la densité. Ces diminutions constatées, s'expliquent par le fait que la masse volumique de l'ajout utilisé est nettement plus faible que celle du clinker.

3.3. Propriétés à l'état durci

3.3.1. Résistance à la flexion

L'essai de rupture par flexion a été effectué sur des éprouvettes prismatiques de $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ en mortier normal, et consiste à appliquer une charge concentrée au milieu de la portée. Les résultats des essais de ruptures à la flexion sont reportés dans la figure 4.3.

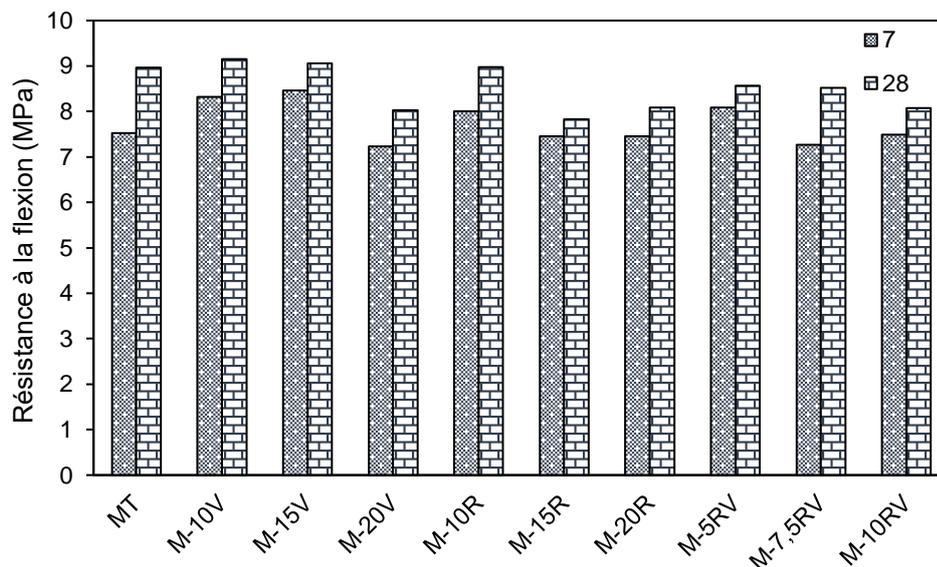


Figure 3.3. Résistance à la flexion des différents mortiers utilisés.

La figure 3.3 présente l'évaluation de la résistance à la flexion d'un mortier formulé avec la poudre de verre et/ou les fines recyclées. D'après les résultats, on remarque que le rapport de flexion de mélange M-10V et M-10R en 28/7 jours est le meilleur que les autres rapports de flexion des autres mortiers.

Ces résultats permettent de conclure que, les résistances à la flexion des ciments élaborés à base de la poudre de verre et les fines recyclées dépassent la résistance de l'échantillon de référence (sans ajout) pour une teneur qui ne dépasse pas à 10%. Ces accroissements des résistances se développent grâce notamment à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H. la combinaison entre le Verre et la fine recyclée ne présente pas un bon comportement flexionnel. Ceci est probablement dû à la mauvaise compatibilité entre les deux poudres.

3.3.2. Résistance à la compression

L'essai de compression consiste à soumettre les éprouvettes de forme carrée issus du test de flexion entre deux plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées.

La figure 4.4 illustre l'effet de la présence des poudres verre et/ou fine recyclée sur la résistance à la compression des différents mortiers.

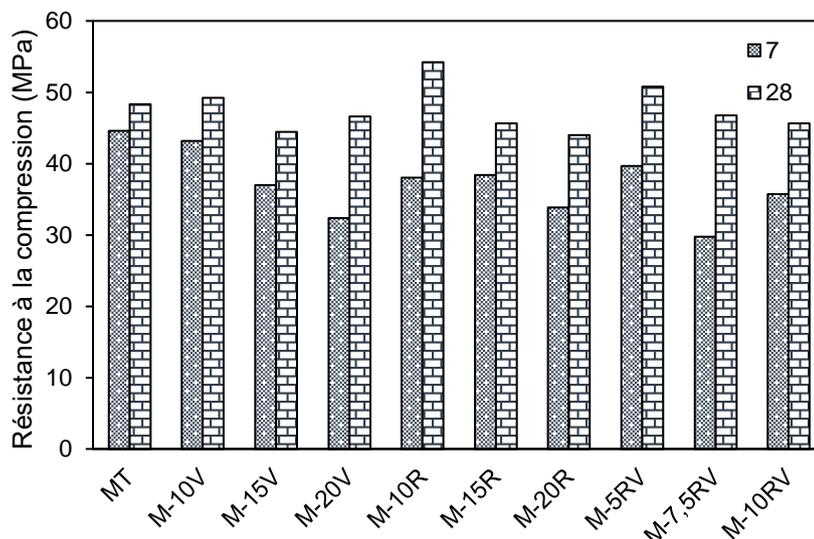


Figure 3.4 Résistance à la compression des différents mortiers.

La résistance à la compression à 7 et à 28 jours pour chaque mélange est indiquée dans la figure 4.4. On constate une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement par la poudre de verre et de fine recyclée augment. La résistance à la compression à 28 jours des mélanges avec M-10V, M-15V et M-20V ont montré des résistances égales à 49 MPa, 45 MPa et 47 MPa respectivement. Cependant, la résistance du mélange avec M-10R a augmenté considérablement la résistance avec 15% par rapport au témoin. Cette amélioration peut être due à des effets de remplissage des pores (effets physiques) ainsi un effet pouzzolanique de cette poudre. La combinaison entre 5% la poudre de R et 5% de la poudre V révèle une augmentation de résistance à 28 jours avec 4%.

3.3.3. Corrélation entre la résistance à la flexion et à la compression

L'évaluation de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion a été effectuée à 7 et 28 jours, sur des échantillons de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ Cm}^3$).

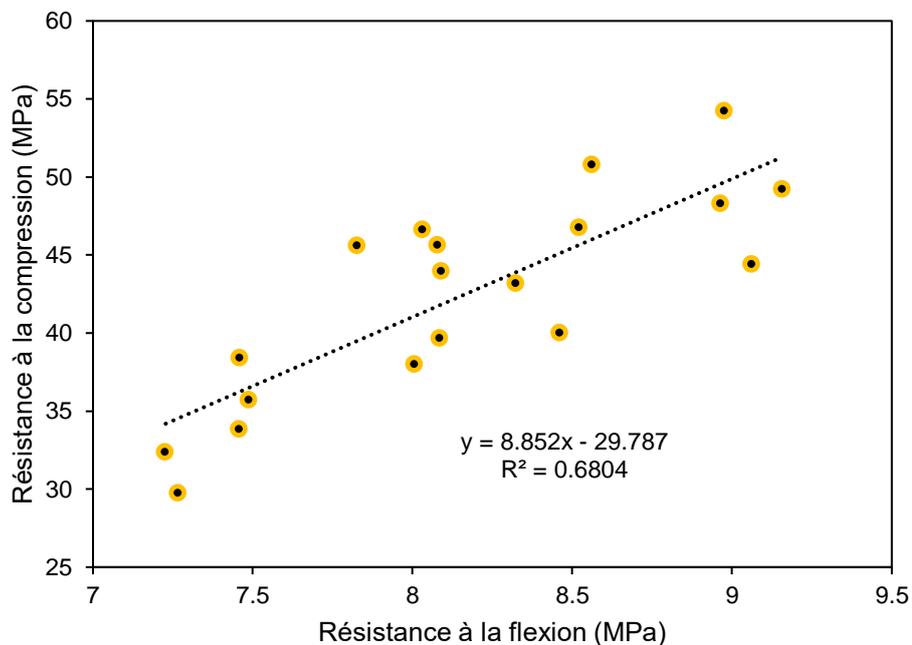


Figure.3.5 Corrélation entre la résistance à la compression et à la flexion des différents mortiers.

On constate qu'il y a une bonne corrélation (relation linéaire) entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression avec un coefficient de corrélation est égal de $R^2 = 0.68$. De plus, on remarque que la résistance à la flexion augmente, la résistance à la compression s'augmente proportionnellement. La fonction de la corrélation est $R_c = 8.85RF - 29.78$

3.3.4. Vitesse de l'ultrason

L'auscultation par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif pour savoir généralement l'homogénéité du béton ou du mortier, qui détermine la vitesse de propagation des ondes longitudinales à travers des éléments en béton ou en mortier. Le principe de la méthode comprend la mesure du temps nécessaire à une onde pour parcourir une distance donnée. La relation entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance à la compression est influencée par de nombreuses variables, telles que l'âge du mortier, les conditions d'humidité...etc.

Figure 3.6 présente la vitesse de l'ultrason qui se traverse un prisme de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

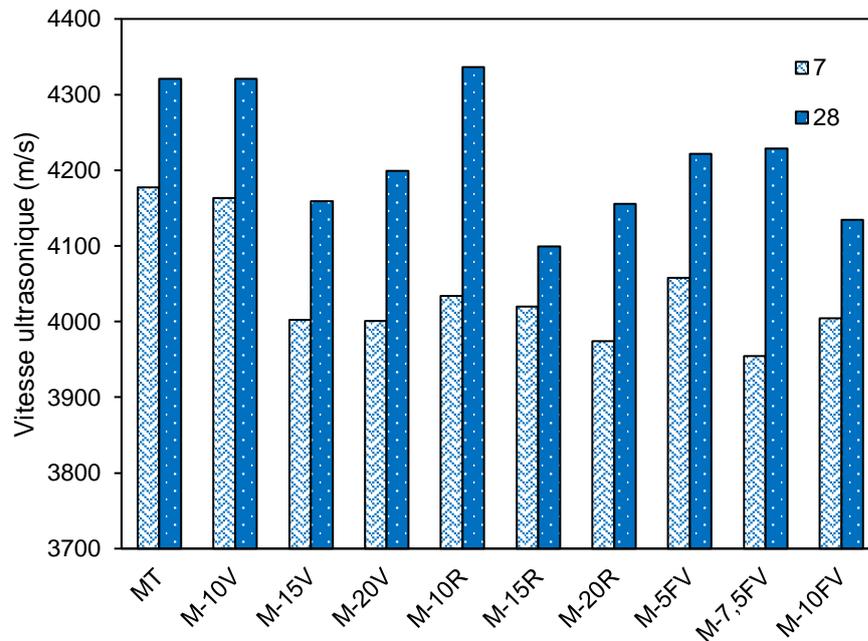


Figure.3.6 Vitesse de l'ultrason de différents mortiers confectionnés.

Pour une meilleure précision, nous avons répété l'essai trois fois sur chaque éprouvette, et nous avons par la suite calculé la moyenne des trois mesures obtenues sur chaque éprouvette de mortier. D'après la figure 4.6 on constate que les vitesses de l'ultrason pour ces mortiers diminuent avec l'augmentation du taux des poudres de verre et des fines recyclées. Cependant les meilleurs mélanges sont M-10V et M-10R qui représentent une vitesse de son à 28 jours légèrement plus élevée que MT. Ces résultats confirment ceux qui a trouvé pour la résistance à la compression et à la flexion.

3.3.5. Corrélation entre la vitesse de l'ultrason et la résistance à la compression

La figure 4.7 présente la courbe de de corrélation établie entre la résistance à la compression par écrasement RC et les vitesses ultrasoniques correspondantes.

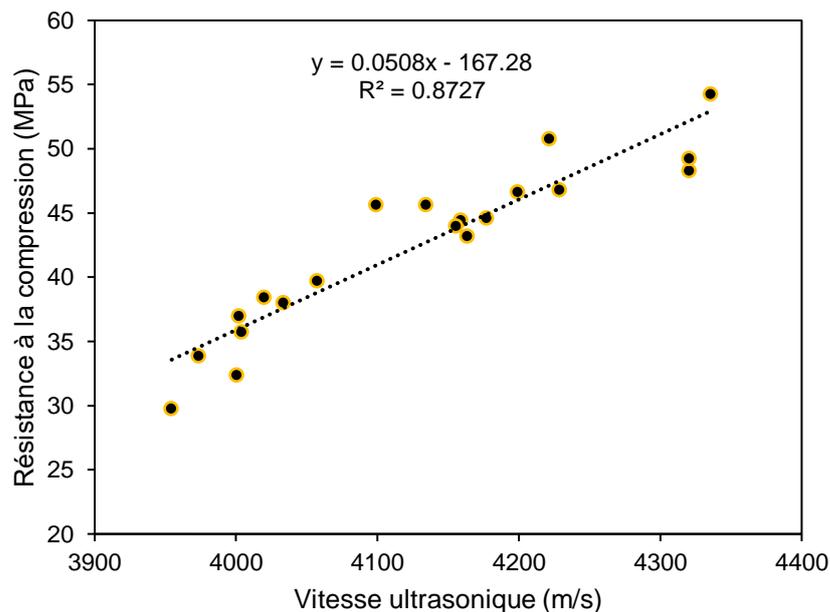


Figure.3.7 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique des différents mortiers.

On constate qu'il y a une bonne corrélation (relation linéaire) entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique avec un coefficient de détermination est égal de $R^2 = 0.87$. De plus, on remarque que la vitesse ultrasonique s'augmente, la résistance à la compression s'augmente proportionnellement. L'expression proposée est égale $R_c = 0.05VS - 167.28$.

3.3.6. Absorption d'eau

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée. Rappelons que l'essai consiste à un séchage des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 150°C . Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée de l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle.

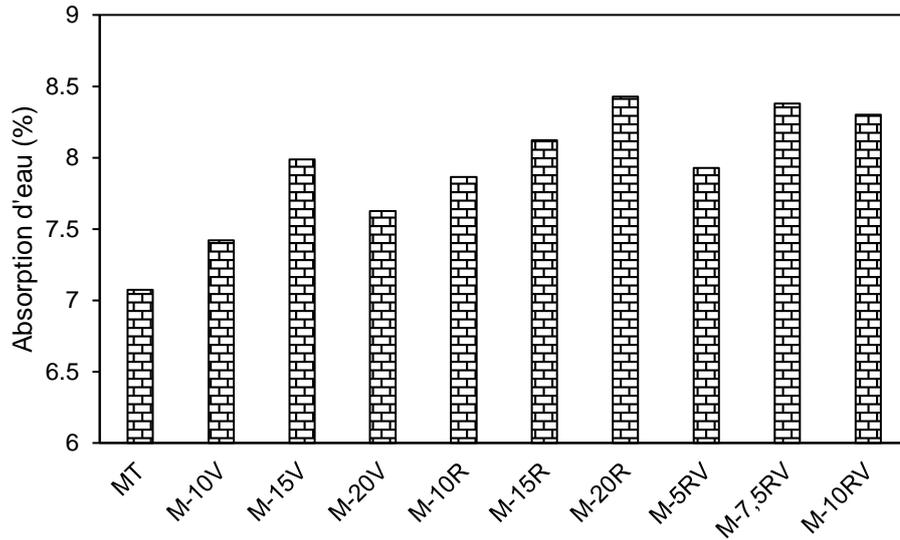


Figure.3.8. Absorption d'eau des différents mélanges.

D'après la figure 3.8 nous remarquons que l'augmentation de la substitution du ciment par la poudre de verre et de fines recyclées induit une augmentation de l'absorption d'eau par immersion totale. Cette augmentation est peut-être due à l'effet de la réaction pouzzolanique tardive qui induit plus de pores au jeune âge dans le mortier. De plus, les mortiers avec fines recyclés présentent une absorption d'eau plus que M-V et MT. Ceci est probablement dû à l'absorption élevés de ces poudres provoquant une augmentation de l'absorption des M-R.

3.3.7. Masse volumique sèche

D'après la figure 4.9 on note une diminution de la masse volumique sèche dans tous les mélanges après l'augmentation de la teneur de substitution du ciment par les déchets recyclés.

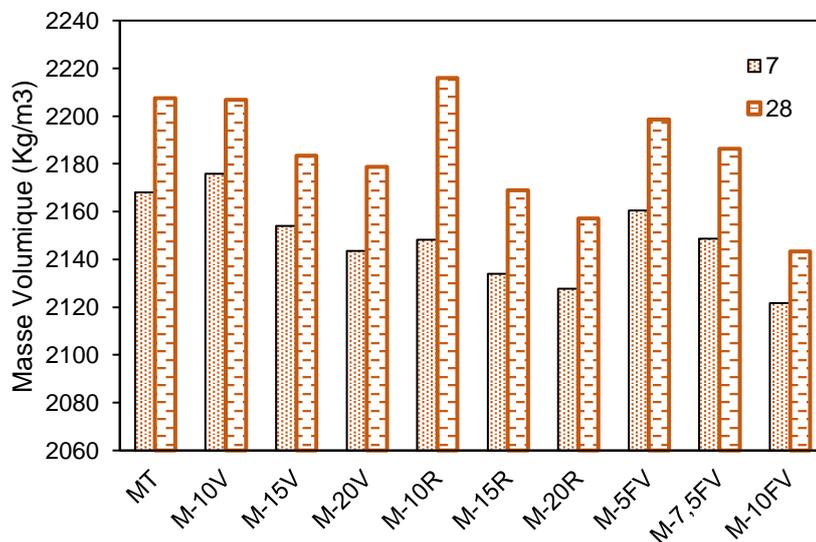


Figure.3.9. Masse volumique sèche des différents mélanges.

Cependant le mélange qui contient M-10R subit une légère augmentation de la masse par rapport au témoin confirmant les résultats de la résistance à la compression et la vitesse de l'ultrason.

3.3.8. Corrélation entre la masse volumique et la vitesse ultrasonique

La figure 4.10 présente la courbe de corrélation établie entre la masse volumique et la vitesse ultrasonique.

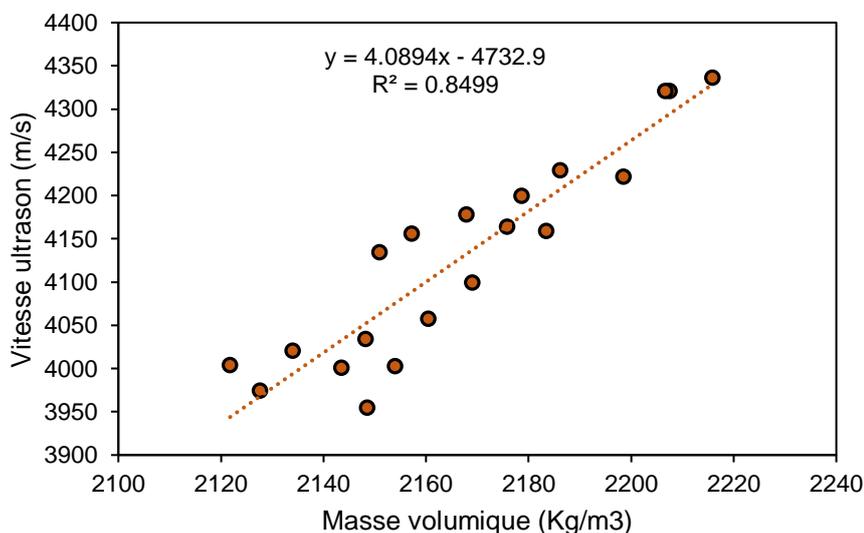


Figure.3.10 Corrélation entre la masse volumique et la vitesse ultrasonique des différents mortiers.

On constate qu'il y a une bonne corrélation (relation linéaire) entre la masse volumique sèche et la vitesse ultrasonique avec un coefficient qui est égal à $R^2 = 0.85$. De plus, on remarque que la vitesse ultrasonique s'augmente, la masse volumique sèche s'augmente proportionnellement. L'expression proposée est égale $VS = 4.09\rho_s - 4732.9$.

3.4. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence le rôle important de la fine issue des bétons recyclés et de verre avec différents taux de substitution sur le comportement mécanique et les propriétés de transfert des mortiers cimentaires. Le remplacement de 10 % de fines recyclées dans le ciment présente des performances mécaniques intéressantes du mortier par rapport au mortier témoin. Par ailleurs, le remplacement au-delà de 10% les propriétés mécaniques et physiques se diminuent en comparant avec le mortier sans addition. La combinaison fine issue de béton de recyclé et poudre de verre a un effet moins que l'ajout d'addition seule. Cependant l'ajout de deux additions recyclées présente des performances similaires par rapport au MT. De plus la présence de ces déchets rend les matériaux cimentaires plus économiques et écologiques.

Conclusion générale

L'objectif de notre étude était de voir l'effet de poudre de verre et de poudre de fine de béton dans les mortiers cimentaires sur les plans : état frais et performances mécaniques et physiques.

Pour cela, poudre de verre et de fine de béton ont été utilisées en remplacement partiellement du ciment avec différents pourcentages 10%, 15% et 20%. Ainsi on a fait une combinaison entre les deux fines avec les teneurs précédentes divisées en deux. L'approche est essentiellement expérimentale on peut tirer les conclusions suivantes :

En se basant sur les résultats obtenus, on peut dire qu'il est possible d'utiliser ces deux fines dans les mortiers cimentaires avec un taux qui ne dépasse pas 10%. Ainsi la présence de 10 de fines recyclées dans le ciment présente des performances mécaniques intéressantes du mortier par rapport au mortier témoin et au mortier à base de verre à 28 jours. Par ailleurs, le remplacement au de-là de 10% les propriétés mécaniques et physiques se diminuent en comparant avec le mortier sans addition. La combinaison fine issue de béton démolé et poudre de verre a un effet moins que l'ajout d'addition seule. Cependant l'ajout deux additions recyclées présente des performances similaires par rapport au MT. De plus la présence de ces déchets rend les matériaux cimentaires plus économique et écologique.

A partir ces résultats on va attester de la viabilité scientifique du recyclage de ces produits en tant qu'ajouts minéraux dans la fabrication d'éco-ciment et, par conséquent, d'éliminer le besoin de stocker ces matériaux dans des usines de recyclage/stockage.

Références

- 196-1, E. (2018). Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
- 933-8+A1, N. E. (2015). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable.
- Ali, M. M., & Hashmi, S. (2014). An experimental investigation on strengths characteristics of concrete with the partial replacement of cement by marble powder dust and sand by stone dust. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2(7), 360-368.
- Belkadi, A. A., Kessal, O., Chiker, T., Achour, Y., Rouabhi, A., Messaoudi, O., & Khouadjia, M. L. K. (2022). Full Factorial Design of Mechanical and Physical Properties of Eco-mortars Containing Waste Marble Powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-14.
- Benjeddou, O., Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Soussi, C., Khadimallah, M. A., Alabduljabbar, H., & Tahir, M. M. (2020). Utilisation of waste marble powder as low-cost cementing materials in the production of mortar. *Journal of Building Engineering*, 32, 101642.
- C1437-20, A. (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, . ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Chahour, K., & Safi, B. (2020). Mechanical behavior and chemical durability of marble-based mortar: Application to panels subjected to punching. *Construction and building materials*, 232, 117245.
- Charlot-Valdieu, C. (1993). LES DECHETS DE DEMOLITION OU DE CHANTIER-ETAT DES LIEUX.
- Chen, Z., & Chen, G. (2011). An overview of energy consumption of the globalized world economy. *Energy Policy*, 39(10), 5920-5928.
- Danish, A., Mosaberpanah, M. A., Salim, M. U., Fediuk, R., Rashid, M. F., & Waqas, R. M. (2021). Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites: a review on sustainability benefits and critical challenges. *Journal of Building Engineering*, 102600.
- Douaïssia, Z., Merzoud, M., Habita, M. F., & Benazzouk, A. (2021). Effets du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques et sur la réaction alcali silice des mortiers à base de verre recyclé. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 26(1), 78-91.
- Frías, M., Martínez-Ramírez, S., de la Villa, R. V., Fernández-Carrasco, L., & García, R. (2021). Reactivity in cement pastes bearing fine fraction concrete and glass from construction and demolition waste: Microstructural analysis of viability. *Cement and Concrete Research*, 148, 106531.
- Frías, M., Vigil de la Villa, R., Martínez-Ramírez, S., Fernández-Carrasco, L., Villar-Cociña, E., & García-Giménez, R. (2020). Multi-Technique characterization of a fine fraction of CDW and assessment of reactivity in a CDW/Lime system. *Minerals*, 10(7), 590.
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171.
- Islam, G. S., Rahman, M., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 37-44.
- Kore, S. D., Vyas, A., & Kabeer KI, S. A. (2020). A brief review on sustainable utilisation of marble waste in concrete. *International Journal of Sustainable Engineering*, 13(4), 264-279.
- Li, L., Huang, Z., Tan, Y., Kwan, A., & Liu, F. (2018). Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar. *Construction and building materials*, 166, 423-432.

- Liu, G., Florea, M., & Brouwers, H. (2018). The hydration and microstructure characteristics of cement pastes with high volume organic-contaminated waste glass powder. *Construction and Building Materials*, 187, 1177-1189.
- Liu, Q., Li, B., Xiao, J., & Singh, A. (2020). Utilization potential of aerated concrete block powder and clay brick powder from C&D waste. *Construction and Building Materials*, 238, 117721.
- Mashaly, A. O., El-Kaliouby, B. A., Shalaby, B. N., El-Gohary, A. M., & Rashwan, M. A. (2016). Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 731-741.
- Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H., Kurmus, H., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 443-467.
- Moreno-Juez, J., Vegas, I. J., Gebremariam, A. T., García-Cortés, V., & Di Maio, F. (2020). Treatment of end-of-life concrete in an innovative heating-air classification system for circular cement-based products. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121515.
- Naik, T. R. (2008). Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(2), 98-103.
- NOUI, A. (2018). *Contribution à l'étude des caractéristiques physiques et mécaniques et de la durabilité des ciments ternaires*, Université de M'sila].
- Rashad, A. M. (2015). A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement—A guide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2), 278-306.
- Rossignolo, J. A., Rodrigues, M. S., Frias, M., Santos, S. F., & Junior, H. S. (2017). Improved interfacial transition zone between aggregate-cementitious matrix by addition sugarcane industrial ash. *Cement and Concrete Composites*, 80, 157-167.
- Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, conservation and recycling*, 52(2), 234-247.
- Turanli, L., Bektas, F., & Monteiro, P. (2003). Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1539-1542.
- Zhang, C., Hu, M., Yang, X., Miranda-Xicotencatl, B., Sprecher, B., Di Maio, F., Zhong, X., & Tukker, A. (2020). Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121718.
- Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J., & Sun, B. (2020). Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 117980.
- Zheng, K. (2016). Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 67, 30-38.
- Zhou, L., Wang, W., Liu, R., & Thomas, B. G. (2013). Computational modeling of temperature, flow, and crystallization of mold slag during double hot thermocouple technique experiments. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(5), 1264-1279.