

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de

Doctorat en sciences

Filière : Génie civil

Option : Matériaux de construction

Valorisation des déchets plastiques (Les sacs) dans la fabrication des mortiers

Présentée par :

HAOUARA Selma

Soutenue publiquement le : 07 /07/2025

Devant le jury composé de :

Pr. MELLAS Mekki	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. ZEGHICHI Leila	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. IZEMMOUREN Ouarda	MCA	Co-Rapporteur	Université de Biskra
Pr. GHRIEB Abderrahmane	Professeur	Examineur	Université de Djelfa
Dr. NECIRA Brahim	MCA	Examineur	Université de Djelfa
Dr. BOUGLADA Mohamed Saleh	MCA	Examineur	Université de Batna2
Pr. GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Invité	Université de Biskra
Dr. MEZGHICHE Bouzidi	MCA	Invité	Université de Biskra

REMERCIEMENTS

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force et la santé nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

*En premier lieu, je tiens à remercier sincèrement mon encadrante, le **Pr. Leila ZEGHICHI**, pour sa guidance précieuse, ses encouragements constants, et ses conseils avisés tout au long de ce travail. Sa confiance en mes capacités et son soutien permanent ont été essentiels à l'aboutissement de cette recherche.*

*Je souhaite exprimer une reconnaissance particulière à ma co-encadrante **Dr. Ouarda IZEMMOUREN**, dont le soutien, la patience et les conseils éclairés ont grandement enrichi ce travail. Merci pour votre disponibilité et votre perspicacité.*

Je remercie également les membres de mon jury, d'avoir accepté d'évaluer et de juger ce travail et pour leur temps précieux qui l'ont consacré à lire ce manuscrit, et leur bienveillance à l'égard de ce travail.

Je n'oublie pas ma famille : mes parents, et à mon mari et mes enfants dont l'amour et le soutien indéfectible m'ont porté dans les moments de doute, merci pour votre patience, votre compréhension, et votre encouragement constant.

Un remerciement tout particulier va à mes collègues et amis, qui ont toujours été là pour m'encourager et croire en moi sans relâche. Votre soutien indéfectible a été une source constante de motivation pour moi.

*Je tiens également à remercier ceux qui m'ont aidé à finaliser ce manuscrit : **Dr. Afaf ZEROUAL** et **Dr. Amina MASMOUDI**, votre aide précieuse, et votre disponibilité ont grandement contribué à la qualité de ce manuscrit.*

RÉSUMÉ

L'utilisation fréquente de sacs en polyéthylène haute densité (PEHD), offerts aux caisses des magasins et marchés, a entraîné plusieurs problèmes environnementaux car ces sacs sont souvent jetés après avoir été utilisés une seule fois. La gestion des déchets plastiques, notamment ceux provenant des sacs plastiques, constitue un défi environnemental majeur à l'échelle mondiale. Cette thèse explore une approche innovante visant à valoriser ces déchets en tant qu'agrégats dans la fabrication de mortiers pour le secteur de la construction. L'étude se concentre sur l'effet de l'incorporation de déchets des sacs PEHD déchiqueté ou granulés par fusion sur les propriétés mécaniques, thermiques et la durabilité du mortier. Les déchets de sacs plastiques sont d'abord collectés, lavés et transformés en granulats par deux procédés : broyage mécanique (déchiquetage) ou fusion thermique. Ces matériaux recyclés sont ensuite intégrés dans des formulations de mortier à différents pourcentages de substitution du sable naturel ou à différents pourcentages d'addition (ajout) à la formulation du mortier normal afin d'obtenir un mortier composite PEHD. Les performances du mortier composite sont évaluées en termes de résistance mécanique, de durabilité et d'aptitude à l'utilisation dans le confort thermique.

Les résultats montrent qu'il est recommandé d'utiliser du sable concassé, et ne pas dépasser une substitution de 10% pour le PEHD granulé pour obtenir une maniabilité et résistance mécanique acceptable. La conductivité thermique la plus faible a été détectée dans le mortier avec substitution de sable de 4,45% de PEHD déchiqueté et 30% PEHD granulé par fusion avec une amélioration de ce dernier par addition de la poudre de déchet d'Aluminium (1% du poids du ciment). L'incorporation du déchet des sacs PEHD déchiquetés dans le mortier de teneur 3% en addition ou 3% en substitution et de rapport eau/ciment (0,5), présentant une maniabilité et une résistance à la compression ainsi qu'à la flexion proche à celles du mortier de référence, mais une ductilité et une durabilité supérieures. Cette approche innovante pourrait être intégrée dans les pratiques de construction durable, contribuant ainsi à la protection de l'environnement et à la promotion de matériaux de construction écologiques.

Mots clés : Sacs PEHD, Granulats plastiques, Propriétés mécaniques, Isolation thermique, Substitution des agrégats, Ajout d'agrégats, Impact environnemental, Mortier léger, durabilité du mortier.

ABSTRACT

The frequent use of high-density polyethylene (HDPE) bags, offered at checkouts in stores and markets, has led to several environmental problems as these bags are often discarded after being used only once. The management of plastic waste, especially from plastic bags, is a major environmental challenge worldwide. This thesis explores an innovative approach to valorize these wastes as aggregates in the manufacture of mortars for the construction sector. The study focuses on the effect of incorporating shredded or melt-granulated HDPE bag waste on the mechanical and thermal properties and durability of the mortar. Plastic bag waste is first collected, washed and transformed into aggregates by two processes: mechanical grinding (shredding) or thermal melting. These recycled materials are then integrated into mortar formulations at different percentages of natural sand substitution or at different percentages of addition (addition) to the normal mortar formulation to obtain a composite HDPE mortar. The performance of the composite mortar was evaluated in terms of mechanical strength, durability, and suitability for use in thermal comfort.

The results show that it is recommended to use crushed sand, and not exceed a 10% substitution for granulated HDPE to achieve acceptable workability and mechanical strength. The lowest thermal conductivity was detected in the mortar with sand substitution of 4.45% shredded HDPE and 30% fusion-granulated HDPE, with the latter improved by the addition of aluminum waste powder (1% of the cement weight). The incorporation of shredded HDPE bag waste into the mortar with 3% addition or 3% substitution content and a water/cement ratio of 0.5, presented the same workability and mechanical strength close to those of the reference mortar, but superior ductility and durability. This innovative approach could be integrated into sustainable construction practices, thus contributing to environmental protection and the promotion of green building materials.

Keywords: HDPE Bags, Plastic Aggregates, Mechanical Properties, Thermal Insulation, Aggregate Substitution, Aggregate Addition, Environmental Impact, Lightweight Mortar, Mortar Durability.

أدى الاستخدام المتكرر لأكياس البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)، المعروضة عند نقاط الدفع في المتاجر والأسواق، إلى العديد من المشاكل البيئية، إذ غالبًا ما تُرمى هذه الأكياس بعد استعمالها مرة واحدة فقط. تُمثل إدارة النفايات البلاستيكية، وخاصةً الأكياس البلاستيكية، تحديًا بيئيًا كبيرًا على مستوى العالم. تستكشف هذه الأطروحة نهجًا مبتكرًا لتثمين هذه النفايات كمواد خام في تصنيع الملاط لقطاع البناء. تُركز الدراسة على تأثير دمج نفايات أكياس البولي إيثيلين عالي الكثافة الممزقة (المقطعة) أو المنصهرة على الخصائص الميكانيكية والحرارية وديمومة الملاط.

تُجمع نفايات الأكياس البلاستيكية أولًا، وتُغسل، وتُحوّل إلى مواد خام من خلال عمليتين: الطحن الميكانيكي (التقطيع) أو الصهر الحراري. ثم تُدمج هذه المواد المُعاد تدويرها في تركيبات الملاط بنسب متفاوتة من استبدال الرمل الطبيعي أو بنسب متفاوتة من الإضافة إلى تركيبة الملاط العادية للحصول على ملاط مركب من البولي إيثيلين عالي الكثافة. تم تقييم أداء الملاط المركب من حيث المقاومة الميكانيكية و الديمومة وملاءمته للاستخدام في ظروف الراحة الحرارية.

أظهرت النتائج أنه يُنصح باستخدام رمل المحجرة، مع عدم تجاوز نسبة استبدال البولي إيثيلين عالي الكثافة الحبيبي بالإنصهار 10% لتحقيق قابلية تشغيل مقاومة ميكانيكية مقبولة. وقد لوحظت أدنى ناقلية حرارية في الملاط عند استبدال الرمل بنسبة 4.45% من البولي إيثيلين عالي الكثافة المقطع و30% من البولي إيثيلين عالي الكثافة الحبيبي المنصهر، مع تحسين هذا الأخير بإضافة مسحوق نفايات الألومنيوم (1% من وزن الأسمنت). وقد أدت إضافة 3% من نفايات أكياس البولي إيثيلين عالي الكثافة المقطع في الملاط، أو 3% من الاستبدال، ونسبة ماء إلى أسمنت 0.5، إلى تحقيق نفس قابلية التشغيل و المقاومة الميكانيكية (للضغط و الإنحناء)، وهي قريبة من تلك الموجودة في الملاط المرجعي، مع ليونة و ديمومة أعلى. ويمكن دمج هذا النهج المبتكر في ممارسات البناء المستدامة، مما يُسهم في حماية البيئة وتعزيز استخدام مواد البناء الخضراء.

الكلمات المفتاحية: أكياس البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)، الركام البلاستيكي، الخصائص الميكانيكية، العزل الحراري، استبدال

الركام، إضافة الركام، التأثير البيئي، الملاط الخفيف، ديمومة الملاط.

LISTE D'ABREVIATION

ASTM	American society for testing and materials
C ₂ S	Silicate bicalcique
C ₃ A	Aluminate tricalcique
C ₃ S	Silicate tricalcique
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique
CSH	Silicates de calcium hydratés
DP	Déchets Plastiques
DRX	Diffraction des rayons X
E-plastic	Plastic Electronique et électrique
Ed	Module d'élasticité dynamique
GDP	Granulats des déchets plastiques
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic
GP	Granulat plastique
HIPS	Polystyrène à haut impact
ITZ	Zone de Transition Interfaciale
MCL	Mortier composite léger
MEB	Microscope à balayage électronique
MOP	Microscope optique
NF EN	Norme européenne
PC	Polycarbonate
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène basse densité
PEHD	Polyéthylène haute densité
PET	Polyéthylène téréphtalate
PP	Polypropylène

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	III
ملخص.....	IV
LISTE D'ABREVIATION	X
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XVI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
I.1 Introduction	5
I.2 Provenance des plastiques	5
I.3 Les différents types de plastiques	6
I.4 L'éthylène	8
I.5 Le polyéthylène haute densité (PEHD)	9
I.5.1 Historique	9
I.5.2 Définition du PEHD	9
I.5.3 Caractéristiques du PEHD	10
I.5.4 Présentations commerciales	10
I.5.5 Exemples d'applications courantes du PEHD	11
I.6 Les sacs plastiques PEHD	12
I.6.1 Fabrication	12
I.6.2 La différence entre les sacs plastiques PEHD et ceux en PEBD	13
I.6.3 Propriétés chimiques des sacs PEHD	14
I.6.4 Consommation des sacs plastiques	15
I.6.5 Les sacs plastiques après consommation	16

I.6.6	Impact environnemental des déchets des sacs plastiques	16
I.6.7	Impacts des sacs en polyéthylène sur l'économie	20
I.6.8	Recyclage des sacs plastiques.....	20
I.7	Recyclage des déchets plastiques	21
I.7.1	Les contraintes du recyclage des Déchets plastiques (DP).....	21
I.7.2	Processus de recyclage.....	21
I.7.3	Méthodes de recyclage.....	23
I.8	La valorisation des DP dans les matériaux de construction	24
I.8.1	Préparation des agrégats plastiques	24
I.8.2	Propriétés des granulats plastiques	27
I.8.3	Les avantages de valorisation des DP dans les matériaux de construction.....	27
I.8.4	Exemples d'applications de la valorisation des DP dans les matériaux de construction	28
I.9	Analyse des recherches antérieures sur l'influence des GP sur les propriétés du mortier / béton composite	30
I.9.1	L'effet des GP sur la maniabilité des bétons ou mortiers composites.....	31
I.9.2	L'effet des GP sur la masse volumique apparente du mortier composite.....	33
I.9.3	La porosité accessible à l'eau	36
I.9.4	L'effet des GP sur la résistance à la compression.....	37
I.9.5	L'effet des GP sur la résistance à la flexion	38
I.9.6	Caractéristiques de la rupture des matériaux composites contenant des agrégats plastiques.....	40
I.9.7	L'effet des GP sur la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV).....	42
I.9.8	Module d'élasticité	43
I.9.8.1	Le module d'élasticité dynamique (E_d).....	43
I.9.9	Le module d'élasticité statique (le module de Young E).....	44
I.9.10	L'absorption capillaire.....	46
I.9.11	Pénétration des ions chlorures	47
I.9.12	Résistance à l'attaque sulfatique.....	48
I.9.13	Conductivité thermique	49

I.10 Influence de la poudre d'aluminium sur les propriétés thermomécaniques des mortiers	51
I.10.1 Influence de la poudre d'aluminium sur la maniabilité des mortiers	52
I.10.2 Influence de la poudre d'aluminium sur la densité des bétons.	52
I.10.3 Influence de la poudre d'aluminium sur la porosité des bétons.	52
I.10.4 L'effet de la poudre d'aluminium sur la résistance à la compression	53
I.10.5 L'effet de la poudre d'aluminium sur la résistance à la flexion.....	54
I.11 l'effet de la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique des matériaux cimentaire..	54
I.11.1 L'effet de la nature du sable sur la maniabilité des matériaux cimentaires	55
I.11.2 L'effet de la nature du sable sur la résistance mécanique des matériaux cimentaires.....	56
I.12 Conclusion	57
CHAPITRE II : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS	60
II.1 Introduction	60
II.2 Présentation du plan expérimental	60
II.3 Préparation des granulats plastiques	63
II.3.1 Granulats PEHD granulés par fusion	63
II.3.2 Préparation des granulats PEHD déchiquetés.....	64
II.3.2.1 Collecte et tri des sacs plastiques.....	64
II.3.2.2 Découpage manuel.....	64
II.3.2.3 Déchiquetage et Lavage.....	64
II.3.2.4 Rinçage et séchage	65
II.3.2.5 Tamisage et stockage.....	65
II.4 Caractéristiques des matériaux	66
II.4.1 Le Ciment.....	67
II.4.2 Les Sables.....	67
II.4.3 Granulat PEHD.....	68
II.4.3.1 PEHD granulé par fusion.....	68
II.4.3.2 PEHD déchiqueté.....	70
II.4.4 L'eau de gâchage.....	71

II.4.5	Le déchet d'aluminium.....	71
II.5	Préparation et durcissement des éprouvettes	72
II.5.1	Compositions des différents mélanges du mortier.....	72
II.5.1.1	Mortier de référence	72
II.5.1.2	Mortiers composites avec substitution en PEHD granulé par fusion.....	73
II.5.1.3	Mortiers composites (déchet des sacs PEHD déchiquetés).....	75
II.5.2	Procédures de malaxage.....	76
II.5.3	Conservation des éprouvettes	77
II.6	Les essais effectués	77
II.6.1	Les essais effectués à l'état frais	77
II.6.1.1	Mesure de la maniabilité.....	77
II.6.1.2	La masse volumique du mortier frais.....	78
II.6.2	Les essais effectués à l'état durci	79
II.6.2.1	La porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente.....	79
II.6.2.2	Résistance à la flexion	80
II.6.2.3	Résistance à la compression	80
II.6.2.4	L'essai de la vitesse de l'impulsion ultrasonique (UPV).....	80
II.6.2.5	Module d'élasticité dynamique.....	81
II.6.2.6	Mesure de la conductivité thermique	81
II.6.2.7	Absorption capillaire	82
II.6.2.8	Résistance au milieu agressif (L'acide sulfurique H ₂ SO ₄).....	84
II.6.2.9	Pénétration des ions de chlorure.....	84
II.7	Conclusion	85
CHAPITRE III. IMPACT DU TAUX DE PEHD GRANULES ET LA NATURE DU SABLE SUR LA MANIABILITE ET LA RESISTANCE MECANIQUE DU MORTIER COMPOSITE.....		86
III.1	Introduction	86
III.2	Impact du taux de PEHD granulés sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite.....	87

III.2.1	L'influence de la substitution en PEHD sur la maniabilité du mortier	87
III.2.2	L'influence de la substitution en PEHD sur la résistance mécanique (compression - flexion) du mortier.....	88
III.3	Impact de la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier	90
III.3.1	L'effet du type de sable sur la maniabilité du mortier composite PEHD.....	90
III.3.2	L'effet de la nature du sable sur la résistance à la compression du mortier composite (PEHD)...	92
III.3.3	L'effet de la nature du sable sur la résistance à la flexion du mortier composite (PEHD)	94
III.4.	Conclusion	95
 CHAPITRE IV : AMELIORATION DU COMPORTEMENT PHYSICO-THERMIQUE DES MORTIERS COMPOSITES PAR ADDITION DES DECHETS D'ALUMINIUM.....		
IV.1	Introduction	97
IV.2	Evaluation de la maniabilité des mortiers composites	97
IV.3	Evaluation de la densité apparentes et la porosité des mortiers composites	98
IV.4	Evaluation de la résistance à la flexion	101
IV.5	Evaluation de la résistance à la compression	102
IV.6	La conductivité thermique	104
IV.7	Conclusion	105
 CHAPITRE V : ETUDE DE L'IMPACT DU MODE D'INCORPORATION DES PEHD DECHIQUETES (ADDITION / SUBSTITUTION) SUR LES PERFORMANCES MECANQUES ET LA DURABILITE DES MORTIERS COMPOSITES		
V.1	Introduction	107
V.2	Evaluation des propriétés physiques	108
V.2.1	Etude de la maniabilité du mortier composite.....	108
V.2.2	Etude de la masse volumique apparente des mortiers composites	110
V.2.4	La porosité	112
V.3	Evaluation des propriétés mécaniques	113
V.3.1	La résistance à la compression.....	113
V.3.2	La résistance à la flexion.....	116
V.3.3	Caractéristiques de la rupture des mortiers composites PEHD	118

V.3.4 La vitesse de propagation des impulsions ultrasonores.....	119
V.3.5 Modules d'élasticité dynamique.....	121
V.4 Evaluation de la conductivité thermique	123
V.5 Evaluation de la durabilité face à des environnements agressifs	124
V.5.2 L'absorption capillaire	124
V.3.5 Résistance au milieu agressif (acide sulfurique).....	126
V.3.5.1 Examen visuel	126
V.3.5.2 Evaluation de la perte de masse.....	127
V.3.5.3 Pertes de résistance.....	129
V.3.6 Pénétration des ions chlorures (ASTM C1202)	131
V.9 Conclusion	133
CONCLUSION GÉNÉRALE	135
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	138
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	139

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

Figure I. 1 : Processus de transformation du pétrole (REYNE 1998).....	6
Figure I. 2 : Les plastiques (REYNE, 1998).....	7
Figure I. 3 : Le molécule Ethène	9
Figure I. 4 : Le polyéthylène PE.....	9
Figure I. 5 : Polyéthylène basse densité.....	9
Figure I. 6 : Polyéthylène haute densité.....	9
Figure I. 7 : Structure de la chaîne moléculaire du PEHD $H_2C=CH_2$	10
Figure I. 8 : PEHD granulés cylindriques.....	11
Figure I. 9 : PEHD granulés lenticulaires	11
Figure I. 10 : PEHD en poudre.....	11
Figure I. 11: bouteilles PEHD	12
Figure I. 12: PEHD en tuyauterie	12
Figure I. 13: Jouets PEHD	12
Figure I. 14: Accessoires jardin PEHD.....	12
Figure I. 15: Membranes d'étanchéité PEHD	12
Figure I. 16: Résumé des étapes de fabrication des sacs (Muthu & Li, 2014)	13
Figure I. 17: Les inondations de Bangladesh	18
Figure I. 18: l'enchevêtrement et l'ingestion de débris marins (Tough 2007)	18
Figure I. 19: Sac en plastique étouffant le corail (Tough 2007).....	19
Figure I. 20: La mort d'une baleine par les déchets plastiques.....	19
Figure I. 21: Machine de déchiquetage et granulation de plastique (Abdulkader I. Al-Hadithi and Alani 2018) 25	
Figure I. 22: Granulats de déchets des bouteilles PET en tailles similaires à celles du sable (Abdulkader I. Al-Hadithi and Alani 2018)	25
Figure I. 23: Aspect des granulats fins naturels et PVC (Senhadji et al. 2015)	25
Figure I. 24: Aspect des granulats moyens naturels et les granulats PVC moyens (3/8) (Senhadji et al. 2015).....	25
Figure I. 25: Utilisation du PEHD comme matériau de construction (Abeyasinghe et al., 2021).....	30
Figure I. 26: l'effet du pourcentage de substitution de GP fin sur l'ouvrabilité des bétons (Almeshal et al. 2020).32	
Figure I. 27: l'effet du pourcentage de substitution de GP fin sur la densité du béton (Almeshal et al. 2020)	35
Figure I. 28: Variation de la résistance à la compression du béton à 28 jours avec différentes substitutions en granulats plastiques (Almeshal et al. 2020).....	38
Figure I. 29: Variation de la résistance à la flexion du béton à 28 jours avec différentes substitutions en granulats plastiques (Almeshal et al. 2020)	39
Figure I.30: État des éprouvettes après les essais de flexion et en compression (Badache et al., 2018)	41
Figure I.31: Comparaison de l'état de rupture de l'éprouvette du béton conventionnel avec des éprouvettes des bétons composites (avec GP) (Senhadji et al., 2015)	41

Figure I. 32: L'état des éprouvettes après l'essai de compression selon Hannawi et al (Hannawi et al., 2010) ...	41
Figure I. 33: Variation du module d'élasticité à 28 jours avec différents taux de remplacement des agrégats plastiques. (Almeshal et al. 2020)	45
Figure I. 34: Les surfaces de rupture des éprouvettes contenant différentes teneurs en Al (Shabbar et al., 2017)	53

CHAPITRE II : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS

Figure II. 1: Organigramme résumant les étapes de recherche mené dans cette étude.	61
Figure II. 2: Diagramme représentatif des essais sur matériaux utilisés et mortiers étudiés	62
Figure II. 3: Présentation d'une chaîne technologique de fabrication des granulats plastiques par fusion [171]..	63
Figure II. 4: PEHD granulé par fusion	64
Figure II. 5: Sacs PEHD	66
Figure II. 6: Découpage manuel	66
Figure II. 7: Hachoir à hélices	66
Figure II. 8: Déchiquetage et Lavage des sacs.....	66
Figure II. 9: Rinçage des sacs déchiquetés	66
Figure II. 10: Séchage à l'étuve	66
Figure II. 11: Tamisage au tamis 5mm	66
Figure II. 12: sacs (PEHD) déchiquetés	66
Figure II. 13: Stockage	66
Figure II. 14: CEM II/ A-L 42.5 N de la cimenterie de Ain Touta	67
Figure II. 15: Analyses granulométriques des sables utilisés (EN 933-2)	68
Figure II. 16: Détermination de la masse volumique apparente	69
Figure II. 17: détermination de la masse volumique absolue	69
Figure II. 18: La courbe granulométrique du PEHD granulé par fusion par rapport à celles des sables.....	69
Figure II. 19: Densité apparente du PEHD déchiqueté.....	71
Figure II. 20: Densité absolue du PEHD déchiqueté par la méthode du ballon.....	71
Figure II. 21: Le déchet d'aluminium à l'état brut	72
Figure II. 22: Le déchet d'aluminium broyé (la poudre d'Al)	72
Figure II. 23: le sable et la substitution en PEHD des mortiers : MR3(a), MR4(b) et les mélanges (sable + PEHD) : de MR4 (c) et de MR1 (d).....	76
Figure II. 24: Les étapes de malaxage des mortiers.....	76
Figure II. 25: Les éprouvettes prismatiques(4x4x16) avant démoulage	77
Figure II. 26: Les éprouvettes cubiques (5x5x5) avant démoulage	77
Figure II. 27: Conservation des éprouvettes dans l'eau.....	77
Figure II. 28: La table à secousses	78
Figure II. 29: Mesure du diamètre d'étalement	78
Figure II. 30: La masse volumique apparente du mortier frais	78
Figure II. 31: Mesure de la porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente.....	79
Figure II. 32: Essai de la résistance à la flexion du mortier.....	80

Figure II. 33: Essai de la résistance à la flexion du mortier.....	80
Figure II. 34: L'essai de la vitesse de l'impulsion ultrasonique.....	81
Figure II. 35: Le CT mètre	82
Figure II.36: Mesure de la conductivité thermique.....	82
Figure II. 37: l'essai de l'absorption par capillarité	83
Figure II. 38: imperméabilisation des surfaces latérales de l'éprouvette de mortier.....	83
Figure II. 39: schéma de l'essai de l'absorption capillaire	83
Figure II. 40: Mesure de la pénétration des ions de chlorure.....	85

Chapitre III. Impact du taux de PEHD granulés et la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite

Figure III. 1: L'effet de la substitution en PEHD sur la maniabilité du mortier	87
Figure III. 2: L'effet de la substitution en PEHD sur la résistance à la compression.....	88
Figure III. 3: L'effet de la substitution en PEHD sur la résistance à la flexion	88
Figure III. 4 : RTI entre la matrice cimentaire et PEHD	89
Figure III. 5 : Variation de l'étalement du mortier composite (PEHD) en fonction de la nature du sable.....	90
Figure III. 6: L'effet de la nature du sable sur la résistance à la compression des mortiers composites (PEHD) ...	92
Figure III. 7: L'effet de la nature du sable sur la résistance à la flexion des mortiers composites.....	94

Chapitre IV : Amélioration du comportement physico-thermique des mortiers composites par addition des déchets d'aluminium.

Figure IV. 1 : Variation de l'étalement des différents mortiers composites	98
Figure IV. 2: Densité apparente et porosité du mortier en fonction du % PEHD et % Al.	99
Figure IV. 3: Expansion du mortier contenant la poudre d'Aluminium	99
Figure IV. 4 : Microscope Vidlikovy MPB-2	100
Figure IV. 5: Mortier composite PEHD sans Aluminium	101
Figure IV. 6: Mortier composite PEHD avec 0,5% d'Aluminium	101
Figure IV. 7: Mortier composite PEHD avec 1% d'Aluminium	101
Figure IV. 8: La résistance à la flexion des mortiers composites	101
Figure IV. 9: Résistance à la compression des mortiers composites après 7 et 28 jours.	102
Figure IV.10 : La microstructure du mortier témoin (a) et des deux mortiers composites M5 (b) et M3 (c).....	103
Figure IV.11 : Image SEM de la zone d'interface (PEHD-matrice cimentaire).....	103
Figure IV. 12: La conductivité thermique des différentes compositions de mortiers.....	104

Chapitre V : Etude de l'impact du mode d'incorporation des PEHD déchiquetés (addition / substitution) sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers composites

Figure V. 1: Evaluation de la maniabilité des mortiers selon le mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté..	108
--	-----

Figure V. 2: Mortier ferme dû à la présence des déchets des sacs PEHD déchiquetés.....	108
Figure V. 3: L'effet du mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté sur la masse volumique apparente des différents mortiers.....	110
Figure V. 4: Evaluation de la porosité des mortiers composites	112
Figure V. 5: L'effet du mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté sur la résistance à la compression du mortier composite	114
Figure V. 6: L'effet du mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté sur la résistance à la flexion du mortier composite	116
Figure V. 7 : L'état de rupture du mortier contenant des substitutions en sacs PEHD déchiqueté.....	120
Figure V. 8 : Les particules PEHD déchiqueté détachés de la pâte de ciment.....	120
Figure V. 9: Evaluation de VPU des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés.....	119
Figure V. 10: Surface de rupture de MR4.....	121
Figure V. 11: Evaluation du module d'élasticité dynamique des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés	121
Figure V. 12: Evaluation de la conductivité thermique des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés	123
Figure V. 13: Evaluation de l'absorption capillaire des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés.....	124
Figure V. 14: Etat des éprouvettes des mortiers (MT, MR1, MR2, MR3 et MR4) après 28 jours d'immersion dans H ₂ SO ₄	127
Figure V. 15: Etat des éprouvettes des mortiers (MT, MJ1, MJ2, MJ3 et MJ4) après 28 jours d'immersion dans H ₂ SO ₄	127
Figure V. 16: Evolution de la perte de masse des mortiers composites en j jours d'immersion dans H ₂ SO ₄	128
Figure V. 17: Evaluation de la résistance à la compression des mortiers composites après 28 jours d'immersion dans H ₂ SO ₄	130
Figure V. 18: Eprouvette écrasées par compression après immersion pendant 28jours dans H ₂ SO ₄	131
Figure V. 19: Pénétrabilité des ions chlorure des mélanges de mortier à 7, 14 et 28 jours	132
Figure V. 20: mesure de la pénétrabilité des ions de chlorure.....	132

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

Tableau I. 1: Applications des plastiques vierges et recyclés (Siddique, Khatib, and Kaur 2008).....	8
Tableau I. 2 : La différence entre un sac PEHD et un sac PEBD	14
Tableau I. 3: Propriétés des polymères couramment utilisés et des composants du béton (Jacob-vaillancourt & Sorelli, 2018).....	27
Tableau I.4: Brevets pour l'utilisation de déchets plastiques comme granulats dans les composites cimentaires ..	29
Tableau I. 5: Variation de la densité des matériaux de construction ayant des pourcentages variables de granulats plastiques (Zulkernain et al., 2021)	33

CHAPITRE II : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS

Tableau II. 1: Composition chimique (%) du ciment	67
Tableau II. 2: Caractéristiques des sables utilisés	68
Tableau II. 3: Caractéristiques du déchet des sacs PEHD déchiquetés.....	70
Tableau II. 4 : Composition chimique du déchet d'aluminium.....	71
Tableau II. 5: Formulation de base du mortier pour une gâchée	72
Tableau II. 6: Compositions des mortiers avec substitution en PEHD granulé	73
Tableau II. 7: Compositions des mortiers avec substitution en PEHD granulé selon la nature de sable	74
Tableau II. 8: Compositions des mortiers avec substitution en PEHD granulé par fusion et ajout d'Aluminium..	74
Tableau II. 9: Composition des différents mortiers composites (PEHD déchiquetés).....	75
Tableau II. 10: Procédure de malaxage des mortiers (Dupain, Lanchon, and Saint-Arroman 2004)	76

Chapitre V : Etude de l'impact du mode d'incorporation des PEHD déchiquetés (addition / substitution) sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers composites

Tableau V. 1: Les différents mélanges de mortier étudiés	108
---	-----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La problématique des déchets plastiques est devenue l'une des préoccupations environnementales majeures de notre époque. Depuis l'invention du plastique en 1855, sa production a connu une croissance exponentielle en raison de son utilisation dans de nombreuses applications, allant des produits de consommation courante aux applications industrielles (Zulkernain et al. 2021). Entre 1950 et 2015, environ 8,3 milliards de tonnes de plastiques ont été produites dans le monde, dont 6,3 milliards de tonnes ont été rejetées sous forme de déchets, créant une accumulation massive de déchets plastiques (Geyer, Jambeck, and Law 2017). En 2018, la production mondiale de plastique a atteint près de 360 millions de tonnes, soit environ 200 fois plus qu'en 1950. La consommation croissante de plastique dans divers secteurs, tels que l'emballage, la construction, l'automobile, et l'électronique, a conduit à la génération d'un volume élevé de déchets plastiques. Seulement environ 8,4 % du total des déchets plastiques générés sont recyclés, tandis que 75,8 % sont accumulés dans des décharges et dans l'environnement, exacerbant ainsi les problèmes de pollution (Zulkernain et al. 2021).

Parmi les déchets plastiques, le sac en plastique est particulièrement omniprésent et visuellement marquant dans l'environnement. En raison de sa fonctionnalité, de sa légèreté et de son faible coût, il est devenu une forme courante d'emballage pour divers achats, y compris les aliments et les médicaments. En conséquence, la production mondiale de sacs plastiques augmente considérablement chaque jour. Selon Miller (2012), environ 500 à 1 000 milliards de sacs plastiques sont consommés chaque année dans le monde, ce qui équivaut à 1,4 à 2,7 milliards par jour, soit plus d'un million par minute (Alam, Billah, and Yajie 2018; Miller 2012).

Les sacs plastiques sont fréquemment trouvés parmi les déchets et leur nombre dans l'environnement ne cesse de croître et effectivement cumulatif en raison de leur durabilité et de leur durée de vie en tant que déchet (Tough 2007). La gestion de ces déchets représente donc un défi mondial considérable. Malgré l'ampleur de ce problème, la valorisation des déchets plastiques post-consommation, en particulier les sacs plastiques, dans les matériaux de construction reste limitée. Cette approche est encore peu explorée dans les études et

recherches par rapport à d'autres types de déchets plastiques, tels que les bouteilles en PET et les pneus en caoutchouc.

La présente thèse s'intéresse à la valorisation des déchets des sacs de provision en polyéthylène haute densité (PEHD), offerts à la caisse dans les magasins, centres commerciaux et marchés. Ils sont utilisés pour leur légèreté et leur faible coût, sont souvent jetés après une seule utilisation, contribuant ainsi à l'accumulation massive de déchets non biodégradables dans les environnements terrestres et marins. Face à cette situation alarmante, la valorisation des déchets plastiques représente une solution prometteuse non seulement pour réduire leur impact environnemental mais aussi pour éviter l'épuisement des gisements des sables et offrir des matériaux innovants dans le domaine de la construction.

L'incorporation de déchets plastiques dans les matériaux de construction, tels que les mortiers, permet d'améliorer certaines propriétés de ces matériaux, comme la légèreté, la durabilité et l'isolation thermique. Cette thèse se propose d'explorer la valorisation des déchets de sacs PEHD en tant qu'agrégats dans la fabrication de mortiers. L'objectif est d'évaluer l'impact de l'incorporation de déchets de sacs plastiques obtenus par fusion ou simplement déchiquetés comme granulats fins, sur les propriétés mécaniques, thermiques et durabilité des mortiers. L'étude vise également à identifier les pourcentages optimaux de substitution et d'ajout des déchets des sacs PEHD dans les formulations de mortier pour obtenir des matériaux composites performants et écologiques.

En première partie de cette recherche, on s'est basé sur le processus général de recyclage du plastique qui comprend le tri des différents polymères, le nettoyage, le déchiquetage et la fusion en granulés, mais cette dernière consomme beaucoup d'énergie, par conséquent un nettoyage suivi par un déchiquetage donnera un processus de recyclage plus simple et économique. Pour cet avantage, on s'est limité sur ce processus dans la deuxième partie de cette étude.

La thèse est organisée en cinq chapitres :

– ***Le chapitre 1 : Revue de littérature.*** Qui concerne une synthèse de données sur le produit sacs PEHD, les caractéristiques des sacs PEHD, leur problématique, et la valorisation des déchets plastiques dans les matériaux de construction, ainsi qu'une synthèse des études antérieures sur la valorisation des déchets plastiques dans la fabrication des mortiers et bétons.

- ***Le chapitre 2 : Programme expérimental et Procédures d'essais.*** Ce chapitre présente le programme expérimental utilisé pour évaluer les performances des matériaux étudiés, détaillant les protocoles de test, et les essais expérimentaux.
- ***Le chapitre 3: Impact du taux de PEHD granulés et la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite :*** ce chapitre vise en première partie à déterminer le pourcentage optimal de la substitution du sable par le PEHD, l'étude est basée sur l'utilisation de déchets plastiques PEHD granulés par fusion comme granulats fins dans le mortier en remplacement du sable (par volume) à différents pourcentages (10, 20, 30 et 40%). En deuxième partie, l'interaction des PEHD avec le sable naturel est analysée en utilisant deux types de sables (un sable concassé et un sable d'Oued) afin d'optimiser la composition du mortier composite léger répondant aux exigences (ouvrabilité et résistance mécanique).
- ***Le chapitre 4 : Amélioration du comportement physico-thermique des mortiers composites par addition des déchets d'aluminium.*** Ce chapitre vise à produire des éco-matériaux répondant aux exigences techniques et environnementales par la valorisation des matériaux issus du recyclage (déchets plastiques et déchets d'aluminium) pour la formulation des mortiers légers composites en remplaçant partiellement le volume du sable naturel par le PEHD granulé, et en utilisant un déchet d'aluminium en guise d'agent expansif (0.5% et 1%) par rapport au poids de ciment. Un article a été publié dans ce contexte sous le titre : ***Influence of aluminum waste on the thermo-mechanical properties of lightweight composite mortars based on sand and recycled high-density polyethylene***
- ***Le chapitre 5: Etude de l'impact du mode d'incorporation des PEHD déchiquetés (addition / substitution) sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers composites.*** Dans le but de valoriser les déchets des sacs PEHD directement sans apport énergétique (sans traitement) ; les sacs déchiquetés sont incorporés dans le mortier à partir des quantités définies en deux modes d'incorporation (substitution ou addition), les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des mortiers composites obtenus sont évaluées, ainsi que leur durabilité dans les milieux agressifs.

Et enfin la conclusion générale rassemble une synthèse des résultats obtenus à travers cette thèse. Les résultats attendus de cette recherche pourront contribuer à développer des solutions durables et innovantes pour le secteur de la construction, tout en offrant une approche viable pour la gestion des déchets plastiques. Ainsi, cette étude peut s'inscrire dans une démarche de construction durable et de préservation de l'environnement, répondant aux enjeux actuels de développement durable.

CHAPITRE I :
REVUE DE LA
LITTÉRATURE

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.1 Introduction

Environ 2,01 milliards de tonnes de déchets solides municipaux sont produits chaque année dans le monde, et un tiers de ces déchets sont déversés à ciel ouvert sans être gérés de manière respectueuse de l'environnement (Kaza S. et al. 2018). Environ 40 % de ces déchets sont directement déversés dans des décharges, 19 % sont récupérés par recyclage ou compostage et 11 % sont incinérés (Nanda and Berruti 2021). Avec les tendances rapides de l'urbanisation, on prévoit que 3,40 milliards de tonnes de déchets solides municipaux seront générées d'ici 2050, dont 24,14 millions de tonnes sont des plastiques (environ 12 % de ces déchets) (Kaza S. et al. 2018). Le plastique a besoin de 400 à 500 ans pour se décomposer dans des conditions naturelles. Les contaminants plastiques les plus largement utilisés, tels que les sacs en polyéthylène et les bouteilles en polyéthylène téréphtalate, devraient être envisagés pour le recyclage (Rajasekaran and Maji 2018). L'utilisation fréquente des sacs en plastique en raison de leur légèreté et de leur faible coût a entraîné plusieurs problèmes environnementaux car ces sacs sont souvent jetés après avoir été utilisés une seule fois.

Les déchets plastiques ont un faible taux de recyclage, ce qui contribue de manière significative à la pollution de l'environnement. Par conséquent, ils doivent être utilisés dans de multiples applications, comme par exemple servir d'agrégats dans le béton et le mortier. L'incorporation de déchets plastiques recyclés dans les matériaux de construction est l'une des solutions les plus durables sur le plan écologique et économique pour faire face aux tendances rapides en matière d'élimination des déchets plastiques et éviter l'épuisement des ressources naturelles dans le monde (Abeyasinghe et al. 2021).

I.2 Provenance des plastiques

Les matières plastiques peuvent être produites à partir de différentes sources. Elles peuvent être d'origine fossile (pétrole brut, gaz, etc.) ou renouvelables (canne à sucre, amidon, huiles végétales, etc.). Ces dernières sont biodégradables, et ne causent aucun problème de pollution. Et les plastiques d'origine fossile sont l'intérêt de cette étude.

L'industrie du plastique a débuté au début des années 1900 aux États-Unis (Abeysinghe et al. 2021). Au cours de la période de 1950 à 2015, 8,3 milliards de tonnes de plastiques ont été fabriquées dans le monde et 6,3 milliards de tonnes d'entre elles ont été rejetées sous forme de déchets (Geyer, Jambeck, and Law 2017). La Chine se classe au premier rang en matière de fabrication de plastique (30%), suivie de l'Europe (19 %). La Chine est même en tête en matière de consommation de plastique (20%), suivie de l'Europe occidentale (18%) (Abeysinghe et al. 2021).

Lorsque l'on chauffe le pétrole dans un four de distillation à 370°C, on procède au craquage du pétrole, il se sépare en différents états : en fiouls lourds, en mazout et diesel (gazole), en kérosène, en essence, en naphta (en jaune sur la figure I.1) utilisé par la pétrochimie et enfin, en gaz.

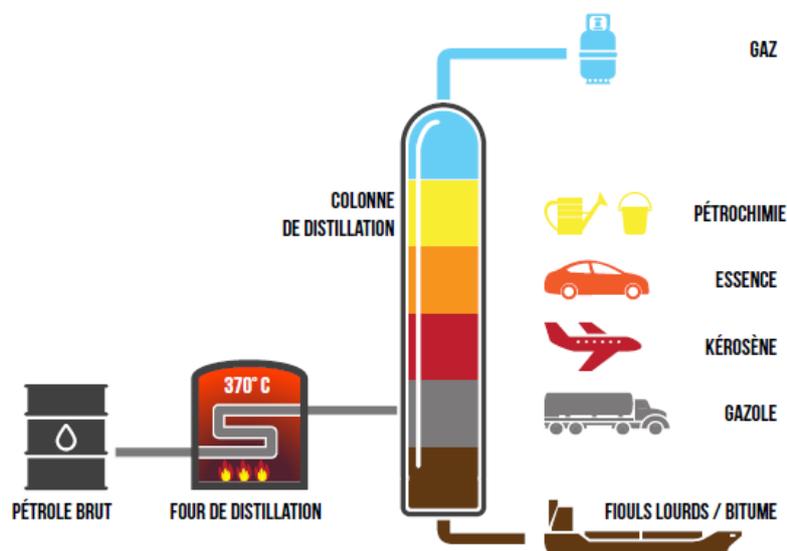


Figure I. 1 : Processus de transformation du pétrole (REYNE 1998)

Pour produire du plastique, on utilise uniquement la fraction naphta (un gaz naturel) dans des usines de plasturgie (l'industrie du plastique), où le naphta est transformé en différents plastiques grâce à des procédés différents et des compositions différentes.

I.3 Les différents types de plastiques

Les plastiques sont divisés en 3 familles : les thermoplastiques, les thermodurcissables, et les élastomères (Figure I.2). Les deux premiers sont les principaux types de plastique.

- Les thermodurcissables : ces plastiques ne peuvent pas être refondus et reformés après avoir été chauffés et formés, tels que le polyuréthane, le phénol formaldéhyde, les résines époxy, l'ester vinylique et le silicone. Leurs propriétés chimiques changent lorsqu'ils sont chauffés.
- Les thermoplastiques sont une famille de plastiques qui peuvent être remodelés, réchauffés et congelés à plusieurs reprises. Ces propriétés, qui donnent son nom au type de plastique, sont réversibles. Ils peuvent fondre lorsqu'ils sont exposés à la chaleur et durcir lorsqu'ils sont exposés au froid à plusieurs reprises (Ibrahim Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, and Mohamed 2020).

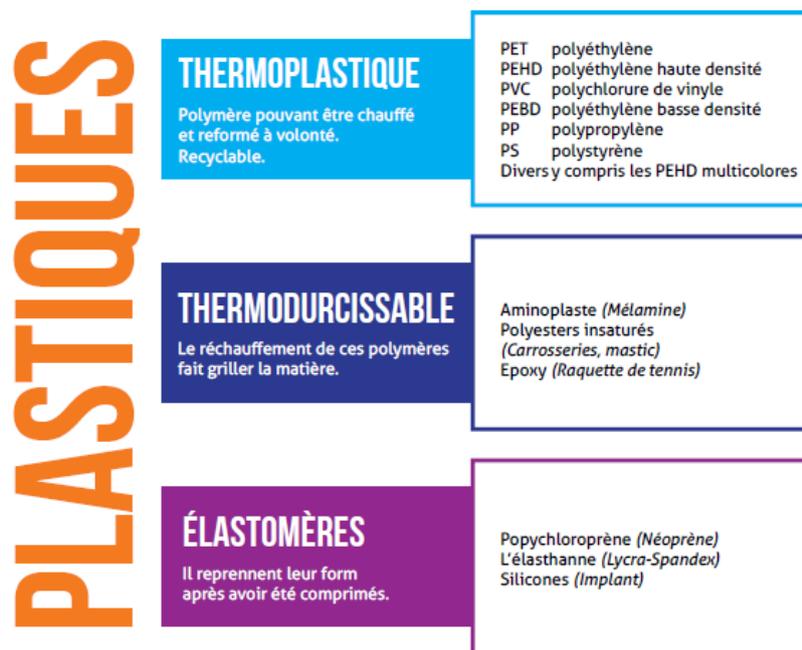


Figure I. 2 : Les plastiques (REYNE, 1998)

Les plastiques les plus fabriqués et utilisés dans le monde sont le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polystyrène (PS), qui représentent 69% de la consommation mondiale de plastique. Dans la production mondiale de plastique, le polypropylène (PP) et le polyéthylène basse densité (PEBD) représentent respectivement 17% et 16%, suivis du polyéthylène haute densité (PEHD) (13%) et du polyphthalamide (13%) (Abeysinghe et al. 2021). Les plastiques les plus couramment recyclés sont présentés dans le tableau I.1.

Tableau I. 1: Applications des plastiques vierges et recyclés (Siddique, Khatib, and Kaur 2008)

Le type du plastique	Applications pour le plastique vierge	Applications pour le plastique recyclé
PET : Polyéthylène téréphtalate	Bouteilles d'eau minérale et de boissons gazeuses	Bouteilles de détergent, bouteilles de boissons gazeuses, vestes polaires
UPVC : chlorure de polyvinyle non plastifié	Bouteilles de jus et de liqueurs transparentes, raccords de tuyaux de plomberie et emballages sous blister	Bouteilles de détergent, raccords de tuyauterie et carrelages
PEHD : Polyéthylène haute densité	Sacs de congélation, sacs de courses froissés , bouteilles de lait et de crème	Bouteilles de détergent, bacs à compost, caisses, poubelles mobiles
LDPE : Polyéthylène basse densité	Sacs poubelles, poubelles, couvercles de pots de glace et feuilles de plastique noir	Industrie, emballage et pépinières, films pour le bâtiment et sacs
PPVC : chlorure de polyvinyle plastifié	Semelles de chaussures, tuyau d'arrosage, tubes et poches de sang	Revêtement de sol industriel et noyau intérieur de tuyau
PS : polystyrène	Couverts en plastique, pots de yaourt et imitation « verrerie » en cristal	Accessoires de bureau, cintres, bobines et règles et pinces à linge
PP : Polypropylène	Sachets de chips, pailles à boire, pots de glace	Caisses de recyclage et bacs à compost en bordure de rue
EPS : Polystyrène expansé	Plateaux et emballages de viande, contenants pour plats à emporter et gobelets pour boissons chaudes	Non recyclé

I.4 L'éthylène

Les plastiques modernes sont fabriqués à partir de polymères, qui sont de grosses molécules constituées d'unités répétitives de monomères. L'une de ces molécules est l'éthylène (l'éthène), qui est représentée chimiquement par C_2H_4 (figure I.3)

L'éthylène (ou Ethène) est dérivé du naphta. Lorsque les molécules d'éthylène sont polymérisées, elles deviennent du polyéthylène PE. Le polymère PE est constitué de chaînes hydrocarbonées constantes où chaque molécule de carbone est liée à deux autres molécules de carbone et à deux molécules d'hydrogène (figure I.4).

Et selon le processus de polymérisation on obtient les différentes formes de polyéthylène : le polyéthylène basse densité (figure I.5) et le polyéthylène haute densité (figure I.6), ce dernier constitue l'intérêt de cette étude.

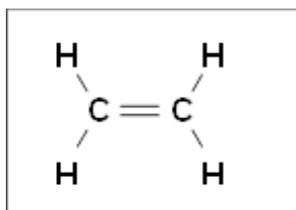


Figure I. 3 : La molécule Ethène

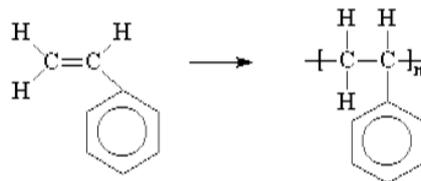


Figure I. 4 : Le polyéthylène PE

Figure I. 5 : Polyéthylène
basse densitéFigure I. 6 :
Polyéthylène haute
densité

I.5 Le polyéthylène haute densité (PEHD)

I.5.1 Historique

Le polyéthylène haute densité est obtenu par des procédés de polymérisation de l'éthylène à basse pression. Les premières unités de production furent construites en 1955 par la société Phillips au Texas. Ensuite Hoechst qui démarra la première unité selon le procédé Ziegler en 1956. Dans les années soixante, des améliorations pour supprimer la coûteuse opération d'élimination des résidus catalytiques. Les développements les plus récents proviennent des procédés de polymérisation en phase gazeuse : BASF construisit sa première unité en 1964 ; Union Carbide a définitivement amélioré le procédé en phase gazeuse et l'a industrialisé dans les années quatre-vingt. Aujourd'hui, de nombreux licenciés utilisent cette technologie. D'autres procédés en phase gazeuse ont été développés et améliorés par la suite (Dossogne 1996).

I.5.2 Définition du PEHD

C'est un polymère thermoplastique de grande diffusion. La polymérisation de l'éthylène seul, selon un procédé à basse pression, conduit au polyéthylène homopolymère (figure I.7).

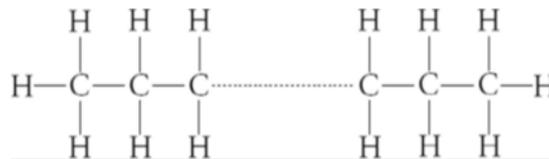


Figure I. 7 : Structure de la chaîne moléculaire du PEHD H₂C=CH₂

I.5.3 Caractéristiques du PEHD

Les principales qualités du PEHD : résilience même à basse température, résistance aux produits chimiques, faible sensibilité à l'eau, imperméabilité à la vapeur d'eau, excellentes propriétés électriques, en font un matériau de choix dans des applications variées comme l'extrusion-soufflage de corps creux, l'extrusion de films, tubes et câbles, ...etc. Le PEHD semi-cristallins devient beaucoup plus dense, rigide et ductile avec une résistance à la flexion comparativement élevée entre 20 et 45 MPa en raison de l'empilement régulier des chaînes polymères (Geyer, Jambeck, and Law 2017; Lukkassen and Meidell 2007). Le PEHD a également une faible densité entre 950 et 970 kg/m³, une meilleure flexibilité et une résistance à la traction élevée entre 20 et 32 MPa (Geyer, Jambeck, and Law 2017; Lukkassen and Meidell 2007). De plus, le PEHD est un matériau chimiquement inerte (Geyer, Jambeck, and Law 2017; Lukkassen and Meidell 2007) et son point de fusion est à 130°C tandis que la température d'inflammation est à 487°C (Alauddin et al. 1995).

I.5.4 Présentations commerciales

Le PEHD est généralement sous forme de granulés cylindriques (figure I.8) ou lenticulaires de quelques millimètres (figure I.9), comme il peut se présenter sous forme de poudre (figure I.10). Il est commercialisé dans des sacs de 25 kg ou livré en vrac (dans des citernes) ou en demi-vmrac (dans des caisses en carton ou des conteneurs souples).



Figure I. 8 : PEHD granulés cylindriques



Figure I. 9 : PEHD granulés lenticulaires



Figure I. 10 : PEHD en poudre

I.5.5 Exemples d'applications courantes du PEHD

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un matériau très polyvalent utilisé dans de nombreuses applications. Des exemples courants montrent à quel point le PEHD est un matériau utile dans notre vie quotidienne. Voici quelques-uns

1. Emballages : Le PEHD est souvent utilisé pour fabriquer des bouteilles (Figure I.11), des conteneurs et des sacs en plastique en raison de sa résistance et de sa légèreté.
2. Tuyauterie (Figure I.12): Il est couramment utilisé dans les systèmes de plomberie et d'irrigation, car il résiste à la corrosion et aux produits chimiques.
3. Jouets (Figure I.13) : De nombreux jouets pour enfants sont fabriqués en PEHD, car il est durable.
4. Équipements de jardinage : Les pots de fleurs, les bacs à compost et d'autres accessoires de jardin (Figure I.14) sont souvent en PEHD.
5. Matériaux de construction : Le PEHD est utilisé dans certains types de membranes d'étanchéité (Figure I.15) et de revêtements de sol.

Grâce à sa bonne résistance à la perforation et au déchirement, le PEHD est utilisé pour fabriquer des films très minces (10 à 12 μm) en sacs de caisse (Dossogne 1996).



Figure I. 11:
Bouteilles
PEHD



Figure I. 12:
PEHD en
tuyauterie



Figure I. 13:
Jouets PEHD



Figure I. 14:
Accessoires jardin
PEHD



Figure I. 15:
Membranes
d'étanchéité
PEHD

I.6 Les sacs plastiques PEHD

Le sac plastique est un sac léger fabriqué en matière plastique destiné à transporter les achats, le plus utilisé est le sac « bretelle » appelé le sac de caisse ou de provision. Il est offert aux clients à la caisse. Introduit pour la première fois à la fin des années 1970, les sacs à provisions en plastique jetables minces et peu coûteux ont été rapidement adoptés par les consommateurs pour leur commodité et leur utilité (Rivers, Shenstone-Harris, and Young 2017)

I.6.1 Fabrication

Les sacs plastiques sont préférés pour les courses, car ils sont plus pratiques à porter pour les clients et aussi moins chers. La majorité des sacs de courses en plastique sont produits à partir de PEHD. Ils sont produits à partir de ressources non renouvelables, dont les principaux ingrédients sont le pétrole et le gaz naturel (Muthu and Li 2014). Selon Muthu et Li, les étapes détaillées de la fabrication des sacs plastiques sont résumées à la Figure I.16 (Muthu and Li 2014). Et le processus de fabrication des sacs plastiques commence par le processus de craquage de l'huile, suivi de nombreux autres processus pour obtenir le polyéthylène. Ce dernier sous forme de résine est utilisé pour fabriquer des sacs plastiques par extrusion de film soufflé, également appelée «procédé de film tubulaire». Lors du traitement du polyéthylène pour fabriquer des sacs plastiques, de nombreux additifs tels que l'anti-bloc (empêche les couches de sacs plastiques de coller ensemble), le glissant (facilite l'ouverture du sac plastique) et l'inhibiteur d'ultraviolets (UVI pour éviter l'affaiblissement de la résistance et la décoloration par les rayons UV) sont ajoutés. Le polyéthylène est introduit dans la trémie, qui transfère ensuite l'alimentation en résine dans l'extrudeuse. La résine est fondue grâce aux

éléments chauffants et au mouvement de rotation de la vis de l'extrudeuse. La résine fondue est forcée à travers l'extrudeuse et s'écoule uniformément sur la filière circulaire. Elle passe ensuite par les éléments de fabrication des sacs par moulage par soufflage, comme décrit à la figure. I.16. Une bulle plastique remplie d'air est créée une fois l'air soufflé à travers le plastique, ce qui permet de faire monter le plastique dans une filière en forme de tube. Le contrôle exercé par les fabricants sur le processus d'extrusion soufflée leur permet d'obtenir la taille et l'épaisseur souhaitées des sacs plastiques en termes de formage. Enfin, le tube plastique produit est directement dans une machine à fabriquer des sacs ou avec l'aide de rouleaux. Cette machine scelle à chaud une extrémité du tube pour préparer le fond d'un sac, tandis qu'un cutter à l'autre extrémité réalise une ouverture précise (Muthu and Li 2014).

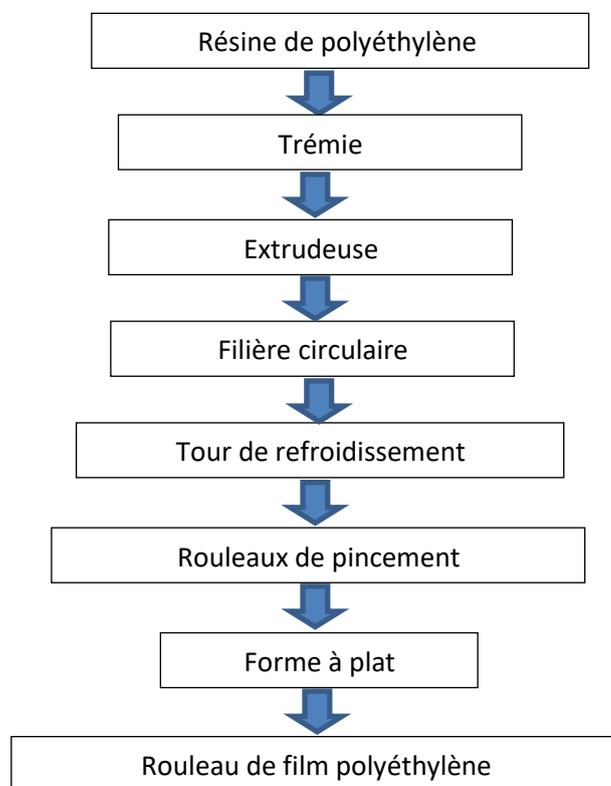


Figure I. 16: Résumé des étapes de fabrication des sacs (Muthu & Li, 2014).

I.6.2 La différence entre les sacs plastiques PEHD et ceux en PEBD

Les sacs plastiques utilisés dans notre vie quotidienne sont en PEBD et PEHD, ces derniers sont les plus utilisés. Le tableau I.2 résume les critères de différence entre les sacs en PEHD et ceux en PEBD selon (Sultana, Prasad, and Sultana, S.A., and Prasad 2012; Verghese, Jollands, and Allan 2009).

Tableau I. 2 : La différence entre un sac PEHD et un sac PEBD

Caractéristiques	Le sac PEHD	Le sac PEBD
Le symbole	 PEHD	 PEBD
L'épaisseur	moins épais	plus épais
Le poids	Plus léger	Plus lourd
Le prix	Moins cher	Plus cher
Rigidité	plus rigides	plus souple et plus flexible
La traction	plus résistant	moins résistant
Aspects au toucher	se froisse avec un bruit craquant et revient spontanément à sa forme d'origine	se froisse sans bruit se perce facilement avec le doigt
La brillance	Plus brillant	Moins brillant
La transparence	Moins élevée	Plus élevée
point de fusion	135°C	115°C
La résistance chimique	Une grande résistance chimique	acceptable

I.6.3 Propriétés chimiques des sacs PEHD

Les sacs en (PEHD) présentent plusieurs propriétés chimiques qui expliquent leur utilisation répandue, notamment dans l'emballage.

1. Inertie chimique : Le PEHD présente une inertie chimique importante, ce qui en fait un matériau privilégié pour l'emballage alimentaire. Cette inertie chimique lui permet de résister à une large gamme de produits chimiques, notamment les acides, les bases et les solvants (Shankar and Bandyopadhyay 2022). Le PEHD a une capacité à protéger les aliments des influences extérieures tout en garantissant la sécurité grâce à sa résistance chimique (Kan and Miller 2022). Cependant, des études indiquent que le PEHD peut se dégradé s'il est soumis à une exposition prolongée à des acides forts comme l'acide sulfurique et l'acide nitrique (Laiwang et al. 2020). Dans l'ensemble, l'inertie chimique du PEHD est cruciale pour son application dans des environnements exigeant des normes de sécurité élevées (Utilisation liées aux aliments) (Kan and Miller 2022).

2. Hydrophobicité : Le PEHD est hydrophobe, ce qui signifie qu'il ne retient pas l'eau. Cela est particulièrement utile pour la fabrication de sacs résistants à l'humidité, utilisés dans des environnements extérieurs ou pour des produits sensibles à l'eau (Dossogne 1996).

3. Résistance aux UV et à l'oxydation : Bien que les sacs en PEHD soient globalement résistants aux intempéries, une exposition prolongée aux rayons UV peut provoquer une

oxydation du polymère, entraînant une dégradation. Pour éviter cela, des stabilisants UV sont ajoutés au matériau (Dossogne 1996).

I.6.4 Consommation des sacs plastiques

Des estimations approximatives suggèrent que le monde utilise entre 500 milliards et 1,5 billion de sacs plastiques en PEHD chaque année (Clapp and Swanston 2009).

Dans l'UE, 98,6 milliards de sacs en plastique ont été utilisés, ce qui correspond à 198 sacs en plastique par citoyen et par an. Un dévastateur 89% des sacs en plastique sont à usage unique, la moitié des sacs jetés finissant dans des décharges (Kalogerakis et al. 2017).

Au Cambodge la ville de Phnom Penh, environ 10 millions de sacs au total par an ou 2 000 sacs en plastique pour chaque habitant de la ville chaque année (Kvanthai 2020).

En Algérie, près de sept (7) milliards de sacs en plastique sont consommés par an, a déclaré la ministre de l'Environnement, Dalila Boudjemaa en mars 2021 (Selon l'Algérie Presse 16/03/2021).

En Jordanie, environ 3 milliards de sacs en plastique sont utilisés par an, ce qui signifie que la consommation en Jordanie se réfère en moyenne à 500 sacs par personne et par an (Saidan, Ansour, and Saidan 2017).

En Irlande, 330 sacs par personne par an étaient consommés avant l'introduction de la taxe. (Saidan, Ansour, and Saidan 2017).

En Australie, une estimation de 3.92 milliards de sac en PEHD sont consommés par an, 51 % sont distribués dans les supermarchés, 11 % dans les magasins de marchandises générales, d'électricité et de vêtements, 18 % dans d'autres points de vente. 80 millions de ces sacs se retrouvent chaque année dans les voies aériennes et navigables (Verghese, Jollands, and Allan 2009).

Taiïwan a la deuxième plus forte densité de magasins de proximité au monde (Hung et al. 2022), et la plupart des emballages alimentaires jetables contiennent des déchets plastiques composés en polyéthylène (PE). Selon l'Agence de protection de l'environnement, dans la seule ville de Taipei, les emballages de livraison de nourriture ont augmenté de 85 % en mai 2021, à cause de l'impact de l'épidémie de COVID-19 (Tsai et al. 2022).

I.6.5 Les sacs plastiques après consommation

Les sacs plastiques sont largement appréciés pour leur durabilité, leur légèreté, leur hygiène et leur faible coût. Cependant, ils sont souvent utilisés une seule fois, avec une durée d'utilisation moyenne estimée à 20 minutes, pouvant aller jusqu'à un an (Mutha, Patel, and Premnath 2006).

Le sac plastique est considéré comme la dernière étape d'emballages, Cependant qui n'est pas nécessairement essentiel à l'intégrité du produit acheté et donc hors fonctions de commercialisation et de protection. C'est l'article le plus trouvé dans les déchets, il est couramment utilisé comme article jetable. La méthode d'élimination des sacs en plastique dépend grandement de la destination du sac en plastique. Les sacs en plastique utilisés dans les activités de plein air, comme les pique-niques sont jetés après une première utilisation. En comparaison, les sacs dont la destination est « la maison » sont plus susceptibles d'être réutilisés ou recyclés (Tough 2007).

Les sacs plastiques se trouvent en trois façons différentes après leurs consommations : le déchargement, l'incinération et le recyclage selon le principe de la hiérarchie des déchets (Gertsakis and Lewis 2003). Le déchargement est considéré comme la dernière solution, car il nécessite de grands espaces et par conséquent des problèmes de pollution à long terme. L'incinération est la meilleure solution où le déchet est complètement éliminé, mais malheureusement conduit directement à la pollution toxique à cause des gaz et produits chimiques libérés. Donc le recyclage est la meilleure solution pour l'élimination ces déchets en évitant les conséquences des deux premières solutions (Tough 2007).

I.6.6 Impact environnemental des déchets des sacs plastiques

Selon les estimations, environ 46 000 fragments de déchets plastiques flottent dans les océans, et près de 8 millions de tonnes de déchets plastiques sont déversés dans les océans chaque année (Erni-Cassola et al. 2019; Saikia and De Brito 2012).

Environ 40 millions de sacs en plastique à usage unique sont jetés chaque année, et seulement 5 à 10 millions d'entre eux sont collectés grâce à des programmes de nettoyage des déchets (Wagner 2017). Bien qu'ils représentent moins de 1 % de tous les déchets, leur visibilité et leur persistance dans l'environnement en font un problème majeur. Ils présentent également un danger potentiel pour la faune en cas d'ingestion. Un sac en plastique commencera à se décomposer dans l'environnement naturel s'il est exposé à la lumière ultraviolette, mais à

court terme, cela peut aggraver le problème des déchets en produisant un plus grand nombre de fragments plus petits (Tough 2007). Le taux de dégradation dépendra probablement du climat, de l'épaisseur du sac et de son emplacement (dans le sol, dans l'eau douce ou marine, accroché aux arbres ou aux clôtures). En fin de vie, ces sacs posent de nombreux problèmes environnementaux :

Les sacs plastiques ne se biodégradent pas et se désintègrent sous l'effet des conditions environnementales, telles que les rayons ultraviolets, le vent ou l'eau. Ce processus laisse derrière lui de la poussière plastique ou de minuscules morceaux de plastique dans l'environnement (Wagner 2017).

Les estimations des temps de dégradation varient, allant de 50 à 1000 ans (James and Grant 2012), et dépendent de la composition du sac ainsi que des conditions environnementales. Les sacs en plastique mettent également beaucoup plus de temps à se décomposer dans l'eau que sur terre (Wagner 2017). On estime qu'un sac PEHD persiste sous forme de déchet pendant deux ans avant d'être réduit en petites particules, et flotte dans l'eau pendant six mois avant de couler (James and Grant 2012). Cette persistance entraîne une pollution visuelle accrue, créant un dérangement esthétique. Selon une enquête de 2015, 16 pays du tiers monde présentant une mauvaise gestion des déchets figurent parmi les 20 premiers pays responsables de la pollution des écosystèmes marins par les déchets plastiques (Jambeck et al. 2015).

Les sacs en PEHD contribuent significativement à la pollution par divers mécanismes :

- Leur fabrication nécessite l'extraction de pétrole brut et de gaz naturel, ce qui émet des polluants atmosphériques et dégrade la qualité de l'air (Li et al., 2022).
- Une fois dans l'environnement, ces sacs peuvent causer de graves dommages, tels que l'étouffement de la faune, le blocage des cours d'eau et la dégradation des paysages (Bahri 2005). Leur non-biodégradabilité signifie qu'ils persistent dans les écosystèmes pendant des centaines d'années, contribuant à la pollution des sols et de l'eau (Hussain et al. 2020). De nombreux animaux et oiseaux meurent chaque année à cause des plastiques présents dans leur environnement. Le PEHD représente également 79 % des polymères dans les microplastiques prélevés en milieu marin (Hidalgo-Ruz and Thiel 2013).
- La pollution plastique se propage à travers les océans par les vents et les courants de surface (Eriksen et al. 2014). Des sacs en plastique jetables ont récemment été détectés à 10

898 m de profondeur, au point le plus profond de notre planète la fosse des Mariannes, Pacifique Nord-Ouest (Berry et al. 2023; Chiba et al. 2018).

Au-delà de la pollution visuelle, les déchets de sacs plastiques sont associés à de nombreux autres problèmes environnementaux :

- Ils diminuent la productivité des sols dans les champs agricoles (Njeru 2006).
- Au Bangladesh (figure I.17), en 1988, une défaillance du système de drainage due à l'obstruction par des sacs plastiques a provoqué des inondations dévastatrices et de nombreux décès (Khondoker Golam Tawhid 2022) .
- En 2012, les tunnels et les rues d'Amman ont été inondés en quelques heures à cause des sacs plastiques jetés le long des routes et dans les fossés de drainage (Saidan, Ansour, and Saidan 2017).



Figure I. 17: Les inondations de Bangladesh

- Plus d'un million d'oiseaux marins et 100 000 mammifères et tortues marines meurent chaque année dans le monde à cause de l'enchevêtrement plastiques (figure I.18) (Tough 2007).



Figure I. 18: l'enchevêtrement et l'ingestion de débris marins (Tough 2007)

- Les sacs plastiques étouffent les coraux en empêchant la lumière solaire essentielle d'atteindre les coraux ou en s'empêtrant dans le corail et brisant les têtes de corail par le mouvement des vagues (figure I.19) (Tough 2007).



Figure I. 19: Sac en plastique étouffant le corail (Tough 2007)

- Les sacs plastiques ressemblant à de la nourriture, comme une méduse ou un calmar, ils sont ingérés par les animaux de mer (les tortues, les oiseaux, les baleines, les dauphins, etc.), ils se trouvent avec des sacs plastiques qui bloquent le tube digestif empêchant une alimentation adéquate (Hussain et al. 2020), ce qui conduit finalement à la mort par famine (Figure I.20). L'ingestion de plastique a de graves conséquences sur la survie des animaux et des espèces, ce qui exerce une pression sur la biodiversité de la vie marine.

- Il est évident que divers produits chimiques nocifs et matières toxiques utilisés dans la fabrication du plastique avalés par de nombreux animaux et passent dans leur sang, ce qui transforme différents tissus vitaux en maillons de la chaîne alimentaire (Hussain et al. 2020).



Figure I. 20: La mort d'une baleine par les déchets plastiques

I.6.7 Impacts des sacs en polyéthylène sur l'économie

Le principal problème économique lié aux sacs et aux déchets plastiques concerne les pays dont l'économie dépend largement du tourisme. Les articles en plastique contribuent également à la pollution visuelle. L'impact économique des plastiques marins sur le transport maritime, la pêche et le tourisme est estimé à environ 1,3 milliard de dollars, selon la Coopération économique Asie-Pacifique (APEC) dans cette seule région.

Le coût du nettoyage des plages et des rivages est estimé à environ 630 millions d'euros par an en Europe. Les dommages économiques causés par les plastiques à l'écosystème marin s'élèvent à près de 13 milliards de dollars (Hussain et al. 2020).

I.6.8 Recyclage des sacs plastiques

Les sacs en plastique, qui contribuent régulièrement à la pollution des sols et de l'eau, peuvent être transformés en produits légers et très durables (Awoyera and Adesina 2020). La plupart des sacs en plastique sont fabriqués à partir de (PEHD) et le (PEBD), qui peuvent être recyclés, mais les taux de recyclage restent faibles, avec seulement environ 33 % dans l'UE en 2018 (Di et al. 2021). En outre, les recherches indiquent que l'intégration de sacs en plastique usagés dans des matériaux de construction, comme le béton léger, peut améliorer la durabilité tout en résolvant les problèmes d'élimination (Abdel Tawab OF et al. 2020). Dans l'ensemble, l'amélioration des technologies de recyclage et la promotion du recyclage sont essentielles pour améliorer les efforts de recyclage des sacs en plastique (Di et al. 2021).

La collecte massive des sacs plastiques à recycler est une tâche difficile. Par exemple en Nouvelle-Zélande, la collecte se fait au niveau d'un petit nombre de points de vente. Une initiative qui a débuté en 2004 pour la collecte en bordure de rue des sacs en plastique. On estime que 50 000 sacs en plastique sont collectés chaque semaine pour être recyclés (Tough 2007).

Bien que le recyclage puisse atténuer certains effets, il ne constitue pas une solution complète, laissant toujours une empreinte environnementale significative. Pour faire face à ces problèmes, de nombreux pays ont mis en œuvre des interdictions et promu des alternatives, soulignant l'urgence de pratiques de gestion durable des déchets. Une autre solution envisagée consiste à proposer des sacs alternatifs, mais cette approche s'est révélée peu efficace, car les

consommateurs préfèrent généralement utiliser des sacs en plastique plutôt que d'autres types de sacs (Bahri 2005).

I.7 Recyclage des déchets plastiques

Le recyclage et la gestion des déchets plastiques font partie des principales tâches de protection de l'environnement. Le plastique représente une part importante des déchets totaux et a pollué la Terre. Il a besoin de 400 à 500 ans pour se décomposer dans des conditions naturelles (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020). Par rapport à d'autres matériaux utilisés en grandes quantités comme le papier, la céramique, le verre et l'aluminium, le plastique est moins recyclé (Awoyera and Adesina 2020). Les contaminants plastiques les plus largement utilisés, tels que les sacs en PE et les bouteilles en PET, devraient être envisagés pour le recyclage (Rajasekaran and Maji 2018).

I.7.1 Les contraintes du recyclage des Déchets plastiques (DP)

Rebeiz et Craft (Rebeiz and Craft 1995), ont signalé qu'il existe quelques contraintes économiques et technologiques qui limitent le recyclage efficace et complet des déchets plastiques en produits utiles, et ce sont :

- Les mélanges de plastiques sont généralement insolubles et forment des phases discrètes dans une phase continue;
- Les plastiques ne sont pas des matériaux homogènes comme le papier ou l'aluminium, mais ils se composent d'un grand nombre de qualités avec des structures moléculaires et des propriétés différentes, et chaque composant plastique dans un déchet mélangé a une rhéologie de fusion, un comportement et une stabilité thermique différents;
- La contamination des déchets plastiques par d'autres matériaux tels que la saleté et les métaux qui peuvent endommager l'équipement utilisé pour le retraitement des déchets;
- Généralement, la matière première de déchets plastiques n'est pas uniforme dans le temps.

I.7.2 Processus de recyclage

Le recyclage du plastique consiste à récupérer les déchets plastiques ou les chutes et à les transformer en produits utiles. Le recyclage des déchets, qui permet de réduire la quantité de

plastique dans le flux de déchets, constitue un effort mondial visant à minimiser le plastique. Les principales opérations dans un processus de gestion des déchets comprennent :

• **La collecte** : Il existe deux méthodes principales pour collecter les déchets plastiques :

1. Collecte après entrée dans le flux de déchets municipaux : La plupart des déchets plastiques post-consommation, provenant de sources ménagères, commerciales et industrielles légères, finissent dans le flux de déchets municipaux. Ces déchets sont généralement très contaminés, ce qui les rend difficiles à recycler. En conséquence, ils sont souvent soit déposés dans des décharges, soit incinérés pour réduire leur volume et récupérer leur contenu énergétique.

2. Collecte avant entrée dans le flux de déchets municipaux : Cette méthode consiste à collecter les plastiques avant qu'ils ne pénètrent dans le flux de déchets municipaux. Les déchets plastiques ainsi collectés sont relativement propres et peuvent être recyclés plus efficacement après avoir subi des processus de séparation et de purification (Rebeiz and Craft 1995).

• **Mise en décharge**

C'est la pratique la plus courante pour les plastiques non recyclables par enfouissement dans le sol, elle est considérée comme le dernier recours dans la gestion des déchets plastiques car elle nécessite une grande quantité d'espace mais peut entraîner un problème de pollution à long terme (Gu and Ozbakkaloglu 2016). La durabilité environnementale de cette méthode est souvent remise en question. L'élimination des plastiques dans les décharges a suscité certaines inquiétudes de la part du public, car le matériau se dégrade très lentement. Malgré qu'il existe des recherches qui ont montré que les déchets plastiques ne créent pas de difficultés dans les opérations de mise en décharge et ne contribuent pas à la toxicité du lixiviat des décharges (Rebeiz and Craft 1995). D'autres chercheurs trouvent que les additifs et d'autres contaminants potentiels se décomposent à partir des déchets plastiques et finissent par polluer le système des eaux souterraines, cela implique que les additifs et monomères plastiques sont susceptibles d'être libérés dans les lixiviats des décharges, ce qui peut entraîner une pollution des eaux souterraines (Zulkernain et al. 2021).

• **Incinération**

La récupération de l'énergie thermique des déchets plastiques peut se faire par incinération. Ces déchets constituent une source de combustible efficace, car la plupart des résines possèdent un pouvoir calorifique comparable à celui du charbon. En plus de représenter une

alternative énergétique intéressante et de contribuer à la préservation des ressources naturelles, l'incinération permet de réduire considérablement le volume des déchets, de l'ordre de 90 à 95 %. Cependant, lorsque les processus d'incinération ne sont pas correctement conçus et contrôlés, une quantité significative de dioxyde de carbone et de substances chimiques toxiques peut être libérée dans l'environnement, accompagnée de cendres volantes et de cendres résiduelles nocives (Belmokaddem et al. 2020; Gu and Ozbakkaloglu 2016).

Bien que le recyclage soit une option viable pour atténuer l'impact environnemental des déchets plastiques, il nécessite une quantité importante de main-d'œuvre et d'énergie (Nikbin et al. 2016). L'incinération est souvent perçue comme une solution rapide et simple pour éliminer les déchets plastiques, mais elle engendre également la libération de polluants toxiques tels que les furanes et les dioxines, qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé, ainsi que des résidus dangereux comme le plomb et le cadmium (Nyathi and Togo 2020).

I.7.3 Méthodes de recyclage

Les déchets plastiques peuvent être recyclés mécaniquement, chimiquement ou thermiquement.

- **Recyclage mécanique** : Le recyclage mécanique : implique la dégradation physique des déchets en utilisant des processus tels que le broyage et/ou le déchiquetage (Serranti and Bonifazi 2018), c'est la technique la plus utilisée pour le recyclage du plastique vu qu'elle est efficace et rapide à mettre en œuvre et économique.
- **Le recyclage chimique** : C'est des techniques de récupération du plastique en décomposant les polymères (modification chimique) en leurs monomères constitutifs qui peuvent à leur tour être réutilisés dans les raffineries à la place des matières premières vierges pour la production de nouveaux matériaux plastiques (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020).
- **Le recyclage thermique** : consiste à chauffer les déchets plastiques (thermoplastique) à des températures élevées pour les faire fondre, puis transformé en un nouveau produit en refroidissant, sans modification de la composition chimique des plastiques.

I.8 La valorisation des DP dans les matériaux de construction

La valorisation des déchets plastiques dans les matériaux de construction (béton et mortier) est la meilleure solution pour réduire la pollution de l'environnement : résoudre le problème d'élimination des déchets plastiques et préserver simultanément les ressources naturelles (Saikia and De Brito 2012, 2014; Verma, Afaque, and Abhishek 2016).

I.8.1 Préparation des agrégats plastiques

- Dans certaines études, des déchets plastiques de tailles appropriées ont été récupérés dans des usines de traitement des déchets plastiques ou des usines de fabrication de plastique (Akçaözoğlu, Atiş, and Akçaözoğlu 2010; Ismail and AL-Hashmi 2008; Saikia and De Brito 2012) . Dans ces cas, le tamisage a été effectué en laboratoire pour obtenir une plage de taille adéquate (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010; Mounanga et al. 2008; Saikia and De Brito 2012).
- Dans certaines études telles que celles de (Aocharoen and Chotickai 2023a; Ghernouti et al. 20014), les granulats de PE ont été recyclés à partir de sacs plastiques relativement fins grâce à une technique d'extrusion. le matériau plastique a été fondu et injecté dans une extrudeuse. Les longs brins de PE provenant de l'extrudeuse ont ensuite été refroidis à l'eau et coupés en petits morceaux pour obtenir des granulats de PE en forme de granulés.
- La plupart des agrégats plastiques utilisés dans diverses recherches ont été élaborés à partir de déchets plastiques provenant de différentes sources. Divers types de concasseurs à hélice ou de broyeurs à ailettes sont employés pour réduire en morceaux les déchets plastiques. Généralement, les bouteilles en plastique sont broyées à l'aide d'un broyeur, puis tamisées pour obtenir la taille adéquate (Abdulkader I. Al-Hadithi and Alani 2018; Batayneh, Marie, and Asi 2007; Frigione 2010; Kou et al. 2009; O. Yazoghli Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2007). Les figure I.21 et I.22 représentent le déchiquetage des bouteilles et broyage en tailles similaires à celles du sable, par une machine de granulation de plastique (Abdulkader I. Al-Hadithi and Alani 2018).



Figure I. 21: Machine de déshiquetage et granulation de plastique (Abdulkader I. Al-Hadithi and Alani 2018)



Figure I. 22: Granulats de déchets des bouteilles PET en tailles similaires à celles du sable (Abdulkader I. Al-Hadithi and Alani 2018)

- Senhadji et al. (Senhadji et al. 2015), ont utilisé des granulats issus du broyage de tuyaux en PVC usagés en petits granulats, classés comme granulats fins ou moyens, dont la granulométrie est respectivement de 0 à 3 et de 3 à 8, comme le montrent les figures I.23 et I.24. La première montre les granulats PVC remplaçant le sable, tandis que la deuxième présente ceux qui remplacent le gravier moyen.
- Certaines recherches ont également intégré une étape de lavage pour éliminer les impuretés présentes dans les déchets plastiques (Akçaözoğlu, Atiş, and Akçaözoğlu 2010; O. Yazoghli Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2007; Remadnia et al. 2009)



Figure I. 23: Aspect des granulats fins naturels et PVC (Senhadji et al. 2015).



Figure I. 24: Aspect des granulats moyens naturels et les granulats PVC moyens (3/8) (Senhadji et al. 2015).

- Des étapes de broyage supplémentaires sont parfois mises en œuvre après le déshiquetage initial pour améliorer l'adhérence entre le ciment et les agrégats plastiques. Par exemple, Remadnia et al. ont déshiqueté des morceaux de plastique dans une étape distincte à l'aide d'un concasseur à hélice pour contrôler la taille des particules et faciliter l'adhésion entre la

matrice et l'agrégat, grâce à la forme irrégulière et à la texture rugueuse (Remadnia et al. 2009).

- Saikia et de Brito (Saikia and De Brito 2012), ont rapporté l'utilisation de trois types d'agrégats plastiques (agrégats de PET sous forme de flocons avec deux gammes de tailles différentes et un produit en forme de pastille) directement collectés d'une usine de traitement des déchets PET pour être utilisés comme agrégat dans le béton. Ces deux types d'agrégats ont été obtenus après un broyage mécanique des déchets de PET, où le lavage a été réalisé avant et après le broyage à l'aide de solutions alcalines. Ensuite le PET moulu a été agité dans un bain d'eau propre et centrifugés pour éliminer les impuretés (le papier, la poussière, le verre broyé et les colles). Le broyage des déchets de PET a produit des particules floconneuses de PET dans une plage de 10 à 14 mm, avec une petite quantité de particules fines, qui ont été éliminées à l'aide d'un système de dépoussiérage.
- Le chauffage et la fusion ont été effectués pour permettre l'extraction des contaminants volatils. Le processus d'extrusion est relativement rapide, ce qui limite les réactions secondaires durant la phase de fusion. Après avoir été extrudée, la masse fondue est recueillie dans un bain de refroidissement qui solidifie le polymère avant d'être granulée dans un coupeur rotatif dans l'eau. Le mélange d'eau et de grains de polymère est ensuite soumis à un séparateur vibratoire, suivi d'une centrifugation des grains de polymère (pastilles en plastique) pour éliminer l'excès d'eau.
- Des modifications des déchets plastiques par chauffage, moyens mécaniques, trempage dans l'eau, fusion suivie d'un mélange avec d'autres matériaux, ainsi que d'autres techniques, ont également été réalisées pour améliorer la qualité des déchets plastiques destinés à être utilisés comme agrégat dans le béton (Choi et al. 2005, 2009; Laukaitis, Žurauskas, and Keriene 2005).

Généralement, le processus de recyclage du plastique comprend le tri des différents polymères, le nettoyage, le déchiquetage et la fusion en granulés (Poonyakan et al. 2018). Mais cette dernière consomme beaucoup d'énergie, par conséquent un nettoyage suivi par un déchiquetage donnera un processus de recyclage plus simple et économique. Même l'utilisation la plus économique des déchets plastiques dans le béton ou mortier semble être leur utilisation directe après déchiquetage comme granulats (Akçaözöğlü, Atiş, and Akçaözöğlü 2010).

I.8.2 Propriétés des granulats plastiques

L'influence des granulats des déchets plastiques (GDP) sur les propriétés des mortiers ou bétons dépend des propriétés des polymères constituant les GP. Le tableau I.3 présente les propriétés des polymères couramment utilisés, telles que la résistance à la traction (f_t), la conductivité thermique (k) et le module de Young (E), et les propriétés des composants du béton, tels que le sable de quartzite, les agrégats de calcaire et la pâte de ciment (Jacobvaillancourt and Sorelli 2018).

Tableau I. 3: Propriétés des polymères couramment utilisés et des composants du béton (Jacobvaillancourt & Sorelli, 2018)

Matériau	f_t (MPa)	E (GPa)	k (W/m.K)
PET	55–80	2.1–3.1	0.15
PVC	50–60	2.7–3.0	0.17–0.21
PS	30–55	3.1–3.3	0.105
PP	25–40	1.3–1.8	0.12
PE	18–30	0.6–1.4	0.33–0.52
Aggregate	–	70	2.29–2.78
Sand	–	70	4.45
Pâte de ciment (E/C = 0.5)	–	36–40	1

On remarque que :

- Tous les types de plastique ont un module d'élasticité et une conductivité thermique inférieurs à ceux des composants du béton ;
- Les granulats naturels (sable et gravier) ont un module d'élasticité de 22 fois celui du PET, ce qui explique la diminution du module de Young (E) et la résistance mécanique du béton ou mortier contenant des GP ;
- La conductivité thermique pour le PE est de 11% de celui du sable, ce qui signifie que l'augmentation de GP dans le béton diminue la conductivité thermique ;
- La résistance à la traction du plastique est supérieure à celle des composants en béton, donc l'utilisation des GP dans le béton peut augmenter la résistance à la traction du matériau cimentaire.

I.8.3 Les avantages de valorisation des DP dans les matériaux de construction

Les besoins mondiaux en agrégats pour la production de béton avoisinent les 4,5 milliards de tonnes annuelles, soulignant l'urgence de découvrir des sources alternatives d'agrégats essentielles pour répondre à la demande croissante de production de béton (Gunasekara et al.

2017). L'incorporation de déchets plastiques recyclés dans la fabrication de béton représente une solution durable face à la fois à l'élimination des déchets plastiques et à la pénurie d'agrégats, grâce à ses bénéfices économiques et écologiques résumés sous :

- Elle contribue au recyclage, réduit la production d'énergie et la pollution de l'environnement et aide à maintenir et à économiser les ressources naturelles qui ne peuvent pas être reconstituées (Ismail and AL-Hashmi 2008).
- L'utilisation DP comme agrégats légers diminue la densité du béton dans le but de la fabrication du béton léger offre une meilleure isolation thermique des structures (Iucolano et al. 2013).
- Et réduit le risque de tremblement de terre puisque la force des tremblements de terre dépend linéairement du poids de bâtiment (Akçaözöğlü, Atiş, and Akçaözöğlü 2010).
- Selon la norme NF EN 13139, des granulats légers, lorsque la densité réelle du grain est inférieure à 2 (Calderon and Horgnies 2013). Ils sont légers, mieux résistants aux intempéries, imperméables (Bahij et al. 2020) et confèrent des propriétés d'isolation thermique (Fraternali et al. 2011; Poonyakan et al. 2018).
- Aujourd'hui, avec les moyens disponibles, il est possible de construire un bâtiment entier uniquement avec des matériaux recyclés. En plus de fournir une mise en œuvre pratique et utile, les plastiques peuvent également contribuer à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, à économiser l'énergie, à réduire les coûts de réalisation, à améliorer la qualité de vie et à protéger l'environnement (Badache et al. 2018)

I.8.4 Exemples d'applications de la valorisation des DP dans les matériaux de construction

Au cours des dernières années, l'utilisation de plastiques recyclés de différentes natures (PEHD, PET, PP, EPS et PVC) pour la fabrication de mortiers et de bétons légers a fait l'objet de plusieurs études telles que (Badache et al. 2018; Fraternali et al. 2011; Herki, Khatib, and Negim 2013; Kou et al. 2009; A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019; Senhadji et al. 2015; Xu et al. 2012). En effet, les déchets plastiques peuvent être utilisés soit comme agrégats fins ou grossiers ou comme fibres de renfort.

En dépit de l'augmentation du nombre de publications et de brevets, la production commerciale et l'utilisation des déchets plastiques comme agrégats de construction restent

limitées. Le marché pour ces agrégats n'est pas encore pleinement développé et la plupart des applications existantes se font à petite échelle (Awoyera and Adesina 2020; L. Zhang 2013). Certains applications pratiques de la valorisation des déchets plastiques dans les matériaux de construction, telles que :

- Les pavés en béton, grâce à sa résistance à l'abrasion supérieure à celle du béton conventionnel (Saikia and De Brito 2012) ;
- Le béton projeté dans les tunnels (Kaufmann et al. 2013) ;
- Les trottoirs en béton (Alani and Beckett 2013) ;
- Des murs en béton préfabriqué) devraient également être envisagées et éventuellement appliquées aux bâtiments écologiques. En Thaïlande, le projet de construction écologique est promu pour encourager les matériaux respectueux de l'environnement (Poonyakan et al. 2018).
- D'autres utilisations dans le secteur de la construction et des infrastructures, par exemple dans le mélange qui forme l'asphalte et dans les briques (Choudhary, Kumar, and Gupta 2020).
- Les sacs en plastique usagés, ont été recyclés pour la production de carreaux de sol et de mur moins inflammables et présentant une résistance à la traction améliorée (Dhawan et al. 2019).
- Il existe plusieurs brevets pour l'utilisation de déchets plastiques comme agrégats de construction qui ont été approuvés (Tableau I.4) (Zulkernain et al. 2021).

Tableau I.4: Brevets pour l'utilisation de déchets plastiques comme granulats dans les composites cimentaires

Numéro de brevet	Titre	Inventeur Année	Type de plastique	Références
US 005422051A	Method for Recycling Plastic into Cementitious Building Products	Sawyers 1995	–	(Sawyers 1995)
US 6488766 B2	Aggregate Using Recycled Plastic	Balkum 2002	PVC	(Balkum 2002)
US 006,669,773 B2	Fly Ash/ Mixed Plastic Aggregate and Products Made Therefrom	Malloy et al. 2003	–	(Malloy, Kashi, and Swan 2003)
US 2006/0106191 A1	PET Artificial Aggregate for the Preparation of Lightened Concrete	Lo Presti and Martines 2006	PET	(S. Lo Presti 2006)
WO 2016/084007 A1	Extruded Plastic Aggregate for Concrete	Barrow et al. 2016	–	(Barrow 2016)
US 2017/0088463 A1	Recycled Plastic Aggregate for Use in Concrete	Alqahtani et al. 2017	PET	(Alqahtani 2017)

Selon Abeysinghe et al. (Abeysinghe et al. 2021), le PEHD est le troisième type de plastique le plus utilisé dans la construction, précédé par le PP et le PET. Les applications et les études de recherche sur le PEHD utilisé dans le béton sont très minimales par rapport au PP et au PET (voir la figure I.25).

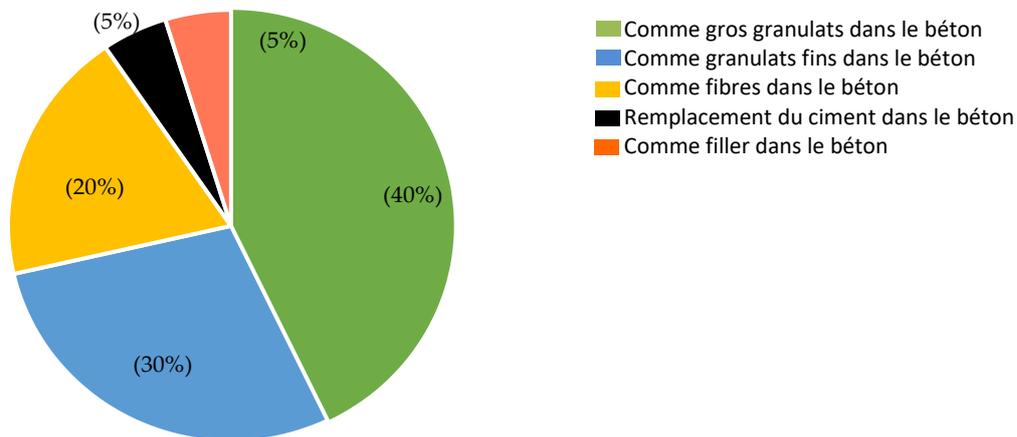


Figure I. 25: Utilisation du PEHD comme matériau de construction (Abeysinghe et al., 2021).

I.9 Analyse des recherches antérieures sur l'influence des GP sur les propriétés du mortier / béton composite

Plusieurs recherches ont porté sur l'intégration des déchets plastiques dans les constructions civiles, notamment dans le béton et les mortiers. Divers types de plastiques, comme le PET, PEHD, PVC, PEBD, PP, ... etc., ont été examinés en raison de leurs propriétés avantageuses telles que la durabilité et la légèreté. Certains chercheurs ont utilisé des agrégats plastiques (AP), qui ont remplacé les granulats naturels, ou sous forme de fibres pour renforcer le béton. Les propriétés du béton frais et durci incorporant des matières plastiques ont été discutées par plusieurs chercheurs (Gu and Ozbakkaloglu 2016; Saikia and De Brito 2014; Sharma and Bansal 2016). Comme d'autres chercheurs ont utilisé les déchets plastiques (DP) dans la confection des mortiers (Aattache et al. 2013; Aocharoen and Chotickai 2023b; Boucedra, Bederina, and Ghernouti 2020; Hung et al. 2022; Saikia and De Brito 2012).

Bien que l'intégration des déchets plastiques dans les matériaux de construction présente des avantages environnementaux, les caractéristiques de ces matériaux demandent des analyses pour évaluer le potentiel et la faisabilité de l'utilisation des déchets plastiques en tant qu'agrégats. Cependant les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité des matériaux de construction contenant des agrégats de déchets plastiques sont examinés et discutés.

I.9.1 L'effet des GP sur la maniabilité des bétons ou mortiers composites

Selon Gu et al. (Gu and Ozbakkaloglu 2016), les facteurs qui affectent la maniabilité des mortiers et bétons contenant des GP sont : Le dosage de substitution des GP, le rapport eau-ciment (E/C) et la forme des GP. Sharma insiste sur l'effet de la quantité d'eau libre sur la maniabilité qui est due à l'ajout de déchets plastiques dans le béton ou mortier (Sharma and Bansal 2016).

Selon Almesha (Ibrahim. Almesha, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020), la diminution la maniabilité du béton est due à : La forme angulaire des particules et les arêtes vives de l'agrégat plastique, les formes non uniformes de GP et le grand rapport de particules fines ou de poudre (résultant du broyage du plastique) augmente la surface totale et nécessite plus d'eau pour entourer ces particules.

En revanche Choi et Ghernouti (Choi et al. 2005, 2009; Ghernouti et al. 20014), ajoutent que la maniabilité du béton augmente à cause de : La surface extérieure des GP plus lisse que celle du sable, et l'absorption d'eau des GP plus faible que celle du sable ce qui résulte plus d'eau libre qui par la suite augmente la valeur d'affaissement.

La figure I.26 (Ibrahim. Almesha, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020), présente les résultats collectés dans des études antérieures (Akinyele and Ajede 2018; Batayneh, Marie, and Asi 2007; Choi et al. 2009; Ghernouti et al. 20014; Hama and Hilal 2019; Ismail and AL-Hashmi 2008; Kou et al. 2009; A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019; Mustafa et al. 2019; Rai et al. 2012; Saikia and De Brito 2014; Shubbar and Al-Shadeedi 2017a; Wang and Meyer 2012), qui montrent l'effet du taux de substitution de GP fin sur l'ouvrabilité des composites à base de ciment.

Dans la majorité des études, la maniabilité du béton frais diminue avec l'augmentation du taux de substitution (Akinyele and Ajede 2018; Batayneh, Marie, and Asi 2007; Hama and Hilal 2019; Ismail and AL-Hashmi 2008; A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019; Rai et al. 2012; Shubbar and Al-Shadeedi 2017a) . Ceci est dû à de nombreuses raisons telles que : la forme angulaire des particules et les arêtes vives de l'agrégat plastique, la faible fluidité résultant de formes non uniformes de GP et le grand rapport de particules fines ou de poudre (dû au broyage du plastique) augmente la surface totale augmentant ainsi la nécessité d'augmenter la teneur en eau pour entourer ces particules.

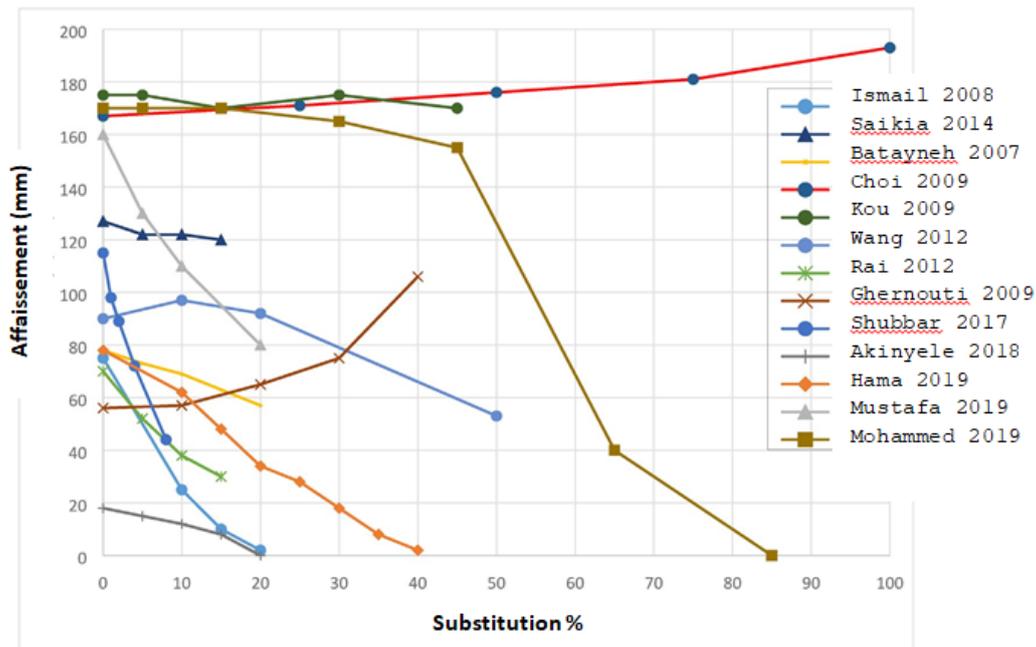


Figure I. 26: l'effet du pourcentage de substitution de GP fin sur l'ouvrabilité des bétons (Almeshal et al. 2020)

Mustafa a observé que l'affaissement était réduit jusqu'à 50% pour un mélange contenant 20% de GP en remplacement de sable (Mustafa et al. 2019). Alors que Mohamed a constaté que le remplacement de 85% de sable par le PVC a donné un béton sans affaissement (A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019).

Cependant, certains auteurs ont indiqué qu'aucune influence remarquable de la substitution en GP à de faibles dosages, sur la maniabilité du béton (Kou et al. 2009; Wang and Meyer 2012).

Dans le cas des mortiers, Al-Hadithi a trouvé que l'ajout de déchets de PEHD traités modifie la fluidité et les propriétés mécaniques du mortier, avec des impacts plus prononcés à des taux élevés. Ils constatent également que les additions de plus de 3 % de PEHD réduisent l'ouvrabilité (A. I. Al-Hadithi, Abdulrahman, and Al-Rawi 2020).

Tsai et al. (Tsai et al. 2022), ont étudié un mortier de ciment préparé avec différents rapports E/L et différents pourcentages (1 %, 2 %, 3 % et 4 %) de déchets de PE et 20% de laitier granulé de haut fourneau dans des rapports E/L (0,4, 0,5 et 0,6). Les résultats ont montré que la maniabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en déchets de PE et augmentent avec l'augmentation du rapport E/C.

Saikia et de Brito (Saikia and De Brito 2014), ont utilisé des agrégats PET en deux formes différentes pour remplacer partiellement les granulats naturels grossiers et fins dans le béton : un granulat PET granulé, ayant une surface très lisse et un PET feuilleté, ils ont constaté que l'affaissement du béton frais augmente dans le premier cas et diminue dans le deuxième.

I.9.2 L'effet des GP sur la masse volumique apparente du mortier composite

Il faut souligner que les GDP ont une densité bien inférieure à celle des granulats naturels. Et leur incorporation dans le composite à base de ciment permet de réduire ses masses volumiques à l'état frais et durci. La densité du composite de ciment diminue avec l'augmentation de la substitution en GDP. Selon Hannawi (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010), lorsque le PE augmente dans le mélange, la densité apparente du mortier à l'état durci diminue. Cette réduction est due au fait que la densité des granulats plastiques est inférieure de 70 % à celle du sable naturel.

Le remplacement du plastique dans la plupart des matériaux de construction, notamment le béton, le mortier et la brique, permet de produire des matériaux de construction légers grâce à la faible densité et au poids très léger du plastique. Le tableau I.5 donne des exemples de variation de la densité enregistrée dans plusieurs études pour le béton, le mortier et les briques (Zulkernain et al. 2021).

Tableau I. 5: Variation de la densité des matériaux de construction ayant des pourcentages variables de granulats plastiques (Zulkernain et al., 2021)

La référence	matériau	Type de plastique	% de plastique	La densité apparente (Kg/m ³)	
				Sans Plastique	Avec plastique
(Rai et al. 2012)	Béton	mélange	0, 5, 10, 15	2400	2300 -2225
(Akinyele and Toriola 2018)	Block de béton	mélange	0, 5, 10, 15, 20, 100	2350	2250–500
(Makri, Hahladakis, and Gidaracos 2019)	mortier	E-plastique	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12	2000	1900–1500
(Akinyele, Igba, and Adigun 2020)	La brique cuite	PET	0, 5, 10	1674	1404–1330

Mehta et Monteiro (Mehta and Monteiro 2001), indiquent que les mortiers classiques peuvent perdre environ 5 % de leur densité après le durcissement, principalement en raison de la perte d'eau et du développement de la porosité.

Les facteurs influençant la différence de densité à l'état frais et durci sont :

- **L'évaporation de l'eau** : Pendant le processus de durcissement, l'eau excédentaire s'évapore, créant des vides et des pores dans la matrice cimentaire. Cela réduit la densité du mortier durci par rapport à l'état frais. Plus le rapport E/C est élevé, plus la différence de densité sera prononcée, comme l'indiquent Powers & Brownyard (1946) dans leur étude sur la porosité et la densité des mortiers (Problems 1947).
- **La réaction d'hydratation du ciment** : L'hydratation du ciment entraîne également une réduction de la masse d'eau dans le système. Environ 20 à 25 % de l'eau utilisée dans le mélange initial est liée chimiquement dans les produits d'hydratation, mais une grande partie s'évapore, contribuant à la diminution de la densité (Neville 2011).
- **La porosité** : Le développement de la porosité interne dans le mortier durci est un facteur clé dans la réduction de la densité. Le mortier durci présente généralement une porosité capillaire, qui affecte sa masse volumique et contribue à une diminution de densité par rapport au mortier frais (Zulkernain et al. 2021).

La figure I.23 (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020), présente les résultats obtenus lors d'études antérieures dont les GP ont remplacé un volume de sable dans le béton (Ferreira, De Brito, and Saikia 2012; Ghernouti et al. 20014; Hama and Hilal 2019; Ismail and AL-Hashmi 2008; Juki et al. 2013; A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019; Mustafa et al. 2019; Shubbar and Al-Shadeedi 2017a; R. V. Silva, De Brito, and Saikia 2013) qui montrent l'effet de la substitution en GP sur la masse volumique apparente du béton. Cette dernière, diminue à mesure que la substitution en GP augmente.

Tous les chercheurs sont d'accord avec la diminution de la densité (fraîche ou durcie) des bétons et mortiers avec l'incorporation des granulats plastiques. Ils ont attribué cela à la densité légère de l'agrégat plastique, qui était 13,75% plus léger que l'agrégat fin utilisé (Shubbar and Al-Shadeedi 2017a). Hama et Hilal (Hama and Hilal 2019), ont observé une réduction de la densité fraîche du béton contenant du PET et du HDPE sous forme de granulats fin. Des taux de remplacement de 40% de PET et de 30% de HDPE d'agrégats fins conduisent à diminuer la densité de 15% et 11,4% respectivement. Les auteurs ont lié cette réduction à la faible densité du plastique par rapport à la gravité spécifique des granulats naturels fins ou grossiers.

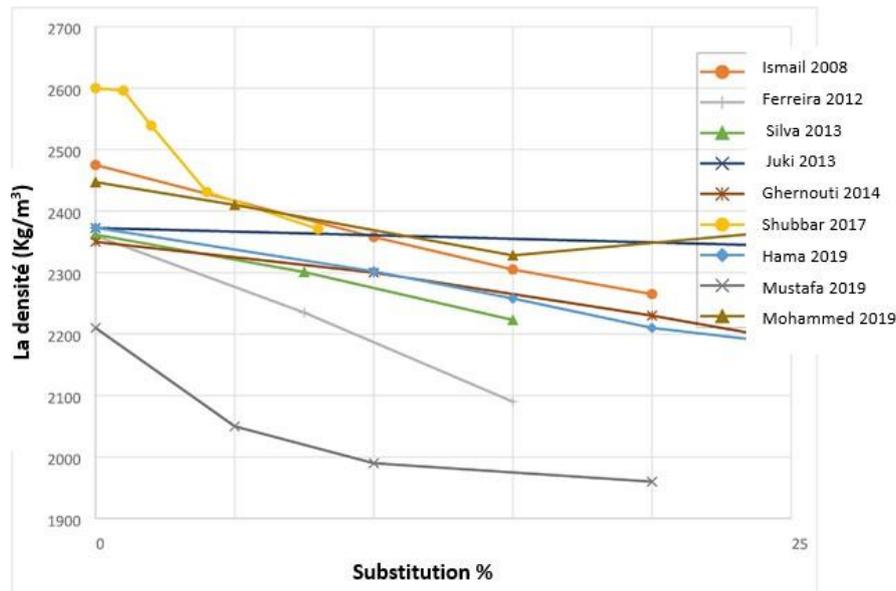


Figure I. 27: l'effet du pourcentage de substitution de GP fin sur la densité du béton (Almeshal et al. 2020)

Mohammed et al. (A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019), ont signalé que la densité du béton ne diminuait pas de manière significative lorsque le sable était remplacé par du PVC, contrairement au remplacement du gravier qui montre une réduction remarquable de la densité et environ deux fois plus élevée que lorsque le sable est remplacé par des agrégats de PVC.

Saikia et de Brito (Saikia and De Brito 2014), ont signalé que la densité des mélanges de béton frais diminue à mesure que la teneur en granulats de PET augmente. Les auteurs ont trouvé cette réduction de densité pour trois formes différentes d'agrégat de PET: deux fractions d'agrégat plastique déchiqueté (fine et grossière) et un agrégat plastique granulé. Les auteurs expliquent cette tendance pour l'écart entre la densité de l'agrégat de PET et celle de l'agrégat naturel.

Marzouk et coll (O Y Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2005), ont travaillé avec des mélanges de mortier préparés en remplaçant le sable en volume par deux tailles différentes de granulats PET avec un taux de remplacement de 0 à 100%. Quelle que soit la taille du PET, la réduction de densité est restée faible lorsque le niveau de substitution varie entre 0% et 30%. Cependant, lorsque le taux de remplacement dépassait 50%, les densités apparentes diminuaient à $1\,000\text{ kg/m}^3$ tandis que le mélange de référence était de $2\,000\text{ kg/m}^3$.

Calderon et Horgnies (Calderon and Horgnies 2013), ont mentionné que l'addition de polymères recyclés (y compris le PEHD) réduit la densité des mortiers au fur et à mesure que les pourcentages augmentent. Cela s'explique par la substitution des granulats lourds par des matériaux plus légers, et à l'augmentation du volume d'air emprisonné dans la matrice dû à une adhérence plus faible entre le polymère et la pâte de ciment.

Badache (Badache et al. 2018), ont démontré que l'ajout de PEHD réduit la densité apparente, tant dans l'état frais que durci du mortier, et cette diminution devient plus prononcée avec des taux d'incorporation plus élevés .

Saikia et de Brito (Saikia and De Brito 2012), mentionnent que la réduction de densité dans les matériaux de construction contenant des polymères recyclés est attribuable non seulement à la faible densité des polymères eux-mêmes, mais aussi à l'augmentation de la porosité dans la matrice cimentaire résultant de l'ajout de ces polymères.

Ismail et Al-Hashmi (Ismail and AL-Hashmi 2008), ont également montré que l'incorporation de PEHD, bien qu'elle réduise la densité, améliore l'allègement du mortier, ce qui peut être avantageux dans certaines applications de construction où la réduction de poids est cruciale, comme dans les panneaux de revêtement.

I.9.3 La porosité accessible à l'eau

La porosité est le principal facteur affectant les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Une augmentation de la taille des pores diminue le module d'élasticité et la résistance du béton. Il a été observé que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la porosité du béton. De plus, l'augmentation de la porosité augmente l'absorption d'eau, et la perméabilité (Aocharoen and Chotickai 2023a).

Selon Safi et al. (Safi et al. 2013), les résultats de la porosité et de l'absorption d'eau au cours de 28 jours pour tous les mortiers, illustrent que la porosité diminue avec le pourcentage de remplacement du sable par les déchets plastiques pour toutes les compositions, jusqu'à 30% de remplacement, une légère augmentation de la porosité des mortiers autoplaçants, est observée. Cela est lié à l'effet de remplissage des vides dans la matrice cimentaire et ça réside dans le remplacement du sable, matériau poreux, par le plastique qui est un matériau moins poreux.

La substitution des particules de PE n'a eu aucun effet bénéfique direct sur la porosité des mortiers composites durcis, car la sorptivité a augmenté et la détérioration des mortiers a diminué avec des taux de remplacement plus élevés (Aattache, Soltani, and Mahi 2017).

Albano et al. (Albano et al. 2009), ont indiqué que la taille et la forme des granulats peuvent influencer la porosité de deux manières : d'une part, en modifiant la pâte, et d'autre part, en assurant une porosité adéquate. La substitution partielle du sable par des granulats PET (avec une granulométrie différente), crée une porosité différente à celles créées par le sable naturel.

I.9.4 L'effet des GP sur la résistance à la compression

La qualité du composite à base de ciment est souvent évaluée en fonction de sa résistance à la compression. Et presque toutes ces propriétés sont liées à cette résistance. L'incorporation des granulats plastiques dans les matériaux de construction est souvent associée à une certaine dégradation des propriétés mécaniques du béton, du mortier ou des briques produites (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020; Gu and Ozbakkaloglu 2016; Saikia and De Brito 2012).

- Selon Gu et Ozbakkaloglu (Gu and Ozbakkaloglu 2016), les paramètres qui affectent la résistance à la compression du béton contenant du plastique sont : le pourcentage de substitution en GP ; les formes et les types de GDP et le rapport E/C.
- Selon Almeshal et al. (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020), les facteurs qui diminuent la résistance à la compression du béton contenant du GDP sont : La nature hydrophobe des GDP qui freine la réaction d'hydratation du ciment ce qui résulte une très faible adhérence entre la pâte de ciment et la surface du GDP; la porosité et la teneur élevée en air du béton ; le faible module d'élasticité des GP par rapport à celui des granulats naturels.
- Coppola et al (Coppola et al. 2016), ont constaté que le mortier contenant 10 % et 25 % d'agrégats plastiques obtenait respectivement 35,12 MPa et 22,86 MPa de résistance à la compression, ce qui dépassait l'exigence standard du comité de l'American Concrete Institute (ACI) pour le béton structurel (17,25 MPa).

Selon la figure I.28 toutes les études, indiquent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de substitution en GP (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020).

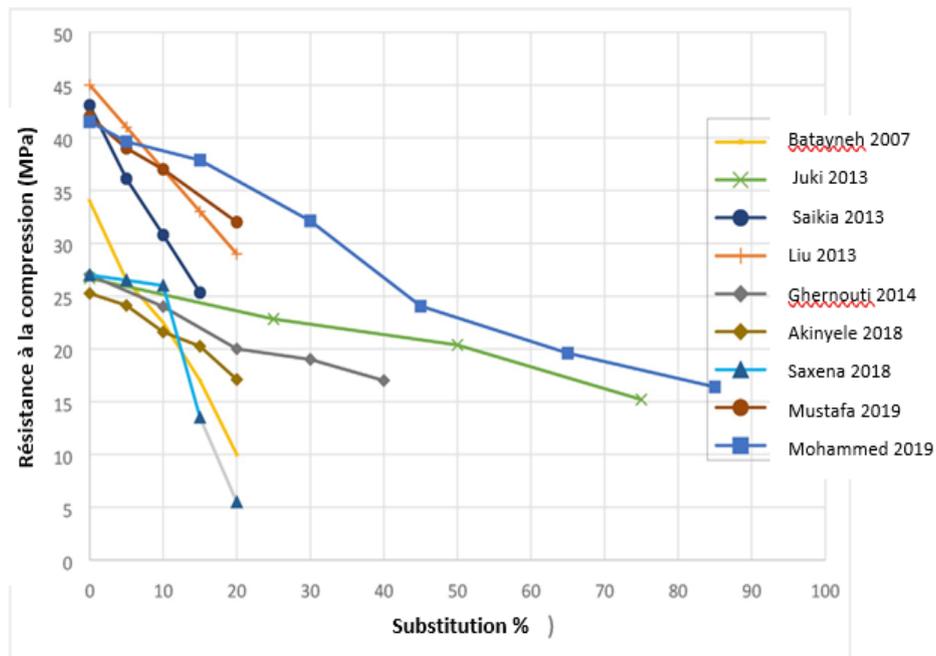


Figure I. 28: Variation de la résistance à la compression du béton à 28 jours avec différentes substitutions en granulats plastiques (Almeshal et al. 2020)

(Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010; O. Yazoghli Marzouk, Dheilly, and Queneudec 2007), ont rapporté les résistances à la compression du mortier préparé par des agrégats de polycarbonate (PC) et de PET avec 3%, 10%, 20% et 50% en remplacement du sable. La résistance à la compression diminuait lorsque la GDP dans le mortier augmentait. En outre, la forme feuilletée du GDP peut être responsable d'une réduction supplémentaire de la résistance à la compression (A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019).

Hung et al (Hung et al. 2022) ont ajouté à un mortier de ciment avec un rapport (E/C=0,5), du polyéthylène (PE) usagé à des volumes de sable de 0 %, 1 %, 2 %, 3 % et 4 %. La résistance à la compression a diminué avec l'augmentation du volume de déchets de PE ajouté. L'ajout de 2 % de ce volume au mortier permet de répondre aux besoins d'une utilisation en ingénierie générale et de favoriser le recyclage des déchets.

I.9.5 L'effet des GP sur la résistance à la flexion

La résistance à la flexion est la capacité d'un matériau à résister à la déformation sous une charge de flexion, et elle est mesurée en termes de contrainte. La résistance à la flexion des matériaux cimentaires (bétons/mortiers) est prise en compte dans les essais de résistance à la traction.

La figure I.29 présente les résultats recueillis dans les études (Aciu et al. 2018; Batayneh, Marie, and Asi 2007; Ghernouti et al. 20014; Jaivignesh and Sofi 2017; Juki et al. 2013; A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019; Rai et al. 2012; Safi et al. 2013; Saikia and De Brito 2014; Záleská et al. 2018), qui montrent l'effet de la substitution en GDP sur la résistance à la flexion du béton. Semblable à la résistance à la compression, la résistance à la flexion diminue à mesure que le pourcentage de remplacement augmente. L'explication de la perte de résistance à la compression des composites à base de ciment due à l'incorporation de DGP s'applique également au comportement en flexion du béton.

Saikia et de Brito (Saikia and De Brito 2014), ont conclu que la résistance à la flexion diminue avec l'ajout de tout type d'agrégat PET dans le béton. Ils mentionnent que le PET de forme régulière a entraîné une diminution de la résistance à la flexion inférieure à celle de la forme aléatoire. Pour 15% de remplacement en GP, la résistance à la flexion a diminué de 16% et 50% de moins que le béton conventionnel pour le PET en forme de granulés et le PET broyé (feuilleutés), respectivement.

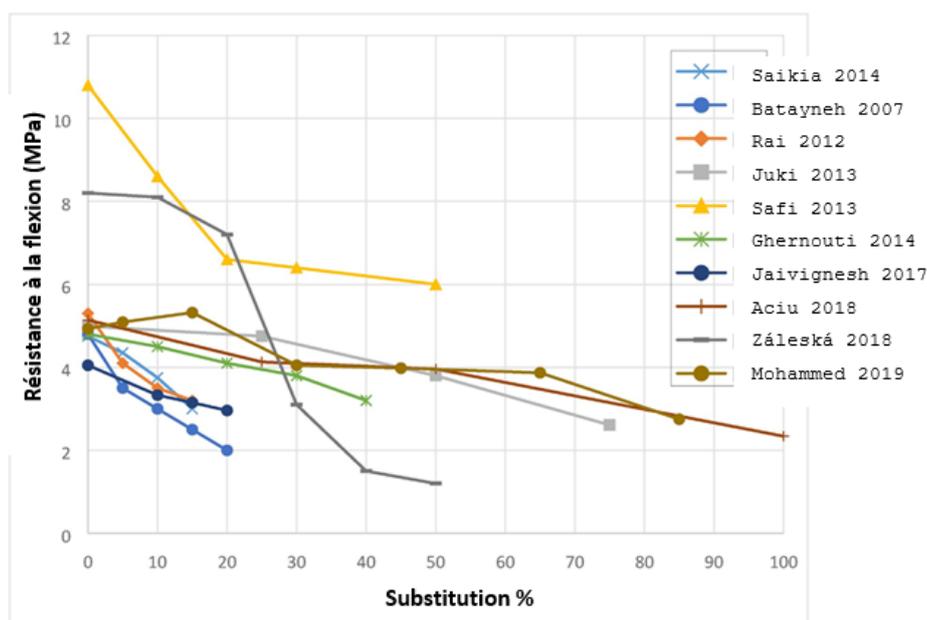


Figure I. 29: Variation de la résistance à la flexion du béton à 28 jours avec différentes substitutions en granulats plastiques (Almeshal et al. 2020)

Mohammed et al (A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019) ont rapporté une variation des résultats de résistance à la flexion du béton avec le pourcentage d'agrégats de PVC. Lorsque le sable a été remplacé par du PVC, il y avait une augmentation de la résistance

à la flexion du béton de 8% à 15% de remplacement, la contrainte n'a pas été modifiée entre 30% et 65% mais il y a une perte relativement élevée à 85% pour 44% de PVC.

Pour les mortiers les études suivantes ont révélé :

Hannawi et al (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010), ont rapporté qu'aucun changement significatif de la résistance à la flexion du mortier contenant jusqu'à 20% et 10% d'agrégats PC et PET respectivement par rapport au mortier de référence. Cependant, pour 20% et 50% des agrégats de PET, la résistance à la flexion a diminué respectivement de 9,5% et 17,9%. Pour un taux de remplacement des agrégats de PC de 50%, une réduction de 32,8% a été observée. Les auteurs ont expliqué que la nature élastique et le comportement non cassant sous la charge des GDP pourraient avoir un impact sur les valeurs de résistance à la flexion.

Akcaozoglu et coll (Akçaözoğlu, Atiş, and Akçaözoğlu 2010), ont étudié la résistance à la flexion de deux mélanges de mortier. Le premier mélange contenant du PET et du sable ensemble, et le second mélange ne contenant que du PET. Les auteurs ont observé que la résistance à la flexion est similaire pour les deux mélanges, et elle a diminué de 55% inférieure à celle de l'échantillon de référence à 28 jours.

Aciu et al (Aciu et al. 2018). ont rapporté une diminution de la résistance à la flexion du mortier contenant du PVC comme granulats fins par rapport à l'échantillon de référence. À 25%, 50% et 100%, la réduction de la résistance à la flexion était de 20%, 23% et 54%.

I.9.6 Caractéristiques de la rupture des matériaux composites contenant des agrégats plastiques

Les éprouvettes contenant des agrégats plastiques présentent la capacité de supporter une charge pendant plusieurs minutes après avoir subi une rupture. Il a été observé que l'augmentation de la proportion d'agrégats plastiques confère une ductilité accrue à la rupture, comme l'ont rapporté plusieurs chercheurs. Badache et al. (Badache et al. 2018), ont démontré que les mortiers composites montrent une ductilité significative lorsque la substitution de sable en (PEHD) est augmentée, car le mortier devient plus élastique et moins rigide, La figure I.30 montre l'état des éprouvettes après l'essai de flexion-compression. Selon Azhdarpour et al. (Azhdarpour, Nikoudel, and Taheri 2016), Cette ductilité contribue à prolonger la durée de résistance de la structure avant l'effondrement.

La figure I.31 (Senhadji et al. 2015) présente l'état de rupture des éprouvettes contenant du granulats en PVC, comparés à du béton conventionnel. Contrairement au béton témoin, qui

s'est désintégré lorsque la charge maximale a été atteinte, le composite a subi une déformation considérable sans se désintégrer. Cette tendance devient plus évidente à mesure que le pourcentage de granulats en PVC augmente. En fait, l'éprouvette de béton s'est brisée après le déchargement, tandis que les éprouvettes des bétons composites ont conservé leurs intégrités et les fissures sont devenues plus étroites, se fermant parfois même complètement. Cela suggère que le composite a un bon potentiel pour une utilisation dans les barrières antichoc, les structures de soutènement et les structures de chaussée si sa résistance est convenable (Senhadji et al. 2015).

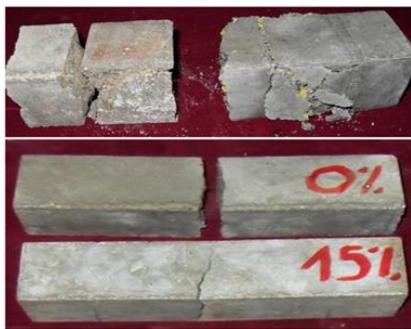


Figure I.30: État des éprouvettes après les essais de flexion et en compression (Badache et al., 2018)



Plain concrete

PLWC30



Mortier de référence

Mortier composite

Mortier composite



PLWC50

PLWC70

Figure I.31: Comparaison de l'état de rupture de l'éprouvette du béton conventionnel avec des éprouvettes des bétons composites (avec GP) (Senhadji et al., 2015)

Des observations similaires ont été rapportées par Batayneh et al., ainsi que par Saikia et de Brito (Batayneh, Marie, and Asi 2007; Saikia and De Brito 2013), concernant d'autres types de déchets plastiques. Ces auteurs ont noté que les éprouvettes de béton contenant des particules de PET entraînaient un mécanisme de rupture plus lent lors des essais de résistance à la traction, les agrégats de PET agissant comme des ponts entre les fragments séparés.

Frigione et Hannawi (Frigione 2010; Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010), ont également observé que les éprouvettes contenant des agrégats plastiques ne se comportent pas de la même manière à la rupture que les mortiers de référence (figure I.32). À mesure que la proportion d'agrégats plastiques augmente, la défaillance devient plus ductile, permettant aux éprouvettes de supporter une charge pendant plusieurs minutes après une défaillance mécanique. Cette tendance semble être plus évidente à mesure que le pourcentage des agrégats plastiques augmente.

Le béton ordinaire fragile n'a pas de ductilité post-fissuration efficace, mais les fibres plastiques peuvent considérablement améliorer la réponse post-fissuration du béton, car elles agissent comme un pare-fissures et modifient la matrice de béton intrinsèquement fragile en un matériau ductile et résistant aux fissures. Par conséquent, lors de la rupture du béton, les fissures simples courantes peuvent être remplacées par des micro-fissures denses en raison de la présence de fibres de renforcement (Yin et al. 2015).

I.9.7 L'effet des GP sur la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV)

Les essais de vitesse d'impulsion peuvent être appliqués dans les études structurelles pour évaluer la gravité des fissures ou de la détérioration et évaluer les changements dans les propriétés du béton. Ces tests peuvent également révéler l'existence de fissures et de vides, estimer l'efficacité de la réparation des fissures et déterminer la qualité relative et l'uniformité du béton. La valeur de la vitesse des ondes mesurée est étroitement liée à la compacité des produits cimentaires (béton/ mortier). En général, la vitesse des ondes d'impulsion est proportionnelle à la racine carrée du module d'élasticité du béton et inversement proportionnelle à la racine carrée de sa masse volumique (Hung et al. 2022). La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un matériau dépend de sa porosité ; elle dépend donc de sa densité et de ses propriétés élastiques (Akçaözoğlu, Akçaözoğlu, and Atiş 2013).

La vitesse des ultrasons a augmenté avec le temps de durcissement. Lorsque l'ajout de déchets de PE est passé de 1 % à 4 %, la vitesse des ultrasons a diminué de 6,9 % à 8,7% (Hung et al. 2022). Akçaözoğlu et al. (Akçaözoğlu, Akçaözoğlu, and Atiş 2013), ont évalué la porosité des bétons composites par des mesures ultrasonores. Les vitesses des ondes ultrasonores des échantillons diminuent à mesure que la quantité des granulats PET augmente dans le mélange, ce qui engendre la diminution du poids unitaire. Tandis que la compacité et la densité du

béton augmentent, la vitesse des ondes ultrasonores et la résistance du béton augmentent simultanément.

Safi et al. (Safi et al. 2013), ont étudié la VUP du mortier autoplaçant contenant des déchets plastiques PET (0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50% du poids du sable). Les résultats ont montré une légère réduction de la vitesse du son, quel que soit le niveau de substitution du sable par des déchets plastiques, par rapport au mortier de référence, à tous les temps de durcissement. Ce résultat peut être attribué aux produits d'hydratation du ciment, qui combleraient les vides éventuels du matériau. De plus, la vitesse du son était pratiquement constante jusqu'à 30 % de déchets plastiques. Mohammed et al (A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019), ont étudié l'UPV du béton fait de granulats fins partiellement remplacés par des déchets plastiques dérivés de feuilles de PVC à des taux de remplacement de 0 %, 5 %, 15 %, 30 %, 45 %, 65 % et 85 %. La valeur de l'UPV s'est dégradée avec une augmentation de la teneur en PVC du béton. Cependant, la réduction n'a pas dépassé 16 % pour des taux de remplacement des granulats de PVC allant jusqu'à 45 %. L'UPV a encore diminué pour de grands volumes de sable remplacés par des granulats de PVC et a atteint 30 % à une teneur en granulats de PVC de 85 % .

I.9.8 Module d'élasticité

Le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique sont deux mesures des propriétés mécaniques des matériaux, mais ils diffèrent par la méthode de mesure et les conditions dans lesquelles ils sont déterminés. Le module statique est plus représentatif des conditions de charge réelles et de la performance à long terme, tandis que le module dynamique est utilisé pour des évaluations rapides et non destructives ou dans des contextes de charges dynamiques.

I.9.8.1 Le module d'élasticité dynamique (E_d)

L'incorporation de 15, 30, 45 et 60 % de granulats recyclés dans les mortiers composites entraîne une diminution du module d'élasticité dynamique (E_d) de 8,4, 17, 21,3 et 24,2 GPa par rapport au mortier de référence NMC. L'augmentation de 60 % de la teneur en polymère (PEHD) entraîne une réduction de 73 % du module d'élasticité dynamique par rapport au mortier témoin, due à l'augmentation du volume des pores au sein de la structure, ce qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores (Badache et al. 2018).

Le module d'élasticité (du béton ou mortier composite) diminue lorsque le pourcentage de GP augmente. Les résultats obtenus par Belmokaddem et al. (Belmokaddem et al. 2020), suggèrent que le béton contenant des granulats plastique (PEHD) provoque une diminution plus significative du module d'élasticité dynamique par rapport à celui contenant (PVC) et le (PP) ; ceci est principalement attribué au fait que le PEHD a un module d'élasticité dynamique plus faible. Et aussi que l'adhérence entre le polymère et la matrice de ciment est faible en raison de la différence entre le module d'élasticité des particules de polymère et celle de la pâte de ciment (Albano et al. 2009; Badache et al. 2018; Benosman et al. 2017; Rahmani et al. 2013), qui ont conclu que la baisse du module d'élasticité des matériaux cimentaires est principalement due au faible module d'élasticité des particules plastiques.

Selon Marzouk et al. (O. Yazoghli Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2007), le module d'élasticité (selon la méthode UPV) augmentait avec la teneur en PET. Une diminution de 50 % a été observée dans le module d'élasticité des mortiers préparés avec un taux de remplacement de 50 % de granulats naturels par des granulats de PET, par rapport à celui du mortier de référence. Cette diminution est due à la baisse des masses volumiques apparentes des mortiers et à la présence d'agrégats plastiques qui font baisser la vitesse de propagation des ondes.

I.9.8.2 Le module d'élasticité statique (le module de Young E)

Tous les types de plastique ont un module d'élasticité bien inférieur à celui des composants du béton. Le sable et les granulats ont un module d'élasticité de 22 fois celui du PET, ce qui indique que l'utilisation de plastique dans le béton conduit à diminuer le module de Young (E) (I Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020). Et le type de granulats a un impact sur le module d'élasticité, puisque la déformation produite dans le béton est en partie attribuée à la déformation élastique des granulats (Belmokaddem et al. 2020). Selon Vaillancourt et Sorelli, le PEHD a un module d'élasticité inférieur (0,6–1,4 GPa) par rapport au PP (1,3–1,8 GPa) et au PVC (2,7–3 GPa) (Jacob-vaillancourt and Sorelli 2018).

La figure I.33 (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020) présente les résultats d'études antérieures (Kou et al. 2009; F. Liu et al. 2015; A. A. Mohammed, Mohammed, and Mohammed 2019; Mustafa et al. 2019; Wang and Meyer 2012; Záleská et al. 2018), qui montrent l'effet du SPA sur le module d'élasticité.

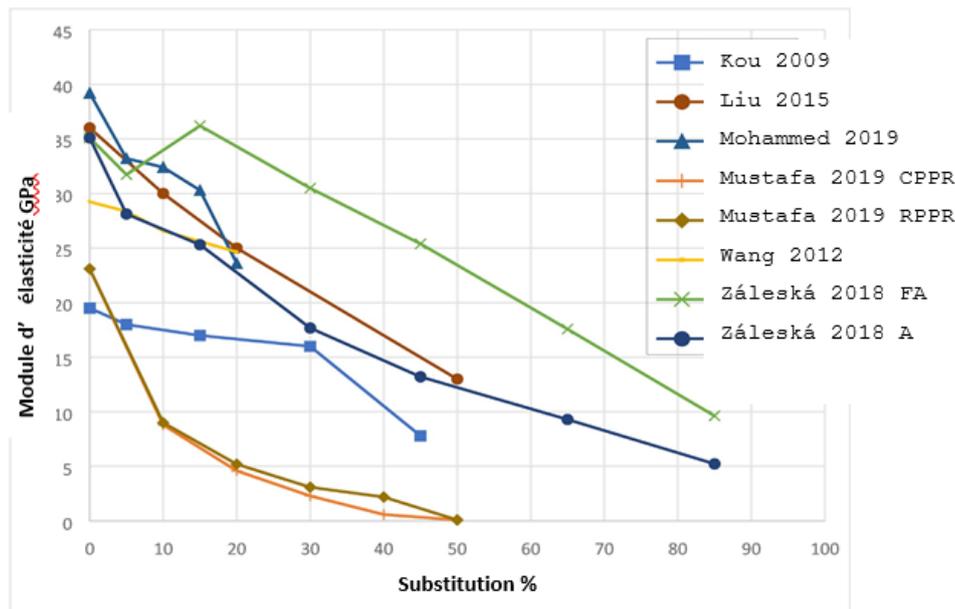


Figure I. 33: Variation du module d'élasticité à 28 jours avec différents taux de remplacement des agrégats plastiques. (Almeshal et al. 2020)

Quant à Hannawi et al. (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010), ils ont rapporté que la mauvaise liaison entre la matrice cimentaire et les granulats plastiques peut également contribuer à cette baisse. Cela peut être intéressant dans les applications où la flexibilité du matériau est plus importante que la résistance.

Marzouk et al. (O. Yazoghli Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2007), ont constaté la réduction du module d'élasticité du mortier contenant du PET résiduel en raison de la faible masse volumique apparente des composites. Hannawi et al. (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010), ont également obtenu des résultats inférieurs sur le module d'élasticité d'un mortier contenant du PET résiduel comme substitut d'agrégats fins. Les résultats inférieurs sont attribués au faible module d'élasticité du PET et à la mauvaise adhérence entre le DP et la matrice de ciment. La raison sous-jacente aux résultats obtenus pour le module d'élasticité inférieur d'une éprouvette de béton constitué de déchets de PET en remplacement d'agrégats fins par Rahmani et al., (Rahmani et al. 2013) était également identique à celui de Hannawi et al. (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010). Les conséquences similaires concernant le module d'élasticité du béton avec déchet plastique ont été observées par d'autres auteurs (Albano et al. 2009; Ghaly et Gill 2004; Kim et al. 2010; Yang et al. 2015).

I.9.9 L'absorption capillaire

La durabilité d'un matériau dépend largement de sa capacité à limiter l'absorption d'eau, en particulier en présence d'ions agressifs dissous. Il est essentiel d'analyser le déplacement de l'humidité au sein des éprouvettes afin de juger leur pertinence en tant que matériaux de construction et d'optimiser leur qualité. Parmi les processus permettant aux substances agressives de s'infiltrer dans les matériaux cimentaires, on distingue principalement la diffusion et la capillarité, cette dernière étant le mode de pénétration prédominant. Toutefois, une faible capillarité favorise une meilleure durabilité. Pour caractériser le comportement d'un matériau en contact avec l'eau, on mesure généralement la sorptivité grâce à un test d'absorption capillaire (Benazzouk et al. 2007).

Omrane et coll. (Omrane et al. 2016) ont analysé des mortiers contenant 2, 4 et 6 % de particules de polymère PET en poids de ciment. Ils ont observé une diminution de la sorptivité avec une augmentation de la teneur en particules de polymère.

Marzouk et al. (O. Yazoghli Marzouk, Dheilly, and Queneudec 2007), ont examiné la sorptivité de différents mortiers de ciment, ils ont constaté des valeurs de sorptivité plus faibles pour les mortiers contenant du PET par rapport au mortier conventionnel. De plus, la sorptivité diminuait avec l'augmentation du volume de substitution jusqu'à 50 %.

Da Silva et al. (A. M. Da Silva, De Brito, and Veiga 2014), ont remplacé le sable par des particules de polymère PET recyclé en utilisant deux géométries différentes (granulés de plastique (PP) et flocons de plastique (PF)) à trois ratios (5, 10 et 15%). Ils ont rapporté que le coefficient d'absorption capillaire de l'eau augmentait avec le volume des déchets plastiques.

Choi et al. (Choi et al. 2009), ont mesuré le coefficient de sorptivité de mortiers de ciment durcis pendant 28 jours, préparés en remplaçant 25%, 50% et 75% des granulats fins naturels par des granulats de PET en poudre recouverte de sable. Leurs résultats ont montré que la sorptivité du mortier contenant 25% de granulats de PET était inférieure à celle du mortier témoin, tandis qu'aux niveaux de remplacement de 50 % et 75 %, elle était supérieure. Selon les auteurs, à ces taux de substitution élevés, la modification de la granulométrie du mélange de granulats fins a entraîné une augmentation de la porosité interne du mortier, ce qui a accru la sorptivité.

L'incorporation de polyéthylène (PE) augmente la présence de pores capillaires, surtout à des taux élevés. Cette augmentation est due à la texture rugueuse du PE qui favorise la rétention

d'eau et stabilise la structure cimentaire. Des études antérieures ont observé des effets similaires avec le remplacement des granulats par du PET (Aattache, Soltani, and Mahi 2017). Mohammed et al. (H. Mohammed et al. 2022), ont utilisé sept types de polymères thermoplastiques recyclables granulaires et en poudre, en remplacement des granulats fins dans le béton (3 et 5 %). Ils suggèrent que la réduction l'absorption capillaire suite à l'incorporation des polymères, est due à la nature hydrophobe des polymères et également aux espaces capillaires obstrués (remplis par les polymères) lorsque les polymères sont dispersés dans la pâte de ciment. De plus, la force de liaison entre la pâte de ciment et les polymères affecte généralement la perméabilité du béton, plus la liaison est forte, moins le béton est perméable. La perméabilité du béton a diminué avec l'introduction de polymères et les liaisons plus fortes ont diminué les espaces entre la pâte de ciment et les polymères, par conséquent, ce type de béton est capable de protéger l'acier de la corrosion. Le transfert hydrique dans les échantillons était beaucoup plus lent avec l'inclusion de PET.

I.9.10 Pénétration des ions chlorures

La pénétration des ions chlorure dans le béton est l'un des problèmes affectant la durabilité du béton. Ces ions peuvent être présents dans l'eau traversant le mortier du revêtement, une fois infiltrés dans le béton, les ions chlorure peuvent provoquer la corrosion des armatures.

Dans l'étude de Senhadji et al. (Senhadji et al. 2015), des déchets plastiques en polychlorure de vinyle (PVC) ont été utilisés en remplacement partiel du sable et du gravier à différents taux (30, 50 et 70 %) par volume de béton. Ils ont mesuré la résistance des bétons composites, ils ont remarqué que la pénétration des ions chlorure a diminué avec le taux de remplacement en PVC. Donc les granulats PVC ont un effet bénéfique en termes de protection des barres d'acier contre la corrosion.

Selon Kou et al. (Kou et al. 2009), les résultats indiquent que la résistance à la pénétrabilité des ions chlorure du béton a augmenté avec l'augmentation de la teneur en PVC. Les granulés de PVC imperméables bloquent le passage des ions chlorure.

Omrane et al. (Omrane et al. 2016), a fait une étude de la résistance à la pénétration des chlorures d'un mortier de ciment contenant du PET. Le ciment est partiellement remplacé par du PET à raison de 2 %, 4 % et 6 % du poids. Les résultats ont révélé une amélioration de la résistance à l'attaque des chlorures.

Ben Fraj et al. (Ben Fraj, Kismi, and Mounanga 2010), ont étudié la diffusion des ions chlorure dans des bétons contenant de la mousse rigide de polyuréthane (PUR). Leur travail révèle que les granulats de PUR secs réduisent la diffusion des chlorures, tandis que leur pré-humidification accroît la porosité et favorise leur propagation. Une optimisation du rapport E/C et du contenu en ciment peut cependant améliorer la résistance du béton aux chlorures.

L'ajout de polymères en remplacement des granulats fins naturels améliore la résistance du béton à la migration des ions chlorure. Une augmentation du PET réduit la migration des chlorures mais accroît la porosité (H. Mohammed et al. 2022)

I.9.11 Résistance à l'attaque sulfatique

L'attaque sulfatique externe entraîne la précipitation de l'ettringite secondaire, provoquant des pressions de cristallisation qui peuvent mener à la fissuration du matériau. Ce phénomène se produit lorsque les hydrates du ciment se dissolvent, libérant des ions réactifs avec les sulfates.

Benosman et al. (Benosman et al. 2017) ont réalisé des essais sur des mortiers mélangés à des particules de PET sous attaque d'ions sulfate. Ils ont observé des diminutions significatives des propriétés mécaniques par rapport aux mortiers ordinaires. Ils ont également conclu que cette diminution était directement liée aux taux de PET utilisées.

Ghernouti et Rabehi (Ghernouti and Rabehi 2012) ont substitué une partie du sable par des particules de polymère PE dans différentes préparations de mortiers immergés dans des solutions acides. Les résultats expérimentaux publiés ont révélé de faibles augmentations de perte de masse par rapport aux mortiers ordinaires. Les auteurs ont également rapporté que de tels mortiers permettaient de réduire la dégradation interne au fil du temps.

Selon Aattache et al. (Aattache, Soltani, and Mahi 2017), un faible taux de substitution des particules de polymère PE a formé une performance clé, car aucune réaction chimique entre les particules et les milieux agressifs n'a eu lieu. De plus, la formation de produits expansifs était similaire à celle du mortier ordinaire. La nature hydrophobe et la surface rugueuse des particules de PE ont constitué une des principales performances de ce mortier composite immergé dans des milieux agressifs, car elles ont permis de créer une barrière aux sels de sulfates.

L'étude de Tsai et al. (Tsai et al. 2022), met en évidence que la résistance des mortiers à l'attaque sulfatique est influencée par le rapport E/C et le taux de substitution par des déchets de PE : Une augmentation du (E/C) entraîne une dégradation de la résistance aux sulfates et une augmentation des pertes de masse. En revanche, lorsque (E/C) est faible, la porosité interne diminue, rendant le matériau plus dense et plus résistant aux sulfates. L'ajout de PE augmente la porosité interne, facilitant ainsi l'érosion du mortier par la solution de sulfate et réduisant sa durabilité. Donc, lorsque le E/C et le taux de PE augmentent simultanément, la porosité et la perte de masse augmentent, compromettant la stabilité du matériau face aux agressions sulfatiques.

Les résultats des essais de Aattache et al. (Aattache and Soltani 2020), ont mis en évidence que les mortiers composite PE (5%, 10% et 15%) présentaient des pertes de masse significatives au cours des premières étapes du processus de durcissement de la solution acide H_2SO_4 , pour atteindre le mortier ordinaire à 56 jours. Les résultats de cette étude diffèrent de ceux rapportés par (Aattache, Soltani, and Mahi 2017), où les pertes de masse des mortiers à base de polymères mélangés augmentaient avec l'augmentation du remplacement du (PE) dans un intervalle allant de 2% à 6%. Ici, les auteurs ont suggéré que les variations enregistrées dans les pertes de masse sont étroitement liées à une valeur seuil pour la substitution du (PE). Par conséquent, l'intervalle des taux de (PE) peut varier entre 5% et 15%. De plus, la réaction due au contact des mortiers avec la solution H_2SO_4 a induit la formation de gypse (Aattache and Soltani 2020)..

I.9.12 Conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des principales propriétés évaluées pour étudier le transfert de chaleur dans les matériaux (Boucedra, Bederina, and Ghernouti 2020). Plusieurs études confirment que tous les bétons contenant les granulats plastiques ont une conductivité thermique plus faible par rapport au béton de référence (sans granulats plastiques). Elles suggèrent que la conductivité thermique diminue à mesure que la teneur en granulats plastiques augmente, à cause de la faible conductivité des granulats plastiques par rapport à celle des granulats naturels (Badache et al. 2018). Selon Belmokaddem et al. (Belmokaddem et al. 2020), la faible conductivité thermique de 0,61 W/m K a été mesurée dans les échantillons préparés avec 75 % de PVC, suivis des autres mélanges préparés avec du PP et du PE. Cela peut être attribué à la faible conductivité thermique du PVC (0,17W/mK)

(Belmokaddem et al. 2020) par rapport à celles du PP (0,2–0,25W/mK) et du PE (0,4–0,42W/mK) (Badache et al. 2018; Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010).

La conductivité thermique la plus faible, de 0,7 à 0,9 W/(m·K), a été observée dans le béton fabriqué à partir de fibres de PEBD, dont la porosité était supérieure à celle du béton témoin. L'amélioration des propriétés thermiques du béton produit s'est déroulée dans l'ordre suivant : PEBD > PEHD > PP > PET (Poonyakan et al. 2018).

Selon Hannawi et al. (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010), l'augmentation de la quantité de déchets de PET dans le mortier engendre un matériau plus caverneux, ce qui tend à améliorer les performances d'isolation du composite cimentaire. De même, Halim, Taib et Aziz (Halim, Taib, and Aziz 2020), ont également constaté que la réutilisation du PET dans le béton a progressivement diminué la conductivité thermique et diminué la capacité de transfert de chaleur dans le béton développé. L'ajout de déchets plastiques a augmenté les vides d'air à l'intérieur des composites, entraînant une baisse des valeurs de conductivité thermique des composites produits (Babafemi et al. 2018; Badache et al. 2018; Gu and Ozbakkaloglu 2016). Donc, par rapport aux matériaux de construction traditionnels, l'inclusion de déchets plastiques dans les matériaux de construction a considérablement amélioré les propriétés d'isolation thermique.

L'étude de Aattache et al. (Aattache et al. 2013), sur les propriétés thermomécaniques des mortiers modifiés par polymère (PMM) met en évidence que substitution du ciment avec le HDPE améliore la conductivité thermique, la capacité calorifique et la diffusivité. Cependant, une augmentation du taux de polymère entraîne une réduction des performances thermiques du mortier. La conductivité thermique est fortement liée à la densité du mortier : plus la densité est faible, plus la conductivité diminue.

L'utilisation de granulats de plastique issus du recyclage présente plusieurs avantages. Leur densité est nettement inférieure à celle des agrégats naturels, ce qui contribue à alléger les structures. De plus, leur coût de production demeure relativement bas comparé aux agrégats légers extraits de ressources naturelles. L'incorporation de ces granulats dans le béton permet ainsi non seulement de réduire le poids des constructions, mais aussi d'améliorer significativement leurs propriétés thermiques, offrant une meilleure isolation. Cependant, au-delà du plastique, l'industrie du béton léger explore d'autres matériaux innovants. Parmi eux, *la poudre métallique d'aluminium* s'impose aujourd'hui comme un composant essentiel. Utilisée comme agent moussant chimique, elle favorise la formation de béton alvéolaire,

conférant aux structures une résistance optimale tout en réduisant leur densité. Cette transition vers l'aluminium illustre la recherche continue de solutions performantes et durables dans le domaine de la construction

I.10 Influence de la poudre d'aluminium sur les propriétés thermomécaniques des mortiers

L'utilisation de bétons légers dans la construction peut réduire considérablement la consommation d'énergie, car ils se caractérisent par la faible masse volumique, et de bonnes propriétés d'isolation thermique, ainsi qu'une résistance assez élevée à la chaleur, au feu et au gel. Il est également important de savoir que les vides d'air, qui existent soit dans les granulats, soit dans la matrice cimentaire, confèrent au béton une masse volumique réduite, c'est-à-dire inférieure à 1800 kg/m^3 . De plus, l'utilisation d'agents d'expansion, comme la poudre d'aluminium, permet d'abaisser la masse volumique des bétons légers à 300 kg/m^3 . En effet, lorsque la poudre d'aluminium réagit avec la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment portland, elle génère du gaz hydrogène qui crée des bulles d'air pour former une structure en nid d'abeille (poreuse). Dans ce cas, la réaction (Holt and Raivio 2005) donnée ci-dessous a lieu :



Aujourd'hui la poudre d'aluminium est largement utilisée dans la fabrication de béton léger comme agent moussant chimique (Bouglada, Ammar, and Larbi 2021; Y. Liu et al. 2017; Yoon et al. 2020). Dans la méthode de moussage chimique, des produits chimiques sont ajoutés au mélange et des vides remplis de gaz apparaissent dans la pâte de béton en raison de la réaction de ces produits chimiques avec l'environnement alcalin du béton. Des déchets d'aluminium peuvent être utilisés à la place de la poudre d'aluminium réactive qui est plus coûteuse. Selon les auteurs de (Y. Liu, Leong, and Yang 2016), la quantité de 15,6 g de poussière d'aluminium peut générer le même volume de gaz produit par l'utilisation de 1 g de poudre d'aluminium. Dans ce contexte, les auteurs de (Záleská et al. 2018) ont indiqué qu'il est possible d'utiliser des déchets d'aluminium pour formuler du béton cellulaire à hautes performances (HPCC).

I.10.1 Influence de la poudre d'aluminium sur la maniabilité des mortiers.

L'ajout de la poudre d'aluminium entraîne une diminution de l'ouvrabilité en raison de la réaction entre l'aluminium et l'hydroxyde de calcium. Il convient de noter que la réaction (1) nécessite une quantité importante d'eau. Cette réduction de l'ouvrabilité a également été confirmée par les auteurs dans (Yoon et al. 2020)

I.10.2 Influence de la poudre d'aluminium sur la densité des bétons.

La poudre d'aluminium métallique est largement utilisée dans l'industrie du béton léger comme agent moussant chimique (Abdollahnejad et al. 2017; Narayanan and Ramamurthy 2000). Dans la méthode de moussage chimique, des produits chimiques sont ajoutés au mélange et des vides de gaz apparaissent dans la pâte de béton en raison de leur réaction dans l'environnement alcalin du béton. Pendant les étapes de prise et de durcissement du béton, les vides de gaz sont confinés dans le squelette de liaison et font chuter la densité de la matrice (Abdollahnejad et al. 2017; Y. Liu, Leong, and Yang 2016; Z. Zhang et al. 2014). La densité sèche est en fonction de la teneur en poudre d'Al, elle diminue progressivement avec l'augmentation de la teneur en Al. La densité du béton cellulaire la plus faible a été obtenue avec 1% Al (Shabbar, Nedwell, and Wu 2017), à cause de la coalescence des pores dans les mélanges avec une teneur en Al plus élevée. Scheffler et Colombo (Scheffler, M., & Colombo 2005), ont expliqué la coalescence des pores à la haute réactivité de la poudre d'Al. La formation d'une plus grande quantité de vides est principalement responsable de la réduction de la densité dans ces échantillons (Hajimohammadi et al. 2017).

I.10.3 Influence de la poudre d'aluminium sur la porosité des bétons.

L'amélioration des propriétés d'isolation thermique et l'isolation acoustique dans la fabrication du béton et mortier. Il existe deux méthodes habituelles pour introduire des vides d'air dans la matrice de béton, à savoir le moussage mécanique et le moussage chimique (Z. Zhang et al. 2015). La variation du pourcentage de la poudre d'Al affecte la forme et la liaison des pores, une distribution de taille plus large des pores est détectée dans les échantillons avec une plus grande étendue de réaction d'Al (Hajimohammadi et al. 2017). Il existe deux types de pores : le Type I, qui correspond aux pores ronds, et le Type II, qui se présente sous forme de fissures résultant de l'élargissement ou de la fusion (coalescence) des pores de Type I. L'expansion causée par la poudre d'Al, engendrent des fissures sur l'interface des granulats PEHD et la

pâte de ciment à cause de la mauvaise adhérence entre eux. Ces fissures agissent comme des puits pour la migration des pores suite à l'élargissement (coalescence) de ces pores pour former des vides semblables à des fissures (pores type II), empêchant l'élimination des pores vers l'extérieur du système (Shinohara et al. 2000).

Dans l'étude de Shabbar (Shabbar, Nedwell, and Wu 2017), les éprouvettes de béton cellulaire contenant de la poudre d'aluminium de 0,5 à 1 % ont révélé la présence de pores de forme non uniforme, et plus larges que celles observées en cas de 0,25 % d'aluminium, ce qui indique la coalescence des pores dans les mélanges à teneur en aluminium plus élevée. Les surfaces de rupture des éprouvettes contenant différentes teneurs en aluminium sont présentées dans la figure I.34.

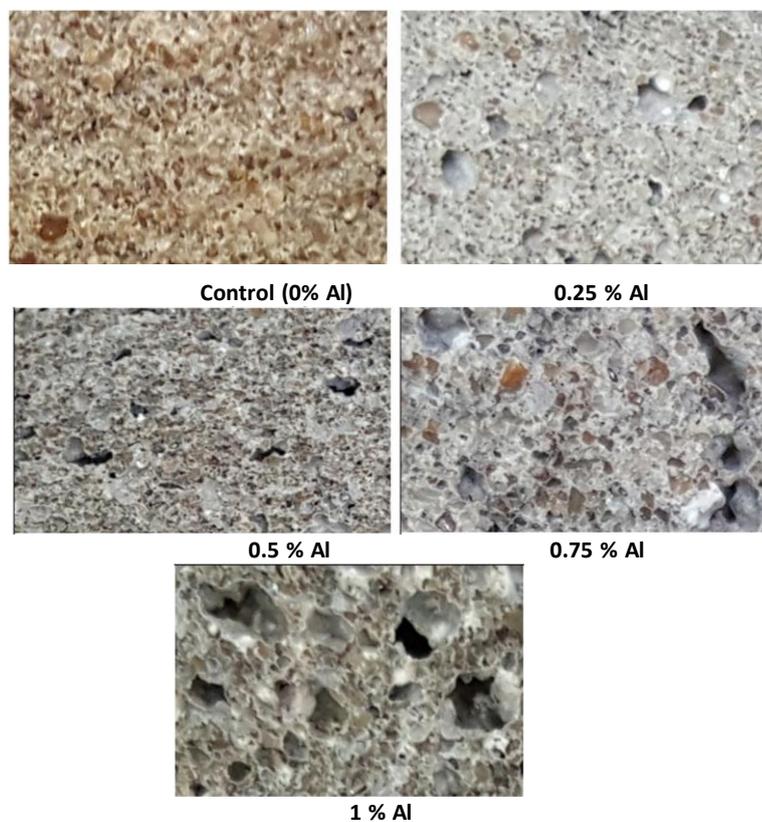


Figure I. 34: Les surfaces de rupture des éprouvettes contenant différentes teneurs en Al (Shabbar et al., 2017)

I.10.4 L'effet de la poudre d'Al sur la résistance à la compression

Plusieurs études ont été menées concernant l'influence de la teneur en aluminium (Al) sur la résistance à la compression du béton cellulaire (Aliabdo, Abd-Elmoaty, and Hassan 2014; Guglielmi, Silva, and Repette 2010). La résistance à la compression diminue avec

l'augmentation de la teneur en poudre d'Al. En raison de la forte réactivité de l'Al, le taux de production de gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) peut diminuer, ce qui correspond à la réduction de la résistance.

Selon Shabbar (Shabbar, Nedwell, and Wu 2017), la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en Al par rapport au béton témoin. La résistance à la compression la plus faible était correspondait à la teneur 1 % d'Al en raison du plus grand nombre de vides et du plus faible taux de gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) qui n'a pas suffisamment contribué à la résistance à la compression. Des résultats similaires ont été obtenus par Guglielmi et al. (Guglielmi, Silva, and Repette 2010) qui ont rapporté que lorsque la teneur en Al augmentait, la résistance à la compression diminuait en raison de la distribution plus élevée de la quantité de pores.

I.10.5 L'effet de la poudre d'Al sur la résistance à la flexion

Similaire à la résistance à la compression, la résistance à la flexion diminue lorsque la teneur en Al augmente. La résistance à la flexion de l'AC a une relation directe avec les résultats de la résistance à la compression et elle diminue à mesure que l'agent moussant augmente (Prakash and Kumar 2013; Shabbar, Nedwell, and Wu 2017).

L'incorporation de particules plastiques entraîne une diminution de certaines propriétés du béton et du mortier, notamment en ce qui concerne leur résistance mécanique. Cependant, les caractéristiques des granulats naturels permettent d'atténuer ces effets indésirables. Il demeure néanmoins essentiel de considérer l'influence de la nature du sable sur les caractéristiques du mortier. Cette considération est d'autant plus importante qu'elle permet de mettre en perspective plusieurs études menées dans ce domaine, qui serviront de références pour une partie de notre analyse.

I.11 l'effet de la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique des matériaux cimentaires

Le sable occupe la majorité volumique de la composition du mortier. De Schutter et Poppe ont remarqué que le type de sable a une influence très significative sur les propriétés du mortier (De Schutter and Poppe 2004). Selon la norme [NF EN 12620+A1], les sables destinés à la confection de béton est un ensemble des grains minéraux dont la dimension maximale $D \leq 4$ mm. Ils sont issus de l'altération naturelle ou de concassage des roches

massives et meubles, ou du traitement des granulats artificiels (Nécira, Guettala, and Guettala 2017). Généralement deux types de sables sont utilisés dans la confection des bétons et /ou des mortiers :

- **Le sable alluvionnaire** : qui est un sable, naturel, siliceux, à grains roulés. Il est obtenu par l'exploitation des gisements des côtés des rivières. Ses classes granulométriques sont généralement 0/3 et 0/5 mm.
- **Le sable concassé** : généralement de nature calcaire ayant des grains de forme angulaire. Il est issu des processus industriels de concassage, lavage et criblage appliqués à des roches sédimentaires massives dans les carrières. Il est livré sous plusieurs classes granulométriques généralement de 0/3 et 0/6.3 mm avec des teneurs élevées en fines calcaires (Nécira 2018).

I.11.1 L'effet de la nature du sable sur la maniabilité des matériaux cimentaires

L'ouvrabilité des mortiers peut être considérée comme l'une des propriétés les plus importantes du mortier car elle a un effet direct sur la facilité de sa mise en œuvre, qui peut influencer considérablement les propriétés mécaniques de la maçonnerie. C'est une propriété de la consistance, utilisée pour caractériser la maniabilité du mortier (Haach, Vasconcelos, and Lourenço 2011). Les paramètres géométriques des grains de sable basés sur la courbe de granulométrie, comme le module de finesse, la surface spécifique relative et la densité apparente, sont reliés avec la demande en eau du sable dans le mortier. Westerholm et al. (Westerholm et al. 2008) ont observé que la teneur en fines influence la viscosité du mortier, qui peut augmenter en raison de l'augmentation de la surface totale des agrégats fins. Selon Reddy et Gupta (Venkatarama Reddy and Gupta 2008), il existe peu d'études sur l'influence de la granulométrie du sable sur les caractéristiques des mortiers.

- Zeghichi (Zeghichi, Benghazi, and Baali 2014), ont étudié les effets physiques du sable de dune (rond) et du sable concassé sur le béton autoplaçant (BAP) et suggère que le sable de dune donne moins de viscosité et donc une meilleure fluidité au BAP, en raison de sa forme ronde qui réduit le frottement intergranulaire entre les particules de sable elles-mêmes et entre le sable et le gravier. Les sphères se déplacent plus facilement que les particules de forme angulaire (Al-Harthy et al. 2007). D'autre part, le sable concassé donne moins de fluidité au BAP, en raison du frottement intergranulaire élevé entre les différentes particules > 0,125 mm (Yammine et al. 2008; Zeghichi, Benghazi, and Baali 2014).

- Le sable concassé nécessite souvent plus d'eau que le sable rond (de dunes ou de rivières) pour atteindre la maniabilité souhaitée (Geiker 2002). Le sable concassé de nature calcaire a besoin de plus d'eau pour donner la maniabilité visée, et il absorbe une certaine quantité d'eau de mélange (Zeghichi, Benghazi, and Baali 2014).
- Elat et al. (Elat et al. 2020), ont étudié une combinaison de sable concassé et de sable de rivière pour développer un mélange optimal de béton, ils ont constaté qu'une augmentation de la quantité de sable concassé diminue l'affaissement, dû aux proportions élevées de particules fines.
- Malgré que la majorité des études montrent un effet négatif du sable concassé sur l'ouvrabilité à cause de la forme, et de la texture de surface rugueuse. Bounedjema et al. (Bounedjema, Ezziane, and Hallal 2016), ont étudié les performances du sable de carrières de calcaire, qui a remplacé le sable de rivière par différents ratios pour réaliser des mortiers à trois rapports E/C. Ce sable de carrière est riche en particules fines ($<80 \mu$) qui ont contribué à réduire le frottement interparticulaire dans la pâte fraîche où la teneur en eau peut être réduite et le superplastifiant n'est pas nécessaire.

I.11.2 L'effet de la nature du sable sur la résistance mécanique des matériaux cimentaires

Plusieurs études montrent que le sable de carrière peut améliorer les performances mécaniques et même la durabilité des matériaux cimentaires (Bederina et al., 2013; Nécira, 2018; Taoufik ACHOUR, 2007).

- La résistance mécanique des mortiers dépend de l'adhérence pâte-granulats. Cette dernière est améliorée par la présence des fines calcaires dans le sable de carrière qui améliorent l'homogénéité du mélange (Nécira 2018).
- De Larrard (De Larrard 2000; Nécira 2018), a montré que l'enchevêtrement des gains anguleux du sable de carrière dans le béton améliore les résistances mécaniques par rapport aux grains arrondis du sable de rivière.
- Le sable concassé contribue mieux au développement de la résistance, en particulier dans le cas de la résistance à la traction (Zeghichi, Benghazi, and Baali 2014).
- L'amélioration de la résistance mécanique du mortier résulte essentiellement de la morphologie et la nature calcaire des grains de sable de carrière : la grande taille, la

granulométrie étalée, la forme angulaire et la texture rugueuse assurent une meilleure adhérence entre la pâte de liant et ces grains (De Larrard 2000; Nécira 2018; Taoufik ACHOUR 2007).

- Yannik et al. (Yannick and Richard 2022), ont fait une étude comparative de mortiers de sables d'origines géologiques diverses pour mettre en évidence leur influence sur les qualités des mortiers. Les essais de résistance à la flexion des mortiers révèlent que les sables concassés surpassent les sables alluviaux. Elles varient de 3 à 3,90 MPa après 7 jours et de 7 à 14,84 MPa après 28 jours. Les résultats des tests de résistance à la compression montrent que les mortiers de sable de carrière ont des résistances à la compression moyennes supérieures à celles des mortiers de sable alluvial, elles varient de 7,55 à 18,96 MPa après 7 jours et de 22,81 à 34,58 MPa après 28 jours.
- Bounedjema et al. (Bounedjema, Ezziane, and Hallal 2016), ont conclu que le remplacement partiel ou total de sable de rivière par un sable concassé conduit à une résistance à la compression plus élevée, à cause des fines particules de calcaire présentes dans le deuxième sable qui favorisent l'hydratation de ciment et de formation de produits CSH supplémentaires.

I.12 Conclusion

L'analyse des études antérieures met en évidence l'impact significatif des polymères et des matériaux alternatifs sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons et mortiers. Le plastique peut être intégré en certaines proportions dans le béton et le mortier, et les recherches dans ce domaine continuent d'apporter des conclusions pertinentes :

1. L'affaissement du béton contenant du plastique recyclé est réduit dans le cas des particules issues de recyclage mécanique, en raison de la surface accrue et de la forme irrégulière des particules plastiques, ce qui rend le béton plus rigide et difficile à manipuler. En revanche, les granulats plastiques obtenus par fusion améliorent l'affaissement du béton et l'étalement du mortier.
2. Les masses volumiques, à l'état frais comme à l'état durci, des bétons et mortiers contenant du plastique sont inférieures à celles des matériaux conventionnels. Cette diminution est due à la faible densité intrinsèque du plastique.

3. L'augmentation de la proportion de plastique dans le béton entraîne une réduction de la résistance mécanique, principalement en raison de la faible adhésion entre la surface des granulats plastiques et la pâte de ciment. Ainsi le faible module d'élasticité des granulats plastiques par rapport aux granulats naturels.

4. La vitesse de propagation des ondes ultrasonores (UPV), indicateur de la qualité du béton et du mortier, diminue avec l'accroissement de la teneur en plastique, ce qui pourrait traduire une altération de la qualité du matériau.

5. L'absorption d'eau par immersion des bétons et mortiers contenant des granulats plastiques (GP) augmente avec le taux de substitution, car le plastique ne s'intègre pas de manière homogène aux granulats naturels, entraînant une structure plus poreuse. Toutefois, la pénétration des ions chlorure et l'attaque par l'acide sulfurique sont significativement réduites grâce aux particules plastiques imperméables qui limitent la diffusion des chlorures et des sels de sulfate.

Les recherches approfondies ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre ces matériaux et la matrice cimentaire, notamment en matière de durabilité, de résistance mécanique et de comportement face aux agressions chimiques. Toutefois, malgré les avancées, plusieurs paramètres restent à investiguer pour optimiser leur incorporation et leurs performances.

Dans le chapitre suivant, nous nous pencherons sur les matériaux utilisés et les méthodes expérimentales mises en œuvre pour évaluer ces phénomènes. Cette approche permettra de vérifier les observations théoriques par des résultats expérimentaux concrets, afin d'approfondir la compréhension des propriétés des mortiers modifiés et d'explorer leurs applications potentielles.

CHAPITRE II :
PROGRAMME
EXPÉRIMENTAL ET
PROCÉDURES D'ESSAIS

CHAPITRE II : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du programme expérimental mis en place pour évaluer les performances des matériaux étudiés. Il décrit les protocoles de test, les essais expérimentaux, et les étapes pour analyser et comparer les différents choix envisagés.

Ce chapitre débute par un organigramme qui schématise les étapes de réflexion et de prise de décision dans le cadre de cette recherche, offrant ainsi une vue d'ensemble des démarches et des choix méthodologiques retenus. Ensuite, il présente les caractéristiques des matériaux sélectionnés et la préparation des granulats recyclés. Les procédés d'essais, ainsi que les normes associées, sont ensuite détaillés pour assurer une méthodologie conforme aux standards de qualité en vigueur. Ce programme expérimental vise à encadrer de manière structurée l'évaluation des performances des procédés de recyclage envisagés, en comparant les méthodes d'incorporation des matériaux recyclés (ajout et substitution) en analysant les résultats obtenus.

II.2 Présentation du plan expérimental

Cette thèse vise à élaborer un mortier contenant des granulats plastiques issus du déchet des sacs plastiques PEHD (sacs de caisse) dans une matrice cimentaire. L'organigramme présenté sur la figure II.1 schématise les démarches de cette thèse qui fait l'objet d'une étude basée sur deux types de granulats plastiques du même polymère selon deux modes de recyclage: PEHD granulé par fusion suite à un recyclage thermique et PEHD déchiquetés issus d'un recyclage mécanique des déchets des sacs. Les axes de recherches étudiés dans cette thèse sont cités sur la figure II.1 et pour visualiser de manière structurée les différentes étapes et méthodes expérimentales, la figure II.2 représente un diagramme qui schématise les essais caractérisant les matériaux utilisés ainsi que les essais évaluant le comportement mécanique et la durabilité des mortiers composites étudiés.

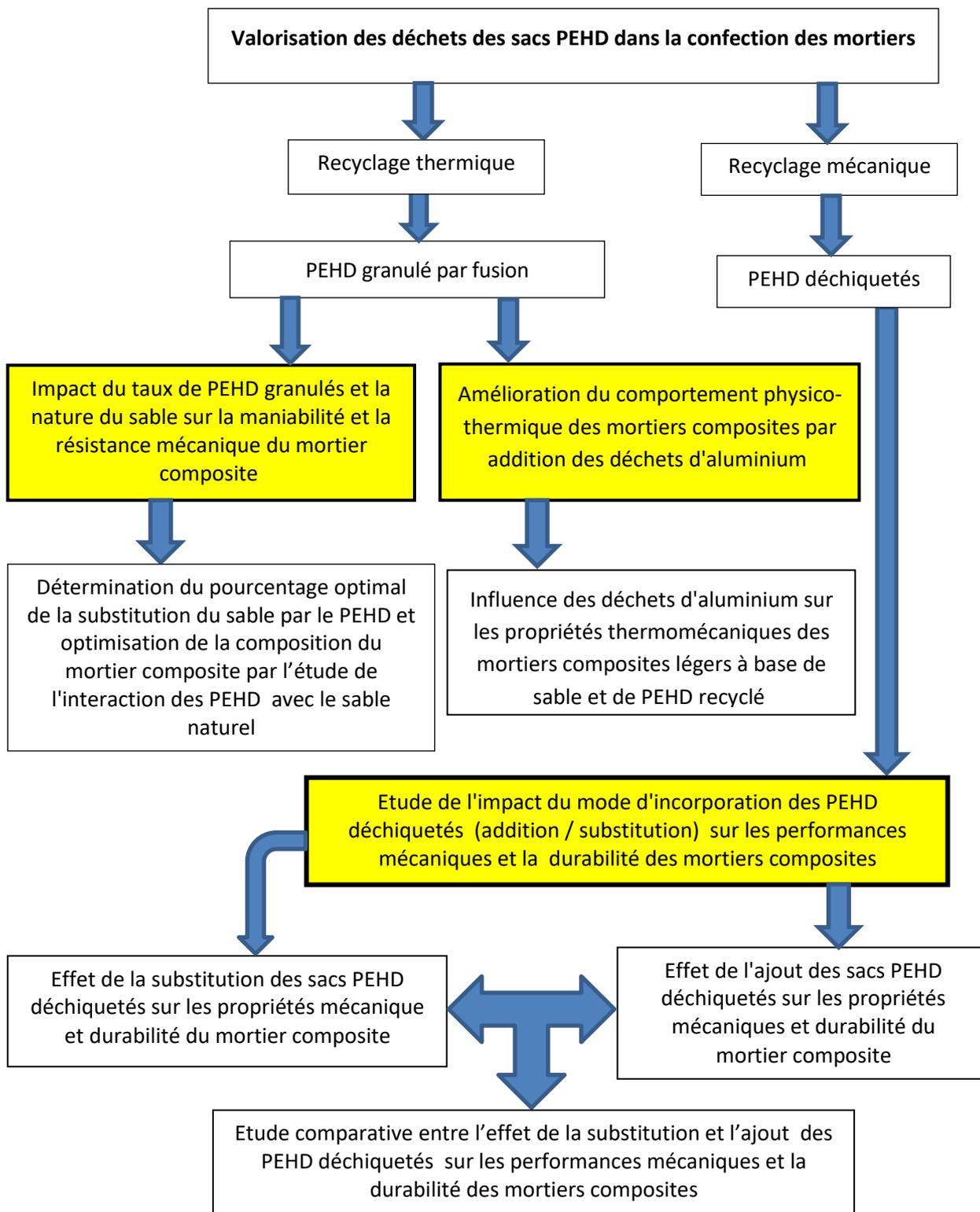


Figure II. 1: Organigramme résumant les étapes de recherche menée dans cette étude.

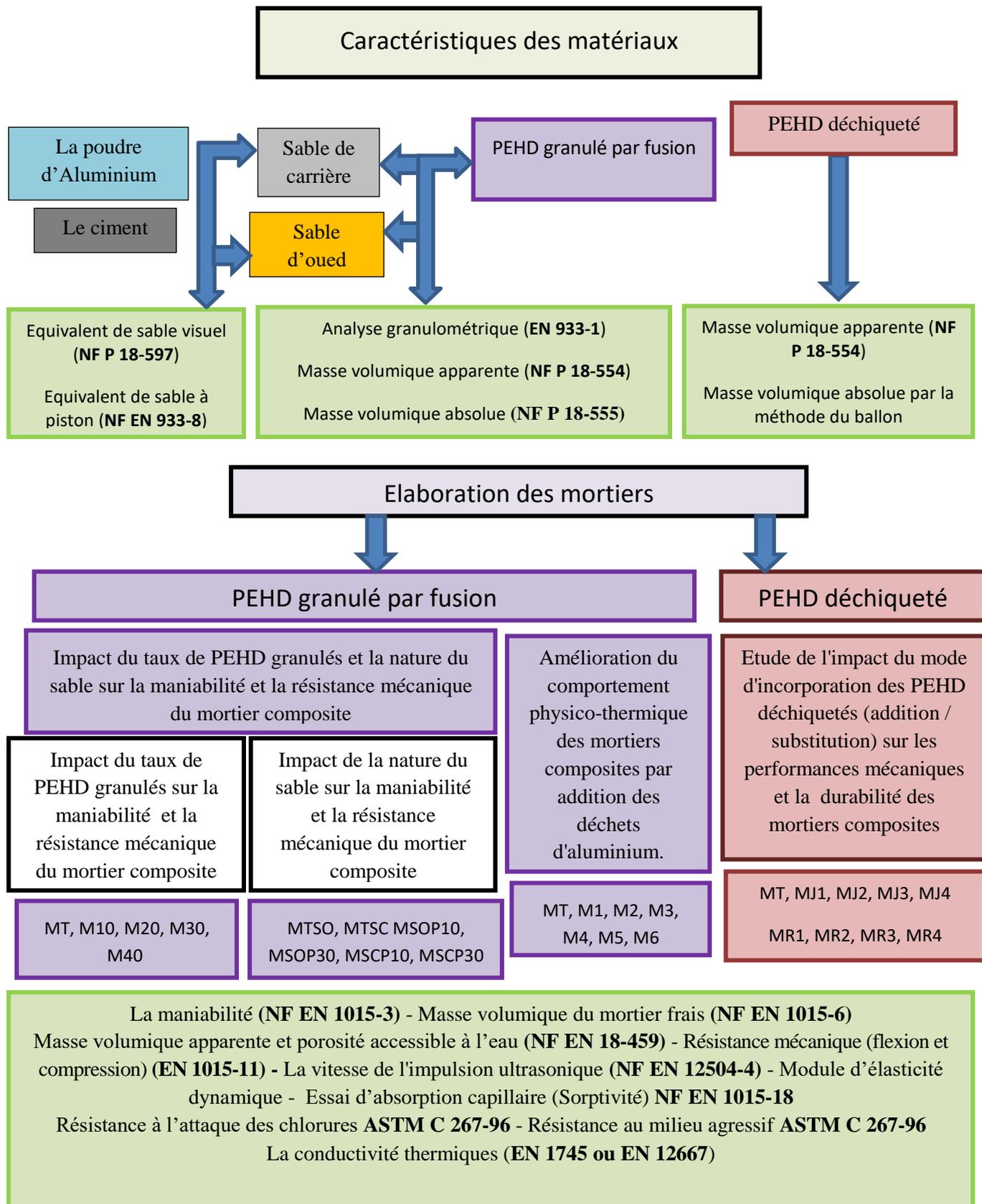


Figure II. 2: Diagramme représentatif des essais sur matériaux utilisés et mortiers étudiés

II.3 Préparation des granulats plastiques

II.3.1 Granulats PEHD granulés par fusion

Des granulats plastiques PEHD (figure II.4), issus du recyclage des déchets plastiques PEHD commercialisés à partir des usines de recyclage de plastique, Selon Ghernouti et al. (Ghernouti et al., 2009) Les déchets des sacs plastiques granulés par fusion peuvent être obtenus selon la chaîne technologique présentée sur la figure II.3

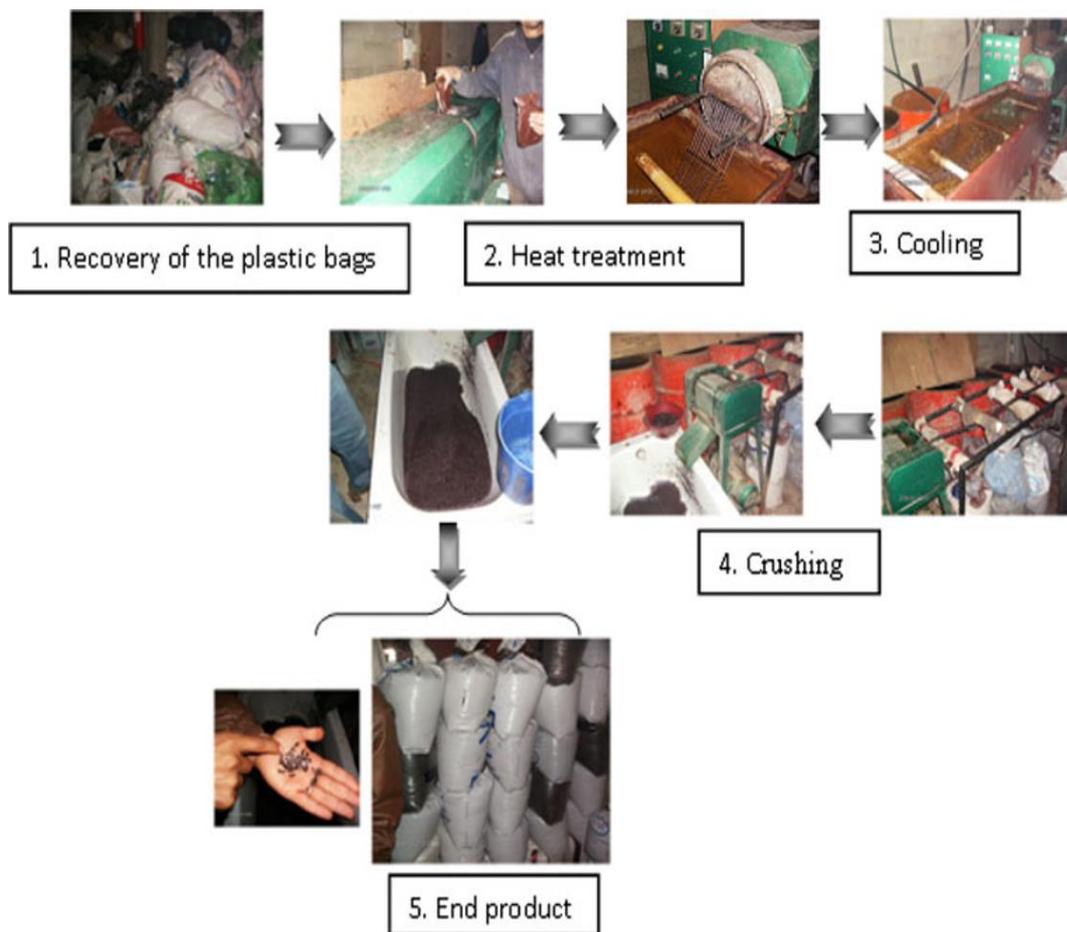


Figure II. 3: Présentation d'une chaîne technologique de fabrication des granulats plastiques par fusion (Ghernouti et al. 2009a)



Figure II. 4: PEHD granulé par fusion

II.3.2 Préparation des granulats PEHD déchiquetés

Le déchiquetage des sacs plastiques constitue une étape capitale du recyclage mécanique des sacs et leur valorisation dans le mortier. Pour préparer les sacs plastiques de manière efficace, nous avons suivi les étapes suivantes pour les déchiqueter :

II.3.2.1 Collecte et tri des sacs plastiques

- **Collecte** : Rassembler les sacs de caisse usagés en s'assurant qu'ils soient d'une propreté acceptable, et qu'ils ne contiennent pas de contaminants tels que des débris alimentaires ou des produits chimiques.
- **Tri** : Séparer les sacs de provision en PEHD, d'usage unique usagés (figure II.5) qui sont le sujet de notre étude et éliminer les autres sacs non concernés (PEBD) (Voir la différence en I.6.2).

II.3.2.2 Découpage manuel

Les sacs sont découpés manuellement à l'aide d'une paire de ciseaux en bandes puis en morceaux de taille appropriée (environ 1 à 5 cm) voir figure II.6.

II.3.2.3 Déchiquetage et Lavage

- **Déchiquetage** : Le déchiquetage est effectué par un hachoir de cuisine à hélices (figure II.7) en présence d'eau et l'eau de javel moussante, considérée comme méthode de lavage et déchiquetage en même temps (figure II.8).

- **Lavage** : Le lavage est adapté pendant le déchetage, la centrifugation des particules plastiques dans le hachoir avec la présence de l'eau et de l'eau de javel permet d'éliminer les impuretés, attachées aux sacs.

II.3.2.4 Rinçage et séchage

- **Rinçage** : Verser les particules obtenues sur un passoir et rincés à l'eau abondante (figure II.9). Il est conseillé de rincer les agrégats avant utilisation, car la présence de savon, détergents ou huiles sur la surface des agrégats peut générer des bulles d'air de façon inattendue (Jacob-Vaillancourt 2018).
- **Séchage primaire** : Laisser sécher les particules plastiques à l'air libre, en les protégeant du vent afin d'éviter qu'elles ne s'envolent.
- **Séchage final** : Placer les particules plastiques dans une étuve à 70°C pendant 24 heures afin de garantir un séchage complet et d'éliminer toute humidité. (Figure II.10)

II.3.2.5 Tamisage et stockage

- **Tamisage** : Les particules obtenues sont feuilletées de forme irrégulière de différentes tailles (Naik et al. 1996). Passer les particules au tamis 5 mm (figure II.11) pour obtenir des granulats de dimension inférieure à 5mm (voir figure II.12)
- **Stockage** : Conserver les particules plastiques dans des boîtes (figure II.13) pour éviter l'humidité et la contamination.



Figure II. 5: Sacs PEHD (sacs de caisse)



Figure II. 6: Découpage manuel



Figure II. 7: Hachoir à hélices



Figure II. 8: Déchiquetage et lavage des sacs



Figure II. 9: Rincage des sacs déchiquetés



Figure II. 10: Séchage à l'étuve



Figure II. 11: Tamisage au tamis 5mm



Figure II. 12: sacs (PEHD) déchiquetés



Figure II. 13: Stockage

II.4 Caractéristiques des matériaux

Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de Biskra. Les matériaux utilisés sont :

II.4.1 Le Ciment

Selon les deux normes (NA 442 et EN 197-1) qui définissent cinq types de ciments, le ciment utilisé est un ciment portland composé (CEM II/A-L42.5N) de la cimenterie de Ain Touta (groupe **GICA**) (figure II.14), de classe commerciale 42.5 MPa, sa masse volumique absolue est de 3.15 g/cm^3 et sa finesse est de $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, sa composition chimique est représentée sur le tableau 1.

Tableau II. 1: Composition chimique (%) du ciment

Constituant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	K ₂ O	Na ₂ O	Chaux libre	Perte au feu	Résidu insoluble
Teneur %	20.34	5.37	3.00	61.69	1.80	2.20	0.027	0.76	0.14	0.97	5.03	1.12



Figure II. 14: CEM II/ A-L 42.5 N de la cimenterie de Ain Touta

II.4.2 Les Sables

On a utilisé deux types de sable (Figure II.15) :

- Un sable concassé de carrière d'Ain TOUTA, désigné par SC ;
- Un sable alluvionnaire de la région de Biskra (sable d'Oued Lioua), désigné par SO.

Les caractéristiques des deux sables sont illustrées dans le tableau II.2.

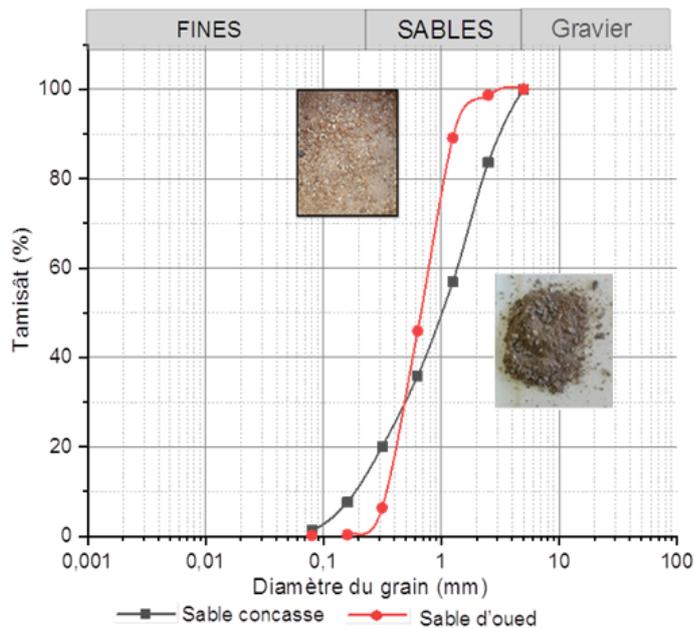


Figure II. 15: Analyses granulométriques des sables utilisés (EN 933-2)

Tableau II. 2: Caractéristiques des sables utilisés

Essai	Norme	SC	SO	
			Avant lavage	Après lavage
Masse volumique apparente g/cm ³	(NF P 18-554)	1,52	1,55	
Masse volumique absolue g/cm ³	(NF P 18-555)	2,61	2,5	2.66
Equivalent de sable visuel VES %	(NF P 18-597)	81,3	55	95,78
Equivalent de sable à piston Esp (%)	(NF EN 933-8)	83.17	58	78
Module de finesse M _f	(NF P 18-304)	2.96	2,59	

$$M_f = \frac{1}{100} \Sigma (\text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

II.4.3 Granulat PEHD

II.4.3.1 PEHD granulé par fusion

Les granulats en PEHD granulé par fusion ont une masse volumique apparente (NF P 18-554) égale à 0,55g/cm³ (figure II.16) et une masse volumique absolue (NF P 18-555) égale à 0.87 g/cm³ (figure II.17), ayant une courbe granulométrique présentée par la figure II.18.



Figure II. 16: Détermination de la masse volumique apparente



Figure II. 17: détermination de la masse volumique absolue

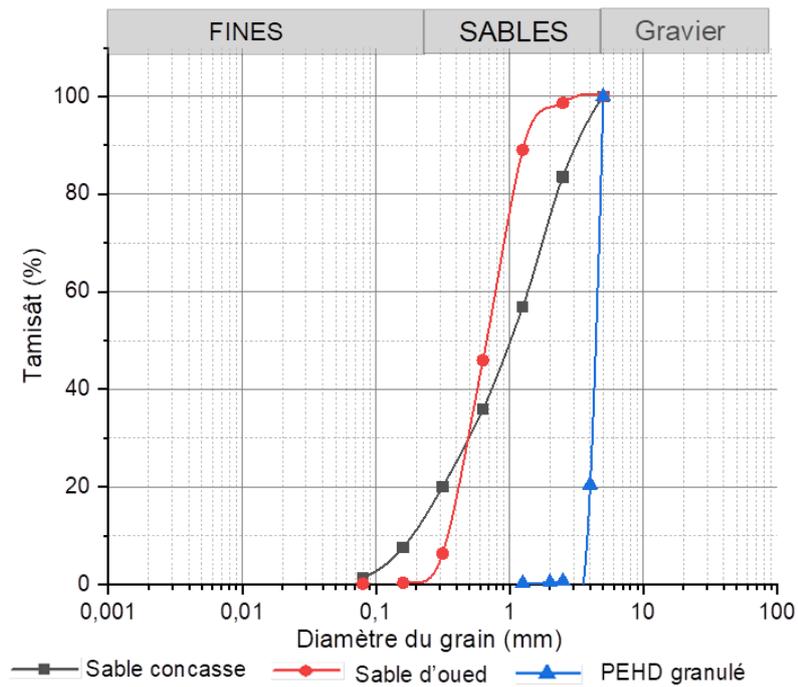


Figure II. 18: La courbe granulométrique du PEHD granulé par fusion par rapport à celles des sables

II.4.3.2 PEHD déchiqueté

Le tableau II.3 rassemble les caractéristiques des granulats issus du déchet des sacs PEHD déchiquetés.

Tableau II. 3: Caractéristiques du déchet des sacs PEHD déchiquetés

propriétés	Résultats
Type	Polyéthylène haute densité PEHD
Catégorie	Sacs de caisse (sac bretelle)
Couleur	multiple
Épaisseur (mm)	10 à 12 μm (Dossogne 1996)
Taille	< 5mm
Forme	Irrégulière et non uniforme
Absorption d'eau	0%
Masse volumique apparente	0.014 g/cm^3 (NF P 18-555) (figure II.19)
Masse volumique absolue	0.15 g/cm^3 (méthode du ballon)

Comme le déchet des sacs PEHD déchiquetés est très léger et flotte sur la surface de l'eau, on était obligé de mesurer la masse volumique absolue par la méthode du ballon (NF EN 1097-6) voir figure II.20

• **Description de la méthode du ballon :** La méthode du ballon est une technique couramment utilisée pour déterminer la **masse volumique absolue** des granulats sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains, selon les étapes suivantes :

- Peser le ballon rempli d'eau (figure II.20. a) : masse M_1 .
- Peser un échantillon sec du matériau (masse M_2).
- Introduire l'échantillon dans le ballon rempli d'eau et vérifier qu'il n'y a aucune bulle d'air. Puis peser le ballon contenant l'échantillon (figure II.20.b) : masse M_3 .

La densité (ρ_s) est ensuite calculée en utilisant la formule suivante:

$$\rho_s = M_2 / ((M_1 + M_2) - M_3)$$

Cette méthode est plus précise surtout pour les granulats légers qui flottent sur la surface d'eau, à condition de prendre les précautions nécessaires pour éliminer les bulles d'air.



Figure II. 19: Densité apparente du PEHD déchiqueté

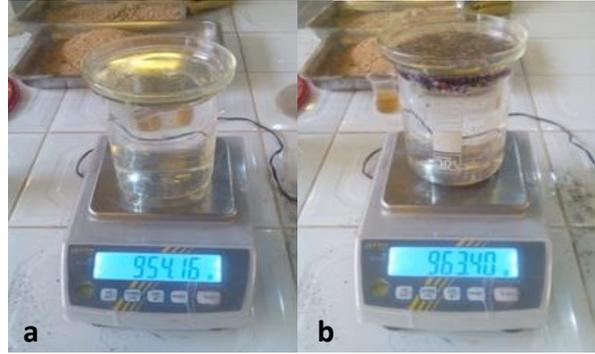


Figure II. 20: Densité absolue du PEHD déchiqueté par la méthode du ballon

II.4.4 L'eau de gâchage

En référence à la norme (NF EN 1008), l'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges de mortier est l'eau potable du robinet du laboratoire de matériau de construction du département de génie civil et hydraulique à l'université de Biskra. Les mélanges ont été préparés avec un rapport E/C = 0,5 conforme à (Badache et al. 2018)

II.4.5 Le déchet d'aluminium

Les déchets d'aluminium peuvent remplacer la poudre d'aluminium réactive coûteuse qui est largement utilisée dans l'industrie du béton léger comme agent moussant chimique. Selon Liu et al. (Y. Liu, Leong, and Yang 2016), 15.6 g de la poussière d'aluminium peut générer le même volume de gaz produit par l'utilisation de 1g de la poudre d'aluminium. Záleská et al. (Záleská et al. 2018), ont mentionné la possibilité d'utiliser les déchets d'aluminium pour formuler un béton cellulaire performant.

La poudre d'aluminium (Figure II.21) (Haouara et al. 2024) utilisée comme agent réactif pour l'expansion du mortier, est un déchet de l'industrie de l'aluminium de la société METANOF (Algérie) (Figure II.20) (Haouara et al. 2024). C'est un aluminium pur à 99%, de granulométrie d'environ 100 μm , de masse volumique de 2 g/cm^3 , sa composition chimique est illustrée sur le tableau II.4:

Tableau II. 4 : Composition chimique du déchet d'aluminium

AL	Zn	Fe	Pb	Cu	Cd
97.66	1.16	1.08	0.066	0.026	0.008



Figure II. 21: Le déchet d'aluminium à l'état brut



Figure II. 22: Le déchet d'aluminium broyé (la poudre d'Al)

II.5 Préparation et durcissement des éprouvettes

La confection des éprouvettes de mortier contenant des granulats plastiques est similaire à celle des éprouvettes de mortier normal avec l'incorporation des granulats plastiques dans les quantités du sable naturel.

II.5.1 Compositions des différents mélanges du mortier

Selon la norme (EN 1015-3), trois éprouvettes de chaque composition et chaque essai, ont été fabriqués de dimensions $(40 \times 40 \times 160) \text{mm}^3$ pour les essais de caractérisation physiques et mécaniques, et de dimensions $(50 \times 50 \times 50) \text{mm}^3$ pour les essais de durabilité.

II.5.1.1 Mortier de référence

Un mortier ayant la même composition d'un mortier normal :1/3 (C/S) est confectionné en fixant le rapport E/C à 0.50 (voir le tableau II.5), c'est un mortier témoin qui sert de référence.

Tableau II. 5: Formulation de base du mortier pour une gâchée

Désignation du mortier	Eprouvette (cm)	Nombre d'éprouvettes	Eau (g)	Ciment (g)	Sable (g)
Mortier témoin	4x4x16	03	225	450	1350
	5x5x5	06	220	440	1320

II.5.1.2 Mortiers composites avec substitution en PEHD granulé par fusion

Un mortier normal 1/3 (C/S) est confectionné en fixant le rapport E/C à 0.50, la part du sable naturel est substituée par des granulats PEHD avec des pourcentages en volume du sable. Les différentes compositions du mortier sont confectionnées pour des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³, et ils sont utilisés dans :

a. Impact du taux de PEHD granulé sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite.

Dans cette partie, on a étudié 04 mélanges de mortiers composites comparés à un mortier témoin. Les différents mortiers sont donnés par le tableau II.6.

Tableau II. 6: Compositions des mortiers avec substitution en PEHD granulé

Désignation du mortier	Description des mélanges	ciment (g)	Eau (ml)	Sable concassé		PEHD	
				(%)	(g)	(%)	(g)
MT	mortier témoin	450	225	100	1350	0	0
M10	mortier composite 10% de PEHD	450	225	90	1215	10	44.15
M20	mortier composite 20% de PEHD	450	225	80	1080	20	88.30
M30	mortier composite 30% de PEHD	450	225	70	945	30	132.46
M40	mortier composite 40% de PEHD	450	225	60	810	40	176.61

b. Impact de la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite

La préparation des mortiers est basée sur deux types de sable : un sable alluvionnaire (SO) et un sable concassé (SC), utilisés séparément. Un mortier de référence (mortier témoin) pour chaque type de sable, confectionné pour des éprouvettes prismatiques. Des mortiers composites pour chaque type de sable avec substitution de sable 10% puis 30%. Donc six mélanges de mortiers à confectionner (voir le tableau II.7)

Tableau II. 7: Compositions des mortiers avec substitution en PEHD granulé selon la nature de sable

Type de sable	Désignation du mortier	Description des mélanges	ciment (g)	Eau (ml)	Sable		PEHD	
					(%)	(g)	(%)	(g)
Sable d'Oued	MTSO	mortier témoin	450	225	100	1350	0	0
	MSOP10	mortier composite 10% de PEHD	450	225	90	1215	10	42.12
	MSOP30	mortier composite 30% de PEHD	450	225	70	945	30	126.37
Sable de carrière	MTSC	mortier témoin	450	225	100	1350	0	0
	MSCP10	mortier composite 10% de PEHD	450	225	90	1215	10	44.15
	MSCP30	mortier composite 30% de PEHD	450	225	70	945	30	132.46

c. Amélioration du comportement physico-thermique des mortiers composites par addition des déchets d'aluminium

Dans cette étude le sable utilisé est un sable d'Oued (SO) et l'ajout du déchet d'aluminium comme agent expansif est de l'ordre de 0.5% et 1% par rapport au poids du ciment. (Voir le tableau II.8) (Haouara et al. 2024)

Tableau II. 8: Compositions des mortiers avec substitution en PEHD granulé par fusion et ajout d'Aluminium

Désignation du mortier	Sable %	PEHD %	Al %	Eau (g)	Ciment (g)	Sable (g)	PEHD (g)	Al (g)
MT	100	0	0	225	450	1350	0	0
M1	90	10	0	225	450	1215	42.12	0
M2	70	30	0	225	450	945	126.37	0
M3	90	10	1	225	450	1215	42.12	4.5
M4	70	30	1	225	450	945	126.37	4.5
M5	90	10	0.5	225	450	1215	42.12	2.25
M6	70	30	0.5	225	450	945	126.37	2.25

II.5.1.3 Mortiers composites (déchet des sacs PEHD déchiquetés)

Pour l'étude de l'impact du mode d'incorporation des PEHD déchiquetés (addition / substitution) sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers composites. Les mortiers confectionnés sont à base de sable concassé, Ils sont réalisés par une teneur en déchets des sacs plastiques déchiquetés selon des quantités en masses fixes exprimées respectivement par :

- Ajout des déchets des sacs plastiques déchiquetés dans le mortier en pourcentages : 1; 2; 3; et 4% du volume total d'une gâchée (Tsai et al. 2022);
- Remplacement volumique du sable par des déchets des sacs plastiques déchiquetés en pourcentages : 1.5% ; 3% ; 4.45% et 6%.

Le tableau II.9 présente les compositions des différents mélanges utilisés pour la confection des éprouvettes prismatiques (4x4x16) et cubiques (5x5x5).

Tableau II. 9: Composition des différents mortiers composites (PEHD déchiquetés)

Epreuves	Composition	Désignation du mortier	PEHD déchiqueté		Sable (g)	Ciment (g)	Eau (ml)
			(%)	(g)			
03 éprouvettes prismatiques 4x4x16 (Un moule)	Mortier témoin	MT	0	0,00	1350,0	450	225
	Mortiers composites en remplacement	MR1	1.5	1.15	1330.0		
		MR2	3	2.3	1310.0		
		MR3	4.45	3.45	1290.0		
		MR4	6	4.60	1270.0		
	Mortiers composites en ajouts	MJ1	1	1.15	1350,0		
		MJ2	2	2.3			
		MJ3	3	3.45			
		MJ4	4	4.60			
	06 éprouvettes cubiques 5x5x5 (02 moules)	Mortier témoin	MT	0	0,00		
Mortier composites en remplacement		MR1	1.5	1.13	1300.0		
		MR2	3	2.26	1280.0		
		MR3	4.45	3.39	1260.0		
		MR4	6	4.52	1240.0		
Mortier composites en ajouts		MJ1	1	1.13	1320,0		
		MJ2	2	2.26			
		MJ3	3	3.39			
		MJ4	4	4.52			

La figure II.23 représente la quantité de sable et substitution en sacs PEHD déchiqueté pour les mortiers MR1, MR3 et MR4.



Figure II. 23: le sable et la substitution en PEHD des mortiers : MR3(a), MR4(b) et les mélanges (sable + PEHD) : de MR4 (c) et de MR1 (d)

II.5.2 Procédures de malaxage

La préparation du mortier a été effectuée selon la norme (EN196-1), les étapes sont récapitulées dans le tableau II.10. Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'âge requis pour effectuer l'essai.

Tableau II. 10: Procédure de malaxage des mortiers (Dupain, Lanchon, and Saint-Arroman 2004)

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	30 s	15 s	1min et 15 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide



Figure II. 24: Les étapes de malaxage des mortiers

II.5.3 Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes couvertes de films plastiques (figure II.25 et figure II.26), sont démoulées après 24 heures de durcissement dans une salle humide pour maintenir une humidité adéquate afin d'éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage.

Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées dans de l'eau (NF EN 196-1) à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, jusqu'au jour des essais afin d'assurer une hydratation continue et uniforme (figure II.27).



Figure II. 25: Les éprouvettes prismatiques (4x4x16) avant démoulage



Figure II. 26: Les éprouvettes cubiques (5x5x5) avant démoulage



Figure II. 27: Conservation des éprouvettes dans l'eau

II.6 Les essais effectués

II.6.1 Les essais effectués à l'état frais

Les essais effectués sur les mortiers à l'état frais permettent d'évaluer leurs propriétés immédiatement après le mélange, afin de garantir leur maniabilité, leur homogénéité et leur adéquation aux applications prévues. Les principaux essais sont :

II.6.1.1 Mesure de la maniabilité

L'essai d'étalement à la table à secousse (figure II.28) pour évaluer la consistance (ou maniabilité) des mortiers frais (NF EN 1015-3): Le mortier est introduit dans le cône (de diamètre à la base égale à 10 cm) en deux couches, chacune est compactée avec 10 coups afin d'assurer un remplissage uniforme. Ensuite, il faut enlever l'excès de mortier et nettoyer le disque de la table d'essai, le moule est soulevé verticalement. Après avoir secoué la table d'étalement 15 fois à une fréquence constante (environ une secousse par seconde), le mortier étant étalé sur la table en donnant une valeur d'étalement (figure II.29) qui est la moyenne des deux diamètres du mortier étalé sur le disque de la table, mesurés dans deux directions perpendiculaires.



Figure II. 28: La table à secousses **Figure II. 29:** Mesure du diamètre d'étalement

II.6.1.2 La masse volumique du mortier frais

La masse volumique apparente du mortier à l'état frais, est une mesure essentielle pour évaluer la qualité et la performance du mortier. Selon la norme (NF EN 1015-6), cette mesure est effectuée en utilisant un récipient normalisé de volume connu (figure II.30). Le mortier frais est versé dans le récipient sans compactage excessif, puis nivelé pour enlever l'excès. La masse du récipient rempli de mortier est ensuite mesurée, et la masse volumique est calculée en divisant la masse du mortier par le volume du récipient. Cette méthode permet d'obtenir une mesure précise de la densité du mortier à l'état frais.



Figure II. 30: La masse volumique apparente du mortier frais

$$M_{vf} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

M_{vf} = Masse volumique apparente

m_1 = Masse du récipient vide

m_2 = Masse du récipient rempli

V = Volume du récipient

II.6.2 Les essais effectués à l'état durci

Les essais effectués sur les mortiers à l'état durci visent à évaluer leurs propriétés physiques, mécaniques et durabilité après leur durcissement. Ces essais sont essentiels pour vérifier que les performances prévues sont atteintes. Les principaux essais réalisés sont ceux qui suivent :

II.6.2.1 La porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente

Pour évaluer la durabilité du mortier vis-à-vis la perméabilité, cet essai (NF EN 18-459) fournit des données sur la quantité d'eau retenue dans les pores, utile pour déterminer la porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente du mortier (figure II.31). Et implique la détermination par pesées des :

- Masse apparente dans l'eau (après immersion dans l'eau et par pesée hydrostatique) du mortier sous vide $M_{sat\ eau}$;
- Masse dans l'air libre du même mortier imbibé $M_{sat\ air}$;
- Masse à l'état sec à (105 °C) jusqu'à masse constante M_{sec} .

- La porosité accessible à l'eau est égale à :

$$P = ((M_{sat\ air} - M_{sec}) / (M_{sat\ air} - M_{sat\ eau})) \times 100 \quad \text{Equation II. 1}$$

- La masse volumique apparente est égale à :

$$\rho_d = (M_{sec} / (M_{sat\ air} - M_{sat\ eau})) \times 100 \quad \text{Equation II. 2}$$



Figure II. 31: Mesure de la porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente

II.6.2.2 Résistance à la flexion

L'essai est réalisé selon la norme (EN 1015-11), sur des éprouvettes prismatiques (4×4×16) à l'aide d'un appareil de type Control, équipé d'un dispositif de flexion par trois points (figure II.32). À l'âge requis, l'éprouvette est retirée de son milieu de conservation, essuyée, puis laissée à l'air libre pendant deux heures avant d'être soumise à un chargement dans la cellule d'écrasement.

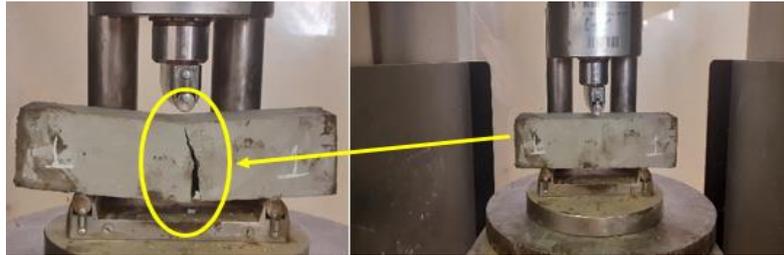


Figure II. 32: Essai de la résistance à la flexion du mortier

II.6.2.3 Résistance à la compression

Les deux demis éprouvette obtenus après rupture à la flexion, sont soumis à l'essai de mesure de résistance à la compression selon la norme (EN 1015-11) voir la figure II.33, est réalisé sur une presse menée d'un dispositif spécial pour mortier.

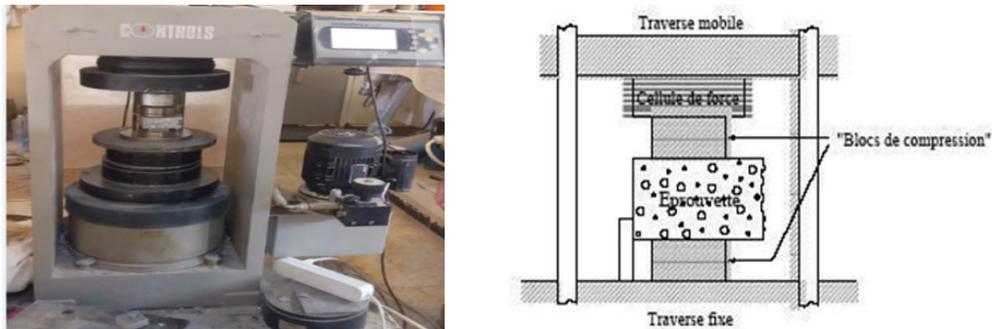


Figure II. 33: Essai de la résistance à la flexion du mortier

II.6.2.4 L'essai de la vitesse de l'impulsion ultrasonique (UPV)

Selon la norme (NF EN 12504-4), un test non destructif utilisé pour évaluer la qualité et l'intégrité du mortier. Il repose sur la mesure du temps que met une impulsion ultrasonique pour traverser une éprouvette du mortier. A l'aide d'un émetteur et un récepteur placés sur deux faces opposées de l'éprouvette on mesure la vitesse par laquelle une impulsion traverse

l'éprouvette (figure II.34). Cette vitesse dépend de la densité et de l'homogénéité du mortier. Une vitesse plus élevée indique un mortier de meilleure qualité, tandis qu'une vitesse plus basse révèle des défauts tels que des fissures ou des vides.



Figure II. 34: L'essai de la vitesse de l'impulsion ultrasonique

II.6.2.5 Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique est obtenu par application d'une onde qui a une vitesse élevée donc par un chargement dynamique. La traversée de l'éprouvette par de telles ondes n'entraîne pas d'endommagement du matériau. Il est déterminé en mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le matériau, et en utilisant l'équation II.3 donnée par Topçu and Bilir (2009) (Badache et al. 2018; Gupta, Chaudhary, and Sharma 2016):

$$E_d = (V^2 * \rho / g) \times 10^{-2} \quad \text{Equation II. 3}$$

E_d : Module d'élasticité dynamique (GPa) ;

V : UPV (Km/s);

ρ : la densité (Kg/m^3) et g : accélération gravitaire ($9,81\text{m/s}^2$)

II.6.2.7 Mesure de la conductivité thermique

A l'aide d'un CT METRE au niveau du laboratoire du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (**CNERIB**), on a évalué les caractéristiques thermiques des mortiers étudiés selon la norme (NF EN 12667), par des mesures de l'élévation de température ressentie par le capteur à l'aide d'une combinaison d'un élément chauffant et d'un capteur de

température (réunis dans une même sonde), placés entre deux éprouvettes du même composition (figure II.35).



Figure II. 35: Le CT mètre



Figure II.36: Mesure de la conductivité thermique

On mesure l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde). La sonde placée entre deux éprouvettes de mortiers de même composition (figure II.36). Cette mesure est effectuée trois fois différemment pour trois éprouvettes du même mortier (éprouvette 1 avec 2 puis 2 avec 3 et enfin 1 avec 3).

II.6.2.9 Absorption capillaire

Cet essai sert à évaluer la capacité de l'eau à pénétrer dans le mortier non saturé (NF EN 1015-18). L'essai mesure l'augmentation de la masse d'une éprouvette de mortier résultant de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps, lorsque seule une surface de l'éprouvette est exposée à l'eau (figure II.37). La sorptivité détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette cubique de dimensions $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette qu'à une hauteur de 5 mm de la profondeur des quatre surfaces latérales préalablement imperméabilisées (Figure II.38). On mesure l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (exprimé en minutes) à 15, 30, 60, 90, 120, 240, 360, et 1440 minutes.



Figure II. 37: l'essai de l'absorption par capillarité



Figure II. 38: imperméabilisation des surfaces latérales de l'éprouvette de mortier

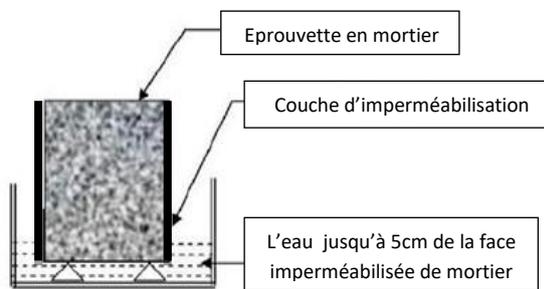


Figure II. 39: schéma de l'essai de l'absorption capillaire

Les résultats de l'essai de la sorptivité des différents mortiers, sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps. L'équation de ces droites à la forme (Eq. II. 5) :

$$S = I/\sqrt{t} \quad \text{Equation II. 5}$$

$$I = m_t/(A \times \rho) \quad \text{Equation II. 4}$$

S : le coefficient de sorptivité du spécimen ($\text{cm/s}^{1/2}$) ;

t : le temps (s) ;

I : La quantité d'eau cumulée absorbée par l'unité de surface en (cm) ;

m_t : l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (g) ;

A : la surface de l'éprouvette en contact avec l'eau, donc $A=5 \times 5 = 25 \text{cm}^2$;

ρ : la densité de l'eau en (g/cm^3).

II.6.2.10 Résistance au milieu agressif (L'acide sulfurique H₂SO₄)

La solution d'acide sulfurique utilisée présente une pureté de 97 % et une concentration de 5%. Des éprouvettes cubiques (5×5×5 cm³) sont conservés dans l'eau pendant 28 jours à une température de 20 ± 2 °C avant d'être exposés à l'attaque acide. Après cette phase de cure, les éprouvettes sont pesées afin de déterminer leur poids initial, puis immergées dans une solution d'acide sulfurique à 5 %. À chaque échéance déterminée, elles sont soigneusement nettoyées à l'eau distillée pour éliminer les résidus altérés, séchées pendant une demi-heure, puis pesées avec une balance de précision de 0,01 g. Cette opération est réalisée à 7, 14, 21 et 28 jours, avec un renouvellement de la solution chaque semaine afin de maintenir un pH inférieur à 7. La résistance des éprouvettes aux agressions chimiques est évaluée conformément à la norme (ASTM C 267-96), en mesurant leur perte de masse et leur diminution de résistance.

- L'évaluation de la perte de masse des éprouvettes s'effectuera de la manière suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1 - M2)/M1] \times 100 \quad \text{Equation II. 6}$$

Où M1 est la masse de l'éprouvette avant immersion dans la solution acide et M2 est la masse de l'éprouvette nettoyée et séchée après immersion.

- La diminution de la résistance à la compression des éprouvettes sera évaluée en comparant la résistance des éprouvettes immergées pendant 28 jours dans l'acide sulfurique à celle des éprouvettes cubiques conservées dans l'eau durant la même période, selon la méthodologie suivante. :

$$\text{Perte de résistance (\%)} : PR_c \% = [(R_{c28} - R_{cs})/R_{c28}] \times 100 \quad \text{Equation II. 7}$$

II.6.2.10 Pénétration des ions de chlorure

L'attaque par les chlorures se caractérise par la corrosion des armatures, ce qui entraîne par la suite la dégradation du béton environnant. La résistance à la pénétration des ions chlorures a été évaluée conformément à la norme (ASTM C 267-96). Pour cela, des éprouvettes de dimensions 50×50×50 mm³ ont été immergées dans des solutions d'essai à 20°C pendant des périodes de 7, 21 et 28 jours.

Après un durcissement de 28 jours dans l'eau, une couche de silicone est appliquée sur les quatre faces latérales des éprouvettes afin de les rendre imperméables. Ainsi, la pénétration

des ions chlorures se limite à deux faces opposées. Les éprouvettes sont ensuite placées dans une solution de NaCl (de pureté 99%), à 5% de concentration, qui est renouvelée tous les 7 jours jusqu'à la fin des 28 jours d'immersion.

À chaque intervalle d'essai (7, 21 et 28 jours), chaque éprouvette est sectionnée en deux suivant les faces perméables, permettant ainsi d'observer le flux de diffusion des ions chlorures. Une solution de nitrate d'argent AgNO_3 (de pureté 100%), à 10% de concentration est ensuite appliquée sur chaque section coupée, ce qui entraîne un changement de couleur au niveau des bords. La zone blanchâtre obtenue correspond à la profondeur de pénétration des ions chlorures, laquelle est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse sur plusieurs points (Figure II.40). La valeur finale de la profondeur de pénétration (X) est déterminée par la moyenne des différentes mesures.

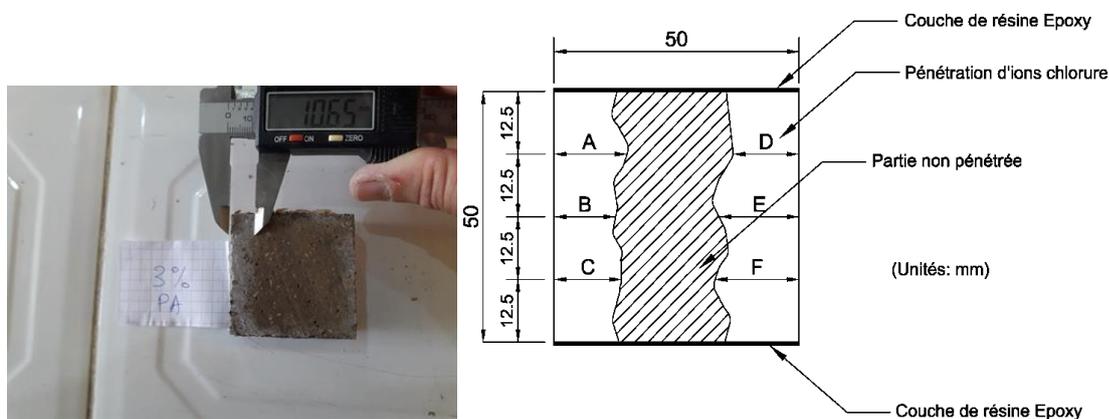


Figure II. 40: Mesure de la pénétration des ions de chlorure

II.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des granulats issus de déchets des sacs PEHD en deux aspects (granulés par fusion et déchiquetés), selon le mode de recyclage (thermique et mécanique). Ces granulats plastiques ont été utilisés dans la fabrication des mortiers composites dans cette étude et comparés à un mortier témoin ou de référence (sans particules plastique) . L'introduction de ces granulats plastiques dans la composition des mortiers peut impliquer des modifications de l'arrangement granulaire, de la cohésion de la matrice, la maniabilité du matériau et par conséquent, des propriétés physiques, mécaniques, et de durabilité.

Ce chapitre a détaillé le programme expérimental mis en place pour évaluer les performances des mortiers composites. Les protocoles de test et les procédures expérimentales ont été exposés selon des normes, offrant un cadre complet et détaillé pour l'étude.

Les résultats obtenus à partir de ces essais fournissent des données essentielles pour comprendre le comportement des mortiers composites sous diverses conditions de charge et environnementales. Les protocoles de test adoptés permettent de reproduire les conditions réelles d'utilisation des matériaux, garantissant ainsi la fiabilité des résultats.

Après avoir donné les différentes compositions des mortiers utilisés dans cette thèse, les chapitres suivants (III, IV et V) discuteront les résultats obtenus.

Chapitre III :
Impact du taux de PEHD
granulés et la nature du
sable sur la maniabilité et la
résistance mécanique du
mortier composite

Chapitre III. Impact du taux de PEHD granulés et la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite

III.1 Introduction

Généralement, le sable employé dans le secteur de la construction est le sable alluvionnaire. Cependant, il fait face à une pénurie significative en Algérie en raison de l'épuisement des gisements, sans oublier les impératifs liés à la protection de l'environnement. Ce qui pousse à explorer d'autres types de sables, comme le sable concassé, qui pourraient améliorer la qualité des mortiers et des bétons (Nécira, Guettala, and Guettala 2017). La valorisation des déchets plastiques comme granulats permet d'éviter l'épuisement des gisements des sables et de réduire la présence de déchets plastiques dans la nature (Awoyera and Adesina 2020). La substitution partielle de sable par des granulats de polyéthylène haute densité (PEHD) dans le mortier représente une avancée prometteuse dans l'utilisation de matériaux recyclés pour réduire l'impact environnemental des constructions (Coppola et al. 2016). Mais malheureusement les particules plastiques ont un effet négatif sur quelques propriétés du béton et du mortier notamment la résistance mécanique, mais le choix du sable (alluvionnaire/concassé) peut remplir cette lacune.

La première partie de ce chapitre vise à déterminer le pourcentage optimal de substitution du sable par le PEHD, en utilisant des granulats de déchets plastiques recyclés granulés par fusion. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques de mortier à base de sable concassé avec des pourcentages de substitution en PEHD : 10%, 20%, 30% et 40% en volume du sable. Les résultats des tests effectués pour évaluer les performances du mortier modifié, permettront d'identifier le pourcentage optimal de PEHD à intégrer, garantissant ainsi des propriétés mécaniques adéquates et acceptables.

La deuxième partie de cette étude analyse l'interaction entre le PEHD et le sable naturel de natures différentes : un sable concassé et un sable d'Oued ; le taux de substitution du sable naturel par le PEHD est fixé à 10% et à 30%. L'objectif est d'optimiser la composition du mortier composite léger, en répondant aux exigences de l'ouvrabilité et de résistance mécanique en compression.

III.2 Impact du taux de PEHD granulés sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite

L'utilisation des granulats de PEHD peut offrir plusieurs avantages, notamment la réduction de la densité du mortier, l'amélioration de l'isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une potentielle diminution de l'empreinte carbone liée à la production et au transport des matériaux. Cependant, il est convaincant de trouver un équilibre entre ces avantages et les possibles compromis en termes de résistance et de mise en œuvre du mortier.

III.2.1 L'influence de la substitution en PEHD sur la maniabilité du mortier

La maniabilité est une caractéristique essentielle du matériau à l'état frais, déterminant la facilité avec laquelle il peut être mis en œuvre. Cette propriété influence également les performances mécaniques du matériau une fois durci. La quantité d'eau nécessaire pour atteindre une maniabilité adéquate est fortement influencée par la texture de surface, la porosité et la forme des granulats. La figure III.1 représente l'effet de la substitution en PEHD sur la maniabilité du mortier.

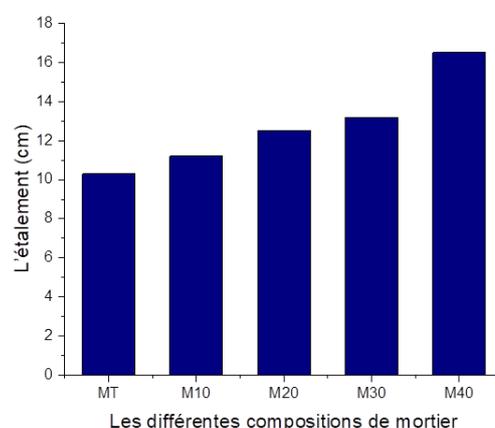


Figure III. 1: L'effet de la substitution en PEHD sur la maniabilité du mortier

Le mortier témoin (MT) sans granulat plastique, a l'étalement le plus faible. Nous observons une augmentation progressive de l'étalement avec l'augmentation du pourcentage de substitution, l'étalement s'améliore de façon significative par rapport au mortier témoin : 8,7%, 21,4%, 28,2% et en 60,2% par ordre progressant de la substitution.

Cela suggère que l'incorporation de granulats de PEHD dans le mortier augmente l'étalement, rendant le mortier plus fluide. Comme il a été confirmé par (Choi et al., 2005, 2009; Ghernouti et al., 2009b), la maniabilité augmente à cause de : la surface plus lisse des granulats PEHD par rapport à celle des particules de sable (Saikia & De Brito, 2012); la présence d'eau libre liée à l'absorption d'eau nulle des granulats PEHD donne un mélange plus fluide (Sharma & Bansal, 2016).

III.2.2 L'influence de la substitution en PEHD sur la résistance mécanique (compression - flexion) du mortier

Les résistances mécaniques à la compression et à la flexion sont évaluées à 7, 28 et 90 jours de durcissement dans un milieu humide sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³. Chaque valeur de résistance mécanique est la valeur moyenne de trois essais. L'évolution de la résistance à la compression et à la flexion des mortiers est représentée sur les figures III.2 et III.3.

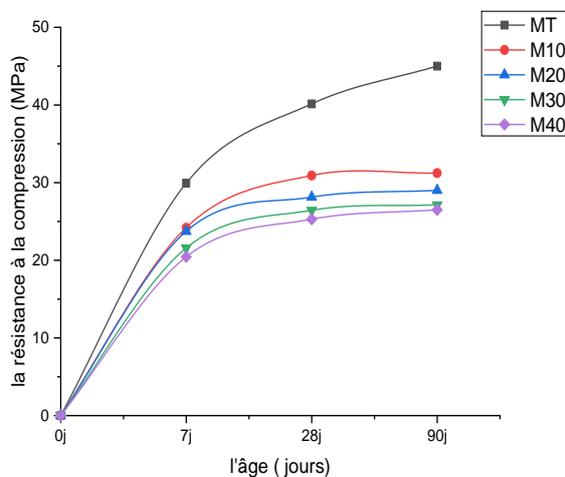


Figure III. 2: L'effet de la substitution en PEHD sur la résistance à la compression

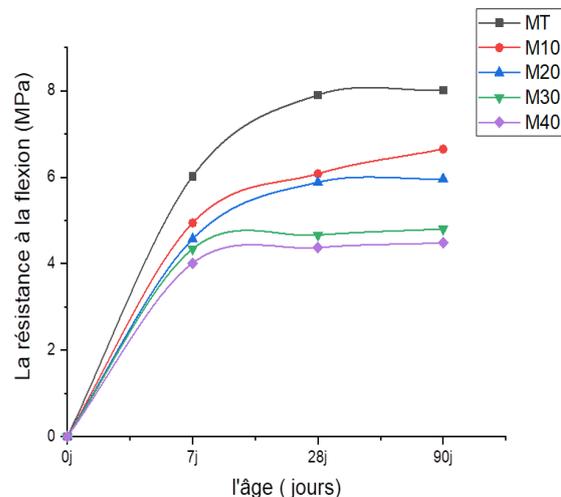


Figure III. 3: L'effet de la substitution en PEHD sur la résistance à la flexion

L'augmentation de la résistance à la flexion et à la compression évolue d'une manière progressive dans le temps pour les différents mortiers soit à (7, 28 et 90 jours). Cette augmentation est due à l'hydratation du ciment au cours du temps ce qui provoque l'évolution de la compacité.

- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du PEHD, et cette baisse est plus marquée à long terme : À 7 jours, la réduction de la résistance par rapport au mortier témoin varie entre 19 % et 32 %, à 28 jours, la baisse est plus prononcée (jusqu'à 37 %). Et enfin à 90 jours, la diminution atteint 41,1 % pour M40.

- La résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du PEHD, à toutes les périodes d'essai (7j, 28j et 90j). La perte est plus marquée pour des pourcentages élevés (30 % et 40 % de PEHD), où la résistance chute de près de 44 % à 90 jours.

Donc, une diminution de la résistance mécanique (à la compression ainsi qu'à la flexion) en fonction de l'augmentation du pourcentage de PEHD dans les mortiers. Cette diminution est liée aux facteurs suivants :

- La présence d'une faible région de transition inter-faciale (RTI) (voir la figure III.4) résultant d'une adhérence insuffisante entre la matrice cimentaire et les granulats plastiques (Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mustafa Mohamed, et al., 2020; Gu & Ozbakkaloglu, 2016; Ismail & AL-Hashmi, 2008; Rai et al., 2012; Saikia & De Brito, 2012).

- Les particules plastiques (PEHD) ont un faible module d'élasticité par rapport à celui des granulats naturels ce qui réduit la résistance mécanique (Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mustafa Mohamed, et al., 2020)

- La nature hydrophobe des granulats PEHD, qui limite la réaction d'hydratation du ciment à proximité de leur surface (Saikia & De Brito, 2012).

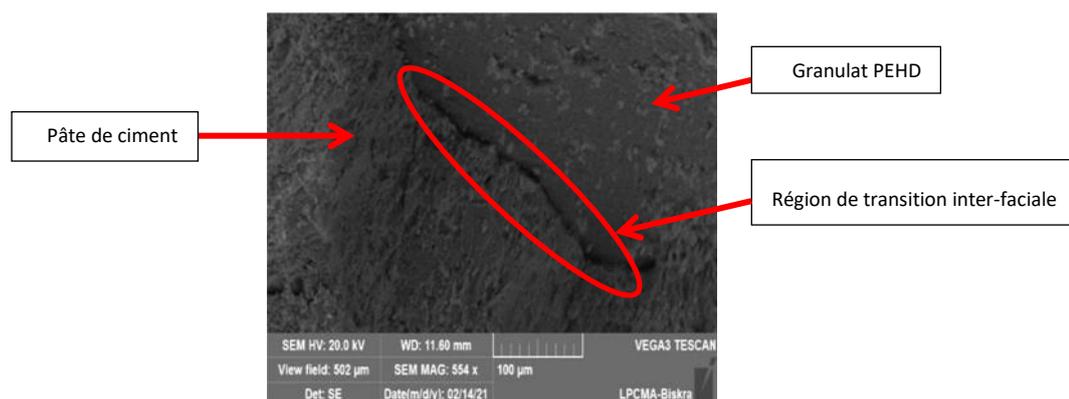


Figure III. 4 : RTI entre la matrice cimentaire et PEHD

Les premiers jours de durcissement sont importants pour la formation de la microstructure du ciment. Le PEHD ralentit le développement initial de la résistance, car il interfère avec

l'hydratation du ciment. À mesure que le mortier continue de durcir, la différence de résistance devient plus marquée pour des taux de substitution élevés.

III.3 Impact de la nature du sable sur la maniabilité et la résistance mécanique du mortier composite

Les déchets PEHD granulés par fusion sont utilisés dans le mortier en remplacement du sable naturel de 10% et 30% de son volume. Deux types de sables sont choisis : Un sable concassé (de carrière d'Ain TOUTA) désigné par SC, et un sable alluvionnaire (sable d'Oued) de la région de Biskra en particulier de Lioua désigné par SO.

Cette partie vise à analyser l'influence de la nature du sable sur les propriétés des mortiers composites à base de PEHD, dont l'objectif est de déterminer le type de sable le plus adapté pour atténuer l'impact négatif des granulats plastiques sur le comportement du mortier à l'état frais et durci en particulier la résistance mécanique.

III.3.1 L'effet du type de sable sur la maniabilité du mortier composite

PEHD

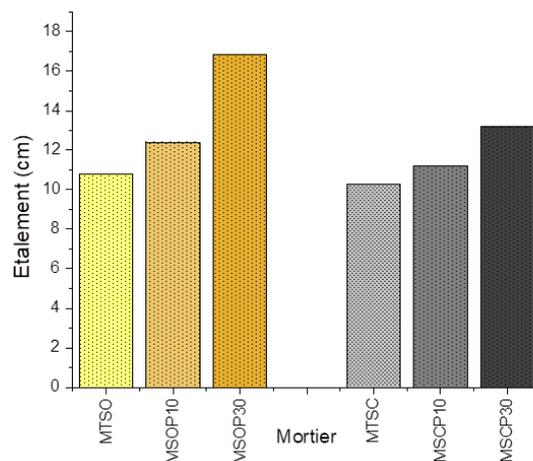


Figure III. 5 : Variation de l'étalement du mortier composite (PEHD) en fonction de la nature du sable

L'influence du type de sable sur la maniabilité du mortier est évaluée par la variation de l'étalement des différentes compositions de mortiers, présentée sur la figure III.5. Cette figure illustre que l'étalement des mortiers élaborés avec du sable d'Oued dépasse celui des mortiers à base de sable concassé, que ce soit en présence ou en absence de granulats plastiques (PEHD).

Cette constatation suggère que le sable d'Oued présente une viscosité plus faible, ce qui améliore la maniabilité du mortier. Plusieurs facteurs expliquent cette différence :

- La morphologie des particules de sable d'Oued, qui sont principalement arrondies, diminue le frottement inter-granulaire entre les particules de sable elles-mêmes (Zeghichi, Benghazi, and Baali 2014) et entre le sable et les granulats de PEHD. En revanche, le sable concassé, composé de particules angulaires avec des arêtes vives, crée une résistance au mouvement d'écoulement, entraînant ainsi une maniabilité réduite.
- La surface lisse des grains de sable d'Oued facilite le déplacement des particules lors de l'écoulement, tandis que la texture rugueuse du sable concassé entrave ce mouvement.
- Les particules fines issues du concassage du sable concassé nécessitent une quantité d'eau plus importante pour les enrober, ce qui réduit la quantité d'eau libre disponible dans le mélange (Elat et al. 2020; Geiker 2002; Westerholm et al. 2008).

L'analyse des résultats révèle que l'incorporation de granulats en PEHD améliore de manière significative la maniabilité des mortiers, quel que soit le type de sable utilisé. Pour une substitution de 10% de PEHD, l'étalement du mortier à base de sable alluvionnaire augmente de 14,81%, tandis que celui du mortier à base de sable concassé s'accroît de 8,73%. En augmentant la substitution à 30%, l'étalement atteint 56% pour le sable alluvionnaire et 28,15% pour le sable concassé. Ces résultats indiquent que les granulats en PEHD favorisent une meilleure fluidité, avec un impact plus marqué sur les mortiers à base de sable d'Oued, en raison des éléments suivants :

- La forme sphérique des granulats naturels et plastiques (sable d'Oued et PEHD) favorise un mouvement plus fluide par rapport aux particules angulaires (Al-Harthy et al. 2007; Zeghichi, Benghazi, and Baali 2014).
- La présence d'eau libre résultant de l'absorption d'eau nulle pour les granulats PEHD ce qui donne un mélange plus fluide (Sharma and Bansal 2016). En revanche, pour les mortiers à base de sable concassé, cette part d'eau est absorbée par les particules fines.

III.3.2 L'effet de la nature du sable sur la résistance à la compression du mortier composite (PEHD)

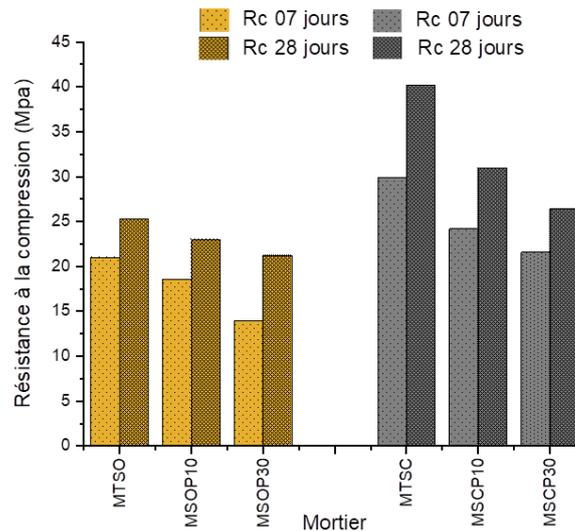


Figure III. 6: L'effet de la nature du sable sur la résistance à la compression des mortiers composites (PEHD)

L'influence du type de sable sur les résistances à la compression des différents mortiers à 7 et 28 jours de durcissement est présentée sur la figure III.6.

- **Pour la résistance à la compression à 7 jours :** Le mortier témoin à base de sable concassé affiche la plus haute résistance initiale, suivi du mortier composite 10%PEHD à base de sable concassé. Le mortier composite 30%PEHD à base de sable d'Oued a la plus faible résistance initiale, ce qui suggère que l'ajout de 30% de PEHD a un impact négatif important sur la résistance à court terme quand on utilise un sable d'Oued.

- **Pour la résistance à la compression à 28 jours :** La tendance reste similaire à 7 jours. Le mortier témoin à base de sable concassé continue de montrer la plus haute résistance, tandis que le mortier composite 30%PEHD à base de sable d'Oued reste le plus faible.

Donc à 7 et 28 jours, les résistances à la compression sont significativement plus élevées pour les mortiers formulés à base du sable concassé, tant pour les mortiers témoins que pour les mortiers composites. Cette amélioration des performances mécaniques peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- La forme angulaire et la texture rugueuse du sable concassé favorisent une meilleure adhérence avec la pâte de ciment (De Larrard 2000; Nécira, Guettala, and Guettala 2017).

- La taille des grains (Nécira, Guettala, and Guettala 2017), tel que le module de finesse du sable concassé est supérieur à celui du sable d'Oued ($M_{fSC}=3,59 > M_{fSO}=2,59$).

- L'enchevêtrement des grains anguleux du sable concassé confère une résistance mécanique accrue par rapport aux grains arrondis du sable d'Oued (De Larrard 2000; Nécira, Guettala, and Guettala 2017). En revanche, les résistances à la compression des mortiers composites contenant du PEHD sont inférieures à celles des mortiers témoins utilisant le même type de sable.

• **Pour le développement de la résistance à la compression** : On remarque que même avec la substitution de 10% de PEHD, il y a une évolution de la résistance à la compression dans le temps. Cette amélioration est de 28% pour le cas du sable concassé, qui est légèrement inférieure à celle du mortier témoin (34%), contrairement au sable d'Oued qui marque une progression raisonnable (24%) avec l'ajout de 10% de PEHD par rapport au mortier témoin (20%). Dans le cas de la substitution de 30% de PEHD, l'évolution de la résistance à la compression est importante dans le mortier composite à base de sable d'Oued (52%) bien qu'il a la plus faible résistance à 7 jours. En revanche dans le cas du sable concassé, l'ajout de 30% de PEHD réduit le développement de la résistance (23%) par rapport au mortier témoin (34%) et le mortier composite 10% PEHD (28%).

• **La réduction de la résistance à la compression due à l'incorporation de PEHD** est significative pour les mortiers à base de sable concassé. Pour une substitution de 10 % de PEHD, la diminution de la résistance à la compression est de 19,11 % à 7 jours et de 22,96 % à 28 jours, tandis que pour le sable d'Oued, elle est de 11,37 % à 7 jours et de 9% à 28 jours. Pour une substitution de 30 % de PEHD, la diminution est de 27,89 % à 7 jours et de 34,17 % à 28 jours pour le sable concassé, contre 33,55% à 7 jours et 16% à 28 jours pour le sable d'oued.

Malgré que la réduction de la résistance à la compression due à l'incorporation de PEHD est plus prononcée dans les mortiers à base de sable concassé, mais ces derniers demeurent plus performants en qualité de résistance à la compression que les mortiers à base de sable d'Oued, voir même meilleures que les résistances à la compression données par le mortier de référence MTSO (sans granulats PEHD).

• **Comparaison sable concassé vs sable d'Oued** : Globalement, les mortiers à base de sable concassé présentent des valeurs de résistance plus élevées que celles des mortiers à base de

sable d'Oued, aussi bien à 7 jours qu'à 28 jours. Donc, contrairement au sable d'Oued, le sable de carrière favorise le développement de la résistance à la compression jusqu'à l'achèvement du durcissement (Yannick and Richard 2022). Les résultats indiquent que le sable concassé est plus adapté pour atteindre des résistances élevées dans les mortiers, même lorsqu'on y ajoute du PEHD. L'ajout de 10% de PEHD semble réduire la résistance pour les deux types de sable, mais l'effet est plus marqué pour le sable d'Oued. L'ajout de 30% de PEHD provoque une réduction significative de la résistance, particulièrement pour le sable d'Oued, soulignant que l'utilisation excessive de PEHD n'est pas avantageuse pour la résistance à la compression.

III.3.3 L'effet de la nature du sable sur la résistance à la flexion du mortier composite (PEHD)

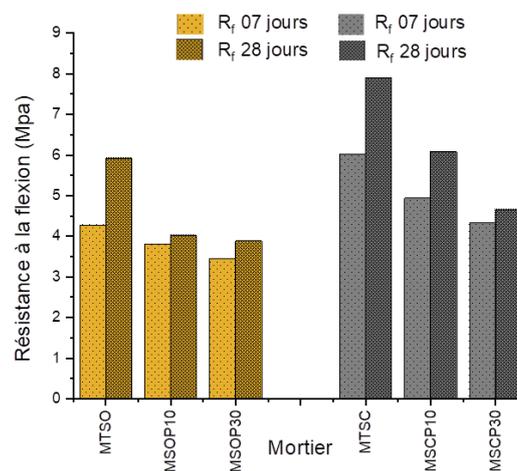


Figure III. 7: L'effet de la nature du sable sur la résistance à la flexion des mortiers composites

Les résultats des essais de résistance à la flexion des mortiers révèlent que les formulations à base de sable concassé présentent des performances mécaniques supérieures à celles élaborées avec du sable d'Oued, comme l'illustre la Figure III.7. Pour les mortiers témoins (sans PEHD), le mortier à base de sable concassé démontre une résistance à la flexion supérieure de 33 % par rapport à son homologue utilisant du sable d'Oued. De plus, cette tendance est répétée par l'introduction de substitutions en PEHD: une augmentation plus de 51 % de la résistance à la flexion est observée avec 10% de PEHD, et une augmentation de 19,79% est constatée avec 30% de PEHD. Ces améliorations peuvent être expliquées par la nature

calcaire et la morphologie rugueuse du sable de carrière, qui favorisent l'adhérence entre la pâte et les granulats, entraînant ainsi une augmentation de la ductilité et de la résistance à la flexion des mortiers (Nécira, Guettala, and Guettala 2017; Taoufik ACHOUR 2007).

Semblable à la résistance à la compression, la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de substitution de PEHD. Une réduction significative de la résistance à la flexion, surtout à 28 jours est signalée. L'explication de la perte de résistance à la compression des mortiers s'applique également au comportement en flexion.

III.4. Conclusion

En conclusion, les résultats soulignent l'importance de la morphologie et de la texture des particules de sable dans la maniabilité et les performances mécaniques des mortiers composites.

- Le sable d'Oued, aux grains arrondis et à la surface lisse, facilite l'écoulement et améliore la maniabilité, particulièrement avec l'ajout de granulats en PEHD. En effet, la substitution en PEHD augmente l'étalement des mortiers, plus significativement avec le sable d'Oued qu'avec le sable concassé. L'augmentation de l'étalement peut être bénéfique pour certains types de construction où une meilleure maniabilité et une mise en œuvre facile sont souhaitées. Toutefois, une fluidité excessive pourrait également nécessiter des ajustements dans d'autres propriétés mécaniques pour garantir la résistance et la durabilité souhaitées.
- Malgré l'amélioration de maniabilité apportée par les granulats en PEHD, leur substitution entraîne une diminution de la résistance à la compression et à la flexion, due principalement à la faible adhérence entre les granulats plastiques et la pâte de ciment, au faible module d'élasticité et à la nature hydrophobe du PEHD.
- Cependant, en termes de résistance mécanique, le sable concassé, caractérisé par ses grains anguleux et rugueux, offre des avantages notables. Il contribue à une meilleure adhérence dans la matrice cimentaire et à une résistance accrue à la compression et à la flexion, notamment en raison de l'enchevêtrement et de la granulométrie plus élevée du sable concassé.
- Le sable concassé, offre plus de performances mécaniques aux mortiers que le sable d'Oued, il donne des mortiers composites en PEHD plus performant en terme de résistance

mécanique qu'un mortier sans PEHD à base de sable d'Oued. Ainsi, l'optimisation des formulations de mortier pourrait tirer parti des avantages combinés du PEHD pour la maniabilité et du sable concassé pour la résistance mécanique, en fonction des exigences spécifiques de performance.

- Tous les mortiers montrent une augmentation de la résistance à la compression entre 7 et 28 jours, mais le taux d'augmentation varie. Les mortiers à base de sable concassé ont tendance à avoir une meilleure résistance initiale et une augmentation constante. Le sable d'Oued montre parfois une évolution de la résistance dans le temps plus importante mais non efficace à cause des résistances plus faibles à 7 jours.
- Pour optimiser les résistances à la compression des mortiers, il est recommandé d'utiliser du sable concassé, et ne pas dépasser 10% de substitution en PEHD, car les taux d'incorporation au-delà de 10% ne sont pas avantageux, surtout avec le sable d'Oued.
- Il est important de trouver un équilibre entre la résistance mécanique acceptable et la quantité de PEHD utilisée. Pour des applications où une résistance élevée n'est pas nécessaire, comme certains éléments non porteurs ou isolants, un pourcentage plus élevé de PEHD peut être acceptable.

Chapitre IV :
Amélioration du
comportement physico-
thermique des mortiers
composites par addition
des déchets d'aluminium.

Chapitre IV : Amélioration du comportement physico-thermique des mortiers composites par addition des déchets d'aluminium.

IV.1 Introduction

Pour garantir un confort thermique intérieur adéquat et durable, il est devenu nécessaire de consommer toujours plus d'énergie pour le chauffage ou le refroidissement, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie et une exploitation irrationnelle des ressources (Khadraoui 2019). La réduction de la consommation d'énergie peut être réalisée grâce à l'utilisation appropriée des matériaux de construction offrant une isolation thermique, que ce soit par l'extérieur ou par l'intérieur, sachant qu'un bâtiment isolé thermiquement consomme moins d'énergie qu'un bâtiment non isolé (Khadraoui and Sriti 2018; Paraschiu, Simona, and Serban 2021).

Le choix du matériau isolant est fonction de ses propriétés thermiques, physiques et mécaniques, l'utilisation des bétons ou mortiers légers répond à ces exigences, en particulier s'il s'agit de leurs plusieurs variétés (bétons à granulats légers, béton de mousse, béton cellulaire, ...). L'utilisation d'agents expansifs dans le mélange de béton, comme la poudre d'aluminium réactive, permet de créer des vides dans la matrice cimentaire et d'alléger davantage le béton ; mais cette poudre est coûteuse. Ce chapitre vise à produire des éco-matériaux légers en utilisant une alternative à la poudre d'aluminium qui est le déchet d'aluminium et en valorisant les matériaux issus du recyclage du plastique pour formuler des mortiers légers composites où le sable naturel est partiellement remplacé par du PEHD (10% et 30%), et l'agent expansif par un déchet d'aluminium de 0,5% et 1% du poids du ciment.

IV.2 Evaluation de la maniabilité des mortiers composites

La maniabilité est évaluée par mesure de l'étalement des différents mélanges de mortier composite par rapport à celui du mortier témoin (mortier de référence). Les résultats sont présentés dans la figure IV.1. On observe que l'étalement s'accroît avec l'ajout d'agrégats de PEHD dans le mortier (M1 et M2). Ceci s'explique par la présence d'eau libre qui n'est pas

absorbée par les granulats de PEHD lors du malaxage, et par la forme arrondie et la surface lisse des granulats plastiques. Ces résultats concordent avec ceux de plusieurs études antérieures (Choi et al. 2009; Ghernouti et al. 2009a; Guendouz, Debieb, and Kadri 2015), qui ont attribué l'amélioration de l'ouvrabilité aux propriétés des particules de plastique, dont la surface extérieure est plus lisse que celle du sable et n'absorbe pas d'eau. En revanche, l'ajout des déchets d'aluminium broyés réduit l'ouvrabilité en raison de la réaction entre l'aluminium et l'hydroxyde de calcium, réaction qui nécessite une grande quantité d'eau (équation I.1). En comparant les mélanges M1 et M5, ainsi que M2 et M6, avec une substitution constante de PEHD et l'ajout de 0,5% d'Al, on constate que l'étalement reste similaire. Cela indique que 0,5% d'Al n'a pas d'impact sur la maniabilité du mortier, tandis que 1% la réduit (comparaison de M1 et M3, ainsi que M2 et M4). Cette diminution de l'ouvrabilité a également été confirmée par (Yoon et al. 2020).

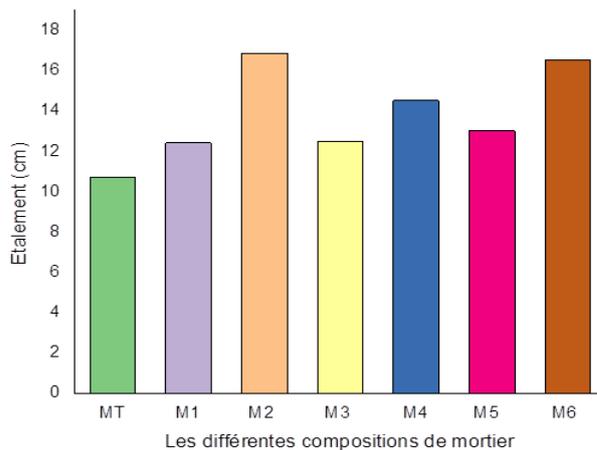


Figure IV. 1 : Variation de l'étalement des différents mortiers composites

IV.3 Evaluation de la densité apparentes et la porosité des mortiers composites

La densité apparente et la porosité des éprouvettes des différents mélanges de mortier sont toutes les deux en fonction de substitution PEHD et de la teneur en poudre d'Al comme le montre la figure IV.2. Les résultats ont révélé que la densité apparente diminuait à mesure que la substitution en PEHD augmentait en raison de la faible densité des granulats plastiques par

rapport à celle des granulats naturels. Dans ce contexte, Hannawi et al. (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010) ont constaté que l'incorporation des granulats plastiques dans le mélange de mortier diminue généralement la densité, ce qui confirme nos résultats. Il est également intéressant de noter qu'une simple comparaison entre la densité du mortier M1 ($2,09 \text{ g/cm}^3$) et celle du M2 ($1,84 \text{ g/cm}^3$) suggère que les agrégats plastiques jouent un rôle fondamental dans l'allègement du mortier comparé avec le mortier témoin ($2,17 \text{ g/cm}^3$).

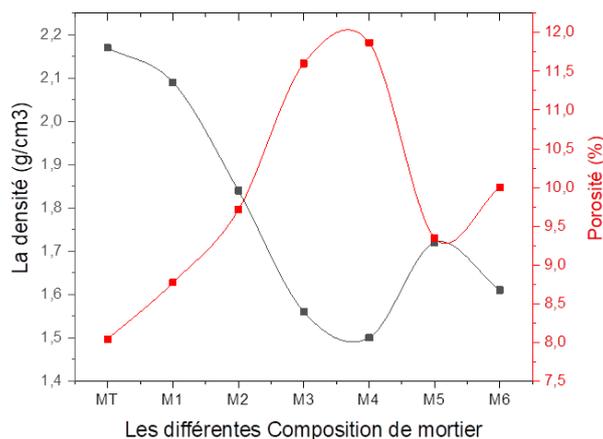


Figure IV. 2: Densité apparente et porosité du mortier en fonction du % PEHD et % Al.



Figure IV. 3: Expansion du mortier contenant la poudre d'Aluminium

La même observation reste valable lors de l'incorporation de poudre d'aluminium qui réduit considérablement la densité des matériaux formulés. Ceci peut certainement être attribué à la proportion des vides créés au sein de la matrice cimentaire suite à la réaction entre la poudre d'aluminium et la portlandite. La figure IV.3, illustre clairement l'expansion des mortiers composites à l'état frais. On peut observer distinctement que la densité est passée de $2,09 \text{ g/cm}^3$ pour M1 (10% de PEHD et 0% d'Al) à $1,72 \text{ g/cm}^3$ pour le mortier composite M5 (10% de PEHD et 0,5% d'Al). Ensuite, cette densité a progressivement diminué lorsque la teneur en

aluminium et la quantité de PEHD ont augmenté pour atteindre un niveau bas d'environ $1,5\text{g/cm}^3$ pour le composite M4 incorporant 30% de PEHD et 1% d'Al. Ces résultats sont similaires aux ceux de Shabbar qui a trouvé que la densité la plus faible a été obtenue avec 1% d'Al, soit 1489 kg/m^3 (Shubbar and Al-Shadeedi 2017b). Le même comportement a été observé pour la porosité qui augmentait quand la teneur en Al augmentait de 0 % à 1 %. Les éprouvettes avec 1% d'Al ont révélé la présence de pores de forme non uniformes et plus longues que ceux observés pour 0,5 % d'Al, ce qui indique la coalescence des pores dans les mélanges à teneur en Al plus élevée. Scheffler et Colombo ont expliqué la coalescence des pores par la forte réactivité de la poudre d'aluminium (Scheffler, M., & Colombo 2005)

Les surfaces de rupture après l'essai de flexion des éprouvettes des différents mélanges M1, M5 et M3, sont prises en photos à l'aide d'un appareil photo à travers un microscope Vidlikovy MPB-2 (figure IV.4). Et elles sont illustrées sur les figures IV.5, IV.6 et IV.7 successives. L'analyse des surfaces montre que le mélange M3 contenant 1% d'Al (figure IV.7), présentait des pores de forme non uniforme (type II), et plus larges que celles observées pour le mélange M5 contenant 0.5% d'Al (figure IV.6). En comparant toutes les deux figures avec la figure IV.5 qui représente M1(10% PEHD et 0% d'Al), on distingue clairement la coalescence (la fusion) des pores du mélange à plus forte teneur en Al, à cause de la haute réactivité de la poudre d'Al (Hajimohammadi et al. 2017; Scheffler, M., & Colombo 2005), une quantité de bulles d'hydrogène formée est plus élevée ce qui donne des pores fusionnés plus stables (Shinohara et al. 2000). La formation d'une plus grande quantité de vides est principalement responsable de la réduction de la densité dans ces éprouvettes (Hajimohammadi et al. 2017).



Figure IV. 4 : Microscope Vidlikovy MPB-2



Figure IV. 5: Mortier composite PEHD sans Aluminium



Figure IV. 6: Mortier composite PEHD avec 0,5% d'Aluminium



Figure IV. 7: Mortier composite PEHD avec 1% d'Aluminium

IV. 4 Evaluation de la résistance à la flexion

Ce paramètre a été mesuré après 7 et 28 jours de durcissement, en milieu humide. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV.8. Il a été constaté que l'incorporation de granulats de PEHD diminue la résistance à la flexion des mortiers composites. Cette diminution a certainement été causée par la porosité accrue apparue dans le mortier suite à l'incorporation de déchets d'aluminium d'un côté et des granulats de PEHD de l'autre côté. De plus, la faible adhérence entre les granulats plastiques et la matrice cimentaire a eu un effet plus important sur la résistance des mortiers composites en raison de la surface lisse du polyéthylène haute densité (PEHD).

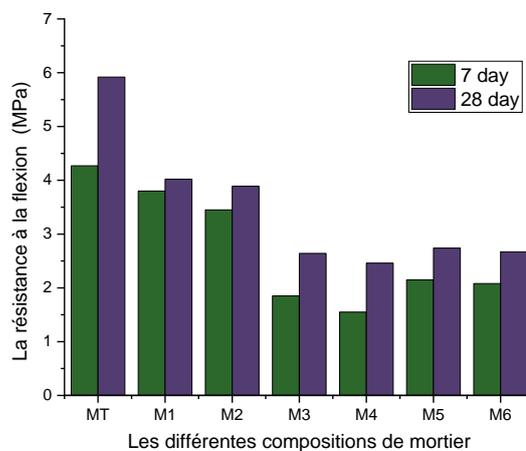


Figure IV. 8: La résistance à la flexion des mortiers composites

IV.5 Evaluation de la résistance à la compression

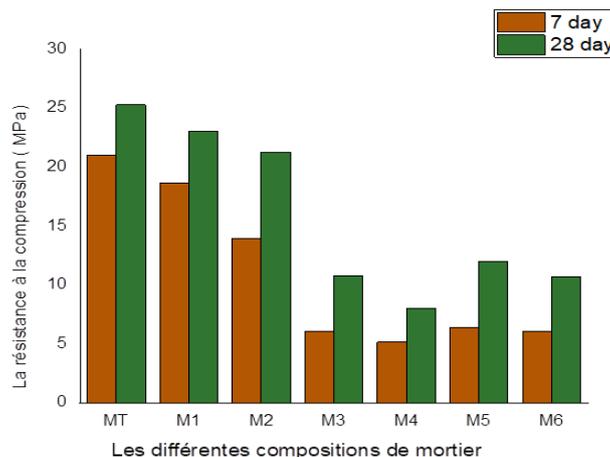


Figure IV. 9: Résistance à la compression des mortiers composites après 7 et 28 jours.

La résistance à la compression des mortiers composites a été évaluée après 7 et 28 jours de durcissement, en milieu humide. La figure IV.9 montre clairement que la résistance à la compression diminue à mesure que la teneur en agrégats plastiques HDPE augmente dans les mortiers composites.

En effet, plusieurs chercheurs (Albano et al. 2009; Badache et al. 2018; Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010; Senhadji et al. 2015; Senthil Kumar and Baskar 2015), ont mentionné cette diminution qui est généralement liée au faible module d'élasticité des granulats plastiques en comparaison à celui des granulats naturels ; au volume d'air important contenu dans ces composites et à la faible adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats en PEHD, comme le montre la figure IV.10 (Haouara et al. 2024).

Il a également été constaté que la nature hydrophobe de ces granulats limitait la réaction d'hydratation du ciment à proximité de la surface du PEHD (Saikia and De Brito 2012). Il est à noter que le taux de réduction a été estimé à 9 % lors de la substitution de 10 % de sable naturel par du PEHD, et à 16 % pour un taux de substitution de 30 % de sable naturel par du PEHD. De plus, il faut aussi dire que l'ajout de déchets d'aluminium affecte la résistance à la compression. En effet, la résistance à la compression a chuté de près de 57 % pour les mortiers composites M3 et M6, et de 68 % pour le M4 (30 % PEHD et 1 % Al) par rapport au mortier témoin (0 % PEHD et 0 % Al).

Les microcellules formées lors de la réaction (Equation I.1) sont responsables de la faible résistance des composites formulés car le transfert de contrainte s'effectue à travers les parois des cellules contrairement à ce qui se passe dans un mortier ordinaire où ce transfert de contrainte s'effectue à travers les granulats.

La figure IV.10 donne une illustration claire de la microstructure du mortier témoin (a) et des deux mortiers composites M5 (b) et M3 (c). On peut voir que le mortier témoin présente une microstructure compacte, avec une forte liaison avec les grains de sable, tandis que les composites M3 et M5 présentent des micropores et des fissures résultant de l'expansion du matériau.

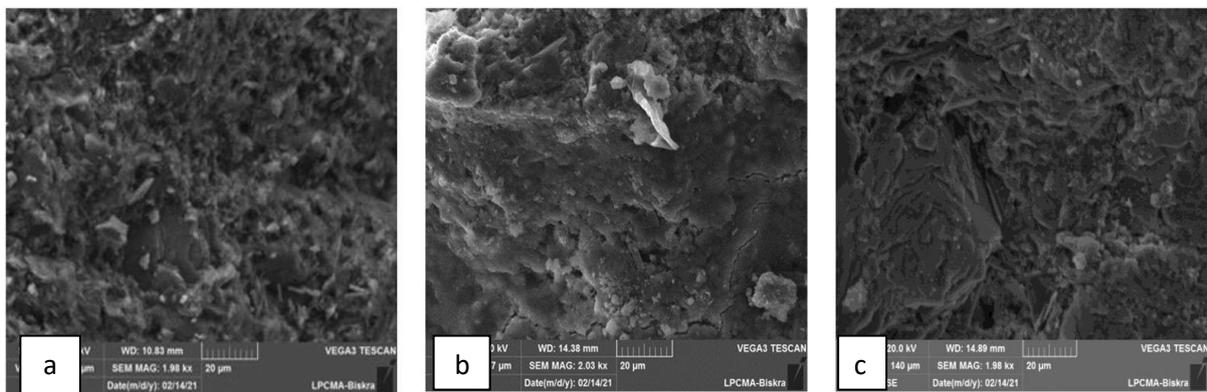


Figure IV. 10: La microstructure du mortier témoin (a) et des deux mortiers composites M5 (b) et M3 (c)

En outre, la zone d'interface entre les agrégats de PEHD et la matrice cimentaire, comme montre la figure IV.11, est de faible qualité, ce qui explique la diminution des résistances à la compression et à la flexion des composites. Cette observation, également rapportée par les auteurs (Badache et al. 2018).

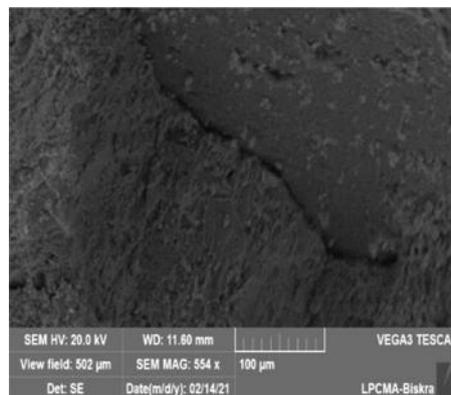


Figure IV. 11: Image SEM de la zone d'interface (PEHD-matrice cimentaire).

IV.6 La conductivité thermique

La conductivité thermique des mortiers composites peut être évaluée à l'aide d'un appareil conçu à cet effet (CT mètre). Les mesures ont été prises à la température ambiante du laboratoire (22°C) où l'humidité était de 55%. Les résultats obtenus sont présentés à la figure IV.12. Il a été observé que la conductivité thermique diminuait à mesure que le taux de remplacement des granulats naturels par du PEHD et l'ajout de déchets d'aluminium augmentaient tous les deux. Cela était certainement dû à la faible conductivité thermique du PEHD comparée à celle des granulats naturels, ainsi qu'à leur faible densité. De plus, la porosité élevée causée par l'expansion des mortiers composites a contribué à la baisse de la conductivité thermique.

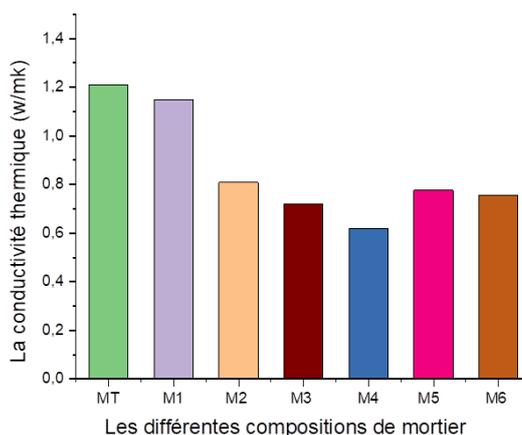


Figure IV. 12: La conductivité thermique des différentes compositions de mortiers.

Il a également été constaté que la conductivité thermique avait chuté d'environ 40 % pour le mortier composite M3, de 48 % pour le mortier composite M4 et de 35 % pour les mortiers composites M5 et M6. Les résultats obtenus concordent bien avec ceux rapportés par d'autres chercheurs (Y. Liu, Leong, and Yang 2016; Záleská et al. 2018). Les auteurs (Badache et al. 2018) ont rapporté que le remplacement des granulats fins par 15, 30, 45 et 60 % de PEHD réduisait la conductivité de 10, 20, 31 et 41 %, respectivement.

IV.7 Conclusion

L'objectif principal de cette partie d'étude expérimentale était de valoriser les déchets plastiques en polyéthylène haute densité (PEHD) et les déchets d'aluminium pour fabriquer des mortiers composites légers (MCL) destinés à l'isolation thermique. Ce travail expérimental a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'ouvrabilité augmente lorsque le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats PEHD granulés par fusion augmente, alors qu'il diminue avec l'ajout de déchets d'aluminium (agent expansif).
- La densité diminue lorsque le taux de substitution des granulats naturels par du PEHD augmente. Elle diminue encore davantage en présence de déchets d'aluminium.
- L'incorporation de granulats de PEHD et de déchets d'aluminium dans les mortiers composites influe de manière significative sur leur porosité et, par conséquent, sur leur densité.
- Les déchets d'aluminium sont très réactifs en présence de portlandite. Les déchets d'aluminium peuvent être utilisés pour la fabrication de béton cellulaire à la place de la poudre d'aluminium qui est plus coûteuse.
- Les résistances mécaniques à la compression et à la flexion sont influencées par la faible adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats en PEHD et la forte porosité des composites préparés. De plus, la microstructure des mortiers composites fabriqués présente des micropores et des fissures, et la zone d'interface entre les granulats en PEHD et la matrice cimentaire est de mauvaise qualité.
- La conductivité thermique diminue considérablement lorsque les granulats naturels sont remplacés par des granulats de déchets plastiques en PEHD avec ajout de déchets d'aluminium. Les résultats indiquent que la conductivité diminue de 48% par rapport à celle du mortier témoin.

**Chapitre V : Etude de
l'impact du mode
d'incorporation des PEHD
déchiquetés (addition /
substitution) sur les
performances mécaniques et
la durabilité des mortiers
composites**

Chapitre V : Etude de l'impact du mode d'incorporation des PEHD déchiquetés (addition / substitution) sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers composites

V.1 Introduction

Dans le contexte actuel de gestion durable des déchets et de recherche d'alternatives écologiques dans le secteur de la construction, l'utilisation des déchets plastiques, notamment des sacs en polyéthylène haute densité (PEHD), présente un intérêt croissant. Ces matériaux, souvent destinés à être mis en décharge ou incinérés, peuvent être valorisés de manière innovante sans apport énergétique supplémentaire, offrant ainsi une solution économique et écologique.

Ce chapitre examine l'intégration directe des quantités en masse de sacs en PEHD déchiquetés dans le mortier, sans aucune modification préalable sauf déchiquetage, en adoptant deux approches d'incorporation : la même quantité de sacs PEHD déchiquetés intégrée dans le mortier sous forme de substitution partielle des granulats (MR) et également ajoutée dans le mortier en tant que renfort (MJ). Une comparaison est réalisée entre les performances des différents mortiers composites, à savoir les mélanges par substitution (MR1, MR2, MR3 et MR4) et ceux par addition (MJ1, MJ2, MJ3 et MJ4). Le tableau V.1, rappelle les désignations des différentes compositions des mortiers composites étudiés dans ce chapitre.

Les résultats obtenus portent sur l'évaluation des propriétés physico-mécaniques et thermiques de ces matériaux composites, ainsi que sur leur résistance face à des environnements agressifs (la durabilité).

En intégrant les sacs PEHD déchiquetés dans le mortier, cette approche vise à réduire l'impact environnemental des déchets plastiques tout en améliorant les performances des matériaux de construction. Les investigations présentées dans ce chapitre permettront de mieux comprendre les potentialités et les limitations de cette méthode de valorisation, ouvrant la voie à de nouvelles applications dans le domaine du bâtiment.

Tableau V. 1: Les différents mélanges de mortier étudiés

Mortier	Témoin	Mortiers avec ajout (addition)				Mortier avec substitution			
	MT	MJ1	MJ2	MJ3	MJ4	MR1	MR2	MR3	MR4
% PEHD déchiqueté	0	1	2	3	4	1,5	3	4,45	6

V.2 Evaluation des propriétés physiques

V.2.1 Etude de la maniabilité du mortier composite

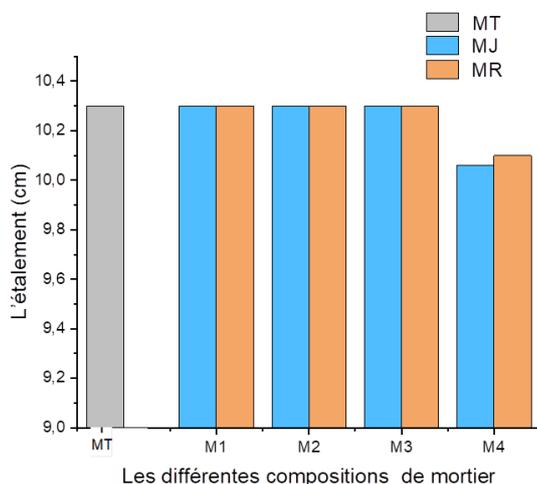


Figure V. 1: Evaluation de la maniabilité des mortiers selon le mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté



Figure V. 2: Mortier ferme dû à la présence des déchets des sacs PEHD déchiquetés

A partir de la figure V.1, on constate :

1. **Pour le cas des mortiers avec ajouts des sacs PEHD déchiquetés :** Les mélanges MJ1, MJ2 et MJ3, montrent des étalements similaires à celui du mortier témoin, À 4 % d'ajout de PEHD (MJ4), l'étalement diminue de 2,3% par rapport au mortier témoin. Ce qui peut indiquer que la structure interne du mortier commence à être affectée, réduisant ainsi sa maniabilité. Cette réduction est principalement due à la forme irrégulière (Ismail and AL-Hashmi 2008) et la forme feuilletée des particules plastiques (Saikia and De Brito 2014). Donc l'ajout des particules de PEHD déchiqueté en faibles quantités n'affecte pas la maniabilité du mortier, mais au-delà de 3% du volume total une légère diminution de l'étalement est distinguée (Hung et al. 2022; Tsai et al. 2022).

2. Pour le cas des mortiers avec substitutions en sacs PEHD déchiquetés : Pour les mêmes quantités des PEHD déchiquetés mais en substitution du sable, un phénomène similaire peut être observé, mais expliqué autrement en raison des propriétés distinctes des plastiques par rapport au sable naturel remplacé. À de faibles proportions des particules PEHD remplacent partiellement le sable sans perturber la granulométrie et la consistance globale des mélanges (MR1, MR2 et MR3). Comme le plastique est plus léger que le sable et n'absorbe pas d'eau, l'eau disponible dans le mortier reste suffisante pour maintenir une ouvrabilité comparable à celle du mortier témoin. Ainsi, l'étalement peut rester constant pour ces faibles quantités. Pour MR4, l'étalement diminue légèrement à cause de :

- Réduction de la densité du mélange : Les particules de PEHD déchiqueté ont une densité beaucoup plus faible que le sable. Leur incorporation réduit la densité globale du mortier, ce qui peut modifier ses propriétés de cohésion et la manière dont les particules interagissent entre elles.

- Hydrophobicité : les particules PEHD ne participent pas à l'absorption de l'eau, ce qui affecte la répartition de l'eau libre en raison de la disposition aléatoire des particules PEHD, ce qui influe négativement l'étalement (Kou et al. 2009; Wang and Meyer 2012).

Donc la substitution partielle de sable en particules de PEHD déchiqueté en faibles quantités n'affecte pas la maniabilité du mortier, mais au-delà de 4,5% (MR3), une diminution de l'étalement est distinguée (Bhogayata and Arora 2017; Wang and Meyer 2012)

3. Comparaison entre les additions (MJ) et les substitutions (MR)

- Les particules plastiques ajoutées (addition) en petites quantités, qui sont non réactifs et non absorbants, n'ont pas d'impact significatif sur la consistance du mortier (A. I. Al-Hadithi, Abdulrahman, and Al-Rawi 2020). Ils permettent aux particules de sable de glisser entre elles, gardant une fluidité et un étalement comparables à ceux du mortier témoin. Une quantité accrue d'addition (plus de 3%) de PEHD hydrophobes perturbe la répartition de l'eau libre, modifie les circuits d'écoulement de l'eau libre et réduit la mobilité du mélange. Ce qui entraîne une diminution de l'étalement

- Les deux modes d'incorporation des déchets des sacs PEHD (ajout et substitution) semblent n'avoir aucun impact sur l'étalement des mortiers comparé au mortier témoin à cause des faibles quantités de PEHD déchiqueté (Kou et al. 2009; Wang and Meyer 2012). Cependant, les diminutions observées dans MJ4 et MR4, à cause de la forme feuilleté des particules

PEHD déchiquetés (Saikia and De Brito 2014) ainsi que la forme non rondes et irrégulières (Wang and Meyer 2012), et nos résultats suggèrent que la substitution du sable pourrait avoir un effet légèrement plus marqué sur la réduction de l'étalement que l'ajout de la même quantité des granulats de déchet des sacs PEHD déchiquetés.

V.2.2 Etude de la masse volumique apparente des mortiers composites

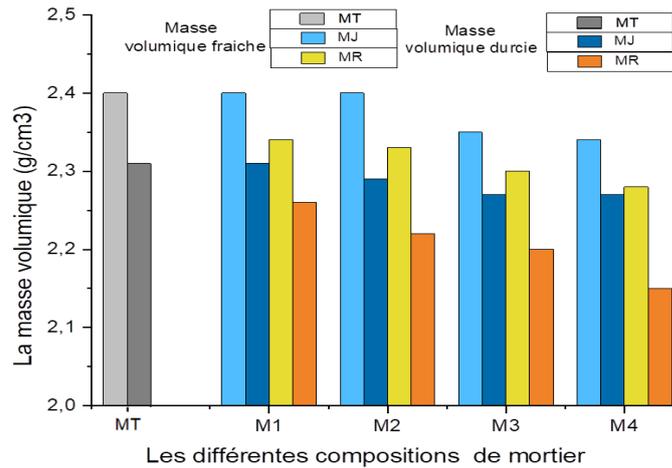


Figure V. 3: L'effet du mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté sur la masse volumique apparente des différents mortiers

Le mortier de référence (MT), présente les valeurs les plus élevées de la masse volumique apparente durcie ($2,31\text{g/cm}^3$) ou fraîche ($2,4\text{ g/cm}^3$), il sert de référence pour évaluer l'effet des ajouts et substitutions des déchets de sacs PEHD déchiquetés.

1. L'effet de l'ajout de déchets des sacs PEHD déchiquetés sur la masse volumique apparente du mortier

• A l'état frais : La masse volumique reste semblable à semblable à celle du MT, pour les deux premières compositions MJ1 et MJ2. Puis une diminution à partir de MJ3 et MJ4 (2,08 % et 2,50 % par ordre). Donc l'effet des additions modérés (1% et 2%) de particules PEHD déchiqueté sur la densité à l'état frais est négligeable, puis une légère diminution lorsqu'ils sont ajoutées en pourcentages plus élevés (3% et 4%). Cette diminution de densité pourrait également indiquer une modification de la compacité du mortier due aux vides créés résultants de la mauvaise adhérence entre les particules PEHD déchiquetés et la matrice cimentaire.

• A l'état durci : On observe une diminution progressive de la masse volumique durcie à mesure que le taux d'ajout augmente. De $2,29 \text{ g/cm}^3$ de (MJ1) à $2,19 \text{ g/cm}^3$ de (MJ4), il y a une réduction d'environ 5,2% par rapport au mortier témoin. Cette baisse est due à la nature légère des sacs PEHD qui réduit la densité globale du mélange (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010).

2. L'effet de la substitution en déchets des sacs PEHD déchiquetés sur la masse volumiques apparente du mortier

- A l'état frais : Les substitutions de sable par des granulats PEHD déchiquetés conduisent à une diminution plus marquée de la masse volumique fraîche que pour des ajouts (MJ), avec des réductions allant jusqu'à 5,00 % pour MR4 (Mehta and Monteiro 2001). Cela s'explique par le fait que les particules PEHD déchiquetés ont une densité beaucoup plus faible que celle du sable, affectant directement la masse volumique globale du mélange. Les diminutions progressives observées avec les taux de remplacement croissants (de MR1 à MR4) révèlent que plus le sable est remplacé par des granulats PEHD déchiquetés, plus l'effet sur la masse volumique à l'état frais est accentué.

- A l'état durci : La même tendance de diminution est observée, avec des valeurs allant de $2,26 \text{ g/cm}^3$ (MR1) à $2,15 \text{ g/cm}^3$ (MR4). Comparé au mortier témoin, la diminution est d'environ 6,9% dans le cas de MR4. La substitution du sable par les sacs PEHD déchiquetés semble avoir un impact légèrement plus prononcé que l'ajout, ce qui pourrait s'expliquer par la différence de masse volumique absolue entre le sable et le PEHD.

3. Comparaison entre les additions (MJ) et les substitutions (MR) : Les mortiers MJ (addition de PEHD) ont un faible effet sur la densité à l'état frais que durci en raison que les particules plastiques ajoutées représentent un pourcentage faible de la matrice totale (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010). Cependant, la substitution du sable par les granulats PEHD présente une réduction plus marquée de la masse volumique (fraîche et durcie) des mortiers MR par rapport aux MJ, ce qui signifie que le remplacement partiel du sable par les granulats plastiques accentue la diminution de la densité. Ces résultats sont cohérents avec ceux de nombreuses recherches, telles que (Badache et al. 2018; Saikia and De Brito 2012). A mesure que le PEHD augmente dans le mélange, la densité apparente du mortier à l'état frais et durci diminue (Rai et al. 2012; Shubbar and Al-Shadeedi 2017a).

V.2.4 Etude de la porosité

Selon la figure V.4, le mortier témoin (MT) présente une porosité maximale de 18,83%. L'analyse des valeurs de porosité des différents mortiers révèle plusieurs tendances intéressantes. L'incorporation de particules PEHD déchiqueté dans les mortiers influence de manière significative leur porosité.

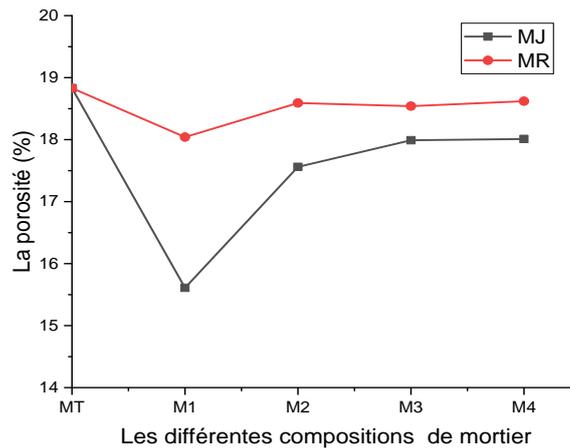


Figure V. 4: Evaluation de la porosité des mortiers composites

1. **Pour les mortiers avec ajout (MJ)** : la porosité est inférieure à celle du MT (MT), elle varie de 15,61% (MJ1) à 18,01% (MJ4). Celle de (MJ1) suggère une amélioration de la compacité du mélange grâce à l'effet de remplissage des particules PEHD, ces particules aient comblé une partie des micropores, réduisant ainsi la porosité globale. Et une meilleure dispersion des particules PEHD dans la matrice cimentaire peut avoir contribué à une structure plus compacte. Toutefois, à des pourcentages plus élevés (MJ2 à MJ4), la porosité tend à se rapprocher de celle du mortier témoin. Donc un faible pourcentage (1%) améliore la compacité grâce à l'effet de remplissage, des proportions plus élevées (2% à 4%) semblent limiter cet avantage, en raison d'une mauvaise adhérence entre les particules PEHD et la pâte de ciment, entraînant une distribution moins homogène et une augmentation des vides interstitiels. L'ajout de déchets PEHD déchiquetés peut influencer la répartition des vides dans le mortier.

2. **Pour les mortiers avec substitution du sable par du PEHD (MR)** : la porosité varie entre 18,04 % (MR1) et 18,62 % (MR4). Contrairement aux mortiers MJ, cette substitution entraîne une porosité légèrement inférieure à celle du mortier témoin, avec une augmentation

progressive lorsque le taux de substitution augmente. Cette tendance pourrait s'expliquer par une différence de granulométrie (Albano et al. 2009) et par la faible adhérence des particules PEHD déchiquetées avec la pâte cimentaire, favorisant la création de vides. Bien que le remplacement progressif du sable par du PEHD entraîne une diminution de la porosité, une légère augmentation est observée au-delà de 3% de substitution (MR2), probablement due à une perturbation de la disposition des particules et une altération de la compacité du mélange.

Globalement, nos résultats sont en accord avec ceux de (Safi et al. 2013). La porosité des mortiers contenant du PEHD reste inférieure à celle du témoin, ce qui peut être attribué à plusieurs facteurs : l'effet de remplissage des particules de PEHD dans la matrice cimentaire, l'amélioration de la compacité due à une meilleure répartition des granulats, la réduction de la rétention d'eau grâce à la nature hydrophobe du PEHD, et la modification de la structure des pores, qui limite la formation de réseaux interconnectés. Enfin, étant donné que le sable est plus poreux que le PEHD, son remplacement par ce matériau non poreux et hydrophobe modifie la structure interne du mortier, réduisant sa capacité d'absorption d'eau et influençant potentiellement sa durabilité mêmes remarques que (Albano et al. 2009).

V.3 Evaluation des propriétés mécaniques

V.3.1 La résistance à la compression

Afin de présenter clairement l'effet du mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté sur la résistance à la compression du mortier composite, on a présenté les résultats par des histogrammes et des courbes (voir la figure V.5).

1. Pour les mortiers avec ajout de PEHD déchiqueté (MJ) :

- À 7 jours : MJ1, et MJ2 montrent des résistances très proches de MT, indiquant que de faibles ajouts de PEHD ne modifient pas significativement la résistance initiale. MJ3 présente une légère diminution (0,47%). Cependant MJ4 affiche une réduction significative (33,2%), ce qui suggère qu'un taux d'ajout de 4 % compromet la cohésion du mortier à court terme. Cela est dû à la faible adhérence entre pâte de ciment et les particules de PEHD, réduisant la compacité et la transmission des contraintes (Jain et al. 2019).

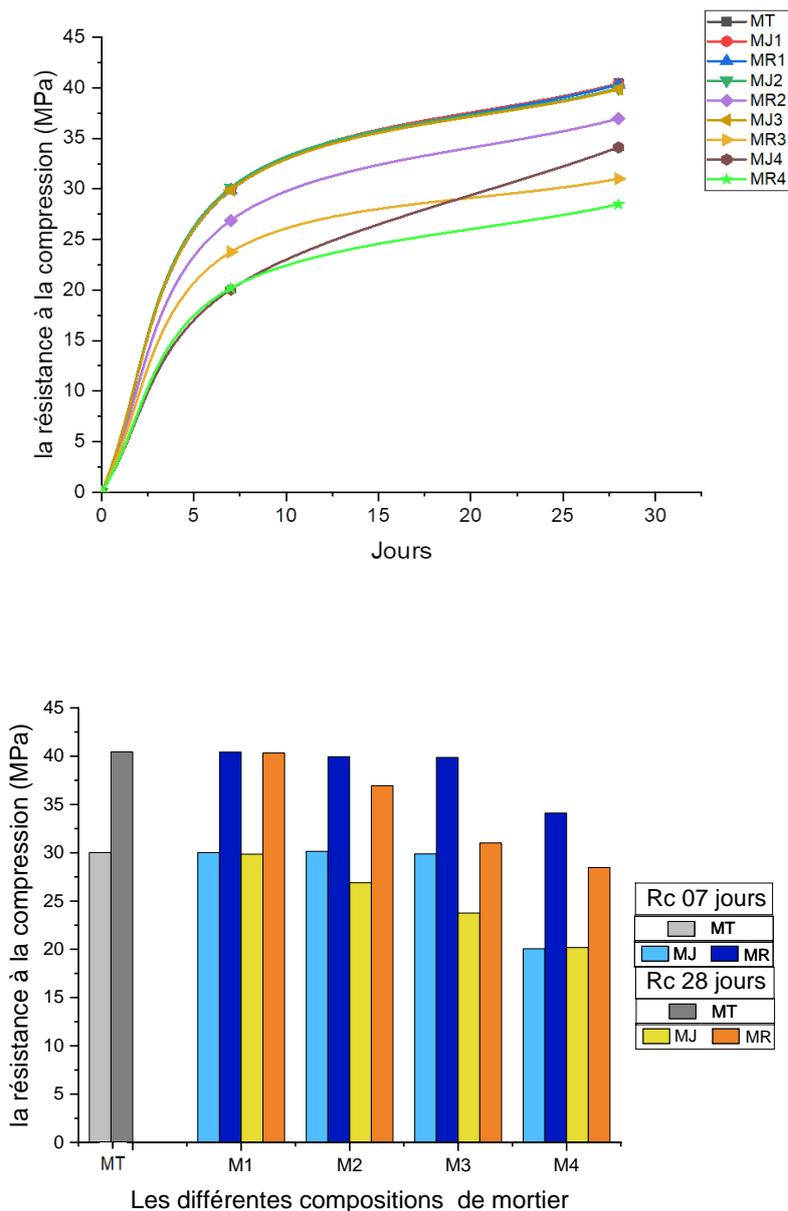


Figure V. 5: L'effet du mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté sur la résistance à la compression du mortier composite

- À 28 jours : de faibles réductions marquées par les trois premiers dosages MJ1 (0,05%), MJ2 (1,21%) et MJ3 (1,41%) et les résistances à la compression restent proches à celle du mortier témoin, confirmant que jusqu'à 3 % d'ajout de PEHD, la diminution de résistance est négligeable, en raison de faibles pourcentages d'ajout. En revanche, MJ4 affiche une diminution de (15,7%), indiquant qu'un ajout trop élevé nuit la résistance du mortier composite durci (Hung et al. 2022; Tsai et al. 2022).

2. Mortiers avec substitution du sable par PEHD déchiqueté (MR)

- À 7 jours : MR1 marque une résistance pratiquement équivalente à MT, suggérant un impact faible sur la résistance initiale, à cause d'une faible substitution du sable par du PEHD déchiqueté qui ne modifie pas significativement la résistance à court terme. MR2, MR3 et MR4, affichent des baisses progressives (10,4%, 20,8% et 32,8%), montrant que la résistance à la compression diminue avec le taux de substitution (Albano et al. 2009). Cette baisse peut être expliquée par : La réduction de la cohésion entre les grains de ciment et le PEHD, qui est un matériau hydrophobe et n'interagit pas favorablement avec la matrice cimentaire. Et le faible module d'élasticité des GP par rapport à celui du sable naturel (Ibrahim. Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, Mohamed, et al. 2020).
- À 28 jours : MR1 donne une résistance proche à celle du MT. MR2, avec une diminution de 8,63% peut être considéré comme acceptable, confirmant qu'un faible taux de substitution ($\leq 3\%$) reste compatible avec la cohésion et la performance du mortier. Cette faible diminution est forcément due à l'eau libre supplémentaire issue de la nature non absorbante des particules plastiques qui remplacent le sable. Cette eau est consommée par l'hydratation du ciment qui compense en partie l'impact du PEHD, mais MR3 et MR4 marquent des réductions importantes de résistance (23,3% et 29,6%). Cela confirme que la substitution du sable par des PEHD déchiquetés réduit progressivement la résistance à la compression du mortier composite durci (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010; O. Yazoghli Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2007).

3. Comparaison entre les additions (MJ) et les substitutions (MR) : L'ajout de PEHD jusqu'à 3 % a un faible impact sur la résistance à la compression. Au-delà de 4%, une baisse remarquable de la résistance à la compression indiquant que ce seuil est trop élevé pour l'addition des déchets des sacs PEHD déchiquetés dans le mortier pour une utilisation optimisée, ces résultats sont en accord avec ceux de (Hung et al. 2022; Tsai et al. 2022). Tandis que la substitution du sable par des PEHD déchiquetés réduit progressivement la résistance à la compression du mortier composite durci (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010). Et le pourcentage de substitution doit être limité pour garantir une bonne performance mécanique du mortier : une faible substitution ($\leq 3\%$) pour préserver la résistance à la compression, sans dépasser un taux de substitution élevé ($>3\%$) afin d'éviter une baisse significative de la résistance, compromettant l'efficacité du mortier.

V.3.2 La résistance à la flexion

Le mortier témoin (MT) affiche une résistance à la flexion de 6,23 MPa à 7 jours et 8,15 MPa à 28 jours, servant de référence pour comparer les résistances à la flexion des mortiers composites étudiés afin d'analyser l'effet des ajouts et substitutions de déchets des sacs PEHD déchiquetés. Selon la figure V.6, on remarque que :

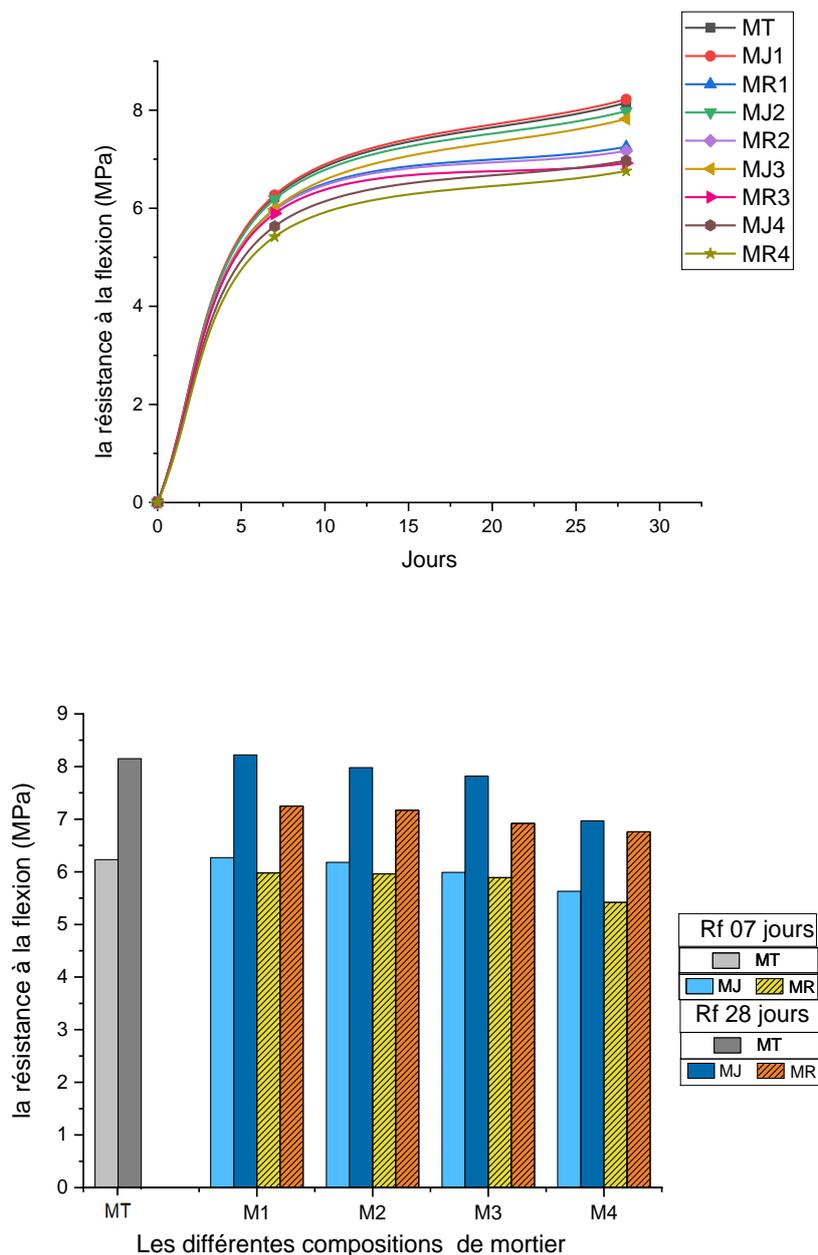


Figure V. 6: L'effet du mode de l'incorporation des PEHD déchiqueté sur la résistance à la flexion du mortier composite

1. Pour les mortiers avec ajout de PEHD déchiqueté (MJ) :

- À 7 jours : MJ1 et MJ2 affichent des valeurs proches de MT (6,27 et 6,18 MPa par ordre), suggérant que de faibles ajouts de PEHD déchiqueté ($\leq 2\%$) n'affectent pas vraiment la résistance à la flexion par rapport au mortier témoin. MJ3 commence à présenter une diminution plus marquée (5,99 MPa), tandis que MJ4 affiche la plus forte diminution (5,63 MPa), indiquant qu'un ajout excessif de PEHD ($>3\%$), compromet la cohésion du mortier et donc sa résistance à la flexion.

- À 28 jours : MJ1 et MJ2 conservent des résistances à la flexion proches de celle de MT (8,22 et 7,98 MPa par ordre), ce qui suggère que jusqu'à 2 % de PEHD, la résistance à la flexion reste acceptable. MJ3 et MJ4 présentent des baisses de résistance (7,82 et 6,97 MPa), confirmant qu'un ajout excessif compromet la résistance, probablement à cause d'une perte d'adhérence. Nos résultats sont en accord avec d'autres études telles que (Hung et al. 2022; Tsai et al. 2022).

2. Pour les mortiers avec substitution du sable par PEHD déchiqueté (MR):

- À 7 jours : MR1 et MR2 montrent une légère baisse (5,98 et 5,96 MPa successives), relativement proche du mortier témoin. MR3 et MR4 enregistrent des réductions plus importantes (5,89 et 5,42 MPa), confirmant que la substitution du sable par du PEHD réduit progressivement la résistance à la flexion (Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010).

- À 28 jours : MR1 et MR2 montrent des résistances inférieures à MT (7,25 et 7,17 MPa) mais restent relativement acceptables. MR3 et MR4 affichent des baisses notables (6,92 et 6,76 MPa), mettant en évidence l'effet négatif d'une substitution excessive sur la rigidité et la cohésion du mortier (Akçaözöğlü, Atiş, and Akçaözöğlü 2010).

3. Comparaison entre les additions (MJ) et les substitutions (MR) : Une faible teneur en addition de PEHD ($\leq 2\%$) ne modifie pas significativement la résistance à la flexion à court et à long terme. Toutefois, au-delà de cette teneur, la ductilité accrue et la perte d'adhérence entre les particules PEHD et la matrice cimentaire entraînent une diminution progressive de la résistance à la flexion.

Remplacer le sable par du PEHD réduit la résistance à la flexion, surtout au-delà de 4,45% (MR3 et MR4), en raison du faible module d'élasticité des particules PEHD qui remplacent le sable et de la diminution de l'adhérence entre les particules PEHD et la matrice cimentaire.

V.3.3 Caractéristiques de la rupture des mortiers composites PEHD

Après l'essai de la résistance à la flexion, les éprouvettes de mortiers composites restent intactes malgré que l'affichage de la valeur de résistance sur l'appareil, et les deux morceaux de l'éprouvette restent attachés malgré l'apparition des fissures (figure V.7).



Figure V. 7: L'état de rupture du mortier contenant des substitutions en sacs PEHD déchiqueté



Figure V.8 : Les particules PEHD déchiqueté détachés de la pâte de ciment

Après séparation des deux morceaux de l'éprouvettes par les deux mains, on remarques que les particules PEHD déchiqueté dans la matrice du mortier composite demeurent intacts, et se détachent de la pâte de ciment (figure V.8) après avoir atteint la contrainte de rupture (Senhadji et al. 2015). Les agrégats de PEHD agissent comme des ponts entre les fragments séparés (Batayneh, Marie, and Asi 2007; Saikia and De Brito 2013) qui présentent une ductilité qui prolonge la durée de résistance de l'éprouvette avant la rupture (Azhdarpour, Nikoudel, and Taheri 2016).

Le mortier de référence n'a pas de ductilité post-fissuration efficace, cependant les particules plastiques agissent comme un pare-fissures et modifient la matrice de mortier intrinsèquement fragile en un matériau ductile et résistant aux fissures. Par conséquent, lors de la rupture du mortier, les fissures simples courantes peuvent être remplacées par des microfissures denses en raison de la présence des particules PEHD c'est la même remarque signalée par (Yin et al. 2015), surtout dans le cas des mortiers avec additions (ajouts). Les mortiers composites avec substitution en PEHD déchiquetés montrent une ductilité significative lorsque la substitution de sable en (PEHD) augmente, car le mortier devient plus élastique et moins rigide (Badache et al. 2018), la défaillance devient plus ductile, permettant aux éprouvettes de supporter une charge pendant plusieurs minutes après une défaillance mécanique (Frigione 2010; Hannawi, Kamali-Bernard, and Prince 2010). Les éprouvettes ont un comportement plus ductile lorsque

la quantité d'agrégats plastiques augmente (Al-Tayeb et al. 2012; Badache et al. 2018; Senhadji et al. 2015)

V.3.4 La vitesse de propagation des impulsions ultrasonores

L'analyse des résultats présentés par la figure V.9, met en évidence l'impact de l'incorporation des granulats issus du déchet des sacs PEHD déchiquetés sur la vitesse de l'impulsion ultrasonique (VPU) des différents mortiers. La valeur la plus élevée (4200 m/s) sert de référence (du MT) pour comparer les effets des ajouts et substitutions.

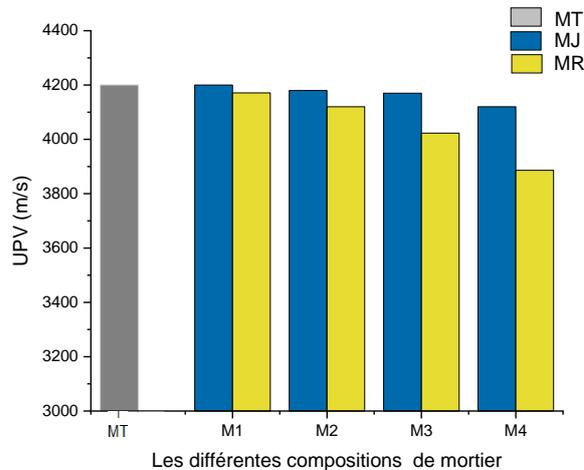


Figure V. 9: Evaluation de VPU des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés

1. Pour les mortiers avec ajout de déchet des sacs PEHD déchiqueté (MJ) : La VPU diminue légèrement avec l'augmentation de la quantité de granulats PEHD, passant de 4200 m/s (MJ1) à 4120 m/s (MJ4). Cette baisse peut être attribuée à la nature des granulats plastiques qui ont une densité plus faible et une adhérence moindre avec la matrice cimentaire par rapport aux granulats naturels, influençant ainsi la compacité et la propagation des ondes ultrasoniques.

2. Pour les mortiers avec substitution en déchet des sacs PEHD déchiqueté (MR) : Une réduction plus marquée est observée, avec une VPU passant de 4171 m/s (MR1) à 3886 m/s (MR4). L'effet est plus prononcé que pour les mortiers MJ, ce qui suggère que la substitution partielle du sable par les granulats plastiques affecte davantage la cohésion et la densité du mortier que l'addition de déchet des sacs PEHD déchiqueté dans le mortier. La diminution

importante de la VPU dans MR4 (3886 m/s) indique une capacité réduite à transmettre les ondes ultrasoniques, ce qui paraît contradictoire avec la porosité accessible à l'eau pour MR4 (18,62%) qui est inférieure à celle du MT (18,83%). (Akçaözoğlu, Akçaözoğlu, and Atiş 2013) a confirmé que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un matériau dépend de sa porosité. Cependant, d'autres facteurs influencent la propagation des ondes ultrasoniques dans les mortiers composites comme :

- L'incorporation des granulats PEHD entraîne une réduction de la rigidité du réseau matriciel du mortier, ce qui est confirmé par le E_d minimal.
- Les granulats plastiques ont une densité et un module d'élasticité plus faible que le sable naturel, ce remplacement affecte la capacité du mortier à transmettre les ondes ultrasoniques, car les matériaux plus souples dissipent davantage l'énergie des ondes.
- L'ajout de PEHD modifie l'homogénéité de la matrice cimentaire en créant des interfaces entre le ciment et les granulats PEHD. Ces interfaces peuvent agir comme des zones de dissipation ou de réflexion des ondes ultrasoniques, réduisant ainsi leur vitesse de propagation.
- Distribution et nature des pores : L'essai de porosité accessible à l'eau mesure principalement les pores interconnectés et leur capacité à absorber de l'eau. Toutefois, des pores fermés ou des micro-défauts internes pourraient être présents dans les mortiers composites, influençant la propagation des ondes sans pour autant affecter significativement l'absorption d'eau.

Donc, on conclue que : La diminution de (UPV) dans les mortiers composites, malgré qu'ils présentent des porosités inférieures à celle du mortier témoin, semble être due à une modification des propriétés du matériau, notamment son homogénéité et son module d'élasticité. L'ajout de granulats plastiques perturbe la transmission des ondes ultrasoniques sans accroître la porosité du mortier. Lors du passage de l'onde à travers les différents constituants (mortier, PEHD, pores) voir figure V.10, une partie est réfléchié tandis qu'une autre est transmise, entraînant ainsi une baisse de sa vitesse. Cependant, conformément à la norme (IS 13311 (Part 2) 1992) (Badache et al. 2018), il est généralement admis que les mortiers composites (MJ et MR) présentent une bonne homogénéité. Cette caractéristique résulte de la distribution efficace des déchets plastiques au sein de la matrice cimentaire (Safi et al. 2013).



Figure V. 10: Surface de rupture de MR4

V.3.5 Modules d'élasticité dynamique

L'analyse des résultats du module d'élasticité dynamique (E_d) des mortiers MJ et MR en comparaison avec le mortier témoin (MT) met en évidence l'effet des déchets de sacs PEHD déchiquetés sur les propriétés mécaniques des mortiers. Le module d'élasticité dynamique le plus élevé (41,53 GPa), est celui du mortier témoin MT, ce qui est attendu puisqu'il ne contient pas de particules plastiques.

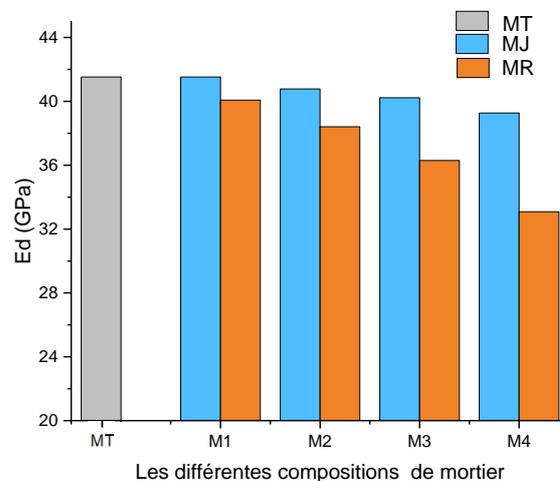


Figure V. 11: Evaluation du module d'élasticité dynamique des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés

1. Pour les mortiers MJ (ajout de déchets PEHD) : on remarque que MJ1 a la même valeur de E_d que MT, ce qui suggère que le faible taux de PEHD n'affecte pas la rigidité initiale du mortier. À mesure que le taux de déchets PEHD augmente (MJ2, MJ3 et MJ4), Le module d'élasticité dynamique (E_d) diminue progressivement jusqu'à 39,27 GPa pour MJ4. Cela

montre que l'ajout des particules plastiques réduit la rigidité du mortier. Ces résultats sont en bon accord avec ceux rapportés avec (O. Yazoghli Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2007).

2. Pour les mortiers MR (substitution du sable par PEHD) : Le remplacement du sable par PEHD affecte davantage la rigidité du mortier. La valeur de E_d chute, passant de 40,08 GPa (MR1) à 33,09 GPa (MR4). Cette baisse plus marquée que dans le cas des mortiers MJ, ce qui confirme que le remplacement du sable par des particules plastiques modifie significativement la structure interne du mortier, nos résultats sont en accord avec ceux de (O. Yazoghli Marzouk, Dheilily, and Queneudec 2007), qui confirme que la baisse des masses volumiques apparentes des mortiers à cause de la présence d'agrégats plastiques qui font baisser la vitesse de propagation des ondes et par conséquent baisser le module E_d .

3. Comparaison entre les additions (MJ) et les substitutions (MR) : La réduction du module d'élasticité dynamique dans les mortiers composites (MJ4, MR2, MR3 et MR4) suite à la diminution de la densité (Ganjian, Khorami, and Maghsoudi 2009; Onuaguluchi and Panesar 2014). Cette réduction du module d'élasticité indique une flexibilité plus élevée des mortiers ce qui peut être considéré comme positif pour ces mortiers. D'autres raisons possibles de la réduction du module d'élasticité peuvent être soit les défauts internes, tels qu'une faible adhérence entre le PEHD et la matrice cimentaire, soit des fissures autour des particules de PEHD, en raison de la différence entre le module d'élasticité des particules de PEHD et celui de la pâte de ciment (Albano et al. 2009; Badache et al. 2018; Benosman et al. 2017; Rahmani et al. 2013). De plus, la réduction de (E_d) est due au faible module d'élasticité des particules de PEHD (Belmokaddem et al. 2020; Benosman et al. 2017; Rahmani et al. 2013). Cette réduction est linéairement liée à l'augmentation de la quantité des particules PEHD.

Donc on peut conclure que : l'ajout de PEHD (MJ) altère légèrement la rigidité du mortier, mais son effet reste modéré. Le remplacement du sable par PEHD (MR) entraîne une diminution plus importante du module d'élasticité dynamique, traduisant une perte de rigidité plus notable. Cette baisse peut être attribuée à l'augmentation de la porosité (par rapport au mortier ayant le dosage min en PEHD) et à la réduction de la transmission des ondes ultrasonores, dues à la présence de particules plastiques ayant une impédance acoustique différente du ciment et du sable. Les mortiers contenant des déchets de sacs PEHD deviennent plus souples et moins rigides à mesure que la quantité de plastique augmente. Le remplacement du sable par PEHD accentue cet effet, suggérant une altération plus significative des propriétés mécaniques du mortier.

V.4 Evaluation de la conductivité thermique

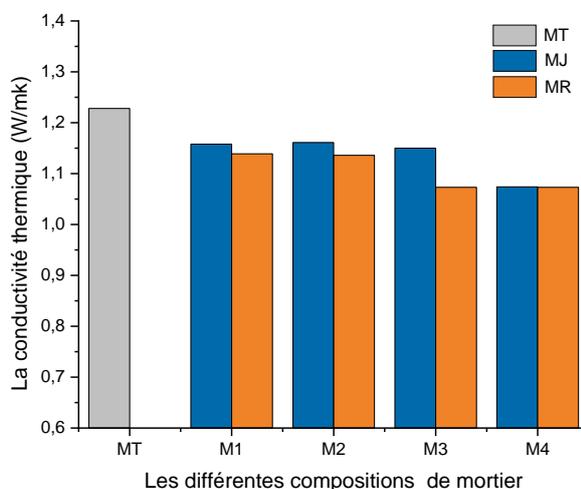


Figure V.12: Evaluation de la conductivité thermique des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés

Le mortier témoin présente une conductivité thermique de 1,228 W/m·K, ce qui représente la valeur de référence pour comparer l'impact des ajouts et des substitutions de PEHD sur la capacité thermique du mortier. Voici une analyse de la conductivité thermique des différentes compositions de mortiers :

1. Mortiers avec ajout de PEHD (MJ) : on remarque de faibles diminutions de la conductivité thermique pour MJ1 (5,7%) et MJ2 (5,5%) et restent proches de celle du MT, indiquant que de faibles ajouts de PEHD n'altèrent pas significativement la conductivité thermique. MJ3 montre une légère diminution supplémentaire (6,3%), tandis que MJ4 affiche une réduction notable de (12,5%), soit une valeur de 1,074 W/m·K, ce qui suggère qu'un taux élevé de PEHD limite le transfert de chaleur dans le mortier. ces résultats confirment que la conductivité thermique diminue progressivement avec l'augmentation du taux d'ajout en PEHD (Halim, Taib, and Aziz 2020; Poonyakan et al. 2018)

2. Mortiers avec substitution du sable par PEHD (MR1 à MR4) : La substitution du sable entraîne une baisse plus marquée de la conductivité thermique : MR1 (7,2%) et MR2 (7,5%) affichent des valeurs légèrement inférieures au MT. MR3 et MR4 atteignent la valeur minimale (1,073 W/m·K), soit une réduction de 12,6 %, ce qui montre que plus la substitution est élevée, plus la conductivité thermique est réduite. ces résultats obtenus concordent bien

avec ceux rapportés par d'autres chercheurs (Badache et al. 2018; Y. Liu, Leong, and Yang 2016; Záleská et al. 2018). La conductivité thermique est fortement liée à la **densité** du mortier : plus la densité est faible, plus la conductivité diminue (Aattache et al. 2013).

On conclut : La conductivité pour le PE est de 11% de celui du sable, le polyéthylène (PEHD) est un matériau thermiquement isolant (Jacob-vaillancourt & Sorelli, 2018), ce qui explique la diminution progressive de la conductivité thermique dans les mortiers avec ajout du PEHD, à cause de la mauvaise adhérence entre les granulats PEHD et la matrice cimentaire, limitant ainsi le transfert de chaleur. Le sable, étant un bon conducteur thermique, joue un rôle important dans la dissipation de la chaleur à travers le mortier. Son remplacement par du PEHD réduit cette capacité, ce qui explique pourquoi les MR ont des valeurs plus faibles que les MJ.

V.5 Evaluation de la durabilité face à des environnements agressifs

V.5.1 L'absorption capillaire

L'augmentation de masse par unité de surface (M/A) a été tracée en fonction de la racine carrée du temps, ce qui donne pour les premières mesures une droite dont la pente donne le coefficient d'absorption d'eau ou la sorptivité.

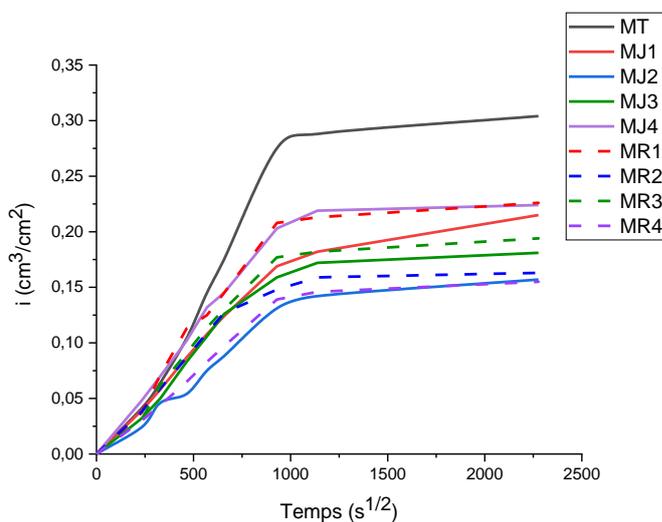


Figure V. 13: Evaluation de l'absorption capillaire des mortiers composites selon le mode d'incorporation des sacs PEHD déchiquetés

Le mortier témoin (MT), présente la sorptivité la plus élevée à chaque intervalle, atteignant $0,304 \text{ cm/s}^{1/2}$ à 24 heure (1440 min ou $2276,82 \text{ s}^{1/2}$). Indique une absorption capillaire plus importante par rapport à tous les mortiers composites MJ et MR.

1. Mortiers avec ajout de PEHD (MJ) : Généralement, l'ajout de PEHD entraîne une réduction de la sorptivité par rapport au mortier témoin (MT). MJ2 montre la sorptivité la plus faible, atteignant seulement $0,157 \text{ cm/s}^{1/2}$ à 24 h, ce qui peut indiquer une meilleure imperméabilité. MJ4 a une valeur la plus élevée ($0,224 \text{ cm/s}^{1/2}$ à 24h), MJ1 et MJ3 ont des valeurs intermédiaires. Ce qui suggère que la réduction de l'absorption capillaire, est due à la nature hydrophobe des polymères et également aux espaces capillaires comblé par les sacs déchiquetés hydrophobes, elles agissent comme des barrières à l'eau dans le mortier. (H. Mohammed et al. 2022). Si le PEHD est bien dispersé, jouant le rôle de remplissage, il réduit la connectivité des pores et limite l'absorption capillaire (Omrane et al. 2016). Sinon il peut créer des micro-vides, expliquant pourquoi certaines formulations ont une sorptivité plus élevée que d'autres. Cela souligne l'importance de l'optimisation du dosage et de la dispersion des particules PEHD pour maximiser l'effet de réduction de la capillarité..

2. Mortiers avec substitution du sable par PEHD déchiqueté (MR) : MR1 a la sorptivité la plus élevée parmi les mortiers MR, ce qui pourrait être dû à une connectivité accrue des pores après la substitution du sable. MR4 présente la sorptivité la plus faible ($0,155 \text{ cm/s}^{1/2}$ à 24h), ce qui indique que cette formulation offre une meilleure résistance à la pénétration capillaire de l'eau. MR2 et MR3 ont des comportements intermédiaires, montrant une absorption relativement faible.

Les mortiers (MR) montrent des sorptivités variées, mais inférieures au mortier témoin (O. Yazoghli Marzouk, Dheilly, and Queneudec 2007), et relativement plus élevée par rapport aux mortiers avec ajout (MJ). Cela suggère que remplacer le sable par du PEHD modifie la connectivité des pores, influençant ainsi la capacité d'absorption capillaire (Aattache, Soltani, and Mahi 2017).

3. Comparaison entre les additions (MJ) et les substitutions (MR)

- MJ2 et MR4 sont les compositions les plus performantes en termes de limitation de l'absorption capillaire, où ils ont un comportement similaire.
- MR1 et MJ4, ils ont le même comportement et ils ont donné l'absorption capillaire la plus élevée. Donc le remplacement minimal du sable par des sacs PEHD déchiquetés ait conduit à

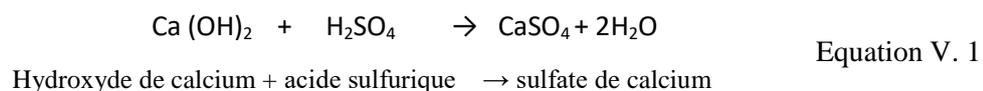
une sorptivité similaire à celle du mortier avec un ajout maximal du même polymère, ça peut s'expliquer par:

- un ajout maximal pourrait conduire à une agglomération des particules plastiques, formant des zones où les pores restent accessibles à l'eau, ce qui maintient une sorptivité élevée.
- À faible taux de remplacement, la majorité des grains de sable reste présente, ce qui préserve la continuité de la porosité capillaire du mortier, et les granulats plastiques peuvent se répartir de manière plus homogène dans la matrice cimentaire, limitant la formation de pores. Et leur effet hydrophobe peut être compensé par la présence majoritaire de sable, empêchant une réduction notable de l'absorption capillaire.
- La quantité minimale de PEHD peut ne pas générer une modification significative de l'adhérence entre le ciment et les granulats. Ainsi, la structure globale du mortier reste proche de celle du mortier témoin. Et le mécanisme de transmission et de rétention de l'eau dans les pores reste similaire, expliquant une sorptivité proche du mortier avec un ajout maximal de PEHD.

V.5.2 Résistance au milieu agressif (acide sulfurique)

V.5.2.1 Examen visuel

L'examen visuel des mortiers exposés à l'acide sulfurique est essentiel pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et la dégradation de l'aspect extérieur des éprouvettes, tout en permettant de confirmer et de comparer les résultats obtenus. Après 28 jours d'immersion dans la solution acide sulfurique [5% H₂SO₄], les éprouvettes de toutes les compositions de mortier présentent une couche blanchâtre en surface (figure V.14 et 15), due au dépôt de gypse résultant de la réaction entre la portlandite et l'acide. Par ailleurs, l'acide sulfurique ne se limite pas à cette réaction : il attaque également la matrice cimentaire par décalcification du silicate de calcium hydraté [C-S-H], entraînant ainsi une perte de masse des éprouvettes et une diminution de leur volume déjà observée (Aattache and Soltani 2020).



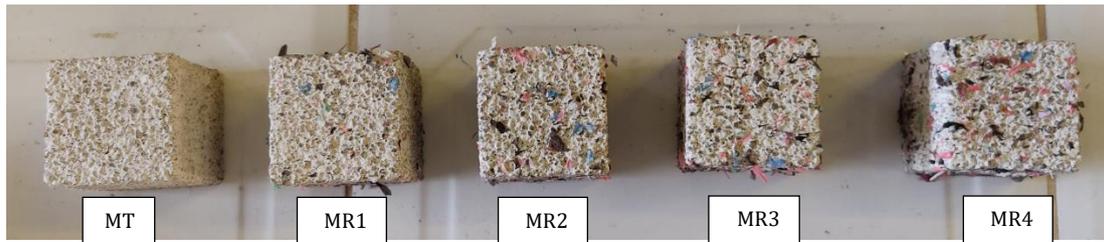


Figure V. 14: Etat des éprouvettes des mortiers (MT, MR1, MR2, MR3 et MR4) après 28 jours d'immersion dans H_2SO_4

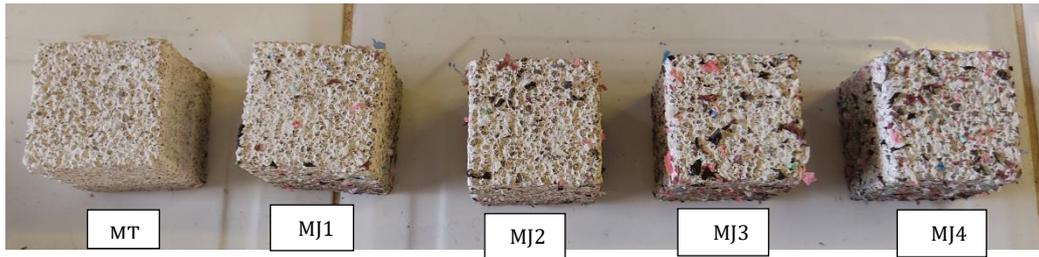


Figure V. 15: Etat des éprouvettes des mortiers (MT, MJ1, MJ2, MJ3 et MJ4) après 28 jours d'immersion dans H_2SO_4

L'exposition des mortiers à une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) entraîne une dégradation chimique, caractérisée par une perte de masse et une diminution de résistance mécanique au fil du temps. Voici une analyse détaillée des tendances observées dans les différentes compositions de mortier pour une immersion dans la solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) pendant une durée limitée à 28 jours.

V.3.5.2 Evaluation de la perte de masse

La perte de masse observée avec le temps est logique : plus l'exposition est longue, plus la dissolution des phases sensibles se produit. La figure V.16 présente les résultats de la perte de masse des différents mortiers.

Le mortier témoin MT, résiste bien aux premières phases de l'attaque sulfatique (à 7 jours) et présente la perte de masse la plus faible, en raison de la compacité initiale du MT et les sulfates commencent à interagir avec les composés du ciment sans causer une dégradation significative. Après 14 jours, l'attaque sulfatique devient plus agressive, formant des composés expansifs (l'étringite), ce qui augmente les contraintes internes provoquant le détachement progressif de la pâte, et se traduit par une perte de masse plus importante. Avec le temps, le mortier témoin est le plus exposé, et la dégradation s'accélère en raison de la

dissolution des phases cimentaires, ce qui affaiblit la cohésion du matériau. MT devient plus fragile après 28 jours, et la propagation des fissures facilite la pénétration des sulfates, aggravant la désintégration du mortier et donnant la perte de masse la plus élevée (6,70%).

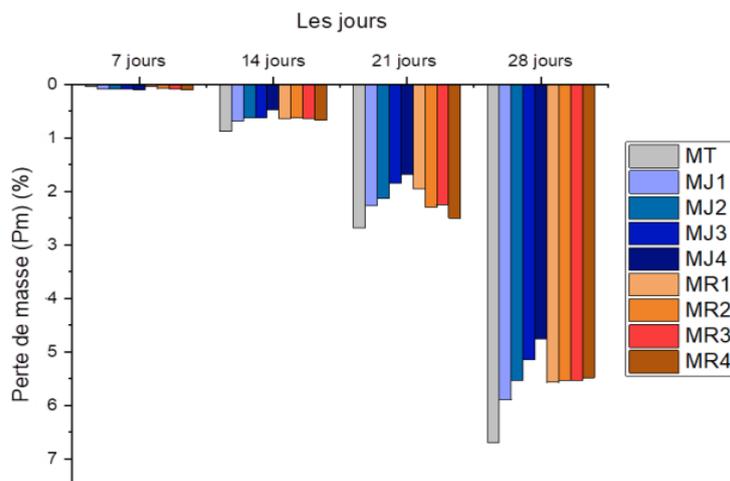


Figure V. 16: Evolution de la perte de masse des mortiers composites en j jours d'immersion dans H_2SO_4

1. Mortiers avec ajout de PEHD (MJ) : Tous les mortiers MJ ont une perte de masse inférieure à celle de MT, ce qui suggère que l'ajout des sacs PEHD déchiqueté améliore la résistance à l'attaque sulfatique. MJ4 présente la perte de masse la plus faible à 28 jours (4,76%), ce qui suggère qu'il est le plus résistant à la détérioration massique. MJ3 et MJ4 montrent une meilleure durabilité que MJ1 et MJ2, avec des pertes de masse plus faibles sur toute la durée du test. MJ2 offre une amélioration notable à court terme, mais la dégradation devient plus marquée après 21 jours. On peut dire d'une manière générale la perte de masse diminue avec l'augmentation du taux d'ajout de déchet des sacs PEHD déchiquetés, en raison de leur nature hydrophobe et leur inertie chimique, ces particules réduisent la pénétration de l'acide sulfurique, ce qui limite la perte de masse pour tous les MJ.

2. Mortiers avec substitution du sable par PEHD déchiqueté (MR) : Les mortiers MR ont globalement une perte de masse plus faible par rapport aux MJ, ce qui suggère que la substitution du sable par le déchet des sacs PEHD déchiquetés améliore la résistance aux attaques chimiques. Après 28 jours d'immersion dans l'acide sulfurique, les valeurs de perte de masse des mortiers MR sont relativement proches, montrant une stabilité face à l'attaque chimique. Donc, la substitution du sable par le déchet des sacs PEHD déchiquetés limite la

détérioration massique et offre une résistance chimique au mortier face à l'attaque de l'acide sulfurique, nos résultats sont en accord avec ceux de (Aattache and Soltani 2020).

3. Comparaison de la perte de masse sous attaque sulfatique entre les (MJ) et les (MR)

Après 28 jours d'immersion dans l'acide sulfurique, les mortiers MR montrent des valeurs de perte de masse relativement proches, suggérant que la substitution du sable par PEHD offre une résistance similaire à la détérioration massique dans toutes les formulations, et globalement une perte de masse plus stable que les MJ. La substitution du sable par PEHD modifie la microstructure, ce qui peut entraîner une porosité plus ouverte, mais assurant une résistance chimique acceptable face à l'acide sulfurique, en raison de la nature hydrophobe des particules PEHD qui ont permis de créer une barrière contre les sels de sulfate (Aattache and Soltani 2020).

MJ4 est le plus performant, avec une perte de masse minimale (4,76%). L'ajout de PEHD (MJ) améliore la compacité du mortier, réduisant la connectivité des pores et limitant la pénétration des sulfates.

Les particules PEHD hydrophobes limitent la pénétration de l'eau, et malgré leur mauvaise adhérence avec la matrice cimentaire, ces particules améliorent la durabilité du mortier (Ghernouti and Rabehi 2012).

V.3.5.2 Pertes de résistance

La résistance à la compression des mortiers après exposition à un environnement acide est un indicateur clé pour évaluer leur durabilité. Le Mortier témoin (MT) a subi une perte de résistance de 49,45%, ce qui signifie que près de la moitié de sa résistance initiale est affectée par l'attaque acide. Ça prouve que le MT est vulnérable à la dégradation chimique.

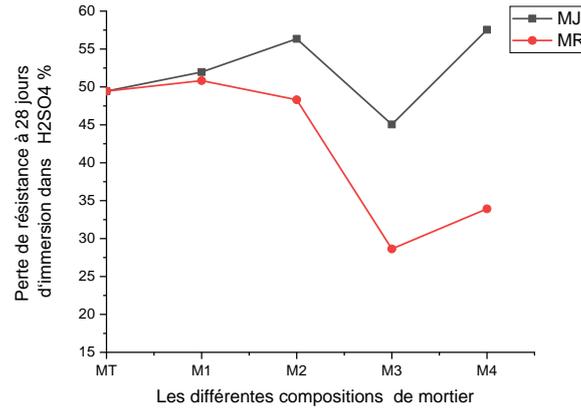


Figure V. 17: Evaluation de la résistance à la compression des mortiers composites après 28 jours d'immersion dans H₂SO₄

1. Mortiers avec ajout de PEHD (MJ) :

- MJ1 présente une perte de résistance proches de MT (51,96 %) cette perte augmente à 56,34% pour MJ2, puis MJ3 montre une amélioration (45,05%), soit une réduction de 8,9 % par rapport à MT et enfin MJ4 (57,54%), soit une dégradation supplémentaire de 16,4 % par rapport à MT.

- MJ4 affiche la plus forte perte (57,54%) malgré qu'il ait donné la plus faible perte de masse. Ce phénomène peut s'expliquer ainsi : l'incorporation de déchets de sacs PEHD déchiquetés permet de limiter la solubilité des composants du mortier dans l'acide, entraînant ainsi une faible perte de masse. Toutefois, bien que la masse globale du mortier reste relativement stable, l'exposition à l'acide altère le réseau de liants cimentaires, fragilise les interfaces granulaires en raison d'une teneur plus élevée en sable et engendre des fissurations internes. Ces dégradations compromettent la résistance mécanique du mortier, provoquant une diminution significative de sa capacité à supporter les contraintes, malgré une perte de masse limitée.

2. Mortiers avec substitution du sable par PEHD déchiqueté (MR) :

MR1 et MR2 ont des pertes de résistance similaires à MT, confirmant que de faibles taux de substitution n'apportent pas de bénéfices majeurs. MR3 et MR4 montrent une nette amélioration, avec 28,64% et 33,92%, soit une réduction de près de 42% pour MR3 par rapport à MT. Ces résultats indiquent que la substitution du sable par PEHD protège mieux le mortier de l'attaque acide sulfurique, probablement en raison de la réduction de la connectivité des pores et de la nature hydrophobe du PEHD.

3. Comparaison de la perte de résistance sous attaque sulfatique entre les (MJ) et les (MR)

-L'ajout du déchet des sacs PEHD déchiquetés (MJ), affecte l'évolution de la perte de résistance qui semble suivre une tendance non linéaire, ce qui peut être dû à la répartition inégale des particules PEHD qui peut créer des zones de faiblesse, facilitant la dégradation chimique et mécanique, suggérant qu'un excès nuit à la résistance chimique (Benosman et al. 2017).

-La substitution semble la meilleure incorporation vis-à-vis la résistance chimique et les résultats suggèrent que les formulations MR3 et MR4 sont les plus performantes en termes de résistance aux milieux acides, et offrent une meilleure préservation mécanique. Le PEHD agit comme une barrière contre l'attaque acide, réduisant la perméabilité et limitant la détérioration des composants cimentaires internes.

- L'écrasement par compression des éprouvettes de MJ1 et MR4 immergées pendant 28 jours dans la solution acide H_2SO_4 , les deux mortiers ont enregistré des résistances proches (19,34 MPa et 19,01 MPa par ordre). La figure V.18, montrent l'état des éprouvettes MJ1 et MR4, on remarque que la deuxième garde sa forme suite à plus de ductilité due à d'une quantité plus importante de déchet des sacs PEHD déchiquetés.

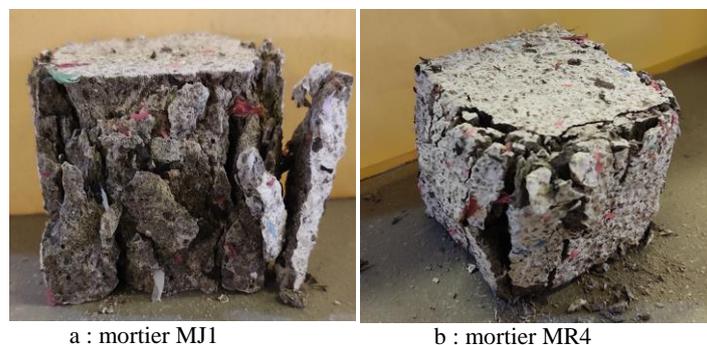


Figure V. 18: Epreuve écrasées par compression après immersion pendant 28jours dans H_2SO_4

V.3.6 Pénétration des ions chlorures (ASTM C1202)

La pénétration des ions chlorures est un indicateur clé pour évaluer la durabilité des mortiers face aux environnements agressifs, notamment en conditions marines. La pénétration des ions chlorure dans le béton est l'un des problèmes liés à la durabilité du revêtement. Les ions chlorure peuvent être présents dans l'air. Une fois infiltrés dans le béton, ces ions chlorure peuvent provoquer la corrosion des armatures. La figure V.19 présente les résultats de la pénétrabilité des ions chlorure des mélanges à 7, 14 et 28 jours.

Le Mortier témoin (MT) présente les valeurs les plus élevées de pénétration des ions chlorures à 7 jours (8,38 mm), 14 jours (11,17 mm) et 28 jours (17,23 mm). Ces résultats montrent que MT est le plus vulnérable à la pénétration des chlorures, ce qui est attendu puisqu'il ne contient pas d'ajout de PEHD.

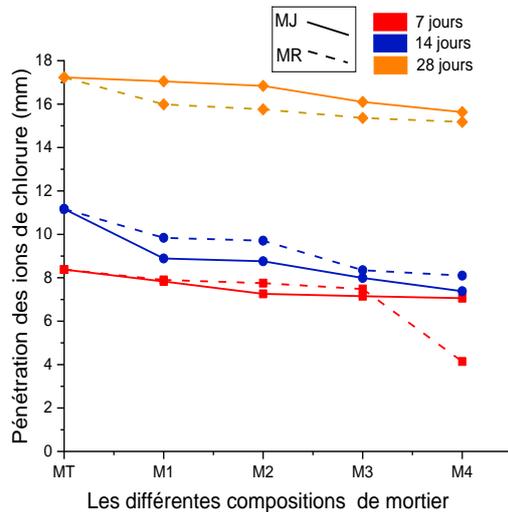


Figure V.19: Pénétrabilité des ions chlorure des mélanges de mortier à 7, 14 et 28 jours

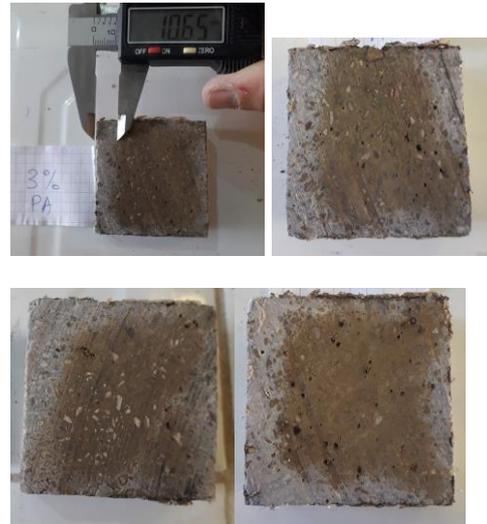


Figure V.20: mesure de la pénétrabilité des ions de chlorure

1. Mortiers avec ajout de PEHD (MJ) : Les valeurs de pénétration des ions chlorures sont inférieures à celles du mortier témoin. MJ4 présente la meilleure résistance parmi les MJ (à 7, 14 et jours). MJ1, MJ2 et MJ3 restent proches les uns des autres, avec une amélioration notable par rapport à MT. Donc la pénétration diminue avec l'augmentation d'ajout du PEHD, suggérant que les particules de PEHD jouent un rôle protecteur (Kou et al. 2009).

2. Mortiers avec substitution du sable par PEHD (MR) : Les valeurs de pénétration des ions chlorures diminuent significativement avec l'augmentation du taux de substitution du sable par du PEHD comme plusieurs études l'on signalé (H. Mohammed et al. 2022)(Senhadji et al. 2015): MR4 montre la plus faible pénétration à 28 jours (environ 12% par rapport au MT). Cette diminution peut être attribuée au fait que les particules PEHD réduisent la connectivité des pores et limitent l'absorption capillaire des ions chlorures en raison de leur nature hydrophobe.

3. Comparaison entre MJ et MR :

- Les mortiers MR présentent les meilleures performances avec une réduction allant jusqu'à 50 % de la pénétration des chlorures à 7 jours par rapport au mortier témoin.
- Les mortiers MJ montrent une amélioration, mais l'effet est moins prononcé (réduction d'environ 15 % à 7 jours).
- L'effet barrière du PEHD limite la pénétration des ions chlorures, mais son efficacité de MJ semble moins marquée que dans les mortiers MR où le sable est remplacé.

Donc on conclut que : Le PEHD améliore la résistance aux chlorures en limitant la porosité et en réduisant la connectivité des pores capillaires. L'optimisation des formulations suggère que les mortiers MR offrent une meilleure barrière contre les chlorures que les mortiers MJ.

Ces résultats montrent que le PEHD peut être un matériau prometteur pour améliorer la durabilité des mortiers dans des environnements marin, afin d'éviter la corrosion des armatures suite à l'attaque des chlorures (Kou et al. 2009).

V.9 Conclusion

- L'incorporation des déchets de sacs PEHD déchiquetés dans les mortiers, que ce soit par ajout ou substitution, semble n'avoir qu'un impact limité sur l'étalement en raison des faibles quantités utilisées. Cependant, les réductions observées dans MJ4 et MR4 s'expliquent par la forme feuilletée et irrégulière des particules de PEHD.
- L'ajout de PEHD dans les mortiers a un impact limité sur leur densité, car les particules plastiques représentent un faible pourcentage de la matrice. En revanche, la substitution du sable par les granulats de PEHD entraîne une réduction plus marquée de la masse volumique des mortiers, accentuant ainsi la diminution de densité à mesure que la quantité de PEHD augmente.
- Les mortiers contenant des déchets des sacs PEHD déchiquetés restent moins poreux que le témoin. Cela s'explique par plusieurs facteurs : le remplissage des particules de PEHD dans la matrice cimentaire, une meilleure répartition des granulats améliorant la compacité, une diminution de la rétention d'eau due à la nature hydrophobe du PEHD. Enfin, le remplacement du sable, plus poreux que le PEHD, modifie la structure interne du mortier.

- Pour la résistance à la compression, l'ajout de PEHD jusqu'à 3 % a un impact limité sur la résistance à la compression. Cependant, au-delà de 4 %, une baisse significative est observée. La substitution du sable par du PEHD déchiqueté entraîne une réduction progressive de la résistance à la compression, nécessitant une limitation du taux de substitution (≤ 3 %) pour préserver les performances mécaniques du mortier et éviter une diminution excessive.
- Concernant la résistance à la flexion, une faible addition de PEHD (≤ 2 %) n'engendre pas de modifications notables à court et à long terme. Toutefois, au-delà de ce seuil, une augmentation de la ductilité et une perte d'adhérence entre les particules PEHD et la matrice cimentaire entraînent une réduction progressive de cette résistance. La substitution du sable par du PEHD entraîne une diminution de la résistance à la flexion, particulièrement au-delà de 4,45 % (MR3 à MR4). Cela s'explique par le faible module d'élasticité des particules de PEHD et la réduction de l'adhérence avec la matrice cimentaire.
- Lors de la rupture du mortier, les fissures simples sont remplacées par des microfissures denses, phénomène également observé dans les mortiers avec ajout de PEHD. Les mortiers composites avec substitution en PEHD déchiqueté présentent une ductilité accrue à mesure que la proportion de PEHD augmente, rendant le mortier plus élastique et moins rigide. Cette ductilité permet aux éprouvettes de supporter une charge plus longtemps après une défaillance mécanique, renforçant ainsi leur capacité à absorber les contraintes.
- L'ajout de PEHD (MJ) entraîne une légère diminution de la rigidité du mortier, bien que son effet reste modéré. En revanche, la substitution du sable par du PEHD (MR) provoque une baisse plus prononcée du module d'élasticité dynamique, traduisant une perte de rigidité plus importante. Cette réduction est due à l'augmentation de la porosité et à la diminution de la transmission des ondes ultrasonores causée par l'impédance acoustique différente du PEHD par rapport au ciment et au sable. Plus la quantité de PEHD augmente, plus le mortier devient souple et moins rigide.
- L'incorporation des déchets des sacs PEHD déchiquetés dans le mortier de teneur 3% en addition ou 3% en substitution et de rapport eau/ciment (0,5), présentant la même maniabilité par rapport à un mortier de référence similaire. La résistance à la compression et la résistance à la flexion sont proches à celles du mortier de référence, mais présentent une ductilité et une durabilité supérieures.
- Concernant la conductivité thermique, le PEHD étant un matériau isolant, sa présence réduit progressivement la conductivité thermique du mortier. Le sable, en tant que bon

conducteur thermique, son remplacement par du PEHD entraîne une diminution de la conductivité. Donc on suggère un remplacement au-delà de 4,45% pour une faible conductivité thermique

- À faible taux d'incorporation des déchets de sacs PEHD déchiquetés, la majorité des grains de sable reste présente, empêchant une réduction marquée de l'absorption capillaire. Donc, une substitution du sable au-delà de 6% est la meilleure incorporation de ce déchet pour une faible absorption capillaire.

- Après 28 jours d'immersion dans l'acide sulfurique, la substitution semble la meilleure incorporation vis-à-vis la résistance chimique et les résultats suggèrent que les formulations MR3 et MR4 sont les plus performantes en termes de résistance aux milieux acides, et offrent une meilleure préservation mécanique. Le PEHD agit comme une barrière contre l'attaque sulfatique, réduisant la perméabilité et limitant la détérioration des composants cimentaires internes.

- Le PEHD améliore la résistance aux chlorures en limitant la porosité et en réduisant la connectivité des pores capillaires. Les résultats après 28 jours d'immersion montrent que le déchet des sacs PEHS déchiqueté offre une barrière contre les chlorures que ce soit en ajout ou en substitution du sable. Ces résultats montrent que le PEHD peut être un matériau prometteur pour améliorer la durabilité des mortiers dans des environnements marin, afin d'éviter la corrosion des armatures suite à l'attaque des chlorures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats de la présente étude ont montré des résultats assez encourageants et ont ouvert une nouvelle voie pour le recyclage du déchet des sacs PEHD dans les composites de ciment et de béton. Les principaux résultats sont :

- L'ouvrabilité du mortier frais diminue fortement avec l'incorporation d'agrégat plastique PEHD de forme feuilletée, mais l'agrégat de PEHD granulé par fusion en forme de pastille augmente l'ouvrabilité à cause de la surface plus lisse que le sable, et plus d'eau libre.
- La densité diminue lorsque le taux de substitution des granulats naturels par du PEHD augmente, surtout dans le cas de PEHD granulé par fusion. Elle diminue encore davantage en présence de déchets d'aluminium.
- Une baisse de la résistance à la compression du mortier à mesure que la teneur en agrégats plastiques augmentait. Cela a été attribué à la faible liaison entre la matrice cimentaire et les particules plastiques. Pour optimiser les résistances à la compression des mortiers, il est recommandé d'utiliser du sable concassé. L'incorporation de PEHD granulé par fusion doit être faite avec prudence, et les taux d'incorporation élevés (au-delà de 10%) ne sont pas avantageux, surtout avec le sable d'Oued. La perte de résistance mécanique n'est pas pertinente si ces composites sont utilisés dans des applications structurelles où une résistance modérée est acceptable.
- De même, la ductilité du mortier intégrant des granulats plastiques augmente en conséquence de la réduction du module d'élasticité dynamique. La diminution du module d'élasticité conduit à un mortier ductile et plus déformable, ce qui peut être intéressant dans les applications où la flexibilité et la capacité de déformation du revêtement sont plus importantes que la résistance.
- De plus, l'utilisation de granulats plastiques dans le mortier améliore son isolation thermique. La conductivité thermique la plus faible a été détectée dans le mortier avec substitution de sable par : un taux au-delà de 4,45% de PEHD déchiqueté et 30% PEHD granulé par fusion avec une amélioration par addition de la poudre de déchet d'Aluminium

(1% du poids du ciment). Cela est considéré comme une solution précieuse aux problèmes énergétique dans le secteur de la construction. De cette façon, l'efficacité thermique du bâtiment peut être considérablement améliorée.

- En ce qui concerne l'impact environnemental, l'incorporation de déchets plastiques recyclés dans les mélanges de mortiers est perçue comme une solution prometteuse pour réduire l'impact environnemental du plastique en termes de pollution, de consommation d'énergie, d'élimination des déchets et de réchauffement climatique.

- La valorisation des déchets plastiques et des déchets d'aluminium pour la fabrication de mortiers légers permet de réduire la consommation d'énergie et en même temps de se débarrasser de ces matériaux non biodégradables et très nocifs pour l'environnement et l'écosystème.

- Effectivement, le remplacement des ressources naturelles par des déchets apporte plusieurs avantages. Non seulement cette pratique contribue à réduire les dommages environnementaux et l'épuisement des matériaux naturels résultant de l'extraction des agrégats naturels, mais elle offre également une solution économique. En utilisant des déchets comme substituts, il est possible de diminuer les coûts associés aux matériaux conventionnels, offrant ainsi une alternative à la fois écologique et financièrement viable. L'incorporation de déchets des sacs PEHD déchiquetés dans le mortier, sans traitement particulier, présente des avantages économiques et énergétiques, et ne nécessite ni purification ni décoloration, contrairement aux autres applications courantes de recyclage du PEHD.

Implications pratiques de l'incorporation des déchets des sacs PEHD

Les méthodes d'incorporation des particules de PEHD déchiquetés, par addition ou substitution, peuvent offrir des opportunités intéressantes dans l'industrie de la construction grâce à leurs effets sur les propriétés des mortiers. Voici quelques exemples d'application :

1. Amélioration des matériaux pour les constructions légères : Les particules de PEHD, surtout lorsqu'elles remplacent une partie importante des agrégats, réduisent la densité du mortier. Cela peut être exploité dans la production de matériaux légers pour des applications comme les murs non porteurs ou les cloisons intérieures.

2. Un mortier ductile, grâce à sa capacité à supporter des déformations sans se fissurer brutalement, peut être adapté pour des travaux de réparation structurelle, où la capacité à absorber les contraintes sans rupture immédiate est primordiale.
3. Réparation de la maçonnerie fissurée : La capacité des mortiers contenant des PEHD à mieux résister aux fissures peut être utilisée dans des projets de réparation nécessitant une ductilité accrue, comme la réparation de la maçonnerie fissurée après un tassement différentiel.
4. Pour la diminution de la densité apparente fraîche ou durcie : Cette propriété est particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et de restauration du vieux bâti et dans l'allègement des structures.
5. Effet des granulats légers : Les particules plastiques utilisés, qu'ils soient ajoutés ou substitués, ont une faible densité et généralement une surface lisse. Cela peut réduire les frottements internes dans le mélange, améliorant la facilité de mise en œuvre et nécessitant moins d'efforts pour l'étaler les revêtements, en améliorant le travail manuel offrant un résultat final plus homogène.
6. L'effet de barrière contre les solutions agressives : l'utilisation de déchets des sacs PEHD déchiquetés dans la fabrication des mortiers composites qui peuvent recommandés pour prévenir la corrosion de l'acier induite par les chlorures dans diverses structures en béton armé ou dans les infrastructure soumis aux attaques sulfatiques des sols agressifs.

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Cette étude s'inscrit dans une perspective de valorisation des granulats en PEHD déchiqueté afin de renforcer leur compatibilité avec les mortiers destinés aux revêtements de béton armé, notamment en milieux agressifs. L'objectif principal est de développer des granulats PEHD optimisés et commercialisables, pouvant être directement mélangés avec du sable pour la préparation de mortiers adaptés aux revêtements.

Pour atteindre cet objectif, l'approche repose sur une analyse approfondie de la microstructure du mortier afin de comprendre les interactions entre les granulats recyclés et la matrice cimentaire. Cette exploration permettra d'identifier les traitements les plus efficaces pour améliorer l'adhésion des granulats à la pâte cimentaire, via des modifications chimiques et physiques visant à accroître leur rugosité et réactivité.

Enfin, cette recherche se veut pratiquée et appliquée, avec une valorisation industrielle à travers des collaborations avec le secteur de la construction. L'intégration de ces matériaux recyclés dans les pratiques de construction durable contribuerait à réduire l'impact environnemental des déchets plastiques tout en proposant des solutions innovantes pour renforcer la durabilité des revêtements en béton armé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

- Aattache, Amel, Abdelkader Mahi, Rabah Soltani, Mohamed Mouli, and Ahmed Soufiane Benosman. 2013. "Experimental Study on Thermo-Mechanical Properties of Polymer Modified Mortar." *Materials and Design* 52: 456–69. doi:10.1016/j.matdes.2013.05.055.
- Aattache, Amel, and Rabah Soltani. 2020. "Durability-Related Properties of Early-Age and Long-Term Resistant Laboratory Elaborated Polymer-Based Repair Mortars." *Construction and Building Materials* 235: 117494. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117494.
- Aattache, Amel, Rabah Soltani, and Abdelkader Mahi. 2017. "Investigations for Properties Improvement of Recycled PE Polymer Particles-Reinforced Mortars for Repair Practice." *Construction and Building Materials* 146: 603–14. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.110.
- Abdel Tawab OF, Amin MR, Ibrahim MM, Abdel Wahab M, Abd El Rahman EN, Hassanien RH, Hatem MH, and Ghaly AE. 2020. "Recycling Waste Plastic Bags as a Replacement for Cement in Production of Building Bricks and Concrete Blocks Advanced Applications of Solar Energy in Greenhouses for Energy and Food Production. ID:33456 View Project." *Journal of Waste Resources and Recycling* 1(05300205020516009): 1–13.
- Abdollahnejad, Z., S. Miraldo, F. Pacheco-Torgal, and J. Barroso Aguiar. 2017. "Cost-Efficient One-Part Alkali-Activated Mortars with Low Global Warming Potential for Floor Heating Systems Applications." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 21(4): 412–29. doi:10.1080/19648189.2015.1125392.
- Abeyesinghe, Sonali, Chamila Gunasekara, Chaminda Bandara, Kate Nguyen, Ranjith Dissanayake, and Priyan Mendis. 2021. "Engineering Performance of Concrete Incorporated with Recycled High-Density Polyethylene (HDPE) A Systematic Review." *Polymers* 13(11). doi:10.3390/polym13111885.
- ACHOUR, Nouria. 2007. "Recyclage Des Matériaux En Algérie."
- Aciu, Claudiu, Dana Adriana Ilutiu-Varvara, Daniela Lucia Manea, Yvette Anna Orban, and Florin Babota. 2018. "Recycling of Plastic Waste Materials in the Composition of Ecological Mortars." *Procedia Manufacturing* 22: 274–79. doi:10.1016/j.promfg.2018.03.042.
- Akçaözoğlu, Semiha, Kubilay Akçaözoğlu, and Cengiz Duran Atış. 2013. "Thermal Conductivity, Compressive Strength and Ultrasonic Wave Velocity of Cementitious Composite Containing Waste PET Lightweight Aggregate (WPLA)." *Composites Part B: Engineering* 45(1): 721–26. doi:10.1016/j.compositesb.2012.09.012.
- Akçaözoğlu, Semiha, Ceng iz Duran Atış, and Kubilay Akçaözoğlu. 2010. "An Investigation on the Use of Shredded Waste PET Bottles as Aggregate in Lightweight Concrete." *Waste Management* 30(2): 285–90. doi:10.1016/j.wasman.2009.09.033.
- Akinyele, J. O., and A. Ajede. 2018. "The Use of Granulated Plastic Waste in Structural Concrete." *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development* 10(2): 169–75. doi:10.1080/20421338.2017.1414111.

- Akinyele, J. O., U. T. Igba, and B. G. Adigun. 2020. "Effect of Waste PET on the Structural Properties of Burnt Bricks." *Scientific African* 7: e00301. doi:10.1016/j.sciaf.2020.e00301.
- Akinyele, J. O., and I. O. Toriola. 2018. "The Effect of Crushed Plastics Waste on the Structural Properties of Sandcrete Blocks." *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development* 10(6): 709–13. doi:10.1080/20421338.2018.1496614.
- Al-Hadithi, A. I., M. B. Abdulrahman, and M. I. Al-Rawi. 2020. "Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Waste Plastic Fibers." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 737(1). doi:10.1088/1757-899X/737/1/012173.
- Al-Hadithi, Abdulkader I., and Mahmood Fawzi Alani. 2018. "Importance of Adding Waste Plastics to High-Performance Concrete." *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management* 171(2): 36–51. doi:10.1680/jwarm.17.00040.
- Al-Harthy, A. S., M. Abdel Halim, R. Taha, and K. S. Al-Jabri. 2007. "The Properties of Concrete Made with Fine Dune Sand." *Construction and Building Materials* 21(8): 1803–8. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053.
- Al-Tayeb, Mustafa Maher, B. H. Abu Bakar, Hanafi Ismail, and Hazizan Md Akil. 2012. "Impact Resistance of Concrete with Partial Replacements of Sand and Cement by Waste Rubber." *Polymer - Plastics Technology and Engineering* 51(12): 1230–36. doi:10.1080/03602559.2012.696767.
- Alam, Ohidul, Mukaddis Billah, and Ding Yajie. 2018. "Resources, Conservation & Recycling." *Resources, Conservation & Recycling* 132(December 2017): 121–29. doi:10.1016/j.resconrec.2018.01.037.
- Alani, Amir M., and Derrick Beckett. 2013. "Mechanical Properties of a Large Scale Synthetic Fibre Reinforced Concrete Ground Slab." *Construction and Building Materials* 41: 335–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.043.
- Alauddin, M., I. A. Choudhury, M. A. El Baradie, and M. S.J. Hashmi. 1995. "Plastics and Their Machining: A Review." *Journal of Materials Processing Tech.* 54(1–4): 40–46. doi:10.1016/0924-0136(95)01917-0.
- Albano, C., N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, and A. Gutiérrez. 2009. "Influence of Content and Particle Size of Waste Pet Bottles on Concrete Behavior at Different w/c Ratios." *Waste Management* 29(10): 2707–16. doi:10.1016/j.wasman.2009.05.007.
- Aliabdo, Ali A., Abd Elmoaty M. Abd-Elmoaty, and Hani H. Hassan. 2014. "Utilization of Crushed Clay Brick in Cellular Concrete Production." *Alexandria Engineering Journal* 53(1): 119–30. doi:10.1016/j.aej.2013.11.005.
- Almeshal, I, B. A Tayeh, R Alyousef, H Alabduljabbar, A. M Mohamed, and A Alaskar. 2020. "Use of Recycled Plastic as Fine Aggregate in Cementitious Composites: A Review." *Construction and Building Materials* 253: 119146. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119146.
- Almeshal, Ibrahim., Bassam A. Tayeh, Rayad. Alyousef, Hisham. Alabduljabbar, Abdeliazim Mustafa. Mohamed, and Abdulaziz. Alaskar. 2020. "Use of Recycled Plastic as Fine Aggregate in Cementitious Composites: A Review." *Construction and Building Materials* 253: 119146. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119146.

- Almeshal, Ibrahim, Bassam A. Tayeh, Rayed Alyousef, Hisham Alabduljabbar, and Abdeliazim Mustafa Mohamed. 2020. "Eco-Friendly Concrete Containing Recycled Plastic as Partial Replacement for Sand." *Journal of Materials Research and Technology* 9(3): 4631–43. doi:10.1016/j.jmrt.2020.02.090.
- Almeshal, Ibrahim, Bassam A. Tayeh, Rayed Alyousef, Hisham Alabduljabbar, Abdeliazim Mustafa Mohamed, and Abdulaziz Alaskar. 2020. "Use of Recycled Plastic as Fine Aggregate in Cementitious Composites: A Review." *Construction and Building Materials* 253: 119146. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119146.
- Alqahtani, F.K. 2017. "US 2017/0088463 A1- Recycled Plastic Aggregate for Use in Concrete.Pdf." *PDF*.
- Aocharoen, Yanika, and Piya Chotickai. 2023a. "Compressive Mechanical and Durability Properties of Concrete with Polyethylene Terephthalate and High-Density Polyethylene Aggregates." *Cleaner Engineering and Technology* 12(October 2022): 100600. doi:10.1016/j.clet.2023.100600.
- Aocharoen, Yanika, and Piya Chotickai. 2023b. "Compressive Mechanical and Durability Properties of Concrete with Polyethylene Terephthalate and High-Density Polyethylene Aggregates." *Cleaner Engineering and Technology* 12(February): 100600. doi:10.1016/j.clet.2023.100600.
- Awoyera, P O, and A Adesina. 2020. "Case Studies in Construction Materials Plastic Wastes to Construction Products : Status, Limitations and Future Perspective." *Case Studies in Construction Materials* 12: e00330. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00330.
- Azharpour, Amir Mahyar, Mohammad Reza Nikoudel, and Milad Taheri. 2016. "The Effect of Using Polyethylene Terephthalate Particles on Physical and Strength-Related Properties of Concrete; A Laboratory Evaluation." *Construction and Building Materials* 109: 55–62. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056.
- Babafemi, Adewumi John, Branko Šavija, Suvash Chandra Paul, and Vivi Anggraini. 2018. "Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review." *Sustainability (Switzerland)* 10(11). doi : 10.3390/su10113875.
- Badache, Abdelhak, Ahmed Soufiane Benosman, Yassine Senhadji, and Mohamed Mouli. 2018. "Thermo-Physical and Mechanical Characteristics of Sand-Based Lightweight Composite Mortars with Recycled High-Density Polyethylene (HDPE)." *Construction and Building Materials* 163: 40–52. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069.
- Bahij, Sifatullah, Safiullah Omary, Françoise Feugeas, and Amanullah Faqiri. 2020. "Fresh and Hardened Properties of Concrete Containing Different Forms of Plastic Waste – A Review." *Waste Management* 113: 157–75. doi:10.1016/j.wasman.2020.05.048.
- Bahri, Girum. 2005. The Case of Nairobi, Kenya "Sustainable Management of Plastic Bag Waste: The Case of Nairobi, Kenya." IIIIEE, Lund University. Sweden.
- Balkum, E.T. 2002. "US 6488766 B2- Aggregate Using Recycled Plastic.Pdf." *PDF*.
- Barrow, P. 2016. "WO 2016/084007 A1-Extruded Plastic Aggregate for Concrete." *PDF*.

- Batayneh, Malek, Iqbal Marie, and Ibrahim Asi. 2007. "Use of Selected Waste Materials in Concrete Mixes." *Waste Management* 27(12): 1870–76. doi:10.1016/j.wasman.2006.07.026.
- Bederina, M., Z. Makhoulfi, A. Bounoua, T. Bouziani, and M. Quéneudec. 2013. "Effect of Partial and Total Replacement of Siliceous River Sand with Limestone Crushed Sand on the Durability of Mortars Exposed to Chemical Solutions." *Construction and Building Materials* 47: 146–58. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037.
- Belmokaddem, Mohammed, Abdelkader Mahi, Yassine Senhadji, and Bekir Yilmaz Pekmezci. 2020. "Mechanical and Physical Properties and Morphology of Concrete Containing Plastic Waste as Aggregate." *Construction and Building Materials* 257: 119559. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119559.
- Benazzouk, A., O. Douzane, T. Langlet, K. Mezreb, J. M. Roucoult, and M. Quéneudec. 2007. "Physico-Mechanical Properties and Water Absorption of Cement Composite Containing Shredded Rubber Wastes." *Cement and Concrete Composites* 29(10): 732–40. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.07.001.
- Benosman, A. S., H. Taïbi, Y. Senhadji, M. Mouli, M. Belbachir, and M. I. Bahlouli. 2017. "Plastic Waste Particles in Mortar Composites: Sulfate Resistance and Thermal Coefficients." *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 33(3): 171–201. doi:10.1177/147776061703300304.
- Berry, Kathryn L E, Nora Hall, Kay Critchell, Kayi Chan, Munro Mortimer, and Phoebe J Lewis. 2023. "Plastics." : 207–28. doi:10.1007/978-3-031-10127-4.
- Bhogayata, Ankur C., and Narendra K. Arora. 2017. "Fresh and Strength Properties of Concrete Reinforced with Metalized Plastic Waste Fibers." *Construction and Building Materials* 146: 455–63. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095.
- Boucedra, Aissa, Madani Bederina, and Youcef Ghernouti. 2020. "Study of the Acoustical and Thermo-Mechanical Properties of Dune and River Sand Concretes Containing Recycled Plastic Aggregates." *Construction and Building Materials* 256: 119447. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
- Bouglada, Mohammed Salah, Noui Ammar, and Belagraa Larbi. 2021. "Optimization of Cellular Concrete Formulation with Aluminum Waste and Mineral Additions." *Civil Engineering Journal (Iran)* 7(7): 1222–34. doi : 10.28991/cej-2021-03091721.
- Boundedjema, Yassine, Karim Ezziane, and Ahmed Hallal. 2016. "Variation of Mechanical and Rheological Properties of Mortar by Replacement of Natural Sand with Crushed Sand." 4243(July). doi:10.1080/01694243.2016.1206331.
- Calderon, Veronica, and Matthieu Horgnies. 2013. "Utilisation de Polymères Recyclés Dans Les Mortiers et Bétons." *Plastiques et composites* (October). doi : 10.51257/a-v1-am3600.
- Chiba, Sanae, Hideaki Saito, Ruth Fletcher, Takayuki Yogi, Makino Kayo, Shin Miyagi, Moritaka Ogido, and Katsunori Fujikura. 2018. "Human Footprint in the Abyss: 30 Year Records of Deep-Sea Plastic Debris." *Marine Policy* 96 (March):204–12. doi:10.1016/j.marpol.2018.03.022.

- Choi, Yun Wang, Dae Joong Moon, Jee Seung Chung, and Sun Kyu Cho. 2005. "Effects of Waste PET Bottles Aggregate on the Properties of Concrete." *Cement and Concrete Research* 35(4): 776–81. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.014.
- Choi, Yun Wang, Dae Joong Moon, Yong Jic Kim, and Mohamed Lachemi. 2009. "Characteristics of Mortar and Concrete Containing Fine Aggregate Manufactured from Recycled Waste Polyethylene Terephthalate Bottles." *Construction and Building Materials* 23(8): 2829–35. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036.
- Choudhary, Jayvant, Brind Kumar, and Ankit Gupta. 2020. "Utilization of Solid Waste Materials as Alternative Fillers in Asphalt Mixes: A Review." *Construction and Building Materials* 234: 117271. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117271.
- Clapp, Jennifer, and Linda Swanston. 2009. "Doing Away with Plastic Shopping Bags: International Patterns of Norm Emergence and Policy Implementation." *Environmental Politics* 18(3): 315–32. doi:10.1080/09644010902823717.
- Coppola, Bartolomeo, Luc Courard, Frédéric Michel, Loredana Incarnato, and Luciano Di Maio. 2016. "Investigation on the Use of Foamed Plastic Waste as Natural Aggregates Replacement in Lightweight Mortar." *Composites Part B: Engineering* 99: 75–83. doi:10.1016/j.compositesb.2016.05.058.
- Dhawan, Ridham, Brij Mohan, Singh Bisht, Rajeev Kumar, Saroj Kumari, and S K Dhawan. 2019. "Recycling of Plastic Waste into Tiles with Reduced Flammability and Improved Tensile Strength." *Process Safety and Environmental Protection*. doi:10.1016/j.psep.2019.02.018.
- Di, Jinghan, Barbara K. Reck, Alessio Miatto, and Thomas E. Graedel. 2021. "United States Plastics: Large Flows, Short Lifetimes, and Negligible Recycling." *Resources, Conservation and Recycling* 167(January): 105440. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105440.
- Dossogne, Reynald. 1996. "Polyéthylène Haute Densité PE-HD.Pdf." *Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites* Doc. A 3 3: 1; 10.
- Dupain, R., R. Lanchon, and J-C. Saint-Arroman. 2004. *Granulats, Sols, Ciment et Bétons*. 3ème Editi. Casteilla, 2004.
- Elat, Emmanuel, Prosper Pliya, Alexandre Pierre, Michel Mbessa, and Albert Noumow. 2020. "Microstructure and Mechanical Behavior of Concrete Based on Crushed Sand Combined with Alluvial Sand." : 181–97.
- Eriksen, Marcus, Laurent C.M. Lebreton, Henry S. Carson, Martin Thiel, Charles J. Moore, Jose C. Borerro, Francois Galgani, Peter G. Ryan, and Julia Reisser. 2014. "Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea." *PLoS ONE* 9(12): 1–15. doi:10.1371/journal.pone.0111913.
- Erni-Cassola, Gabriel, Vinko Zadjelovic, Matthew I. Gibson, and Joseph A. Christie-Oleza. 2019. "Distribution of Plastic Polymer Types in the Marine Environment; A Meta-Analysis." *Journal of Hazardous Materials* 369(November 2018): 691–98. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.02.067.

- Ferreira, Luís, Jorge De Brito, and Nabajyoti Saikia. 2012. "Influence of Curing Conditions on the Mechanical Performance of Concrete Containing Recycled Plastic Aggregate." *Construction and Building Materials* 36: 196–204. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098.
- Ben Fraj, Amor, Mohamed Kismi, and Pierre Mounanga. 2010. "Valorization of Coarse Rigid Polyurethane Foam Waste in Lightweight Aggregate Concrete." *Construction and Building Materials* 24(6): 1069–77. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010.
- Fraternali, Fernando, Vincenzo Ciancia, Rosaria Chechile, Gianvittorio Rizzano, Luciano Feo, and Loredana Incarnato. 2011. "Experimental Study of the Thermo-Mechanical Properties of Recycled PET Fiber-Reinforced Concrete." *Composite Structures* 93(9): 2368–74. doi:10.1016/j.compstruct.2011.03.025.
- Frigione, Mariaenrica. 2010. "Recycling of PET Bottles as Fine Aggregate in Concrete." *Waste Management* 30(6): 1101–6. doi:10.1016/j.wasman.2010.01.030.
- Ganjian, Eshmaiel, Morteza Khorami, and Ali Akbar Maghsoudi. 2009. "Scrap-Tyre-Rubber Replacement for Aggregate and Filler in Concrete." *Construction and Building Materials* 23(5): 1828–36. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020.
- Geiker, Mette R. 2002. "The Effect of Measuring Procedure on the Apparent Rheological Properties of Self-Compacting Concrete." *Cement and Concrete Research* 32(11): 1791–1795.
- Gertsakis, J, and Helen Lewis. 2003. "Sustainability and the Waste Management Hierarchy." *EcoRecycle Victoria* (March): 16.
- Geyer, Roland, Jenna R. Jambeck, and Kara Lavender Law. 2017. "Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made." *Science Advances* 3(7): 25–29. doi:10.1126/sciadv.1700782.
- Ghernouti, Youcef, and Bahia Rabehi. 2012. "Strength and Durability of Mortar Made with Plastics Bag Waste (MPBW)." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6(3): 145–53. doi:10.1007/s40069-012-0013-0.
- Ghernouti, Youcef, Bahia Rabehi, Brahim Safi, and Rabah Chaid. 20014. "USE OF RECYCLED PLASTIC BAG WASTE IN THE CONCRETE." *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies*. 8: 480–87.
- Ghernouti, Youcef, Bahia Rabehi, Brahim Safi, and Rabah Chaid. 2009a. "Use of Recycle Plastic Bag Waste in the Concrete." *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies* 8(June): 480–87.
- Ghernouti, Youcef, Bahia Rabehi, Brahim Safi, and Rabah Chaid. 2009b. "USE OF RECYCLED PLASTIC BAG WASTE IN THE CONCRETE Youcef Ghernouti, Bahia Rabehi, Brahim Safi and Rabah Chaid Research Unit: Materials, Processes and Environment, University M'Hamed Bougara of Boumerdes. Algeria." *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies* 8: 480–87.
- Gu, Lei, and Togay Ozbakkaloglu. 2016. "Use of Recycled Plastics in Concrete: A Critical Review." *Waste Management* 51: 19–42. doi:10.1016/j.wasman.2016.03.005.

- Guendouz, Mohamed, Farid Debieb, and El Hadj Kadri. 2015. "Formulation et Caractérisation d' un Béton de Sable à Base de Déchets Plastiques." *Rencontres Universitaires de Génie Civil* (May).
- Guglielmi, P. O., W. R.L. Silva, and W. L. Repette. 2010. "Porosity and Mechanical Strength of an Autoclaved Clayey Cellular Concrete." *Advances in Civil Engineering* 2010(Ccc): 6–11. doi:10.1155/2010/194102.
- Gunasekara, Chamila, David W. Law, Sujeeva Setunge, Iko Burgar, and Robert Brkljaca. 2017. "Effect of Element Distribution on Strength in Fly Ash Geopolymers." *ACI Materials Journal* 114(5): 795–808. doi : 10.14359/51689779.
- Gupta, Trilok, Sandeep Chaudhary, and Ravi K. Sharma. 2016. "Mechanical and Durability Properties of Waste Rubber Fiber Concrete with and without Silica Fume." *Journal of Cleaner Production* 112: 702–11. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.081.
- Haach, Vladimir G, Graça Vasconcelos, and Paulo B Lourenço. 2011. "Influence of Aggregates Grading and Water / Cement Ratio in Workability and Hardened Properties of Mortars." *Construction and Building Materials* 25(6): 2980–87. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011.
- Hajimohammadi, Ailar, Tuan Ngo, Priyan Mendis, Tuan Nguyen, Alireza Kashani, and Jannie S.J. van Deventer. 2017. "Pore Characteristics in One-Part Mix Geopolymers Foamed by H₂O₂: The Impact of Mix Design." *Materials and Design* 130(March): 381–91. doi:10.1016/j.matdes.2017.05.084.
- Halim, N. F.A., N. Taib, and Z. A. Aziz. 2020. "The Performance of Thermal Property in Concrete Containing Waste Pet (Polyethylene Terephthalate) as an Alternative Sustainable Building Material." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 452(1). doi:10.1088/1755-1315/452/1/012108.
- Hama, Sheelan M., and Nahla N. Hilal. 2019. Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete *Fresh Properties of Concrete Containing Plastic Aggregate*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-0-08-102676-2.00005-0.
- Hannawi, Kinda, Siham Kamali-Bernard, and William Prince. 2010. "Physical and Mechanical Properties of Mortars Containing PET and PC Waste Aggregates." *Waste Management* 30(11): 2312–20. doi:10.1016/j.wasman.2010.03.028.
- Haouara, Selma, Leila Zeghichi, Ouarda Izemmouren, and Ikram Souici. 2024. "Influence of Aluminum Waste on the Thermo-Mechanical Properties of Lightweight Composite Mortars Based on Sand and Recycled High-Density Polyethylene." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 28(4): 844–58. doi:10.1080/19648189.2023.2229396.
- Herki, B. A., J. M. Khatib, and E. M. Negim. 2013. "Lightweight Concrete Made from Waste Polystyrene and Fly Ash." *World Applied Sciences Journal* 21(9): 1356–60. doi:10.5829/idosi.wasj.2013.21.9.20213.
- Hidalgo-Ruz, Valeria, and Martin Thiel. 2013. "Distribution and Abundance of Small Plastic Debris on Beaches in the SE Pacific (Chile): A Study Supported by a Citizen Science Project." *Marine Environmental Research* 87–88: 12–18. doi:10.1016/j.marenvres.2013.02.015.

- Holt, Erika, and Paula Raivio. 2005. "Use of Gasification Residues in Aerated Autoclaved Concrete." *Cement and Concrete Research* 35(4): 796–802. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.005.
- Hung, Chang Chi, Jung Nan Chang, Her Yung Wang, and Fu Lin Wen. 2022. "Effect of Adding Waste Polyethylene and GGBFS on the Engineering Properties of Cement Mortar." *Applied Sciences (Switzerland)* 12(24). doi:10.3390/app122412665.
- Hussain, Ayesha, Zafar Javed, Farzana Kishwa, Muhammad Kashif, Hafiz Muhammad, Zeeshan Raza, and Mehrin Farooq. 2020. "Impact of Single Use Polyethylene Shopping Bags on Environmental Pollution, a Comprehensive Review." 9(3): 1962–75. IS 13311 (Part 2). 1992. "Non-Destructive Testing of Concrete-Methods of Test Part 2: Rebound Hammer." *Bureau of Indian Standards*: 1–12.
- Ismail, Zainab Z., and Enas A. AL-Hashmi. 2008. "Use of Waste Plastic in Concrete Mixture as Aggregate Replacement." *Waste Management* 28(11): 2041–47. doi:10.1016/j.wasman.2007.08.023.
- Iucolano, F., B. Liguori, D. Caputo, F. Colangelo, and R. Cioffi. 2013. "Recycled Plastic Aggregate in Mortars Composition: Effect on Physical and Mechanical Properties." *Materials and Design* 52: 916–22. doi:10.1016/j.matdes.2013.06.025.
- Jacob-Vaillancourt, Colin. 2018. "Caractérisation Avancée et Valorisation Des Plastiques Mélangés Postconsommation Caractérisation Avancée et Valorisation Des Plastiques Mélangés Postconsommation Étude de Cas Chez Gaudreau Environnement Inc."
- Jacob-vaillancourt, Colin, and Luca Sorelli. 2018. "Characterization of Concrete Composites with Recycled Plastic Aggregates from Postconsumer Material Streams." *Construction and Building Materials* 182: 561–72. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.083.
- Jain, Abhishek, Salman Siddique, Trilok Gupta, Sudhir Jain, Ravi K. Sharma, and Sandeep Chaudhary. 2019. "Fresh, Strength, Durability and Microstructural Properties of Shredded Waste Plastic Concrete." *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering* 43: 455–65. doi : 10.1007/s40996-018-0178-0.
- Jaivignesh, B., and A. Sofi. 2017. "Study on Mechanical Properties of Concrete Using Plastic Waste as an Aggregate." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 80(1). doi:10.1088/1755-1315/80/1/012016.
- Jambeck, Jenna R., R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, and K. L. Law. 2015. "Entradas de Residuos Plásticos Desde La Tierra Al Océano." *Ciencia* 347(6223): 768–71.
- James, Karli, and Tim Grant. 2012. "LCA of Degradable Plastic Bags Centre for Design." : 17.
- Juki, Mohd Irwan, Mazni Awang, Mahamad Mohd Khairil Annas, Koh Heng Boon, Norzila Othman, Aeslina Abdul Kadir, Muhammad Asyraf Roslan, and Faisal Sheikh Khalid. 2013. "Relationship between Compressive, Splitting Tensile and Flexural Strength of Concrete Containing Granulated Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles as Fine Aggregate." *Advanced Materials Research* 795: 356–59. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.795.356.

- Kalogerakis, Nicolas, Katerina Karkanorachaki, G. Calypso Kalogerakis, Elisavet I. Triantafyllidi, Alexandros D. Gotsis, Panagiotis Partsinevelos, and Fabio Fava. 2017. "Microplastics Generation: Onset of Fragmentation of Polyethylene Films in Marine Environment Mesocosms." *Frontiers in Marine Science* 4(MAR): 1–15. doi:10.3389/fmars.2017.00084.
- Kan, M., and S. A. Miller. 2022. "TITLE : Environmental Impacts of Plastic Packaging of Food Products Center for Sustainable Systems, School for Environment and Sustainability , University of Michigan , Ann Arbor , MI , USA 48109 CORRESPONDING AUTHOR : Shelie A Miller 440 Church St ., An." *Resources, Conservation and Recycling* 180(734): 106156.
- Kaufmann, Josef, Kurt Frech, Philipp Schuetz, and Beat Münch. 2013. "Rebound and Orientation of Fibers in Wet Sprayed Concrete Applications." *Construction and Building Materials* 49: 15–22. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.051.
- Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., and F Van Woerden. 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Publications.
- Khadraoui, Mohamed Amine. 2019. Thèse de doctorat "Étude et Optimisation de La Façade Pour Un Confort Thermique et Une Efficacité Énergétique (Cas Des Bâtiments Tertiaires Dans Un Climat Chaud et Aride)." UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- Khadraoui, Mohamed Amine, and Leila Sriti. 2018. "The Impact of Facade Materials on the Thermal Comfort and Energy Efficiency of Offices Buildings." *Journal of Building Materials and Structures* 5(1): 55–64. doi:10.34118/jbms.v5i1.44.
- Khondoker Golam Tawhid. 2022. "Causes and Effects of Water Logging in Dhaka City." : 153–71. doi:10.1007/978-981-16-6966-8_8.
- Kou, S. C., G. Lee, C. S. Poon, and W. L. Lai. 2009. "Properties of Lightweight Aggregate Concrete Prepared with PVC Granules Derived from Scraped PVC Pipes." *Waste Management* 29(2): 621–28. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.014.
- Kvanthai, ING. 2020. "Factors Influencing the Reduction of Plastic Bag Consumption in Cambodian Supermarkets." *Insight: Cambodia Journal of Basic and Applied Research* 2(02): 89–118. doi:10.61945/cjbar.2020.2.2.4.
- Laiwang, Bin, Shang Hao Liu, Jen Hao Chi, Mao Sen Wen, and Chi Min Shu. 2020. "Safety Evaluation of Different Acids in High-Density Polyethylene Container Loading." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 63: 103991. doi:10.1016/j.jlp.2019.103991.
- De Larrard, F. 2000. *Structures Granulaires et Formulation Des Bétons*.
- Laukaitis, A., R. Žurauskas, and J. Keriene. 2005. "The Effect of Foam Polystyrene Granules on Cement Composite Properties." *Cement and Concrete Composites* 27(1): 41–47. doi:10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004.
- Liu, Feng, Yong Yan, Lijuan Li, Cheng Lan, and Gongfa Chen. 2015. "Performance of Recycled Plastic-Based Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 27(2). doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000989.

- Liu, Yiquan, Bo Siang Leong, Zhong Ting Hu, and En Hua Yang. 2017. "Autoclaved Aerated Concrete Incorporating Waste Aluminum Dust as Foaming Agent." *Construction and Building Materials* 148: 140–47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.047.
- Liu, Yiquan, Bo Siang Leong, and En Hua Yang. 2016. "Aluminum Dust Recycled as Aerating Agent for the Production of Autoclaved Aerated Concrete." *Sustainable Construction Materials and Technologies* 2016-Augus. doi:10.18552/2016/scmt4s222.
- Lukkassen, Dag, and Annette Meidell. 2007. *2 Advanced Materials and Structures and Their Fabrication Processes*.
- Makri, Chrysanthi, John N. Hahladakis, and Evangelos Gidarakos. 2019. "Use and Assessment of 'e-Plastics' as Recycled Aggregates in Cement Mortar." *Journal of Hazardous Materials* 379(February): 120776. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.120776.
- Malloy, R., M.G. Kashi, and C.W. Swan. 2003. "US6669773B2-Fly Ash, Mixed Plastic Aggregate and Products Made Therefrom.Pdf." *PDF* 2(12).
- Marzouk, O. Yazoghli, R. M. Dheilily, and M. Queneudec. 2007. "Valorization of Post-Consumer Waste Plastic in Cementitious Concrete Composites." *Waste Management* 27(2): 310–18. doi:10.1016/j.wasman.2006.03.012.
- Marzouk, O Y, R-M Dheilily, and M Queneudec. 2005. "REUSE OF PLASTIC WASTE IN CEMENTITIOUS CONCRETE COMPOSITES." *Cement Combinations for Durable Concrete*. doi:10.1680/ccfdc.34013.
- Mehta, P. Kumar, and Paulo J. M. Monteiro. 2001. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials Theoretical Concepts of Stress Wave Propagation in Solids*.
- Miller, Rachel Marie. 2012. "Plastic Shopping Bags: An Analysis of Policy Instruments for Plastic Bag Reduction."
- Mohammed, Azad A., Ilham I. Mohammed, and Shuaaib A. Mohammed. 2019. "Some Properties of Concrete with Plastic Aggregate Derived from Shredded PVC Sheets." *Construction and Building Materials* 201: 232–45. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.145.
- Mohammed, Hazha, Francesca Giuntini, Monower Sadique, Andy Shaw, and Ana Bras. 2022. "Polymer Modified Concrete Impact on the Durability of Infrastructure Exposed to Chloride Environments." *Construction and Building Materials* 317(October 2021): 125771. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125771.
- Mounanga, Pierre, W Gbongbon, Philippe Poullain, Ph Turcry, Pierre Mounanga, W Gbongbon, Philippe Poullain, and Ph Turcry Proportioning. 2008. "Proportioning and Characterization of Lightweight Concrete Mixtures Made with Rigid Polyurethane Foam Wastes To Cite This Version : HAL Id : Hal-01007225." : 0–9.
- Mustafa, Maher Al Tayeb, Ismail Hanafi, Rade Mahmoud, and B. A. Tayeh. 2019. "Effect of Partial Replacement of Sand by Plastic Waste on Impact Resistance of Concrete: Experiment and Simulation." *Structures* 20(June): 519–26. doi:10.1016/j.istruc.2019.06.008.

- Mutha, Nitin H., Martin Patel, and V. Premnath. 2006. "Plastics Materials Flow Analysis for India." *Resources, Conservation and Recycling* 47(3): 222–44. doi:10.1016/j.resconrec.2005.09.003.
- Muthu, Subramanian Senthilkannan, and Yi Li. 2014. "Manufacturing Processes of Grocery Shopping Bags." : 7–14. doi : 10.1007/978-981-4560-20-7_2.
- Naik, T. R., S. S. Singh, C. O. Huber, and B. S. Brodersen. 1996. "Use of Post-Consumer Waste Plastics in Cement-Based Composites." *Cement and Concrete Research* 26(10): 1489–92. doi : 10.1016/0008-8846(96)00135-4.
- Nanda, Sonil, and Franco Berruti. 2021. "Municipal Solid Waste Management and Landfilling Technologies: A Review." *Environmental Chemistry Letters* 19(2): 1433–56. doi : 10.1007/s10311-020-01100-y.
- Narayanan, N., and K. Ramamurthy. 2000. "Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review." *Cement and Concrete Composites* 22(5): 321–29. doi:10.1016/S0958-9465(00)00016-0.
- Nécira, Brahim. 2018. "Développement Des Bétons Autoplaçants à Hautes Performances: Influence de La Composition." UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- Nécira, Brahim, Abdelhamid Guettala, and Salim Guettala. 2017. "Study of the Combined Effect of Different Types of Sand on the Characteristics of High Performance Self-Compacting Concrete." *Journal of Adhesion Science and Technology* 4243(June): 0. doi:10.1080/01694243.2017.1289829.
- Neville, A.M. 2011. *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification Properties of Concrete*. doi : 10.4324/9780203967874-11.
- Nikbin, Iman M., Saman Rahimi R., Hamed Allahyari, and Mohammad Damadi. 2016. "A Comprehensive Analytical Study on the Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Bottom Ash as Natural Aggregate Replacement." *Construction and Building Materials* 121: 746–59. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.078.
- Njeru, Jeremia. 2006. "The Urban Political Ecology of Plastic Bag Waste Problem in Nairobi, Kenya." *Geoforum* 37(6): 1046–58. doi:10.1016/j.geoforum.2006.03.003.
- Nyathi, Brian, and Chamunorwa Aloius Togo. 2020. "Overview of Legal and Policy Framework Approaches for Plastic Bag Waste Management in African Countries." *Journal of Environmental and Public Health* 2020. doi:10.1155/2020/8892773.
- Omrane, M., A. S. Benosman, M. Mouli, and Y. Senhadji. 2016. "Use of Thermoplastic Polymer in Mortar Composites to Improve Its Chloride Penetration Resistance." *International Journal of Engineering Research in Africa* 22(January): 33–44. doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.22.33.
- Onuaguluchi, Obinna, and Daman K. Panesar. 2014. "Hardened Properties of Concrete Mixtures Containing Pre-Coated Crumb Rubber and Silica Fume." *Journal of Cleaner Production* 82: 125–31. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.068.
- Paraschiv, Spiru, Lizica Simona, and Alexandru Serban. 2021. "Increasing the Energy Efficiency of a Building by Thermal Insulation to Reduce the Thermal Load of the Micro-Combined Cooling, Heating and Power System." *Energy Reports* 7(May): 286–98.

- doi:10.1016/j.egy.2021.07.122.
- Poonyakan, Artid, Manaskorn Rachakornkij, Methi Wecharatana, and Watanachai Smittakorn. 2018. "Potential Use of Plastic Wastes for Low Thermal Conductivity Concrete." *Materials* 11(10): 1–17. doi : 10.3390/ma11101938.
- Prakash, T. M., and B. G. N. Kumar. 2013. "Strength and Elastic Properties of Aerated Concrete Block Masonry." *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 1. Problems, Job. 1947. "American Concrete." 43: 2008.
- Rahmani, E., M. Dehestani, M. H.A. Beygi, H. Allahyari, and I. M. Nikbin. 2013. "On the Mechanical Properties of Concrete Containing Waste PET Particles." *Construction and Building Materials* 47: 1302–8. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
- Rai, Baboo, S. Tabin Rushad, Bhavesh Kr, and S. K. Duggal. 2012. "Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer." *ISRN Civil Engineering* 2012: 1–5. doi:10.5402/2012/469272.
- Rajasekaran, Divya, and Pradip K. Maji. 2018. "Recycling of Plastic Wastes with Poly (Ethylene-Co-Methacrylic Acid) Copolymer as Compatibilizer and Their Conversion into High-End Product." *Waste Management* 74: 135–43. doi:10.1016/j.wasman.2018.01.018.
- Rebeiz, K. S., and A. P. Craft. 1995. "Plastic Waste Management in Construction: Technological and Institutional Issues." *Resources, Conservation and Recycling* 15(3–4): 245–57. doi:10.1016/0921-3449(95)00034-8.
- Remadnia, A., R. M. Dheilily, B. Laidoudi, and M. Quéneudec. 2009. "Use of Animal Proteins as Foaming Agent in Cementitious Concrete Composites Manufactured with Recycled PET Aggregates." *Construction and Building Materials* 23(10): 3118–23. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.027.
- REYNE, Maurice. 1998. "Les Plastiques." : 126.
- Rivers, Nicholas, Sarah Shenstone-Harris, and Nathan Young. 2017. "Using Nudges to Reduce Waste? The Case of Toronto's Plastic Bag Levy." *Journal of Environmental Management* 188: 153–62. doi:10.1016/j.jenvman.2016.12.009.
- S. Lo Presti, E. Martines. 2006. "US20060106191A1-PET Artificial Aggregate.Pdf." *PDF*.
- Safi, Brahim, Mohammed Saidi, Djamila Aboutaleb, and Madani Maallem. 2013. "The Use of Plastic Waste as Fine Aggregate in the Self-Compacting Mortars: Effect on Physical and Mechanical Properties." *Construction and Building Materials* 43: 436–42. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049.
- Saidan, Motasem N., Linah M. Ansur, and Hakam Saidan. 2017. "Management of Plastic Bags Waste: An Assessment of Scenarios in Jordan." *Journal of Chemical Technology and Metallurgy* 52(1): 148–54.
- Saikia, Nabajyoti, and Jorge De Brito. 2012. "Use of Plastic Waste as Aggregate in Cement Mortar and Concrete Preparation: A Review." *Construction and Building Materials* 34: 385–401. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.

- Saikia, Nabajyoti, and Jorge De Brito. 2013. "Waste Polyethylene Terephthalate as an Aggregate in Concrete." *Materials Research* 16(2): 341–50. doi : 10.1590/S1516-14392013005000017.
- Saikia, Nabajyoti, and Jorge De Brito. 2014. "Mechanical Properties and Abrasion Behaviour of Concrete Containing Shredded PET Bottle Waste as a Partial Substitution of Natural Aggregate." *Construction and Building Materials* 52: 236–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
- Sawyers, John P. 1995. "US5422051-Method for Recycling Plastic into Cementitious Building Products.Pdf." *PDF* (19).
- Scheffler, M., & Colombo, P. (2005). Cellular Ceramics. 2005. *Structure , Manufacturing ,*. De Schutter, G., and A. M. Poppe. 2004. "Quantification of the Water Demand of Sand in Mortar." *Construction and Building Materials* 18(7): 517-21. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.04.004.
- Senhadji, Y., G. Escadeillas, A. S. Benosman, M. Mouli, H. Khelafi, and S. Ould Kaci. 2015. "Effect of Incorporating PVC Waste as Aggregate on the Physical, Mechanical, and Chloride Ion Penetration Behavior of Concrete." *Journal of Adhesion Science and Technology* 29(7): 625–40. doi:10.1080/01694243.2014.1000773.
- Senthil Kumar, Kaliyavaradhan, and Kaliyamoorthy Baskar. 2015. "Recycling of E-Plastic Waste as a Construction Material in Developing Countries." *Journal of Material Cycles and Waste Management* 17(4): 718–24. doi : 10.1007/s10163-014-0303-5.
- Serranti, Silvia, and Giuseppe Bonifazi. 2018. Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete *Techniques for Separation of Plastic Wastes*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/B978-0-08-102676-2.00002-5.
- Shabbar, Rana, Paul Nedwell, and Zhangjian Wu. 2017. "Mechanical Properties of Lightweight Aerated Concrete with Different Aluminium Powder Content." *MATEC Web of Conferences* 120: 1–7. doi:10.1051/mateconf/201712002010.
- Shankar, Uday, and Anasuya Bandyopadhyay. 2022. "Plastics in High Chemical Resistant Applications." *Encyclopedia of Materials : Plastics and Polymers, Elsevier*, 4: 187-199,.
- Sharma, Raju, and Prem Pal Bansal. 2016. "Use of Different Forms of Waste Plastic in Concrete - A Review." *Journal of Cleaner Production* 112: 473–82. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.042.
- Shinohara, Nobuhiro, Masataro Okumiya, Tadashi Hotta, Kenji Nakahira, Makio Naito, and Keizo Uematsu. 2000. "Morphological Changes in Process-Related Large Pores of Granular Compacted and Sintered Alumina." *Journal of the American Ceramic Society* 83(7): 1633–40. doi:10.1111/j.1151-2916.2000.tb01442.x.
- Shubbar, Sawsan D A, and Aqeel S Al-Shadeedi. 2017a. "Utilization of Waste Plastic Bottles عن كبديل المستهلكة المياه عبوات استخدام الخرسانة في الناعم الركام المدرس شبر احمد ضياء سوسن As Fine Aggregate in Concrete الشديدي الدين صالح عقيل المدني والمهندس الهندسة كلي." *Kufa Journal of Engineering*
- Siddique, Rafat, Jamal Khatib, and Inderpreet Kaur. 2008. "Use of Recycled Plastic in Concrete: A Review." *Waste Management* 28(10): 1835–52. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.011.

- Da Silva, Alexandra M., Jorge De Brito, and Rosário Veiga. 2014. "Incorporation of Fine Plastic Aggregates in Rendering Mortars." *Construction and Building Materials* 71: 226–36. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026.
- Silva, R. V., J. De Brito, and Nabajyoti Saikia. 2013. "Influence of Curing Conditions on the Durability-Related Performance of Concrete Made with Selected Plastic Waste Aggregates." *Cement and Concrete Composites* 35(1): 23–31. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017.
- Sultana, S.K.A., K.S.B. Prasad, and K.S.B. Sultana, S.A., and Prasad. 2012. "Utilization of Waste Plastic as a Strength Modifier in Surface Course of Flexible and Rigid Pavements." *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* 2(4): 1185–91.
- Taoufik ACHOUR. 2007. "Étude De L'Influence De La Nature Des Granulats Sur Les Propriétés Des Bétons Hydrauliques : Cas Des Granulats Calcaires Tunisiens." *Thèse*.
- Tough, Rhian. 2007. "PLASTIC SHOPPING BAGS :"
- Tsai, Shen Lun, Keng Ta Lin, Chang Chi Hung, Her Yung Wang, and Fu Lin Wen. 2022. "Polyethylene (PE) Waste Minimization Study of Cement Mortar with Adding PE Content under Different W/B Ratios." *Buildings* 12(12). doi:10.3390/buildings12122117.
- Venkatarama Reddy, B. V., and Ajay Gupta. 2008. "Influence of Sand Grading on the Characteristics of Mortars and Soil-Cement Block Masonry." *Construction and Building Materials* 22(8): 1614–23. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.06.014.
- Verghese, K., M. Jollands, and M. Allan. 2009. "The Litterability of Plastic Bags: Key Design Criteria." *Society of Plastics Engineers - Global Plastics Environmental Conference, GPEC 2008* 1(November 2006): 536–69.
- Verma, Gaurav, Mohd Afaque, and Khan Abhishek. 2016. "Effect of Waste Plastic as Partial Replacement of Aggregate in Concrete Mixture : A Review." *International Research Journal of Engineering and Technology* 3(2): 1634–36.
- Wagner, Travis P. 2017. "Reducing Single-Use Plastic Shopping Bags in the USA." *Waste Management* 70: 3–12. doi:10.1016/j.wasman.2017.09.003.
- Wang, Ru, and Christian Meyer. 2012. "Performance of Cement Mortar Made with Recycled High Impact Polystyrene." *Cement and Concrete Composites* 34(9): 975–81. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014.
- Westerholm, Mikael, Björn Lagerblad, Johan Silfwerbrand, and Eric Forsberg. 2008. "Influence of Fine Aggregate Characteristics on the Rheological Properties of Mortars." *Cement and Concrete Composites* 30(4): 274–82. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008.
- Xu, Yi, Linhua Jiang, Jinxia Xu, and Yang Li. 2012. "Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Lightweight Aggregate Concrete and Brick." *Construction and Building Materials* 27(1): 32–38. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.030.
- Yamine, Joumana, Mohend Chaouche, Michel Guerinet, Micheline Moranville, and Nicolas Roussel. 2008. "From Ordinary Rheology Concrete to Self Compacting Concrete: A Transition between Frictional and Hydrodynamic Interactions." *Cement and Concrete Research* 38(7): 890–96. doi:10.1016/j.cemconres.2008.03.011.

- Yannick, Tchedele Langollo, and Mache Jacques Richard. 2022. "Properties of Sands of Different Geological Origins in Mortars."
- Yin, Shi, Rabin Tuladhar, Feng Shi, Mark Combe, Tony Collister, and Nagaratnam Sivakugan. 2015. "Use of Macro Plastic Fibres in Concrete: A Review." *Construction and Building Materials* 93: 180–88. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105.
- Yoon, Jinyoung, Hyunjun Kim, Taehoon Koh, and Sukhoon Pyo. 2020. "Microstructural Characteristics of Sound Absorbable Porous Cement-Based Materials by Incorporating Natural Fibers and Aluminum Powder." *Construction and Building Materials* 243: 118167. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118167.
- Záleská, Martina, Milena Pavlíková, Jaroslav Pokorný, Ondřej Jankovský, Zbyšek Pavlík, and Robert Černý. 2018. "Structural, Mechanical and Hygrothermal Properties of Lightweight Concrete Based on the Application of Waste Plastics." *Construction and Building Materials* 180: 1–11. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250.
- Zeghichi, L, Z Benghazi, and L Baali. 2014. "The Effect of the Kind of Sands and Additions on the Mechanical Behaviour of S.C.C." *Physics Procedia* 55: 485–92. doi:10.1016/j.phpro.2014.07.070.
- Zhang, Lianyang. 2013. "Production of Bricks from Waste Materials - A Review." *Construction and Building Materials* 47: 643–55. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043.
- Zhang, Zuhua, John L. Provis, Andrew Reid, and Hao Wang. 2014. "Geopolymer Foam Concrete: An Emerging Material for Sustainable Construction." *Construction and Building Materials* 56: 113–27. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
- Zhang, Zuhua, John L. Provis, Andrew Reid, and Hao Wang. 2015. "Mechanical, Thermal Insulation, Thermal Resistance and Acoustic Absorption Properties of Geopolymer Foam Concrete." *Cement and Concrete Composites* 62: 97–105. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013.
- Zulkernain, Nur Hanis, Paran Gani, Ng Chuck Chuan, and Turkeswari Uvarajan. 2021. "Utilisation of Plastic Waste as Aggregate in Construction Materials : A Review." *Construction and Building Materials* 296: 123669. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123669.