



Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Numéro de série.....

Numéro d'inscription.....

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des Matériaux

THEME

Valorisation des types de sable de dune de la région du Hodna pour l'élaboration des bétons polymères à base de déchets plastiques

Présentée Par

MEKIDECHE Salih

Soutenue le : 26/02/2025

Devant le jury composé de :

<u>Nom & Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Qualité</u>
BENHAMIDA Mohamed	Professeur	Univ. de M'sila	Président
RAHMOUNI Zine El Abidine	Professeur	Univ. de M'sila	Directeur de thèse
ROKBI Mansour	Professeur	Univ. de M'sila	Co-Directeur de thèse
AMROUNE Salah	Professeur	Univ. de M'sila	Examineur
BOUBAAYA Rabah	MCA	Univ. de BBA	Examineur
DJENDEL Mokhtar	MCA	Univ. de BBA	Examineur
TEBBAL Nadia	Professeur	Univ. de M'sila	Invitée

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Louange et merci à ALLAH, avant tout, de nous avoir donné la patience et la force de poursuivre le chemin académique et de recherche, avec la grâce de ALLAH.

*Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à mes encadrants, le Professeur **RAHMOUNI Zine El Abidine** et le Professeur **ROKBI Mansour**, pour leurs précieux conseils et leur soutien tout au long de mon parcours de recherche. J'apprécie grandement leurs soutiens et leurs rigueurs scientifiques tout au long de ce travail.*

*Je tiens également à adresser mes sincères remerciements aux membres de jury le professeur **BENHAMIDA Mohamed**, et aux examinateurs, le professeur **AMROUNE Salah**, le professeur **TEBBAL Nadia**, le professeur **BOUBAAYA Rabah** et le professeur **DJENDEL Mokhtar**. Je les remercie encore pour leur précieux soutien commentaires et conseils.*

*J'adresse mes sincères remerciements au Dr **KHALDOUNE Abderraouf**, responsable du Laboratoire de Moulage, pour m'avoir facilité mes tâches. Je remercie également tout le personnel du laboratoire de la Faculté de Technologie de l'Université Mohammed Boudiaf M'sila entre autres Mr **SALAMANI Brahim** et Mr **AOUFI Belkacem**.*

*Je remercie également Mr **MEKIDECHE Abdelkader**, et Mr **MESSEGUEM Meftah** et la société Lafarge pour leur soutien à mon égard en réalisant de analyses aux laboratoires.*

*Je remercie mon collègue Mr **MAHMOUDI Khaled**, chef atelier de tournage, d'avoir consacré son temps et son atelier à concrétiser l'idée de l'extrudeuse et à sa fabrication.*

*Tous nos remerciements vont à Mr **BAALI Brahim** et Mr **SAAI. Dj** pour leurs aimables collaborations.*

J'adresse mes plus hautes expressions de remerciement, de gratitude et de loyauté à mes honorables parents pour chaque grande et petite chose qu'ils m'ont apportée. J'adresse également mes remerciements à ma grande famille, mes frères et sœurs, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Enfin, j'adresse mes plus hautes expressions de gratitude à ma petite famille, Mahdi et sa mère, pour leur patience et leur soutien à mon égard tout au long de cette étape.

Salih MEKIDECHE

Résumé

Au cours de la dernière décennie, de nombreux types de déchets ont été exploités comme matières premières dans différentes industries. Les plastiques recyclés font partie des déchets nécessaires pour de nombreuses applications de génie civil. D'autre part, au sud de la région de Hodna à M'sila, il existe plusieurs carrières de sable de dunes. Cependant, cette énorme richesse n'est pas largement exploitée. Dans ce travail, nous avons tenté la valorisation des sables de dunes et les déchets plastiques, pour produire de matériaux de construction dans de nombreuses applications de construction. Tout d'abord, plusieurs matériaux tels que (déchets de polypropylène, polypropylène vierge, différents types de sable et déchets minéraux) ont été analysés à l'aide de l'ATR-FTIR, de la XRF ainsi que l'analyse granulométrique. D'autre part, des tests mécaniques et physiques tels que la résistance à la flexion en trois points, la résistance à la compression, l'absorption d'eau et l'observation visuelle ont été appliqués à différents échantillons composites produits. Les résultats ont été examinés et analysés. Les tests sur les composites développés ont montré que ces matériaux ont des propriétés mécaniques remarquables, notamment une résistance à la flexion et à la compression ainsi qu'une absorption d'eau minimale. D'autre part, nous avons conclu que l'ajout des fibres (végétale ou minérale) améliore d'une façon significative les performances des composites. Cette étude confirme la contribution à la valorisation des sables de dunes et des déchets plastiques dans l'industrie du bétons polymères.

Abstract

In the last decade, many types of waste have been exploited as raw materials in different industries. Recycled plastics are among the wastes needed for many civil engineering applications. On the other hand, in the south of Hodna region in M'sila, there are several dune sand quarries. However, this huge wealth is not widely exploited. In this work, we attempted to valorize dune sands and plastic wastes, to produce materials in many construction applications. First, several materials such as (polypropylene waste, virgin polypropylene, different types of sand and mineral wastes) were analyzed using ATR-FTIR, XRF and particle size analysis. On the other hand, mechanical and physical tests such as three-point bending strength, compressive strength, water absorption and visual observation were applied to different produced samples. The results were reviewed and analyzed. Tests on the developed composites showed that these materials have remarkable mechanical properties, including resistance to bending and compression as well as minimal water absorption. On the other hand, we concluded that the

addition of fibers (vegetable or mineral) significantly improves the performance of the composites. This study confirms the contribution to the recovery of dune sands and plastic waste in the polymer concrete industry.

الملخص

في العقد الماضي، تم استغلال العديد من أنواع النفايات كمواد خام في صناعات مختلفة. تعد المواد البلاستيكية المعاد تدويرها من بين النفايات اللازمة للعديد من تطبيقات الهندسة المدنية. من ناحية أخرى، توجد في جنوب منطقة الحضنة بالمسيلة العديد من مقالع رمال الكثبان الرملية. ومع ذلك، لا يتم استغلال هذه الثروة الضخمة على نطاق واسع. في هذا العمل، حاولنا ترمين رمال الكثبان الرملية والنفايات البلاستيكية، لإنتاج مواد للعديد من التطبيقات في مجال البناء. أولاً، تم تحليل العديد من المواد الأولية مثل (نفايات البولي بروبيلين، البولي بروبيلين البكر، أنواع مختلفة من الرمال والنفايات المعدنية) باستخدام ATR-FTIR و XRF وتحليل حجم الجسيمات. ومن ناحية أخرى، تم تطبيق الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية مثل قوة الانحناء ثلاثية النقاط وقوة الضغط وامتصاص الماء وكذا الملاحظة المجهرية على عينات مختلفة تم تصنيعها. بعد مراجعة النتائج وتحليلها. أظهرت الاختبارات على المركبات المطورة أن هذه المواد تتمتع بخصائص ميكانيكية ملحوظة، بما في ذلك مقاومة الانحناء والضغط بالإضافة إلى امتصاص الماء الأدنى. ومن ناحية أخرى، توصلنا إلى أن إضافة الألياف (النباتية أو المعدنية) تعمل على تحسين أداء المركبات بشكل ملحوظ. وتؤكد هذه الدراسة على المساهمة في استعادة رمال الكثبان الرملية والنفايات البلاستيكية في صناعة الخرسانة البوليمرية.

Table des matières

Remerciements	
Résumé	
Abstract	
<i>الملخص</i>	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	13
Chapitre I: Revue de littérature	
I.1. Historique	18
I.2. Effet du taux de plastique	19
I.3. Effet du type de plastique	24
I.4. Effet de type de sable	25
I.5. Effet de taille des grains	27
Chapitre II: Généralités sur le recyclage et les déchets	
II.1. Introduction	33
II.2. Définition du recyclage	33
II.3. Classification de recyclage	34
II.3.1. Recyclage mécanique	34
II.3.2. Recyclage chimique	35
II.3.3. Recyclage énergétique	35
II.4. Notions de déchets	36
II.4.1. Définition du déchet	36
II.4.2. Différents types de déchets	37
II.4.2.1. Déchets solides municipaux	37
II.4.2.2. Déchets industriels	37
II.4.2.3. Déchets dangereux	38

II.4.2.4. Déchets biodégradables	38
II.4.2.5. Déchets électroniques.....	39
II.4.2.6. Déchets de construction et de démolition.....	39
II.4.2.7. Déchets médicaux	40
II.5. Les plastiques	40
II.5.1. Définition	40
II.5.1. Classification des plastiques.....	41
II.5.1.1. PETE ou PET (polyéthylène téréphtalate).....	41
II.5.1.2. PEHD (polyéthylène haute densité)	41
II.5.1.3. PVC (Polychlorure de vinyle).....	42
II.5.1.4. LDPE (polyéthylène basse densité).....	42
II.5.1.5. PP (Polypropylène)	42
II.5.1.6. PS (Polystyrène).....	43
II.5.1.7. Plastiques divers.....	43
II.6. Processus de recyclage des déchets plastiques	44
II.6.1. Collecte et récupération des déchets	44
II.6.2. Séparation et tri.....	44
II.6.3. Déchiquetage	45
II.6.4. Nettoyage	45
II.6.5. Remodelage des matières premières	46
II.6.6. Fabrication.....	46
II.7. Avantages et inconvénients du recyclage.....	46
II.7.1. Avantages du recyclage	46
II.7.2. Inconvénients du recyclage	48
II.8. Conclusion	49

Chapitre III: Bétons polymères à base de déchet plastique : Application

III.1. Introduction.....	51
III.2. Définition de bétons polymères	51
III.3. Classification des bétons polymères	52
III.4. Différent Types de polymère	53
III.4.1. Thermoplastiques	53
III.4.2. Thermodurcissable.....	54
III.4.3. Élastomères	54

III.5. Propriétés des polymères	54
III.5.1. Propriétés mécaniques des polymères thermoplastiques et thermodurcissables.	54
III.6. Constituants et domaines d'applications des bétons polymères	55
III.6.1. Matériau de liaison	55
III.6.2. Granulats	56
III.7. Applications des bétons polymères à base de déchet plastique	56
III.7.1. Pavage et construction de routes	56
III.7.2. Tuiles de routes.....	58
III.7.3. Briques de construction	59
III.7. Conclusion	61

Chapitre IV: Travaux Expérimentaux

IV.1. Introduction.....	63
IV.1.2. Principe de l'extrusion	64
IV.1.3. Types d'extrusion plastique.....	64
IV.1.4. Conception d'une extrudeuse	65
IV.2. Partie 01 : Caractéristiques des déchets PP.....	69
IV.2.1. Matières premières.....	69
IV.2.2. ATR-FTIR du PP.....	70
IV.2.3. Préparation des échantillons	71
IV.2.4. Essais mécaniques.....	71
IV.3. Partie 02 : Effet de type de sable.....	72
IV.3.1. Matières premières.....	72
IV.3.2. Analyse des matériaux	73
IV.3.2.1. ATR-FTIR du sable	73
IV.3.2.2. Composition chimique	73
IV.3.2.3. Analyse granulométrique.....	74
IV.3.3. Préparation des échantillons BP	75
IV.3.4. Test d'absorption d'eau	76
IV.3.5. Essais mécaniques.....	76
IV.3.6. Analyse ATR-FTIR	77
IV.3.7. Analyse optique	78
IV.4. Partie 03 : Effet des déchets minéraux	78
IV.4.1. Matières premières.....	78

IV.4.2. Analyse des matériaux	80
IV.4.2.1. Analyse ATR-FTIR.....	80
IV.4.2.2. Composition chimique	80
IV.4.3. Fabrication du BP	81
IV.4.3. Essais mécaniques.....	82
IV.4.4. Test d'absorption d'eau	83
IV.5. Partie 04 : Effet de renforcement par fibres	83
IV.5.1. Matières premières.....	84
IV.5.2. Fabrication du BP	85
IV.5.3. Essais mécaniques.....	86
Chapitre V: Résultat et discussion	
V.1. Partie 1 : Caractéristiques des déchets de polypropylène	89
V.1.1. ATR-FTIR du PP.....	89
V.1.2. Résistance à la flexion.....	90
V.1.3. Résistance à la traction.....	92
V.2. Partie 2 : Effet de type de sable	94
V.2.1. Composition chimique du sable.....	94
V.2.2. ATR-FTIR du sable	94
V.2.3. Analyse granulométrique.....	96
V.2.4. Absorption d'eau du BP	98
V.2.5. Résistance à la flexion du BP	98
V.2.6. Résistance à la compression DU BP	101
V.2.7. ATR-FTIR du BP	103
V.2.8. Microscopie du facies du BP	105
V.3. Partie 3 : Effet des déchets minéraux.....	106
V.3.1. Composition chimique des déchets minéraux.....	106
V.3.2. Absorption d'eau	107
V.3.3. Résistance à la flexion.....	108
V.3.4. Résistance à la compression	111
V.4. Partie 4 : Effet de renforcement par fibres	112
V.4.1. Effet de l'ajout des fibres sur la rupture du BP.....	112
V.5. Conclusions	116
Conclusions générales.....	118
Références :	120

Liste des figures

Figure 1. Représentation de l'évolution de recherche sur le « recyclage des déchets plastiques » selon la base de données Science Direct.....	14
---	----

Chapitre I: Revue de littérature

Figure I.1. Courbe contrainte-déformation.....	20
Figure I.2. Effet de la variation de la proportion de sable sur la résistance à la compression	21
Figure I.3. Relation charge-déformation des briques SPW et des briques en terre cuite	22
Figure I.4. Résistance à la flexion des déchets de plastique PET et du composite de sable	23
Figure I.5. Images des matières premières : a cendre de balle de riz, b sable, c PEBD, d PEHD, e PP	24
Figure I.6. Validation du mélange de matériaux composites plastiques pour la construction	25
Figure I.7. Résistance à la compression des blocs de pavage en sable de fosse plastique et en sable de mer plastique	26
Figure I.8. Résistance à la traction des blocs de pavage en sable de fosse plastique et en sable de mer plastique	26
Figure I.9. Distribution granulométrique du sable échantillonné et des matériaux granulaires utilisés pour la préparation du MPB	28
Figure I.10. Effet de la variation des proportions de sable et de la taille des particules sur la résistance à la compression de	29
Figure I.11. (a) Modifications structurelles du réseau dans le sable lié au LDPE montrant l'augmentation de la porosité et la diminution du volume de liant autour des grains de sable à mesure que la taille des particules de sable augmente ; (b) Variation de la microstructure du sable lié au LDPE montrant la réduction du volume et de l'épaisseur de la pâte liante encapsulant les grains de sable à mesure que les proportions de sable augmentent	31

Chapitre II: Généralités sur le recyclage et les déchets

Figure II.1. Symbole du recyclage.....	34
Figure II.2. Processus de recyclage mécanique	35
Figure II.3. Processus de recyclage chimique	35
Figure II.4. Processus de recyclage énergétique	36
Figure II.5. Différents types de déchets solides.....	37
Figure II.6. Différents types de déchets industriels.....	37
Figure II.7. Différents types de déchets dangereux.....	38
Figure II.8. Différents types de déchets biodégradables	38
Figure II.9. Déchets électroniques	39
Figure II.10. Déchets de construction	39
Figure II.11. Différents déchets de médicaux.....	40
Figure II.12. Codes d'identification des résines plastique	43
Figure II.13. Poubelles au bord de la rue	44
Figure II.14. Broyage des déchets plastiques	45
Figure II.15. Nettoyage des déchets plastiques.....	45
Figure II.16. Recyclage du plastique en granulés	46

Chapitre III: Bétons polymères à base de déchet plastique : Application

Figure III.1. Béton polymère	52
Figure III.2. Classification des systèmes et composés de béton et de polymères	53
Figure III.3. Quelque produit par élastomères	54
Figure III.4. Paver de routes : Echantillons	57
Figure III.5. Échantillon de pavé	57
Figure III.6. Exemple de cour de maison à Bamako avec des pavés autobloquants échantillons avec des déchets plastiques fondus	58
Figure III.7. Formation des tuiles à partir de sable lié plastiquement	58
Figure III.8. Échantillons de briques en plastique fabriquées	59
Figure III.9. Briques fabriquées à partir de déchets plastiques et de sable	60
Figure III.10. Plastic/Sand Roof and pavement tiles	60
Figure III.11. Polymères et tuiles artificielles	61

Chapitre IV: Travaux Expérimentaux

Figure IV.1. Système d'entraînement de l'axe	65
Figure IV.2. Système d'alimentation de matières	66
Figure IV.3. Système d'alimentation de matières	66
Figure IV.4. Éléments d'armoire électrique	67
Figure IV.5. L'extrudeuse dans son état final	68
Figure IV.6. Déchets plastiques en polypropylène	69
Figure IV.7. ATR-FTIR Spectromètre	71
Figure IV.8. Éprouvettes d'essai de traction et de flexion	71
Figure IV.9. Machine d'essai Universal YLE TM/20 kN	72
Figure IV.10. Carte de la province de M'sila montrant les régions où les dunes de sable	73
Figure IV.11. Instrument XRF Bruker S8 Tiger	74
Figure IV.12. Tamiseuse électrique	74
Figure IV.13. Méthodologie de fabrication du BP	75
Figure IV.14. Essais mécaniques	77
Figure IV.15. Préparation de chamotte	79
Figure IV.16. Tamisage de la poudre de marbre	80
Figure IV.17. Echantillons de différents types de chamotte et marbre :	80
Figure IV.18. Différents échantillons	82
Figure IV.19. a) Flexion trois points ; b) Compression	82
Figure IV.20. a) Séchage L'échantillon dans une étuve ; b) Echantillons immergés dans de l'eau	83
Figure IV.21. Morceaux de fibres longueur 10 mm et 30 mm	84
Figure IV.22. Méthodologie de fabrication des échantillons semi-circulaires (SCB)	85
Figure IV.23. Méthodes de création de fissures	86
Figure IV.24. Essai de flexion trois points des éprouvettes SCB	87

Chapitre V: Résultat et discussion

Figure V.1. Spectres ATR-FTIR de PP a) Déchet PP, b) PP Vierge	89
Figure V.2. Superposition des courbes (P- δ) des échantillons de polypropylène vierge	91
Figure V.3. Courbe contrainte-déformation de flexion PP-V et PP-W	91
Figure V.4. Evaluation de : a) Contrainte de flexion, b) Déformation de flexion	92
Figure V.5. Courbe contrainte-déformation de traction PP-V et PP-W	93
Figure V.6. Evaluation de : a) Contrainte de traction, b) Déformation de traction	93
Figure V.7. Spectre ATR-FTIR de différents sables	95
Figure V.8. Courbe de distribution granulométrique pour différents sables	97

Figure V.9. Courbes d'essai de flexion montrant les courbes charge-déflexion des matériaux.....	99
Figure V.10. Propriétés de flexion de différents matériaux de sable liés au plastique	100
Figure V.11. Comportement à la compression des matériaux à base de sable lié plastique testés.....	102
Figure V.12. Spectres ATR-FTIR des BP	103
Figure V.13. Spectres ATR-FTIR des déchets PP, sable « Type D » et Mat D	104
Figure V.14. Image microscopique optique des surfaces de rupture des échantillons d'essai de flexion ..	105
Figure V.15. Evaluation d'absorption d'eau pour différents échantillons	108
Figure V.16. Courbes charge-déplacement d'essai de flexion de différents matériaux.....	109
Figure V.17. Evaluation des contraintes de flexion.....	110
Figure V.18. Evaluation des taux de déformation.....	110
Figure V.19. Courbes contrainte-déformation d'essai de compression de Mat MR 25%	111
Figure V.20. Contraintes moyennes de compression des bétons polymères.....	112
Figure V.21. Courbes charge-déplacement d'essai de flexion sur les échantillons SCB.....	113
Figure V.22. Evaluation de ténacité à la rupture pour les échantillons SCB	114
Figure V.23. Trajectoires de rupture des bétons polymères	116

Liste des tableaux

Chapitre I: Revue de littérature

Tableau I. 1. Résistance à la compression du sable plastique.....	23
---	----

Chapitre III: Bétons polymères à base de déchet plastique : Application

Tableau III. 1. Propriétés mécaniques et physiques de quelques polymères	55
--	----

Chapitre IV: Travaux Expérimentaux

Tableau IV. 1. Caractéristiques de l'extrudeuse	68
Tableau IV. 2. Formulation d'échantillons de composites de sable liés au plastique.....	76
Tableau IV. 3. Taux de chaque composante.....	81
Tableau IV. 4. Composition de l'échantillon.....	85

Chapitre V: Résultat et discussion

Tableau V. 1. Principales bandes d'absorption FTIR et les vibrations de liaison associées du PP.	90
Tableau V. 2. Composition chimique du sable de silice	94
Tableau V. 3. Principales bandes d'absorption IR et vibrations de liaison associées du sable.....	96
Tableau V. 4. Analyse quantitative des plages de diamètres granulométriques pour différents sables	97
Tableau V. 5. Absorption d'eau des échantillons de BP	98
Tableau V. 6. Résultats des essais de flexion des échantillons de sable liés au plastique testés	101
Tableau V. 7. Résultats des essais de compression des échantillons de BP.....	103
Tableau V. 8. Propriétés chimiques des échantillons.....	106

Liste des symboles

PEHD	Polyéthylène haute densité.
PELD	Polyéthylène basse densité.
PET	Polyéthylène téréphtalate.
PP	Polypropylène.
PVC	Polychlorure de vinyle.
PS	Polystyrène.
Ec	Modules élastiques longitudinale en compression.
Ef	Modules élastiques en flexion.
BP	Bétons polymères.
XRF	Spectroscopie de fluorescence X.
ATR-FTIR	Transformée de Fourier à réflectance totale atténuée.
Mat	Matériaux.
MS	M'sila.
BB	Bourdj Bou Arreridj.
BO	Bou Saada.
MR	Marbre.
PP-V	Polypropylène déchets.
PP-W	Polypropylène vierge.
SCB	Semi-Circular Bend.
K_I	Facteur d'intensité de contrainte mode I.
σ	Contrainte axiale.
Y	Facteur de forme.
P	<i>Charge appliquée.</i>
r	<i>Rayon de l'échantillon.</i>
t	<i>Épaisseur de l'échantillon.</i>
a	<i>Longueur de la fissure.</i>
P- δ	Charge-déplacement.
PAF	Perte au feu.
PC- VF	Polymer Concrete- Vegetable fibers.
PC- GF	Polymer Concrete- Glass fibers.
PC	Polymer Concrete.

Introduction Générale

Introduction générale

Ces dernières années, la production et l'utilisation de plastique ont considérablement augmenté à l'échelle mondiale. Cette augmentation peut être attribuée au rôle vital que jouent les plastiques dans divers aspects de notre vie quotidienne [1-3], notamment l'emballage, l'électronique, les articles ménagers, l'agriculture, les transports, la médecine, la tuyauterie, l'isolation et la construction de meubles [4]. La production de plastique a augmenté de manière remarquable au cours des quinze dernières années. Bien que de nombreuses initiatives aient été mises en œuvre pour réglementer le domaine de plastiques, les rapports indiquent une augmentation continue de sa production. De deux millions de tonnes en 1950, elle est passée à 367 millions de tonnes en 2020. Les projections suggèrent que la production mondiale cumulée de plastique pourrait grimper à 2 600 millions de tonnes par an d'ici 2050, à moins qu'un consensus mondial ne soit trouvé pour interdire sa prolifération [5]. L'intérêt croissant pour le plastique découle de ses nombreux avantages, tels que sa légèreté, son étanchéité, sa flexibilité, sa durabilité et son bon rapport coût-efficacité.

Cependant, ces avantages s'accompagnent d'inconvénients importants, notamment de mauvaises propriétés mécaniques, une non-biodégradabilité et une sensibilité aux changements de température [6]. L'un des problèmes les plus urgents associés à l'utilisation du plastique est l'accumulation de déchets plastiques dans le monde entier, qui représente un lourd fardeau environnemental en raison de sa résistance aux processus de dégradation naturels [7]. Ces déchets contaminent le sol et l'eau et obstruent les égouts pluviaux et les systèmes de drainage des villes, entraînant des inondations, des dommages matériels et parfois des décès [8]. De plus, ils contribuent à la prolifération d'insectes porteurs de maladies comme les moustiques [9, 10]. Par conséquent, les scientifiques se concentrent de plus en plus depuis plusieurs années sur la recherche de solutions au problème des déchets plastiques.

Les recherches sur les déchets plastiques ont examiné en profondeur et longuement débattu d'un large éventail d'alternatives pour leur élimination [6, 11]. Les méthodes les plus couramment utilisées comprennent le recyclage mécanique, l'incinération et la mise en décharge [11-13]. Cependant, il est largement reconnu que la mise en décharge et l'incinération traditionnelles peut avoir des effets environnementaux négatifs [14]. L'enfouissement des déchets, par exemple, peut entraîner une pollution à long terme des sols, des eaux souterraines et des eaux de surface à proximité [4]. D'autre part, l'incinération peut produire des sous-produits nocifs tels que des gaz toxiques (par exemple, le monoxyde de carbone, les furanes et les hydrocarbures aromatiques polycycliques), qui présentent des risques de toxicité localisée pour les humains et l'environnement, et peuvent perturber les habitats des espèces animales voisines

[15]. De plus, l'accumulation de cendres contenant des quantités importantes de microplastiques au fond des incinérateurs constitue une menace pour les écosystèmes [6]. En revanche, le recyclage mécanique des déchets plastiques apparaît comme une solution respectueuse de l'environnement.

Au cours de la dernière décennie, on a assisté à une augmentation notable des publications de recherche axées sur le « recyclage des déchets plastiques ».

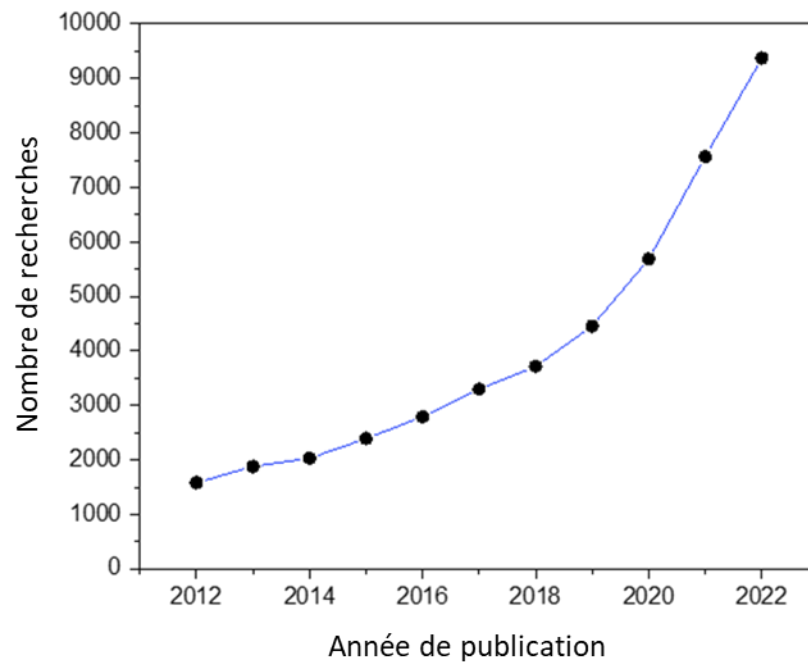


Figure 1. Représentation de l'évolution de recherche sur le « recyclage des déchets plastiques » selon la base de données Science Direct.

La tendance illustrée par la Figure 1 peut être attribuée au fait que le recyclage mécanique reste le moyen le plus financièrement viable de recycler les déchets plastiques, avec des préoccupations minimales concernant la pollution de l'environnement [1, 6, 7, 16]. Cependant, le taux de valorisation des déchets plastiques reste relativement faible, et ce, à cause de la faible valeur économique du plastique recyclé et du manque de support technique [17]. À l'échelle mondiale, seulement 20 % environ des déchets plastiques sont actuellement recyclés [18]. Malgré les taux relativement faibles de collecte et de recyclage des déchets plastiques, le plastique recyclé est toujours utilisé dans divers secteurs tels que la construction, les articles ménagers, l'électronique, les tissus en plastique, etc. [19]. L'utilisation de déchets plastiques dans le génie civil, en particulier dans les projets de construction, apparaît comme une voie importante pour leur récupération et leur recyclage [20]. Par conséquent, ce secteur suscite un intérêt croissant pour le développement de matériaux plus respectueux de l'environnement. Cependant, la majorité des études dans ce domaine tendent à se concentrer davantage sur l'incorporation des déchets plastiques comme matières premières [10, 21, 22], fibres [23] ou

comme adjuvants dans le béton [24], tandis que les recherches sur l'utilisation des déchets plastiques comme liant dans les produits en béton sont relativement rares.

De nos jours, le polypropylène (PP) est l'un des plastiques les plus utilisés, et il est généralement plus rigide et plus résistant [25, 26]. De plus, le polypropylène est également connu pour avoir plus de propriétés chimiques et thermodurcissables et une meilleure flexibilité et ténacité à température normale par rapport à certains autres matériaux thermoplastiques tel que le polyéthylène [27, 28]. Pour cette raison, une grande quantité de déchets de polypropylène peut être recyclée et peut également être utilisée pour remplacer le plastique vierge dans diverses applications techniques.

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été menées pour utiliser le mélange de déchets plastiques (HDPE, LDPE et PET) avec du sable pour produire des matériaux de construction alternatifs tels que les pavés [8, 10, 20, 29, 30] et des briques de pierre [31, 32]. Cependant, seuls quelques chercheurs ont travaillé sur la combinaison de déchets de polypropylène et de sable pour fabriquer des matériaux légers tels que des briques en plastique [33]. En outre, de nombreuses études impliquant le sable pour le développement de matériaux manquent d'exploration détaillée de l'effet des différents types de sable utilisés.

La thèse se compose d'une introduction générale en plus de cinq chapitres. Voici un bref commentaire sur le contenu de ces chapitres :

Le chapitre I couvre une revue générale de la littérature relative à l'effet des ratios plastiques, à l'effet du type de plastique, à l'effet du type de sable et à l'effet de la taille des grains de sable sur le béton polymère à travers des recherches liées au sujet de notre recherche.

Le chapitre II met en évidence les méthodes de base du recyclage, et met également en évidence les différents types de déchets en plus des différentes méthodes de traitement des déchets.

Au cours du chapitre III, de nombreux points concernant le béton polymère ont été abordés. Des définitions ont été données sur le béton polymère et ses classifications, et les types de polymères ont également été expliqués. Les composés de base du béton polymère ont également été expliqués. Enfin, les différentes utilisations du béton polymère dans diverses constructions ont été abordées.

Le chapitre IV traite les différentes étapes expérimentales, où dans la première étape, un aperçu a été donné sur l'extrusion de plastique en plus d'expliquer les différentes pièces et composants de l'extrudeuse qui a été réalisée, quant à la deuxième étape du travail, elle s'est concentrée sur la détermination des propriétés des déchets de polypropylène et le

polypropylène vierge, tandis que pendant la troisième étape, les types de sable ont été abordés en préparant du béton polymère avec quatre types de sable de différentes régions, quant à la quatrième étape, l'effet des déchets minéraux sur le béton polymère a été étudié, où trois différents types de déchets de briques (chamotte) ont été examinés, ainsi que des déchets de marbre dans le béton polymère, quant à la cinquième et dernière étape, l'effet des fibres sur le renforcement du béton polymère a été étudié en utilisant des fibres végétales et des fibres de verre.

Au cours du chapitre V, nous avons présenté et discuté les différents résultats d'analyses et de tests effectués sur les matières premières. Nous avons également traité les différents résultats des tests mécaniques et physiques et nous avons résumés sous forme de graphiques et de tableaux, et nous avons expliqué, analysé et discuté les différents résultats obtenus.

Chapitre I

Revue de littérature

I.1. Historique

Le béton polymère est considéré comme l'un des types de matériaux composites, c'est-à-dire lorsque des polymères sont mélangés et combinés avec des granulats tels que du sable, du gravier ou de la pierre concassée dans certaines conditions [34]. Ces matériaux sont reconnus pour leur durabilité et leur haute résistance, en plus de leur résistance aux produits chimiques et à la corrosion. L'histoire du béton polymère remonte à plusieurs décennies, durant lesquelles il a connu de nombreuses évolutions. Le concept de béton polymère est apparu vers le milieu du siècle dernier, époque à laquelle les chercheurs cherchaient à améliorer les propriétés du béton traditionnel, qui repose principalement sur le ciment, et ont commencé à expérimenter l'utilisation de résines polymères comme alternative au ciment [35]. Au cours des années 1960 et 1970, des progrès significatifs ont été notés dans la formulation et le développement de systèmes de production de béton polymère destinés à diverses applications, notamment la construction, les infrastructures, les environnements marins et le confinement chimique. À cette époque, de nombreux types différents de résines polymères, telles que comme le polyester et l'époxy, ont été examinés pour s'assurer de sa compatibilité avec les granulats et de sa capacité à fournir de bonnes propriétés. Vint ensuite une autre phase qui dura encore deux décennies, au cours de laquelle le béton polymère gagna du terrain dans les applications industrielles en raison de ses propriétés étonnantes à l'époque, telles que sa résistance exceptionnelle aux produits chimiques, à la corrosion et aux chocs. Son utilisation dans les usines de traitement chimique, les installations de traitement des eaux usées et les infrastructures de transport s'est avérée avoir une grande capacité à résister aux environnements difficiles et à réduire les coûts de maintenance dans ces industries. Les progrès réalisés au fil des ans dans la science des matériaux et la technologie des polymères ont également conduit à de nouvelles améliorations du béton polymère. Les chercheurs se sont concentrés sur l'amélioration des propriétés et des types de polymères, sur la recherche de meilleures combinaisons d'agrégats, en plus du développement et de l'amélioration des techniques de fabrication [36]. Ces développements ont conduit à diverses augmentations de la résistance du béton polymère. Son application a été largement utilisée dans divers domaines, tels que la construction d'étages industriels, de tabliers de ponts, de quais ferroviaires et de structures de stationnement. Il est également utilisé pour fabriquer des éléments préfabriqués, tels que des tuyaux, des couvercles de regards et des réservoirs de stockage de produits chimiques [37]. Le développement du béton polymère s'est poursuivi au cours de la dernière décennie, avec des recherches en cours axées sur l'amélioration de ses propriétés et l'exploration de nouvelles applications. Les chercheurs ont étudié l'intégration de matériaux plastiques, en particulier ceux utilisés, pour améliorer la résistance,

la ductilité et la durabilité environnementale. L'accent croissant mis sur la flexibilité des infrastructures et le besoin de matériaux durables devraient conduire à de nouveaux progrès dans le domaine du béton polymère.

I.2. Effet du taux de plastique

Afin de connaître le pourcentage de plastique utilisé dans le béton polymère qui donnera les meilleurs résultats en termes de propriétés mécaniques et physiques, de nombreux chercheurs ont étudié ce point dans leurs recherches. Dans une étude menée par [Amey, et al. \[38\]](#), elle visait à évaluer les déchets plastiques à la recherche d'une composition de mortier idéale constituée principalement de sacs plastiques fondus et de sable limoneux du Togo. Des échantillons de ce mélange ont été préparés avec des pourcentages allant de 7% à 28% du taux de plastique. Les propriétés mécaniques et physiques des échantillons ont été étudiées. Les résultats ont montré que les taux de plastique dans le mélange, qui variaient entre 16 et 22 %, présentaient une bonne résistance à la compression, allant d'environ 10,3 MPa et une bonne résistance à la traction par flexion était d'environ 5,3 MPa et par fendage variait d'environ 1,4 MPa, aussi la résistance au cisaillement par fendage est de 2,2 MPa avec taux de plastique de 16%. La valeur des modules élastiques longitudinaux (E_c) en compression atteint 3800 MPa et en flexion (E_f) elle atteint environ 700 MPa à une teneur en plastique de 22 %. D'autre part, les propriétés physiques d'absorption d'eau ont montré que les échantillons deviennent résistants à l'eau et que le pourcentage d'absorption d'eau qu'ils contiennent est nul par rapport au contenu du matériau lorsqu'on utilise un taux de plastique estimé à 18 % ou plus.

Dans une autre étude, l'objectif était de déterminer une valeur standard pour le coefficient de Poisson, qui permet, grâce à des tests par ultrasons, de calculer le module d'Young et de prédire la résistance à la compression des mélanges plastique-sable. Au cours de laquelle deux méthodes de tests ont été utilisées, à savoir la pression directe et l'examen par ultrasons, sur des échantillons contenant différents taux de plastique compris entre 15%, 20%, 25%, 30%, 35% et 40% de déchets de LDPE. La valeur de compression et le module d'Young ont été déterminés expérimentalement pour les échantillons étudiés ([Figure I.1](#)). Il a été observé que le module élastique augmente jusqu'à atteindre son maximum à 25% du taux de plastique, où sa valeur atteint 4393 MPa. Le rapport de compression le plus élevé a été obtenu dans des échantillons contenant 30 % de taux de plastique, atteignant 29,81 MPa [\[39\]](#).

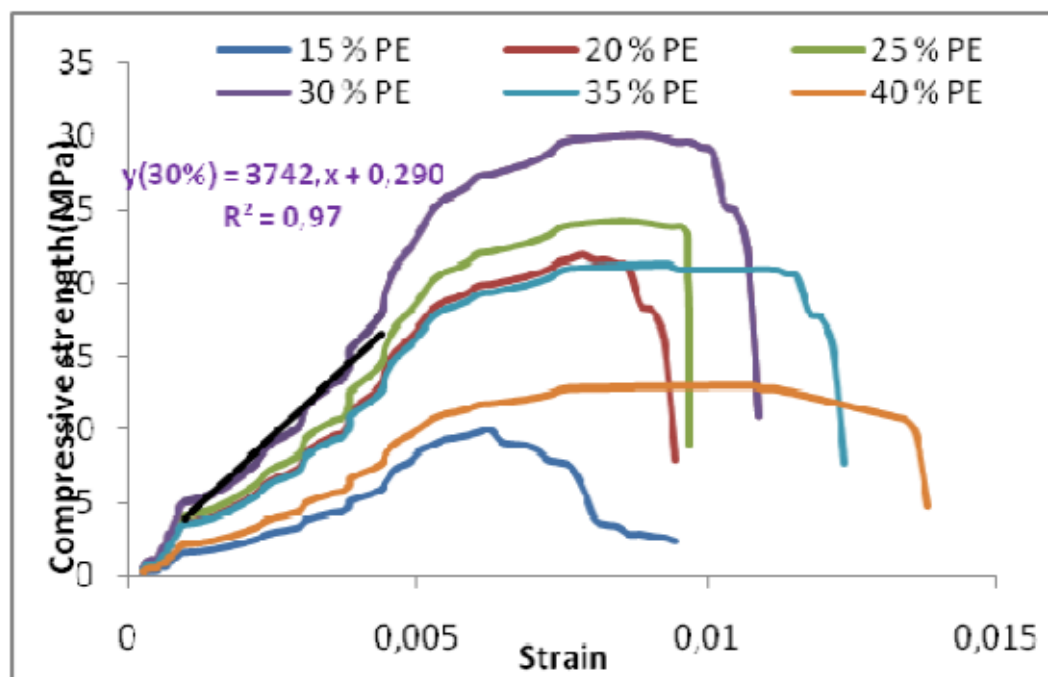


Figure I.1. Courbe contrainte-déformation [39]

Dans une recherche menée par Jnr, et al. [8] sur le recyclage de sacs d'eau en polyéthylène basse densité pour former des blocs de sable en plastique, au cours de laquelle plusieurs ratios ont été utilisés dans la préparation d'échantillons pour étudier l'effet des ratios sable/plastique, les conceptions de mélange pour les échantillons comprenaient variations du rapport sable/plastique en fonction du poids et du pourcentage de sable en poids. Les pourcentages utilisés dans les expériences étaient de 50,0 %, 66,7 %, 75,0 %, 80,0 %, 83,3 % et 85,7 % en poids. Les propriétés mécaniques de blocs de sable liés au LDPE ont été étudiées. L'étude a révélé que l'ajout de sable pour obtenir la résistance à la compression maximale s'élevait à environ 75 % en poids, ce qui signifie que le taux de plastique était de 25 %. Ce pourcentage a donné une résistance à la compression maximale de 27,3 MPa, ce qui indique que ce pourcentage a donné les meilleurs résultats (Figure I.2), en termes de propriétés mécaniques.

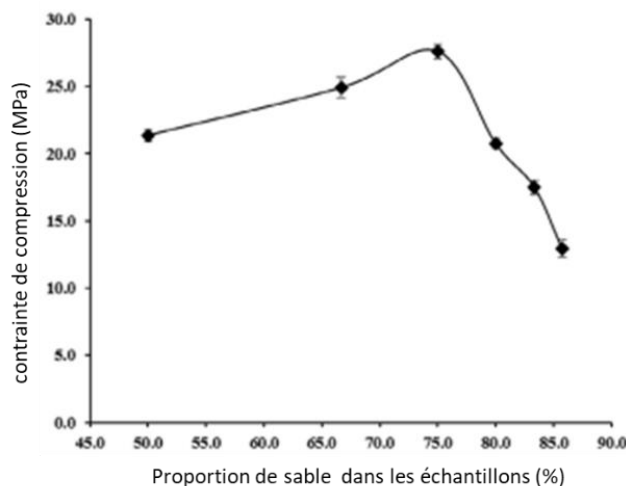


Figure I.2. Effet de la variation de la proportion de sable sur la résistance à la compression [8]

Un article de [Patil, et al. \[33\]](#) présente un travail expérimental pour la fabrication de briques de sable en plastique, contenant du sable et des déchets de polyéthylène et de polypropylène. Six types de briques de sable en plastique ont été préparés sur la base d'un rapport différent plastique/sable estimé à (1:2, 2:1, 2:2, 2:3, 2:4, 2:5). Plusieurs tests ont ensuite été réalisés sur les échantillons, tels que des tests de résistance à la compression, d'efflorescence, de résistance au feu et d'absorption d'eau. Les résultats ont montré que les briques de sable plastique possèdent de bonnes propriétés mécaniques et physiques, telle que la résistance à la compression atteint 12,43 MPa pour des échantillons contenant un rapport de 2:1. En plus d'une efflorescence nulle et d'un taux d'absorption d'eau très léger, presque nul, les briques de sable en plastique ont également montré une bonne résistance au feu. Dans une autre étude menée par [Aneke and Shabangu \[31\]](#), les indicateurs de durabilité et de résistance des briques de construction fabriquées à partir de déchets plastiques et de sable ont été évalués et comparés à des briques d'argile, dans le but de contribuer à trouver des solutions qui contribuent à préserver l'environnement. Au cours de cette étude, un groupe de briques a été produit avec différents pourcentages de déchets plastiques. Pour une identification facile des briques préparées, l'échantillon 80 % - 20 % est étiqueté SPW-1, 70 % - 30 %, est égal à SPW-2, tandis que 60 % - 40 % est équivalent à SPW-3. Plusieurs tests ont été réalisés sur les échantillons en termes de résistance à la compression et à la traction, de durabilité aux acides et à l'absorption d'eau. Les résultats ont montré que les briques contenant 30% de plastique ont donné de bons résultats par rapport aux briques d'argile, puisque la résistance à la compression atteint 38,14 MPa comme indiqué par la [Figure I.3](#), et la résistance à la traction atteint 9,51 MPa. Les résultats ont montré que les échantillons avaient une faible absorption d'eau, en plus de maintenir leur résistance finale après trempage dans différentes concentrations d'acide.

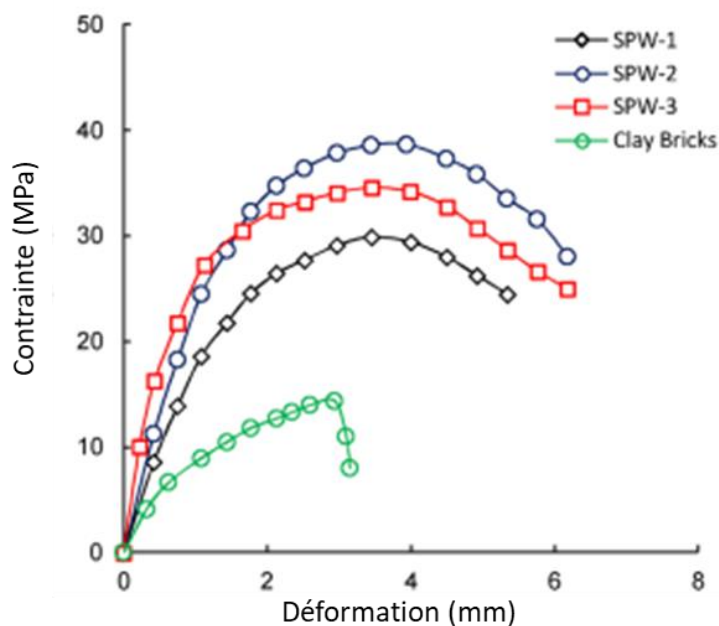


Figure I.3. Relation charge-déformation des briques SPW et des briques en terre cuite [31]

Babatunde, et al. [40] Leur objectif était de trouver un moyen durable d'éliminer les déchets plastiques. Grâce à leurs recherches, ils ont cherché à explorer la possibilité de recycler les déchets plastiques sous forme de liants pour produire des composés utilisés à des fins de construction. Ils ont utilisé du polyéthylène téréphtalate (PET), qui a été fondu et mélangé avec du sable dans trois rapports : 1:1, 1:2 et 1:3 (plastique/sable). Les expériences ont montré que la plus grande résistance à la compression était pour le composé contenant un rapport de 1:2 et était estimée à 11,5 MPa, tandis que la plus grande résistance à la flexion était pour le composé contenant un rapport de 1:3 et était estimée à 2,551 MPa (Figure I.4), tandis que le pourcentage d'absorption d'eau pour tous les composés était inférieur à 1, %. Grâce aux précieux résultats obtenus, ils ont découvert que ce composé pouvait être utilisé dans des applications de construction et dans des zones nécessitant une imperméabilisation.

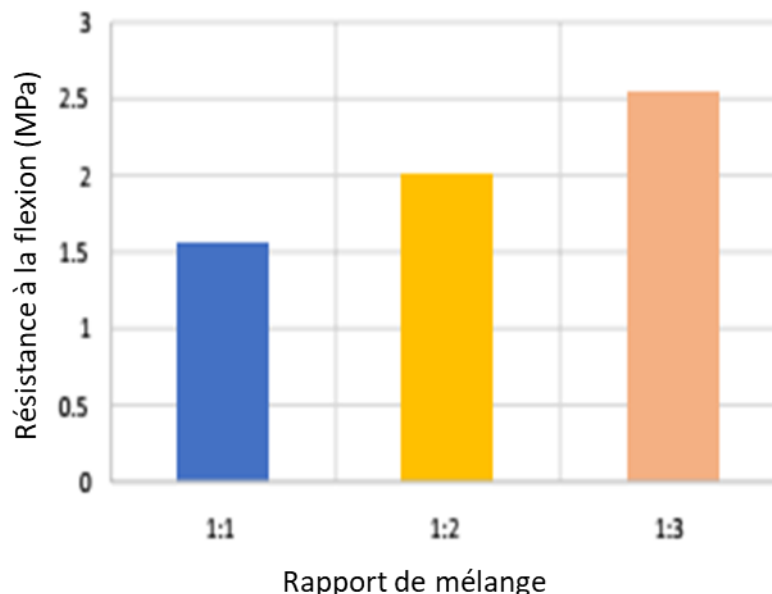


Figure I.4. Résistance à la flexion des déchets de plastique PET et du composite de sable [40]

En Inde, plus de 56 millions de tonnes de déchets plastiques sont jetées chaque année. C'est ce qui a poussé Gahane, et al. [30] à entamer des recherches sur le remplacement du ciment par des déchets plastiques dans les pavés afin d'en réduire les coûts. Pour cela, ils ont combiné des déchets plastiques avec du sable dans différentes proportions qui étaient les suivantes (80%-20%, 75%-25%, 70%-30%, 60%-40%, 50%-50%, sable - Plastique). Selon des tests effectués sur des pavés, les résultats ont montré que le meilleur mélange était celui de 3 parts de sable pour 1 part de plastique (3:1 sable : plastique), soit un rapport de 75 à 25 % comme indiqué par Tableau I. 1, puisque sa résistance à la compression atteint 23,54 MPa. Cela en fait de bons pavés qui peuvent être utilisés dans de nombreux endroits différents.

Tableau I. 1. Résistance à la compression du sable plastique [30]

N°	Différentes proportions (Sable ; plastic)	Résistance à la compression (N/mm2)
1	50%-50%	6.62
2	60%-40%	7.22
3	70%-30%	15.05
4	75%-25%	23.54
5	80%-20%	16.85

I.3. Effet du type de plastique

Le plastique est considéré comme le matériau de liaison de base du béton polymère. On sait que le plastique est classé en plusieurs types, chacun ayant des caractéristiques spécifiques et différentes. C'est pour cette raison que de nombreux chercheurs ont structuré l'étude sur cet axe.

Dans une recherche menée par [Soni, et al. \[41\]](#) qui soutient l'idée de durabilité et d'économie circulaire en exploitant les déchets pour produire des produits à valeur ajoutée, au cours de laquelle ils ont pris trois formes différentes de déchets plastiques LDPE, HDPE et PP ([Figure I.5](#)) comme Les matrices et les cendres de balle de riz et le sable de silice ont été pris comme matériaux de remplissage, les résultats ont montré que le béton polymère contenant du plastique PP a donné les valeurs optimales pour la résistance à la compression, à la flexion et à la traction, qui sont 26,3944, 4,89543 et 3,25659 MPa respectivement, tandis que le béton polymère contenant du LDPE donnait . 7,5015, 1,1266 et 0,8633 MPa respectivement, tandis que le béton polymère contenant du plastique HDPE a montré des valeurs estimées à 13,2151, 1,88975 et 1,52092 MPa pour la compression, la flexion et la traction, respectivement. Les composites ont eu une réponse relativement meilleure à l'absorption d'eau, car le pourcentage minimum d'absorption d'eau pour le béton polymère contenant du LDPE, du HDPE et du PP était respectivement de 0,1996, 0,052383 et 0,11223 %. Cette recherche a permis de conclure que le béton polymère développé à partir de déchets plastiques est considéré comme une solution rentable et produit respectueux de l'environnement.

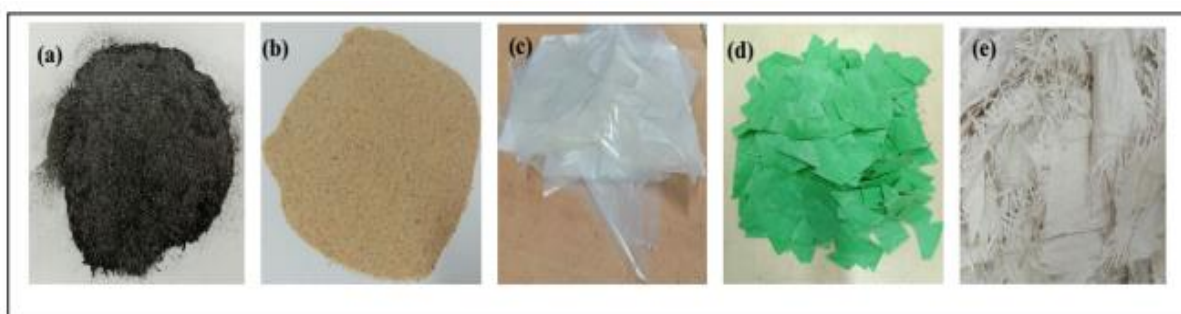


Figure I.5. Images des matières premières : a) cendre de balle de riz, b) sable, c) PEBD, d) PEHD, e) PP [41]

Dans une autre étude menée par [Jain, et al. \[32\]](#), elle s'est concentrée sur le recyclage des déchets plastiques et la fabrication de matériaux de construction avec du béton polymère, qui comprend des granulats fins et grossiers en plus de trois types de déchets plastiques, qui sont le polyéthylène haute densité (PEHD) et polyéthylène basse densité (LDPE) et polyéthylène

téréphtalate (PETE). Diverses propriétés du béton polymère préparé ont été évaluées, telles que la résistance à la compression (Figure I.6), la résistance à la flexion, la résistance à la traction, la densité et l'absorption d'eau. Les résultats ont montré que le béton polymère contenant des déchets HDPE avec des granulats fins donne les meilleurs résultats par rapport au LDPE et au PETE. Le taux d'absorption d'eau était de 0,05 % et la résistance à la compression des échantillons cubiques et cylindriques atteignait respectivement 12,6 et 11,16 MPa, tandis que la résistance à la traction séparée atteignait 1,85 N/mm² et la résistance à la flexion atteignait 24,15 MPa.

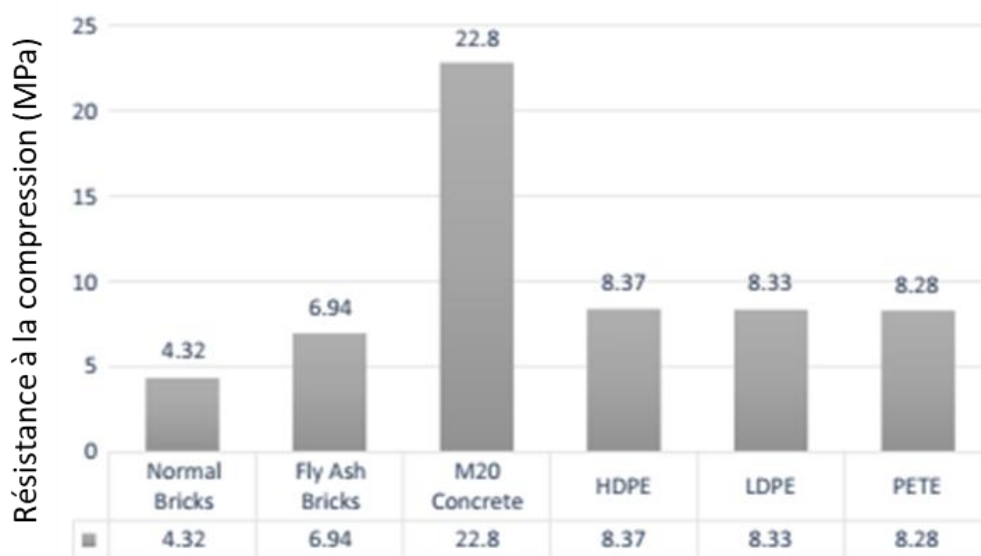


Figure I.6. Validation du mélange de matériaux composites plastiques pour la construction [32]

I.4. Effet de type de sable

Le sable est considéré comme l'un des matériaux de base les plus importants utilisés dans la construction. Le type de sable utilisé dans la construction peut avoir un impact significatif sur la résistance, la durabilité et les performances du produit final. Par conséquent, la sélection du sable est nécessaire pour garantir que les matériaux de construction répondent aux spécifications et normes requises. Le béton polymère est un matériau composite qui combine des matières premières, dont le sable, avec un liant polymère, offrant des propriétés améliorées par rapport au béton conventionnel. Le type de sable utilisé dans le béton polymère affecte grandement ses propriétés mécaniques, sa durabilité et ses performances globales. Comprendre l'effet du type de sable sur le béton polymère est essentiel pour optimiser sa formulation pour des applications spécifiques. Choisir le bon sable le rend adapté à un large éventail d'utilisations dans la construction et les infrastructures.

Une étude menée par [Tulashie and Kotoka \[42\]](#) s'est concentrée sur la conversion de déchets plastiques en pavés, où des déchets de plastique polyéthylène et polypropylène et deux types différents de sable, le sable de fosse (pit sand) et le sable de mer (sea sand), ont été utilisés. Les résultats des tests ([Figure I.7](#) et [Figure I.8](#)) ont montré que le PPPB est un matériau de construction supérieur au PSPB. La résistance ultime à la compression de 36,96 MPa du PPPB a dépassé le PSPB de 25 %, et la résistance à la traction du PPPB et du PSPB a culminé à 8,2 MPa et 6,1 MPa, respectivement. Ces résultats indiquent qu'il est possible de combiner du sable de forage et des déchets plastiques pour former des pavés, qui peuvent convenir à la construction et à la construction de routes.

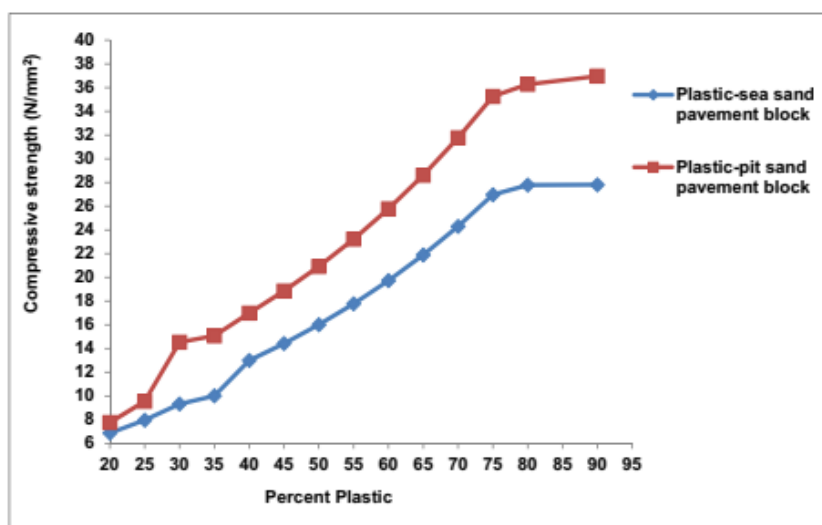


Figure I.7. Résistance à la compression des blocs de pavage en sable de fosse plastique et en sable de mer plastique [42]

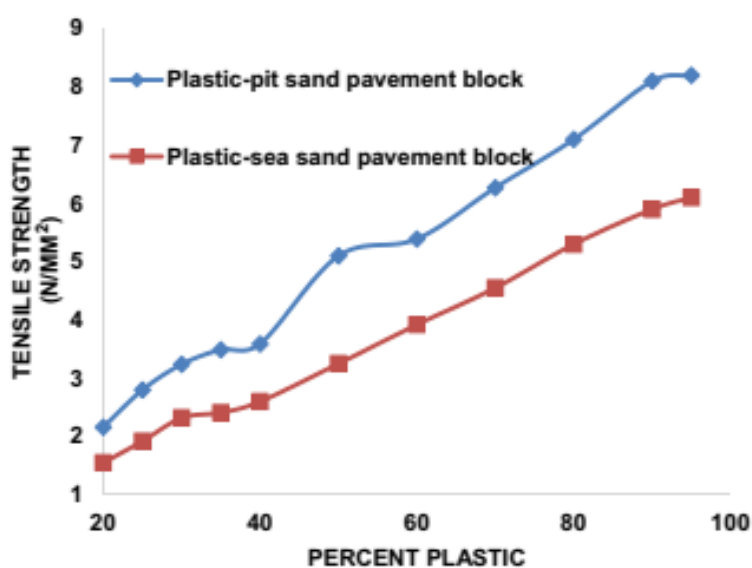


Figure I.8. Résistance à la traction des blocs de pavage en sable de fosse plastique et en sable de mer plastique [42]

Dans un article de recherche mené par [Mohan, et al. \[43\]](#) axé sur le développement d'un matériau de construction durable à partir de déchets plastiques et de deux types de sable, deux échantillons composites ont été fabriqués à partir de plastique recyclé avec du sable de rivière et du sable manufacturé. Les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et à la traction ainsi que l'absorption d'eau ont été testées, et il a été observé que la résistance à la compression du composite de sable de rivière était supérieure à celle du composite de sable manufacturé, atteignant 14,0 MPa et 13,7 MPa. En revanche, la résistance à la traction était de 14,2 MPa dans l'échantillon de sable de rivière et de 12,0 MPa dans l'échantillon de sable de rivière. Les échantillons de sable de rivière ont également montré une absorption d'eau plus faible. Ces résultats indiquent la pertinence d'utiliser le composite développé comme alternative pour les applications de construction.

I.5. Effet de taille des grains

La taille des grains de sable joue un rôle important dans la détermination des propriétés et des performances de divers types de béton et de béton polymère. En tant que l'un des composants les plus importants de ces matériaux, le sable affecte plusieurs propriétés différentes, notamment la résistance, la durabilité et l'intégrité structurelle globale du produit final. Dans le béton polymère, l'équilibre entre le sable fin et le sable grossier affecte la capacité du mélange à s'écouler et à remplir les formes, ce qui est essentiel pour obtenir une structure solide et durable. Comme les liants polymères remplacent le ciment traditionnel, la taille des grains influence l'interaction entre les agrégats et la résine, ce qui affecte grandement les propriétés mécaniques et l'adhérence. Comprendre la relation entre la taille des grains de sable et le béton polymère est essentiel pour améliorer les performances de ces matériaux et garantir qu'ils répondent aux exigences spécifiques des différentes applications de construction.

Un article de recherche de [Thiam, et al. \[10\]](#) étudie les propriétés mécaniques du mortier fabriqué à partir de déchets plastiques fondus comme seul liant. L'étude s'est concentrée sur l'effet de la composition du matériau et des systèmes de traitement sur les performances du matériau produit. L'étude a montré que la taille des grains de sable ([Figure I.9](#)) a un effet significatif sur les propriétés mécaniques du matériau produit. Les résultats ont montré que le mortier fabriqué à partir de matériaux granulaires plus gros avait une résistance à la compression 50 à 60 % supérieure à celle de ceux fabriqués uniquement avec du sable fin. En effet, la présence de particules plus grosses augmente la densité de tassement des matériaux granulaires, ce qui entraîne une augmentation de la densité solide du mélange. Une densité solide plus élevée est généralement associée à une porosité plus faible, ce qui contribue à une

résistance accrue du matériau. Par conséquent, le remplacement du sable fin par des particules plus grosses peut améliorer les performances mécaniques du mortier, le rendant plus adapté à une utilisation dans les applications de construction. Les résultats obtenus dans l'étude indiquent que les matériaux fabriqués à partir de déchets plastiques fondus et de sable ont de bonnes propriétés mécaniques. La résistance à la compression variait de 5 à 60 MPa, notant que la résistance à la compression augmente avec le temps et avec des conditions de traitement améliorées. Les résultats ont également montré que la résistance à la traction était de 5,1 MPa. Ces valeurs montrent que ce matériau peut être une alternative rentable avec de bonnes performances mécaniques par rapport aux matériaux conventionnels utilisés dans la construction.

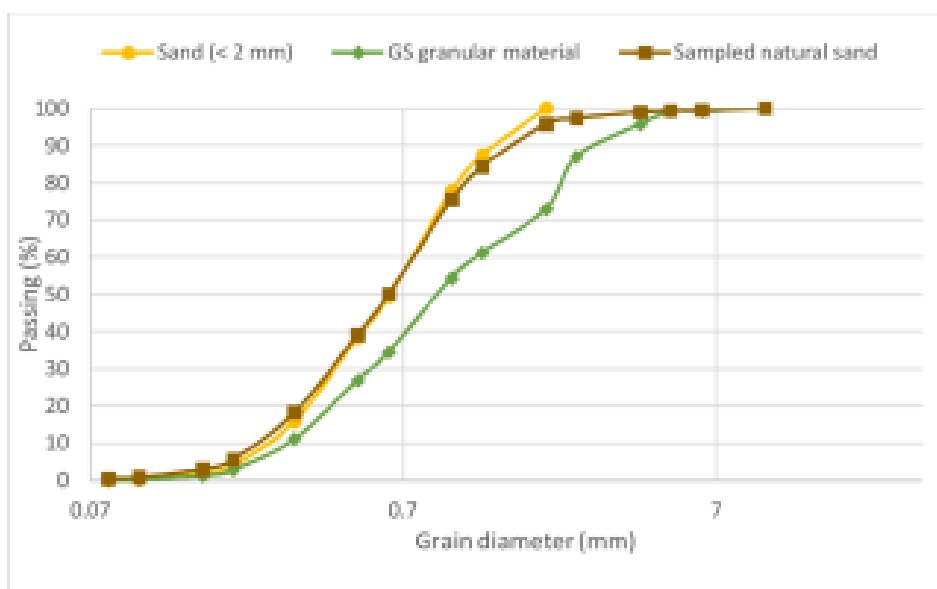
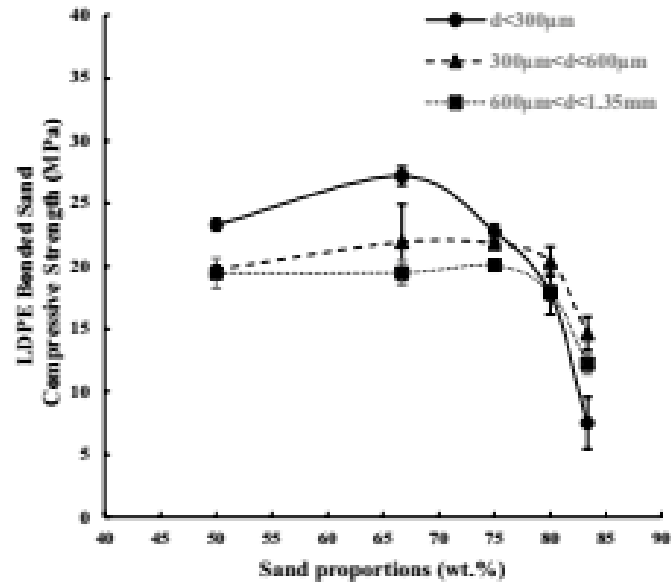
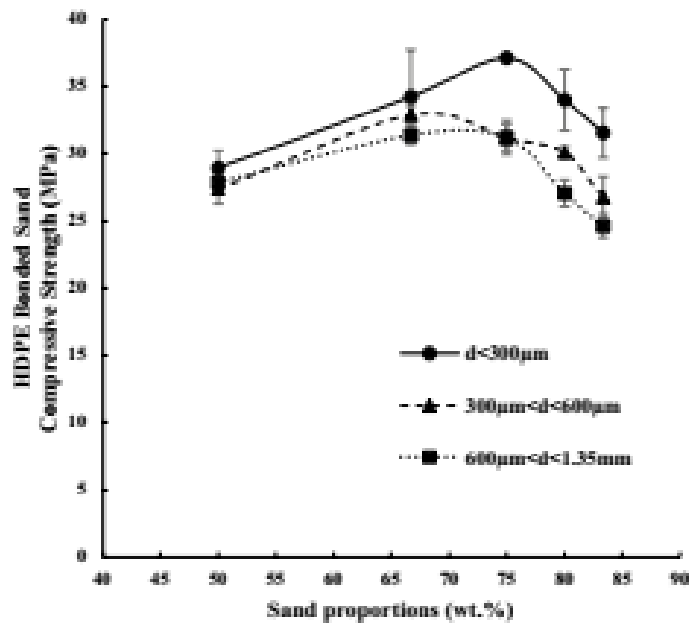


Figure I.9. Distribution granulométrique du sable échantillonné et des matériaux granulaires utilisés pour la préparation du MPB [10]

Dans une autre étude par [Kumi-Larbi Jnr, et al. \[29\]](#), il a abordé la question de la production et de l'utilisation du sable lié au plastique, en se concentrant sur la manière de traiter les déchets plastiques et de les convertir en matériaux de construction tels que les tuiles et les toitures. L'étude comprend une analyse des processus utilisés dans la production, ainsi que l'effet de la taille des grains de sable sur les propriétés du sable lié au plastique. Trois tailles moyennes de grains de sable ont été supposées, à savoir 0,15 mm, 0,45 mm et 0,98 mm avec deux types de plastique LDPE et HDPE. Des expériences ont montré que la taille des grains affecte les propriétés mécaniques des échantillons, telles que la résistance à la compression comme indiqué par la [Figure I.10](#). Ces résultats sont utilisés pour améliorer le processus de production et obtenir de meilleures propriétés pour les matériaux produits.



(a)



(b)

Figure I.10. Effet de la variation des proportions de sable et de la taille des particules sur la résistance à la compression de : a) le sable lié au plastique LDPE et b) le sable lié au plastique HDPE. Les barres d'erreur indiquent l'écart type des valeurs de résistance à la compression pour trois échantillons d'essai [29]

Dans une autre recherche intitulée « L'effet des granulats grossiers sur les performances physiques et mécaniques des pavés en plastique usagé » par [Shitote, et al. \[44\]](#) sur le thème de la gestion des déchets de sacs en plastique et son impact sur l'industrie des pavés. Se concentre sur l'étude de l'utilisation du plastique basse densité (LDPE) comme liant à la place du ciment dans la fabrication de pavés. L'article suggère que l'utilisation de plastique fondu avec du sable

et des granulats grossiers peut donner lieu à des pavés plus flexibles et plus résistants à l'absorption d'eau. L'article traite de l'effet de la taille des grains de sable sur les propriétés mécaniques des pavés manufacturés. Les résultats indiquent que l'utilisation de sable de forme angulaire passé au tamis de 4,75 mm donne de meilleures propriétés. Elle a montré que la taille des grains de sable affecte plusieurs aspects, notamment :

- Un sable de taille appropriée peut améliorer la résistance à la compression des blocs, ce qui entraîne une amélioration des performances mécaniques.
- Les grains de sable inclinés offrent de meilleurs points de contact avec le plastique, améliorant ainsi la liaison entre les composants et augmentant la durabilité des blocs.

La taille du sable peut également affecter la capacité des blocs à absorber l'eau, affectant ainsi leur durabilité dans différentes conditions environnementales.

Dans l'ensemble, les recherches montrent que le choix de la bonne granulométrie de sable peut améliorer les propriétés physiques et mécaniques des pavés, les rendant ainsi plus efficaces pour les applications de construction. L'article rapporte plusieurs découvertes liées aux propriétés mécaniques des pavés fabriqués à partir de plastique usagé. La valeur maximale de résistance à la compression de 15,452 MPa a été atteinte, et la valeur maximale de résistance à la traction et à la rupture de 2,818 MPa a été atteinte. Il a été observé qu'il y avait une légère augmentation de la capacité des blocs à absorber l'eau avec l'augmentation de la taille des gros granulats. Enfin, le document indique que cette recherche vise à apporter des solutions durables au problème de la pollution environnementale résultant des déchets plastiques, à travers le recyclage de ces matériaux et leur utilisation dans la construction.

Dans une autre recherche, [Jnr, et al. \[8\]](#) traite le sujet de recyclage du plastique résultant de l'utilisation de sacs d'eau en LDPE dans les pays en développement, en utilisant ces sacs pour former des blocs de sable liés au plastique. Cette étude présente l'effet de la taille des grains de sable et du rapport sable/plastique sur la densité et la résistance à la compression de ces blocs, en plus de leur capacité à absorber l'eau. Les chercheurs ont mené des expériences pour étudier l'effet de la taille des grains de sable et du rapport sable/plastique sur la densité et la résistance à la compression de ces blocs, en plus de leur capacité à absorber l'eau. Les spécimens idéaux ont été identifiés et mieux caractérisés en termes de résistance à la flexion et de conductivité thermique. Des expériences ont également montré que le LDPE lié au sable est un matériau solide et très durable, avec une résistance à la compression atteignant 27 MPa lorsqu'il est produit dans des conditions de traitement optimales. Des recherches ont montré que la taille des grains de sable affecte de manière significative les propriétés mécaniques des blocs liés au plastique. Il a été conclu que l'augmentation de la taille des grains de sable entraîne une

diminution de la résistance à la compression et de la densité, en raison de changements structurels dans la matrice de sable et de plastique. En particulier, une taille de grain plus grande entraîne une porosité accrue comme indiqué sur la [Figure I.11](#), ce qui réduit la résistance à la compression.

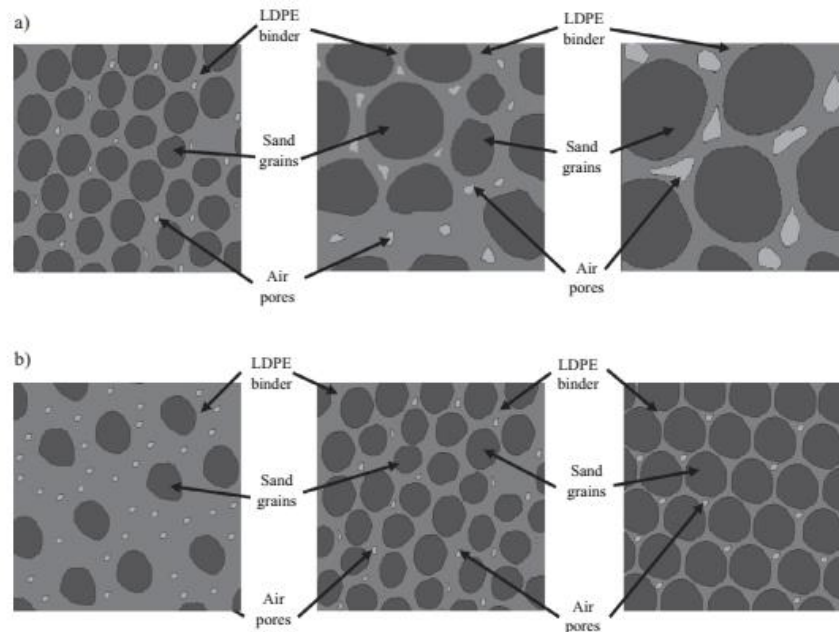


Figure I.11. a) Modifications structurelles du réseau dans le sable lié au LDPE montrant l'augmentation de la porosité et la diminution du volume de liant autour des grains de sable à mesure que la taille des particules de sable augmente ; b) Variation de la microstructure du sable lié au LDPE montrant la réduction du volume et de l'épaisseur de la pâte liante encapsulant les grains de sable à mesure que les proportions de sable augmentent [8]

Au vu de tout ce qui précède, on peut dire que plusieurs facteurs peuvent contrôler l'amélioration du béton polymère, tels que le type de plastique, le type de sable, le rapport sable/plastique, et autres.

Chapitre II

Généralités sur le recyclage et les déchets

II.1. Introduction

Dans la société actuelle, les gens utilisent une quantité stupéfiante de ressources brutes. En conséquence, les ressources naturelles s'épuisent rapidement. L'expansion démographique s'accompagne d'une augmentation de la production de déchets en raison du besoin de nouvelles routes, d'entreprises, de complexes résidentiels et de projets d'infrastructure. En conséquence, un volume considérable de déchets est déversé chaque année dans les décharges. Les ressources naturelles ne cesseront jamais d'être produites ; elles finiront simplement par s'épuiser en raison de la demande croissante des consommateurs et de l'expansion économique. Selon [Awomeso, et al. \[45\]](#), les préoccupations environnementales modernes ont contraint les pays développés et en développement à réduire leurs niveaux de pollution afin de parvenir à une croissance durable. Ils ont également souligné l'utilisation de méthodes efficaces d'élimination des déchets, adaptées à la sauvegarde de l'environnement. L'écosystème peut être préservé et prospéré grâce à l'utilisation de ressources recyclées et réutilisées [\[46\]](#). Le recyclage réduit les émissions de gaz à effet de serre, la production de déchets solides, la consommation d'énergie, la pollution de l'air et de l'eau et l'épuisement des ressources naturelles. On estime que six à dix fois plus d'emplois sont générés par le recyclage, la réutilisation et le compostage que par la mise en décharge et l'incinération des déchets [\[47\]](#). L'analyse du cycle de vie est importante et cruciale dans l'économie circulaire et la gestion des déchets, car elle permet d'examiner de nombreux aspects de la gestion des déchets, notamment la conception, la fabrication et les méthodes de recyclage des produits. La mise en œuvre de systèmes et de pratiques efficaces de gestion des déchets peut grandement bénéficier à la société à bien des égards, notamment en produisant des biens durables et en réduisant la quantité de déchets qui finissent dans nos écosystèmes [\[48\]](#).

II.2. Définition du recyclage

Le recyclage est un processus actif qui prolonge la durée de vie d'un matériau grâce à sa réutilisation. On sait qu'il y a trois flèches séquentielles dans le symbole de recyclage bien connu créé par Anderson représenté sur la [Figure II.1](#). Les trois étapes qui composent la boucle de recyclage sont représentées par chaque flèche [\[49\]](#).

- La phase d'assemblage est la première étape : Où les matériaux sont collectés sur le site de livraison ou en bordure de rue.
- La transformation des matériaux est la deuxième étape : Au cours de laquelle les matériaux collectés sont triés et rangés puis commercialisés et revendus.
- L'étape de fabrication est la troisième étape : Les matériaux recyclables sont réutilisés dans de nouveaux biens et matériaux vendus aux consommateurs.

Après ces trois étapes, les biens et matériaux fabriqués à partir de déchets recyclés sont dirigés vers les consommateurs pour être achetés comme étape finale.



Figure II.1. Symbole du recyclage

II.3. Classification de recyclage

Il existe plusieurs façons de classer les types de recyclage. Le type de matériau recyclé est une classification courante. Cela inclut le recyclage du verre, du papier, du métal, du plastique et des textiles, le recyclage électronique et le compostage, qui consiste à réutiliser des déchets biodégradables tels que des feuilles mortes dans le jardin ou des restes de nourriture.

Une autre classification des procédés de recyclage est adoptée, qui peuvent relever du recyclage mécanique, du recyclage énergétique ou du recyclage chimique.

II.3.1. Recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est l'une des méthodes les plus utilisées au monde pour trouver de nouvelles utilisations aux déchets. Cette méthode permet le recyclage du plastique, du verre, du papier et de divers autres matériaux, et les restes de tous ces matériaux sont transformés mécaniquement en de nouveaux matériaux grâce à une série de processus physiques sans modifier leur composition chimique. Parmi les procédés bien connus du recyclage mécanique, la [Figure II.2 \[48\]](#) :

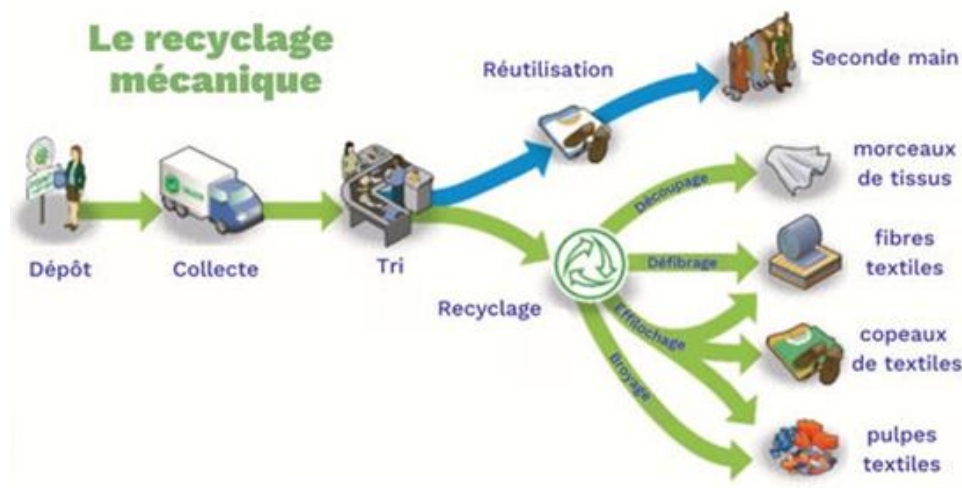


Figure II.2. Processus de recyclage mécanique (<https://www.fairytale.eco/>)

II.3.2. Recyclage chimique

Le recyclage chimique est une technologie moderne qui ramène les matériaux de n'importe quelle étape de la chaîne aux matières premières de haute qualité. Le recyclage chimique implique en réalité plusieurs processus différents par exemple comme le montre la Figure II.3 [50].

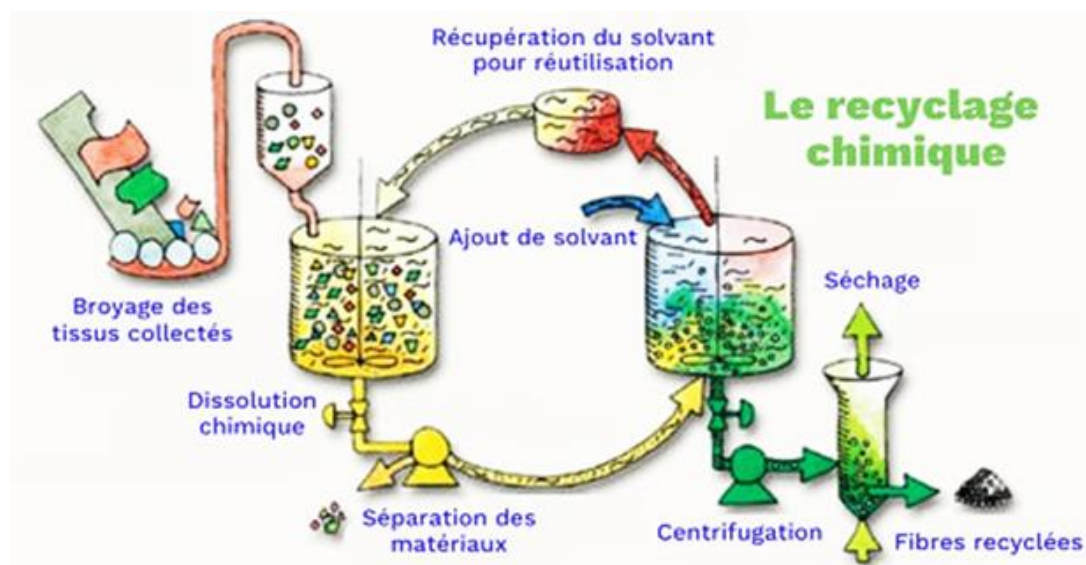


Figure II.3. Processus de recyclage chimique (<https://www.fairytale.eco/>)

II.3.3. Recyclage énergétique

L'approche de recyclage énergétique fonctionne uniquement avec les déchets plastiques et convertit le plastique en énergie thermique et électrique via le processus d'incinération, et l'énergie thermique libérée par ces matériaux est sous forme de carburant. Le recyclage énergétique est très populaire dans certains pays car il exploite l'espace disponible dans les

villes denses et utilise de petits espaces pour les décharges. Cette solution est largement utilisée dans les pays développés et nécessite d'énormes investissements (Figure II.4) [50].

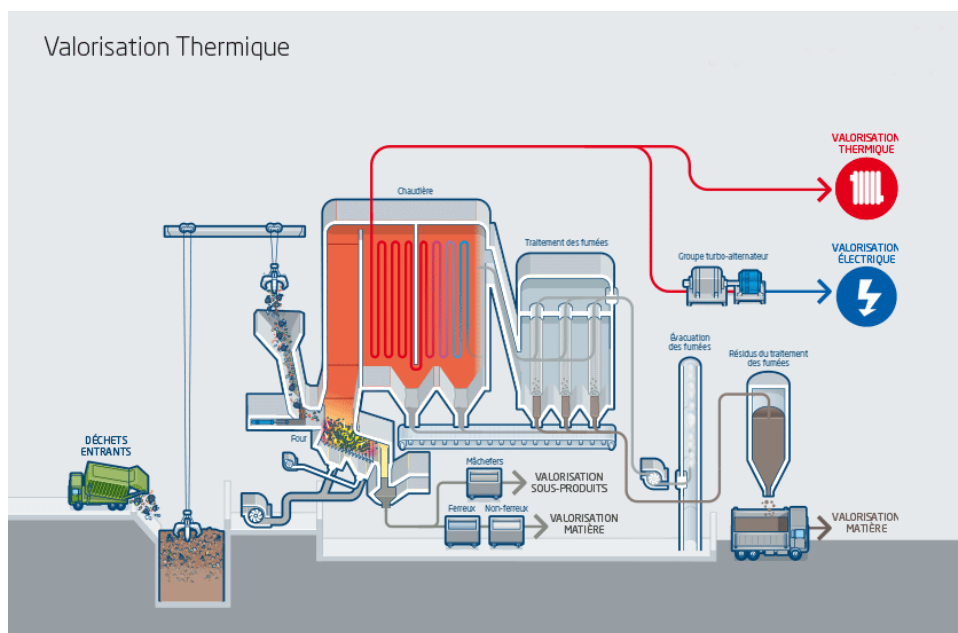


Figure.II.4. Processus de recyclage énergétique (usinenouvelle.com)

II.4. Notions de déchets

II.4.1. Définition du déchet

Tout objet ou matériau dont ses propriétaires n'ont plus besoin et qui est éliminé ou destiné à être éliminé peut-être qualifié de déchet au sens de la définition de la Commission de l'Union européenne [51, 52]

Les déchets sont classés en différentes catégories : ils peuvent être classés selon le type de matériau (plastique, papier, métal, etc.) ; Ainsi que l'état physique (solide, liquide ou gazeux) ; En revanche, ils sont classés selon leur utilisation et leurs propriétés physiques (dégradabilité, recyclabilité et combustibilité) ; La sécurité est aussi un critère de classification (dangereux, non dangereux), etc., et toutes ces classifications sont prises en compte lors de la classification des déchets . De plus, Christensen [53] a divisé les déchets en quatre groupes de base en fonction de leur source : les déchets industriels, les déchets commerciaux et institutionnels, les déchets de construction et de démolition et les déchets ménagers.

D'autre part, les déchets collectés auprès de sources locales ou autres par les autorités concernées ou leurs représentants sont appelés « déchets solides municipaux ». Cela comprend les déchets ménagers provenant des complexes résidentiels, des parcs publics, des entreprises situées dans les zones industrielles, des lieux de travail et des rues [46].

II.4.2. Différents types de déchets

Les déchets résultent de toute activité humaine, économique, sociale ou quotidienne, ainsi que de phénomènes naturels. En conséquence, l'écosystème produit une large gamme de déchets en quantités importantes et énormes [54, 55]. Pour donner un aperçu, les déchets peuvent être globalement classés en plusieurs catégories, notamment :

II.4.2.1. Déchets solides municipaux

Qui comprennent les déchets ménagers, les déchets commerciaux et les déchets institutionnels provenant de sources résidentielles, commerciales et publiques comme le montre la [Figure II.5](#) [56].



Figure II.5. Différents types de déchets solides

II.4.2.2. Déchets industriels

Ce sont les déchets résultant des processus industriels, des activités de fabrication et de production. Cela peut inclure différents types de déchets, y compris les types dangereux et non dangereux produits par les industries comme indiqué sur la [Figure II.6](#) [57].



Figure II.6. Différents types de déchets industriels

II.4.2.3. Déchets dangereux

Ce sont des déchets qui présentent des caractéristiques qui les rendent nocifs pour la santé humaine, l'environnement, voire les animaux terrestres et marins (Figure II.7). Cette catégorie comprend des matériaux tels que des produits chimiques toxiques, des métaux lourds, des matériaux inflammables et des déchets radioactifs [55].



Figure II.7. Différents types de déchets dangereux

II.4.2.4. Déchets biodégradables

Déchets organiques pouvant être naturellement décomposés par des micro-organismes, tels que les déchets alimentaires, les déchets végétaux et forestiers et certains types de papier (Figure II.8) [58].



Figure II.8. Différents types de déchets biodégradables

II.4.2.5. Déchets électroniques

Déchets résultant d'appareils électroniques tels que les ordinateurs, téléphones portables, téléviseurs et autres équipements électroniques dont on s'est débarrassé comme indiqué sur la [Figure II.9](#) [50].



Figure II.9. Déchets électroniques

II.4.2.6. Déchets de construction et de démolition

Déchets résultant des activités de construction, de rénovation et de démolition, notamment le béton, le bois, le métal et autres déchets de construction ([Figure II.10](#)) [59].



Figure.II.10. Déchets de construction

II.4.2.7. Déchets médicaux

Déchets générés par les établissements de santé tels que les hôpitaux et les cliniques, y compris les déchets transmettant des infections, les objets tranchants (aiguilles et seringues), divers déchets pharmaceutiques et autres déchets médicaux vitaux comme indiqué sur la [Figure II.11](#) [60].



Figure II.11. Différents déchets de médicaux

II.5. Les plastiques

II.5.1. Définition

En chimie, les plastiques sont de grosses molécules appelées polymères, qui se composent d'unités répétitives appelées monomères avec des squelettes carbonés. Un polymère est essentiellement une vaste molécule composée de nombreuses unités plus petites connectées dans une séquence, formant une longue chaîne. La plus petite unité d'un polymère est appelée monomère [61]. Les polymères peuvent être classés en deux types principaux : les thermoplastiques, qui peuvent être moulés, et les thermodurcissables, qui ne le peuvent pas. Le terme « plastiques » fait généralement référence aux produits chimiques synthétiques. Alexander Parkes a créé le premier plastique synthétique et l'a présenté à la Grande Exposition internationale de 1862 à Londres. Ce matériau, appelé Parkesine, était fabriqué à partir de cellulose et pouvait être façonné lorsqu'il était chauffé, conservant sa forme lors du refroidissement. De nombreux produits en plastique comportent un code d'identification en résine, souvent moulé ou imprimé sur le contenant, généralement au fond. Ce système de codage a été établi en 1988 par la Society of the Plastics Industry aux États-Unis pour faciliter

le recyclage des plastiques post-consommation. Il est certainement intéressant d'en explorer les détails [62].

II.5.1. Classification des plastiques

Il est essentiel de comprendre les propriétés et les dangers potentiels des différents plastiques pour faire des choix éclairés quant à leur utilisation et leur élimination. Les efforts visant à améliorer les techniques de recyclage et la sensibilisation peuvent contribuer à atténuer l'impact environnemental de ces matériaux. Vous trouverez ci-dessous les sept types de plastique et leurs codes correspondants

II.5.1.1. PETE ou PET (polyéthylène téréphtalate)

Introduit pour la première fois dans les années 1940, le polyéthylène téréphtalate (PET) est un type de plastique largement utilisé dans les bouteilles de boissons et les contenants pour aliments périssables. Le plastique PET transparent est généralement considéré comme sûr, mais il peut absorber les odeurs et les saveurs des aliments et des liquides qu'il contient. Ce type de plastique peut être dangereux pour la santé humaine s'il est exposé à la chaleur et au soleil, par exemple lorsqu'on laisse une bouteille d'eau dans une voiture chaude. Au fil du temps, cela peut entraîner une fuite d'antimoine du plastique dans le liquide stocké. Ce type de plastique est facile à recycler et la plupart des usines de recyclage l'acceptent, il est donc facile de s'en débarrasser correctement. Le plastique PET est recyclé et utilisé dans la fabrication de tapis, de meubles et de fibres pour vêtements [63].

II.5.1.2. PEHD (polyéthylène haute densité)

Le polyéthylène haute densité (PEHD) a été créé dans les années 1950 par Karl Ziegler et Erhard Holzkamp et est considéré comme sûr pour le contact alimentaire par la FDA en raison de sa structure interne nettement plus solide que le PET, ce qui le rend sûr pour la réutilisation. Ce type de plastique convient aussi bien aux applications congelées qu'aux applications à haute température. Les contenants en PEHD présentent un faible risque de fuite dans les aliments et les liquides. Nous rencontrons couramment ce plastique dans les articles du quotidien tels que les contenants de lait et de yaourt, les bouteilles de produits cosmétiques et de nettoyage, les jardinières, les tubes et les jouets [64].

II.5.1.3. PVC (Polychlorure de vinyle)

Le polychlorure de vinyle (PVC), découvert en 1838, est un plastique largement utilisé, connu pour sa polyvalence et sa durabilité. Il est initialement rigide, mais peut être rendu flexible en ajoutant des plastifiants. Les applications courantes comprennent les cartes de crédit, les emballages alimentaires, les tuyaux de plomberie, les carreaux, les fenêtres et les équipements médicaux. Cependant, le PVC est rarement recyclé et contient des produits chimiques nocifs qui peuvent être liés à divers problèmes de santé, notamment les maladies des os et du foie, ainsi que les problèmes de développement chez les enfants et les nourrissons. Il est recommandé de garder les produits en PVC à l'écart des aliments et des boissons. Des programmes de recyclage spécialisés peuvent réutiliser le PVC dans des produits tels que les revêtements de sol, les bardeaux et les gouttières en bordure de route [64].

II.5.1.4. LDPE (polyéthylène basse densité)

Le LDPE (polyéthylène souple) est un plastique plus souple et plus flexible pour sa durabilité et sa durabilité, avec la structure la plus simple de tous les plastiques. Il est recommandé de l'utiliser dans des produits tels que les sacs en plastique, les enrobages alimentaires, les contenants et certains types de contenants. Le polyéthylène basse densité (LDPE) est généralement considéré comme sûr, sans danger de contact alimentaire et peut être recyclé, même si le recyclage est relativement réalisable. Ce plastique résiste à l'humidification et aux produits chimiques et peut être adapté à diverses applications domestiques et industrielles [65].

II.5.1.5. PP (Polypropylène)

Le polypropylène (PP) est un plastique durable et polyvalent connu pour sa résistance à la chaleur, aux produits chimiques et à la fatigue. Le polypropylène a été découvert dans une compagnie pétrolière en 1951. Il est couramment utilisé dans une large gamme d'applications, notamment les emballages, les pièces automobiles, les textiles et les articles ménagers tels que les conteneurs et les ustensiles. Le polypropylène est léger et a un point de fusion élevé, ce qui le rend adapté aux produits allant au micro-ondes. Il est également recyclable, bien que la disponibilité des programmes de recyclage puisse varier selon les endroits. De plus, le polypropylène est souvent utilisé dans les applications médicales en raison de sa biocompatibilité [66].

II.5.1.6. PS (Polystyrène)

Le polystyrène, ou mousse, a été découvert par accident en Allemagne en 1839. Ce plastique facilement reconnaissable est couramment utilisé pour l'isolation, l'emballage, les cartons d'œufs et la vaisselle jetable. Son faible coût et sa facilité de production ont contribué à son utilisation généralisée. Cependant, le polystyrène est considéré comme dangereux en raison de sa tendance à libérer des produits chimiques nocifs, en particulier lorsqu'il est chauffé, et de sa faible recyclabilité. Comme le polypropylène, il est souvent jeté, bien que certains programmes de recyclage puissent l'accepter. Une fois recyclé, le polystyrène peut être transformé en une variété de produits, notamment des isolants, des fournitures scolaires et des cadres de plaques d'immatriculation [67].

II.5.1.7. Plastiques divers

Le terme « plastiques divers » désigne une classe de plastiques qui n'entrent pas dans les catégories de recyclage standard définies par le système de codes de la Society of the Plastics Industry (SPI). Cette classe est souvent désignée par un code SPI de « 7 ». Ces plastiques divers peuvent être fabriqués à partir de divers matériaux, notamment le polycarbonate, le nylon, l'acrylique, etc. Ces plastiques sont utilisés dans diverses applications, des pièces automobiles aux biens de consommation, en passant par l'électronique et des articles tels que les lunettes de soleil et les composants de machines et d'équipements. En raison de leurs compositions diverses, ces plastiques peuvent être difficiles à recycler et ne sont souvent pas acceptés dans les programmes de recyclage [64].

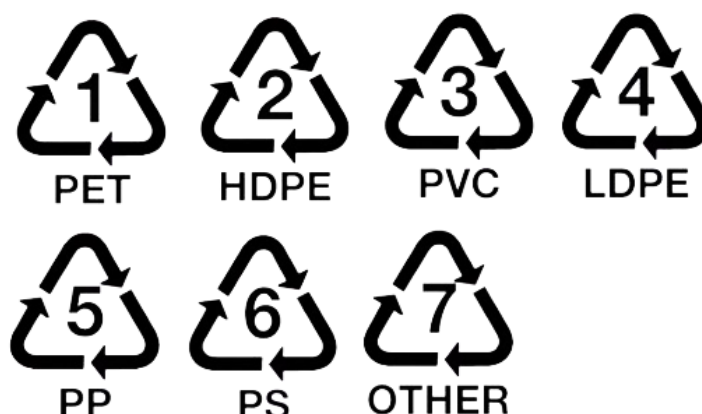


Figure II.12. Codes d'identification des résines plastique

II.6. Processus de recyclage des déchets plastiques

Le recyclage du plastique est le processus de récupération des déchets ou des rebuts de plastique et de leur retraitement en produits fonctionnels. Ce processus vise à réduire la pollution plastique et à diminuer la demande de matières vierges nécessaires à la création de nouveaux articles en plastique. En recyclant le plastique, nous préservons les ressources et empêchons les plastiques de finir dans des décharges ou de polluer les océans. Les plastiques sont des matériaux durables, légers et économiques qui peuvent être facilement moulés dans une large gamme de produits pour diverses applications. Plus de 420 millions de tonnes de plastiques sont produites dans le monde chaque année, ce qui rend la réutilisation, la récupération et le recyclage des plastiques cruciaux [62].

Voici un aperçu des principales étapes impliquées :

II.6.1. Collecte et récupération des déchets

Le plastique est collecté auprès des particuliers et des entreprises par le biais de programmes de recyclage en bordure de rue. Certaines collectivités proposent également des sites désignés (Figure II.13) où les résidents peuvent apporter leurs déchets plastiques [68].



Figure II.13. Poubelles au bord de la rue

II.6.2. Séparation et tri

Les travailleurs séparent le plastique par type et par couleur, éliminant les contaminants tels que les restes de nourriture et les matériaux non recyclables [55]. Certaines installations avancées utilisent des bandes transporteuses et des machines équipées de capteurs infrarouges pour identifier et trier différents types de plastique en fonction de leurs codes de résine [69].

II.6.3. Déchiquetage

Au cours de cette étape, les grosses particules de plastique sont décomposées en morceaux plus petits. Sans aucun traitement supplémentaire, la taille des morceaux de plastique déchiquetés varie entre 4 et 1 cm, comme le montre la [Figure II.15](#), afin de réduire les besoins en espace de stockage et de transport et de faciliter le processus de recyclage [62].



Figure II.14. Broyage des déchets plastiques

II.6.4. Nettoyage

Le plastique découpé est soigneusement nettoyé pour éliminer la saleté, les autocollants et les adhésifs ([Figure II.14](#)). Cette étape est nécessaire pour garantir la qualité du matériau recyclé. Le plastique est ensuite séché pour le préparer à l'étape suivante [69].



Figure II.15. Nettoyage des déchets plastiques

II.6.5. Remodelage des matières premières

Le plastique déchiqueté est fondu et extrudé en petits granulés (Figure II.16). Ce processus permet de créer un matériau uniforme qui peut être facilement utilisé dans la fabrication [69].



Figure II.16. Recyclage du plastique en granulés

II.6.6. Fabrication

Production de nouveaux produits : les granulés de plastique recyclés peuvent être utilisés pour produire une variété de nouveaux produits, tels que les conteneurs, les vêtements, les meubles et les matériaux de construction.

II.7. Avantages et inconvénients du recyclage

Le recyclage, classé au troisième niveau de la hiérarchie de la gestion des déchets, a changé la façon dont l'humanité gère les déchets. Le recyclage existe depuis le 19^e siècle et s'est développé à l'échelle mondiale au fil du temps. Cette croissance a apporté à la fois des avantages et des inconvénients. Plusieurs études ont examiné les opportunités et les défis associés au recyclage du plastique, concluant finalement qu'il reste une option viable pour atténuer l'impact environnemental des plastiques. En outre, le secteur du recyclage joue un rôle dynamique au sein de différentes industries [70].

II.7.1. Avantages du recyclage

Le recyclage a permis aux fabricants de produire une grande variété de produits, des vêtements et des meubles aux objets du quotidien. C'est un moyen de réutiliser des matériaux précieux, ce qui permet de boucler efficacement la boucle. Le secteur du recyclage a connu une croissance

rapide et offre de nombreux avantages à la fois à l'industrie et à la société dans son ensemble. Vous trouverez ci-dessous quelques-uns des principaux avantages du recyclage.

- **Réduire la pollution des décharges**

La plupart des plastiques manufacturés ne sont pas biodégradables ou mettent très longtemps à se décomposer et causent des dommages importants à l'environnement. Par conséquent, le recyclage réduit généralement la pollution environnementale. Bien que la pollution puisse mettre du temps à apparaître, ses effets peuvent avoir des conséquences durables sur l'environnement et tous les êtres vivants.

- **Réacheminement des déchets vers d'autres sources de valorisation**

Il n'est pas certain qu'un programme de recyclage puisse atteindre une efficacité opérationnelle de 100 % pour bénéficier pleinement à la société. Les grandes zones urbaines continuent de produire d'énormes quantités de déchets chaque année, et même avec des technologies de recyclage de base permettant de détourner au moins 50 % des déchets, une quantité importante de matériaux peut encore être réutilisée et réintroduite sur le marché.

- **Réduire la consommation de matières premières**

La création de programmes de recyclage coûte plus cher mais contribue à réduire la consommation de matières premières. En effet, la plupart des matériaux sont transformés en produits post-consommation ayant un cycle de vie court.

- **Capacité à fonctionner dans des systèmes en boucle ouverte et en boucle fermée**

Le recyclage peut être effectué à la fois avec un système en boucle fermée et un système en boucle ouverte. Les produits peuvent être convertis en différents produits. Par exemple, transformer une bouteille en plastique en sac poubelle (système en boucle ouverte). Pour les systèmes en boucle fermée, les produits sont convertis en les mêmes produits. Par exemple, transformer des canettes en aluminium en canettes en aluminium.

- **Réduire les niveaux de pollution**

La pollution de l'air et de l'eau peut être considérablement réduite grâce au recyclage. Nous pouvons réduire les gaz à effet de serre en réduisant la combustion inconsidérée des déchets, ce qui entraîne une diminution des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution de l'air. Le recyclage contribue également à réduire la pollution de l'eau en empêchant les déchets de contaminer les sources d'eau, car moins de matériaux sont envoyés dans les décharges et les incinérateurs de déchets.

- **Créer des opportunités éducatives**

La disponibilité de connaissances sur le recyclage est le moteur de la participation communautaire aux programmes de recyclage. De nombreuses recherches montrent que le manque d'informations sur le recyclage empêche les communautés de participer. Par conséquent, la mise en place de programmes de recyclage est une opportunité de fournir des connaissances et une éducation. Informer les communautés sur le recyclage des déchets contribue à une gestion durable des déchets et peut apprendre aux familles comment réduire l'élimination et se concentrer sur la valorisation.

- **Rentabilité des programmes de recyclage**

Selon la taille de la ville, des bénéfices importants peuvent être tirés d'un programme de recyclage.

- **Création d'emplois**

Dans les économies en développement, la majorité des déchets du secteur public sont valorisés par le secteur informel des déchets. Les moyens de subsistance que le secteur informel des déchets tire de la relance ont contribué à la reprise durable et à la gestion des déchets du secteur public. Par conséquent, la présence d'opérations de recyclage a contribué à la création d'emplois dans l'industrie du recyclage.

II.7.2. Inconvénients du recyclage

Selon [Nayak \[71\]](#), les nouveaux produits fabriqués à partir du recyclage présentent des inconvénients : ils ont des propriétés inférieures à celles des produits fabriqués à partir de matières premières. Cela est dû aux contaminants et au faible poids moléculaire des déchets recyclés. Il existe également d'autres inconvénients, tels que :

- **Le recyclage coûte cher par rapport à la mise en décharge**

Outre les coûts liés à la construction d'usines de recyclage, à l'achat des équipements et machines de recyclage nécessaires et à l'éducation des résidents locaux sur les programmes et séminaires de recyclage disponibles, le recyclage est coûteux par rapport aux décharges. Les statistiques de montrent que le coût du recyclage empêche les communautés de recycler.

- **Non-respect des programmes de recyclage par les communautés**

Le manque de conformité de la part des communautés présente des inconvénients pour le recyclage. Les communautés veulent recycler mais ne comprennent pas les règles d'inclusion des déchets en collecte sélective. Cela crée de nombreux problèmes pour les programmes de

recyclage. Bien qu'il existe des codes de recyclage pour la plupart des produits recyclables, le respect des communautés est encore très faible car la plupart d'entre elles ne comprennent pas ces codes et finissent donc par mélanger ces déchets recyclables.

- **Sites de recyclage insalubres et dangereux**

La plupart des sites de recyclage sont insalubres et dangereux, car l'endroit où s'accumulent les déchets crée un environnement propice à la formation de débris. Les travailleurs et les collecteurs de déchets sont confrontés à de nombreuses toxines dans les points de collecte et les décharges. Les travailleurs sont exposés à des produits chimiques, à des liquides et à des agents microbiens, et chaque point de collecte crée un problème de santé potentiel.

- **Problèmes causés par les polluants**

La présence de tout polluant peut entraîner la destruction complète de l'ensemble de l'usine de recyclage. Il s'agit d'un défi majeur dans le secteur du recyclage, malgré le fait que des règles spécifiques soient en place pour les déchets.

- **Accumulation de déchets par les récupérateurs**

Dans les économies en développement, la plupart des récupérateurs travaillent dans le secteur informel. Ce secteur ne dispose pas de capacités suffisantes en termes d'équipements et de véhicules de collecte des déchets. Ce défi continue de créer des problèmes d'accumulation de déchets après leur récupération. Des scènes de ce type sont observées dans les quartiers malgré l'utilisation de camions de gestion des déchets équipés de bras hydrauliques pour soulever le conteneur.

- **Consommation d'énergie et pollution**

Tout au long de la vie d'un produit, de l'énergie est nécessaire. Lors du recyclage, de l'énergie est consommée pour le transport des déchets depuis les points de collecte, pendant le tri, le nettoyage et la fabrication. Dans tous ces processus, de l'énergie est consommée. De plus, des déchets sont générés sous forme de polluants. Les véhicules utilisés dans les processus de transport créent de la pollution. Les polluants chimiques provenant des déchets sont nocifs pour l'environnement

II.8. Conclusion

D'après la littérature examinée, le recyclage est un élément essentiel de la hiérarchie de gestion des déchets et continuera de contribuer au développement durable à l'échelle mondiale. Différentes stratégies de recyclage présentent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Ces avantages et inconvénients ont permis le recyclage de différents types de

déchets du service public. À mesure que les innovations et les avancées technologiques continuent d'émerger, les améliorations en matière de recyclage continuent de progresser. Ces avancées technologiques grâce à la recherche sont requises par les entreprises de recyclage, car l'industrie de la fabrication du plastique n'attend pas que la technologie du recyclage progresse avant de concevoir et de fabriquer de nouveaux produits. L'intégration requise des parties prenantes, l'application de la réglementation, les connaissances et la sensibilisation au recyclage ainsi que le développement de systèmes sont nécessaires pour une mise en œuvre réussie des programmes de recyclage, mais doivent être compatibles avec le contexte. L'intégration de la communauté dans le processus de recyclage est nécessaire car les déchets sont générés par tous les aspects de la vie, c'est-à-dire les lieux de travail et les familles. Enfin, les différentes stratégies de recyclage des déchets des services publics ne sont pas durables à 100 % mais contribuent à résoudre les problèmes de déchets des services publics.

Chapitre III
Bétons polymères à base de
déchets plastiques :
Applications

III.1. Introduction

Le béton traditionnel à base de ciment Portland est considéré comme l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, en raison de son faible coût et de sa facilité d'application en plus de sa résistance élevée à la compression. D'un autre côté, le béton traditionnel présente certains inconvénients dans ses propriétés, tels qu'une perméabilité élevée, une faible résistance à la traction et au fendillement et une faible résistance chimique [72]. L'utilisation de matériaux polymères a commencé dans diverses applications de génie civil dans le but essentiellement d'augmenter la résistance et la durabilité des matériaux, en plus de contribuer à réaliser les travaux d'entretien et de réparation en un temps record, en plus de leur capacité à résister à des pressions élevées dans des conditions difficiles [73, 74]. Les recherches sur l'utilisation de matériaux polymères ont commencé au milieu du siècle dernier pour les incorporer au béton. À utiliser pour des travaux de réparation et de renforcement ainsi que pour une utilisation en structure. Il a été observé que l'utilisation de matériaux polymères a effectivement contribué à améliorer considérablement les propriétés mécaniques [43].

III.2. Définition de bétons polymères

Le béton polymère (Figure III.1) est un matériau composite produit en combinant et en mélangeant des granulats et un matériau polymère (résine ou liant) dans des proportions spécifiques. Les granulats et le liant polymère sont remplacés par du ciment et de l'eau pour obtenir du béton polymère. Le matériau polymère recouvre l'agrégat agissant comme une colle et forme ainsi la structure à obtenir [44, 74, 75]. Les types de polymères largement utilisés comme liants dans la production de béton polymère sont des polymères thermodurcissables tels que le polyester styrène, l'acrylique et l'époxy [76]. Cependant, des matériaux polymères thermoplastiques ont été utilisés comme matériaux de remplissage en raison de la difficulté de leur manipulation [77], mais au cours des dix dernières années, on a observé un certain nombre de recherches axées sur l'utilisation de polymères thermoplastiques comme liants pour granulats, car ce type de polymères le béton est réalisé en milieu réfractaire [77]. On constate que le béton à base de polymère présente de nombreux avantages par rapport au béton traditionnel. Ces avantages incluent une résistance et une durabilité élevées, une résistance chimique élevée, des méthodes de traitement très rapides et de faibles taux d'absorption d'eau [74, 76]. Le béton polymère est utilisé dans diverses applications. Nous mentionnons par exemple les conduites d'égout, certains travaux de réparation, les panneaux décoratifs, et ils

sont également utilisés comme matériaux de revêtement sur des surfaces exposées à divers facteurs agressifs [74].



Figure III.1. Béton polymère

III.3. Classification des bétons polymères

L'idée générale des composites de béton polymère, vue d'un point de vue technique, implique un processus dans lequel divers produits chimiques (monomères, oligomères, prépolymères et polymères) sont incorporés dans un mélange de béton, puis subissent une polymérisation et une polycondensation par des méthodes thermo catalytiques ou alternatives. En règle générale, les composites de béton polymère sont créés en remplaçant et en renforçant une partie ou la totalité du liant de ciment hydraté présent dans le mortier ou le béton conventionnel par des polymères [75]. Les systèmes et composites de béton et de polymères sont classés dans la Figure III.2 sur la base des principes des processus technologiques.

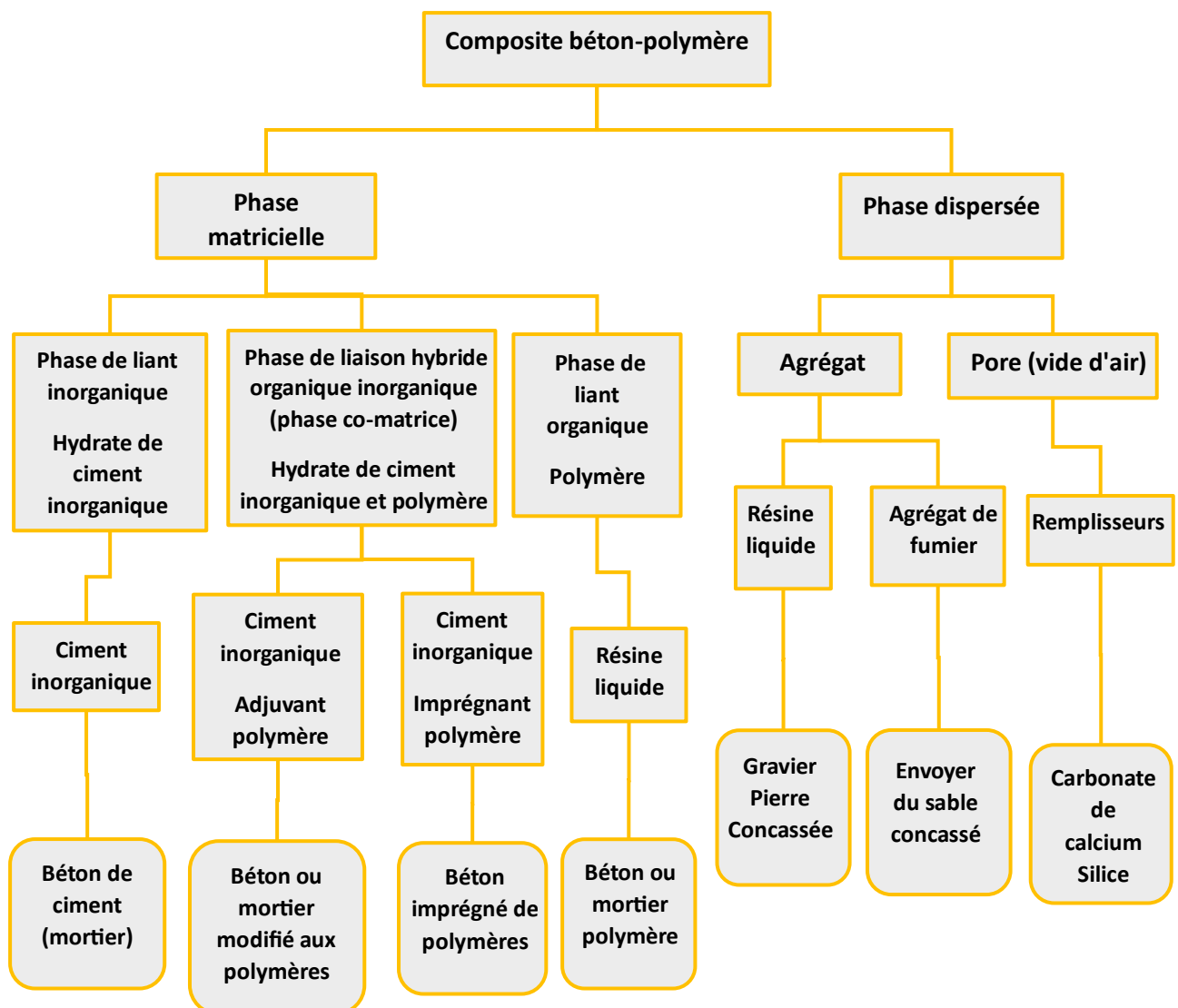


Figure III.2. Classification des systèmes et composés de béton et de polymères [73]

III.4. Différent Types de polymère

Les polymères sont classés en plusieurs catégories selon leurs propriétés et leur composition chimique. Voici quelques classifications courantes :

III.4.1. Thermoplastiques

Ce sont ceux qui peuvent être fondus et retraités plusieurs fois sans provoquer de changement chimique majeur. Il conserve ses propriétés d'origine après refroidissement. On cite par exemple le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène... [78].

III.4.2. Thermodurcissable

Ces polymères subissent une réaction chimique qui aboutit à la formation d'une structure réticulée tridimensionnelle. Une fois formé et pris, il ne peut pas être facilement refondu ou traité. On mentionne les résines époxy, les résines polystyrène et les résines phénoliques [79].

III.4.3. Élastomères

Ce sont des polymères qui ont une élasticité semblable à celle du caoutchouc et peuvent subir des déformations importantes sous pression. Il présente un degré élevé de réticulation, ce qui lui permet de reprendre sa forme initiale après déformation. Un exemple en est le caoutchouc naturel et le caoutchouc synthétique tel que le polyisoprène et le néoprène [80] (Figure III.3).



Figure III.3. Quelques produits par élastomères

III.5. Propriétés des polymères

III.5.1. Propriétés mécaniques des polymères thermoplastiques et thermodurcissables.

Les polymères thermoplastiques et les polymères thermodurcissables sont deux grandes classes de polymères possédant des propriétés mécaniques distinctes. Le Tableau III.1 montre quelques propriétés mécaniques et physiques de certains types. Il est important de noter que ces propriétés peuvent varier considérablement en fonction de la composition spécifique du polymère, des conditions de traitement et des éventuels additifs ou renforts qui y sont incorporés [81].

Tableau III. 1. Propriétés mécaniques et physiques de quelques polymères [81]

Polymères	Densité (g/cm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module de flexion (GPa)
Époxy	-	55-130	2.7-4.1	110-150	03-avr
Phénolique	-	50-60	04-juil	80-135	02-avr
Polyester	-	34-105	2.1-3.5	70-110	02-avr
Vinylesters	-	73-81	3-3.5	130-140	3
Poly lactide	1,24	56,3	3,6	-	-
Polyester	1,2	61	4	-	-
Chlorure de polyvinyle (PVC)	1,35	48	3,3	-	-
Polystyrène	-	46	2,9	-	-
Polypropylène (PP)	0.899 - 0.920	26 - 41.4	0.95 - 1.776	55,2	0.83-1.73
Polyéthylène basse densité (LDPE)	0.910 - 0.925	4-78.6	0.055 - 0.38	-	-
Polyéthylène haute densité (PEHD)	0.941 - 1	14.5- 38	0.413- 1.490	-	0.41-1.07

III.6. Constituants et domaines d'applications des bétons polymères

Le béton polymère est constitué d'un liant organique, généralement thermodurcissable mais parfois thermoplastique, et d'une ou plusieurs charges minérales telles que du sable ou du gravier. Lorsque du sable est utilisé comme charge, le produit obtenu est appelé mortier de résine. De plus, des matériaux fins tels que de la poudre de marbre, de la fumée de silice et des cendres volantes peuvent être inclus dans les mélanges [34].

III.6.1. Matériau de liaison

Dans le béton polymère, un liant désigne généralement le matériau qui lie les particules d'agrégats entre elles, assurant la cohésion et l'intégrité structurelle du composé. Ce liant est généralement composé de résines polymères, et les résines couramment utilisées comprennent l'époxy, le polyester et l'acrylique. D'autre part, certains incluent des matières plastiques telles que le PEHD, le PELD et le PP. Ces liants subissent la formation d'une matrice solide qui lie les agrégats, améliorant ainsi la résistance et la durabilité globales du béton pour le béton polymère [43, 82].

III.6.2. Granulats

Dans le béton polymère, le terme « filler » désigne les matériaux granulaires ajoutés au composite pour améliorer ses propriétés et ses performances. Les fillers jouent un rôle crucial dans la détermination des propriétés globales du béton. Les fillers couramment utilisés comprennent le sable, le gravier, la poudre de calcaire et plusieurs autres. Ils contribuent à améliorer la résistance à la compression et à la traction du béton polymère. Les fillers du béton polymère sont des composants essentiels qui améliorent les propriétés mécaniques du composite, la rentabilité et les performances globales [44, 75].

III.7. Applications des bétons polymères à base de déchet plastique

Le béton polymère à base de déchets plastiques est une solution innovante et durable dans le secteur de la construction. Il tire parti du plastique recyclé pour créer des matériaux qui peuvent offrir une variété d'avantages et d'applications. Voici quelques-unes des principales applications :

III.7.1. Pavage et construction de routes

Le béton polymère peut être utilisé pour paver les routes, les trottoirs et les parkings. L'utilisation de plastique recyclé améliore la durabilité et la résilience de la surface, ce qui peut réduire les coûts d'entretien et améliorer la résistance à la corrosion liée aux intempéries. Dans une étude de [Traore \[83\]](#) une méthode est proposée pour réutiliser les déchets plastiques en fabriquant des matériaux pouvant être utilisés dans les revêtements de sol intérieurs et extérieurs. La technique de pressage manuel et la technique de pressage thermique ont été adoptées. Dans les deux méthodes, du sable a été mélangé à du plastique fondu. Afin d'améliorer la résistance mécanique et d'élargir le champ d'utilisation des matériaux, des échantillons ont été fabriqués en utilisant les deux méthodes. Les résultats ont permis de constater que la résistance mécanique du pressage thermique est plus élevée en raison de la pression exercée qui renforce la cohésion entre le sable et les déchets plastiques. Les résultats obtenus ont également été comparés aux exigences des spécifications standard pour les matériaux de revêtement routier (chaussée) et les revêtements de sol. Il est démontré que les matériaux peuvent être utilisés comme revêtements de sol et carreaux de sol ([Figure III.4](#)).



Figure III.4. Paver de routes : Echantillons [77]

L'article de recherche de [Shitote, et al. \[44\]](#) aborde la question de la gestion des déchets de sacs en plastique et son impact sur l'industrie des pavés. L'étude s'est concentrée sur l'utilisation de plastique à faible densité (LDPE) comme liant à la place du ciment dans la fabrication de pavés ([Figure III.5](#)), ce qui contribue à améliorer les propriétés techniques de ces pavés. L'article indique également que l'utilisation de plastique fondu avec du sable et des granulats grossiers peut donner des pavés plus flexibles et plus résistants à l'eau.



Figure III.5. Échantillon de pavé [43]

Dans une autre étude de [Thiam, et al. \[10\]](#), les propriétés mécaniques d'un mortier fabriqué à partir de déchets plastiques fondus comme seul liant ont été étudiées. L'étude se concentre sur l'influence de la composition du matériau et du système de traitement sur les performances de ce mortier, en référence à ses applications potentielles dans la ville de Bamako. Un type de matériau de construction appelé blocs emboîtables en plastique fondu a été fabriqué, qui utilise des déchets plastiques fondus (tels que le PEHD et le PEBD) comme seul liant. Ces blocs ([Figure III.6](#)) sont conçus pour être utilisés dans des zones non fréquentées, telles que les trottoirs, les allées, les places et les parcs publics. Ces blocs ont de bonnes propriétés mécaniques, telles qu'une résistance et une durabilité élevées, en plus d'être respectueux de

l'environnement, car ils contribuent à réduire les déchets plastiques et à améliorer la durabilité dans le secteur de la construction.



Figure III.6. Exemple de cour de maison à Bamako avec des pavés autobloquants échantillons avec des déchets plastiques fondus [10]

III.7.2. Tuiles de routes

Un matériau de construction connu sous le nom de sable lié au plastique a été développé par [Kumi-Larbi Jnr, et al. \[29\]](#). Ce matériau est constitué d'un mélange de sable et de plastique. Les tuiles sont fabriquées à partir de sable lié au plastique ([Figure.III.7](#)). Ce matériau fait partie des innovations dans le recyclage des déchets plastiques, où le plastique est combiné au sable pour produire des tuiles qui peuvent être utilisées dans la construction. Ce matériau présente des propriétés mécaniques similaires à celles du béton bitumineux, ce qui le rend adapté à une utilisation dans les applications de construction.



Figure III.7. Formation des tuiles à partir de sable lié plastiquement [29]

III.7.3. Briques de construction

La brique est l'un des éléments de construction les plus importants et les plus utilisés. Elle a subi des changements structurels progressifs pour faire face aux contraintes économiques et environnementales croissantes auxquelles sont confrontées les industries. Certaines recherches ont permis d'utiliser les déchets plastiques dans les industries du briquetage afin de réduire la pollution environnementale résultant de l'accumulation d'un pourcentage élevé de déchets plastiques.

Dans un document de recherche de [Patil, et al. \[33\]](#), il a mené une préparation expérimentale pour la fabrication de briques de sable en plastique à partir de polyéthylène et de polypropylène, a caractérisé les nouvelles briques et les a comparées aux briques de sable. Des échantillons de briques de sable en plastique ont été préparés en fonction de différents rapports plastique/sable ([Figure III.8](#)). Des tests sont effectués pour déterminer la résistance à la compression, l'efflorescence, l'absorption d'eau, la durabilité et la résistance au feu. Les résultats montrent que la brique de sable en plastique a une dureté et une durabilité plus élevées, un faible taux d'absorption d'eau, est exempte d'efflorescence et constitue une source efficace de réduction des déchets plastiques.



Figure.III.8. Échantillons de briques en plastique fabriquées [33]

Dans un autre article de recherche de [Aneke and Shabangu \[31\]](#), évoque la production de briques de construction respectueuses de l'environnement à partir de déchets plastiques et de sable d'usine ([Figure III.9](#)). La recherche se concentre sur la manière de convertir ces déchets en matériaux de construction durables, ce qui contribue à réduire la pollution de l'environnement et à améliorer l'efficacité des ressources. Elle propose également des solutions grâce à la réutilisation des déchets dans la fabrication de briques, ce qui contribue à résoudre les problèmes de logement et à atteindre un équilibre économique, social et environnemental.

La recherche a montré des résultats positifs indiquant que les nouvelles briques peuvent surpasser les briques d'argile traditionnelles en termes de résistance.



Figure III.9. Briques fabriquées à partir de déchets plastiques et de sable [31]

III.7.3. Tuiles

Un article de [Perera, et al. \[84\]](#) examine la littérature sur le développement de matériaux de construction fabriqués à partir de sable et de plastique recyclés, notamment la technologie, les défis, la qualité et les propriétés. L'article se concentre également sur la fabrication commerciale de carreaux de sol ou de pavage en utilisant du plastique recyclé comme liant, avec du sable ou du verre comme charge. Les produits fabriqués à partir de sable et de plastique dans une machine commerciale (SinterMachines) sont présentés dans la [Figure III.10](#).

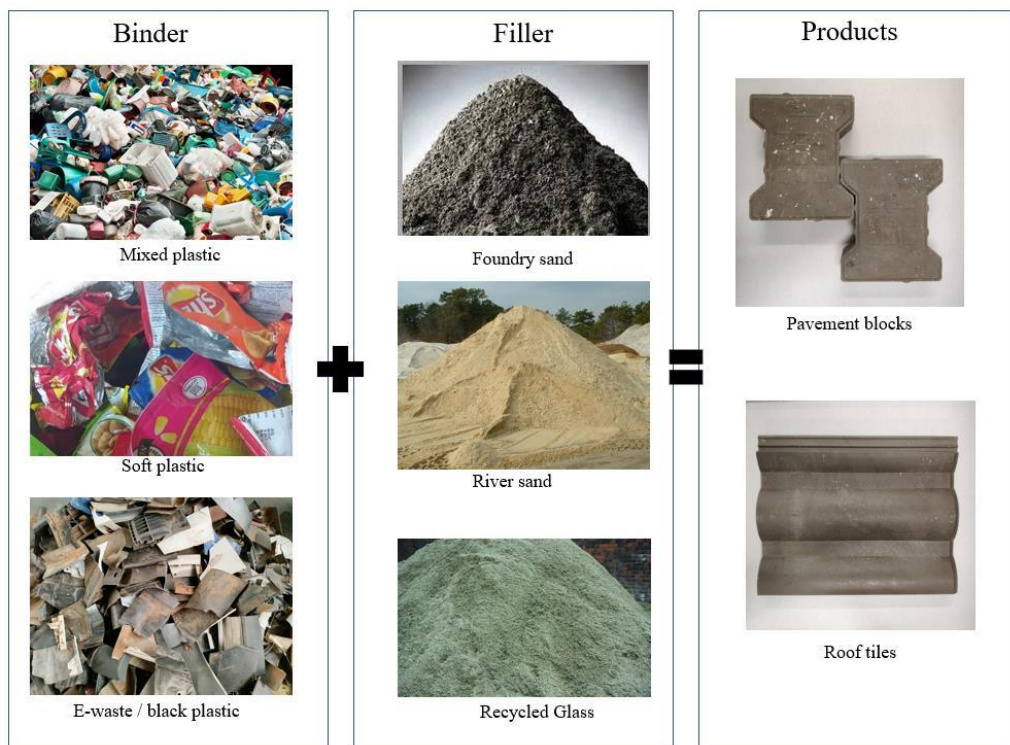


Figure III.10. Plastic/Sand Roof and pavement tiles [84]

Dans certains pays, certaines entreprises produisent un nouveau matériau pour couvrir les toits, il simule l'apparence des tuiles d'argile et de béton naturelles mais est plus léger et plus résistant (Figure III.11). De plus, c'est un matériau durable car nous utilisons du contenu recyclé dans sa fabrication et contribue ainsi à un environnement plus propre et plus sûr (<https://www.ecoblocksandtiles.co.ke/>).



Figure III.11. Polymères et tuiles artificielles (<https://www.ecoblocksandtiles.co.ke/>)

III.7. Conclusion

Le béton polymère fabriqué à partir de déchets plastiques offre une solution prometteuse à de nombreux défis environnementaux et techniques, en contribuant à réduire la quantité de plastique dans les décharges et les océans, contribuant ainsi à la durabilité environnementale. Des recherches ont montré que l'incorporation de déchets plastiques peut améliorer certaines des propriétés mécaniques du béton, telles que la résistance à la traction et la durabilité, le rendant ainsi adapté à diverses applications de construction. Bien que la production de polymères ait des coûts environnementaux, l'évaluation globale du cycle de vie indique un impact positif net si l'on considère la réduction des déchets et la conservation des ressources. La poursuite des recherches est essentielle pour améliorer les formulations de béton polymère, améliorer leurs propriétés et comprendre les performances et la durabilité à long terme dans différentes conditions environnementales. Non seulement le béton polymère à base de déchets plastiques offre une alternative viable au béton conventionnel, mais il favorise également une économie circulaire en s'attaquant aux problèmes des déchets plastiques tout en améliorant les matériaux de construction. L'innovation et la recherche continues seront essentielles pour réaliser son plein potentiel dans le secteur de la construction.

Chapitre IV

Travaux Expérimentaux

IV.1. Introduction

Le développement incessant de la technologie a poussé l'utilisation des matériaux innovants et créer une compétition dans tous les domaines de l'industrie. Le plastique est l'un des matériaux les plus utilisés au monde, mais il pose un problème environnemental majeur en raison de sa difficulté à se décomposer et à se désintégrer, en plus de ses taux de consommation et de production élevés. En raison de son utilisation continue, le plastique peut perdre certaines de ses propriétés et devenir ainsi moins utilisable pour l'usage auquel il est destiné. Dans ce cas, il est considéré comme un déchet et est généralement éliminé comme poubelle ou brûlé. Dans la perspective du recyclage des déchets plastiques, l'élaboration de nouveaux matériaux de construction est une des solutions pertinentes. Dans ce prétexte, la gestion des déchets solides est devenue parmi les préoccupations à l'échelle mondiale en raison des quantités croissantes de déchets.

Les différents types de matériaux recyclables sont actuellement utilisés dans différents types de matériaux recyclables sont actuellement utilisés dans différentes applications telles qu'en construction de bâtiments, les routes, les allées, les fondations, et systèmes de drainage. L'une des applications est la fabrication de béton polymère. Le principe d'élaboration de ce produit consiste à mélanger du sable (dunes, rivières, industriel, grossier ...) avec des déchets plastiques tout en suivant la technique de mélange de ces produits. Les déchets plastiques sont nombreux, parmi ses déchets, on trouve des particules de caoutchouc de polychlorure de vinyle (PVC), polyéthylène téréphtalate PET, du polyéthylène haut densité (PEHD) et du polypropylène (PP). De nombreux travaux ont été réalisés jusqu'à présent, et d'autres en cours, et ce, pour évaluer les propriétés des matériaux innovants. La littérature nous a permis de connaître les différentes techniques d'élaboration de ses matériaux. La méthode la plus rentable et est celle de l'extrusion. Cette technique peut contribuer à l'exploitation optimale des déchets plastiques et à faciliter le processus de fusion du plastique et assurer un bon mélange. Notre objectif au début de cette recherche était de parvenir à une bonne technique permettant d'obtenir un mélange homogène à l'aide d'une extrudeuse.

IV.1.2. Principe de l'extrusion

Le principe de l'extrusion du plastique consiste à former des matières plastiques tous en les forçant à travers une filière pour créer des produits ayant une section transversale spécifique [85]. Le plastique brut est généralement sélectionné sous forme de granulés ou de poudre en fonction des propriétés souhaitées. La matière plastique est d'abord introduite dans l'extrudeuse via une trémie, le plastique déplace dans le cylindre de l'extrudeuse, où il subit à son tour un chauffage contrôlé. La combinaison de la chaleur et du torsion mécanique de la vis rotative fait fondre le plastique, le transformant ainsi en un état fondu visqueux. La conception de la vis, souvent dotée de trépan ou de rainures, assure un mélange complet des matériaux, qui peuvent inclure des additifs tels que des colorants ou des adjuvants, pour l'amélioration des propriétés rhéologiques, propriétés d'usage. Après ces étapes, le plastique fondu est finalement forcé à travers une filière aux dimensions souhaitées. Après sa sortie de la filière, le matériau extrudé est refroidi, généralement avec de l'air ou de l'eau froide, ce qui lui permet de durcir jusqu'à sa forme finale.

IV.1.3. Types d'extrusion plastique

- **Extrusion mono vis** : La méthode la plus couramment utilisée, où la matière plastique est transportée par une seule vis.
- **Extrusion à double vis** : cette technique est utilisée pour favoriser un bon mélange en utilisant deux vis imbriquées qui peuvent s'adapter à des formulations plastiques plus complexes.
- **Coextrusion** : implique l'utilisation de plusieurs extrudeuses pour superposer différents matériaux en extrudant simultanément deux ou plusieurs pièces, ce qui permet d'obtenir des produits aux propriétés variées.

Généralement l'extrusion plastique est une technologie de fabrication essentielle qui permet la production efficace d'une grande variété de produits en plastique. Sa capacité à créer des formes et des profils complexes la rend largement utilisée dans de nombreux secteurs, de la construction aux biens de consommation.

A notre niveau, nos laboratoires ne disposent pas d'une extrudeuse appropriée à l'élaboration de béton en plastiques. Pour cela, nous avons procédé à la conception et la fabrication d'une extrudeuse pour la réalisation de nos produits d'étude.

IV.1.4. Conception d'une extrudeuse

Notre extrudeuse est composée de différents systèmes qui peuvent assurer la formulation d'un mélange (sable, déchets plastique) selon les perspectives envisagées on trouve :

a) Système d'entraînement de l'axe

Le système d'entraînement de l'axe d'extrusion est un élément clé pour convertir l'énergie mécanique en mouvement rotatif, nécessaire pour faire tourner la vis de l'extrudeuse. Ce système se compose essentiellement d'un moteur électrique, qui est utilisé pour fournir la puissance nécessaire pour entraîner la vis. Le moteur dispose également d'un réducteur de vitesse pour réduire la vitesse de rotation du moteur tout en augmentant le couple, ce qui est nécessaire pour les applications d'extrusion. Le moteur est relié à la vis de l'extrudeuse par un système de chaîne et des pignons comme illustré à la [Figure IV.1](#).

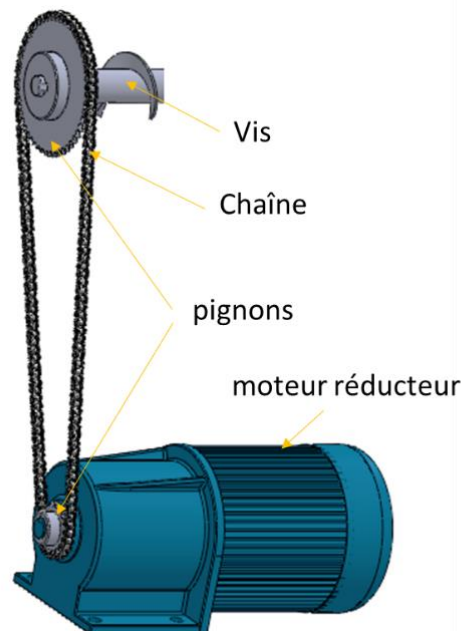


Figure IV.1. Système d'entraînement de l'axe

b) Système d'alimentation de matières

Le système d'alimentation en matière dans l'extrudeuse est essentiel pour assurer un flux continu et efficace de matières premières pendant le processus d'extrusion. Le composant principal est la trémie, qui est le principal conteneur de stockage des matières premières. Elle a souvent une forme conique pour faciliter le flux descendant des matériaux et est installée au début du premier cylindre ([Figure IV.2](#)). Le matériau est ensuite alimenté vers le dispositif d'extrudeuse via un mécanisme en spirale rotatif (Vis). La distance et le diamètre de la spirale sont conçus pour obtenir un écoulement optimal du matériau dans les cylindres. Le matériau sort ensuite du dernier cylindre par une petite ouverture.

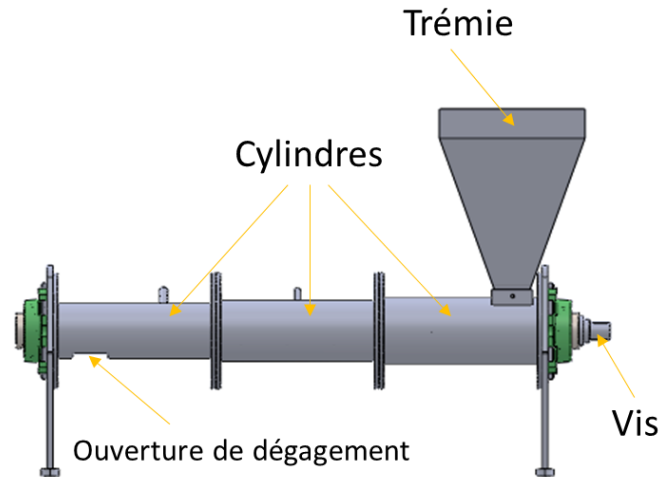


Figure IV.2. Système d'alimentation de matières

c) Système de fusion de plastique

Le système de fusion du plastique dans l'extrudeuse est l'un des principaux composants qui transforme les chutes de plastique solides en un état fondu, leur permettant d'être mélangées aux grains de sable. Les cylindres sont le principal endroit où le plastique fond, ces pièces sont en acier pour résister aux températures élevées et améliorer la fusion. Des éléments chauffants électriques sont enroulés autour des cylindres pour fournir la chaleur nécessaire à la fusion du plastique (Figure IV.3). Les matériaux à l'intérieur des cylindres passent par trois zones, la zone d'alimentation est l'endroit où les matériaux sont introduits dans leur état solide. Elle est généralement plus froide que les autres sections, suivie immédiatement par la zone de transition où le plastique commence à fondre et à se mélanger au sable, où la température augmente progressivement dans cette zone. La zone de fusion est la zone de température la plus élevée où le plastique est complètement fondu et bien mélangé au sable, la vitesse de rotation de la vis et sa conception sont également essentielles pour une fusion efficace et un bon mélange.

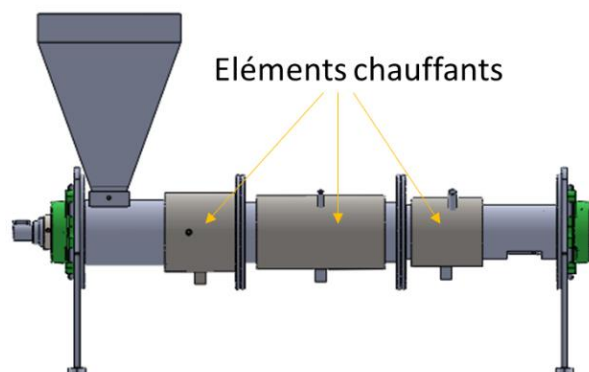


Figure IV.3. Système de fusion de plastique

d) Système de contrôle

Le système de contrôle de l'extrudeuse joue un rôle crucial pour garantir un fonctionnement efficace. En surveillant et en ajustant les paramètres critiques tels que la température et le fonctionnement du moteur, il contribue à maintenir des conditions idéales tout au long du processus d'extrusion et à garantir la sécurité opérationnelle. Les contacteurs électriques reçoivent des commandes du thermostat pour allumer et éteindre les éléments chauffants. Le thermostat est le cerveau du contrôleur en recevant les entrées des capteurs et en envoyant des commandes aux contacteurs électrique. Grâce à lui, les températures minimales et maximales nécessaires pour maintenir certaines températures dans les cylindres sont définies. Les capteurs de température sont également des éléments permettant de surveiller la température des cylindres afin de garantir qu'elle reste dans les limites spécifiées. Nous disposons également de disjoncteurs qui, à leur tour, protègent tous les éléments électriques et le moteur. Tous ces éléments sont installés dans l'armoire électrique illustrée à la [Figure IV.4](#).



Figure IV.4. Éléments d'armoire électrique

La [Figure IV.5](#) montre l'extrudeuse dans son état final et le [Tableau IV. 1](#) répertorie certaines de ses propriétés.



Figure IV.5. L'extrudeuse dans son état final

Tableau IV. 1. Caractéristiques de l'extrudeuse

Paramètres	Valeurs
Diamètre de la racine de la vis	5 cm
Longueur de la vis	120 cm
Épaisseur du filet	0.8 cm
Profondeur du canal à l'extrémité de la vis	1.5 cm
Vitesse de rotation de la vis	25 t/min
Température max.	400 °C

IV.2. Partie 01 : Caractéristiques des déchets PP

La possibilité d'utiliser des déchets plastiques peut être une solution environnementale appropriée. L'une de ces méthodes consiste à recycler ces déchets en d'autres produits aux propriétés limitées. Dans cette partie du travail, nous avons analysé ainsi nous avons préparé des échantillons de déchets de polypropylène (PP Déchets) et de polypropylène vierge (PP Vierge), et nous avons comparé leurs différentes propriétés.

IV.2.1. Matières premières

- **Déchets plastiques (PP)**

Les déchets plastiques provenaient de divers types de contenants et d'articles en matière plastique collectés, on peut même les récupérer des centres de recyclage locaux. Pour faciliter le tri, les différents types de plastiques sont identifiés par des codes numériques indicatifs que l'on trouve généralement sur les emballages.

Les déchets PP sont l'un des déchets solides qui prennent beaucoup de temps à se dégrader, il est donc logique de recycler ce type de déchet afin de réduire son impact environnemental [86].

Une fois triés, les déchets PP ont subi un processus de découpe à l'aide d'un broyeur visant à réduire la taille des morceaux plastiques. Généralement, les morceaux obtenus ont une superficie variant de 5 mm² à 10 mm² comme le montre la [Figure IV.6](#).

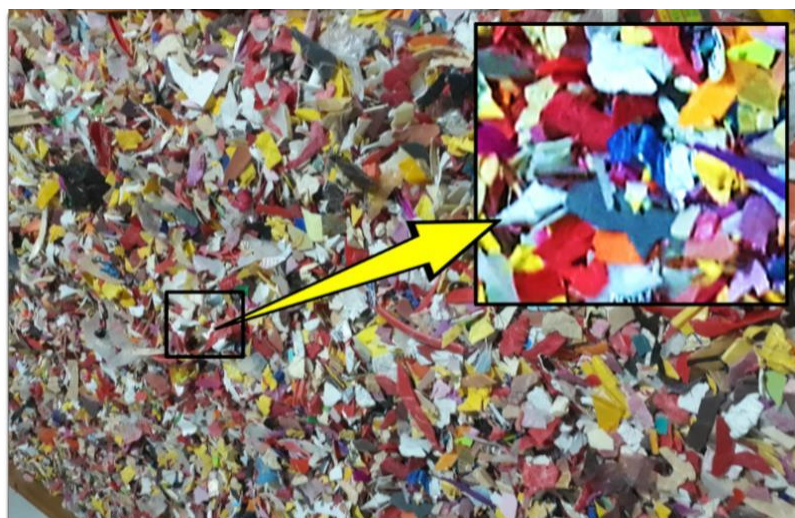


Figure IV.6. Déchets plastiques en polypropylène

Pour éliminer le maximum des contaminants ou résidus adhérant aux surfaces des morceaux plastique, ainsi pour garantir la propreté et la pureté du matériau, un lavage puis un séchage minutieux des morceaux en plastique ont été effectués. En lavant et en séchant méticuleusement les déchets plastiques, toute interférence potentielle avec une analyse ou une expérimentation ultérieure a été minimisée. A ce stade, le matériau plastique est rendu prêt pour toute éventuelle analyse.

L'une des caractéristiques pratiques PP est sa nature non hygroscopique [87]. Cette dernière caractéristique, qui va jusqu'à 0,2 %, peut-être une caractéristique utile lors du moulage. En d'autres termes, la teneur en humidité n'affecte pas les propriétés physiques du PP pendant le processus de moulage [40].

- **Plastiques vierge (PP Vierge)**

Le polypropylène vierge désigne le polypropylène qui n'a pas été utilisé, traité ou recyclé auparavant. Il se présente sous sa forme de matière première, produite directement à partir de la polymérisation de monomères de propylène. Le polypropylène vierge est un plastique polyvalent et largement utilisé avec plusieurs applications dans diverses industries. Il offre de nombreux avantages et son impact environnemental peut être traité par le recyclage pour réduire les déchets plastiques. Des granulés de polypropylène vierges ont été utilisés

IV.2.2. ATR-FTIR du PP

La technique de transformée de Fourier à réflectance totale atténuée (ATR-FTIR) fournit une méthode efficace pour déterminer rapidement divers détails concernant les liaisons chimiques et la composition de différents matériaux [88, 89]. Dans cette étude, la technique ATR-FTIR a été adoptée pour étudier la composition chimique du polypropylène brut et usagé à l'aide du spectromètre FTIR Agilent Cary 630 (Figure IV.7). Après préparation, une quantité appropriée (échantillons) de chaque type de matières plastiques brutes et usagées a été prélevée et c'était bien broyé. Différents spectres ont été mesurés dans la région de longueur d'onde de 4000 cm^{-1} à 400 cm^{-1} avec une précision de 2 cm^{-1} .



Figure IV.7. ATR-FTIR Spectromètre

IV.2.3. Préparation des échantillons

Afin de déterminer les propriétés mécaniques des déchets PP et de les comparer avec celles du PP vierge, un ensemble d'échantillons a été préparé pour des essais de traction et de flexion. Les granulés de polypropylène ont été chauffés à une température de 170°C et placés dans un moule et comprimés par une presse à chaud. Enfin, des échantillons ont été obtenus selon les normes ASTM D638-03 et ASTM D790, comme le montre la Figure IV.8.

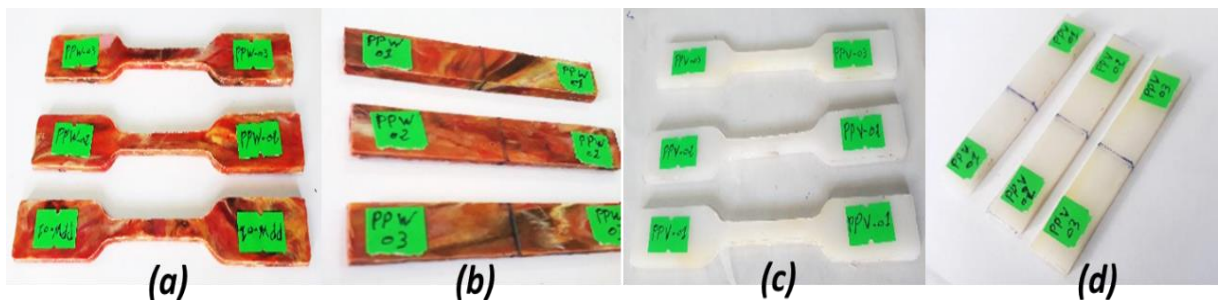


Figure IV.8. Éprouvettes d'essai de traction et de flexion : a, b) déchets de PP ; c, d) PP vierge

IV.2.4. Essais mécaniques

Dans cette première partie, des essais de traction et de résistance à la flexion trois points ont été réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques des deux types de polypropylène. Les essais de flexion ont été effectués à l'aide d'une machine d'essai YLE Universal TM/20 kN, illustrée à la Figure IV.9, fonctionnant à une vitesse transversale de 3 mm/min, conformément aux directives ASTM D790-10. Des essais de traction ont également été effectués sur la même machine selon

ASTM D638-03 en utilisant une vitesse transversale de 0,5 mm/min. Chaque type a été testé sur au moins trois échantillons pour garantir la fiabilité et l'exactitude des résultats.



Figure IV.9. Machine d'essai Universal YLE TM/20 kN

IV.3. Partie 02 : Effet de type de sable

L'objectif de cette partie est de déterminer les différentes caractéristiques des types de sable en étudiant les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de chaque type de béton polymère.

IV.3.1. Matières premières

- **Sable des dunes**

Pour cette étude, le sable de silice utilisé est facilement disponible auprès de sources locales. Plus précisément, quatre types distincts de sable de dunes naturelles ont été collectés à divers endroits dans la province méridionale de M'sila, en Algérie, comme indiqué sur la carte présentée à la Figure IV.10. Pour garantir la pureté et l'adéquation des échantillons de sable à l'expérimentation, ils ont subi un processus de nettoyage à l'eau. Cette étape vise à éliminer toutes les impuretés ou contaminants susceptibles d'affecter les propriétés du sable. Une fois nettoyés, les échantillons de sable ont été laissés sécher complètement avant d'être intégrés à l'étude.

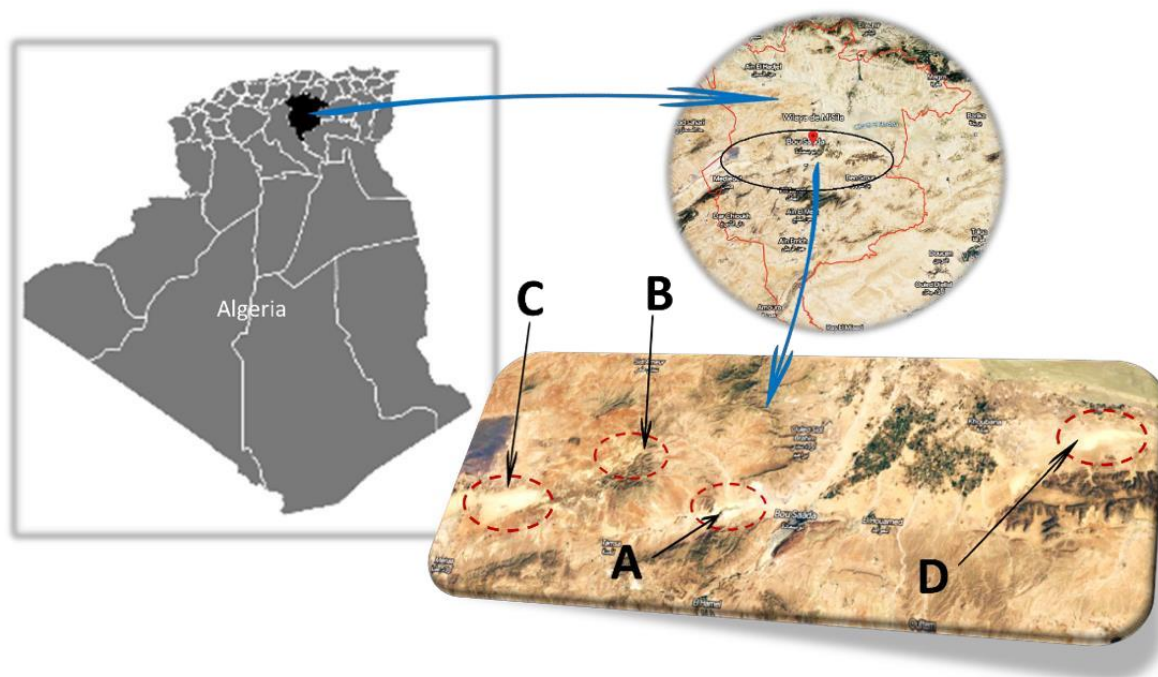


Figure IV.10. Carte de la province de M'sila montrant les régions où les dunes de sable ont été collectées ; A) Oued Meitar ; B) Ain Sbaa ; C) Sidi Ameer ; D) Khoubana

IV.3.2. Analyse des matériaux

IV.3.2.1. ATR-FTIR du sable

Dans cette partie de l'étude, la technique ATR-FTIR précédemment utilisée a été adoptée pour étudier la composition chimique de quatre types différents de sable siliceux. Après avoir préparé les différents types de sable, une quantité appropriée (échantillon) a été prélevée sur chaque type de sable. Les échantillons ont été broyés en poudre à l'aide d'un broyeur planétaire unique, les échantillons ont ensuite été tamisés à une taille de $80\ \mu\text{m}$, puis analysés par ATR-FTIR. Différents spectres ont été mesurés dans la plage de longueurs d'onde de $4000\ \text{cm}^{-1}$ à $400\ \text{cm}^{-1}$ avec une résolution de $2\ \text{cm}^{-1}$.

IV.3.2.2. Composition chimique

La composition chimique des quatre sables a été analysée à l'aide de la spectroscopie de fluorescence X (XRF) (Figure IV.11). La XRF est une technique couramment utilisée pour déterminer la composition élémentaire des matériaux en mesurant les rayons X fluorescents émis lorsqu'un échantillon est irradié avec des rayons X [90]. Dans cette étude, des échantillons de silice ont été préparés pour l'analyse XRF en étant finement broyés et homogénéisés pour garantir un échantillonnage représentatif. Les échantillons préparés ont ensuite été placés dans l'instrument XRF Bruker S8 Tiger. Lorsque les rayons X interagissaient avec les atomes de

l'échantillon, ils provoquaient l'émission de rayons X fluorescents caractéristiques. En détectant et en analysant ces rayons X émis, la composition élémentaire du sable de silice, y compris les concentrations de divers éléments présents, a pu être déterminée.



Figure IV.11. Instrument XRF Bruker S8 Tiger

IV.3.2.3. Analyse granulométrique

Pour déterminer les courbes de distribution granulométrique de différents échantillons de sable de silice, l'analyse a été réalisée selon la norme NF EN 933-1. Cette méthode implique une procédure systématique utilisant des tamis vibrants classés par ordre décroissant de diamètre [91]. Dans cette analyse, les échantillons de silice ont été soigneusement séchés pour éliminer toute teneur en humidité qui pourrait affecter les résultats. Par la suite, une partie représentative de l'échantillon séché a été pesée avec précision. L'étape suivante impliquait l'utilisation d'une série de tamis vibrants avec des tailles de mailles progressivement plus petites. Ces tamis ont été disposés en pile (Figure IV.12),



Figure IV.12. Tamiseuse électrique

Le tamis contenant les plus grandes ouvertures étant placé en haut et le tamis avec les plus petites ouvertures étant placé en bas. Une fois les tamis correctement disposés, l'échantillon de sable de silice préparé a été placé sur le tamis supérieur. La pile de tamis a ensuite été soumise à des vibrations mécaniques, généralement à l'aide d'un agitateur de tamis, pour faciliter la séparation des particules en fonction de leur taille. Après 15 minutes d'agitation, les tamis ont été soigneusement retirés de la pile et les particules retenues sur chaque tamis ont été collectées et pesées. Les courbes de distribution granulométrique ont ensuite été construites en fonction des poids de particules retenues sur chaque tamis

IV.3.3. Préparation des échantillons BP

Pour obtenir les matériaux en BP, tout d'abord, l'extrudeuse a été chauffée à une température souhaitée (195 ± 5 °C). Après cela, un mélange de sable et de déchets plastiques hachés (PP) a été introduit dans la vis par la trémie sous l'action de la gravité, comme illustré dans la [Figure IV.13](#). La rotation de la vis est assurée par un motoréducteur. La pâte homogène résultante (à 195 ± 5 °C) a été transférée dans un moule, qui était déjà chauffé à 200 ± 5 °C, puis a été comprimée à l'aide d'une presse à chaud pour créer des échantillons de BP de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm³ comme indiqué dans la norme NF EN 196-1.

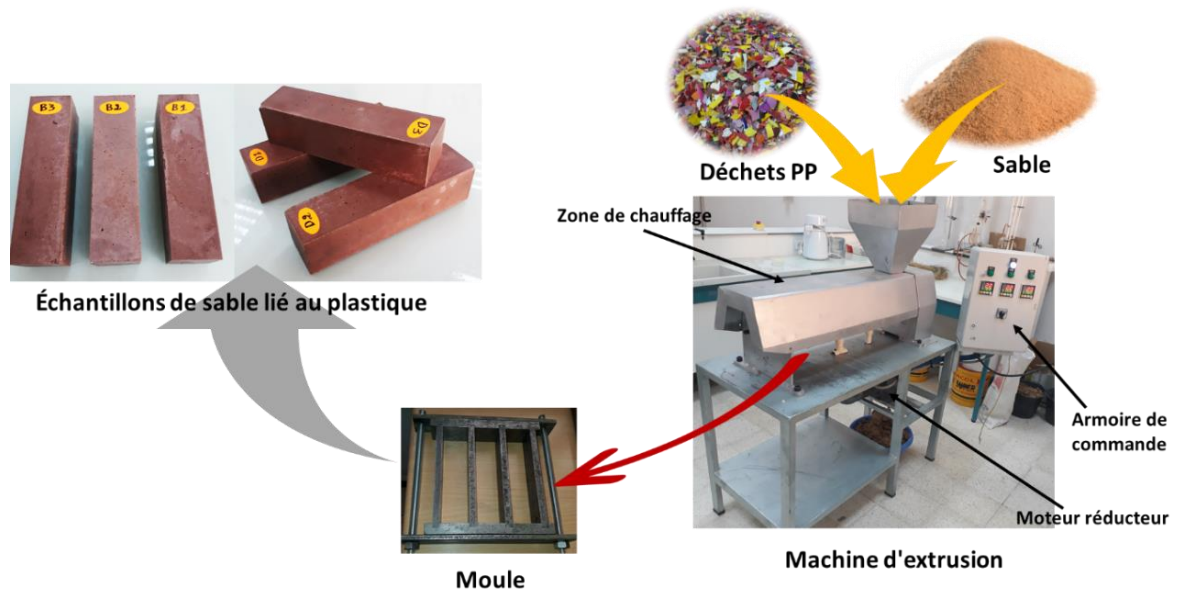


Figure IV.13. Méthodologie de fabrication du BP

Après le moulage, les produits de BP sont laissés refroidir et se solidifier, garantissant qu'ils conservent leur forme et leur intégrité structurelle. Enfin, les produits fabriqués peuvent subir des processus de finition, tels que le rognage ou le ponçage, pour obtenir les textures de surface ou les dimensions souhaitées. Sur la base d'études précédentes, différentes formulations

d'échantillons ont été envisagées pour la fabrication de BP. Dans la grande majorité des travaux sur le BP, les ratios de plastique utilisés ont été pris entre 20% et 50% [30, 33, 40, 44, 92]. Selon la littérature, les meilleurs résultats en matière de résistance à la flexion et à la compression ont été obtenus pour la formulation d'échantillon de 25% en poids de plastique [8, 30, 92]. Pour évaluer l'impact de différents types de sable sur les propriétés mécaniques et physiques des composites, quatre types d'échantillons de BP ont été formulés conformément au [Tableau IV.2](#).

Tableau IV.2. Formulation d'échantillons de composites de BP

Source de sable	Désignation du sable siliceux	Déchets de PP wt (%)	Sable siliceux wt (%)	Désignation du BP
Oued Meitar	Type A	25	75	Mat A
Ain Sbaa	Type B	25	75	Mat B
Sidi Aneur	Type C	25	75	Mat C
Khoubana	Type D	25	75	Mat D

IV.3.4. Test d'absorption d'eau

Pour effectuer un test d'absorption d'eau sur un matériau en BP, les échantillons ont été pesés individuellement à l'aide d'une balance précise pour déterminer le poids initial. Par la suite, les échantillons sont entièrement immergés dans l'eau pendant 24 h, pour permettre une saturation complète. Après la période d'immersion, les échantillons sont retirés, délicatement épongés pour éliminer l'excès d'humidité, puis pesés à nouveau pour obtenir leurs poids finaux. Le pourcentage d'absorption d'eau de chaque échantillon est calculé en utilisant la différence entre les poids finaux et initiaux, normalisée au poids initial et exprimée en pourcentage. La formule de calcul de l'absorption d'eau d'un échantillon est donnée dans l'équation 1. Cette procédure permet d'évaluer les propriétés d'absorption d'eau des matériaux, fournissant des informations précieuses sur leurs performances et leurs applications potentielles [93]

$$\text{Absorption d'eau (\%)} = \frac{\text{Poids humide} - \text{Poids sec}}{\text{Poids sec}} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

IV.3.5. Essais mécaniques

Dans cette étude, un essai de résistance à la flexion en trois points a été réalisé pour évaluer les propriétés mécaniques de divers matériaux. L'essai a été réalisé à l'aide d'une machine d'essai

YLE Universal TM/20 kN, fonctionnant à une vitesse de traverse de 0,4 mm/min, comme illustré à la [Figure IV.14 \(a\)](#), conformément aux directives ASTM D790-10. Ici, les échantillons ont été placés horizontalement sur deux points d'appui, avec une charge appliquée verticalement au point médian jusqu'à ce que la rupture soit atteinte. Tout au long de l'essai, les mesures de la charge appliquée et de la déflexion correspondante ont été enregistrées pour calculer la résistance à la flexion et le module d'élasticité. Chaque formulation de BP a été soumise à des essais sur au moins trois échantillons pour garantir la fiabilité et l'exactitude des résultats. Par la suite, les moitiés brisées des prismes résultant de l'essai de flexion ont été soumises à un essai de compression jusqu'à la rupture. Les mesures de charge et de déformation ont été enregistrées tout au long de l'essai. Cet essai a été réalisé à l'aide du système de commande et d'alimentation automatique Hydraulic Pilot Pro d'une capacité de 300 kN, en appliquant une vitesse de charge de 65 kN/min, comme illustré dans la [Figure IV.14 \(b\)](#). Ces procédures d'essai fournissent des informations précieuses sur le comportement mécanique et l'intégrité structurelle des échantillons de sable liés au plastique, contribuant ainsi à leur adéquation aux applications techniques.

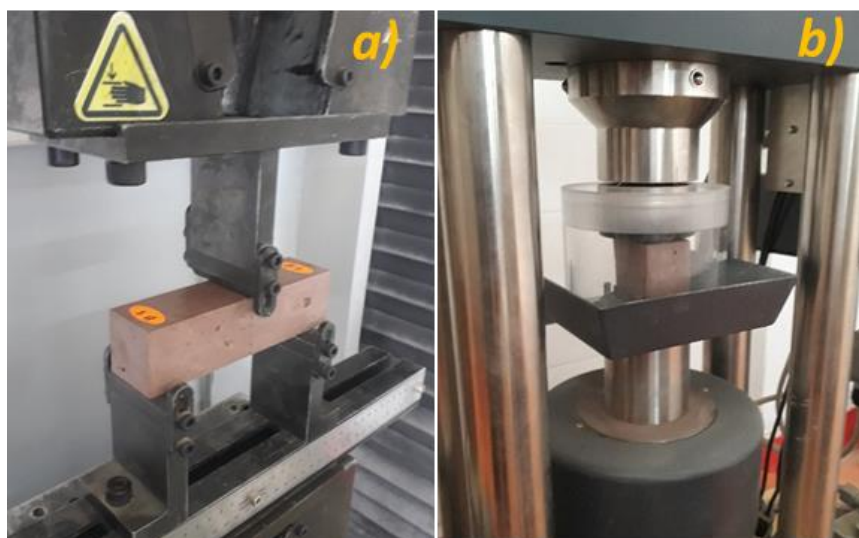


Figure IV.14. Essais mécaniques ; a) Essai de flexion en trois points ; b) Essai de compression

IV.3.6. Analyse ATR-FTIR

Dans cette partie, les spectres ATR-FTIR des différents BP ont été enregistrés en utilisant les mêmes techniques mentionnées dans la section IV.3.2.1.

IV.3.7. Analyse optique

Dans cette étude, une analyse optique approfondie a été réalisée sur les surfaces de fracture en flexion de différents échantillons de BP. Cette analyse a été réalisée à l'aide d'un microscope optique sophistiqué à haute résolution, en particulier la caméra Sunell IP CCD, qui a permis un examen détaillé des surfaces de fracture à un niveau microscopique. L'objectif principal de cette analyse était d'évaluer la qualité du mélange composé de déchets plastiques et de sable dans les échantillons de BP. Cela impliquait d'évaluer le niveau d'homogénéité, de distribution et d'interaction des particules de plastique et de sable dans l'ensemble de l'échantillon. De plus, l'analyse optique visait à identifier d'éventuels défauts, incohérences ou irrégularités dans le matériau.

IV.4. Partie 03 : Effet des déchets minéraux

La préparation du béton polymère est une étape essentielle dans la formation et la construction de structures solides et durables. Ce processus consiste à combiner différents matériaux, notamment du sable, des déchets plastiques et des additifs (déchets minéraux), pour produire un matériau solide avec de nouvelles propriétés. La composition et les propriétés du BP peuvent varier en fonction de l'utilisation prévue, ce qui nécessite une expérimentation pour déterminer les proportions optimales de chaque composant.

Dans cette partie, nous décrirons les différentes étapes de préparation et de caractérisation des échantillons de BP. Puis, nous analysons les différentes propriétés des matériaux, ainsi que les méthodes expérimentales utilisées pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques des produits finaux.

IV.4.1. Matières premières

- **Déchets plastiques**

Les déchets plastique polypropylène sont considérés comme le matériau liant du béton polymère produit lors de la première étape de notre recherche. Dans cette étape, les mêmes déchets plastiques (PP) sont utilisés.

- **Sable des dunes**

Le sable est considéré comme le deuxième matériau de base le plus important dans le béton polymère. Lors de la première étape, nous avons déterminé l'effet du type de sable sur le béton polymère, comme il nous est apparu quel type de sable est le bon parmi les types étudiés. Dans cette étape, nous avons utilisé le sable qui a les bonnes performances.

- **Déchets Minéraux**
 - **Déchets de brique (chamotte)**

Le brique est le deuxième matériau de construction le plus utilisé après le béton et est traitée comme un déchet de construction et de démolition si des dommages surviennent lors de la fabrication. Les briques d'argile recyclées peuvent aider à résoudre le problème de l'élimination des déchets solides ainsi qu'à réduire les dommages environnementaux causés par l'exploitation excessive des ressources et les activités de construction et de démolition. Les briques d'argile usagées (chamotte) peuvent être broyées (poudre) pour être utilisées dans divers types de béton [94]. Dans cette recherche, nous avons utilisé trois types de déchets de briques provenant d'usines situées dans trois régions différentes. Nous avons broyé la chamotte dans un broyeur en acier, puis elle est tamisée à travers un tamis de 80 μm comme le montre la [Figure IV.15](#), pour être ensuite analysée et également utilisée dans différentes proportions dans la fabrication d'échantillons de béton polymère.



Figure IV.15. Préparation de chamotte a) Broyage ; b) Tamisage de la poudre chamotte

- **Déchets de marbre**

Les déchets de marbre désignent les sous-produits générés lors de l'extraction du marbre ou résultant également de son traitement et de sa finition. Ces déchets peuvent avoir différents impacts environnementaux, mais ils offrent également des possibilités de recyclage et de réutilisation. Les déchets de marbre peuvent être recyclés et utilisés comme agrégats dans le béton, ce qui peut en améliorer diverses propriétés [95]. Dans cette recherche, nous avons utilisé la poudre de déchets de marbre dans différentes proportions dans la fabrication d'échantillons de béton polymère, après l'avoir bien broyée puis tamisée à travers un tamis de 80 μm comme le montre la [Figure IV.16](#).



Figure IV.16. Tamisage de la poudre de marbre

IV.4.2. Analyse des matériaux

IV.4.2.1. Analyse ATR-FTIR

De la même manière que l'analyse des déchets de polypropylène et des échantillons de sable lors de la première partie de cette recherche, nous avons analysé les différents types de chamotte, ainsi les déchets de marbre (Figure IV.17) en utilisant la technique ATR-FTIR.

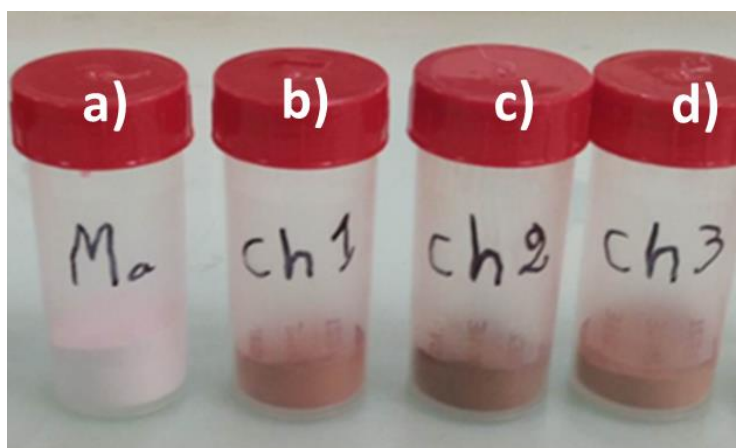


Figure.IV.17. Echantillons de différents types de chamotte et marbre : a) Marbre ; b) Chamotte

M'sila ; c) Chamotte Bordj Bou Arreridj ; d) Chamotte Boussaâda

IV.4.2.2. Composition chimique

La composition chimique de divers échantillons de chamotte et de marbre a été analysée par spectroscopie de fluorescence X (XRF) et par la même technique que celle utilisée dans la section IV.3.2.2.

IV.4.3. Fabrication du BP

Lors de cette étape nous avons suivi les mêmes techniques que l'étape précédente (IV.3.3), sauf que lors de cette étape un troisième élément est incorporé au mélange (poudre de chamotte ou poudre de marbre) avec des proportions différentes. Le même pourcentage de plastique est maintenu pour toutes les étapes, alors que le pourcentage de déchets minéraux (poudre de marbre et poudre de chamotte) varie par rapport au pourcentage du sable. Quatre échantillons ont été préparés à partir du sable associé aux déchets plastiques et minéraux. Pour chaque type de BP, trois échantillons sont élaborés comme indiqué dans le [Tableau IV. 3](#).

Tableau IV. 3. Taux de chaque composante

Type et source de déchets minéraux	Désignation du BP	Proportion de déchets PP en poids. (%)	Proportion de sable en poids. (%)	Proportion de déchets minéraux en poids (%)
Chamotte 1 M'sila	Mat MS 15%	25	85	15
	Mat MS 20%	25	80	20
	Mat MS 25%	25	75	25
Chamotte 2 Bordj Bou Arreridj	Mat BB 15%	25	85	15
	Mat BB 20%	25	80	20
	Mat BB 25%	25	75	25
Chamotte 3 Boussaâda	Mat BO 15%	25	85	15
	Mat BO 20%	25	80	20
	Mat BO 25%	25	75	25
Marbre	Mat MR 15%	25	85	15
	Mat MR 20%	25	80	20
	Mat MR 25%	25	75	25

La [Figure IV.18](#) montre les ensembles d'échantillons de béton polymère fabriqués.

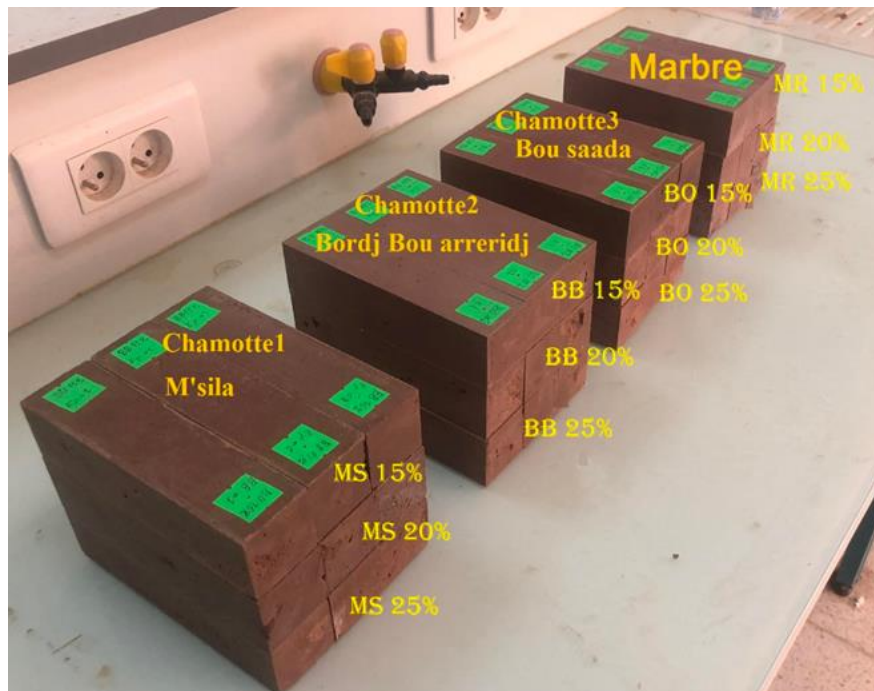


Figure IV.18. Différents échantillons

IV.4.3. Essais mécaniques

Lors de cette étape, les mêmes étapes d'essais mécaniques ont été suivies que lors de la première étape, à savoir la flexion trois points et la compression comme le montre la [Figure IV.19](#).

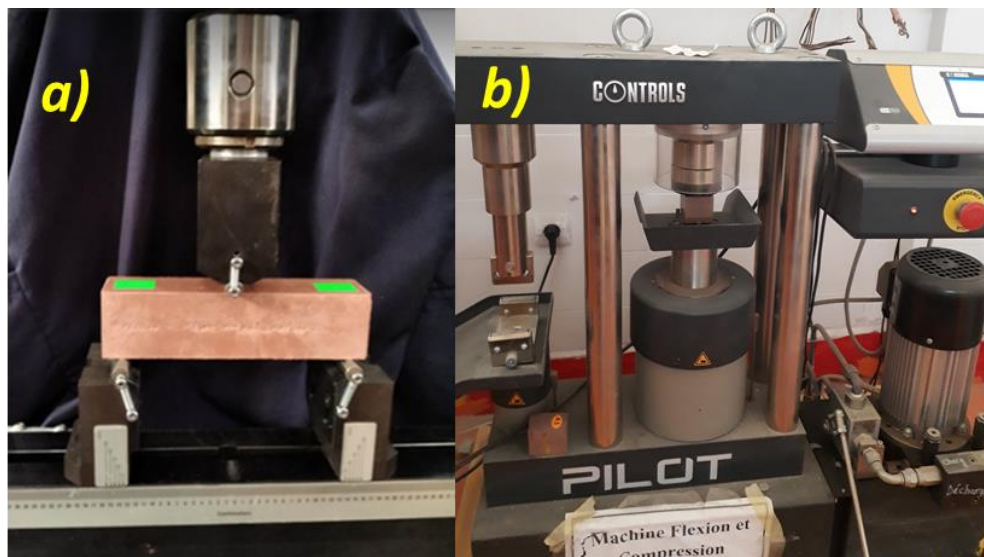


Figure IV.19. a) Flexion à trois points ; b) Compression

IV.4.4. Test d'absorption d'eau

Le test d'absorption d'eau est l'une des procédures les plus critiques pour évaluer la porosité et la durabilité des matériaux de construction, en particulier les produits en béton. Le principe consiste à déterminer la quantité d'eau qu'un matériau peut absorber, ce qui est important pour évaluer ses performances dans différentes conditions environnementales. Au cours de cette partie du travail, nous avons suivi les mêmes étapes que celles suivies précédemment dans la section IV.3.4. La [Figure IV.20](#) montre le processus de séchage et d'immersion des échantillons BP.

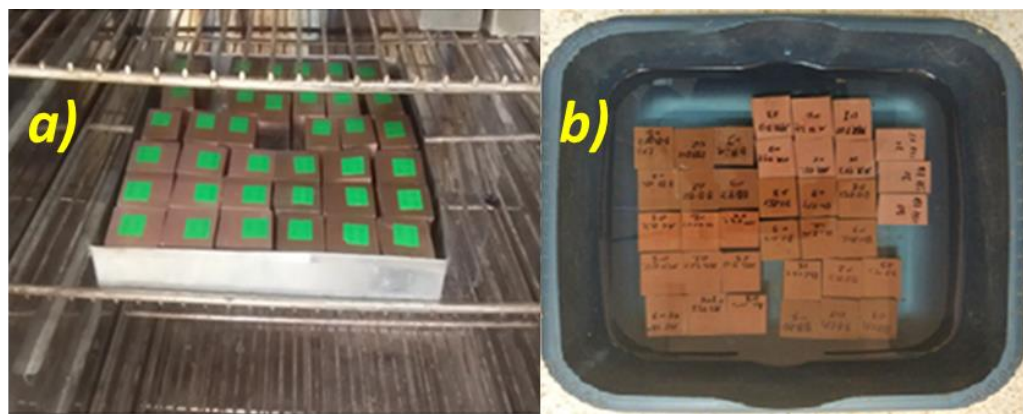


Figure.IV.20. a) Séchage de L'échantillon dans une étuve ; b) Echantillons immergés dans l'eau

IV.5. Partie 04 : Effet de renforcement par fibres

Le béton polymère est un matériau innovant qui a été développé par rapport au béton traditionnel, où le polymère agit pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité. D'autre part, l'incorporation de fibres, telles que des fibres végétales et des fibres de verre, dans le béton polymère a suscité un intérêt comme moyen d'améliorer considérablement ses performances. Les fibres peuvent améliorer les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la résistance à la flexion et la résistance aux chocs, rendant le béton polymère plus flexible sous différentes charges. La présence de fibres aide également à contrôler la fissuration en répartissant les contraintes de manière plus uniforme dans tout le matériau [2]. Les fibres végétales sont connues pour être dérivées de sources naturelles, telles que le jute, le chanvre, le sisal et le lin, et sont renouvelables et respectueuses de l'environnement. Elles offrent également de bonnes propriétés mécaniques. La fibre de verre est constituée de fils de verre fins et est connue pour sa résistance élevée à la traction et à la corrosion. L'utilisation de fibres végétales et de verre pour renforcer le béton polymère offre une voie prometteuse pour améliorer les

propriétés du matériau, contribuant au développement de solutions de construction plus durables [96]. Les recherches visant à déterminer les compositions et les applications optimales de ces fibres se poursuivent, ce qui accroît le potentiel d'utilisation innovante et efficace du béton polymère. Cette partie de la recherche consiste à utiliser deux types de fibres différents (fibres végétales et fibres de verre) pour examiner comment les fibres affectent les propriétés mécaniques du béton polymère. Cela se fait par le biais de leur performance à la rupture. Cette recherche simplifie également l'évaluation de l'adéquation du matériau aux applications dans le secteur du génie civil et facilite l'utilisation efficace de ressources abondantes.

IV.5.1. Matières premières

Dans cette partie, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation de deux types de fibres (fibres Alfa et fibres de verre) pour renforcer le béton polymère (sable et déchets PP).

L'utilisation de fibres pour renforcer les matériaux n'est pas un concept nouveau, mais peu qui ont travaillé sur le béton polymère à base de fibres. Rappelons que cette partie implique l'utilisation de deux différents types de fibres : des fibres végétales : représentées par des fibres d'Alfa et par des fibres synthétiques : des fibres de verre, et ce, pour étudier comment les fibres affectent les propriétés mécaniques du béton polymère lors de sa rupture.

Un ensemble de fibres (Alfa et fibres de verre) ont été coupées selon deux longueurs (10 mm et 30 mm) comme indiqué sur la [Figure IV.21](#).

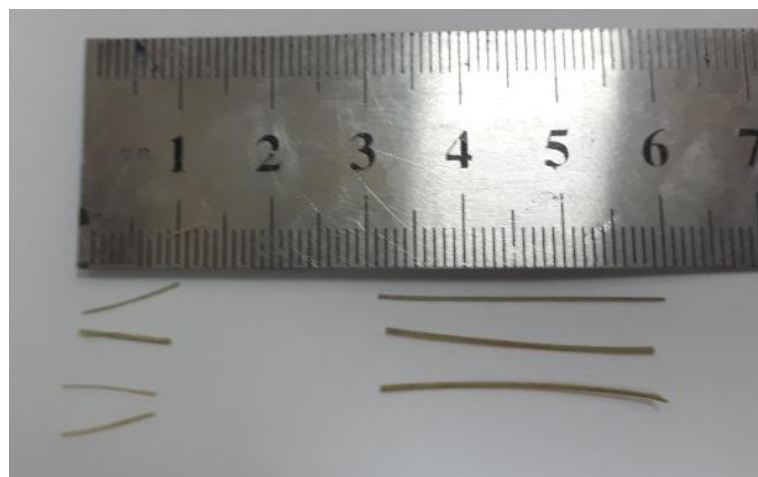


Figure IV.21. Morceaux de fibres longueur 10 mm et 30 mm

IV.5.2. Fabrication du BP

Pour illustrer l'effet de l'ajout de fibres au béton polymère, nous avons développé trois types d'échantillons SCB : des échantillons sans fibres, des échantillons contenant des fibres Alfa et d'autres échantillons contenant des fibres de verre, où dans les échantillons contenant des fibres nous mélangeons 1 % des fibres, comme indiqué dans le [Tableau IV. 4](#).

Tableau IV. 4. Composition de l'échantillon

Compositions	Fibre wt (%)	Déchets de PP wt (%)	Sable wt (%)	Désignation de composite
Sable + Déchets PP	0	25	75	P C
Sable + Déchets PP + Fibre Végétale	1	24,5	74,5	P C – V F
Sable + Déchets PP + Fibre de verre	1	24,5	74,5	P C – G F

Dans l'étape de fabrication, les fibres (longueur 10mm (50%) et longueur 30mm (50%)), sont bien mélangées avec du sable et du plastique avant de les verser dans l'extrudeuse. Une fois le mélange est obtenu, il est versé dans un moule puis compressé selon la [Figure IV.22](#).

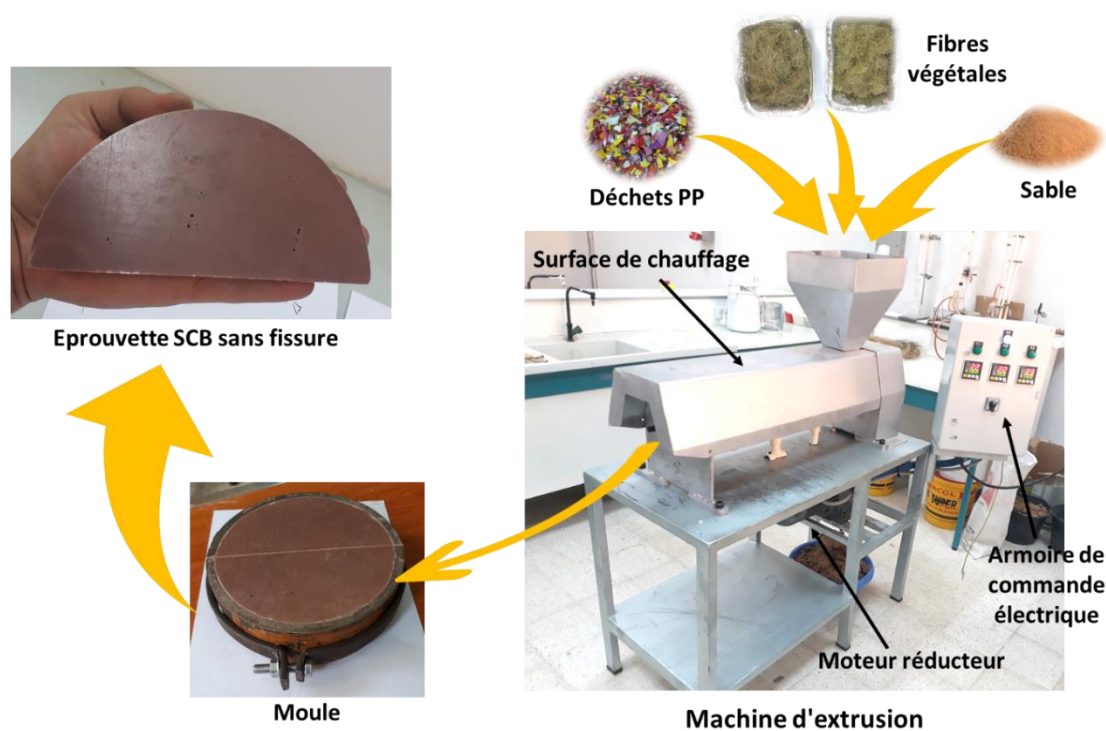


Figure IV.22. Méthodologie de fabrication des échantillons semi-circulaires (SCB)

Après avoir obtenu les éprouvettes SCB sans fissure, nous avons procédé à la création de fissure. Pour se faire, nous avons fabriqué un porte-échantillon semi-circulaire ayant les mêmes dimensions que l'échantillon, où ce porte-échantillon est fixé sur la table de la fraiseuse. D'autre part, nous avons fabriqué un porte-disque de coupe qui est, à son tour, fixé sur la broche rotative de la fraiseuse, comme indiqué par la [Figure IV.23](#). La fissure est créée dans l'échantillon en deux étapes. La première étape consiste à créer la fissure initiale à l'aide d'un disque de coupe d'une épaisseur de 2 mm, tandis que la deuxième étape consiste à créer la fissure finale à l'aide d'un autre disque de coupe d'une épaisseur de 1 mm.

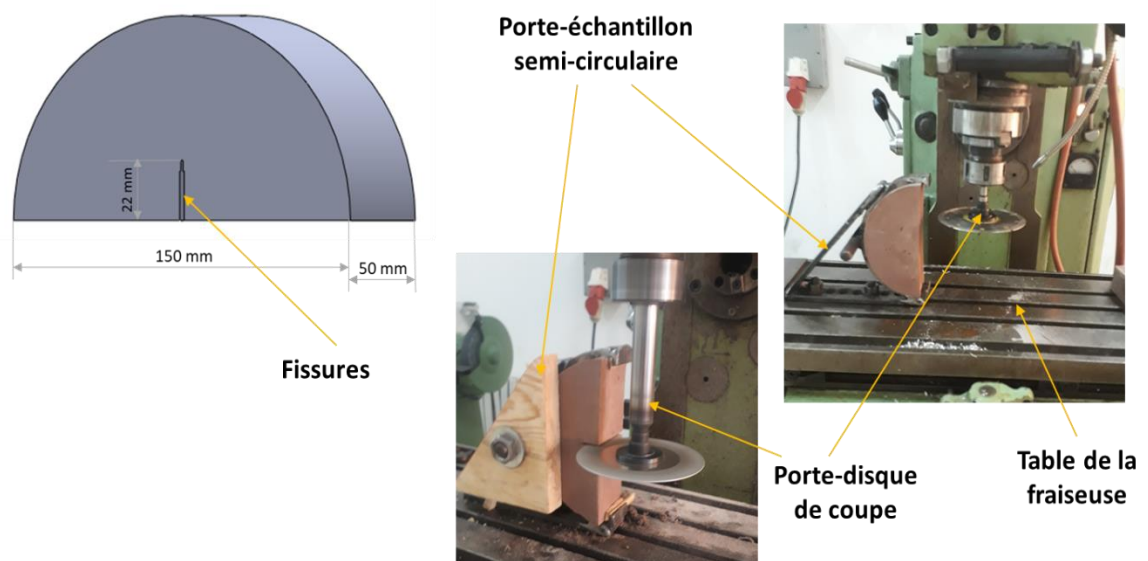


Figure IV.23. Méthodes de création de fissures

IV.5.3. Essais mécaniques

Toutes les éprouvettes SCB ont été progressivement chargées sur une machine d'essai universelle E45 - MTS d'une capacité de chargement de 300 kN. L'échantillon a été placé sur deux rouleaux cylindriques pour un chargement par le bas. La distance entre deux rouleaux cylindriques a été ajustée en fonction de la taille des échantillons. Les positions des deux rouleaux de support inférieurs doivent être parallèles. Un taux de déplacement constant de 0,4 mm/min a été appliqué aux échantillons. La charge a été appliquée au moyen de dispositifs de flexion conventionnels à trois points. L'expérience est illustrée à la [Figure IV.24](#).

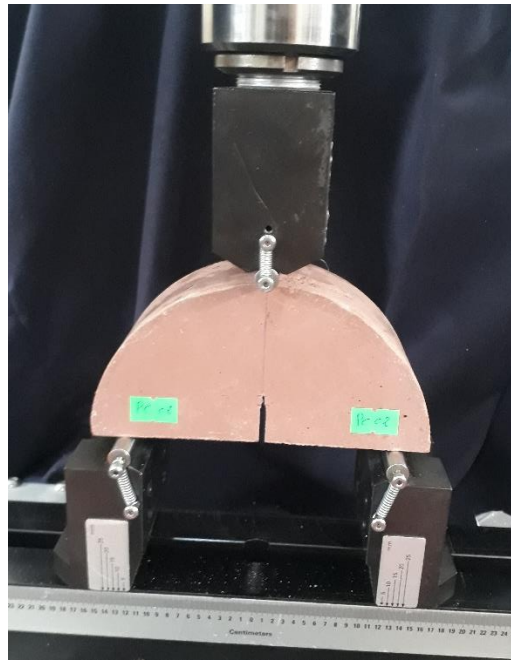


Figure IV.24. Essai de flexion trois points des éprouvettes SCB

Le facteur K_I détermine la résistance à la rupture au début de l'extension de la fissure en remplaçant la charge maximale. Lors de la réalisation d'essais de rupture pour des échantillons SCB, le facteur de ténacité à la rupture, K_I , est estimé à l'aide de l'équation proposée par Artamendi and Khalid [97], présentée ci-dessous.

$$K_I = \sigma_I Y_I \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (2)$$

Avec : $\sigma_I : \frac{P}{2rt} \dots\dots\dots (3)$

- P* : Charge appliquée (N)
- r* : Rayon de l'échantillon (mm)
- t* : Épaisseur de l'échantillon (mm)
- a* : Longueur de la fissure (mm)

Sur la base de la géométrie semi-circulaire et des dimensions de l'échantillon utilisées dans cette méthode de test, Y_I est déterminé approximativement par [97, 98].

$$Y_I = 4,792 - 1,219 \left(\frac{a}{r}\right) + 0,063 \exp\left(\frac{a}{r}\right) \dots\dots\dots (4)$$

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1. Partie 1 : Caractéristiques des déchets de polypropylène

V.1.1. ATR-FTIR du PP

L'analyse ATR-FTIR a été réalisée sur des échantillons de polypropylène vierge et de déchets à des fins de comparaison. Les spectres infrarouges des deux échantillons de PP, révélant plusieurs pics distincts, sont présentés par la [Figure V.1](#). Notamment, à un nombre d'onde de 995 cm^{-1} , un groupe fonctionnel C–H a été observé en raison de vibrations asymétriques de CH_3 [99]. De plus, le pic à 1170 cm^{-1} a été attribué aux vibrations d'étirement asymétriques de C–C [99-101], tandis que le pic à 1373 cm^{-1} résultait des vibrations de déformation symétriques de CH_3 [99, 102]. De plus, la bande à 1468 cm^{-1} était associée à la déformation asymétrique de CH_3 ou aux vibrations de CH_2 [99-101]. De plus, la bande à 1730 cm^{-1} a été attribuée aux vibrations combinées et à l'expansion de CO [99, 103]. Le spectre d'absorption à 2915 cm^{-1} représente la vibration du groupe CH_2 dans la chaîne primaire du polypropylène [99, 102]. L'observation des deux spectres de la figure ne reflète pas beaucoup de variation entre les bandes distinctives [104]. Le [Tableau V. 1](#) offre un aperçu complet de l'analyse des spectres infrarouges, résumant les pics observés et leurs attributions.

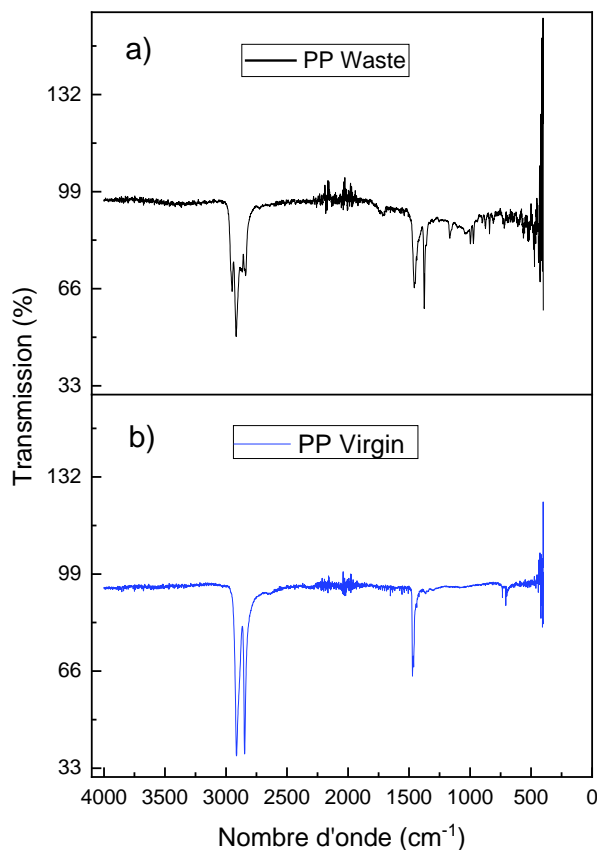


Figure V.1. Spectres ATR-FTIR de PP a) Déchet PP, b) PP Vierge

Tableau V. 1. Principales bandes d'absorption FTIR et les vibrations de liaison associées du PP.

Liaison (cm⁻¹)	Liaison (Mode vibration)	Composé	Ref
995	CH ₃	Groupes alkyles	[99]
1170	C–C	Composé carbonylé éventuellement ester	[99-101]
1373	CH ₃	Groupes alkyles	[99, 102]
1468	CH ₃	Groupes alkyles	[99, 101]
1730	C O	Présence de groupes carbonyle (CO)	[99, 103]
2915	CH ₂	Vibration de groupe dans la chaîne polymère principale PP	[99, 102]

V.1.2. Résistance à la flexion

Dans ce travail, la résistance à la flexion en trois points de différents échantillons de polypropylène a été surveillée en enregistrant la courbe charge-déplacement (P- δ). Les échantillons testés ont montré un comportement pratiquement linéaire dans la première partie de la courbe, où le matériau se comporte élastiquement et est appelée partie élastique, suivie directement par la partie plastique, où le matériau subit une déformation plastique au cours de cette étape. Les mêmes constatations ont été observées par Bispo, et al. [105], lors de l'étude de l'analyse des propriétés mécaniques des biocomposites en polypropylène renforcés avec des fibres. Afin de valider les résultats, la reproductibilité des expériences est un critère essentiel. Il est essentiel de suivre l'approche scientifique pour garantir la validité des résultats [74, 95, 106].

La superposition des courbes (P- δ) des échantillons de PP-V (polypropylène vierge) est illustrée par la Figure V.2. Le matériau PP-V présente une bonne reproductibilité des courbes charge-déplacement (P- δ). Il est intéressant de noter que la reproductibilité dans notre étude peut être utilisée comme un indicateur fiable de la validité des propriétés mécaniques [95]. Pour tous les types de matériaux testés, la même répétabilité a été observée, d'où la bonne reproductibilité des résultats.

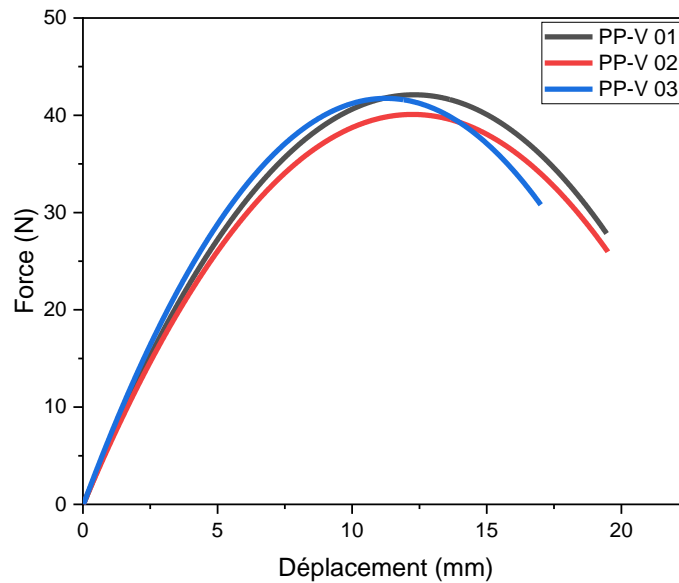


Figure V.2. Superposition des courbes ($P-\delta$) des échantillons de polypropylène vierge

La Figure V.3 montre la courbe contrainte-déformation des échantillons de polypropylène (PP-V et PP-W) sollicités en flexion trois points. Nous notons que la valeur moyenne de contrainte du PP-W est supérieure à celle d'échantillon PP-V, car elle a été estimée à environ 25 MPa et 22 MPa, respectivement, comme le montre la Figure V.4 (a). D'autre part, nous notons que le PP-V a la capacité de s'allonger par rapport au PP-W, car leur taux d'allongement est d'environ 8 % et 4 %, respectivement, comme le montre la Figure V.4 (b). Il est à noter que le polypropylène vierge, après avoir été formé et utilisé, perd une partie de sa propriété de ductilité et gagne une partie de sa rigidité.

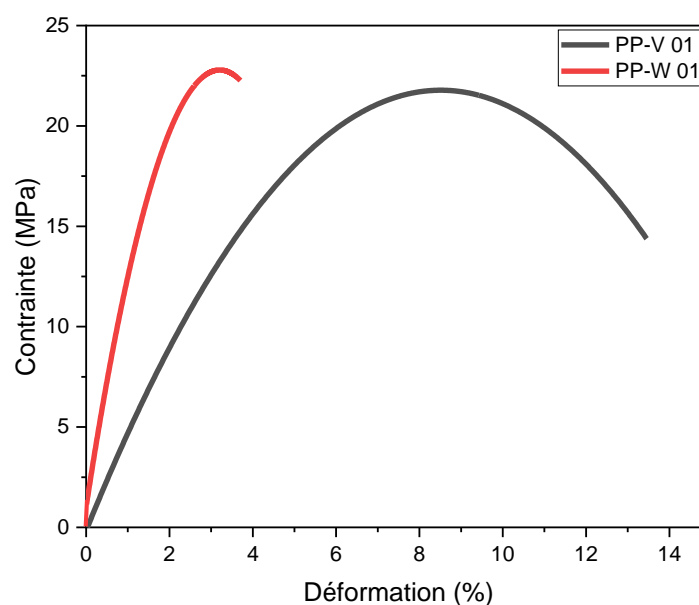


Figure V.3. Courbe contrainte-déformation de flexion PP-V et PP-W

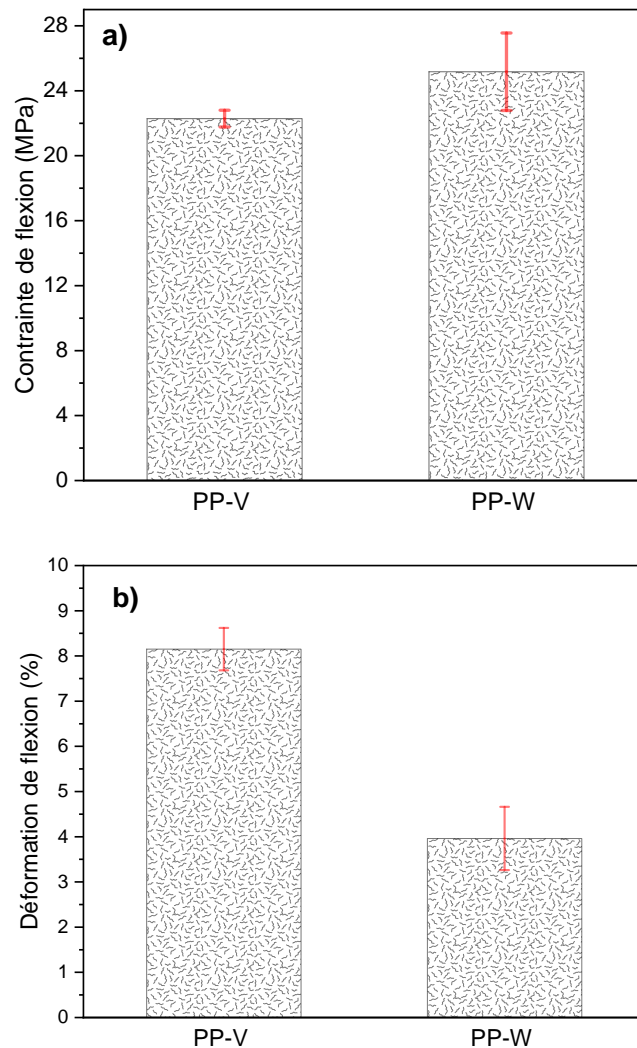


Figure V.4. Evaluation de : a) Contraite de flexion, b) Déformation de flexion

V.1.3. Résistance à la traction

La Figure V.5 montre les courbes contrainte-déformation du PP-V et du PP-W sollicités en traction. Trois échantillons de chaque type ont été testés et leurs valeurs moyennes sont représentées sur la Figure V.6. Comme on peut le voir sur la figure 4, les courbes montrent une augmentation continue de la contrainte et du module d'Young avec la vitesse de déformation, ce qui correspond à un mauvais comportement mécanique du matériau. C'est ce qu'ont conclu par Zrida, et al. [107], dans une étude sur les essais de traction à grande vitesse sur le polypropylène. Les échantillons en PP-V ont une bonne résistance à la traction avec un bon rapport d'allongement, où la contrainte moyenne était d'environ 16 MPa et la déformation moyenne est d'environ 4 %. Quant aux échantillons PP-W, nous constatons que la contrainte moyenne de ces éprouvettes a légèrement diminué par rapport à une diminution significative du rapport d'allongement, où la valeur de contrainte moyenne pour les échantillons de déchets

est d'environ 14 MPa avec un rapport d'allongement d'environ 2 %. À partir de ces résultats, nous pouvons résumer que le polypropylène perd certaines de ses propriétés telles que la résistance à la traction et le rapport d'allongement après son recyclage.

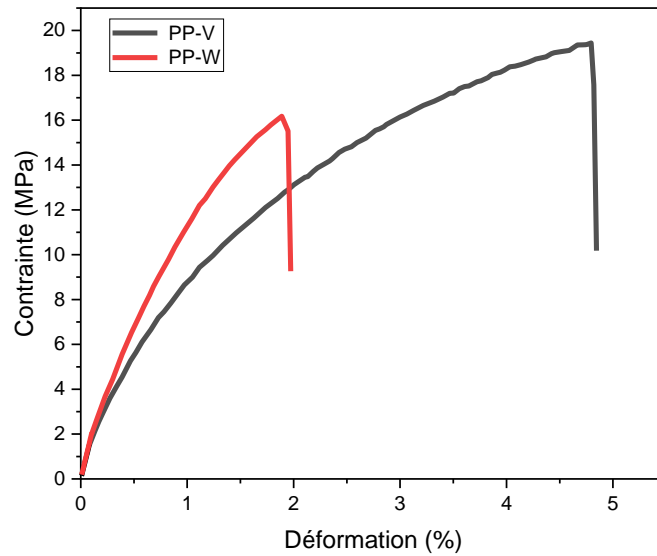


Figure V.5. Courbe contrainte-déformation de traction PP-V et PP-W

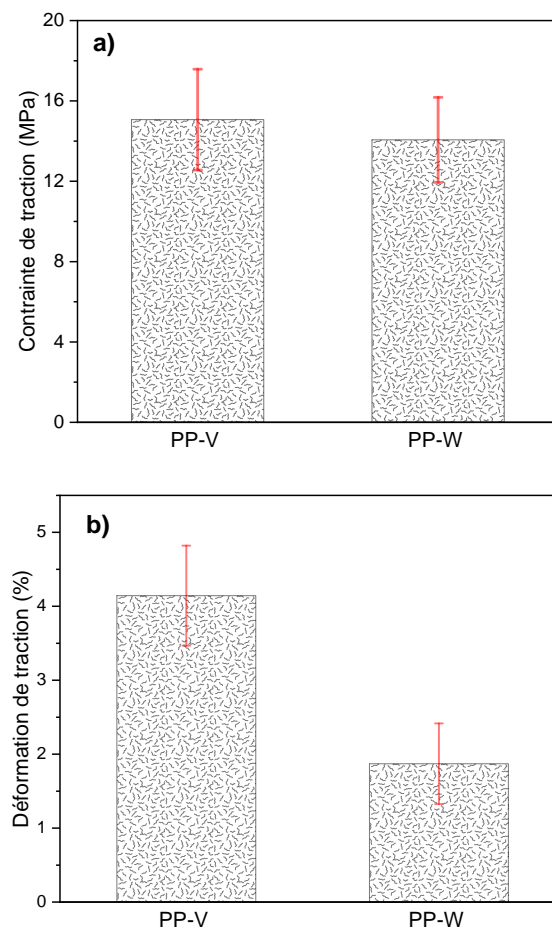


Figure V.6. Evaluation de : a) Contrainte de traction, b) Déformation de traction

V.2. Partie 2 : Effet de type de sable

V.2.1. Composition chimique du sable

Les résultats de l'analyse chimique (XRF) de divers échantillons de sables sont présentés par le [Tableau V.2](#). Nous observons que tous les résultats analysés des sables ont une teneur en silice (SiO₂) supérieure à 93 %. Le sable de Sidi Ameur « Type C » a le pourcentage le plus élevé de teneur en silice d'environ 97 %, suivi des sables de Khobana « Type D » et d'Ain Sbaa « Type B » avec un pourcentage supérieur à 95 %, le pourcentage le plus faible de SiO₂ est attribué pour le sable d'Oued Meitar « Type A », et il a été estimé à environ 93 %.

Tableau V. 2. Composition chimique du sable de silice

Composition du sable	Composition chimique du sable (%)					
	Étude actuelle sur le sable				Sable de El-Oued [89]	Sable de Biskra [108]
	Type A	Type B	Type C	Type D		
SiO ₂	93,625	95,61	97,016	95,642	97,630	97,6
Al ₂ O ₃	0,756	0,953	0,614	0,964	0,327	0,4
Fe ₂ O ₃	0,696	1,009	0,888	1,007	0,042	0,5
CaO	2,349	0,659	0,467	0,657	0,564	1
MgO	0,058	0,107	0,010	0,110	0,613	<0,05
SO ₃	0,073	0,096	0,076	0,095	0,037	-
K ₂ O	0,300	0,394	0,268	0,394	0,067	<0,05
Na ₂ O	0,000	0,000	0,000	0,003	0,542	0,06
P ₂ O ₅	0,018	0,021	0,018	0,021	0,013	<0,05
TiO ₂	0,094	0,098	0,065	0,099	0,005	<0,05
Cr ₂ O ₃	0,059	0,088	0,095	0,088	-	-
Mn ₂ O ₃	0,011	0,011	0,011	0,012	0,002	<0,05
ZnO	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-
SrO	0,009	0,007	0,008	0,007	-	-

V.2.2. ATR-FTIR du sable

L'analyse ATR-FTIR a fourni des informations précieuses sur les principaux composés présents dans divers échantillons de sable de silice. Les spectres de transmission infrarouge des échantillons collectés sont représentés sur la [Figure V.7](#). Le [Tableau V.3](#) fournit un résumé de l'étude des graphiques de spectrométrie d'absorption infrarouge. En règle générale, tous les échantillons de sable comprennent principalement du quartz, de la calcite et de la dolomite [109, 110]. Le quartz constituait le composant prédominant dans tous les types de sable de silice, comme en témoignent ses pourcentages de transmission élevés. Cette dominance du quartz est indiquée par des pics proéminents observés à 520 cm⁻¹, 710 cm⁻¹, 766 cm⁻¹ et 1007 cm⁻¹ dans

les spectres [89, 110-113]. Il est intéressant de noter que ces pics étaient plus prononcés dans le sable de type C, suivi du sable de type D, du type B et enfin du sable de type A, ce qui correspond à la composition chimique déterminée par analyse XRF. De plus, la présence de calcite est révélée par des pics à 872 cm^{-1} et 1420 cm^{-1} dans les spectres [89, 112]. Alors que le sable de type A présentait des pics de calcite proéminents, les échantillons restants présentaient des pics plus petits.

La présence de dolomite dans le sable peut influencer considérablement ses propriétés et son adéquation à diverses applications. La dolomite, un minéral composé de carbonate de calcium et de magnésium, améliore les propriétés physiques et mécaniques du sable, notamment sa résistance, sa stabilité et sa résistance aux intempéries. Cependant, il est à noter que certains échantillons de sable, en particulier ceux de la région du Sahara algérien, présentent une présence ou une absence plus faible de dolomite.

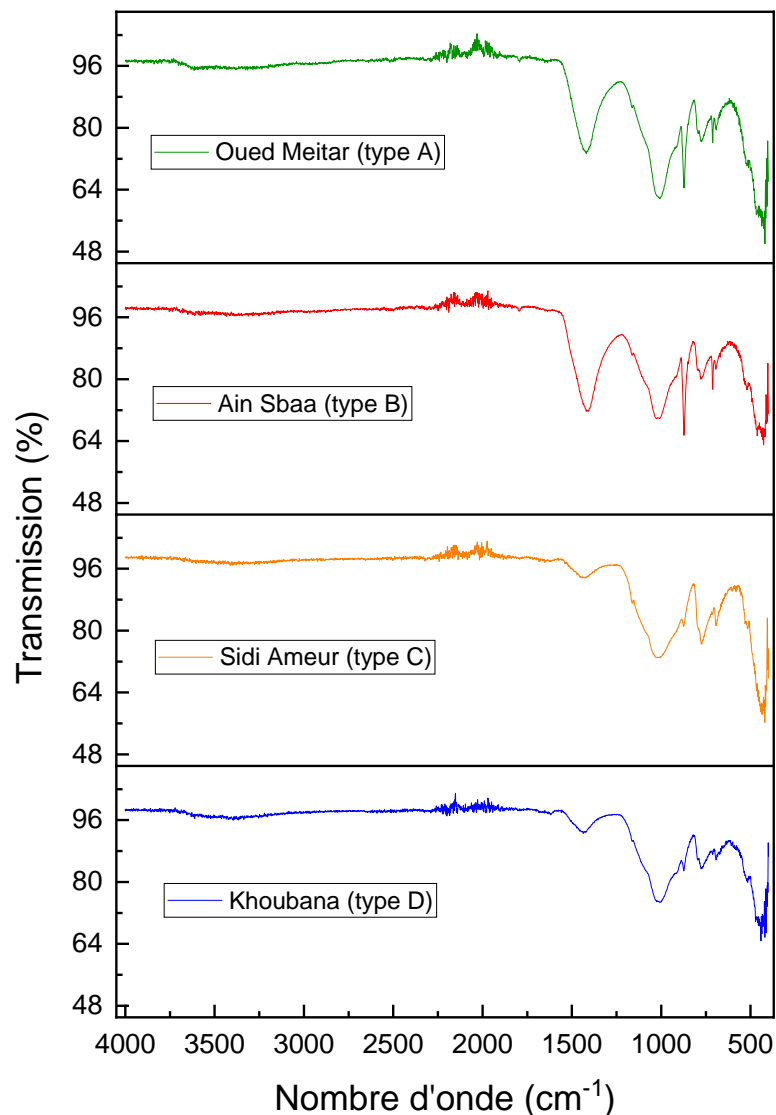


Figure V.7. Spectre ATR-FTIR de différents sables

Cette variation de la teneur en dolomite peut être attribuée à des facteurs géologiques et aux origines spécifiques des gisements de sable dans chaque région [114]. Les processus géologiques et l'environnement de dépôt jouent un rôle crucial dans la détermination de la composition minérale des sables. Dans certaines régions, les conditions géologiques peuvent favoriser le dépôt de sables à teneur minimale en dolomite, tandis que dans d'autres, les sables riches en dolomite peuvent être plus répandus.

Tableau V. 3. Principales bandes d'absorption IR et vibrations de liaison associées du sable

Liaison (cm ⁻¹)	Liaison (mode vibration)	Compound	Ref
520	Si-O-Al	Quartz	[111]
710	Si-O-Si	Quartz	[89, 111]
766	Si-O	Quartz	[89, 110-112]
872	(CO ₃) ⁻²	Calcite	[89, 112]
1007	Si-O-Si	Quartz	[110, 112]
1420	(CO ₃) ⁻²	Calcite	[89]

V.2.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique de différents types de sable consiste à déterminer la distribution des tailles de particules dans chaque échantillon. Cette analyse fournit des informations cruciales sur la texture et les caractéristiques du sable, qui peuvent influencer son adéquation à diverses applications de construction. Dans cette étude, les échantillons de sable présentaient naturellement un mélange de tailles de particules, ce qui est typique des environnements sédimentaires. Cette variabilité des tailles de particules reflète les divers processus géologiques qui contribuent à la formation de dépôts de sable. Les grains de sable ont été classés en fonction de leur diamètre en trois groupes principaux : sable grossier, sable moyen et sable fin. Le sable grossier est composé de particules plus grosses dont le diamètre varie de 0,6 à 2 mm. Ces grains sont visiblement plus gros et peuvent être facilement ressentis entre les doigts. Le sable moyen, quant à lui, comprend des particules dont le diamètre est compris entre 0,2 et 0,6 mm. Ces grains sont plus petits que le sable grossier mais toujours perceptibles à l'œil nu. Le sable fin est caractérisé par des particules encore plus petites, dont le diamètre varie de 0,06 à 0,2 mm comme indiqué dans le [Tableau V. 4](#). Ces grains ont une texture beaucoup plus fine et peuvent presque ressembler à de la poudre lorsqu'ils sont manipulés.

Tableau V. 4. Analyse quantitative des plages de diamètres granulométriques pour différents sables

Type de sable	Plages de diamètres de grains de sable (wt%)		
	Fin (0,06 – 0,2 mm)	Moyen (0,2 – 0,6 mm)	Gros (0,6 – 2 mm)
Type A	38%	58%	04%
Type B	61%	39%	-
Type C	47%	53%	-
Type D	60%	40%	-

La [Figure V.8](#) représente visuellement la distribution des tailles de grains dans chaque catégorie, aidant à illustrer la variation des tailles de particules présentes dans les différents types de dunes de sable. Ces informations sont cruciales pour comprendre la texture, la porosité, la perméabilité et d'autres propriétés du sable, qui sont des considérations essentielles pour le mélange avec du propylène usagé pour les fabrications composites. De plus, le tableau 6 fournit un résultat quantitatif des plages de diamètres de taille de grains calculées à partir de la courbe de distribution des particules. La distribution des types de sable D et B se compose jusqu'à 60 % en poids de grains de sable fin et environ 40 % en poids de grains de sable moyens. Inversement, le type de sable C comprend 47 % en poids de grains de sable fin et 53 % en poids de grains de sable moyens. Le type de sable A contient 38 % en poids de grains de sable fin, ainsi que 58 % en poids de grains de sable moyens et 4 % en poids de grains de sable grossiers.

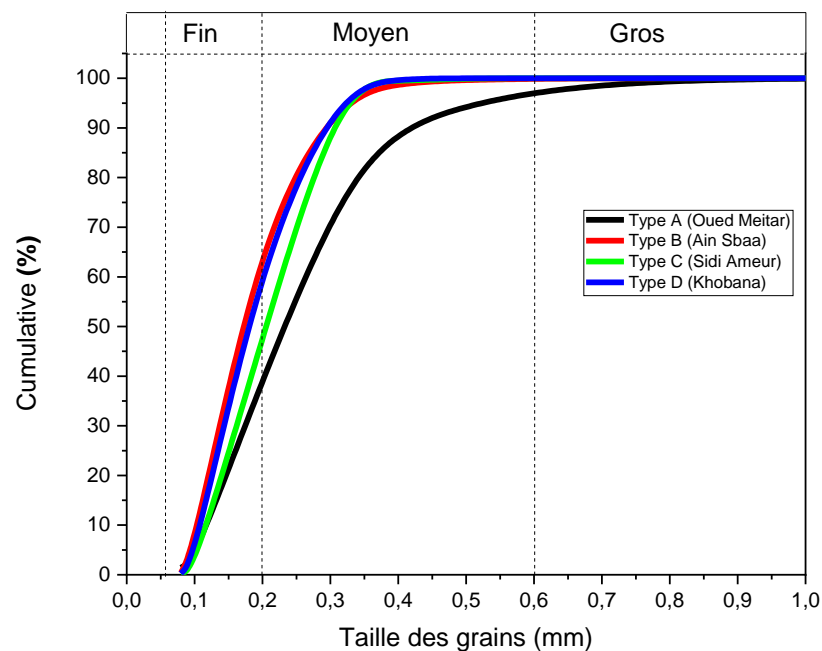


Figure V.8. Courbe de distribution granulométrique pour différents sables

V.2.4. Absorption d'eau du BP

Le test d'absorption d'eau sert à évaluer l'adéquation du BP à diverses conditions environnementales, y compris les environnements secs ou humides. Plusieurs facteurs influencent la capacité du matériau à absorber l'eau, notamment la présence de pores dans le matériau, la taille des particules de sable et la connectivité entre ces pores [32, 41, 93]. De plus, le type de plastique utilisé peut avoir un impact sur l'absorption d'eau, des recherches indiquant que des matériaux tels que le PEHD/sable présentent des pourcentages d'absorption d'eau inférieurs à ceux d'autres mélanges de déchets plastiques comme le PEBD/sable et le PETE/sable [32]. Le [Tableau V.5](#) présente les pourcentages moyens d'absorption d'eau, allant de 0,46 % à 1,42 %. Cette variance peut provenir de différences dans les rapports de porosité entre les différentes compositions de BP et/ou de variations dans la distribution des tailles de particules de sable. Les recherches indiquent que les mélanges PEHD/sable fin ont tendance à avoir moins de pores en raison de tailles de particules de grains plus petites, ce qui donne un mélange plus dense. À l'inverse, une abondance de pores internes dans le BP peut augmenter la connectivité entre les pores [115].

Tableau V. 5. Absorption d'eau des échantillons de BP

Matériel	Absorption d'eau	Source
Mat A	1,43±0,07	Travail actuel
Mat B	0,67±0,04	
Mat C	1,16±0,04	
Mat D	0,46±0,03	
HDPE/Sand	0,0634	[93]
PET /Sand	< 1	[40]
LDPE/Sand	1,19	[14]

Par conséquent, l'absorption d'eau plus faible observée dans [Mat B](#) et [Mat D](#) pourrait être attribuée à leurs tailles de particules bien réparties, ce qui réduit la présence de pores et minimise l'interconnectivité entre eux.

V.2.5. Résistance à la flexion du BP

La résistance à la flexion en trois points de divers échantillons de BP a été évaluée en enregistrant les courbes de charge-déplacement à l'aide de la machine d'essai Universal TM/20 kN. Les résultats ont révélé un comportement essentiellement linéaire dans les échantillons testés, comme illustré à la [Figure V.11](#). L'analyse des courbes a indiqué que le [Mat D](#) présentait la capacité de charge la plus élevée, atteignant environ 4 200 N, accompagnée d'une déflexion

maximale de 0,54 mm à la rupture. Ensuite, le **Mat B** présentait une capacité de charge de 3 000 N avec une déflexion de 0,45 mm, tandis que le **Mat C** présentait une capacité de charge de 2 500 N et une déflexion de 0,44 mm. À l'inverse, le **Mat A** présentait la capacité de charge maximale la plus faible, s'établissant à 1 900 N, ainsi qu'un déplacement minimal de 0,37 mm.

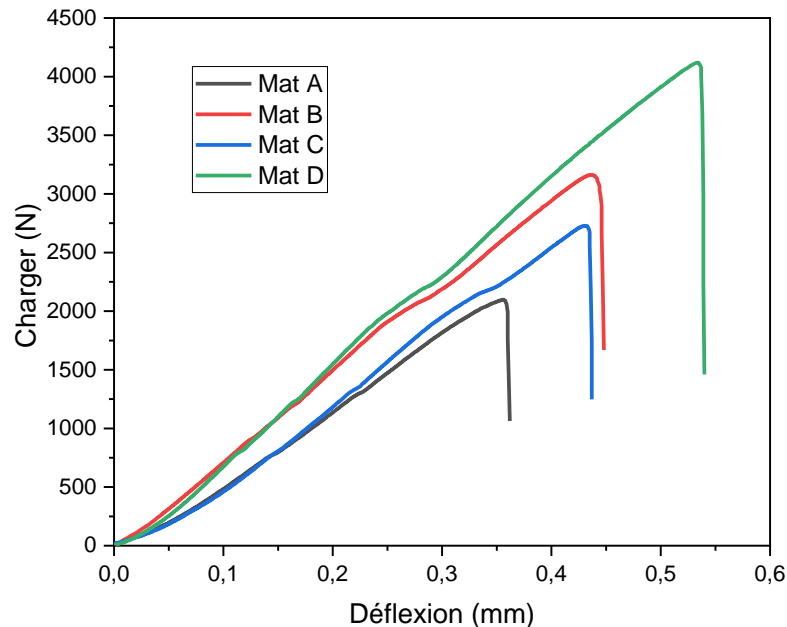


Figure V.9. Courbes charge-déflexion d'essai de flexion des matériaux

De plus, la contrainte de flexion, le module de flexion et la déformation de flexion des différents matériaux de sable à liant plastiques testés sont représentés sur la [Figure V.10](#), avec des résultats résumés présentés dans le [Tableau V.6](#). Les résultats soulignent l'influence significative du type de sable sur les propriétés de flexion des matériaux fabriqués. Plus précisément, les contraintes de flexion déterminées étaient de 5,45 MPa pour Mat A, 9,08 MPa pour Mat B, 7,26 MPa pour Mat C et 11,56 MPa pour Mat D. Les performances notables de Mat D et Mat B en matière de résistance à la flexion en trois points peuvent être attribuées à leur distribution granulométrique relativement uniforme, à leur degré de porosité plus faible et à leur interconnectivité réduite entre les pores [32, 93, 115].

Une tendance similaire était évidente dans les résultats du module de flexion, avec des valeurs plus élevées observées pour les composites **Mat D** (1557 MPa) et **Mat B** (1450 MPa). Ces valeurs de module de flexion élevées peuvent indiquer une zone de transition interfaciale plus efficace [41]. À l'inverse, les matériaux **Mat A** et **Mat C** ont présenté les valeurs de module de flexion les plus faibles, mesurant respectivement 1061,52 MPa et 1137,44 MPa. De plus, les valeurs moyennes de déformation en flexion pour tous les échantillons de BP testés ont suivi une tendance constante, avec **Mat D**, **Mat B**, **Mat C** et **Mat A** affichant des plages de déformation

en flexion de 0,70 %, 0,66 %, 0,61 % et 0,58 %, respectivement. Ces résultats fournissent des informations précieuses sur les performances structurales de chaque matériau, mettant en évidence les variations des propriétés de flexion en fonction du type et de la composition du sable.

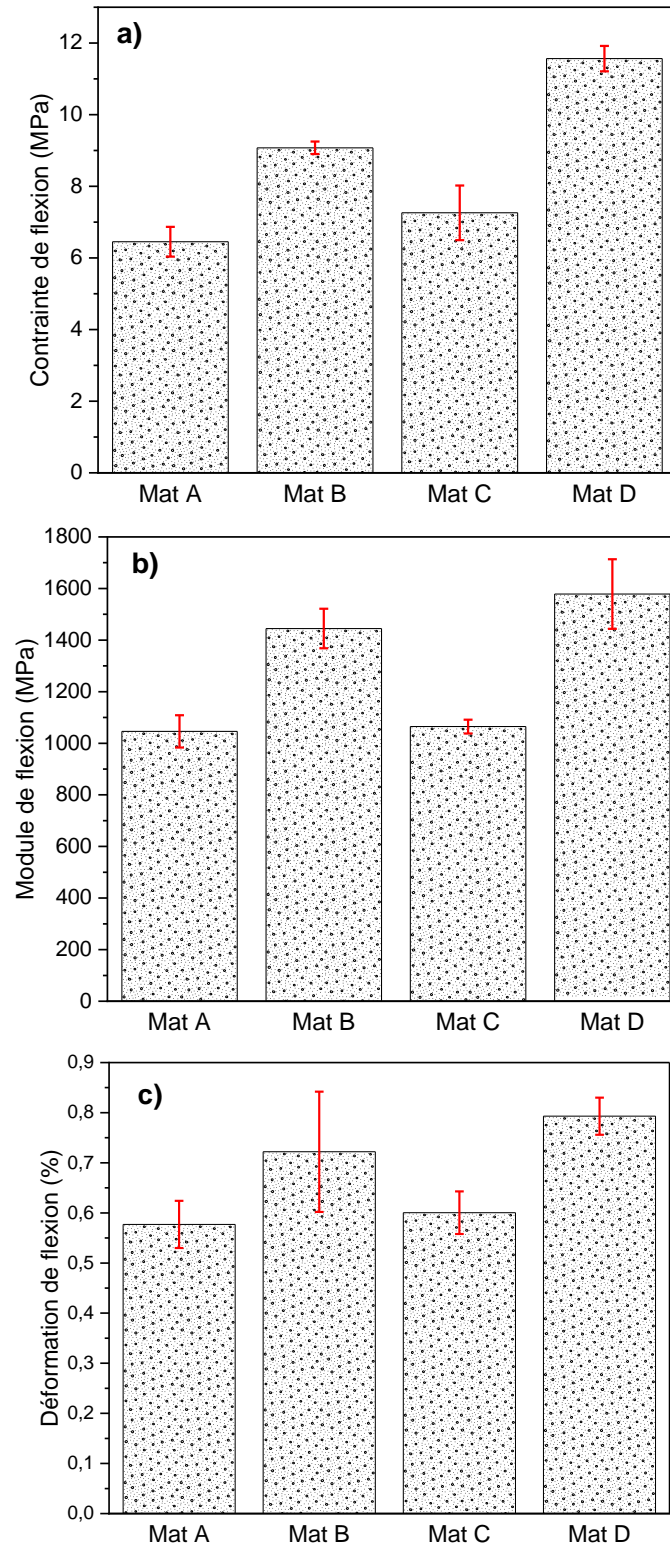


Figure V.10. Propriétés de flexion de différents matériaux de sable liés au plastique a) Contrainte de flexion, b) Module de flexion et c) Déformation de flexion

Le tableau 6 résume les valeurs moyennes trouvées pour les différentes configurations de BP. Ces valeurs sont comparées à d'autres composites sable-plastique récemment proposés dans la littérature. Comme l'indique le tableau 8, les contraintes de flexion des composites BP étudiés sont nettement plus élevées que celles formulées avec LDPE/Sable [93], HDPE/Sable [93] et PET/Sable [40]. Cette distinction semble être principalement attribuée à la nature des déchets plastiques utilisés. Dalhat and Wahhab [116] ont étudié des structures cimentées liées pour évaluer l'utilisation potentielle de plastiques recyclés (PEHD et PP). Selon une étude antérieure, le PP recyclé présentait des résistances à la flexion trois fois supérieures à celles du béton de ciment ordinaire et cinq fois supérieures à celles du béton bitumineux. D'autre part, les auteurs ont déduit que le PP recyclé est plus efficace que le PEHD recyclé dans de telles applications [116].

Tableau V. 6. Résultats des essais de flexion des échantillons de sable liés au plastique testés

Désignation	Échantillons	Contrainte (MPa)	Contrainte moyenne (MPa)	Déformation n (%)	Déformation moyenne (%)	Module de flexion (MPa)	Module de flexion moyen (MPa)	Ref
BP	Mat A	1	6,04		0,53	983,64		
		2	6,55	6,48	0,62	1092,45	1061,52	
		3	6,87		0,58	1108,46		
	Mat B	1	9,25		0,74	1368,33		
		2	9,16	9,1	0,65	1521,44	1450,24	
		3	8,9		0,6	1460,96		
	Mat C	1	7,41		0,64	1037,87		
		2	8,02	7,31	0,64	1091,54	1137,44	
		3	6,5		0,56	1282,91		
	Mat D	1	11,9		0,79	1713,33		
		2	11,8	11,63	0,83	1443,54	1557,94	
		3	11,21		0,76	1516,96		
	LDPE/Sand		5,13				[93]	
	HDPE/Sand		6,24				[40]	
	PET/Sand		2,55				[40]	

V.2.6. Résistance à la compression DU BP

Les résultats de compression des briques plastiques-sable ont révélé des variations significatives de la résistance à la compression selon les compositions. La Figure V.13 illustre la résistance relative à la compression. Parmi les matériaux testés, le BP contenant du sable de Khoubana, désigné Mat D, a présenté la résistance à la compression la plus élevée de 26,19 MPa, indiquant leur adéquation aux applications nécessitant un support structurel robuste. Il a

été suivi par le **Mat B** avec une résistance à la compression de 22,07 MPa. À l'inverse, la résistance à la compression la plus faible a été observée dans le BP incorporant du sable d'Oued Meitar, désigné **Mat A**, qui a enregistré une résistance à la compression de 17,92 MPa. Cette tendance à des valeurs de compression plus faibles dans **Mat A** et **Mat C** est attribuée à la présence de particules de sable de plus grande taille dans leurs structures [8]. De plus, la porosité et l'interconnectivité entre les pores sont d'autres défauts qui peuvent affecter la résistance à la compression des composites sable-plastique. Les recherches menées par **BARIŞ and TANAÇAN** [117] ont montré qu'un degré plus élevé d'interconnectivité des pores conduit à une plus grande dispersion de la taille des pores et à une diminution de la résistance. Dans l'ensemble, les résultats de compression révèlent des informations précieuses sur l'intégrité structurelle du matériau et ses capacités de charge.

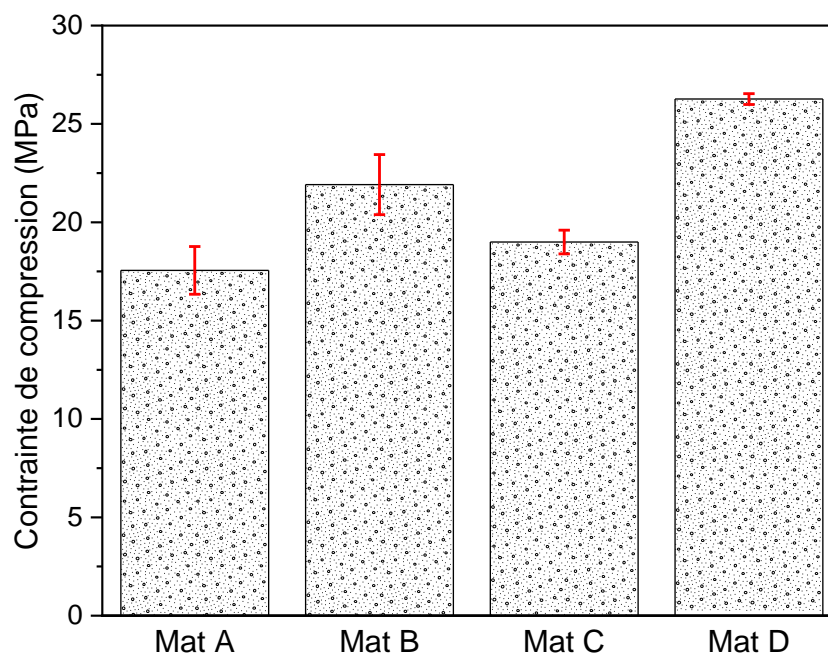


Figure V.II. Comportement à la compression des matériaux à base de sable lié plastique testés

Le **Tableau V.7** résume les valeurs de charge critique et de contrainte enregistrées lors de l'essai de compression de divers composites sable-plastique. Une fois encore, les composites fabriqués enregistrent les valeurs les plus élevées par rapport au LDPE/sable [20], au PET/sable [40], au PE/sable de rivière [118] et au HDPE/granulats fins [32].

Tableau V. 7. Résultats des essais de compression des échantillons de BP

Désignation	Échantillons	Charge (kN)	Charge moyenne (kN)	Contrainte (MPa)	Contrainte moyenne (MPa)	Ref
BP	Mat A	1	29,54		18,64	Travail actuel
		2	26,14	28,57	16,34	
		3	30,03		18,77	
	Mat B	1	35,81		22,38	
		2	37,5	35,6	23,44	
		3	33,49		20,39	
	Mat C	1	31,24		19,53	
		2	31,36	30,96	19,6	
		3	30,29		18,39	
	Mat D	1	41,64		26,03	
		2	42,33	41,85	26,54	
		3	41,58		25,99	
LDPE/Sand					16,66	[20]
PET/Sand					11,50	[40]
PE/River sand					12,28	[118]
HDPE/fine aggregates					08,37	[32]

V.2.7. ATR-FTIR du BP

En général, l'analyse ATR-FTIR est effectuée sur les composés initiaux utilisés et le produit formé. Comme c'était le cas pour l'ATR-FTIR du PP et de différents types de sable, les groupes fonctionnels de divers échantillons de BP ont été étudiés en analysant les spectres obtenus. La Figure V.12 présente les spectres ATR-FTIR des composites de BP.

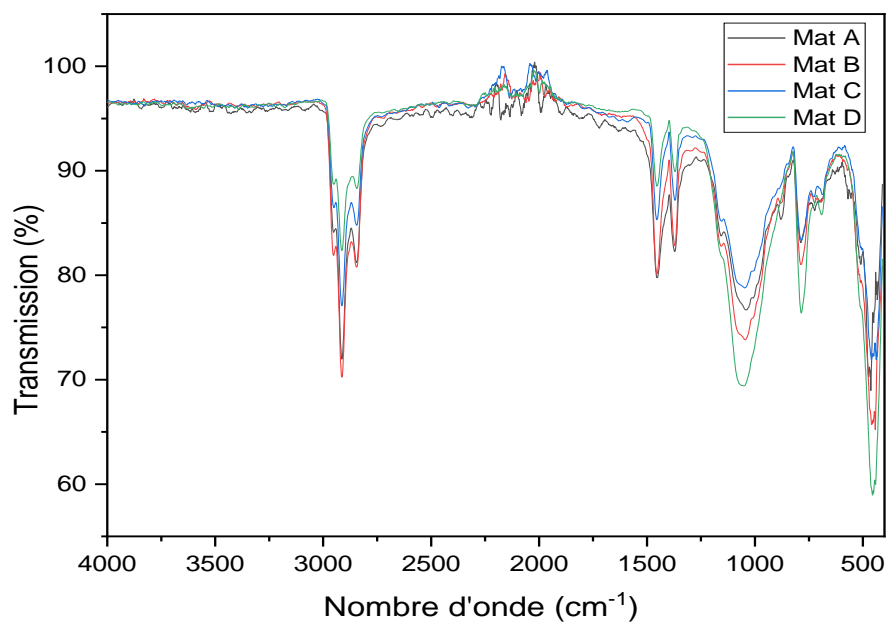


Figure V.12. Spectres ATR-FTIR des BP

Comme on peut le voir sur cette figure, les spectres semblent avoir le même schéma pour tous les échantillons avec des différences mineures. Le léger changement peut être attribué à l'interaction physique entre les deux ingrédients [119]. Pour tous les spectres, l'absorption à 1367 cm^{-1} , 1460 cm^{-1} , 2840 cm^{-1} , 2910 cm^{-1} représente les vibrations des bandes CH_2 , CH_3 et C-H , où se distinguent les caractéristiques spécifiques d'absorption de la matrice PP [120]. Les absorptions caractéristiques apparaissent aux nombres d'ondes 686 cm^{-1} , 780 cm^{-1} , 1050 cm^{-1} qui sont attribués à Si-O et Si-O-Si [121].

La Figure V.13 présente les spectres ATR-FTIR des déchets PP, du sable de type « D » et de leur composite. À partir de cette figure, toutes les bandes des deux composés (déchets PP et sable) sont visibles après le traitement d'extrusion. On peut également signaler que les spectres ATR-FTIR du composite confirment la présence de Si-O et Si-O-Si dans le matériau de la matrice PP. De plus, l'une des variations les plus notables dans les spectres du PP et de ses composites est la diminution remarquable des bandes d'intensité des déchets PP [122]. Selon Vilímová, et al. [122], cette réduction est principalement due au traitement thermique du plastique PP, mais aucun changement structural n'est visible. Dans d'autres travaux, Aydemir, et al. [123] ont utilisé l'analyse FTIR lors de l'étude des propriétés des composites PP/déchets céramiques. En conséquence, des structures chimiques similaires des composites sont observées et aucun changement majeur n'a été signalé entre les composites, ce qui peut confirmer le type de mécanisme de contact interfacial via l'adhésion mécanique. La même observation a été rapportée par.

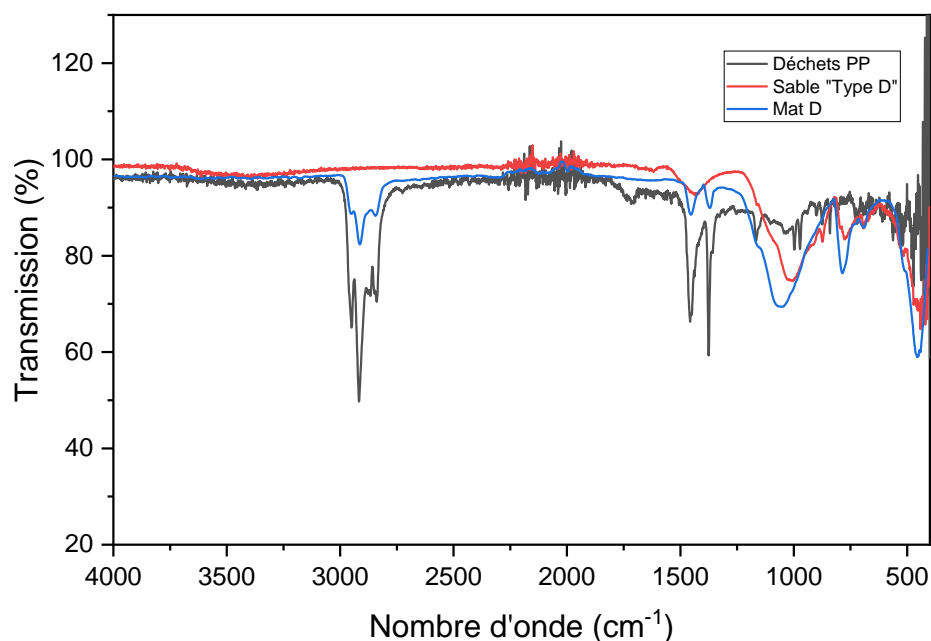


Figure V.13. Spectres ATR-FTIR des déchets PP, sable « Type D » et Mat D

V.2.8. Microscopie du facies du BP

Dans la technologie du béton, les méthodes d'analyse pétrographiques et non destructives peuvent être utilisées pour analyser l'uniformité de la structure. Ces méthodes montrent si les matériaux présentent une distribution uniforme dans leurs microstructures et si leur intégrité structurelle est adéquate [124]. L'examen microscopique des surfaces de fracture en flexion des échantillons, représentés sur la Figure V.14, révèle des informations cruciales sur leur intégrité structurelle. Dans l'ensemble, tous les matériaux préparés présentent un niveau d'homogénéité louable. Cependant, après une inspection plus approfondie des matériaux Mat A et Mat C dans les Figures V.14 (a)-(c), plusieurs défauts deviennent apparents, notamment des pores, des problèmes d'interconnectivité et de mauvaises zones de transition interfaciale. La zone de transition interfaciale inadéquate peut être attribuée à l'incapacité des déchets plastiques à fusionner efficacement avec les particules de sable, ce qui entraîne un piégeage d'air dans cette région [41]. Par conséquent, ces défauts contribuent à une compression et une résistance à la flexion plus faibles, ainsi qu'à des taux d'absorption d'eau accrus.

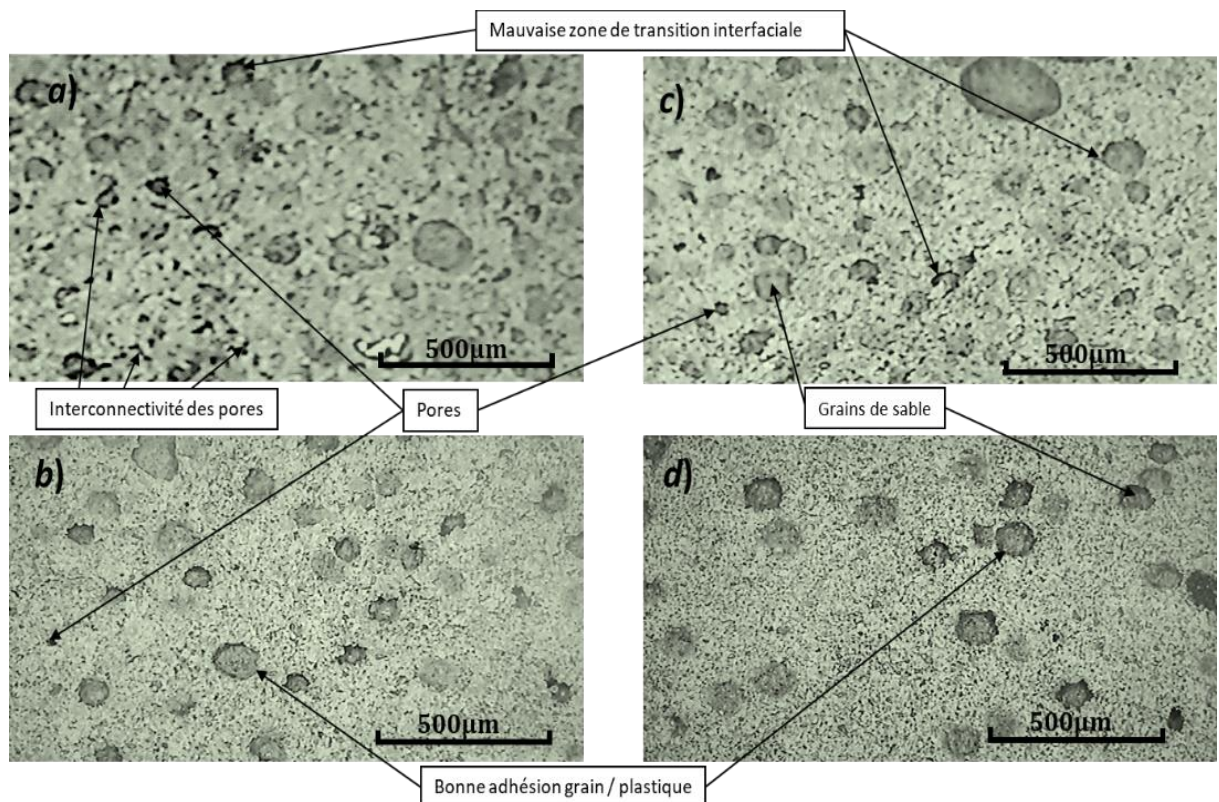


Figure V.14. Image microscopique optique des surfaces de rupture des échantillons d'essai de flexion de BP : a) Mat A, b) Mat B, c) Mat C, d) Mat D

A l'inverse, comme le montrent les Figures V.14 (b)-(d), les particules de sable à l'intérieur de la structure sont parfaitement encapsulées et liées mécaniquement par le liant plastique, ce qui

montre une bonne intégrité structurale. De plus, on observe une réduction de la porosité et la présence de particules de sable plus fines. Ces caractéristiques contribuent à un composite doté d'une résistance accrue et de propriétés d'absorption d'eau améliorées.

V.3. Partie 3 : Effet des déchets minéraux

V.3.1. Composition chimique des déchets minéraux

Le [Tableau V.8](#) présente les résultats de l'analyse chimique (XRF) des différents échantillons de chamotte et des déchets de marbre. Nous notons que les résultats d'analyse des différents échantillons de chamotte contiennent des pourcentages de silice (SiO₂) variant de 26% à 64%. La chamotte de M'sila « CH1 » a connu le pourcentage le plus élevé de silice avec environ 63,26%, tandis que les chamottes de Bou Saada « CH3 » et Bordj Bou Arreridj « CH2 » avaient des pourcentages de silice variant autour de 26%. Par contre, nous notons que le pourcentage d'oxyde de calcium (CaO) dans les deux chamotte M'sila et Bou Saada est légèrement plus élevé que dans la chamotte de Bordj Bou Arreridj.

Tableau V. 8. Propriétés chimiques des échantillons

Chemical Composition	CH1 Msila	CH2 BBA	CH3 Bou ssada	Mar	Poudre de brique [125]	Poudre de marbre [125]
SiO ₂	63,264	26,647	26,084	0,112	62,44	0,98
Al ₂ O ₃	13,398	9,333	6,037	0,068	10,71	0,32
Fe ₂ O ₃	5,349	4,011	2,525	0,028	6,65	0,16
CaO	9,339	3,961	7,331	56,37	14,20	51,43
MgO	2,577	1,393	1,52	0,159	2,15	2,17
SO ₃	0,788	1,017	0,879	0,051	1,85	0,03
K ₂ O	1,847	1,208	0,93	0	1,08	0,01
Na ₂ O	0,83	0,286	0,281	0	0,85	0,45
P ₂ O ₅	0,205	0,101	0,095	0,006	-	-
TiO ₂	0,681	0,425	0,32	0,009	-	-
Cr ₂ O ₃	0,021	0,012	0,008	0,001	-	-
Mn ₂ O ₃	0,05	0,119	0,029	0,005	-	-
ZnO	0,024	0,02	0,005	0,001	-	-
SrO	0,046	0,04	0,024	0,012	-	-
PAF	0,6	50,8	53,33	42,87	-	44.34

Nous notons également que le pourcentage de Perte au feu (PAF) dans la chamotte M'sila est très faible par rapport à tous les autres types d'échantillons, ce qui indique que les composants de ce type de chamotte sont résistants à la chaleur. Quant aux analyses des déchets de marbre, nous notons que le pourcentage d'oxyde de calcium qu'il contient est élevé et est estimé à 56,37%, tandis que les pourcentages des éléments restants varient entre 0 et 0,15%, tandis que le pourcentage de Perte au feu qu'il contient atteint 42,87%.

V.3.2. Absorption d'eau

Le test d'absorption d'eau évalue l'adéquation du matériau à différentes conditions environnementales. Plusieurs facteurs affectent la capacité du matériau à absorber l'eau, notamment la présence de pores dans le matériau en plus de la taille des composants tels que le sable et les déchets minéral. L'inter connectivité entre les pores du matériau joue également un rôle majeur dans l'augmentation du taux d'absorption d'eau [93]. La [Figure V.15](#) montre les taux d'absorption d'eau moyens pour différents échantillons à différents taux. La valeur d'absorption d'eau la plus faible était pour [Mat MR 25%](#), estimée à 0,2 %, tandis que le taux d'absorption le plus élevé était pour les échantillons [Mat BB 20%](#), estimé à 0,8 %. Par rapport aux résultats de la partie précédente des travaux, on constate que le pourcentage d'absorption d'eau a considérablement diminué, puisque ses pourcentages variaient de 0,46% à 1,43%, cette variation peut provenir de différences dans les taux d'absorption d'eau dues à la porosité entre les compositions des différents composants du matériau et aux différences dans les distributions de taille des particules de sable. Les recherches indiquent que les mélanges PEHD/sable fin ont tendance à avoir moins de pores en raison de tailles de particules de grain plus petites, ce qui donne un mélange plus dense. À l'inverse, l'abondance de pores internes dans les sables liés au plastique peut augmenter la connectivité entre les pores [115].

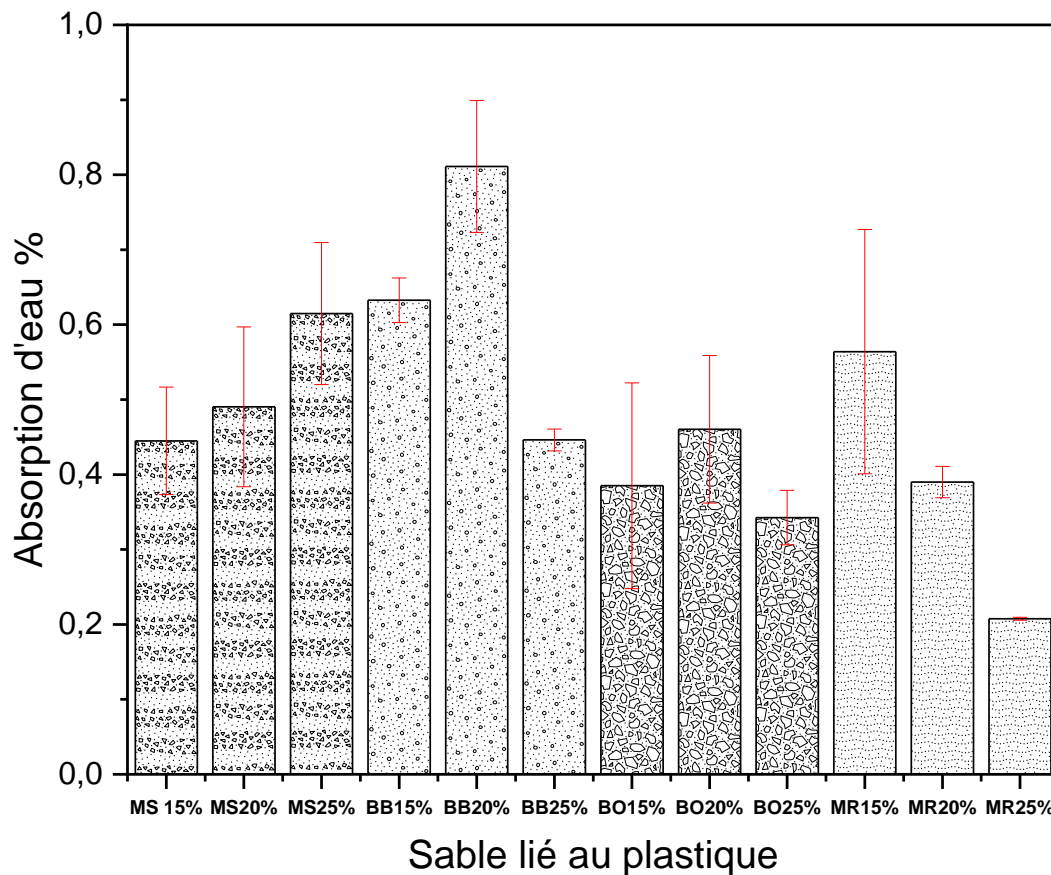


Figure V.15. Evaluation d'absorption d'eau pour différents échantillons

V.3.3. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion en trois points de toutes les éprouvettes de proportions différentes a été évaluée comme à l'étape précédente. Les résultats ont révélé un comportement linéaire dans les échantillons testés, comme le montre la Figure V.16. Les analyses indiquent que les échantillons contenant des déchets de marbre (Mat MR) ont montré la plus grande capacité de charge, atteignant environ 3600 N avec une déflexion d'environ 0,52 mm à la rupture. Des valeurs de capacité de charge assez proches sont enregistrées pour les échantillons contenant des chamottes de Boussaâda (Mat BO) et de M'Sila (Mat MS), et qui sont d'environ 3480 N et 3430 N respectivement. Alors que les valeurs de déflexion à la rupture sont d'environ 0,54 mm, 0,52 mm respectivement. Quant aux échantillons contenant des chamottes de Bordj Bou Arreridj (Mat BB), ils ont montré la valeur de capacité de charge la plus faible, estimée à environ 3150 N avec la valeur de déflexion la plus faible d'environ 0,43 mm.

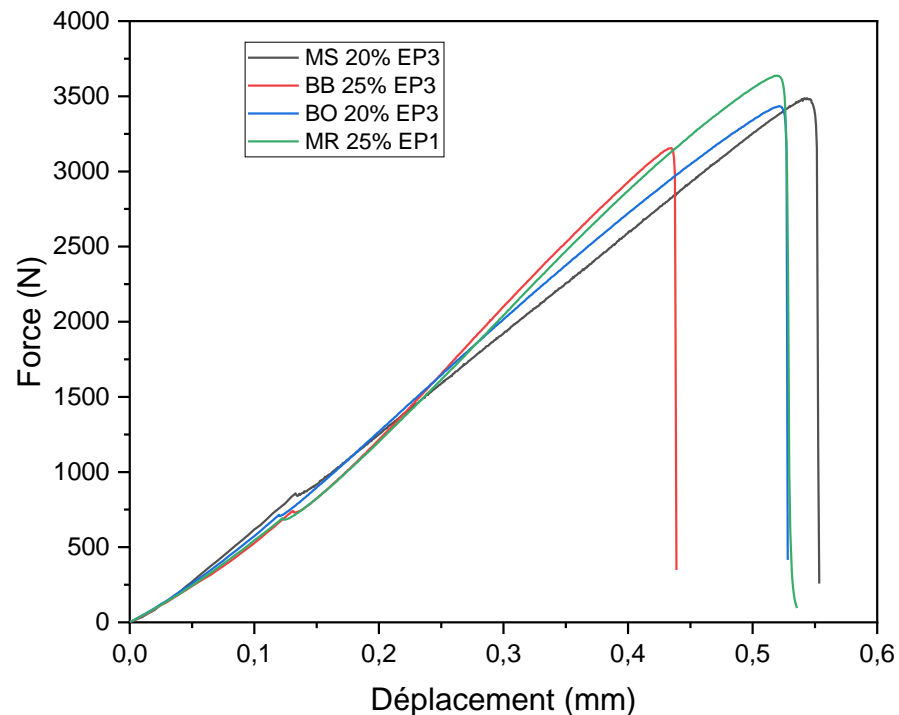


Figure V.16. Courbes charge-déplacement d'essai de flexion de différents matériaux

La Figure.V.17 montre les évaluations des contraintes de flexion et la Figure V.18 montre les évaluations des taux de déformation pour les résultats des tests menés sur diverses compositions et proportions des matériaux fabriqués. Les résultats indiquent que les contraintes de flexion pour les échantillons contenant de la chamotte Boussaâda (Mat BO) montrent de bons résultats pour Mat BO 15% et Mat BO 20%, atteignant environ 10,8 MPa avec déformation d'environ 0,6 %, tandis que pour les échantillons Mat BO 25%, on constate que la valeur de contrainte en eux a diminué jusqu'à environ 10 MPa avec un déformation d'environ 0,59%. Quant aux échantillons contenant des déchets de marbre (Mat MR), ils ont également montré de bons résultats, puisque les échantillons contenant 25% de déchets de marbre ont montré la valeur la plus élevée avec différentes compositions et proportions de matériaux, puisqu'elle a atteint environ 11,5 MPa avec une déformation de 0,6%. Pour l'échantillon Mat MS, la valeur la plus élevée a été enregistrée pour l'échantillon Mat MS 20%, et qui a été estimée à environ 10,3 MPa avec un déformation d'environ 0,56%. Quant aux échantillons contenant la chamotte de Bordj Bou Arreridj Mat BB, se caractérisent par des valeurs de contraintes les plus faibles, la valeur la plus élevée parmi les ratios qu'ils contiennent atteignant environ 9,5 MPa, avec un taux de déformation estimé à environ 0,47% pour l'échantillon Mat BB 25%.

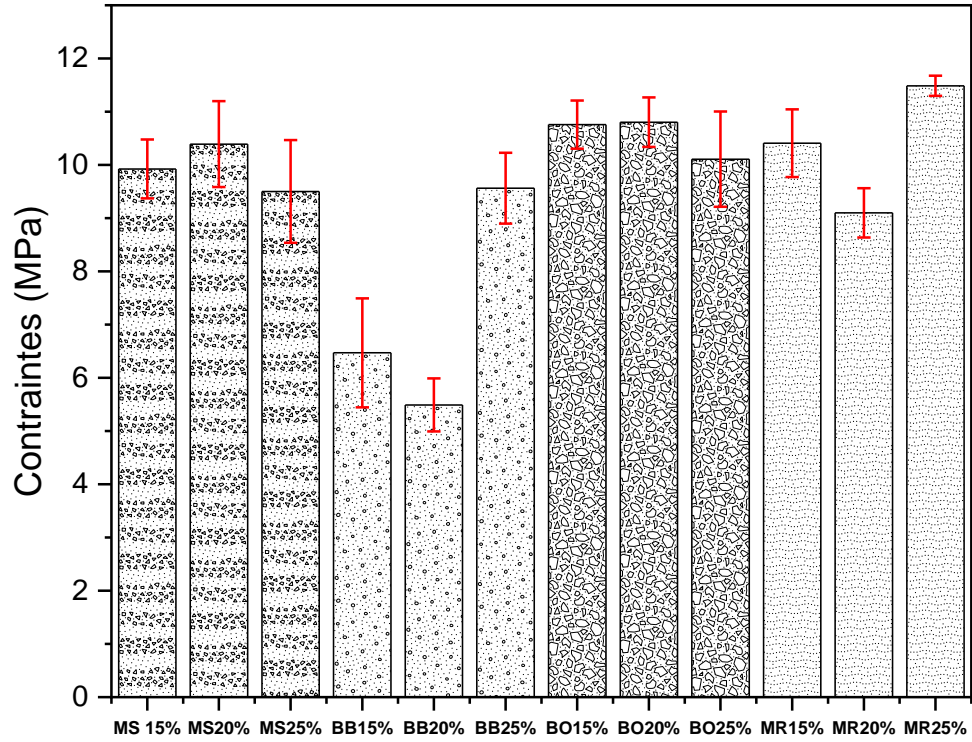


Figure V.17. Evaluation des contraintes de flexion

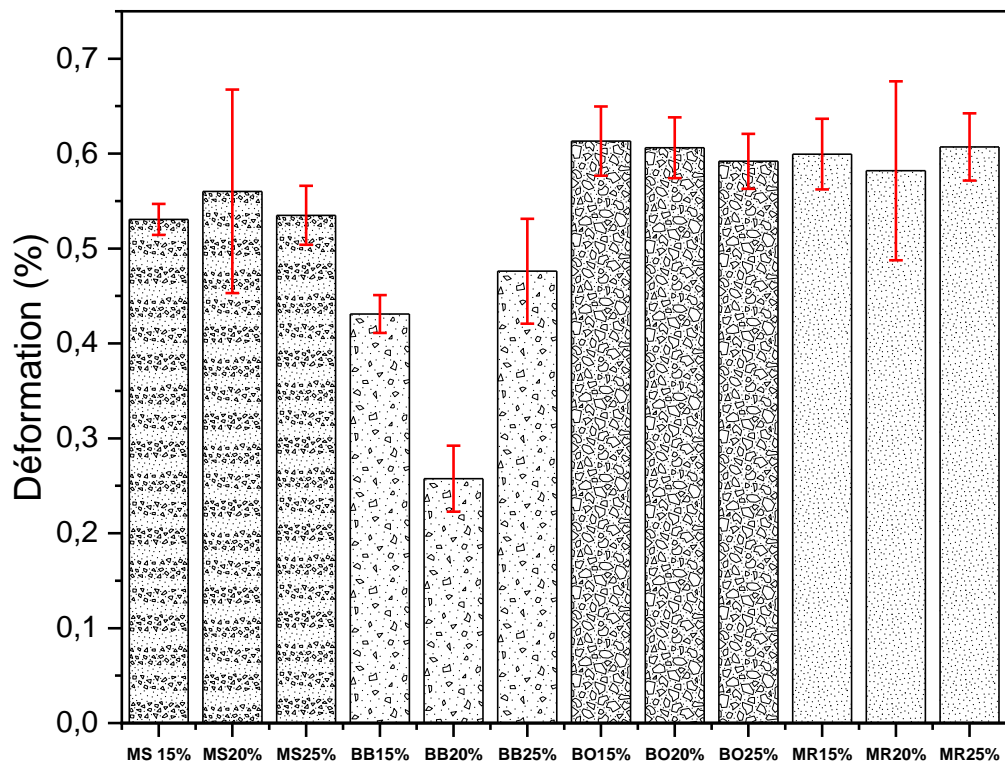


Figure V.18. Evaluation des taux de déformation

V.3.4. Résistance à la compression

La [Figure V.19](#) montre la courbe contrainte-déformation d'éprouvettes de béton polymère soumises à des essais de compression contenant 25 % de déchets de marbre. Le graphique montre le comportement viscoélastique, similaire à une étude de [Jnr, et al. \[8\]](#). À propos de l'utilisation de sacs d'eau en polyéthylène basse densité pour former des blocs de sable liés au plastique. Les courbes contrainte-déformation des échantillons de sable améliorés liés au LDPE ont montré un comportement similaire.

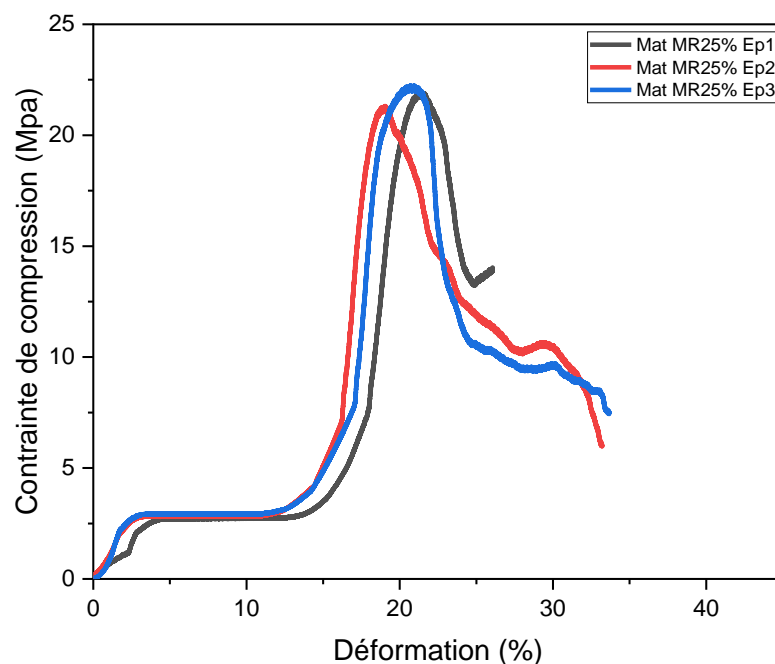


Figure V.19. Courbes contrainte-déformation d'essai de compression de Mat MR 25%

La [Figure V.20](#) représente les contraintes moyennes de compression pour tous les types de béton polymère contenant différents pourcentages de déchets minéraux. Il est clair que les échantillons contenant 15% et 20% de chamotte de M'sila ont enregistré de bonnes valeurs, variant autour de 22 MPa, alors que nous avons remarqué que les échantillons contenant 25% de chamotte de M'sila avaient des valeurs de contrainte plus faibles, ce qui indique qu'une augmentation de la chamotte de plus de 20% peut affecter négativement la résistance à la compression. Nous avons également remarqué que les valeurs de contrainte les plus élevées pour les échantillons contenant la chamotte de Boussaâda ([Mat BO](#)) et la chamotte de Bordj Bou Arreridj ([Mat BB](#)) étaient de 25% pour chacun d'eux, atteignant respectivement 18,90 MPa et 17,45 MPa. D'autre part, nous avons remarqué que les échantillons de béton polymère contenant des déchets de marbre ont montré des résultats de compression qui variaient

directement avec les différentes proportions de déchets de marbre utilisés, car ils ont enregistrées 12,80 MPa à 15% de déchets de marbre , et ont enregistré une valeur de 17,70 MPa à 20% de déchets de marbre , et ont atteint environ 22 MPa à 25% de déchets de marbre , ce qui indique que l'augmentation de la proportion de déchets de marbre dans le béton polymère peut améliorer sa capacité à résister à la pression.

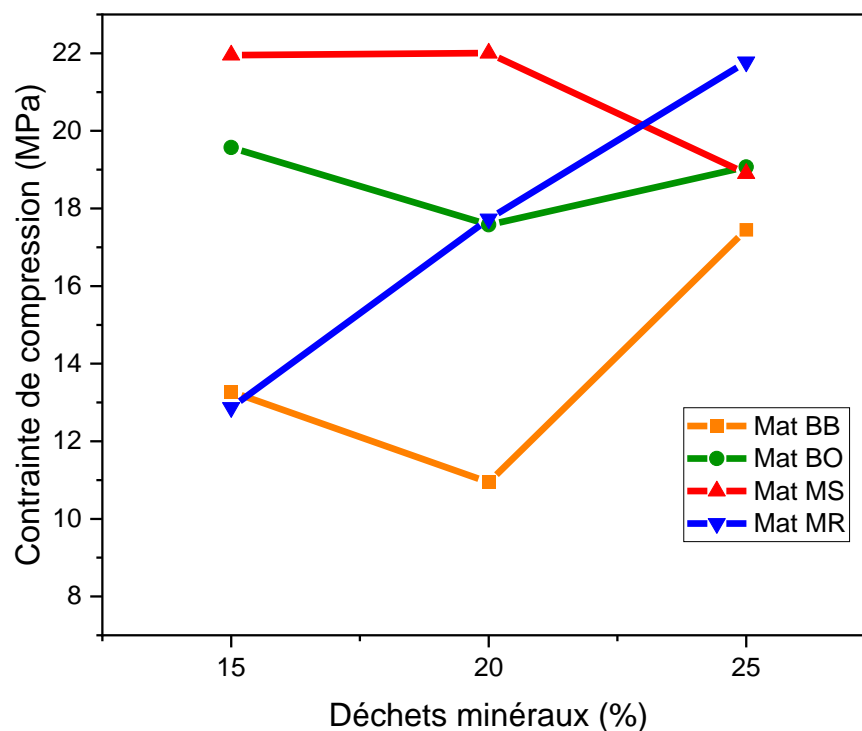


Figure V.20. Contraintes moyennes de compression des bétons polymères

V.4. Partie 4 : Effet de renforcement par fibres

V.4.1. Effet de l'ajout des fibres sur la rupture du BP

La Figure V.21 montre l'effet du renforcement par des fibres Alfa et fibres de verre sur le comportement à la rupture du béton polymère en utilisant des éprouvettes SCB. Les courbes charge-déplacement de la Figure V.21 montrent que les matériaux testés (renforcés ou vierges) ont presque la même évolution. On observe une évolution linéaire des courbes jusqu'à atteindre une charge maximale, suivie d'une rupture brutale. Ce comportement illustre un comportement de rupture fragile des matériaux testés. Le même type d'évolution est observé par Aliha, et al. [126] et Aghdam, et al. [127] lors des études expérimentales de détermination de la résistance à la traction et du K_{Ic} du bétons polymères renforcés de fibres de verre à brins coupés ; ainsi de L'effet

des fibres de basalte en différentes proportions sur les propriétés de rupture du béton polymère renforcé de nano argile, respectivement. Il est clair que les échantillons contenant des fibres végétales (Alfa) ont montré un bon comportement en termes de résistance à charge appliquée qui est de l'ordre de 5000 N avec une déformation d'environ 0,4 mm, suivis par les échantillons renforcés par des fibres de verre avec une charge qui peut atteindre 4200 N et une déformation de 0,45 mm, tandis que les échantillons non renforcés ont montré une résistance assez faible comparée aux deux matériaux renforcés par fibres avec une déformation réduite. Il est à signaler que les résistances à la rupture de ces matériaux ont été déterminées à partir de la charge maximale enregistrée pour chaque essai.

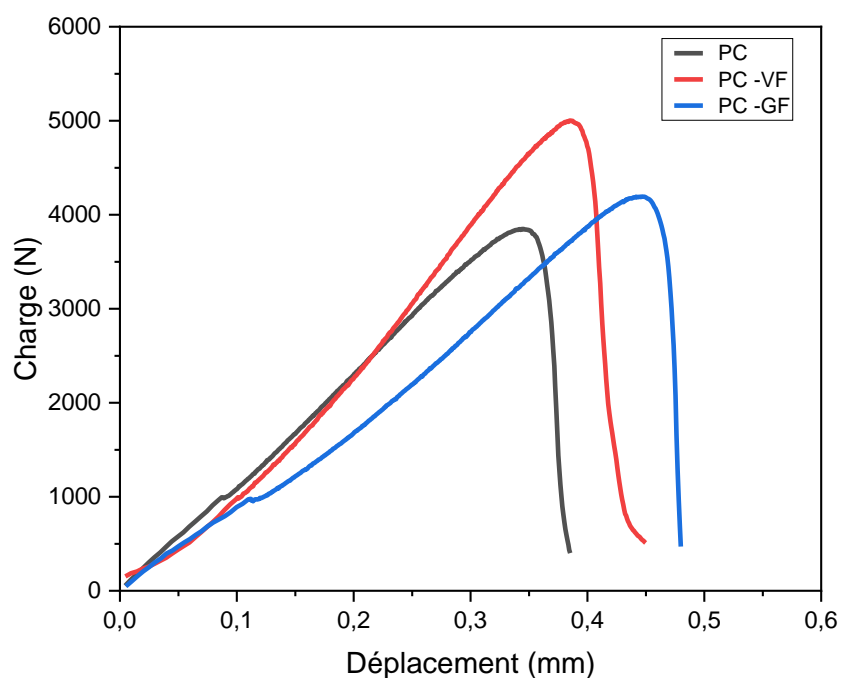


Figure V.21. Courbes charge-déplacement d'essai de flexion sur les échantillons SCB

L'histogramme de la Figure V.22 montre les valeurs du facteur de ténacité à la rupture des éprouvettes SCB en béton polymère renforcés de diverses fibres et non renforcés sollicités en mode I. Les fibres sont normalement utilisées pour empêcher le drainage du liant des particules d'agrégats. En général, le module, la résistance et d'autres propriétés dépendent de la teneur en fibres, de l'orientation et de la qualité de la liaison interfaciale entre les fibres et la matrice [95]. L'utilisation de fibres comme élément de renforcement augmente clairement les valeurs de résistance à la fracture K_{Ic} , car les échantillons contenant des fibres végétales PC-VF ont montré la valeur moyenne la plus élevée du coefficient K_{Ic} , atteignant $0,80 \pm 0,05$ (MPa \sqrt{m}), suivi des

échantillons contenant les fibres de verre, avec une valeur moyenne de $0,71 \pm 0,05$ (MPa \sqrt{m}), tandis que les échantillons non renforcés illustrent moyenne K_I de l'ordre $0,68 \pm 0,08$ (MPa \sqrt{m}).

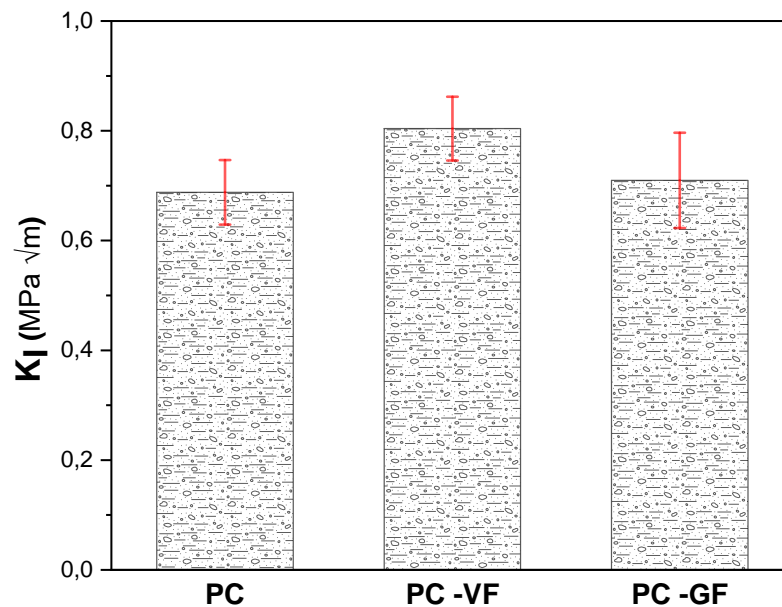


Figure V.22. Evaluation de ténacité à la rupture pour les échantillons SCB

Il est à constater que les valeurs moyennes de la résistance des deux matériaux PC- VF et PC-GF sont nettement supérieures à celle du matériau PC. Cette distinction semble être liée à l'ajout des fibres dans la structure béton polymère. Ce renforcement joue un rôle actif comme mécanisme de pontage en contrôlant la microfissuration résultante et en réduisant la vitesse de propagation des fissures [128]. En d'autres termes, le béton polymère renforcé de fibres peut transformer le comportement fragile en un comportement pseudo-ductile en maintenant une capacité de charge considérable après la fissuration de la matrice [129].

Une autre constatation peut être aussi observée : le composite renforcé par des fibres végétales illustre une résistance moyenne assez élevée comparée à celle du matériau à base de fibres de verre. Ce résultat inattendue peut être expliquer, en premier lieu, par l'agglomération de fibres de verre qui se produit sous la pression de la vis [130]. La caractérisation mécanique du béton renforcé par deux différents types fibres ont été étudiés par Al-Oraimi and Seibi [131]. Cette étude expérimentale a été réalisée en utilisant des fibres de verre et de palmier sur du béton à haute résistance. Les propriétés de résistance mécanique telles que la compression, la traction, la flexion de l'éprouvette fissurée et la ténacité après fissuration ont été étudiées. Il est intéressant de noter que les deux renforts montrent des résultats comparables indiquant l'importance des fibres naturelles. Les mêmes constatations sont signalées par Benkharbeche, et al. [132], lors de l'étude de l'effet de l'orientation des fibres sur la rupture du béton polymère.

D'après le résultat de contrôle visuel, une distribution non homogène des fibres de verre a été observée dans la première étape de la production (pendant l'extrusion). Ce phénomène est moins remarquable pour les fibres végétales Alfa, étant donné que ces fibres ont des diamètres plus importants (50-120 μm) [133], comparées à ceux des fibres de verre qui sont composées de nombreuses fibrilles extrêmement fines (0,5 à 3,8 μm) [134]. La nature des fibres végétales, notamment des fibres d'Alfa, se caractérisent par une flexibilité et une facilité d'intégration dans des matrices polymères dans de nombreux procédés, tels que l'infusion, le moulage par compression ou l'extrusion [135]. Le même phénomène a été signalé par Rokbi, et al. [128] lors de l'étude de la rupture des composites de polyester à fibres naturelles courtes aléatoires. Pour éviter l'agglomération ou l'entrecroisement des fibres, les auteurs proposent d'ajouter les fibres par petites quantités sur la surface du mélange jusqu'à ce que toutes les fibres soient absorbées par le mélange. Il semble que la bonne répartition des fibres végétales et l'adhésion entre ces fibres et la pâte plastique sont la cause de la résistance optimale du matériau renforcé par fibres végétales. L'effet de l'ajout des fibres dans le béton polymère peut être aussi refléter par l'analyse de l'accroissement de fissure lors de la rupture des éprouvettes SCB. La Figure V.22 montre clairement que la trajectoire de fissuration a changé de manière significative pour les échantillons renforcés par des fibres par rapport aux échantillons non renforcés. On remarque sur la Figure V.22 (a) que le chemin de fissuration a suivi le chemin directement vers les points d'application de la charge. En revanche, le mélange renforcé par des fibres de verre présente une trajectoire de rupture légèrement différent où il a légèrement dévié comme observé sur la Figure V.22 (b). En ce qui concerne les échantillons renforcés par des fibres Alfa, il ressort très clairement, selon la Figure V.22 (c), que la trajectoire de rupture est très tortueuse, ce qui reflète clairement des signes de ramification par rapport aux échantillons précédents. Comme on le sait, les fissures recherchent le chemin de moindre résistance fourni par les caractéristiques microscopiques les plus endommagées devant elles [128].

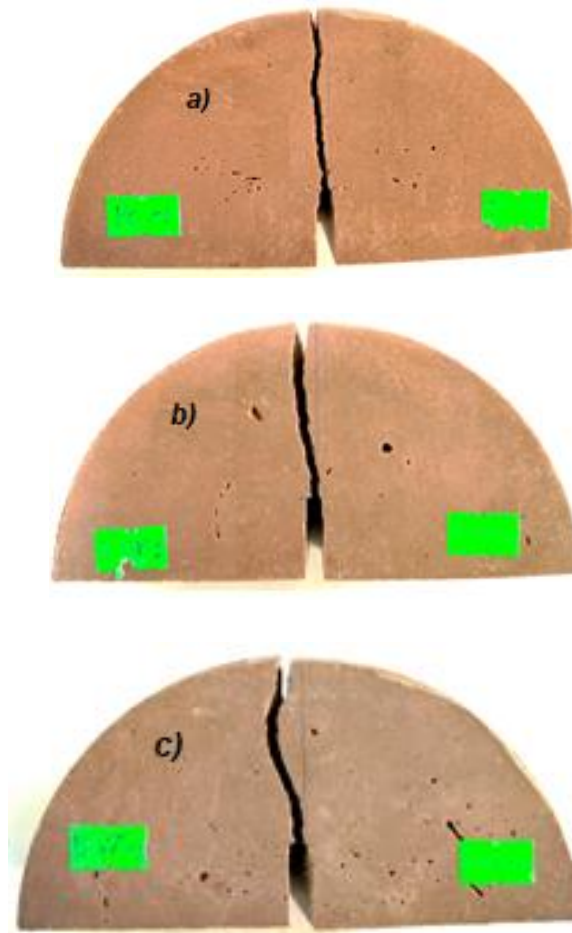


Figure V.23. Trajectoires de rupture des bétons polymères avec : (a) fibres d'Alfa, (b) fibres de verre, (c) sans fibres

V.5. Conclusions

Cette étude explore le développement et la caractérisation de bétons polymères à base de sable et des déchets plastiques. Elle révèle que le polypropylène recyclé possède des propriétés mécaniques acceptables, comparables à celles du polypropylène vierge, et peut servir de liant avec différents sables pour créer de nouveaux matériaux de construction durables. Les résultats obtenus montrent que la performance mécanique dépend du type de sable utilisé. Ainsi le sable de Khobana offre les meilleures propriétés.

Les tests d'absorption d'eau soulignent l'importance de la taille des particules et de la porosité. En outre, l'utilisation de déchets de marbre et de chamotte s'avère prometteuse. Enfin, l'ajout de fibres Alfa et les fibres de verre améliore la ténacité du béton, le mélange du sable avec les fibres de verre produit des résultats significatifs. Dans l'ensemble, les résultats suggèrent que ces bétons polymères sont une solution écologique pour réduire les déchets et optimiser l'utilisation de ressources naturelles.

Conclusions générales

Conclusions générales

Cette étude traite le développement et la caractérisation de bétons polymères à base de sable et de déchets plastiques. Grâce à une série d'analyses et de tests, nous sommes parvenus à de nombreux résultats.

Les résultats de l'analyse ATR-FTIR du polypropylène ont montré qu'il n'y a pas beaucoup de différence entre les bandes caractéristiques des composés du polypropylène. Les résultats des analyses ATR-FTIR et XRF ont montré que les sables des dunes de la zone du Hodna contiennent des pourcentages élevés de silice. Les mêmes analyses pour les échantillons de chamotte utilisés ont montré que la chamotte de M'sila contient un pourcentage plus élevé de silice que la chamotte de Bou Saada et de Bordj Bou Arreridj, de plus le déchet de marbre est principalement composé d'oxyde de calcium.

Les résultats des tests de traction et de flexion sur les éprouvettes PP (recyclées ou vierge) ont montré que les déchets PP peuvent être réutilisés et que ses propriétés mécaniques sont très acceptables par rapport au PP vierge. D'autres part, les résultats ont indiqué que les déchets de PP peuvent être utilisés comme liant, avec différents types de sable (charges), et sont prometteurs pour la création de nouveaux matériaux de construction durables.

Les tests en flexion et en compression des différents BP ont montré que les propriétés mécaniques sont fortement liées aux types de sables utilisés. Le composite fabriqué à partir de sable de Khobana (Mat D) a enregistré des propriétés mécaniques supérieures par rapport aux autres matériaux. Alors que le Mat B (Ain Sbaa) a obtenu des performances mécaniques légèrement inférieures, suivi de Mat C (Sidi Amer). En revanche, les propriétés mécaniques les moins favorables sont enregistrées lors des tests du composite Mat A (Wadi Meitar).

Les tests d'absorption d'eau de ces matériaux ont mis en évidence l'importance de la taille des particules de sable et de la porosité pour déterminer l'adéquation du matériau à différentes conditions environnementales.

Les résultats des tests des différents BP à base de sable, déchets plastiques et déchets minéraux ont montré que le béton polymère fabriqué à partir de ses matériaux est une solution respectueuse de l'environnement pour réduire les déchets et la consommation de ressources naturelles non renouvelables. Les tests mécaniques ont fourni des résultats remarquables dans l'utilisation de déchets de marbre et de chamotte, ce qui permet son utilisation dans différentes applications de construction. Les résultats ont montré que les échantillons MS20%, BO15%, BO20% et MR25% se caractérisent par des performances idéales pour la résistance à la flexion, contrairement aux autres ratios. Quant aux résultats des tests de compression, les matériaux MR

25%, MS15% et MS20% ont donné de bonnes performances par rapport aux autres composés. Les résultats d'absorption d'eau des échantillons contenant MR25% ont enregistré le taux d'absorption le plus faible parmi les formulations testées. Tous ces résultats soulignent l'importance d'améliorer la formulation des matériaux et les paramètres de traitement pour améliorer leurs performances globales.

Dans la dernière partie du travail effectué, lors de l'étude de l'effet des fibres Alfa et les fibres de verre sur le béton polymère, nous avons atteint de nombreux résultats, où un effet significatif du mélange PC-VF a été observé sur les valeurs de ténacité ainsi que le comportement à la fissuration des échantillons SCB testés. En revanche, le béton polymère renforcé de fibres Alfa présente des valeurs de ténacité légèrement supérieures à celles du béton renforcé des fibres de verre PC-GF. Quant au béton polymère non renforcé PC, des valeurs de ténacité les plus faibles ont été signalées.

A travers les méthodes utilisées pour élaborer le béton polymère et les résultats obtenus lors de différents essais, nous concluons ce qui suit :

- L'exploitation du sable de dunes, matière première abondante et peu coûteuse, peut être valorisée pour la fabrication de nouveau matériau de construction.
- Récupérer et recycler les déchets plastiques contribue ainsi à la gestion des déchets plastiques par des moyens techniques qui ne nuisent pas la nature et l'environnement.
- Fabriquer un nouveau matériau de construction à base de sable et de déchets plastiques présentant de bonnes propriétés mécaniques et physiques.
- Remplacement de certains produits en béton ordinaire et en céramique, qui s'abîment rapidement, par un matériau plus résistant et durable.
- Obtention d'un matériau de construction pouvant être moulé au besoin (tuiles, pavés, ralentisseurs et autres produits) pour différentes applications.

Exploiter autres matériaux recyclables pour la production d'autres matériaux

Références :

- [1] O. Drzyzga and A. Prieto, "Plastic waste management, a matter for the 'community'," *Microbial biotechnology*, vol. 12, no. 1, p. 66, 2019.
- [2] E. El-Seidy *et al.*, "Lightweight alkali-activated materials and ordinary Portland cement composites using recycled polyvinyl chloride and waste glass aggregates to fully replace natural sand," *Construction and Building Materials*, vol. 368, p. 130399, 2023.
- [3] M. Sambucci and M. Valente, "Ground waste tire rubber as a total replacement of natural aggregates in concrete mixes: Application for lightweight paving blocks," *Materials*, vol. 14, no. 24, p. 7493, 2021.
- [4] J. Siddiqui and G. Pandey, "A review of plastic waste management strategies," *Int. Res. J. Environ. Sci*, vol. 2, no. 12, p. 84, 2013.
- [5] X. Liu, T. Lei, A. Boré, Z. Lou, B. Abdouraman, and W. Ma, "Evolution of global plastic waste trade flows from 2000 to 2020 and its predicted trade sinks in 2030," *Journal of Cleaner Production*, vol. 376, p. 134373, 2022.
- [6] J. Jiang *et al.*, "From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 1, p. 106867, 2022.
- [7] O. Kehinde, O. Ramonu, K. Babaremu, and L. Justin, "Plastic wastes: environmental hazard and instrument for wealth creation in Nigeria," *Heliyon*, vol. 6, no. 10, p. e05131, 2020.
- [8] A. K.-L. Jnr, D. Yunana, P. Kamsouloum, M. Webster, D. C. Wilson, and C. Cheeseman, "Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks," *Waste Management*, vol. 80, pp. 112-118, 2018.
- [9] I. Adam, T. R. Walker, J. C. Bezerra, and A. Clayton, "Policies to reduce single-use plastic marine pollution in West Africa," *Marine Policy*, vol. 116, p. 103928, 2020.
- [10] M. Thiam, M. Fall, and M. Diarra, "Mechanical properties of a mortar with melted plastic waste as the only binder: Influence of material composition and curing regime, and application in Bamako," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00634, 2021.
- [11] L. Rigamonti, M. Grosso, J. Møller, V. M. Sanchez, S. Magnani, and T. H. Christensen, "Environmental evaluation of plastic waste management scenarios," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 85, pp. 42-53, 2014.
- [12] C.-F. Chow, W.-M. W. So, T.-Y. Cheung, and S.-K. D. Yeung, "Plastic waste problem and education for plastic waste management," *Emerging practices in scholarship of learning and teaching in a digital era*, pp. 125-140, 2017.
- [13] R. Arman, E. Sundari, Y. Darmayanti, and R. Efendi, "Experimental Study of Heat Transfer Using Water-Cooled Condensers to Increase Oil Production from Plastic Waste," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1764, no. 1, p. 012168: IOP Publishing.
- [14] H. T. Mohan *et al.*, "Transforming urban waste into construction blocks for a sanitation infrastructure: A step towards addressing rural open defecation," in *2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 2017, pp. 1-9: IEEE.
- [15] O. O. Ayeleru *et al.*, "Challenges of plastic waste generation and management in sub-Saharan Africa: A review," *Waste Management*, vol. 110, pp. 24-42, 2020.
- [16] A. Soni *et al.*, "Valorization of Post-Consumers Plastics and Agro-Waste in Sustainable Polymeric Composites for Tribological Applications," *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1-17, 2023.
- [17] E. Franco-Urquiza, H. Ferrando, D. Luis, and M. L. Maspoch, "Reciclado mecánico de residuos plásticos. Caso práctico: Poliéstireno de alto impacto para la fabricación de componentes de TV," *Afinidad*, vol. 73, no. 575, 2016.
- [18] T. M. Letcher, *Plastic waste and recycling: Environmental impact, societal issues, prevention, and solutions*. Academic Press, 2020.
- [19] P. Lamba, D. P. Kaur, S. Raj, and J. Sorout, "Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-24, 2021.

-
- [20] I. Mashudi, N. Suardana, I. A. Thanaya, I. B. Adnyana, and C. Kencanawati, "Compressive strength and truck run over ability of plastic/sand paving block composites," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 839, no. 1, p. 012011: IOP Publishing.
- [21] H. A. Bulut and R. Şahin, "A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste," *Composite Structures*, vol. 178, pp. 50-62, 2017.
- [22] A. Diana and D. Desharyanto, "Effect of addition waste bottle and fly ash variation to compressive strength environmentally friendly paving block," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1538, no. 1, p. 012025: IOP Publishing.
- [23] M. Hsie, C. Tu, and P. Song, "Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 494, no. 1-2, pp. 153-157, 2008.
- [24] M. Guendouz, F. Debieb, O. Boukendakdji, E. Kadri, M. Bentchikou, and H. Soualhi, "Use of plastic waste in sand concrete," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 7, no. 2, pp. 382-389, 2016.
- [25] J. Nisar, M. Aziz, A. Shah, I. Shah, and M. Iqbal, "Conversion of polypropylene waste into value-added products: a greener approach," *Molecules*, vol. 27, no. 9, p. 3015, 2022.
- [26] P. Tratzi *et al.*, "Effect of hard plastic waste on the quality of recycled polypropylene blends," *Recycling*, vol. 6, no. 3, p. 58, 2021.
- [27] H. Otuoze and A. Shuaibu, "An experimental study on the use of polypropylene waste in bituminous mix," *Nigerian Journal of Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 677-685, 2017.
- [28] A. Aravind, A. R. Bhagat, and R. Radhakrishnan, "A novel use of twisted continuous carbon fibers in additive manufacturing of composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 7049-7055, 2021.
- [29] A. Kumi-Larbi Jnr, R. Galpin, S. Manjula, Z. Lenkiewicz, and C. Cheeseman, "Reuse of Waste Plastics in Developing Countries: Properties of Waste Plastic-Sand Composites," *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1-14, 2022.
- [30] S. Gahane, S. Gour, K. Raut, D. Kumari, S. Gaidhane, and A. Moon, "PLASTIC WASTE UTILIZATION IN PAVER BLOCK."
- [31] F. I. Aneke and C. Shabangu, "Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, p. e00515, 2021.
- [32] D. Jain, S. Bhadauria, and S. Kushwah, "An experimental study of utilization of plastic waste for manufacturing of composite construction material," *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp. 1-10, 2022.
- [33] G. N. Patil, M. Al Yahmedi, S. M. Walke, and L. Rao, "Manufacturing of plastic sand bricks from polypropylene and polyethylene waste plastic," *Int J Adv Sci Tech*, vol. 29, no. 8, pp. 206-2068, 2020.
- [34] Y. Ohama, "Recent progress in concrete-polymer composites," *Advanced Cement Based Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 31-40, 1997.
- [35] M. R. Taha, M. Genedy, and Y. Ohama, "Polymer concrete," in *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*: Elsevier, 2019, pp. 391-408.
- [36] J. B. Kardou, "Polymer-modified concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 85-92, 1997.
- [37] H. N. Atahan, B. Y. Pekmezci, E. Y. Tuncel, and A. Paksoy, "Behavior of glass fabric reinforced polymer concrete composites under flexural loads," *Restoration of Buildings and Monuments*, vol. 19, no. 2-3, pp. 203-210, 2013.
- [38] K. B. Amey, K. Neglo, O.-D. Samah, A. Y. Kouto, and A. P'Kla, "Étude expérimentale de la formulation de mortier a base de sable silteux du Togo et de liant de sachets plastiques type «voltic»," *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, vol. 10, no. 3, 2014.
- [39] M. O. Boffoue *et al.*, "Experimental Determination of the Poisson's Ratio and the Elastic Modulus of a Sand-Plastic Composite Material," *Int. J. of Engineering Research*, vol. 6, pp. 292-297, 2017.
- [40] Y. O. Babatunde, R. A. Ibrahim, and D. O. Oguntayo, "Effect of mix proportion on the strength and durability of plastic and sand composite for construction applications," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 7, no. 6, p. 333, 2022.
-

-
- [41] A. Soni, P. K. Das, M. Yusuf, A. A. Pasha, K. Irshad, and M. Burchak, "Synergy of RHA and silica sand on physico-mechanical and tribological properties of waste plastic–reinforced thermoplastic composites as floor tiles," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-19, 2022.
- [42] S. K. Tulashie and F. Kotoka, "The potential of castor, palm kernel, and coconut oils as biolubricant base oil via chemical modification and formulation," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 16, p. 100480, 2020.
- [43] H. T. Mohan, F. Whitaker, R. Mohan, and K. Mini, "Performance assessment of recycled LDPE with sand fillers," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 1526-1530, 2021.
- [44] S. M. Shitote, Z. C. A. Gariy, and E. Ronoh, "Influence of Coarse Aggregate on the Physical and Mechanical Performance of Paving Blocks made using Waste Plastic."
- [45] J. Awomeso, A. Taiwo, A. Gbadebo, and A. Arimoro, "Waste disposal and pollution management in urban areas: A workable remedy for the environment in developing countries," 2010.
- [46] M. A. Abdulredha, *An Investigation of Municipal Solid Waste Management During the Arba'Een Pilgrimage in Kerbala, Iraq*. Liverpool John Moores University (United Kingdom), 2019.
- [47] J. J. Bolden IV, *Innovative uses of recycled and waste materials in construction application*. North Carolina Agricultural and Technical State University, 2013.
- [48] S. Rajendran, "Applications of Recycled Plastics and Life Cycle Assessment," University of Sheffield, 2020.
- [49] M. Nazarova, "Design of a digital product to encourage the community to recycle in Russia," 2020.
- [50] P. Nyamekye, "Re-use and Re-cycling of Automobile Plastics—A step to manage plastic waste in Ghana," 2013.
- [51] P. Européen and C. Européen, "DIRECTIVE 2008/98/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives," *Journal Officiel de l'Union Européenne*, pp. 3-30, 2008.
- [52] E. Koçak and B. İkizoğlu, "Types of waste in the context of waste management and general overview of waste disposal in Turkey," *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 520-527, 2020.
- [53] T. Christensen, *Solid waste technology and management*. John Wiley & Sons, 2011.
- [54] C. M. Orlescu and I. A. Costescu, "SOLID WASTE MANAGEMENT IN ROMANIA: CURRENT AND FUTURE ISSUES," *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, vol. 12, no. 5, 2013.
- [55] A. F. Alsebaei, "Solid waste management and recycling during Hajj pilgrimage in Mina," University of Leeds, 2014.
- [56] S. E. Vergara and G. Tchobanoglous, "Municipal solid waste and the environment: a global perspective," *Annual review of environment and resources*, vol. 37, no. 1, pp. 277-309, 2012.
- [57] N. K. Soliman and A. Moustafa, "Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 10235-10253, 2020.
- [58] G. Velvizhi *et al.*, "Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy," *Science of the Total Environment*, vol. 731, p. 138049, 2020.
- [59] J.-L. Gálvez-Martos, D. Styles, H. Schoenberger, and B. Zeschmar-Lahl, "Construction and demolition waste best management practice in Europe," *Resources, conservation and recycling*, vol. 136, pp. 166-178, 2018.
- [60] L. F. Diaz, L. Eggerth, S. Enkhtsetseg, and G. Savage, "Characteristics of healthcare wastes," *Waste management*, vol. 28, no. 7, pp. 1219-1226, 2008.
- [61] V. Causin and V. Causin, "Polymers: an overview," *Polymers on the Crime Scene: Forensic Analysis of Polymeric Trace Evidence*, pp. 9-52, 2015.
- [62] D. N. HAILEYESUS, "DEVELOPMENT OF SHREDDER, MIXER, AND EXTRUDER TO FABRICATE COMPOSITE MATERIAL USING WASTE PLASTIC AND FINE SAND," 2021.
-

-
- [63] B. Demirel, A. Yaraş, and H. Elcicek, "Crystallization behavior of PET materials," 2011.
- [64] B. Ruj, V. Pandey, P. Jash, and V. Srivastava, "Sorting of plastic waste for effective recycling," *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 564-571, 2015.
- [65] S. E. Selke, "Applications of plastic films in packaging," *Handbook of plastic films*, pp. 235-261, 2003.
- [66] M. T. Hossain *et al.*, "Research and application of polypropylene: a review," *Discover Nano*, vol. 19, no. 1, p. 2, 2024.
- [67] D. Bozsaky, "The historical development of thermal insulation materials," *Periodica Polytechnica Architecture*, vol. 41, no. 2, pp. 49-56, 2010.
- [68] R. Eisted, A. W. Larsen, and T. H. Christensen, "Collection, transfer and transport of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contribution," *Waste management & research*, vol. 27, no. 8, pp. 738-745, 2009.
- [69] M.-A. Marcoux, F. Olivier, and F. Thery, *Déchets et économie circulaire: conditions d'intégration pour une valorisation en filières industrielles*. Lavoisier, 2016.
- [70] J. Hopewell, R. Dvorak, and E. Kosior, "Plastics recycling: challenges and opportunities," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 2115-2126, 2009.
- [71] R. Nayak, *Sustainable technologies for fashion and textiles*. Woodhead Publishing, 2019.
- [72] P. V. Méndez, "Advantages and disadvantages of the use of self-repairing concrete in Colombia," *Tekhnê*, vol. 17, no. 2, pp. 27-34, 2020.
- [73] N. Tarannum and K. Pooja, "Recent trends and applications in the research and development activities of redispersible powder: a vision of twenty-first century," *Polymer Bulletin*, vol. 79, no. 10, pp. 8093-8142, 2022.
- [74] R. Mansour, R. El Abidine, and B. Brahim, "Performance of polymer concrete incorporating waste marble and alfa fibers. *Advanced Concrete Construction 2017*; 5: 331e43," ed.
- [75] N. BENZANNACHE, "Caractérisation mécanique des bétons polymères à base de résine renforcés par des granulats," 2017.
- [76] D. W. Fowler, "Polymers in concrete: a vision for the 21st century," *Cement and concrete composites*, vol. 21, no. 5-6, pp. 449-452, 1999.
- [77] I. H. Alfahdawi, S. Osman, R. Hamid, and A. I. Al-Hadithi, "Utilizing waste plastic polypropylene and polyethylene terephthalate as alternative aggregates to produce lightweight concrete: A review," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 11, no. 8, pp. 1165-1173, 2016.
- [78] E. N. Peters, *Plastics: thermoplastics, thermosets, and elastomers*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [79] J. P. Pascault and R. J. Williams, "Thermosetting polymers," *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*, pp. 519-533, 2013.
- [80] R. J. Spontak and N. P. Patel, "Thermoplastic elastomers: fundamentals and applications," *Current opinion in colloid & interface science*, vol. 5, no. 5-6, pp. 333-340, 2000.
- [81] M. Gupta, R. Srivastava, and H. Bisaria, "Potential of jute fibre reinforced polymer composites: A review," *Int. J. Fiber Text. Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 30-38, 2015.
- [82] M. Muthukumar and D. Mohan, "Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion," *European polymer journal*, vol. 40, no. 9, pp. 2167-2177, 2004.
- [83] B. Traore, "Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles," Université Bourgogne Franche-Comté; Université Félix Houphouët-Boigny ..., 2018.
- [84] J. S. Perera, P. Mendis, S. K. Baduge, and M. Hashemi, "Cementless building materials made from recycled plastic and sand/glass: a review and road map for the future," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 56-63, 2022.
- [85] D. V. Rosato, *Extruding plastics: a practical processing handbook*. Springer Science & Business Media, 2013.
-

-
- [86] S. N. Ahmed, N. H. Sor, M. A. Ahmed, and S. M. Qaidi, "Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate," *Materials Today: Proceedings*, vol. 57, pp. 818-823, 2022.
- [87] S. Suherman, M. Peglow, and E. Tsotsas, "Measurement and Modelling of Sorption Equilibrium Curve of Water on PA6, PP, HDPE and PVC by Using Flory-Huggins Model," *Reaktor*, vol. 13, no. 2, pp. 89-94, 2010.
- [88] L. Benhamadouche *et al.*, "Characterization of physical and mechanical properties of recycled jute fabric reinforced polypropylene composites," *Polymer Composites*, vol. 42, no. 10, pp. 5435-5444, 2021.
- [89] N. Meftah and M. S. Mahboub, "Spectroscopic characterizations of sand dunes minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD analyses," *Silicon*, vol. 12, no. 1, pp. 147-153, 2020.
- [90] T. D. T. Oyedotun, "X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview," *Geology, Ecology, and Landscapes*, vol. 2, no. 2, pp. 148-154, 2018.
- [91] H. Kowanou, E. Sanya, and A. Vianou, "Effets de l'incorporation du fondu de déchets de sachets plastiques sur la consistance du bitume et la stabilité du béton bitumineux," *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, vol. 10, no. 2, 2014.
- [92] L. A. Sanchez-Echeverri, N. J. Tovar-Perilla, J. G. Suarez-Puentes, J. E. Bravo-Cervera, and D. F. Rojas-Parra, "Mechanical and market study for sand/recycled-plastic cobbles in a medium-size Colombian city," *Recycling*, vol. 6, no. 1, p. 17, 2021.
- [93] A. Soni and P. K. Das, "Development of sand-plastic composites as floor tiles using silica sand and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products-A sustainable approach for cleaner production," 2022.
- [94] F. A. Shilar, S. V. Ganachari, V. B. Patil, N. Almakayeel, and T. Y. Khan, "Development and optimization of an eco-friendly geopolymer brick production process for sustainable masonry construction," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e02133, 2023.
- [95] M. Rokbi, B. Baali, Z. Rahmouni, and H. Latelli, "Mechanical properties of polymer concrete made with jute fabric and waste marble powder at various woven orientations," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, no. 9, pp. 5087-5094, 2019.
- [96] H. reza Karimi and M. Aliha, "Statistical assessment on relationship between fracture parameters of plain and fiber reinforced polymer concrete materials," *Composites Communications*, vol. 28, p. 100969, 2021.
- [97] I. Artamendi and H. A. Khalid, "A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 7, no. sup1, pp. 163-180, 2006.
- [98] I. Lim, I. Johnston, and S. Choi, "Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 44, no. 3, pp. 363-382, 1993.
- [99] R. Morent, N. De Geyter, C. Leys, L. Gengembre, and E. Payen, "Comparison between XPS-and FTIR-analysis of plasma-treated polypropylene film surfaces," *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, vol. 40, no. 3-4, pp. 597-600, 2008.
- [100] M. Tiwari, T. Rathod, P. Ajmal, R. Bhangare, and S. Sahu, "Distribution and characterization of microplastics in beach sand from three different Indian coastal environments," *Marine pollution bulletin*, vol. 140, pp. 262-273, 2019.
- [101] J. Jose, S. Satapathy, A. Nag, and G. Nando, "Modification of waste polypropylene with waste rubber dust from textile cot industry and its characterization," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 85, no. 4, pp. 318-326, 2007.
- [102] A. Kassouf, J. Maalouly, D. N. Rutledge, H. Chebib, and V. Ducruet, "Rapid discrimination of plastic packaging materials using MIR spectroscopy coupled with independent components analysis (ICA)," *Waste management*, vol. 34, no. 11, pp. 2131-2138, 2014.
-

-
- [103] Z. Yao, T. Chen, H. Li, M. Xia, Y. Ye, and H. Zheng, "Mechanical and thermal properties of polypropylene (PP) composites filled with modified shell waste," *Journal of hazardous materials*, vol. 262, pp. 212-217, 2013.
- [104] J. A. Hadi, F. G. Najmuldeen, and I. Ahmed, "Quality restoration of waste polyolefin plastic material through the dissolution-precipitation technique," *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 20, no. 2, pp. 163-170, 2014.
- [105] S. J. L. Bispo, R. C. S. Freire Júnior, and E. M. F. d. Aquino, "Mechanical properties analysis of polypropylene biocomposites reinforced with curaua fiber," *Materials Research*, vol. 18, pp. 833-837, 2015.
- [106] E. Sabău, R. Udriou, P. Bere, I. Buranský, and C.-Ş. Miron-Borzan, "A novel polymer concrete composite with GFRP waste: Applications, morphology, and porosity characterization," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, p. 2060, 2020.
- [107] M. Zrida *et al.*, "High-speed tensile tests on a polypropylene material," *Polymer Testing*, vol. 29, no. 6, pp. 685-692, 2010.
- [108] S. A. Boussaa, A. Kheloufi, and N. B. Zaourar, "Sand dune characterization for preparing metallurgical grade silicon," *Open Chemistry*, vol. 16, no. 1, pp. 1227-1232, 2018.
- [109] E. Ahmed, M. Soliman, A. Alsharhan, and S. Tamer, "Mineralogical characteristics of the Quaternary sand dunes in the eastern province of Abu Dhabi, United Arab Emirates," in *Quaternary Deserts and Climatic Change*: CRC Press, 2020, pp. 85-90.
- [110] A.-C. Pescheux, E. Le Baron, and O. Raccurt, "Characterization of different Moroccan sands to explain their potential negative impacts on CSP solar mirrors," *Solar Energy*, vol. 194, pp. 959-968, 2019.
- [111] M. L. Mechri, S. Chihi, N. Mahdadi, and S. Beddiaf, "Study of heat effect on the composition of dunes sand of Ouargla (Algeria) using XRD and FTIR," *Silicon*, vol. 9, no. 6, pp. 933-941, 2017.
- [112] S. Lucas, M. T. Tognonvi, J. Gelet, J. Soro, and S. Rossignol, "Interactions between silica sand and sodium silicate solution during consolidation process," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 357, no. 4, pp. 1310-1318, 2011.
- [113] M. M. Khan, M. Singh, G. Jadhav, S. Mahajani, and S. Mandre, "Characterization of waste and reclaimed green sand used in foundry processing," *Silicon*, vol. 12, no. 3, pp. 677-691, 2020.
- [114] N. Mahdadi, Y. Benkrima, S. Chihi, M. L. Mechri, and M. S. E. Bougoffa, "Spectroscopic properties of Ouargla Sand Dunes—Algeria," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 15, no. 14, p. 1288, 2022.
- [115] N. Garcia-Troncoso, L. Li, Q. Cheng, K. H. Mo, and T.-C. Ling, "Comparative study on the properties and high temperature resistance of self-compacting concrete with various types of recycled aggregates," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00678, 2021.
- [116] M. A. Dalhat and H. A.-A. Wahhab, "Cement-less and asphalt-less concrete bounded by recycled plastic," *Construction and Building Materials*, vol. 119, pp. 206-214, 2016.
- [117] K. E. BARIŞ and L. TANAÇAN, "Natural pozzolan-based green geopolymer foam for thermal insulation," *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, vol. 7, no. 3, pp. 128-144.
- [118] K. Sahani, B. R. Joshi, K. Khatri, A. T. Magar, S. Chapagain, and N. Karmacharya, "Mechanical Properties of Plastic Sand Brick Containing Plastic Waste," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, 2022.
- [119] A. F. Hamzah and R. M. Alkhafaj, "An investigation of manufacturing technique and characterization of low-density polyethylene waste base bricks," *Materials Today: Proceedings*, vol. 61, pp. 724-733, 2022.
- [120] D. X. Thang, "FABRICATION AND STUDY ON PROPERTIES OF POLYPROPYLENE COMPOSITE MATERIALS/SILICA SAND POWDER," 2023.
- [121] S. K. Tulashie, E. K. Boadu, F. Kotoka, and D. Mensah, "Plastic wastes to pavement blocks: A significant alternative way to reducing plastic wastes generation and accumulation in Ghana," *Construction and Building Materials*, vol. 241, p. 118044, 2020.
-

-
- [122] P. Vilímová, J. Tokarský, P. Peikertová, K. M. Kutláková, and T. Plaček, "Influence of thermal and UV treatment on the polypropylene/graphite composite," *Polymer Testing*, vol. 52, pp. 46-53, 2016.
- [123] D. Aydemir *et al.*, "Nanocomposites of polypropylene/nano titanium dioxide: effect of loading rates of nano titanium dioxide," *Materials Science*, vol. 22, no. 3, pp. 364-369, 2016.
- [124] L. D. Wakeley, G. S. Wong, and J. Burkes, "Petrographic techniques applied to cement-solidified hazardous waste," 1992.
- [125] G. Mirouzi and A. Houda, "Effect of mineral additions on the mechanical behavior of polymer concretes," *World Journal of Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 851-861, 2023.
- [126] M. Aliha, M. Heidari-Rarani, M. Shokrieh, and M. Ayatollahi, "Experimental determination of tensile strength and K (IC) of polymer concretes using semi-circular bend(SCB) specimens," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 43, no. 6, p. 823, 2012.
- [127] A. A. Aghdam, M. H. Niaki, and M. Sakkaki, "Effect of basalt fibers on fracture properties of nanoclay reinforced polymer concrete after exposure to elevated temperatures," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107329, 2023.
- [128] M. Rokbi, A. Imad, C. Herbelot, and Z. Belouadah, "Fracture toughness of random short natural fibers polyester composites," *Diffusion Foundations*, vol. 18, pp. 94-105, 2018.
- [129] M. Rokbi, Z. E. A. Rahmouni, and B. Baali, "Flexural characterization of polymer concrete comprising waste marble and date palm fibers," *Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn*, 2019.
- [130] A. M. M. El-Sabbagh, L. Steuernagel, D. Meiners, and G. Ziegmann, "Effect of extruder elements on fiber dimensions and mechanical properties of bast natural fiber polypropylene composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, no. 12, 2014.
- [131] S. Al-Oraimi and A. Seibi, "Mechanical characterisation and impact behaviour of concrete reinforced with natural fibres," *Composite Structures*, vol. 32, no. 1-4, pp. 165-171, 1995.
- [132] H. Benkharbeche, M. Rokbi, Z. E. A. Rahmouni, M. Ghebouli, M. Grine, and B. Baali, "Effect of fibers orientation on the fracture of polymer concrete based on quartz, polyester and jute fabrics," in *Defect and Diffusion Forum*, 2021, vol. 406, pp. 511-520: Trans Tech Publ.
- [133] M. Rokbi, H. Osmani, A. Imad, and N. Benseddiq, "Effect of chemical treatment on flexure properties of natural fiber-reinforced polyester composite," *procedia Engineering*, vol. 10, pp. 2092-2097, 2011.
- [134] G. A. Heitmann, "Elastomeric materials reinforced with small diameter glass fibers," ed: Google Patents, 1977.
- [135] M. Sakib, K. Maraz, S. Shahida, A. Ahmed, and R. Khan, "A review on the properties of natural fibers and manufacturing techniques of fiber reinforced biocomposites," *Mod. Concept. Mater. Sci.*, vol. 4, no. 5, pp. 1-15, 2021.
-