

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



جامعة البويرة

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Mekid Oualid

Fedala Aissa

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** en :

Filière : Génie Civil

Option : Structure

Thème :

Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de granulats synthétiques

Devant le jury composé de :

M ^f : Bouamra .Y	MCB	UAMOB	Président
M ^f : Mougari Brahim	MAA	UAMOB	promoteur
M ^f : Ait tahar Kamel	Professeur	UAMOB	Co- promoteur
M ^f : Bakhti .R	MCB	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

REMERCEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux ,
qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail*

*Nous remercions vivement notre promoteur Dr : Mougari Brahim pour ses
encouragements ,ses conseils , sa disponibilité ,et son aide précieux qu'il nous
a offert dans la réalisation de ce travail*

*Nous tenons à remercier notre Co-promoteur Pr : Ait tahar Kamel pour son
aide et ses conseils*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt
qu'ils ont porté notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de
l'enrichir par leurs propositions.*

*Un grand merci à tous les enseignants de génie civil qui ont contribué à notre
formation et à tous nos collègues.*

*En fin , nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont
participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

*Mes très chers parents, Mes grand-
mères*

*Mes frères , sœurs et tout ma famille
, tous mes amis sans exception,
et à tous ceux qui m'ont soutenu*

MEKID OUALID

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à
Mes très chers parents,
Mes frères , sœurs
et tout ma famille ,
tous mes amis sans exception,
et à tous ceux qui m'ont soutenu

FEDALA AISSA

Résumé

La valorisation des déchets et réutilisations sous forme de granulats dans le domaine de la construction parmi les solutions qui peut être favorise la protection de l'environnement et s'avère à la création d'une source alternative aux granulats naturels issus des carrières.

L'objectif de cette recherche est d'étudier la faisabilité de la valorisation des déchets pneumatiques et la réalisation des matériaux composites légers susceptible à utiliser dans la construction, en effet nous avons opté à l'élaboration de deux composites, l'un à base du plâtre et l'autre à base du mortier ordinaire, les granulats pneumatiques sont partagés en deux gammes (0/2.5) mm et (2.5/5)mm. L'ajout des granulats pneumatiques se fait en incorporation et en substitution respectivement dans le mortier et le plâtre en taux volumiques (15% ; 30% et 45%).

Dans la suite nous avons évalué l'influence des granulats pneumatique sur les propriétés physico-mécaniques des éprouvettes réalisées.

Les résultats ont montres que : l'augmentation du taux des granulats pneumatique abaisse la masse volumique à l'état sec des composites réalisés, ainsi la diminution de leurs propriété mécaniques.

Mots clés : valorisation, plâtre, mortier, déchets pneumatique, propriétés physico-mécanique.

Abstrait

Recycling and reuse of waste in the form of granules in the construction field is one of the solutions that can contribute to protecting the environment and it can give an alternative.

The aim of this research is to study the recyclability and reuse of rubber wheel waste as granules in two different compounds: Gypsum and mortar.

We use two samples of rubber granules with a diameter of (0 / 2.5) mm and (5 / 2.5) mm. In addition the volumetric ratios are (45%, 30%, 15%) Respectively .

Later we evaluate the effect of the rubber granules on the physical and mechanical properties of the test samples performed.

The results showed that:

The high proportions of rubber particles in the mixtures lead to a decrease in the volumetric mass in the solid state and decrease the mechanical resistance:

Key words :Rotate , Waste rubber tires , Gypsum , Slurry , Physical properties , Mechanical properties

ملخص

تدوير النفايات وإعادة استعمالها على شكل حبيبات في مجال البناء يعد من الحلول التي بإمكانها المساهمة في حماية البيئة وإعطائنا مصدر بديل للحصى الطبيعية المستخرجة من المحاجر الهدف من هذا البحث هو دراسة قابلية تدوير نفايات العجلات المطاطية وإنتاج مواد مركبة خفيفة الوزن من المحتمل أن تستخدم في البناء، وقد اخترنا بالفعل تطوير مركبين، أحدهما الجبس والأخر الملاط العادي نستعمل عينتين من حبيبات الاطارات المطاطية ذات قطر (0/2.5) مم و (2.5/5) مم إضافة هذه الاخيرة يتم عن طريق الدمج والاستبدال من اجل النسب الحجمية (15% ; 30% ; 45%) على التوالي فيما بعد نقوم بتقييم تأثير الحبيبات المطاطية علي الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعينات الاختبار المنجزة اظهرت النتائج ان :

ارتفاع نسب الحبيبات المطاطية في الخلائط يؤدي إلي انخفاض الكتلة الحجمية في الحالة الصلبة وينقص من المقاومة الميكانيكية

كلمات المفتاحية: تدوير, نفايات الاطارات المطاطية, جبس, ملاط, خصائص فيزيائية, خصائص ميكانيكية

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I :Les déchets à base des polymères - Recherche bibliographique	3
I.1. introduction	3
I.2.Déchets.....	3
I.2.1. Différents types des déchets	3
I.2.1.1. Déchet inertes	4
I.2.1.2. Déchets ultimes	4
I.2.1.3. Déchets encombrants	5
I.2.2. Gestion des déchets	5
I.2.2.1 Définition de la gestion des déchets	5
I.2.3. valorisation des déchets	6
I.2.3.1. Le recyclage	6
I.2.3.2. Le Réemploi	6
I.2.3.3. La régénération.....	6
I.2.3.4. La réutilisation	6
I.3. Les déchets pneumatiques	6
I.3.1. pneus usagés	6
I.3.2. Histoire Des Déchets Pneumatiques.....	7
I.3.2.1 Définition du caoutchouc	8
I.3.2.2. Définition d'un pneumatique	9
I.3.2.3. Principaux constituants d'un pneu.....	9
a)- La carcasse	9
b)- Le talon	9
c)- La bande de roulement	9
d)- Le flanc	10
I.3.2.4. Composition d'un pneu	11
I.3.2.5. Caractéristiques mécaniques des PUNR	12
I.3.3. Filières de valorisation	12
I.3.3.1. Le rechapage	12
I.3.3.2. La valorisation énergétique	13

I.3.3.3. L'incinération en cimenterie	13
I.3.3.4. Autres valorisations thermiques	14
I.3.3.5 La valorisation sous forme de matières premières	14
A) Poudrettes	15
B) Granulés	15
I.3.4. Valorisation des pneus usagés dans le domaine de la construction :.....	16
a- Le tapis de pneus anti vibration	16
b- La construction de récifs artificiels	16
c- Mur antibruit ACIAL (1992)	16
d- Le pneu sol.....	17
I.4.Conclusion du chapitre.....	17
CHAPITRE II :les composites à base des granulats synthétique	18
II.2 Valorisation des déchets pneumatiques usagés comme granulats dans le béton	18
II.2.1. Elaboration de la poudrette de caoutchouc	18
A) Séparation	18
B) Laminage des parties 100% en caoutchouc	18
C) Pré-broyage	18
D) Séparation caoutchouc - câbles d'acier.....	18
E) Le granulateur.....	18
II.2.2. Impact des GC sur les propriétés des bétons à l'état frais	18
II.2.2.1. Affaissement	18
II.2.2.2. La masse volumique.....	19
II.2.2.3 Teneur en air	20
II.2.3. Impact des GC sur les propriétés à l'état durci du béton.....	20
II.2.3.1.Résistance à la compression	20
II.2.3.2.Résistance à la traction	22
II.2.3.3.Module d'élasticité :.....	22
II.2.3.4.Capacité de déformation :.....	23
II.2.3.5.Amortissement des vibrations.....	24
II.2.3.6.Propriétés thermiques	24
II.2.4. Impact sur les propriétés liées à la durabilité.....	25
II.2.4.1. Perméabilité	25
II.2.4.2. Retrait.....	26
II.2.4.3.Résistance au gel et dégel :.....	27
II.3. Les déchets plastiques.....	28

II.3.1. Généralité sur les matières plastiques	28
II.3.2. Définition d'une matière plastique.....	29
A- Définition d'un monomère.....	29
B- définition d'un polymère.....	29
II.3.3. Les différents types de matières plastiques :	29
II.3.3.1. Les thermoplastiques	29
II.3.3.2. Les thermodurcissables	31
II.3.3.3. Les élastomères	32
II.3.4. La fabrication du plastique	32
II.3.4.1. Le raffinage Le craquage	32
II.3.4.2. La polymérisation.....	32
II.3.4.3. Les adjuvants	33
II.3.5. Avantages des matières plastiques	33
II.3.5.1. Inconvénients des plastiques.....	34
II.3.6. La valorisation des déchets plastiques	34
II.3.6.1. Origine et répartition des plastiques	34
II.3.6.2. Le processus de collecte et de tri et de recyclage.....	35
II.3.6.2.1. La collecte et le tri	35
II.3.6.2.2. Etapes du recyclage des déchets plastiques	36
II.3.7. Valorisation Des Déchets Plastiques Dans Le Domaine De Génie Civil.....	37
II.3.7.1. La fabrication d'éléments de construction.....	37
II.3.7.2. Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton et mortier.....	37
II.3.7.3 Certains types des matières recyclables d'origine plastique utilisées dans les applications en génie civil.....	37
II.3.7.4. Classification des plastiques réutilises et revalorises dans le béton et mortiers :.....	39
II.3.7.5. Les effets de valorisation des déchets plastiques sur le comportement du béton.....	40
II.3.8. propriétés des différents bétons à base des déchets plastiques :	41
II.3.8.1. à l'état frais :	41
II.3.8.2 à l'état durci :	42
II.3.9. Remarque :	46
II.4. Les déchets de polystyrène.....	47
II.4.1. Généralité	47
II.4.2. Composition chimique	48
II.4.3. Les applications :	49
II.4.4. Les différents types de polystyrènes :	49

II.4.5. Propriétés physiques et mécaniques du polystyrène	51
II.4.5.1 Densité.....	51
II.4.5.2 Résistance à la chaleur	51
II.4.5.3 Absorption	51
II.4.5.4 Conductivité thermique :	51
II.4.5.5 Résistance à la compression	51
II.4.5.6. Inconvénients du polystyrène	51
II.4.6. Billes de polystyrène :	52
II.4.6.1 Béton de polystyrène	52
II.4.6.2. Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène	54
II.4.6.3. Avantages et domaine d'utilisation du béton de polystyrène.....	55
II.5. Conclusion du chapitre :	56
CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux utilisés et procédés expérimentaux.....	57
III.1. Introduction.....	57
III.2. Les matériaux et matériels utilisés	57
III.2.1. Ciment.....	59
III.2.2. Le sable	59
III.2.2.1. Caractéristiques physiques du sable utilisé	59
III.2.3. Granulats des déchets pneumatiques	60
III.2.3.1. Caractéristiques physiques des déchets pneumatiques.....	60
III.2.4 EAU	63
III.2.5 Le plâtre	63
III.2.5.1 : Caractérisations physiques des matériaux utilisés	63
III.2.5.1.1 : La masse volumique du plâtre	63
III.3 : Formulations des composites à base des granulats pneumatiques	63
III.3.1 : Optimisation des mélanges plâtre/granulats pneumatiques.....	65
III.3.1.1 : Procédés de réalisation des différents mélanges plâtre/granulats pneumatiques	65
III.3.1.2 Caractérisations mécaniques des différents composites réalisés	66
III.3.2 Formulation des mortiers	69
III.3.2.1 confection du mortier ordinaire (de référence)	69
III.3.2.2 : Constituants du mortier normal : (ciment = 1/3 sable), (E/C=0.55)	69
III.3.2.3 compositions des différents mortiers à base des granulats pneumatiques (MGDP). ...	70
III.3.2.4. procédés de réalisation de différents composites à base de (MGDP)	71
III.3.2.5. confection des éprouvettes (4x4x16 cm ³).....	71
III.3.2.6 Conservation des éprouvettes	72

III.3.2.7. Les différents essais réalisés	72
III.3.2.7.1. Essai de caractérisation rhéologique des mortiers	72
III.3.2.7.2. Essais réalisés à l'état sec	74
III.4. Conclusion du chapitre	75
CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION	76
IV.1 Introduction	76
IV.2. Résultats des essais du matériau plâtre.....	76
IV.2.1. Résultats essais physiques.....	76
A. La masse volumique	76
IV.2.2. Résultats des essais mécaniques	77
A. Essais de flexion	77
B. Essais de compression	79
IV.2.3. Interprétation des résultats	82
IV.3. Résultat des essais sur les mortiers étudié	83
IV.3.1. Etat frais.....	83
IV.3.1.1. La Maniabilité	83
IV.3.2 l'état durci.....	84
IV.3.2.1. Résultats des essais physiques.....	84
IV.3.2.2. Résultats des essais mécaniques	85
IV.3.3. Interprétation des résultats	89
IV.4. Conclusion du chapitre	90
Conclusion générale	91
VI. bibliographique.....	93

Liste des figures :

Figure I-1 DECHET INERTES	4
Figure I-2 Déchets ultimes.....	5
Figure I-3 Déchets ultimes.....	5
Figure I-4 pneu de voiture	7
Figure I-5 Coupe transversale d'un pneu	10
Figure I-6 Le rechapage	13
Figure I-7 L'incinération en cimenterie.....	14
Figure I-8 matières premières	15
Figure I-9 tapis de pneus anti vibration	16
Figure I-10 Ouvrage végétalisé Projet de Bousmail.....	17
Figure I-11 Pose des nappes de pneus Projet pilote-Route de Bousmail	17
Figure I-12 Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie)-Stabilité d'un talus	17
Figure II-1 : Influence des GC sur l'affaissement	19
Figure II-2 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GC	20
Figure II-3 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus	20
Figure II-4 : Influence du dosage en GC sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des GC 0-4mm)	21
Figure II-5 : Influence de l'adjonction de GC sur la résistance en compression	21
Figure II-6 : Influence des GC sur le module d'élasticité	23
Figure II-7 : Influence de l'incorporation de GC sur la capacité de déformation en traction directe ...	24
Figure II-8 : Influence du dosage en granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique	25
Figure II-9 : Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des GC	26
Figure II-10 : Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en GC	27
Figure II-11 : Effet des GC sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire : état des éprouvettes après 300 cycles de gel-dégel	28
Figure II-12 Agrégat de PVC.....	37
Figure II-13 Déchets des pièces plastiques électroniques	37
Figure II-14 : Type des agrégats plastiques utilisés dans le béton / mortier.....	38
Figure II-15 : Type des fibres plastiques utilisées dans le béton / mortier.	39

Figure II-16. Types de déchets plastiques utilisés	41
Figure II-17. Temps d'écoulement des bétons type BDGP.....	42
Figure II-18. Temps d'écoulement des bétons type BFP.....	42
Figure II-19. Résistance à la traction des bétons type BDGP	42
Figure II-20. Résistance à la traction des bétons type BFP	43
Figure II-21. Absorption d'eau des bétons type BDGP	43
Figure II-22. Absorption d'eau des bétons type BFPO	44
Figure II-23. Absorption d'eau des bétons type BFPR	44
Figure II-24. Retrait des bétons type BDGP.....	44
Figure II-25. Retrait des bétons type BFPO	45
Figure II-26. Retrait des bétons type BFPR.....	45
Figure II-27. Polystyrène sous sa forme commerciale.	48
Figure II-28 : Structure chimique du polystyrène	48
Figure II-29. Polystyrène expansé (PSE).	50
Figure II-30. Polystyrène expansé moulé (PSE-M).	50
Figure II-31. Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).	50
Figure II-32 : Billes de polystyrène.....	52
Figure II-33 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène.....	53
Figure II-34: Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène.....	53
Figure II-35 : Evolution de la résistance de compression en fonction du pourcentage et de la taille des billes de polystyrène	54
Figure II-36. Pavé en béton de PSE.....	55
Figure II-37. Mur en blocs de béton de PSE.	55
Figure II-38. Cloison en Béton de PSE	56
Figure II-39. Installation d'un plancher Projeté béton de PSE.....	56
Figure III-1 .a : Sable (0/3)	57
Figure III-1 .b : Granulat pneumatique gamme (0/2.5).....	57
Figure III-1 .c : Granulat pneumatique gamme (2.5/5) mm	58
Figure III-1 .d : Plâtre.....	58
Figure III-1 .e : Ciment.....	58
Figure III-1 .f : L'eau potable.....	58
Figure III-2 : Les moules utilisés	58
Figure III-3 .a : Main écope.....	59

Figure III-3 .b : Règle métallique	59
Figure III-3 .c : Récipient.....	59
Figure III-3 d : balance.....	59
Figure III-4 : étapes de détermination de la masse volumique apparent.....	61
Figure III-5 .détermination de la masse volumique absolue	62
Figure III-6 : étapes de confection des composites à base de P/G.P	66
Figure III-7 : Essai de flexion 3 points sur éprouvette prismatique (4x4x16) cm ³	67
Figure III-8 : éprouvettes à base de (P/G.P) après la rupture à la flexion	67
Figure III-9 la distribution de granulat pneumatique sur le plan de rupture	68
Figure III-10 : la presse utilisée avec la table commende	68
Figure III-11 : Dispositif de rupture en compression.	69
Figure III-12 : malaxage des constituants.....	71
Figure III-13: coulage des éprouvettes (4x4x16 cm ³) à base de (MGDP).	72
Figure III-14 démoulage et Conservation des éprouvettes.....	72
Figure III-15: Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais.....	73
Figure III-16 essai de l'étalement à la table de secousse	73
Figure III-17 essai de flexion	74
Figure III-18 mode de rupture	74
Figure III-19 mode de rupture à la compression des éprouvettes (4x4x4 cm ³).....	74
Figure IV-1 .: Variation des masses volumiques des différents types de plâtre en fonction du Temps	77
Figure IV-2 .:Résistances en flexion des différents mélanges étudiés en fonction du temps	78
Figure IV-3 Résistances en compression des mélanges étudiés en fonction du temps.....	80
Figure IV-4 : Variation des masses volumiques des différents types de Mortier en fonction du temps	84
Figure IV-5 : Résistances en flexion des différents Mortiers étudiés en fonction du temps,.....	86
Figure IV-6 ; Résistances en compression des Mortiers étudiés en fonction du temps	87

liste des tableaux

Tableau I-1 : Constitution moyenne en masse des pneus	11
Tableau I-2 : Composants chimiques d'un pneu	11
Tableau I-3 caractéristiques physiques d'un pneu	11
Tableau I-4 : les valeurs de PCI par unité de masse de certains combustibles	14
Tableau II-1 : Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D)	22
Tableau II-2 : Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment – caoutchouc	26
Tableau II-3 <i>propriétés physique des déchets du PEBD</i>	40
Tableau II-4 <i>Systèmes de renforcements discrets des plastiques vierges et recyclés</i>	40
Tableau II-5 : Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité.	51
Tableau II-6 : Conductivité thermique des bétons de polystyrène.....	55
Tableau III-1: Les constituants principaux de ciment	59
Tableau III-2 : Représente les Caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé.....	59
Tableau III-3: les Caractéristiques physiques de sable.....	60
Tableau III-4: Masse volumique apparente des granulats de déchets pneumatique	61
Tableau III-5: les caractéristiques physiques des granulats pneumatiques	62
Tableau III-6. Différentes formulations à base du plâtre et déchets pneumatiques :	64
Tableau III-7 Différentes formulations à base du mortier et déchets pneumatiques	64
Tableau III-8: les différentes proportions des mélanges plâtre/granulats pneumatiques	65
Tableau III-9. les différentes proportions des mortiers réalisés.....	70
Tableau III-10: Taux d'étalement à la table à secousse.	73
Tableau IV-1.: Masse volumique de deux gammes de déchets pneumatiques à l'état durci	76
Tableau IV-2.: Résultats des essais mécaniques (flexion)	78
Tableau IV-3: Résultats des essais de compression.....	79
Tableau IV-4:Les différents résultats des essais physico-mécaniques de l'ensemble des mélanges étudiés.....	81
Tableau IV-5: Valeurs d'étalement des mortiers à base de granulats pneumatiques.....	83
Tableau IV-6: Masses volumiques de deux gammes de déchets pneumatiques à l'état durci	84
Tableau IV-7 : Résultats des essais de flexion	85
Tableau IV-8: Résultats des essais de compression.....	86
Tableau IV-9: Résultats des essais physico-mécaniques de l'ensemble des Mortiers étudiés	88

Notations :

CHAPITRE I

PCI : Pouvoir calorifique inferieur

GC : Granulats de caoutchouc

CHAPITRE II

PAP : Béton auto plaçant

MF : Les aminoplastes

PUR : Les polyuréthannes

PVC : Le polychlorure de vinyle

PET : Le polyéthylène téréphtalate

PS : Le polystyrène

PP : Le polypropylène

PEHD : Le polyéthylène à haute densité

PEBD : Le polyéthylène à basse densité

PE : Le polyéthylène

BT : Béton témoin.

BDGP : Béton de grains plastiques.

BFPR : Béton de fibres plastiques rectilignes.

BFPO : Béton de fibres plastiques ondulées.

PSE-E : Le polystyrène expansé extrudé

PSE-M : Le polystyrène expansé moulé

PSE : Le polystyrène expansé

CHAPITRE III

PT : plâtre témoin.

MT : mortier témoin.

GDP : granulats des déchets pneumatique

SYMBOLES

Symboles	Désignations	Unités
E/P	Consistance normale du plâtre	-
ρ	Masse volumique	(Kg/m ³)
Rf	Résistance à la flexion	(MPa)
Rc	Résistance à la compression	(MPa)
Ff	Charge à la rupture en flexion	(N)
Fc	Charge à la rupture en Compression	(N)
L	Longueur qui sépare les deux appuis de l'éprouvette	(mm)
b	Largeur de la section carrée du prisme	(mm)
F	Force	(N)
σ	Contrainte	(Mpa)
E/C	Consistance normale de mortier	-

Introduction générale

Aujourd'hui, le développement des matériaux composites est devenu très opportun quant aux conséquences particulières qu'elles entraînent à savoir la réduction de la densité et l'amélioration de leurs caractéristiques spécifiques. Les matériaux composites présentent des propriétés mécaniques spécifiques à leur emploi. En raison de leur faible densité, ainsi leur faible masse volumique.

L'objectif principal notamment en génie civil est l'optimisation des sollicitations au niveau des éléments structuraux, principalement la diminution de la densité des matériaux utilisés, qui s'avère à la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments, en utilisant des matériaux de construction avec des performances thermiques et acoustiques, tout en réduisant, les quantités des matériaux utilisés, ainsi le coût global du bâtiment, et les dimensions des sections des éléments structuraux. A cet effet, l'utilisation des polymères est une solution alliant des performances techniques, écologiques et confort.

Beaucoup de procédés de développement de nouveaux matériaux innovants sont proposés par des chercheurs pour répondre aux exigences sécuritaires, et l'amélioration de l'aisance des bâtiments. L'utilisation généralisée de granulats légers dans la construction a surtout commencé par la découverte des granulats des déchets pneumatiques, un granulats léger ayant une résistance mécanique et isolation thermique et phonique suffisante et une qualité adaptée pour une utilisation dans les applications de la construction.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés à réaliser et mener une analyse expérimentale de deux matériaux composites constitués de mélanges à base de mortier ordinaire et du plâtre, en utilisant des granulats légers à base polymère notamment les granulats des déchets pneumatiques. Plusieurs fractions (*0/2.5mm*) et (*2.5/5mm*) ont été considérées dans le but d'optimiser les formulations. Ces mélanges seront par la suite considérés dans la réalisation des corps d'épreuves sous forme prismatique. Les spécimens de mortiers et (**P/GDP**) légers vont être caractérisés mécaniquement notamment à la flexion 3-points et la compression uni-axiale.

Le travail de recherche réalisé est structuré en quatre chapitres et est terminé par une conclusion générale et des perspectives :

Le premier chapitre est dédié à la présentation d'une synthèse bibliographique concise sur les diversités des déchets à base polymère et la présentation des différents matériaux synthétiques utilisés dans cette recherche, Les différentes définitions, les caractéristiques physiques, les avantages, et l'intérêt de leurs utilisations ainsi que les différents domaines d'application sont alors rappelées pour chaque matériau.

Le deuxième chapitre est consacré à la citation des différents matériaux composites légers à base des polymères principalement les mortiers et les bétons légers. Les différentes définitions et propriétés spécifiques des composites à base des déchets polymères tels que ; les déchets plastiques, les déchets pneumatiques, le polystyrène, sont également présentées. Selon la littérature les matériaux composites susmentionnés sont dotés par un caractère d'isolation thermique et acoustique, particulièrement présentent une faible masse volumique comparativement ou composites à base des granulats minéraux classiques notamment les bétons et les mortiers ordinaires, dont nous avons pris en considération pour la sélection des matériaux à utiliser au sein de notre investigation expérimentale.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation détaillée des étapes d'élaboration des différents spécimens réalisés, à savoir : les matériaux utilisés, la formulation, l'analyse granulométrique, l'optimisation des mélanges, le procédé de préparation des éprouvettes, les différentes variantes considérées, la réalisation des éprouvettes et enfin l'acquisition et le mode de chargement considérés dans ce travail.

Dans le quatrième chapitre nous avons illustré et représenté les résultats obtenus dans notre investigation. Tous les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans des tableaux récapitulatifs et des histogrammes représentatifs, mettant en exergue l'apport en termes de résistance mécanique comparativement aux structures de références.

**CHAPITRE I :Les déchets à base des polymères -
Recherche bibliographique**

I.1. introduction

La principale définition d'un déchet est un objet qui n'a pas ou plus d'utilité et dont le propriétaire veut se débarrasser. Ainsi, BOYER explique que le mot déchet vient de déchoir, qui signifie qui perd de la valeur. Par conséquent un déchet peut prendre différentes formes. [1]

D'une manière légale on trouve la définition suivante selon la loi Algérienne 01 19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, le déchet est défini comme étant tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer.[2]

Les granulats sont le constituant de base de la majorité des travaux de Génie Civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences) ; tant du point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations (mise en œuvre) ; et ce, afin de maîtriser le coût tout en respectant les critères de qualité. [3]

Les granulats traditionnels (sables et graviers) constituent entre 63 et 85% du poids du béton. La substitution d'une partie des granulats par d'autres matériaux à faible coût peut s'avérer donc très intéressant d'un point de vue purement économique. [4]

Les granulats recyclés de déchets peut être considéré comme un matériau de remplacement qui permet :

- La réduction des quantités des déchets dans les décharges.
- Une économie de la ressource naturelle.
- une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. [5]

I.2.Déchets

I.2.1. Différents types des déchets

Chaque jour, de grandes quantités de déchets sont produites dans le monde. Pour pouvoir les traiter, il est nécessaire de les classer afin de les orienter vers des filières de traitements adaptées. [2]

I.2.1.1. Déchet inertes

Ce sont des déchets minéraux non pollués, ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils proviennent d'industries de fabrication de matériaux de construction, des activités de construction, ou de réhabilitation (rénovation) et de démolition liées au secteur du bâtiment, ainsi que des activités liées à la réalisation et à l'entretien d'ouvrages publics (routes, ponts, réseaux...).

Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve : les bétons, les briques, les tuiles, les carrelages, les matériaux à base de gypse, les céramiques, les déchets de verre, les terres. On peut aussi ajouter les déchets liés aux activités routières (enrobés goudronnés, bitumineux, aimantés, avec ou sans métaux lourds...) et aux travaux de voirie (déblais de tranchées, de bordures de trottoirs, de pavés...), la réutilisation et le recyclage de ces déchets doivent être encouragés dès lors qu'ils sont possibles.



Figure I-1 DECHET INERTES

I.2.1.2. Déchets ultimes

Un déchet ultime est défini comme n'étant plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques appartenant au processus de valorisation du déchet ou de réduction de son caractère polluant ou dangereux. La notion de déchet ultime n'est pas fonction de ses caractéristiques physico-chimiques mais plutôt du système de collecte et de traitement auquel il appartient .



Figure I-2 Déchets ultimes

I.2.1.3. Déchets encombrants

Ce sont tous les déchets issus des ménages qui en raison de leur caractère volumineux ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés ; nous pouvons citer ici, les meubles, les pneus, l'électroménager.



Figure I-3 Déchets ultimes

I.2.2. Gestion des déchets

La gestion des déchets constitue une préoccupation majeure pour les autorités en charge de ce secteur. Elle représente aujourd'hui un véritable enjeu tant financier, en raison de l'augmentation croissante des coûts de gestion des déchets, qu'environnemental, lié d'une part au risque d'insuffisance d'exutoires de traitement à moyen terme, et d'autre part au gaspillage des matières premières. [4]

I.2.2.1 Définition de la gestion des déchets

La gestion des déchets regroupe la collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets généralement issus des activités humaines. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation. La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides,

liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou à un commerçant. La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales (Mairies, etc.), alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité.

I.2.3. valorisation des déchets

La valorisation de la matière issue du déchet regroupe les procédés suivants :

I.2.3.1. Le recyclage

réintroduction d'un déchet dans un cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.

I.2.3.2. Le Réemploi

nouvel emploi du déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation.

I.2.3.3. La régénération

procédé physique ou chimique qui redonne au déchet les caractéristiques permettant de l'utiliser en remplacement d'une matière première vierge.

I.2.3.4. La réutilisation

utilisation du déchet pour un dosage différent de son premier emploi, ou introduction de ce matériau dans un autre cycle de production que celui dont il est issu.

I.3. Les déchets pneumatiques

I.3.1. pneus usagés

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en

caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait. Néanmoins, la résistance en compression est très faible ce qui limite aussi les applications. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications ou la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité [6].



Figure I-4 pneu de voiture [7]

I.3.2. Histoire Des Déchets Pneumatiques

La production mondiale de pneus dépasse 3,1 millions d'unité par jour, soit environ 1,2 milliard de pneus par an et plus de 38 pneus par seconde [8].

Le nombre de pneumatiques consommés progresse régulièrement avec la croissance du parc automobile. Malgré l'amélioration de la longévité des pneumatiques, le gisement de ces déchets reste très important, des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés dans des décharges à l'air libre dans des nombreux pays à travers le monde, chaque année (France, Espagne, Allemagne, Algérie...).

Selon une étude statistique estimative du gisement des Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) publiée en 2011, la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1439514 unités, soit 25918 tonnes par an (3500000 véhicules en 2007). Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 8,4 millions de véhicules, d'après les déclarations du Ministre du Transport en septembre 2016 au journal El Moudjahid. [9]

Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation de pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde.

Il y a quatre origines de déchets pneumatiques être signalées [10]

- Les déchets de caoutchouc industriel.
- Les déchets de fabrication de pneumatique.
- Les pneumatiques usagés.
- Les déchets de rechapage.

I.3.2.1 Définition du caoutchouc

Les élastomères, comme les matières plastiques, font partie de la famille des polymères. Le terme « élastomère » est utilisé aujourd'hui pour désigner d'une façon générale tous les caoutchoucs, c'est-à-dire les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, possédant l'élasticité caoutchouteuse. Le terme « caoutchouc » vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui. Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa basiliens, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autre espèces du même genre. Les caoutchoucs synthétiques sont obtenus par polymérisation (création de macromolécules à partir de molécules de base) et par transformation physiques en présence de catalyseurs. Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés .Ils sont notamment élastiques, étanches et antivibratoires. La combinaison de ces trois propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large. [11]

Les pneumatiques usagés représentent la part de déchets de caoutchouc la plus importante (plus de 85%) [12].

Cependant une fois usé, le pneu conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première [13].

- Elasticité
- Solidité de la structure
- Pouvoir drainant
- Pouvoir calorifique
- Haute teneur en carbone
- Durabilité
- Amortissement

I.3.2.2. Définition d'un pneumatique

Les pneumatiques sont composés de mélanges de caoutchouc, d'acier galvanisé et de textiles, les pneus ne sont pas biodégradables dans la mesure où le temps qu'il leur faut pour se décomposer est indéterminé, ce sont des déchets volumineux qui sont difficiles à compacter, à collecter et à éliminer. Incorrectement traités, ils défigurent le paysage et peuvent bloquer les canaux de circulation, les ruisseaux et les déversoirs. Ils entraînent ainsi des modifications de l'écoulement des eaux qui peuvent à leur tour être des facteurs d'érosion, d'envasement et d'inondation [14]. Les pneus usagés ne sont pas des déchets dangereux mais ils présentent un danger pour l'environnement en cas d'incendie (émission de fumées toxiques et éventuellement résidus huileux). On distingue 2 sortes de déchets pneumatiques :

- Les Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) qui doivent être éliminés ou orientés vers un autre emploi.
- Les Pneus Usagés Réutilisable qui doivent faire l'objet d'un rechapage ou d'une vente comme pneus d'occasion [15].

I.3.2.3. Principaux constituants d'un pneu

Mieux comprendre comment est composé un pneu permet de mieux analyser les produits qui peuvent en être retirés après un recyclage. [16]

L'enveloppe du pneu est décomposable en quatre éléments principaux :

a)- La carcasse

Elle constitue le squelette du pneu, l'ossature du pneu est composé de couches de câble de différent types (nylon, acier, rayonne, polyester, aramide,...)

b)- Le talon

Est l'élément rigide de la liaison entre la jante et le pneu. Il est composé d'une tringle de câble d'acier à haute adhérence.

c)- La bande de roulement

Elle est composée d'un mélange de caoutchouc devant résister aux chocs, aux coupures, aux échauffements, à l'abrasion...

d)- Le flanc

Il est constitué de plusieurs types de caoutchoucs ; son rôle est double : il doit, dans sa partie supérieure protéger la carcasse contre les échauffements et l'abrasion, et dans sa partie inférieure (plus épaisse) protéger la carcasse des contacts avec le rebord de la jante.

Les constituants d'un pneu sont présentés sur la figure I.5. Peu importe où ils sont produits, tous les pneus contiennent quatre groupes fondamentaux de matériaux : les caoutchoucs naturels et synthétiques, les noirs de carbone/silices, les matériaux de renforcements (métaux/textiles) et les facilitateurs utilisés durant les divers stades de la production des pneus (cires, antioxydants...) [17].

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial, dans le sens transversal (Figure I.5), sa complexité, par le nombre de constituants, apparaît avec beaucoup de netteté, on distingue alors :

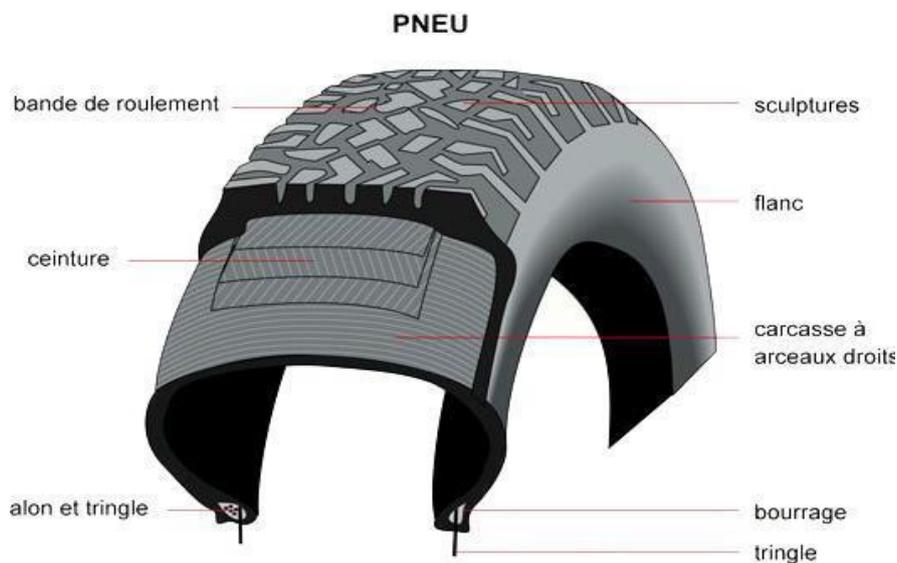


Figure I-5 Coupe transversale d'un pneu [18].

- Pneu : bandage creux et élastique renfermant une chambre à air.
- Sculptures : dessins en relief sur la surface du pneu.
- Flanc : partie latérale du pneu.
- Carcasse à arceaux droits : charpente du pneu ayant la forme d'une arche.
- Bourrage : matériel qui sert à bourrer.
- Tringle : moulure du pneu.
- Talon et tringle : extrémité et partie inférieure du pneu.
- Ceinture : différentes épaisseurs qui recouvrent la carcasse à arceaux.
- Bande de roulement : partie du pneu entrant en contact avec la chaussée [18].

I.3.2.4. Composition d'un pneu

C'est un mélange à base de caoutchouc naturel ou synthétique dont les proportions varient selon le type de pneu et un certain nombre de matières auxiliaires tel que le noir de carbone. Des composants sont ajoutés à la formulation : accélérateurs, antioxydants, anti ozone, charge, agents de vulcanisation, pigments, plastifiants agents de renforcements et résines. La constitution d'un pneu varie peu entre les pneus de véhicules légers et poids lourds [19]. Le tableau I.1 présente les différentes matières contenues dans le pneu et le tableau I.2 présente les composants chimiques.

Tableau I-1 : Constitution moyenne en masse des pneus [20].

Material	Pneu de véhicules de tourisme	Pneu de véhicules poids lourds
Elastomère %	47.0	45.0
Noir de Carbone %	21.5	22.0
Acier %	16.5	25.0
Textile %	5.5	-
Oxide de Zink %	1.0	2.0
Soufre %	1.0	1.0
Autre %	7.5	5.0

Tableau I-2 : Composants chimiques d'un pneu [20].

Elément	Pneu de véhicules de tourisme	Pneu de véhicules poids lourds
	% W_t	% W_t
Carbone	89.48	89.65
Hydrogène	7.61	7.50
Nitrogène	0.27	0.25
Soufre	1.88	2.09
Oxygène	<0.01	<0.01
Chlore	0.07	0.06
Cendre	3.9	5.5

Tableau I-3 caractéristiques physiques d'un pneu [21]

caractéristiques	Tourisme (VL)	Poids lourds (PL)
Poids moyen	7Kgs	50Kgs
Densité moyenne	0.2 entier	0.4 décheté
Nombre de pneu /m ³	20	3
Présence de métal	15%	25%

Remarque :

Le pourcentage de la présence de métal est par rapport au poids total.

I.3.2.5. Caractéristiques mécaniques des PUNR

Un pneu usé non rechapé conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première. Mécaniquement, les armatures du pneu doivent être souples pour lui donner une bonne déformabilité. Elles doivent par ailleurs supporter des efforts de traction importants et posséder une bonne adhérence avec le matériau de remblai. Des essais mécaniques ont été effectués par des chercheurs dans le domaine du Pneu sol sur une presse munie d'un enregistreur d'efforts de traction en fonction de la déformation sur des pneus usagés. A noter que toutes les marques de pneus, ont été testées, les résultats obtenus sont les suivants [21]:

La valeur moyenne de la résistance à la traction des bandes de roulement est de 65KN, avec un écart type de 24KN. La probabilité pour que toutes les bandes de roulement, aient une résistance supérieure à 26 KN est de 90 %. Elle n'est que de 80 % pour une résistance supérieure à 36 KN

Il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux flancs d'un même pneu. Les résistances des flancs varient de 17 à 25 KN, selon le taux d'armatures, avec un écart type de 10 KN.

I.3.3. Filières de valorisation

Le cheminement des pneus usagés est organisé comme suit : Après le démontage des pneus usagés, ils sont stockés par les garagistes puis collectés par les collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner les pneus pouvant être réutilisés ou faire l'objet d'un rechapage.

Les pneus usagés non réutilisables sont, soit stockés entiers ou déchiquetés ou broyés, afin de les livrer aux valorisants.

La valorisation des pneus usagés, peut se présenter sous l'une des formes suivantes :

I.3.3.1. Le rechapage

Permettant d'allonger considérablement la vie du pneu, le rechapage est la première solution de recyclage. Cette technique consiste à changer les bandes de roulement des pneus usagés, en les remplaçant par des bandes de roulement neuves. Cette technique a pour cibler les pneumatiques usagés dont les carcasses ont gardé intacte l'ensemble de leurs qualités intrinsèques et notamment leurs durances. Cette activité génère à son tour des déchets, dont la poudrette de caoutchouc.



Figure I-6 Le rechapage

En Algérie, Michelin Algérie est la seule unité de rechapage inscrite au registre de commerce. L'unité en question ne rechapage que les pneus homologués par Michelin et avait pour objectif d'atteindre 100 pneus rechapés/ jour en fin 2006 (*Quotidien El Watan du 1^{er} décembre 2004*).

I.3.3.2. La valorisation énergétique

Le pneumatique, de par son origine polymérique, a un excellent pouvoir calorifique (**3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel**) (<http://www.aliapur.fr/>).

Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable. La valorisation énergétique, est cependant limitée en France où 18 % des pneus usagés sont valorisés, contre 63 % au Japon, 44 % en Allemagne et 29 % en Grande-Bretagne.

Elle repose de surcroît, quasi essentiellement, sur les cimenteries. Le recours à des installations dédiées, étant très faible.

I.3.3.3. L'incinération en cimenterie

L'industrie cimentière a commencé à utiliser des pneus usagés en substitution partielle des combustibles traditionnels en 1992 – 1993.

Ces pneus sont le plus souvent utilisés broyés, plus rarement entiers. En 1998, 26 000 tonnes de pneus usagés, ont été valorisés en cimenterie en France. Ces quantités pourraient progresser, mais les pneus sont concurrencés par d'autres déchets beaucoup plus rémunérateurs (comme les farines animales) et dont la destruction, peut présenter un caractère prioritaire (www.aliapur.fr).



Figure I-7 L'incinération en cimenterie

I.3.3.4. Autres valorisations thermiques

Elles sont actuellement très limitées. De nombreux projets existent, cependant, celles-ci sont développées notamment par des réchappeurs soucieux de valoriser des pneus, ne pouvant être rechapés et des rebuts de rechapage, afin de produire in situ de l'énergie nécessaire aux unités de production.

Ces projets buttent sur des contraintes réglementaires. Les pneus usagés sont considérés comme des « déchets », et non des « combustibles », et à ce titre, soumis à une réglementation contraignante notamment en terme d'émissions dans l'air.

En Algérie, le problème reste posé puisque la réglementation n'est pas encore claire sur la valorisation énergétique. Les cimenteries algériennes préfèrent utiliser du gaz naturel qui est nettement moins coûteux que les pneus usés déchiquetés.

Tableau (I.4) représentant les valeurs de *Pouvoir calorifique inférieur* (PCI) par unité de masse de certains combustibles [9]

Tableau I-4 : les valeurs de PCI par unité de masse de certains combustibles [9]

Vecteur	PCI du combustible	
	Unité	en MJ
Pneumatiques usagés	Kg	34,5
Gaz naturel pauvre	m ³	32,97
Électricité	kWh	3,6
Gaz butane	kg	45,56
Gaz naturel riche Algérien	m³	36,43
Charbon	kg	26
Coke	kg	32
Propane	L	23,72
Fuel léger	L	36,37
Fuel moyen	L	37,68
Fuel lourd	L	38,16
Fuel extra lourd	L	38,58

I.3.3.5 La valorisation sous forme de matières premières

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc (GC). Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux. [9],[21]



Figure I-8 matières premières

A) Poudrettes

Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers.

Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouettes...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface)...etc. [21]

B) Granulés

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques.

Comme exemple d'utilisation, on a les aires de jeux, les pavés antidérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...)

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la régénération (par combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermiques), ou la Pyrolyse – Thermolyse.

Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone...etc.

Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.

I.3.4. Valorisation des pneus usagés dans le domaine de la construction :

a- Le tapis de pneus anti vibration

Le tapis de pneus, composé de deux lits croisés de bandes de roulement de pneumatiques, est intercalé entre le ballast et la couche de forme (ou pose sur les tabliers des ponts ferroviaires) pour atténuer les vibrations provoquées par diverses machines, les trains, les tramways, les rames du métro, Etc.



Figure I-9 tapis de pneus anti vibration

b- La construction de récifs artificiels

Immergés à des profondeurs de dix ou vingt mètres, assemblés et lestés à l'aide de blocs de ciment, les pneus peuvent former des récifs artificiels constituant des zones de calme pour la faune marine. Le Japon et les Etats-Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel ; par exemple, en Caroline du Nord, plus de 500,000 pneumatiques ont été immergés entre 1974 et 1977. En France, cinq récifs artificiels ont été construits à Palavas – les -Flots, à Langrune-Sur Mer, à Arcachon-Sur-Mer, à Golfe-Juan et à Port-la-Nouvelle.

c- Mur antibruit ACIAL (1992)

L'ingénieur R. Beyler a proposé un mur antibruit dont la structure absorbante est réalisée avec des pneus usagés enfermés dans un caisson métallique dont une face est perforée de trous. Les essais effectués en 1992 selon les normes AFNOR S 31089 ont donné des résultats supérieurs aux valeurs maximales fixées dans la norme, ce qui classe ce mur antibruit parmi l'un des plus intéressants.

d- Le pneu sol

Classé comme une valorisation originale, le pneu sol est un matériau inventé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Le pneu sol est un mélange de pneus et de sol, dans lequel les pneus sont utilisés comme renforts du sol. Ils sont capables de supporter des efforts de traction importants et sont soit entièrement soit partiellement découpés afin d'être associés en nappes, en couches superposées, grâce à des attaches métalliques [22].



Figure I-11 Pose des nappes de pneus
Projet pilote-Route de Bousmail



Figure I-10 Ouvrage végétalisé Projet
de Bousmail



Figure I-12 Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie)-Stabilité d'un talus

I.4. Conclusion du chapitre

Cette recherche bibliographique nous a permis de mettre en évidence les différents types de déchets polymères et la présentation de leurs propriétés spécifiques, dont nous allons exploiter dans le domaine de la construction.

Les différentes fractions des déchets polymères susmentionnés notamment les déchets pneumatiques, seront incorporés pour la confection et la préparation des différentes éprouvettes de mortiers hybrides, et en substitution dans la matrice du plâtre.

CHAPITRE II :les composites à base des granulats synthétique

II.2 Valorisation des déchets pneumatiques usagés comme granulats dans le béton

II.2.1. Elaboration de la poudrette de caoutchouc

L'utilisation de la matière pneumatique sous forme de grains dans la formulation des matériaux de construction bien évidemment nécessite tout un processus de préparation selon les étapes suivantes [4]:

A) Séparation

Séparer la bande de roulement de la carcasse composée de feuille en caoutchouc synthétique (chambre à air), de toile de carcasse.

B) Laminage des parties 100% en caoutchouc

Découpe les flancs de la carcasse et de la bande de roulement en bandelettes. La largeur de découpe est ajustable.

C) Pré-broyage

Broyer grossièrement les bandelettes de caoutchouc obtenues précédemment avec des dimensions prédéfinies.

D) Séparation caoutchouc - câbles d'acier

Les parties non broyer précédemment sont pressées par une machine afin de séparer le caoutchouc des câbles d'acier qui les composent. Une fois cette opération effectuée, le caoutchouc est récupéré puis broyé.

E) Le granulateur

C'est une machine pour la production de poudrette de caoutchouc. Elle broie selon la granulométrie prédéfinie tous les gros morceaux obtenus précédemment. Elle peut également traiter directement les bandelettes de caoutchouc, les morceaux, des semelles de chaussures.

II.2.2. Impact des GC sur les propriétés des bétons à l'état frais

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement ou par l'étalement dans le cas du béton auto-plaçant. [23]

II.2.2.1. Affaissement

[24] ont étudié des propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont 0 à 20% de la masse du ciment est remplacée par la masse de fumée de silice (SF). La figure II.1 illustre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en GC et du dosage X% de la fumée de

silice. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton a diminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de GC, l'affaissement est presque nul.

L'étude réalisée par [25], a indiqué une conclusion un peu différente par rapport à d'autres auteurs. En effet, d'après cette étude le béton incorporant des GC a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition. Néanmoins, leurs résultats montrent que la procédure ordinaire pour évaluer l'affaissement n'est pas appropriée à ce composite cimentaire. Ils ont donc suggéré qu'il fallait chercher d'autres méthodes pour mesurer correctement l'affaissement du béton incorporant des granulats en caoutchouc.

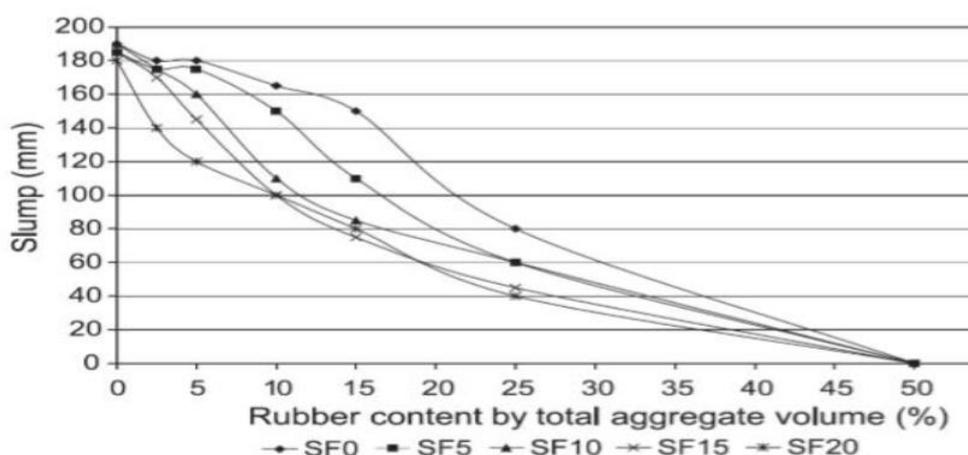


Figure II-1 : Influence des GC sur l'affaissement [24].

Pour ce qui concerne le béton auto-plaçant, [26] a montré dans sa thèse que l'adjonction de GC dans des bétons auto-plaçant (BAP) entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant la chute de l'étalement avec l'augmentation du taux d'incorporation. Il a conclu que l'augmentation du dosage en GC se fait au détriment de l'ensemble des paramètres rhéologiques considérés. L'incorporation de ces granulats conduit à des mélanges plus visqueux et présentant des seuils de cisaillement plus importants.

II.2.2.2. La masse volumique

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des GC en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Avec l'incorporation de GC on peut envisager la production de bétons légers de structure [23]. [27] ont aussi indiqué que la masse volumique diminue approximativement de 102 kg/m³ pour chaque 22,7 kg de GC ajouté, une tendance illustrée par la figure II.2.

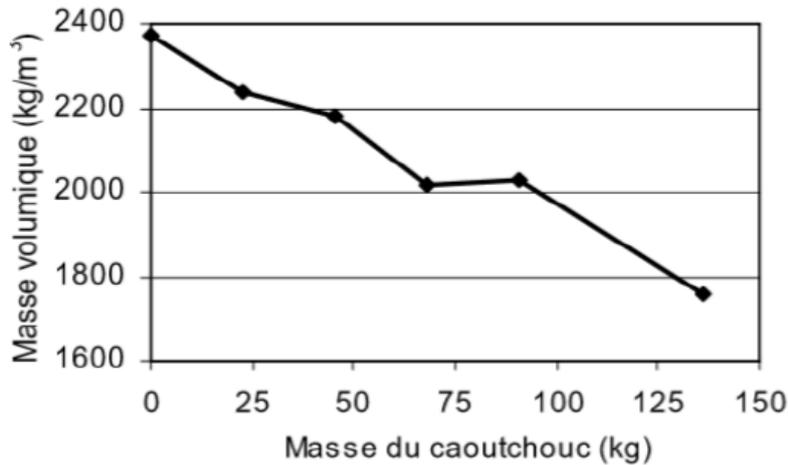


Figure II-2 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GC [27].

II.2.2.3 Teneur en air

S'agissant de la teneur en air occlus, [28] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la **figure II.3** où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des GC fins, le gravier a été remplacé par de gros GC dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des GC fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de GC.

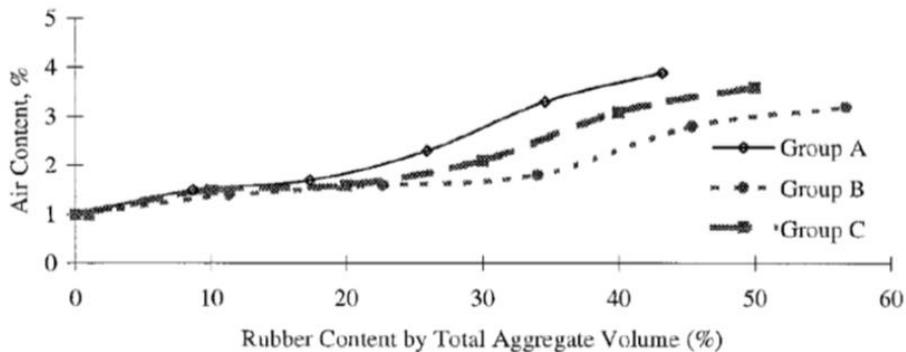


Figure II-3 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus [28].

II.2.3. Impact des GC sur les propriétés à l'état durci du béton

II.2.3.1. Résistance à la compression

La résistance en compression du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc. [23]

Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des GC ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des GC entraînant inévitablement une chute de la résistance en compression.

L'examen des résultats obtenus par [26], lui a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des GC sur ce paramètre dans le cas de BAP. Ses résultats illustrés par la **figure II.4** ont confirmé que la présence de GC est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en GC. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.

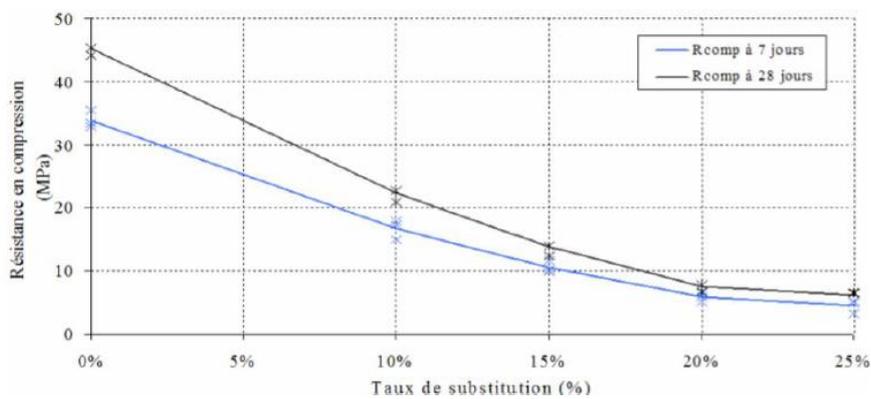


Figure II-4 : Influence du dosage en GC sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des GC 0-4mm) [26].

[29] ont confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90% entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60% de GC. A partir de cette étude, dont les résultats sont illustrés à la **figure II.5**, les auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20% du volume total de la phase granulaire.

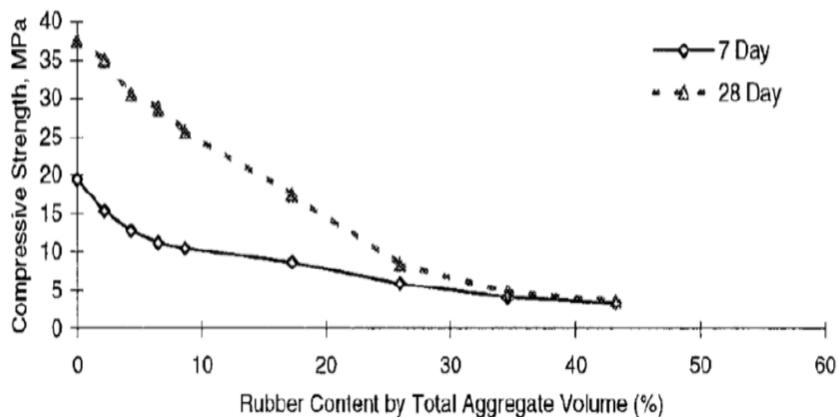


Figure II-5 : Influence de l'adjonction de GC sur la résistance en compression [28].

II.2.3.2. Résistance à la traction

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est relativement faible mais on a parfois besoin de la connaître [27], ont montré que l'augmentation du contenu en GC dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage. Les échantillons testés sont obtenus par sciage d'éprouvettes cylindriques de diamètre (D=102mm) perpendiculairement à la génératrice par tranche d'épaisseur (E) comprise entre 22 et 26mm. Leurs résultats ont été récapitulés dans le **tableau II.1**. Cependant, ils ont observé aussi un bénéfice de l'incorporation de GC : malgré la chute de la résistance en traction, la déformation à la rupture est augmentée. Cette capacité de déformation à la rupture montre que le béton incorporant des GC est plus ductile.

Tableau II-1 : Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D) [27].

Masse GC (kg/m ³)	Epaisseur E (mm)	Diamètre D (mm)	Résistance en traction (MPa)	Déformation à la rupture (%)
0	22	102	2,1	0,31
119	20	102	1,1	0,67
178	24	102	0,9	0,43
237	26	102	0,6	0,54

II.2.3.3. Module d'élasticité :

Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux confirment que l'incorporation de GC induit une chute importante du module d'élasticité. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression.

Dans une étude récente réalisée par [30], les granulats en caoutchouc dont la dimension maximale est de 25mm remplacent 5 ; 7,5 et 10% en masse des gros granulats naturels. Les auteurs montrent à la **figure II.6** une réduction de 30% du module d'élasticité lorsqu'on passe du béton de référence au béton incorporant 10% de GC.

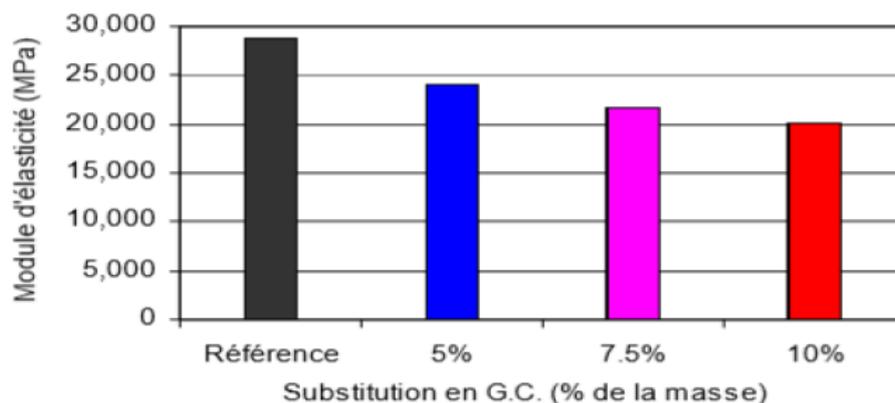


Figure II-6 : Influence des GC sur le module d'élasticité [30].

II.2.3.4. Capacité de déformation :

Si on se contente d'analyser les effets de l'incorporation des GC sur les seules résistances en compression et en traction, la conclusion est sans équivoque : cette incorporation est défavorable à la capacité portante et ne présente que des inconvénients.

Des études [31] ont présenté une autre facette des effets de l'adjonction des GC. Sachant que le module d'élasticité de ces inclusions est nettement plus faible que celui de la matrice cimentaire, ces auteurs ont fait l'hypothèse que les granulats en caoutchouc se comportent comme des trous lorsqu'une fissure débouche à leur interface avec la matrice cimentaire. Dans ce cas il en résulterait une relaxation des contraintes, retardant la coalescence des microfissures et leur localisation en macro fissure. Cette hypothèse a été rapidement validée avec un support de mortier à base de ciment dans lequel le sable a été remplacé par des granulats en caoutchouc dans des proportions volumiques de 20 (M20) et 30% (M30). Les réponses de ces composites en traction directe sont illustrées par la figure suivante où les mortiers incorporant des GC sont comparés au mortier de référence M0 sur un diagramme force-allongement. Si on retrouve l'effet des GC sur le module d'élasticité (pente initiale plus faible) et sur la résistance en traction, on constate bien que l'on atteint des niveaux d'allongement nettement plus importants avant le domaine post-pic.

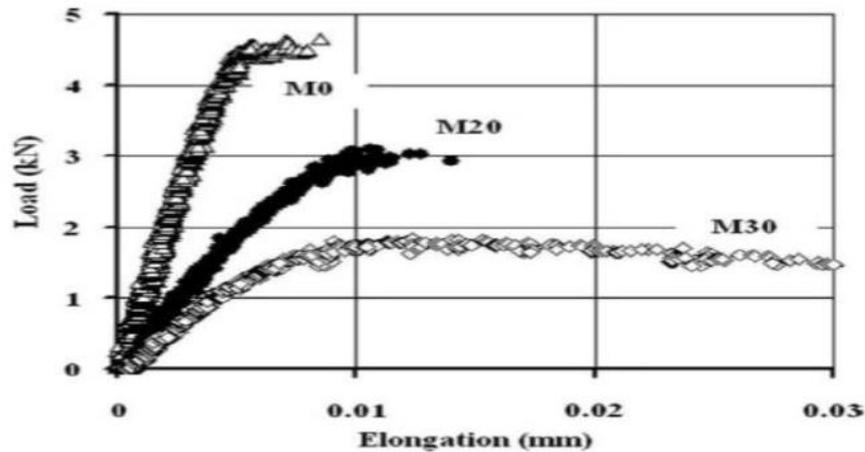


Figure II-7 : Influence de l'incorporation de GC sur la capacité de déformation en traction directe [31].

II.2.3.5. Amortissement des vibrations

Certains chercheurs considèrent que le béton incorporant des granulats en caoutchouc a un potentiel pour amortir des ondes D'après [25], la vitesse de transfert des ondes à travers un matériau est le facteur le plus important de la mécanique vibratoire. Il observe que la présence des GC réduit significativement la vitesse des ondes ultrasoniques. En conséquence en a déduit que ce composite a un potentiel pour amortir une vibration et qu'il peut en particulier servir d'isolant phonique Avec une telle capacité d'amortissement d'ondes en général et plus particulièrement des vibrations mécaniques, il n'est pas superflu d'envisager l'utilisation de ce composite dans les applications comme les murs antibruit des artères routières, comme fondation de rails d'engins roulant ou d'assises de machines vibrantes, etc.

II.2.3.6. Propriétés thermiques

La conductivité thermique du caoutchouc est relativement faible, elle est du même ordre que celle de la terre crue, soit 0,3 à 0,4 W/m.C°. Dans le travail de recherche, fait par [32] dont les résultats sont présentés ci-dessous (figure II.8), il a été montré que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du dosage de granulats de caoutchouc. En effet, le caoutchouc représente une structure amorphe et sa conductivité thermique d'environ 0,4W/m.0C, est faible par rapport à celle des granulats naturels qui représentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à 1,5 W/m.C°.

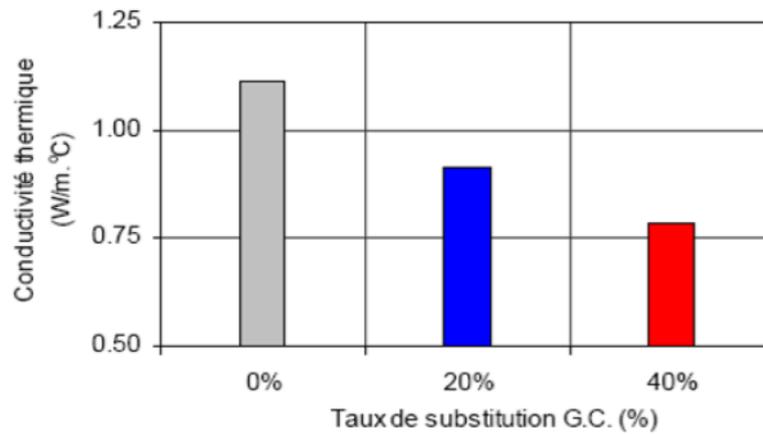


Figure II-8 : Influence du dosage en granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique [32].

Une autre étude [33] montre une diminution de l'ordre de 13,1%, 15,2%, 17% et 21,2% de la conductivité thermique des mortier incorporant 10%, 20%, 30% à 40% de poudrette de caoutchouc (taille $\leq 0,6\text{cm}$), respectivement, remplaçant le même poids du sable naturel, et une réduction de l'ordre de 18,2%, 24,6%, 26% et 27,8% de la conductivité thermique.

La réduction de la conductivité thermique de la matrice caoutchoutée peut être attribuée en partie à l'augmentation de piégeage de l'air provoquée par les particules de caoutchouc hydrophobe, pendant le mélange et en partie à la faible conductivité thermique de la poudrette de caoutchouc. [34] a montré, que l'air entraîné lors du malaxage, conduit à une porosité fermée dans la matrice cimentaire, ce qui améliore les performances d'isolation thermique du composite cimentaire, modifiées par des granulats de caoutchouc.

II.2.4. Impact sur les propriétés liées à la durabilité

II.2.4.1. Perméabilité

Pour certains auteurs, dont les résultats sont présentés dans le **tableau II.2**, le coefficient de perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation du taux de GC alors que la porosité augmente. Ils justifient ces constatations a priori contradictoires par le fait que le réseau poreux du composite incorporant des granulats en caoutchouc est plus discontinu. Cette conclusion de [35], peut être rapprochée des observations de [36], qui, en étudiant des bétons mousses incorporant de cendres volantes, ont aussi constaté que malgré une porosité élevée, le réseau des pores plus discontinu entraîne une perméabilité à l'air nettement plus faible.

Tableau II-2 : Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment – caoutchouc [35].

Volume du GC (%)	Coefficient de perméabilité à l'air (10^{-17} m^2)		
	CRAC		ERAC
0		12,56	
10	10,25	-	9,85
20	4,38	-	2,95
30	3,24	-	2,23
40	2,36	-	1,74

Toujours au sujet de la perméabilité au gaz et comme le montre la **figure II.9 [26]**, qui a travaillé sur les propriétés des **BAP** incorporant des GC en arrive à la conclusion que la perméabilité à l'oxygène du **BAP** augmente avec le taux d'incorporation en GC.

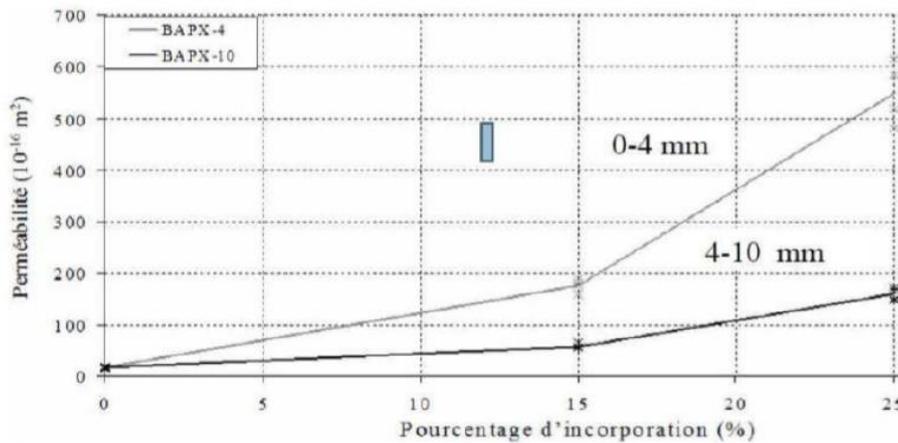


Figure II-9 : Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des GC [26].

II.2.4.2. Retrait

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique. Il correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles entraînent souvent l'apparition de fissures précoces, d'ouverture conséquente ce qui peut nuire à la durabilité du béton.

Certains auteurs ont étudié l'influence des GC sur le retrait du béton et leurs résultats montrent que le retrait du béton caoutchouc est plus élevé que celui du béton de référence. [37] confirment à la **figure II.10** que les variations dimensionnelles des mortiers incorporant des GC sont plus élevées que celles du mortier de référence. C'est essentiellement par la relation entre la rigidité des granulats et l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait [38, 39] que les auteurs interprètent les résultats obtenus.

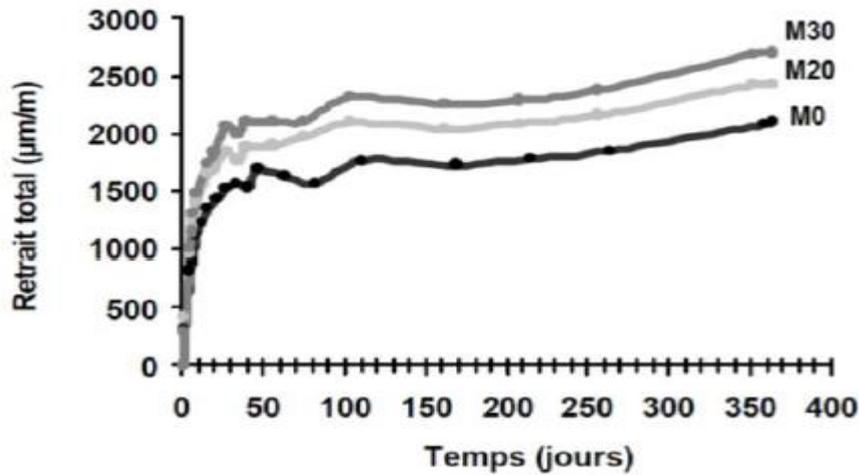


Figure II-10 : Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en GC [39].

A partir des observations de l'amplitude de retrait avec la présence de granulats en caoutchouc, ces auteurs se retrouvent en face de deux phénomènes en compétition et dont les effets sont en opposition vis-à-vis de la fissuration de retrait : d'une part la présence de GC permet d'augmenter la capacité de déformation avant localisation de la fissuration, et d'autre part cette présence de GC entraîne une augmentation des variations dimensionnelles de retrait. Cependant les résultats de [31] montrent que la capacité de déformation avant localisation de la macro-fissuration des mortiers incorporant des GC est prépondérante vis-à-vis de l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait. La présence de GC peut donc être considérée comme une solution pertinente pour empêcher (ou retarder) la fissuration de retrait vis-à-vis de l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait. La présence de GC peut donc être considérée comme une solution pertinente pour empêcher (ou retarder) la fissuration de retrait.

II.2.4.3. Résistance au gel et dégel :

[26], rapporte des résultats selon lesquels les bétons contenant 10 et 15% en masse de GC dont la dimension est de 2 à 6mm ont un facteur de durabilité 60% plus élevé que celui du béton normal après 300 cycles de gel-dégel. Dans une autre étude, [40] confirme que les granulats en caoutchouc améliorent la résistance au gel-dégel des composites cimentaires. Pour illustrer cette conclusion on peut s'appuyer sur l'état des éprouvettes de référence et celui des composites ciment-caoutchouc après 300 cycles de gel-dégel présentés à la figure II.11.

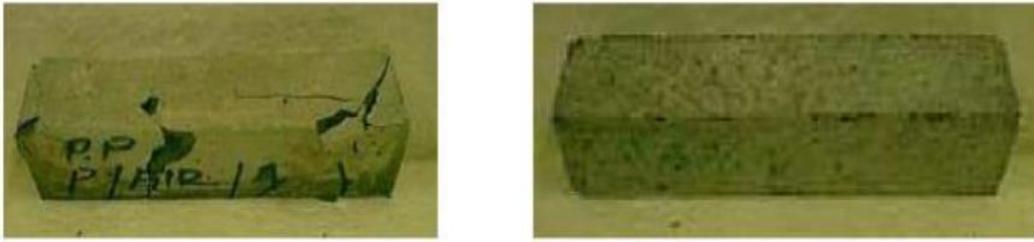


Figure II-11 : Effet des GC sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire : état des éprouvettes après 300 cycles de gel-dégel [40].

II.3. Les déchets plastiques

Les déchets, d'origine plastique, constituent un des problèmes graves du XXI^{ème} siècle. En effet, l'augmentation de la population mondiale et sa concentration dans les villes, ainsi que le développement d'équipements industriels et de biens de consommation génèrent des quantités astronomiques de résidus plastiques. La gestion des déchets plastiques s'avère donc plus qu'inévitable en vue de résoudre ce problème de pollution qui va croître d'année en année. Il est donc important de penser à l'élaboration de matériaux composites à base d'agrégats légers artificiels provenant de déchets plastiques. [41]

II.3.1. Généralité sur les matières plastiques

Le plastique est l'une des innovations les plus importantes du 20^{ème} siècle, c'est un matériau omniprésent. Ces dernières années et en raison de ses avantages liés à son coût, sa légèreté, la facilité de son utilisation, sa force et sa longue durée de vie sont les facteurs qui font qu'une croissance, substantielle de la consommation de plastique est observée partout dans le monde ; ce qui augmente également la production de ses déchets.

Actuellement, il existe plus de 700 types de plastiques aux noms que les chimistes sont les seuls à pouvoir encore prononcer correctement. Dans l'usage quotidien, la plupart de ces matières reçoivent le nom de 'plastique' (Polystyrène, polymères acryliques, chlorure de polyvinyle, polyéthylène, polyuréthane, *poly-tétra-fluor-éthylène*, polyesters, silicones, résines époxy, polycarbonates, polypropylène, polyéthylène téréphtalate, ...etc.).

En outre, une longue série de fonctions nouvelles ne peuvent être remplies aujourd'hui que par les plastiques. Certaines sont très quotidiennes, d'autres, par contre, sont véritablement 'high-tech'. Les emballages représentent, et de loin, la majeure partie des utilisations. D'autres applications des plastiques se retrouvent notamment dans les vêtements, les automobiles, les bicyclettes, les appareils ménagers, le bâtiment, les revêtements de sol, les jouets, les téléphones mobiles, les ordinateurs et les plaques publicitaires.

II.3.2. Définition d'une matière plastique

Les plastiques sont des mélanges de polymères et d'adjuvants synthétiques de nature organique. [42] Une substance est dite plastique lorsqu'elle peut se déformer sous l'action d'une force extérieure, puis elle conserve la forme ainsi acquise, lorsque la force aura cessée d'agir. [43]

A- Définition d'un monomère

Les monomères sont de petites molécules peu réactives tout ou moins à la température ambiante, ayant pour base un squelette de carbone comprenant parfois des atomes d'oxygène, d'azote ou d'autres, sur lequel se greffent différents types d'atomes, le plus abondant est celui d'hydrogène tel que le méthane et l'éthylène, provenant essentiellement de la distillation du pétrole, charbon et gaz naturel ou d'autres substances végétales. [44]

B- définition d'un polymère

Un polymère est une substance composée de très longue chaîne « macromolécules », elles même formées de molécules élémentaires (monomères) assemblées entre elles.

II.3.3. Les différents types de matières plastiques :

Il y a une grande variété de plastiques :

II.3.3.1. Les thermoplastiques

L'usage prévaut de réserver le terme de matière plastique à trois grandes familles de matériaux, les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères, dont la structure, les propriétés physico-chimiques et de mise en œuvre (comportement sous l'action de la chaleur et de la pression) diffèrent totalement.

➤ Le polyéthylène (PE) :

Le polyéthylène est un excellent isolant électrique, ayant une très bonne résistance chimique, Grâce à sa structure chimique simple, le polyéthylène prime sur la plupart des autres matériaux car il peut être réutilisé.

Selon le procédé de polymérisation, on obtient :

➤ Le polyéthylène à basse densité (PEBD) :

Est un polymère dont la densité est inférieure à celle de l'eau, sert à la fabrication de films d'emballage étirables, film pour l'agriculture et le bâtiment, sac poubelles, sachets, barquettes.

➤ **Le polyéthylène à haute densité (PEHD) :**

Est un polymère employé dans des applications à parois épaisses rigides telles que bouteilles, flacons, seaux, bouchons, jouets, articles ménagers, réservoirs à carburant, tuyaux d'évacuation.

➤ **Le polypropylène (PP) :**

C'est un thermoplastique de grande rigidité même à chaud, qui résiste à la chaleur mieux que le polyéthylène. Le polypropylène est un polymère très polyvalent qui sert à la fois comme thermoplastique et comme fibre.

Il est très facile à colorer et n'absorbe pas l'eau. On en trouve beaucoup sous forme de pièces moulées dans les équipements automobiles (pare-chocs, tableaux de bord, habillage de l'habitacle. Le polypropylène est aussi utilisé dans la fabrication de fibres synthétiques (tapis, moquettes, cordes, ficelles).

➤ **Le polystyrène (PS) :**

Le polystyrène est un thermoplastique dur et cassant. Il est employé dans la fabrication des emballages à usage unique pour viande et charcuterie, glaces, et légumes, appareils électriques, gobelets à café, tasses et assiettes, cassettes vidéo et audio. Il existe sous forme de polystyrène choc dans lequel une petite quantité de caoutchouc a été ajoutée afin de le rendre résistant aux chocs. Et existe aussi sous forme de polystyrène expansé (PSE) ou (EPS).

➤ **Le polyéthylène téréphtalate (PET) :**

Le polyéthylène téréphtalate est un polymère obtenu généralement par polycondensation de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol. Il est employé dans l'emballage (bouteilles, pots ; barquettes, couvercles) et dans la fabrication de petites pièces pour l'équipement électrique (barrettes). L'automobile (poignées, ventilateurs) et l'électroménager (poignées, broches de connexion). Il est employé ainsi en fibre textiles telles que le tergal. C'est pourquoi on peut recycler des bouteilles pour en faire des tissus.

➤ **Le polychlorure de vinyle (PVC) :**

Le PVC est un plastique très instable il se brise facilement, c'est un bon isolant électrique assez peu combustible et résistant à la chaleur et non polaire. Il sert à la fabrication des bouteilles, barquettes, des boîtes alimentaires, films pour le médical et des tubes susceptibles de remplacer les tuyaux de fonte, panneaux et autre pièces moulées. [45]

II.3.3.2. Les thermodurcissables

Ce sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. A l'inverse des thermoplastiques, la mobilité thermique est réduite. Des matières plastiques qui sous l'action de la chaleur, se durcissent progressivement pour atteindre un état solide irréversible. Ces matières ne peuvent être recyclées. Exemples : Polyuréthane (PUR), silicone, Polyesters insaturés (UP) pour les coques de bateaux,

Les thermodurcissables sont des polymères tridimensionnel dont les macromolécules vont dans les trois directions de l'espace, ils sont plus rigides et résiste même au fluage ou déformation. [46]

Les plus connus sont :

➤ **Les polyuréthannes (PUR) :**

Caractérisés par une grande diversité de dureté et textures en fonction des associations chimiques de différents monomères, leur usage est assez varié : mousses souples ou rigides grâce à des agents d'expansion, colles, fibres (Licra) Matelas, sièges de voiture, tableaux de bord, roues de patins à roulettes, chaussures de ski...

➤ **Les aminoplastes (MF) :**

Deux types principaux : urée-formaldéhyde (UF) et mélamine-formaldéhyde (MF) dont le plus connu est le formica. Caractérisés par une dureté et rigidité exceptionnelles, peu sensibles à l'hydrolyse et à la lumière, résistance à l'abrasion, bonne tenue aux solvants, difficilement inflammables. Peuvent être produits en teintes claires ;

Usages variés : mobilier de cuisine, plans de travail, liants (adhésifs) dans les contreplaqués, bois agglomérés, mélaminés, etc.), moulage en stratifiés décoratifs de revêtements, pièces moulées d'ustensiles de cuisine (plateaux...), matériel électrique (interrupteurs, prises de courant...), vernis de parquets (vitrification), apprêts pour rendre les tissus infroissables ou plastifiés, peintures, etc.

➤ **Les polyesters insaturés :**

Leur prix est peu élevé, durcissement assez rapide sans élimination de produits secondaires. Imprégnation facile des fibres de verre. Il est possible d'en fabriquer des pièces plastiques renforcées par coulée : pales d'éoliennes, coques et cabines de bateaux, piscines, carrosseries d'automobiles,...Textiles (Dacron, Tergal, Térylène...).

➤ **Les silicones :**

Les silicones ont une bonne résistance aux produits chimiques et à la chaleur et électriquement isolantes. Transformable par moulage et par compression. Souvent colorés en brun foncé. Ils sont utilisés dans les domaines scientifiques et la réalisation d'objets :

téléphones, postes de radio, pour fabriquer les poignées de casserole, de fer à repasser et des plaques de revêtement.

II.3.3.3. Les élastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère en repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Les élastomères sont élastiques : ils se déforment et tendent à reprendre leur forme initiale et supportent de très grandes déformations avant rupture. Ce ne sont pas réellement des «plastiques ». Issu du latex d'Hévéas (arbre d'Amazonie), le caoutchouc naturel est resté longtemps le seul élastomère connu mais les méthodes modernes de fabrication ont permis d'obtenir une grande diversité de matériaux en ajoutant des additifs, accélérateurs, agents protecteurs (anti UV, anti oxygène,...) et en les combinant à d'autres matériaux (métaux, textiles, autres plastiques...). Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des semelles de chaussures ou des pneus.

II.3.4. La fabrication du plastique

La fabrication du plastique se fait à travers un processus défini qui est : le raffinage et le craquage, la polymérisation et les adjuvants.

II.3.4.1. Le raffinage Le craquage

Le raffinage porte le pétrole à haute température dans une série de colonnes de distillation, les composants pétroliers ont des températures d'ébullition différentes ce qui permet de récupérer à chaque palier les différentes fractions ou coupes pétrolières. La quasi-totalité des matières plastiques est fabriquée à partir d'une fraction de pétrole distillé appelée « naphta ». Le craquage du NAPHTA produit l'éthylène. Le gaz du pétrole est porté à plus de 800°C pendant une infime fraction de seconde puis rapidement refroidit. L'objectif est de casser les molécules sous l'action de la chaleur. Les molécules longues sont brisées et transformées en molécules courtes ; on obtient ainsi l'éthylène.

II.3.4.2. La polymérisation

L'éthylène arrive sous forme de gaz et par la réaction chimique de polymérisation, les monomères d'éthylène vont s'accrocher les uns aux autres pour former les polymères de polyéthylènes. Dans le réacteur, le monomère est injecté simultanément avec une faible quantité de catalyseurs, la réaction de polymérisation de monomères est activée par chaque grain de catalyseurs qui grossit au fur et à mesure pour donner un grain de poudre de polymères. A la sortie du réacteur, les polyéthylènes en poudre ainsi les additifs sont introduits dans l'extrudeuse.

Elle fonctionne selon le principe d'Archimède qui tourne dans un Fourreau, l'énergie transmise par la vis fait fondre la poudre est le malaxe. La matière fondue est passée à travers une filière pour donner un ou plusieurs joncs qui seront refroidis dans le bac à eau avant être transformés en granulés dans un « granulateur ».

II.3.4.3. Les adjuvants

Les polymères sont rarement utiliser « purs ». De nombreux adjuvants entrent dans les compositions finales des matières plastiques pour améliorer ou adapter à l'usage. Ces adjuvants sont de plusieurs types avec des rôles spécifiques.

✓ **Les charges :**

Sont utilisées pour augmenter la rigidité et l'adhésivité des matières plastiques mais agissent également sur leur résistance chimique, leur isolation électrique et thermique.

✓ **Les plastifiants :**

Un plastifiant est un solvant lourd qui incorporé aux polymères, détruit partiellement les interactions entre les chaînes, qui sont responsables de la cohésion mécanique et transforme un matériau initialement rigide en matériau souple. [47]

✓ **Les colorants :**

Les polymères sont par nature, dans leur grande majorité, peu ou pas colorés. Leur coloration doit satisfaire à des exigences très diverses : esthétique, technique, sécurité... Ils ont obtenus par synthèses chimiques. Ils sont incorporés très facilement par simple dissolution dans un polymère fondue, avant transformation. [48]

✓ **Les stabilisants :**

Sont ajoutés aux polymères afin d'empêcher la dégradation par la lumière, l'oxygène et les ultraviolets. Les stabilisants sont classés selon leur mode d'action :

- Les antioxydants : le but est de retarder la dégradation thermique au cours de la transformation et de l'utilisation.
- Les stabilisants thermiques : ces stabilisants retardent le dégagement de HCL et la formation de structures conjuguées très colorées. [47]

II.3.5. Avantages des matières plastiques

La croissance de l'utilisation du plastique est due à ses propriétés bénéfiques, qui comprennent :

- Polyvalence extrême et sa capacité d'adaptation pour répondre aux besoins techniques spécifiques.

- Un poids plus léger que les matériaux concurrents réduisant ainsi la consommation de carburant pendant le transport.
- Bonne sécurité d'hygiène pour les emballages alimentaire.
- Longévité et durabilité.
- Résistance aux produits chimiques, à l'eau et à l'impact.
- Excellentes propriétés d'isolation thermique et électrique.
- Coût de production relativement bas.
- la capacité de combiner avec d'autres matériaux comme l'aluminium, du papier, adhésifs.
- Matériau de choix pour l'utilisation de tous les jours, style de vie humain et matière plastique son actuellement inséparables. [49]

II.3.5.1. Inconvénients des plastiques

La production du plastique comprend également l'utilisation des produits chimiques potentiellement nocifs, qui sont ajoutés comme stabilisateurs ou colorants. Beaucoup d'entre eux n'ont pas subi une évaluation des risques environnementaux et leur impact sur la santé humaine et l'environnement, sont actuellement incertain, à titre d'exemple les Phtalates, qui sont employés dans la fabrication de PVC.

Les PVC dans le passé ont été employés dans des jouets pour les enfants en bas âge et il y a eus des soucis que ces Phtalates peuvent être libérés quand ces jouets sont sucés (contact avec la salive). Des évaluations des risques sur les effets des Phtalates sur l'environnement sont actuellement menées. L'élimination des produits plastiques contribue également de manière significative sur leur l'impact environnemental, Parce que la plupart des plastiques prennent beaucoup de temps pour se décomposer, probablement pouvant aller jusqu'à des centaines d'années, bien que personne ne sache avec certitude que les plastiques ne durent pas longtemps quand ils sont mis en décharge.

Avec de plus en plus de produits plastiques, en particulier les emballages, étant débarrassé peu de temps après leur achat, les espaces d'enfouissement requis pour les déchets plastiques sont une préoccupation croissante.

II.3.6. La valorisation des déchets plastiques

Dans cette section, on va essayer de parler sur la technique primordiale dans la valorisation des déchets plastiques, qui est le recyclage et d'illustrer ses différentes étapes.

II.3.6.1. Origine et répartition des plastiques

On est amené à classer les déchets de matières plastiques par catégories et par secteurs d'application.

- Déchets industriels ;
- Déchets de distribution (transport, emballage) ;
- Déchets des consommateurs finaux. [50]

II.3.6.2. Le processus de collecte et de tri et de recyclage

Nous allons examiner les étapes de valorisation des déchets plastique.

II.3.6.2.1. La collecte et le tri

Les déchets plastiques qui sont produits par les entreprises, les ménages et les administrations publiques doivent d'abord être collectés, triés avant d'être recyclés.

A. La collecte

La collecte est le procédé fondamental par lequel les matières recyclables sont détournées des dépotoirs et acheminées vers des établissements de transformation ou de manutention Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centre d'enfouissement technique

Les modes de collecte utilisés pour la collecte du plastique d'emballage ménagers et d'autres déchets plastiques en sont distincts.

- La collecte en apport volontaire ;
- La collecte sélective en porte-à-porte ;
- La collecte des encombrants. [51]

B. Le tri :

Quelle que soit l'origine du plastique collecté (bouteilles, tubes, châssis de fenêtres...), un traitement préalable de tri, nettoyage, purification, peut être nécessaire pour assurer une valorisation judicieuse.

- **Etape 1 :** Les habitants déposent leurs bouteilles dans des poubelles adaptées, des camions spéciaux les emmènent dans des centres de tri.
- **Etape 2 :** Ils sont chargés dans un tapis roulant, on les secoue dans des cribles pour ôter les petits déchets.
- **Etape 3 :** Les matériaux sont séparés mécaniquement ou manuellement, ils sont triés par catégories (bouteilles, flacon plastiques, couleur).
- **Etape 4 :** Ils sont compactés, pour les transporter plus facilement dans des usines de recyclage.

Ruban Möbius

Le ruban de Möbius, mieux connu comme étant le logo du recyclage, garantit que le produit et/ou son emballage est recyclable. La première flèche « symbolise la collecte des matériaux usés, la seconde la réutilisation et la production de nouveaux produits grâce aux

rebut, tandis que la troisième reconnaît le rôle important du consommateur qui réclame de plus en plus des produits recyclés. [52]

II.3.6.2.2. Etapes du recyclage des déchets plastiques

Nous allons examiner ces étapes chacune son tour.

A. Le broyage, lavage et séchage :

Après la collecte et tri des déchets plastiques, ils sont broyés qui sont transformés en paillettes, puis ils sont lavés à chaud.

Les paillettes propres doivent être complètement séchées. (Toute humidité résiduelle peut affecter la qualité du produit fini).

B. La fonte et le filtrage :

Les paillettes séchées sont passés dans une extrudeuse ou la chaleur et la pression font fondre le plastique. (Chaque type de plastique a un point de fusion particulier). Le plastique fondu subit un filtrage serré, (Cette étape permet d'enlever tout contaminant qui aurait résisté au cycle de lavage).

C. La granulation :

Les pailles sont refroidies puis coupées en granules. (Celles-ci sont entreposées pour la vente et l'expédition. Les granules obtenues serviront de matière première pour de nouveaux produits, ils sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi [53]

II.3.7. Valorisation Des Déchets Plastiques Dans Le Domaine De Génie Civil

II.3.7.1. La fabrication d'éléments de construction

A la fin des années 90 est apparue l'idée d'utiliser le plastique (et notamment les sachets plastiques) comme liant, en remplacement du ciment, afin de produire différents éléments de construction comme des pavés, des briques, des tuiles...

II.3.7.2. Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton et mortier

L'utilisation des matériaux plastiques dans le mortier et le béton a fait l'objet de nombreuses recherches. Dans le passé, les plastiques étaient principalement utilisés dans le béton sous deux formes : (1) les granulats plastiques, qui remplaçaient les granulats naturels et (2) les fibres plastiques, utilisées dans le béton fibré. Par ailleurs, les matériaux de construction traditionnels d'origine naturelle sont confrontés, à terme, à l'épuisement. [41]



Figure II-13 Déchets des pièces plastiques électroniques



Figure II-12 Agrégat de PVC

II.3.7.3 Certains types des matières recyclables d'origine plastique utilisées dans les applications en génie civil.

Une vaste étude a été menée pour étudier l'utilisation de diverses formes des plastiques dans le béton ou mortier comme le montre les figures (II.14, II.15).

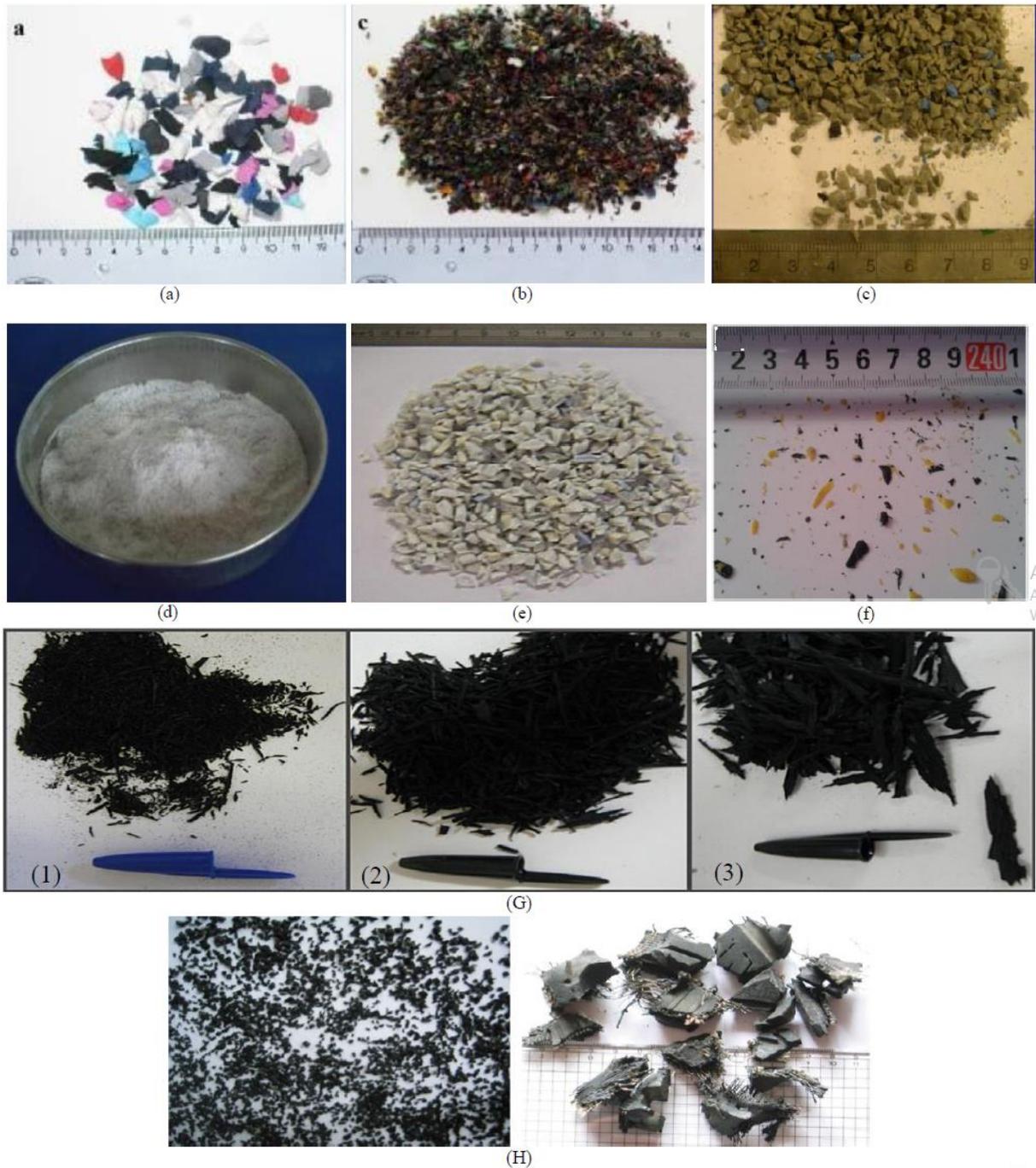


Figure II-14 : Type des agrégats plastiques utilisés dans le béton / mortier.

(a) Ethylène-acétate de vinyle - (EVA) (4/8 mm) , (b) Câbles en polychlorure de vinyle (PVC) (0/4 mm), (c) Tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) (<5 mm), (d) Polyéthylène téréphtalate (PET) (<1mm), (e) Polycarbonate (PC) (<5mm), (f) Polyéthylène à haute densité (PEHD), (G) Caoutchouc pneumatique (SBR) (1)- (1/2 mm) (2)-(2/4 mm) (3)-(4/8 mm),(H) Caoutchouc pneumatique – à gauche (agrégats) / à adroite (déchets).

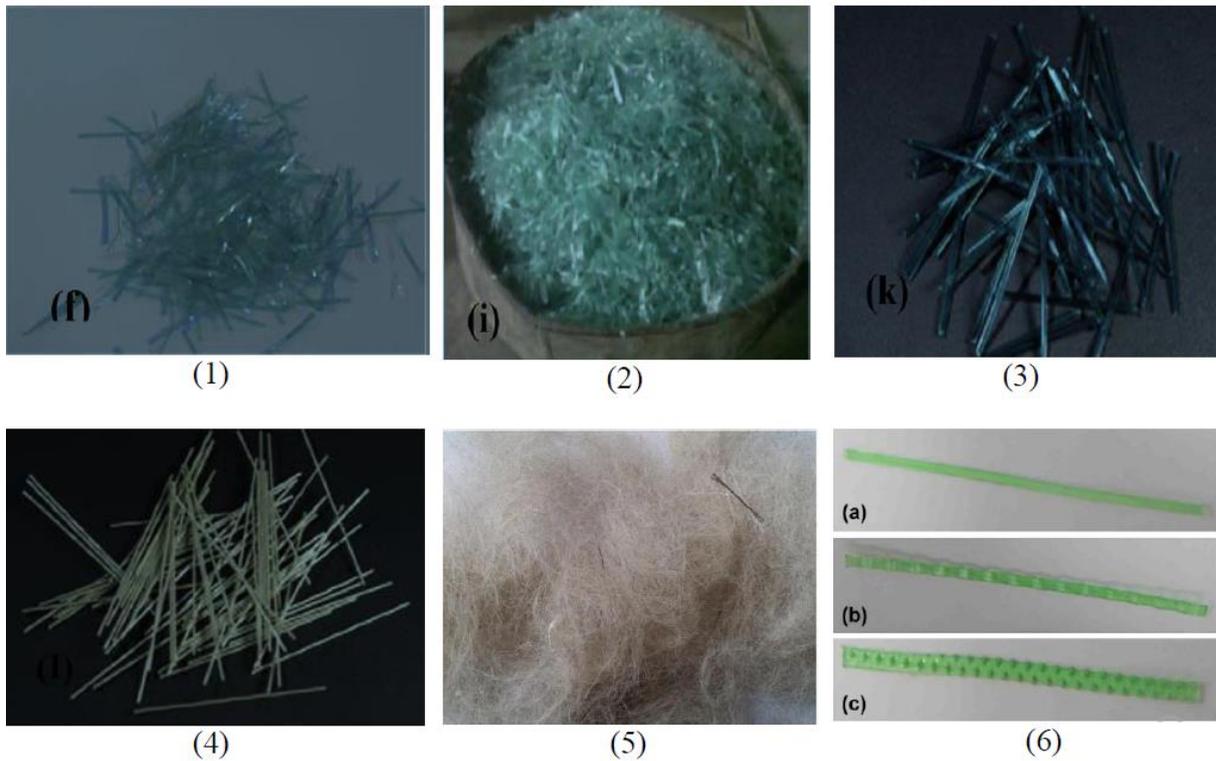


Figure II-15 : Type des fibres plastiques utilisées dans le béton / mortier.

(1) Fibres de PET laminaires courtes, (2) fibre de PET coupée à la main, (3,4) PET, (5) fibre de déchets de moquette, (6) fibres de PET de longueur de 50 mm.

(a) type droit (section transversale $0,5 \times 1$ mm), (b) type serti (section transversale $0,3 \times 1,2$ mm), (c) type en relief (section transversale $0,2 \times 1,3$ mm).

II.3.7.4. Classification des plastiques réutilisés et revalorisés dans le béton et mortiers :

a). Polypropylène Vierge :

Les fibres de polypropylène vierge de 19 de longueurs, 12 et 6 mm

b). Le plastique recyclé des résidus d'automobiles broyé :

Résidus broyés d'automobiles composé essentiellement plastiques mixtes et certains en caoutchouc, avec une dimension maximale des particules de 19 mm ils sont sous forme de flocons.

c). Plastique recyclé (décheté ou rappé) La matière plastique recyclée (déchetée) :

est produite par broyage du plastique obtenu à partir de la récupération des plastiques mélangés, le processus donnant des flocons planes de plastique avec une dimension maximale de 25 mm (1 pouce).

Zoorob et Suparma. Ont rapportés sur les propriétés physiques du plastique réutilisé (polyéthylène à basse densité, PEBD), qui sont données dans des détails du **tableau I I.3.**

Des détails sur les propriétés d'un système de renforcement discret du matériau vierge et recyclé utilisé dans le béton par Soroushian et al. Sont donnés dans le **tableau II.4.** [49]

Tableau II-3 propriétés physique des déchets du PEBD [49]

<i>Propriétés</i>	<i>Polyéthylène à basse densité (PEBD)</i>
Forme de l'agrégat	Granulé
Taille (mm)	5.00-2.36
Densité	0.92
Point de ramollissement (°C)	120
Point de fusion (°C)	140

Tableau II-4 Systèmes de renforcements discrets des plastiques vierges et recyclés [49]

<i>Identification du mélange</i>	<i>Renforcement discret</i>	<i>Aspect</i>	<i>duration</i>	<i>Densité (kg/m3)</i>	<i>Dosage dans le béton</i>	<i>Volume (%)</i>
Poly1.5 & poly3.0	Polypropylène vierge			150	1.2	0.075
Plmp1.5 & plmp2.5	plastique recyclé (traitement par fusion)			11.1	0.8	0.1
Plasr34	plastique recyclé (résidus d'automobile broyés)			1.65	1.5	0.19
Plsh17 & plsh34	plastique recycle (broyé)			3.70	1.0	2.0
					10	1.0
					20	2.0

II.3.7.5. Les effets de valorisation des déchets plastiques sur le comportement du béton

[54] chercheur réalise un travail s'intéresse à la valorisation d'un déchet qui est nuisible pour l'environnement vu son caractère encombrant et inesthétique il s'agit du déchet plastique. Trois types de déchets plastiques sont ajoutés dans le béton (sous forme de grains et fibres (ondulées et rectilignes). Les propriétés à l'état frais (maniabilité, air occlus et densité) et à l'état durci (résistance à la compression, à la traction, retrait et absorption d'eau) des différents bétons réalisés sont analysées et comparés par rapport à leurs témoins respectifs. Ce travail vise à étudier la possibilité d'utiliser des déchets de bouteilles plastiques (PET-polyéthylène téréphtalate) et des citernes (PEBD -polyéthylène basse densité) dans le béton sans autre transformation que le broyage, afin de minimiser le coût du matériau final.

L'influence de la proportion des déchets utilisés sur les caractéristiques physiques et mécaniques du nouveau matériau été étudiée et analysée.

Aussi, Trois types de déchets plastiques (grains(GP), fibres (ondulées (FPO) et rectilignes (FPR)) [Fig.16] sont ajouté dans le mortier et béton a différents pourcentages de substitutions (0 ; 5 ; 10 ; 15 et 20 % de grains plastiques par rapport à la masse du gravier) et d'incorporation (0 ; 0.5 ; 1 ; 1.5 et 2 % de fibres plastiques (forme rectiligne ou ondulée) par rapport à la masse du ciment).

L'eau de gâchage utilisé pour la confection des différents bétons est l'eau potable de distribution exempte d'impuretés.



Figure II-16. Types de déchets plastiques utilisés [54]

II.3.8. propriétés des différents bétons à base des déchets plastiques :

BT : Béton témoin.

BDGP : Béton de grains plastiques.

BFPR : Béton de fibres plastiques rectilignes.

BFPO : Béton de fibres plastiques ondulées.

II.3.8.1. à l'état frais :

Pendant la confection des éprouvettes, nous avons remarqué que les bétons des déchets plastiques (**BDP**) sont peu compacts par rapport au béton témoin (**BT**) et présentent une difficulté de mélange en fonction du pourcentage et du type d'ajout en déchets plastiques (grains ou fibres). Ceci confirme les résultats d'autres chercheurs. Le temps d'écoulement des différents bétons est illustré dans les figures **17** et **18**. Les densités des bétons de déchets plastiques sont plus faibles (**8% cas BDGP et 4% cas BFP**) que celui du **BT**.

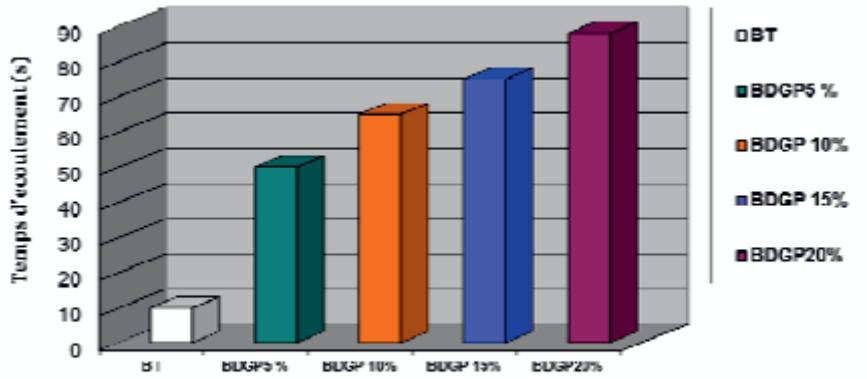


Figure II-17. Temps d'écoulement des bétons type BDGP

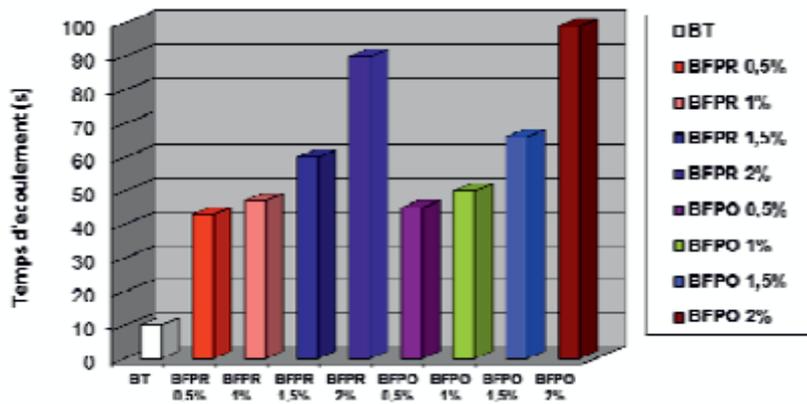


Figure II-18. Temps d'écoulement des bétons type BFP

II.3.8.2 à l'état durci :

Pour chaque essai, les résultats de la résistance mécanique du mortier est la moyenne de 3 mesures prises sur 3 éprouvettes à l'âge de 3,7 et 28j et sont illustrés dans les Figures 19 et 20 suivantes :

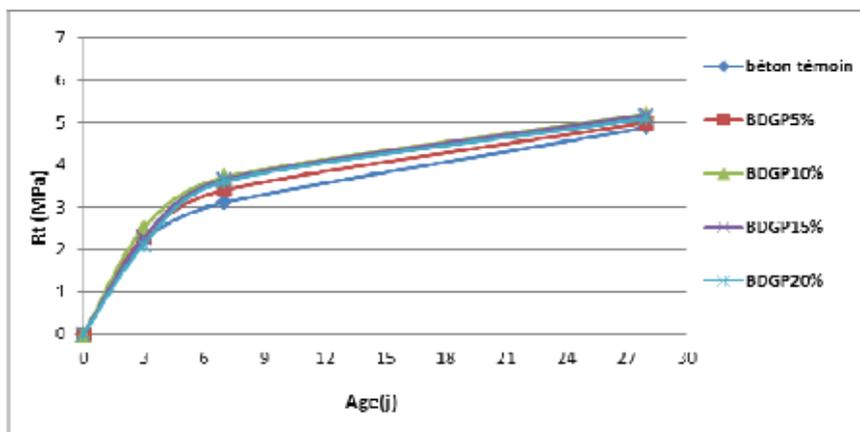


Figure II-19. Résistance à la traction des bétons type BDGP

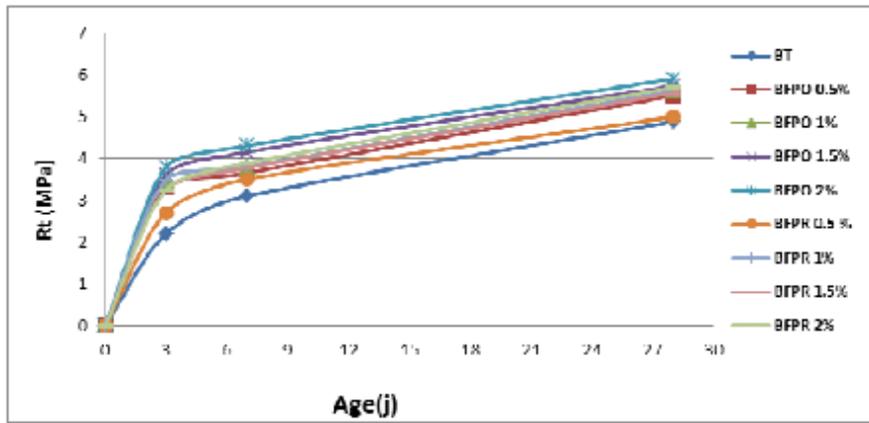


Figure II-20. Résistance à la traction des bétons type BFP

D'après les figures 19 et 20 on remarque que la cinétique de la résistance du béton à base de déchets plastiques est comparable à celle de béton témoin et que le béton gagne en résistance en fonction du pourcentage d'ajout en déchets plastiques. La résistance à la traction est améliorée d'une façon remarquable pour les bétons de fibres plastiques (ondulées et rectilignes) par rapport au béton de grains plastiques et par rapport au béton témoin. Ceci confirme les résultats de **Al-Manaseer et al.** De Les fibres plastiques ondulées améliorent plus la résistance à la traction du béton (environ 25% de gain) que les fibres plastiques rectilignes. Ceci semble logique à cause de la forme ondulée qui augmente l'adhérence dans le squelette granulaire de la matrice cimentaire du béton.

Les figures 21, 22 et 23 illustrent la cinétique d'absorption d'eau des différents mortiers confectionnés.

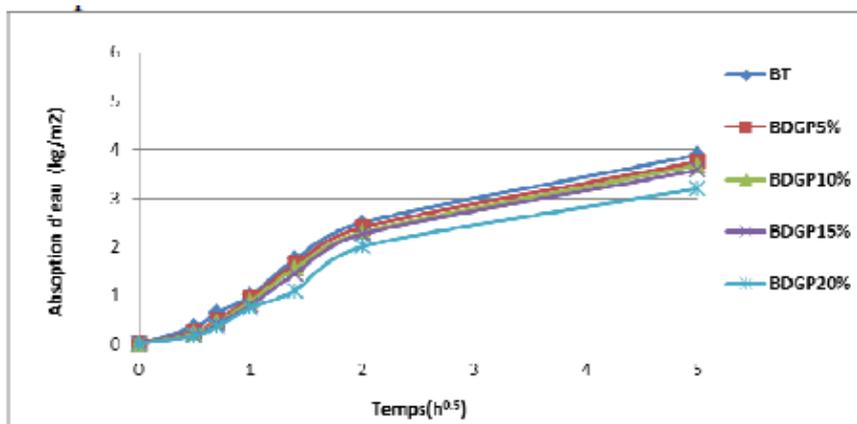


Figure II-21. Absorption d'eau des bétons type BDGP

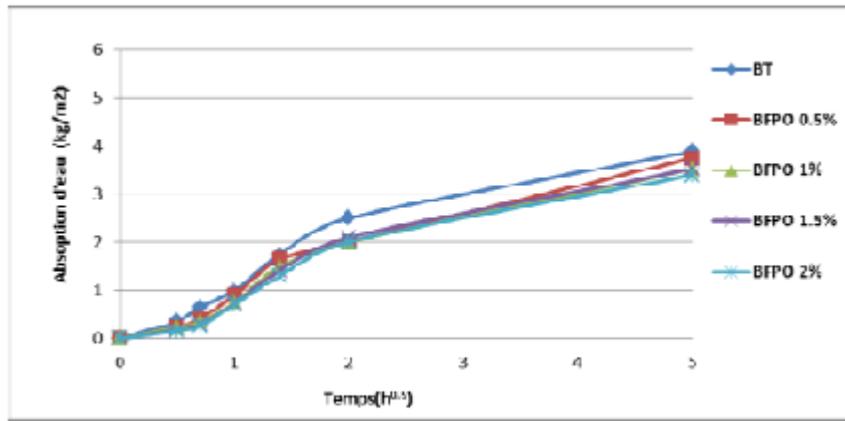


Figure II-22. Absorption d'eau des bétons type BFPO

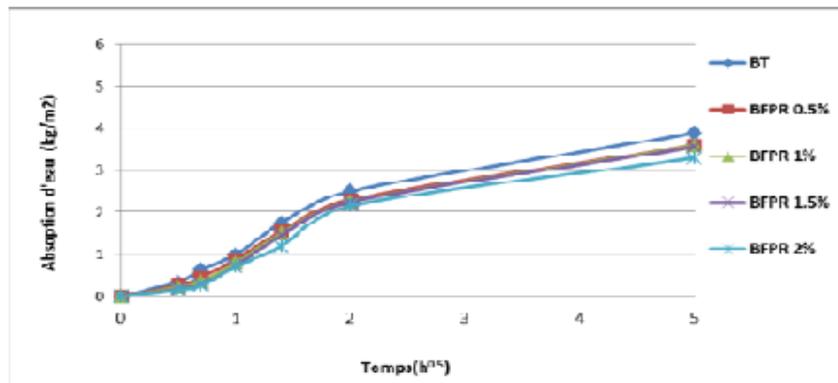


Figure II-23. Absorption d'eau des bétons type BFPR

D'après l'allure des figures 21, 22 et 23, Il est nettement visible que le processus d'absorption d'eau par les bétons de déchets plastiques est similaire à celui du béton naturel. Les fibres plastiques de forme ondulées contribuent encore d'avantage à la diminution de l'absorption d'eau des bétons (environ 9%). Les résultats de l'essai du retrait sur les différents bétons réalisés sont illustrés dans les figures 24, 25 et 26 suivantes.[54]

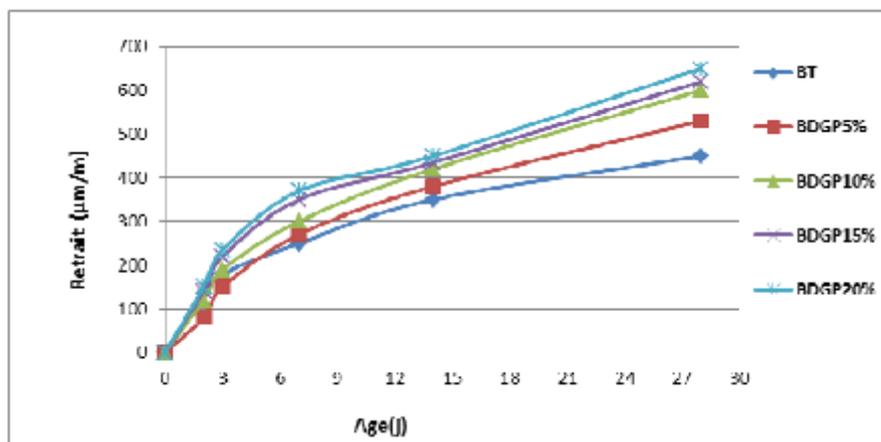


Figure II-24. Retrait des bétons type BDGP

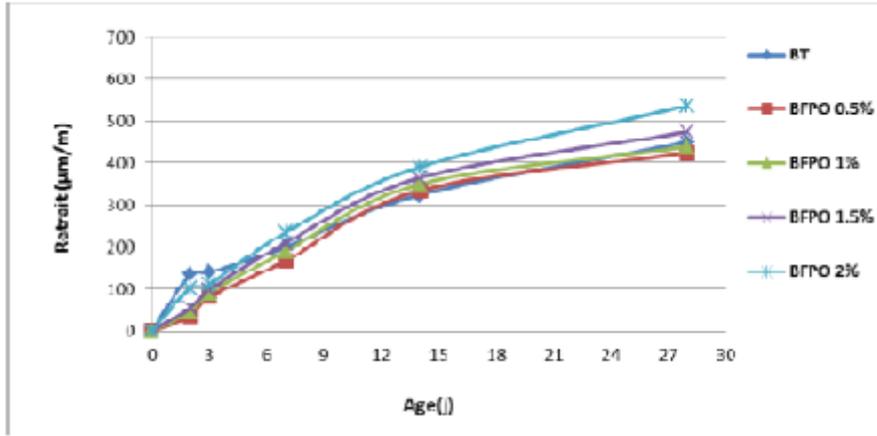


Figure II-25. Retrait des bétons type BFPO

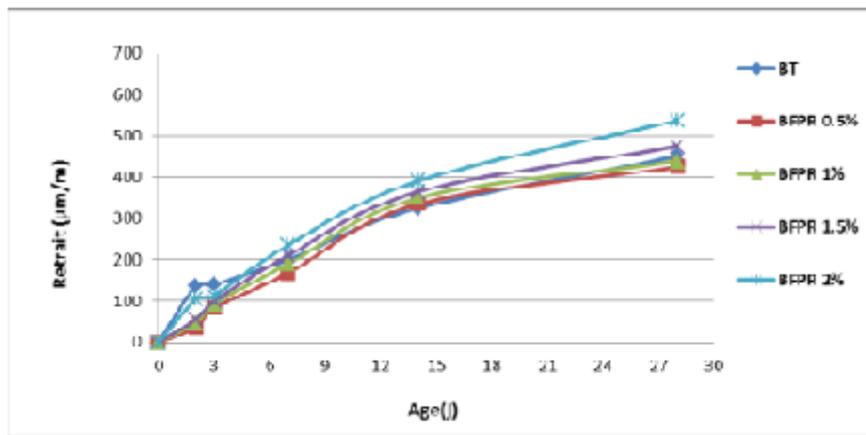


Figure II-26. Retrait des bétons type BFPR

La *figure 24* montre que tous les bétons à base de déchets plastique ont des retraits plus grands par rapport au béton témoin, et on remarque que plus le pourcentage augmente plus le retrait augmente. Contrairement aux grains plastiques, les fibres plastiques (de forme ondulée ou rectiligne) contribuent au retardement (d'environ -8%) du retrait du béton jusqu'au pourcentage d'ajout de 1% en fibres et au-delà le retrait reprend sa croissance (une augmentation de +13%) pour un pourcentage de 2% d'ajout en fibres.[54]

II.3.9. Remarque :

Les résultats obtenus après la réalisation de cette recherche sont :

- Le béton de déchets plastiques est peu compact par rapport au béton ordinaire et présente une difficulté de mélange et de mise en œuvre en fonction du pourcentage et du type d'ajout en déchets plastiques (grains ou fibres).

- Le béton armé de fibres plastiques (surtout en forme ondulée) résiste mieux à la flexion par la traction en comparaison au béton ordinaire. Néanmoins un risque de retrait supplémentaire est possible pour un dosage élevé en pourcentage de fibres, c'est pourquoi un pourcentage de 1% en fibres à ne pas dépasser est conseillé.

II.4. Les déchets de polystyrène

Pour réduire la consommation énergétique dans le domaine de la construction et les problèmes environnementaux liés au recyclage des déchets industriels et domestiques, il est nécessaire de développer de nouvelles solutions pour l'avenir. Ces solutions passent par l'amélioration des matériaux de construction existants. L'introduction de matériaux « déchets » tel que le polystyrène semble une solution intéressante. Les propriétés thermiques de ces matériaux permettent par rapport à un béton classique d'alléger le produit de base, de proposer une meilleure isolation, de diminuer l'inertie thermique, de recycler certains déchets et de réduire le dégagement de CO₂ dû à la combustion pour le chauffage des bâtiments.

II.4.1. Généralité

Le polystyrène est une matière très largement utilisée dans le monde, pour différentes applications et dans différents secteurs. De ce fait, de grands volumes de polystyrène sont produits. [55] Avec une production de 6×10^6 tonnes le polystyrène occupe la quatrième place après le PE, le PVC et le PP [56]. C'est un polymère dur, cassant, transparent et résistant aux agents chimiques. L'utilisation du polystyrène dans le secteur du bâtiment est encore timide dans notre pays, il est disponible en plaque d'isolation acoustique et thermique. Ce matériau innovant peut aussi être introduire à la formulation du béton pour former des <<placo-styrènes>>, dix fois plus légers et trente fois plus isolants et tout aussi résistants que le béton traditionnel. [57] Le béton de polystyrène est un béton à granulats légers. Il est généralement constitué de billes de polystyrène mélangées à une matrice à base de pâte de ciment, ou à base de mortier. Parfois, pour un critère d'allègement, le polystyrène est utilisé dans les bétons traditionnels en remplaçant une partie des granulats ordinaires par des billes de polystyrène [58]

Le polystyrène permet une économie d'énergie dans l'habitat domestique, les pertes d'énergie sont évaluées à 43% de la consommation énergétique totale. Les économies d'énergie sont réalisées en supprimant la plupart des ponts thermiques, en particulier ceux qui sont situés à la jonction entre les cloisons internes et les façades. La consommation en énergie (chauffage et ventilation) cout de plus cher pour les ménages. L'Algérie est un pays chaud. En été les constructions ont besoin de matériaux d'isolation thermique. Le polystyrène expansé c'est un matériau climatiseur, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable : il élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs. Ce matériau est n'est néfaste pour de l'environnement. Le polystyrène est un produit écologique, il n'est certes pas biodégradable. Mais il est recyclable.

Certain producteur a introduit une technique innovante d'origine allemande, utilisée dans le domaine de la construction : utiliser des hourdis en polystyrène, avec armature métallique pour les dalles, les murs de séparation et les toitures. Le produit est isolant, léger et résistant et il est certifié par le CTC. Les hourdis en polystyrène armé sont tout aussi solides que le béton conventionnel. [57]



Figure II-27. Polystyrène sous sa forme commerciale. [55]

II.4.2. Composition chimique

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif homopolymère de styrène (**Figure II.28**). Structuellement, c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés, avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [59].

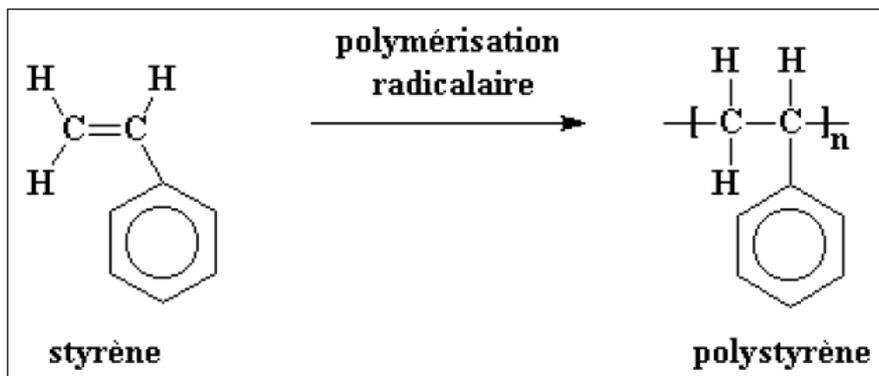


Figure II-28 : Structure chimique du polystyrène

II.4.3. Les applications :

Les principales utilisations du polystyrène dans les vies courantes sont :

- Les boîtiers de CD et PS cristal
 - Les couverts et verres en plastique en PS choc
 - Les emballages alimentaires (comme les pots de yaourt)
 - Les emballages des appareils fragiles en PSE
 - Isolation thermique des bâtiments sous forme expansé ou extrudée. [60]

II.4.4. Les différents types de polystyrènes :

Il existe trois types de polystyrènes :

➤ **Polystyrène standard (Cristal)**

Ce PS est également appelé le polystyrène d'utilisation général (General Pur pose Polystyrène (GPPS)) ou bien le polystyrène rigide (PSR). C'est un polymère amorphe, transparent, brillant, rigide, cassant et pouvant être coloré. Il est souvent appelé PS cristal à cause de son aspect transparent. C'est le premier PS obtenu suite à la polymérisation. Toutes les autres formes du PS sont obtenues par modification de celui-ci.

Le PS cristal peut également être façonné par injection et des pièces moulées, comme des gobelets transparents ou des boîtiers de Digital Versatile Disc (DVD), sont obtenues.

Dans ce cas, il porte le nom de PS injecté [61].

➤ **Polystyrène choc :**

Ce matériau résulte de la polymérisation du styrène en présence d'un élastomère renforçant. Généralement, le polybutadiène y est inséré à cette fin. Le PS choc est également un polymère amorphe constitué de deux phases distinctes : l'une continue, composée de PS, appelée matrice et l'autre discontinue comprenant des nodules de polybutadiène dispersés dans la matrice. La couleur.

➤ **Polystyrène expansé :**

Le polystyrène expansé (PSE) (**Figure II.29**), est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires.

Il existe deux types de polystyrène expansé :

- Le polystyrène expansé moulé (PSE-M) (**Figure II.30**).
- Le polystyrène expansé extrudé (PSE-E) ou XPS (Extruded polystyrene foam) (**Figure II.31**).



Figure II-29. Polystyrène expansé (PSE).

- **Le PSE-M** : est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté en cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane, C_5H_{12}).
- **Le PSE-E** : est quant à lui obtenu lors de l'extrusion par injection sous pression d'un gaz d'expansion (le pentane) dans le polymère cristal fondu. Les propriétés les plus remarquables du polystyrène expansé sont :
 - Sa faible masse volumique ;
 - Son pouvoir isolant thermique ;
 - Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs) ;
 - Son insensibilité à l'eau ;
 - Sa facilité de mise en forme (moulage, découpage) ;
 - Son recyclage.



Figure II-30. Polystyrène expansé moulé (PSE-M).



Figure II-31. Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).

II.4.5. Propriétés physiques et mécaniques du polystyrène

II.4.5.1 Densité

La densité du polystyrène à l'état brut avoisine les 1000 kg/m^3 (Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise, Alger, 1998). Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m^3 . Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé. Le volume de polymère reste toujours très faible devant le volume d'air. Par exemple pour une densité de 32 kg/m^3 , le polystyrène occupe 2.5% du volume total, mais représente 92% de la masse totale du polystyrène expansé [62].

II.4.5.2 Résistance à la chaleur

Le polystyrène expansé se ramollit à une température de 90°C .

II.4.5.3 Absorption

Le polystyrène est un matériau de faible absorption, elle est de 0.2 à 1g par 100 cm^3 (Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise, 1998).

II.4.5.4 Conductivité thermique :

Le polystyrène est un matériau très réputé par ces performances thermiques, il est très utilisé dans l'isolation thermique des constructions sous forme de panneaux de 5 cm d'épaisseur entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. En générale elle varie entre 0.027 à $0.037 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux.

II.4.5.5 Résistance à la compression

Tableau II-5 : Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité.

Référence	Classe Q ₁	Classe Q ₂	Classe Q ₃	Classe Q ₅	Classe Q ₆
Masse volumique (Kg/m ³)	9	13	16	20	25
Contrainte (MPa)	0.03	0.6	0.9	0.12	0.15

II.4.5.6. Inconvénients du polystyrène

Les principaux inconvénients des plastiques à base de polystyrène sont ; La fragilité, basse température de fléchissement et faible résistance aux solvants organiques y compris les produits de nettoyage à sec. En outre, de par leur nature, les résines de polystyrène offrent une

faible résistance aux intempéries ; lorsqu'elles sont exposées à l'extérieur, elles jaunissent et se fendillent. Cependant, plusieurs des défauts mentionnés précédemment peuvent être surmontés par une formulation adéquate, par copolymérisation du styrène avec des monomères de vinyle ou en utilisant un mélange de polystyrène avec d'autres polymères. [63]

II.4.6. Billes de polystyrène :

❖ Composition et origine :

La matière première servant à la formation des billes de polystyrène est constituée de granules de polystyrène non expansé renfermant un porogène.

❖ Méthode de fabrication :

Le porogène, sous l'action de la chaleur, passe à l'état gazeux, ce qui provoque l'expansion. Une fois expansées, les perles peuvent avoir atteint plusieurs fois leur diamètre initial, de 0,4 à 2 mm (Cormon, 1973). Le polystyrène présente une masse volumique parmi les plus faibles (10 à 40 kg/m³) en considération aux autres matériaux étudiés (ACI, 1986).



Figure II-32 : Billes de polystyrène[58]

II.4.6.1 Béton de polystyrène

Bien qu'ils soient technologiquement très prometteurs, les bétons de polystyrène posent encore de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés mécaniques. Chafi [64] a travaillé sur le béton de fibre de polystyrène expansé de densité comprise entre 1.1 et 2.2. Ses résultats ont montré que la résistance à la compression de ce type de béton diminue sensiblement lorsqu'on augmente le taux de fibre. A titre d'exemple, un béton de densité 0.1 résiste à environ 1/10 du béton de densité 0.2 (**Figure II.33**).

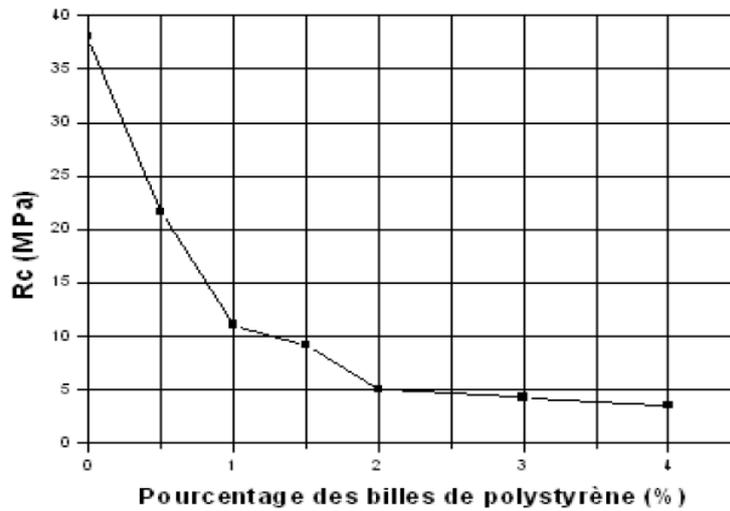


Figure II-33 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène

Par ailleurs, un comportement aux sollicitations de compression et de flexion très différent est observé. En effet, lorsqu'un béton de densité 1.3 ne possède qu'une résistance à la compression de 1/10 de celle d'un béton de densité 2.2, il a une résistance à la flexion de 4/10 (**Figure II.34**) c'est-à-dire quatre fois plus. On constate que l'ajout du polystyrène au béton a une influence sur la résistance à la flexion moindre que sur la résistance à la compression.

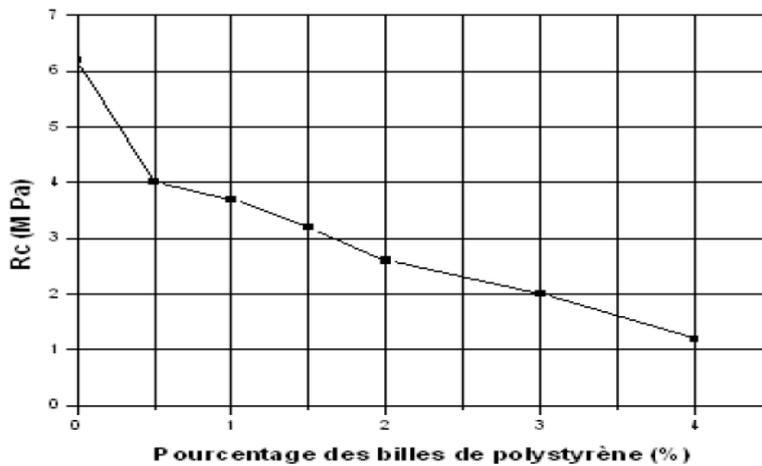


Figure II-34: Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène

L'étude réalisée par Miled [65] montre que la résistance à la compression du béton de polystyrène diminue sensiblement lorsqu'on augmente la taille des billes de polystyrène (figure **Figure II.35**).

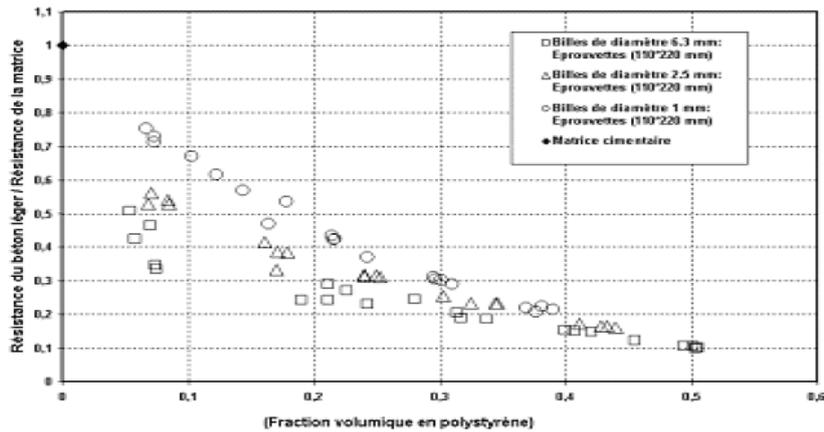


Figure II-35 : Evolution de la résistance de compression en fonction du pourcentage et de la taille des billes de polystyrène

II.4.6.2. Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène

➤ **Densité :**

La densité des bétons de polystyrène varie selon le dosage en polystyrène, elle varie dans la gamme 300-2000 kg/m³ [66].

➤ **Résistance à la compression :**

La résistance à la compression des bétons de polystyrène est fonction du dosage en granulats de polystyrène et de leurs tailles. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 0.2 et 23 MPa.

➤ **Résistance à la traction :**

Elle varie entre 0.1 et 2.4MPa. Elle peut être améliorée par incorporation de fibres telles que les fibres en acier.

➤ **Retrait :**

Variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1.2mm/m. Ce matériau présente une grande élasticité.

➤ **Module d'élasticité :**

Il est de l'ordre de 20.000kg/cm² pour des bétons de 750 kg/m² de masse volumique apparente.

➤ **Conductivité thermique :**

Les bétons de polystyrène sont caractérisés par leur pouvoir isolant leur conductivités thermiques sont assez faibles et pouvant descendre jusqu'à 0.065W. m⁻¹.k⁻¹ Pour les bétons de construction en témoignent cette propriété. Elle varie en fonction de la densité du béton. Le tableau II.6 donne quelques valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche.

Tableau II-6 : Conductivité thermique des bétons de polystyrène.

Masse volumique sèche ρ_a (kg/m ³)	300	500	700	900	1200	1500
Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.065	0.14	0.15	0.33	0.39	0.7

II.4.6.3. Avantages et domaine d'utilisation du béton de polystyrène

Le béton de polystyrène est un matériau utilisé très récemment, il présente beaucoup d'avantages sur le plan technique et économique :

- Il est ultra léger, sans doute parmi les bétons les plus légers.
- Il est reconnu par sa faible absorption d'eau.
- Il est durable et résiste aux agents agressifs.
- Mise en œuvre simple et traditionnelle, sans vibration.
- Moins de surcharge vis-à-vis d'un béton traditionnel.
- Résistant aux chocs.
- Il est considéré parmi les matériaux qui possèdent les meilleures performances thermiques et phoniques.
- Imputrescible

En raison de ces performances physiques, le béton de polystyrène est largement utilisé dans le domaine de construction, on le retrouve dans les panneaux de revêtement, dans l'isolation des planchers et des blocs de béton porteurs rattrapage de niveau ravoir âge remplissage pour réhabilitation de bâtiments anciens et bâtiments neufs ainsi que dans d'autres applications spécialisées comme les pavés et les constructions marines flottantes et dans la protection de structures militaires enterrées.



Figure II-36. Pavé en béton de PSE.



Figure II-37. Mur en blocs de béton de PSE.

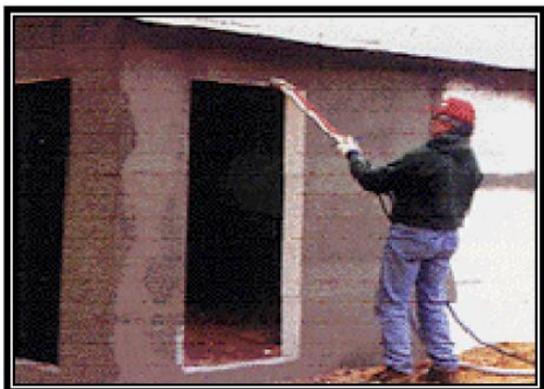


Figure II-38. Cloison en Béton de PSE



Figure II-39. Installation d'un plancher
Projeté béton de PSE.

II.5. Conclusion du chapitre :

Dans cette section nous avons présenté les différents matériaux composites à base des polymères principalement les mortiers et les bétons légers. Les différentes définitions et propriétés spécifiques des composites à base des déchets polymères tels que ; les déchets plastiques, les déchets pneumatiques, le polystyrène, sont également présentées.

Ces matériaux composites sont dotés par un caractère d'isolation thermique et acoustique, particulièrement ces composites présentent une faible masse volumique comparativement ou composites à base des granulats minéraux classiques notamment les bétons et les mortiers ordinaires.

Les caractéristiques suscitées nous ont permis de choisir le granulat utilisé dans notre investigation expérimentale, en optant pour déchets pneumatiques, eu égard à la disponibilité du matériau dans notre pays l'Algérie, et son coût raisonnable.

***CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux
utilisés et procédés expérimentaux***

III.1.Introduction

Dans cette partie expérimentale nous avons réalisé au niveau de laboratoire pédagogique de notre université, vise à étudier l'influence de l'introduction des granulats à base des déchets pneumatique recycle avec des pourcentages varie de (15% ; 30% ; 45%) sur les propretés physico-mécanique pour deux matériaux diffèrent : plâtre et mortier

Nous exposons dans cette chapitre toute les matériaux utilise et leur caractéristique, les essais réalise avec votre appareillage, les formulations adopte et finalement traiter les résultats trouver

III.2.Les matériaux et matériels utilises

Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de BOUIRA.

Les matériaux utilisés sont :

- 1) Un ciment **CEM II/A-M (P-L) 42,5 N** : de la cimenterie de Sour el Ghozlane
 - 2) Un sable (0/3) concasse de la région de Sour el GHOZLANE
 - 3) Granulats des déchets pneumatique gamme (0/2.5) mm
 - 4) Granulats des déchets pneumatique gamme (2.5/5) mm
 - 5) L'eau potable du laboratoire pédagogique de l'université
 - 6) Plâtre marque KNAUF [FLEURUS]
- { Sarl Recytech . hachimia }



Figure III-1 .a : Sable (0/3)



Figure III-1 .b : Granulat pneumatique gamme (0/2.5)



Figure III-1 .c : Granulat pneumatique gamme (2.5/5) mm



Figure III-1 .d : Plâtre



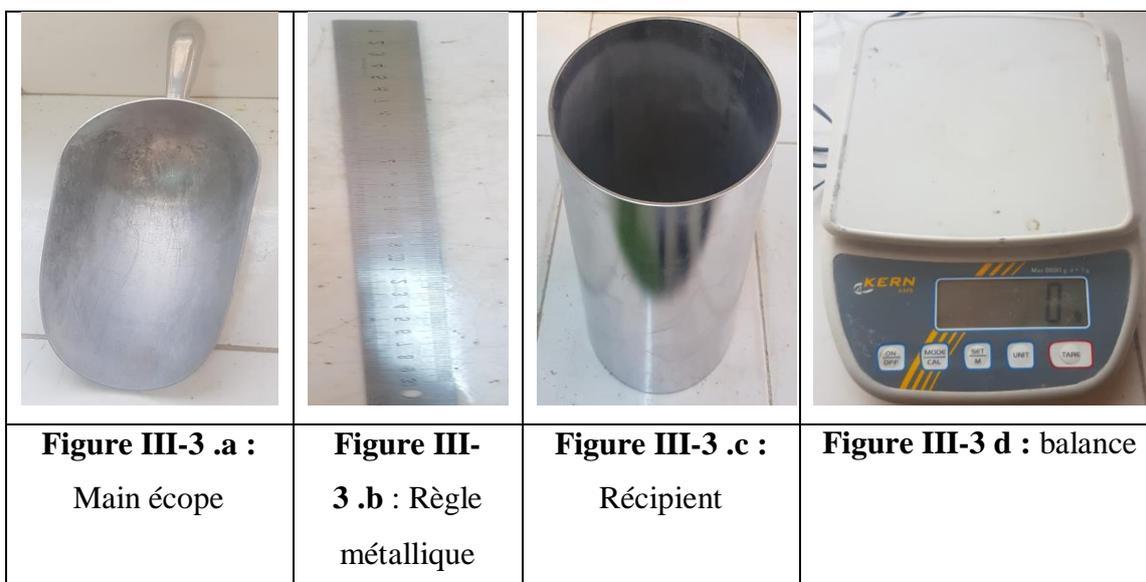
Figure III-1 .e : Ciment



Figure III-1 .f : L'eau potable



Figure III-2 : Les moules utilisés (4x4x16 cm³)



III.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans notre recherche, est un ciment Portland composé **CEM II/A-M (P-L) 42,5 N** Dont les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques satisfont aux exigences du ciment selon la norme **NA442/2013** [67]

Les constituants principaux et les Caractéristiques physicomécaniques du ciment utilisé sont présentés dans les tableaux suivant

Tableau III-1: Les constituants principaux de ciment

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	CaOl	PAF à 1000 C°
%	20,06	03,99	03,04	61,57	01,62	00,54	00,26	00,06	<0,001	1,56	7,16

Tableau III-2 : Représente les Caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé

Surface spécifique g/cm ²	Consistance Normale (%)	Début de prise (Heure : min)	Fin de prise (Heure : min)
4000	26,11	151	322

III.2.2. Le sable

Le sable utilise est un granulat fine de classe granulaire s'étendant entre 0 et 3 mm c'est un produit concasse de la carrière **HAMLAOUI ABDELKADER (SARL AGRE.ROC.CAR)** Sour el **GHOZLANE** Wilaya de **BOUIRA**.

III.2.2.1. Caractéristiques physiques du sable utilisé

Les caractéristique physiques de sable donne ou tableau suivante

Tableau III-3: les Caractéristiques physiques de sable

Classe granulaire	0/3 mm
Masse volumique apparent	1.45 g/cm ³
Masse volumique absolue	2.55 g/cm ³

III.2.3. Granulats des déchets pneumatiques

Les Granulats des déchets pneumatiques proviennent d'une usine de broyage de pneus usage (SARL RECYTECH) située dans la région HACHIMIA Wilaya de BOUIRA, ils sont utilisés en substitution volumique de l'éprouvette

III.2.3.1. Caractéristiques physiques des déchets pneumatiques

A) la masse volumique

La masse volumique : est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume on distingue deux types de masse volumique : apparente et absolue

a) La masse volumique apparente : NF P 18-554 [68]

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides dans les grains ainsi que les vides entre les grains.

Principe de mesure :

La mesure de la masse volumique apparente d'un granulat consiste à verser le granulat «sec» dans un récipient de volume connu en le disposant, sans tasser, par couches horizontales successives, d'araser la dernière couche par un mouvement de va et vient à l'aide d'une règle (figure III.4). La masse volumique apparente, notée "Mapp", est donnée par l'expression :

$$\rho_{app} = \frac{\text{la masse des granulats secs}}{\text{volume du récipient}} = \frac{M}{V_{app}}$$

Avec :

M = masse des granulats contenus dans le récipient,

V = volume du récipient.



Figure III-4 : étapes de détermination de la masse volumique

Volume de récipient : (forme cylindrique)

D=16.2 cm

H=25.2cm

$$v = S \times H = \frac{D^2 \times H \times \pi}{4}$$

$$v = \frac{16.2^2 \times 3.14 \times 25.2}{4} = 5191.588 \text{ cm}^3$$

Tableau III-4: Masse volumique apparente des granulats de déchets pneumatique

Classe granulaire (mm)	N° d'essai	M (g)	V _{app} (cm ³)	ρ (g/ cm3)	ρ moyenne (kg/ m ³)
Gamme (0/2.5)	1	2340	5191.588	0.45	448
	2	2340		0.45	
	3	2320		0.446	
Gamme (2.5/5)	1	2480	5191.588	0.477	477
	2	2470		0.475	
	3	2490		0.479	

D'après les résultats récapitulés dans le tableau ci-dessus, nous avons observé que la masse volumique apparente des granulats pneumatiques, notamment la gamme (0/2.5 mm) est légèrement inférieure à la masse volumique apparente de la gamme (2.5/5 mm), ce qui explique que les dimensions et la forme des granulats pneumatiques manifestent à la variation des vides inter-granulaires.

b) La masse volumique absolue : NF P 18-555 [69]

La masse volumique absolue : est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains

Principe de la mesure : Pour déterminer la masse volumique absolue de granulats des déchets pneumatique, nous avons utilisé la méthode dite de l'éprouvette graduée, dont nous exposons ci-après le principe.

Remplir une éprouvette graduée avec un volume V1 d'eau. Peser un échantillon sec "M" de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V2 (figure III.5.).

La masse volumique absolue se déduit alors à partir de l'expression suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{\text{la masse des granulats secs}}{\text{le volume absolu}} = \frac{M}{V_{abs}} = \frac{M}{V2 - V1}$$

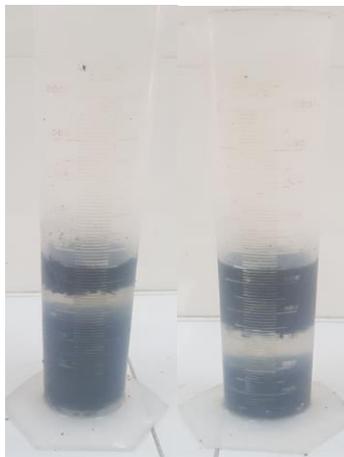


Figure III-5 .détermination de la masse volumique absolue

Après le versement des granulats pneumatiques dans l'eau, nous avons visualisé une quantité des granulats qui se flotte, en parant la visibilité du ménisque, en effet nous avons opté à prendre la masse volumique absolue des granulats pneumatiques selon la fiche technique du fournisseur.

Tableau III-5: les caractéristiques physiques des granulats pneumatiques

Classe granulaire en (mm)	La masse volumique absolue (g/cm ³)
Gamme (0/2.5)	1.155
Gamme (2.5/5)	0.94

III.2.4 EAU

C'est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du mortier. Cette eau ne doit pas contenir d'impuretés nocives comme les chlorures, les sulfates, les matières organiques, les nitrates, les sels de (Na) sodium et de potassium (K)...etc.

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet disponible au laboratoire de génie civil de l'université de BOUIRA.

III.2.5 Le plâtre

Le plâtre KNAUF [FLEURUS] est connu par sa facilité d'application, aussi par son degré exceptionnel de finition qui s'applique manuellement sur tous les supports.

Propriétés :

- *Application légère et facile, à la main ou à la machine.
- * Séchage rapide et durcissement uniforme.
- *Rendement optimal.
- *Matériau ouvert à la diffusion de la vapeur.
- *Assure l'étanchéité à l'air.

III.2.5.1 : Caractérisations physiques des matériaux utilisés

III.2.5.1.1 : La masse volumique du plâtre

Selon la fiche technique du plâtre nous allons délimiter sa masse volumique apparente qui varie entre **600** et **1300 kg/m³** et la surface spécifique de **1500 à 8000 kg/m³**.

III.3 : Formulations des composites à base des granulats pneumatiques

Dans notre investigation expérimentale nous avons procédé à l'élaboration de deux types de composites à base d'une matrice hydraulique et les fractions (**0/2.5** et **2.5/5 mm**) des déchets pneumatiques :

1^{er} type : la substitution des granulats pneumatiques dans une matrice du plâtre.

2^{eme} type : l'incorporation des granulats pneumatiques dans un mortier ordinaire.

Les différents mélangés à base des granulats des déchets pneumatiques ont été élaboré, en incorporant les différents taux volumiques (**15%,30% et 45%**) dans le mortier ordinaire, ainsi que pour les mélanges à base plâtre, les mêmes taux volumiques des granulats pneumatiques ont été incorporés.

Tableau III-6. Différentes formulations à base du plâtre et déchets pneumatiques :

classes granulaires des déchets pneumatiques	Différents mélangés	Identification
	P T	Plâtre témoin
0/2.5 mm	P G D P 15%	Plâtre avec une 15% des déchets pneumatique
	P G D P 30%	Plâtre avec une 30% des déchets pneumatique
	P G D P 45%	Plâtre avec une 45% des déchets pneumatique
2.5/5mm	P G D P 15%	Plâtre avec une 15% des déchets pneumatique
	P G D P 30%	Plâtre avec une 30% des déchets pneumatique
	P G D P 45%	Plâtre avec une 45% des déchets pneumatique

Tableau III-7 Différentes formulations à base du mortier et déchets pneumatiques.

classes granulaire des déchets pneumatiques	Les mélangés prépare	Identification
	M T	mortier témoin
0/2.5 mm	M G D P 15%	mortier avec une 15% des déchets pneumatique
	M G D P 30%	mortier avec une 30% des déchets pneumatique
	M G D P 45%	mortier avec une 45% des déchets pneumatique
2.5/5mm	M G D P 15%	mortier avec une 15% des déchets pneumatique
	M G D P 30%	mortier avec une 30% des déchets pneumatique
	M G D P 45%	mortier avec une 45% des déchets pneumatique

III.3.1 : Optimisation des mélanges plâtre/granulats pneumatiques

Les masses des composants des mélanges plâtre/granulats pneumatiques ont été calculé selon leurs masses volumiques absolues. En raison de la courte durée de prise du plâtre, les caractéristiques rhéologiques et le rapport (E/P) du mélange ont été déterminé à l'œil nu.

Tableau III-8: les différentes proportions des mélanges plâtre/granulats pneumatiques

Type de plâtre	La masse de plâtre (g)	Quantité d'eau (ml)	La masse de G.P (g)	Dosage de G.P (%)	Rapport (E/P)
Plâtre témoin	1100	460	0	Plâtre témoin	0.42
Plâtré +15% G.P Gamme (0/2.5)	935	440	132.4	15% G P gamme (0/2.5) 85%(Plâtre +eau)	0.47
Plâtré +30% G.P Gamme (0/2.5)	770	372	265	30% G P gamme (0/2.5) 70%(Plâtre +eau)	0.48
Plâtré +45% G.P Gamme (0/2.5)	605	303	398	45% G P gamme (0/2.5) 55%(Plâtre +eau)	0.5
Plâtré +15% G.P Gamme (2.5/5)	935	440	108.29	15% G P gamme (2.5/5) 85%(Plâtre +eau)	0.47
Plâtré +30% G.P Gamme (2.5/5)	770	372	216.6	30% G P gamme (2.5/5) 70%(Plâtre +eau)	0.48
Plâtré +45% G.P Gamme (2.5/5)	605	303	324.9	45% G P gamme (2.5/5) 55%(Plâtre +eau)	0.5

III.3.1.1 : Procédés de réalisation des différents mélanges plâtre/granulats pneumatiques

➤ **Mélange (1) : Plâtre témoin (Pt).**

- 1- Nettoyage, huilage des surfaces intérieures et serrage des moules.
- 2- prendre les quantités totales nécessaires pour le Mélange (eau, plâtre).
- 3- Introduire la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur.
- 4- Introduire la quantité du plâtre dans le récipient du malaxeur.
- 5- Malaxage des composants durant 20 secondes.
- 6- Remplissage des moules en deux couches qui subissent sur une table à chocs **60 secousses** en **60 secondes** par couche.
- 7- Démoulage et conservation des échantillons à l'aire libre (20°C).

➤ **Les autre Mélange : Plâtre + % granulats des déchets pneumatiques.**

- 1- Nettoyage, huilage des surfaces intérieures et serrage des moules.
- 2- prendre les quantités totales nécessaires pour le Mélange (eau, plâtre, déchets pneumatiques).
- 3- Introduire la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur.
- 4- Introduire la quantité du plâtre dans le récipient du malaxeur.
- 5- Introduire la quantité du déchet pneumatique dans le récipient du malaxeur
- 6- Malaxage des composants durant 20 secondes.
- 7- Remplissage des moules en deux couches qui subissent sur une table à chocs **60 secousses** en **60 secondes** par couche.
- 8- Démoulage et conservation des échantillons à l'aire libre (20°C).

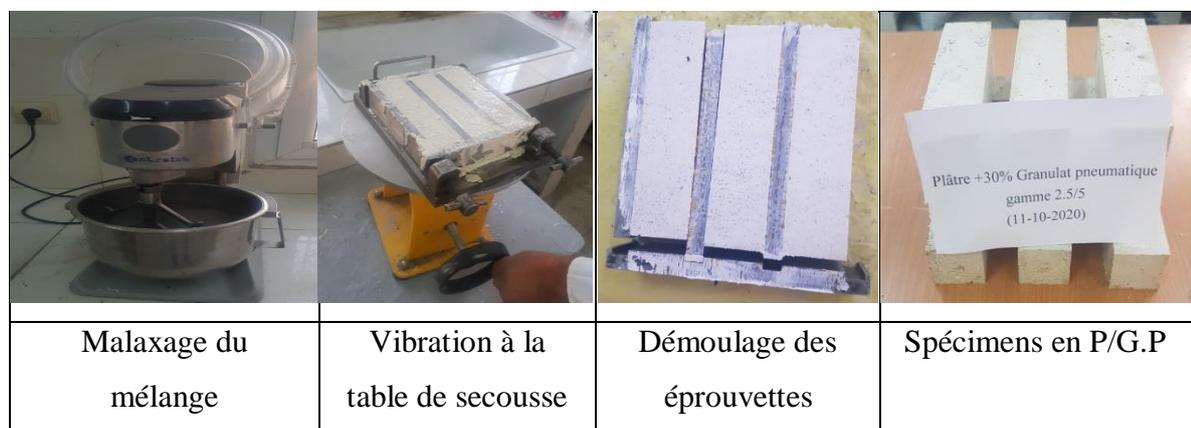


Figure III-6 : étapes de confection des composites à base de P/G.P

III.3.1.2 Caractérisations mécaniques des différents composites réalisés

Les essais de caractérisation mécanique sur les spécimens réalisés notamment à la compression et à la flexion, est une étape cruciale dans notre étude expérimentale. Les essais mécaniques sont réalisés Selon la **norme [196-1] [70]** sur des éprouvettes prismatiques (**4x4x16 cm³**) à flexion et sur des éprouvettes cubiques (**4x4x4 cm³**) à la compression

➤ **L'essai de flexion 3-points :**

Il consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique de section carrée (4cm de côté) et de 10cm de portée à une charge concentrée appliquée au milieu (**figure III.7**).

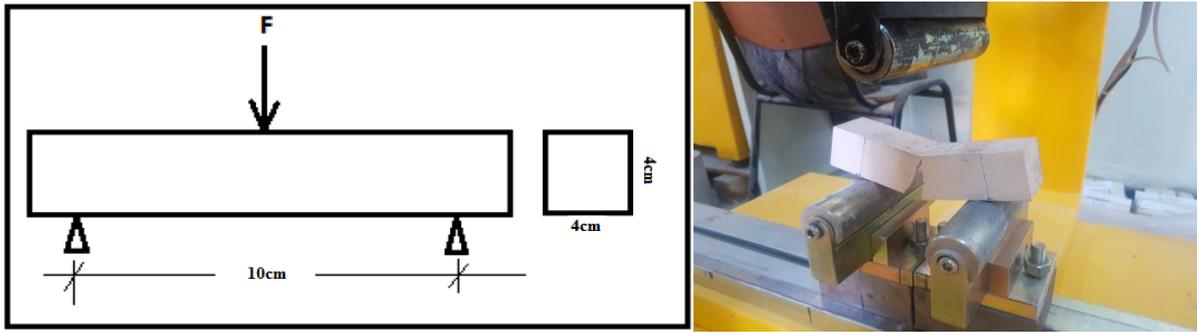


Figure III-7 : Essai de flexion 3 points sur éprouvette prismatique (4x4x16) cm³.

Cet essai est exécuté par une machine de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à **10 KN** sur les éprouvettes de plâtre (4x4x16) cm³.

La résistance à la rupture par flexion est donnée au moyen de la formule suivante :

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{b^3}$$

Rf: Résistance à la flexion en (MPa);

Ff: Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N);

L : Longueur qui sépare les deux appuis en (mm);

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.



Figure III-8 : éprouvettes à base de (P/G.P) après la rupture à la flexion



Figure III-9 la distribution de granulat pneumatique sur le plan de rupture

➤ **b) Essai de résistance à la compression :**

L'essai de compression simple est l'un des plus significatifs pour caractériser la qualité du matériau étudié. Cet essai s'effectue par chargement croissant jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Pour l'essai de résistance en compression la machine utilisée est de marque (RP 3000 XP, qui est une presse automatique avec une table de commande a une capacité de 3000 KN conforme à la norme **EN 196-1**], cette presse composée de deux plateaux l'un fixe et l'autre mobile avec une vitesse de la charge de (0,6 Mpa/s).



Figure III-10 : la presse utilisée avec la table commande

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion ont été rompus en compression comme indiqué sur la Figure.

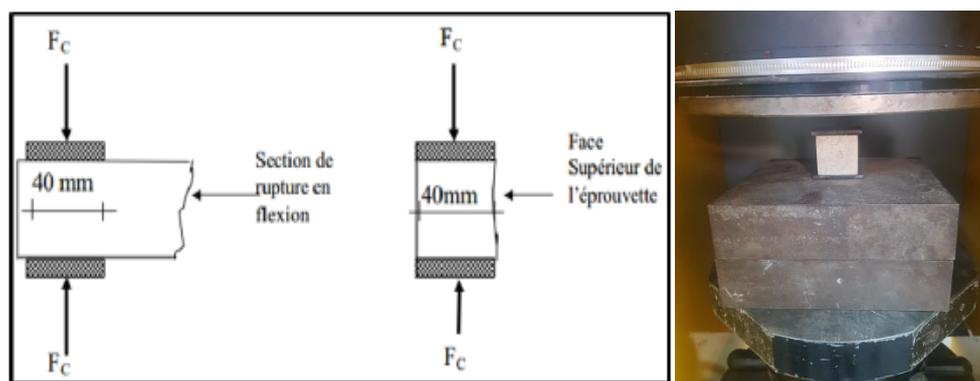


Figure III-11 : Dispositif de rupture en compression.

L'éprouvette est placée au milieu du plateau de la presse comme montre la **Figure III.11**, la surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de 16 cm² (4×4 cm²).

La résistance à la compression est donnée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Avec :

R_c: Résistance à la compression en MPa.

F_c: Charge à la rupture en N.

➤ Les forces de rupture :

Les forces de rupture sont affichées sur l'écran de la table de commande.

III.3.2 Formulation des mortiers

III.3.2.1 confection du mortier ordinaire (de référence)

Nous allons confectionner un mortier de référence sans adjuvants, dont la composition est inspirée de celle du mortier normal défini par la norme **EN 196-1**, avec une quantité d'eau ajustée afin d'obtenir une consistance de référence. Les procédures suivies pour la préparation des mortiers, la confection, des éprouvettes, de stockage, et les mesure des résistances en compression vont être réalisées conformément à la norme **EN 196-1**. [70]

III.3.2.2 : Constituants du mortier normal : (ciment = 1/3 sable), (E/C=0.55)

- Ciment = 450 g
- Sable = 1350 g
- Eau = 250 g

III.3.2.3 compositions des différents mortiers à base des granulats pneumatiques (MGDP).

La détermination des constituants de (MGDP), notamment la quantité d'eau optimale pour les différents mélanges a été spécifiée expérimentalement, en utilisant l'essai de la caractérisation rhéologique à la table de secousse pour chaque type de mélange.

✓ **Exemple de calcul (GDP 15 % gamme 0/2.5mm) :**

Volume de l'éprouvette = $4 \times 4 \times 16 = 256 \text{cm}^3$

Volume de moule = $256 \times 3 = 768 \text{cm}^3$

Volume (G D P) = $15\% \times 768 = 115.2 \text{cm}^3$

Nous avons opté pour la masse (GDP) :

$$\begin{array}{l} 1 \text{cm}^3 \quad \longrightarrow \quad 1.155 \text{g} \\ 115.2 \text{cm}^3 \quad \longrightarrow \quad X \end{array} \quad \longrightarrow \quad X = 1.155 \times 115.2 / 1$$

$X = 133.056 \text{g}$

$M(\text{G D P } 15\%) = 113.056 \text{ g}$

La masse de sable = $1350 \times 85\% = 1147.5 \text{g}$

La masse de ciment = $450 \times 85\% = 382.5 \text{g}$

La quantité d'eau = $250 \times 85\% = 212.5 \text{ml}$

Tableau III-9. les différentes proportions des mortiers réalisés

Mélange de mortier	constituants				
	Sable (g)	GDP (g)		Ciment (g)	Eau (g)
		Gamme (0/2.5) mm	Gamme (2.5/5) mm		
M T	1350			450	250
M G D P 15%	1147.5	132.48	108.288	382.5	243
M G D P 30%	945	264.96	216.576	315	235
M G D P 45%	742.5	397.44	324.86	247.5	150

III.3.2.4. procédés de réalisation de différents composites à base de (MGDP)

Après Pesage tous les composants du mortier pour chaque formulation le malaxage ont été effectués à l'aide d'un malaxeur d'une capacité de 5 litres composé d'un récipient et d'un batteur en acier inoxydable, pouvant fonctionner à une vitesse lente de 140 tours par minute et une vitesse rapide de 285 tours par minute

Les étapes de malaxage sont

- Introduction les composants solides et secs dans le malaxeur (ciment, sable, granulats de caoutchouc) puis malaxage pendant trois (3) minutes à vitesse lente (1) afin d'assurer une bonne dispersion des G.D.P. parmi les éléments traditionnels du mortier.
- Introduction du l'eau et faire le malaxage pendant 2 minutes à vitesse lente.
- arrêter le malaxeur, démonter le batteur, puis racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie de mortier n'échappe au malaxage
- Après remontage du batteur reprendre le malaxage pendant 2mn a vitesse rapide



Figure III-12 : malaxage des constituants

III.3.2.5.confection des éprouvettes (4x4x16 cm³)

Les étapes de coulage des éprouvettes sont :

- 1^{er}étape : graisse les moules par une huile pour faciliter le démoulage après 24 heur de leur coulage
- 2^{ème} étape : rempli la moitié du moule que doit être place sur la table à choc, puis vibres les toutes 60 secousses pendant 60 secondes (60coup/min) afin d'éliminer les vides
- 3^{ème}étape : rempli totalement le moule puis vibrer le tout une deuxième fois 60 secousse en 60 seconde
- 4^{ème}étape : l'arasement la face supérieur des éprouvettes qui doit être lisse est bien fini



Figure III-13: coulage des éprouvettes (4x4x16 cm³) à base de (MGDP).

III.3.2.6 Conservation des éprouvettes

Après le démoulage des éprouvettes, elles seront conservées à l'aire libre (20°C)



Figure III-14 démoulage et Conservation des éprouvettes

III.3.2.7. Les différents essais réalisés

III.3.2.7.1. Essai de caractérisation rhéologique des mortiers

A) Essai de maniabilité : étalement à la table à secousses NF EN 1015-3 [71]

Pour réaliser l'essai d'étalement du mortier à l'état frais sur une table à secousses (**figure.15.a**).

Le mortier frais étant placé dans un cône de diamètre inférieur : **100 mm**, diamètre supérieur : **70 mm** et de hauteur : **60 mm**, en deux couches compactées à l'aide d'une tige métallique.

Après enlèvement du cône, la table subit **30 secousses** en **30 secondes** et la valeur de l'étalement considéré, constitue la moyenne de la mesure de l'étalement du mélange sur deux directions perpendiculaires (**figure.15.b**);

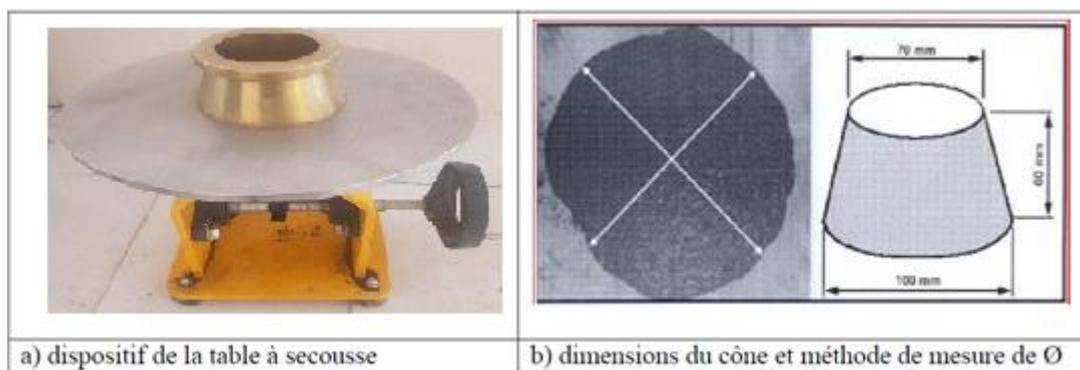


Figure III-15: Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais

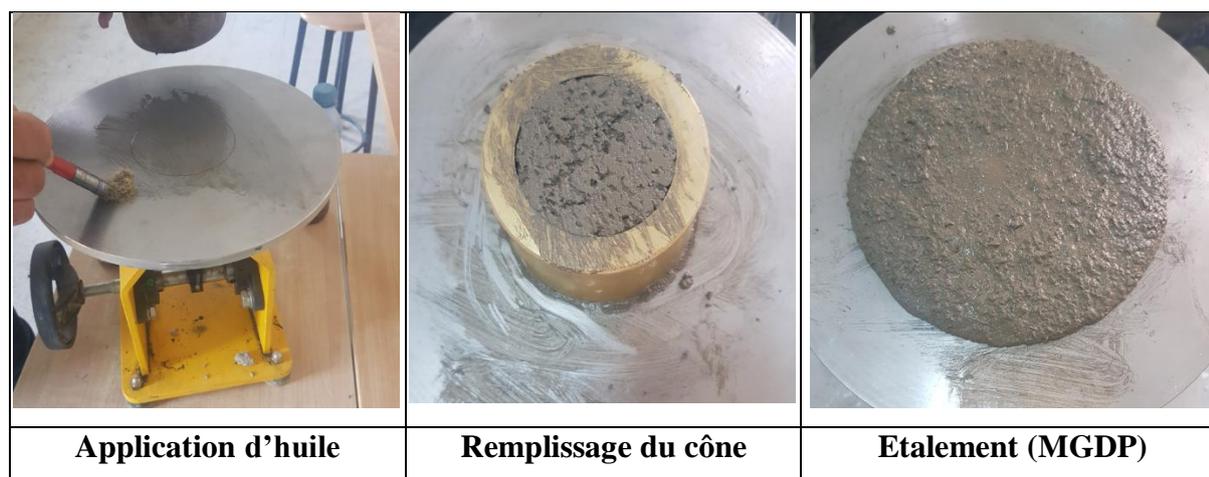


Figure III-16 essai de l'étalement à la table de secousse

Le calcul de l'étalement à la table à secousse se fait par la formule suivante :

$$E\% = 100(D_r - D_i)/D_i$$

Avec : D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

La classification du mortier en termes d'étalement se fait selon les recommandations du (tableau.III.10).

Tableau III-10: Taux d'étalement à la table à secousse.

L'ouvrabilité	Etalement à la table à secousse (%)
Très ferme	10-30
Ferme	30-60
Normal (plastique)	60-80
Mou	80-100
Très mou a liquide	>100

III.3.2.7.2. Essais réalisés à l'état sec

A) Essais mécaniques : [70]

Comme nous avons déjà procédé dans le cas des essais mécaniques sur les éprouvettes de plâtre. Rappelons à l'âge requis, les éprouvettes sont retirées de leur milieu de conservation, elles sont brisées en deux moitiés par flexion et chaque moitié est soumise à l'essai de compression

a) Essais de flexion

Les résistances à la traction du mortier durci sont prévues à **07,14 et 28** jours sur des éprouvettes prismatique (4X4X16 cm³) en utilisant une machine de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à **10 KN**.



Figure III-17 essai de flexion



Figure III-18 mode de rupture

b) Essais de compression

Les résistances en compression sont prévues à **7.14 et 28** jours sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai de flexion, en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à **3000 KN**. La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes



Figure III-19 mode de rupture à la compression des éprouvettes (4x4x4 cm³)

III.4. Conclusion du chapitre

Dans cette partie nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette recherche ainsi que leurs différentes caractéristiques physiques. Le mode opératoire, ainsi que l'optimisation des mélanges des mortiers et les composite à base de (P/GDP) sont présentés d'une manière détaillée. Des corps d'épreuves en mortiers et en (P/GDP) légers à base des granulats utilisés ont été élaborés, confectionnés et caractérisés sous un chargement de compression uni-axiale et de flexion 3-points. Les différents résultats obtenus seront présentés, illustrés et analysés dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE IV : PRESENTATION DES
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET
DISCUSSION**

IV.1 Introduction

Ce chapitre est totalement consacré à la présentation, interprétation et discussion des différents résultats expérimentaux des essais réalisés sur les deux composites.

IV.2. Résultats des essais du matériau plâtre

IV.2.1. Résultats essais physiques

A. La masse volumique

Le tableau IV.1, résume les résultats des essais physiques, à savoir les masses volumiques à l'état durci de chaque mélange élaboré aux âges (7 ,14 et 28 jours), il y'a lieu de signaler que les résultats représentent la moyenne de trois mesures dans chaque cas.

Tableau IV-1.: Masse volumique de deux gammes de déchets pneumatiques à l'état durci

Mélange	Masse volumique (g/cm³)		
Etat	état durci		
Age	7j	14j	28j
plâtre témoin	1.60	1.48	1.46
Plâtre +15% G.P Gamme (0/2.5)	1.48	1.42	1.35
Plâtre +30% G.P Gamme (0/2.5)	1.38	1.33	1.32
Plâtre +45% G.P Gamme (0/2.5)	1.29	1.19	1.19
Plâtre +15% G.P Gamme (2.5/5)	1.51	1.45	1.38
Plâtre +30% G.P Gamme (2.5/5)	1.45	1.37	1.33
Plâtre +45% G.P Gamme (2.5/5)	1.34	1.28	1.28

L'histogramme illustré par la figure IV.1 représente les variations des masses volumiques des mélanges étudiés, en fonction du temps à savoir 7 ,14 et 28 jours,

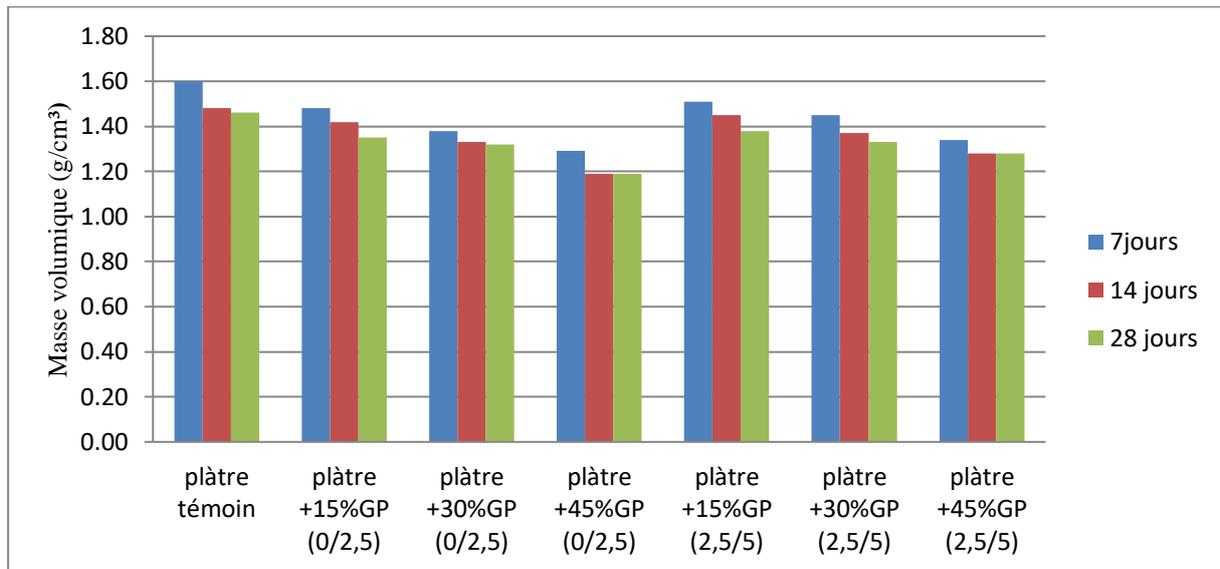


Figure IV-1.: Variation des masses volumiques des différents types de plâtre en fonction du Temps

a. Analyse des résultats d'essais physiques

Les résultats permettent de formuler les conclusions suivantes :

- La masse volumique diminue en fonction de temps (âge) 7jrs > 14 jrs > 28jrs pour la majorité des mélanges étudiés, sauf pour les mélanges avec 45% GDP à l'âge de 14 et 28 jrs la masse volumique reste constante pour les deux gammes
- La masse volumique diminue lorsque le pourcentage des granulats pneumatiques augmente pour les deux gammes [(0/2.5),(2.5/5)mm]
- Les masses volumiques à l'état sec des mélanges de gamme (0/2.5) sont inférieures à des mélanges de gamme (2.5/5)mm

IV.2.2. Résultats des essais mécaniques

A. Essais de flexion

Le tableau IV.2 résume les résultats des essais mécaniques en flexion des éprouvettes à base des différents mélanges élaborés aux âges (7,14 et 28 jours), les résultats représentent la moyenne de trois essais dans chaque mélange étudié.

Tableau IV-2.: Résultats des essais mécaniques (flexion)

Mélange	Résistance à la flexion (MPa) (7 Jours)	Résistance à la flexion (MPa) (14 Jours)	Résistance à la flexion (MPa) (28 Jours)
plâtre témoin	3	3.03	4.33
Plâtre +15% G.P Gamme (0/2.5)	2.06	2.16	2.73
Plâtre +30% G.P Gamme (0/2.5)	1.6	1.63	2.23
Plâtre +45% G.P Gamme (0/2.5)	1.36	1.4	1.8
Plâtre +15% G.P Gamme (2.5/5)	2.1	2.6	2.76
Plâtre +30% G.P Gamme (2.5/5)	1.66	1.9	2.73
Plâtre +45% G.P Gamme (2.5/5)	1.43	1.76	1.93

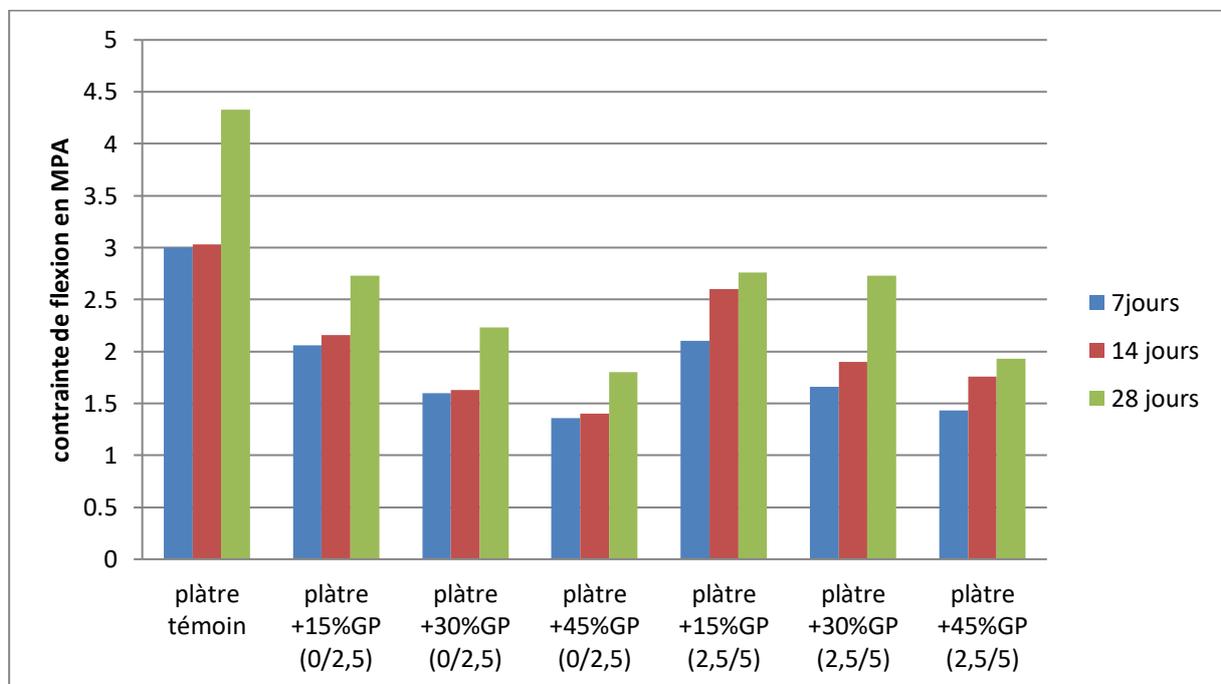


Figure IV-2.: Résistances en flexion des différents mélanges étudiés en fonction du temps

a) Analyse des résultats

A partir des valeurs données dans le tableau IV.2.et l'histogramme des résistances en flexion des différents mélanges étudiés en fonction du temps illustré par la figure IV.2.on observe :

- Une réduction de la résistance à la flexion suite à l'augmentation des pourcentages des granulats pneumatiques pour les deux gammes
- Pour les différents pourcentages, la gamme (2.5/5)mm présente une résistance supérieure à la gamme (0/2.5)mm

B. Essais de compression

Le tableau IV.3 résume les résultats des essais mécaniques en compression des éprouvettes des différents mélanges élaborés aux âges (7, 14 et 28 jours), les résultats représentent la moyenne de trois essais dans chaque mélange étudié.

Tableau IV-3: Résultats des essais de compression

Mélange	Résistance à 7j (MPa)	Résistance à 14j (MPa)	Résistance à 28j (MPa)
plâtre témoin	12.3	12.76	18.93
Plâtre +15% G.P Gamme (0/2.5)	8.13	9	11.2
Plâtre +30% G.P Gamme (0/2.5)	6.63	7.3	8.8
Plâtre +45% G.P Gamme (0/2.5)	5.8	6.26	6.9
Plâtre +15% G.P Gamme (2.5/5)	8.9	10.96	12.06
Plâtre +30% G.P Gamme (2.5/5)	7.2	8.13	10.9
Plâtre +45% G.P Gamme (2.5/5)	6.56	7.36	7.76

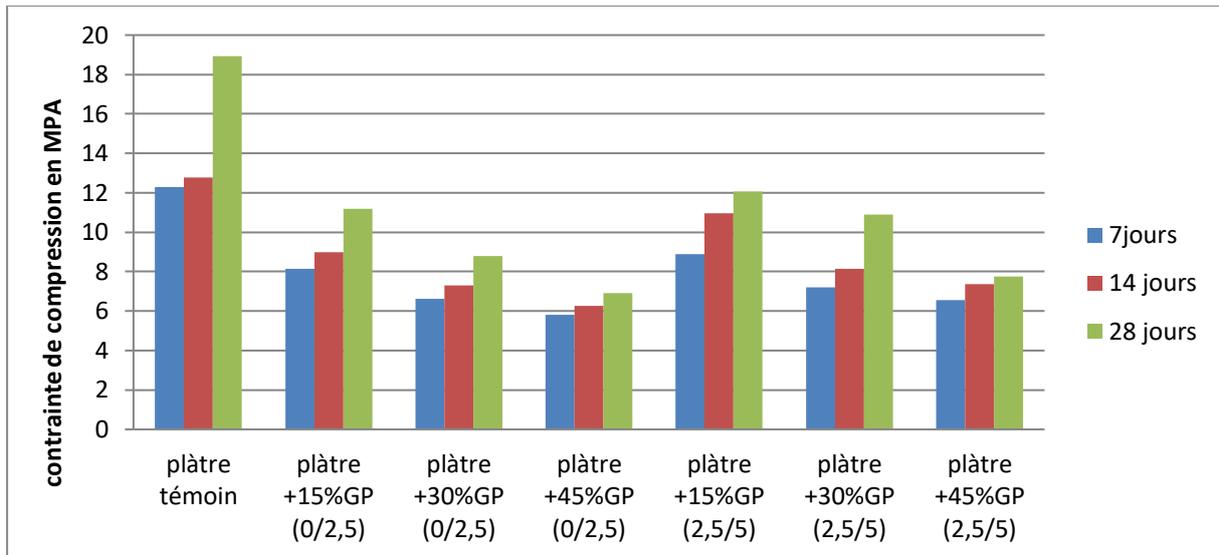


Figure IV-3 Résistances en compression des mélanges étudiés en fonction du temps

a. Remarques

Les mêmes remarques formulées précédemment sont valables aussi pour les résultats en compression.

Tableau IV-4: Les différents résultats des essais physico-mécaniques de l'ensemble des mélanges étudiés.

		7 jours			14 jours			28 jours		
Réf	Numéro	MV g/cm ³	Flexion	compression	MV g/cm ³	Flexion	compression	MV g/cm ³	Flexion	compression
plâtre témoin	1	1.62	2.7	14.3	1.51	3.1	13.9	1.49	5.7	20.6
	2	1.58	3.3	13.1	1.46	3.1	12.2	1.47	3.7	19.8
	3	1.59	3	9.5	1.46	2.9	12.2	1.43	3.6	16.4
	Moyenne	1.6	3	12.3	1.48	3.03	12.76	1.46	4.33	18.93
Plâtre +15% G.P G (0/2.5)	1	1.56	2.2	8.2	1.48	2.3	10.3	1.38	4	12.5
	2	1.42	1.8	8	1.36	2.2	8.6	1.37	2.1	11
	3	1.47	2.2	8.2	1.42	2	8.1	1.31	2.1	10.1
	Moyenne	1.48	2.06	8.13	1.42	2.16	9	1.35	2.73	11.2
Plâtre +30% G.P G (0/2.5)	1	1.39	1.6	6.6	1.33	1.8	7.4	1.33	2.7	8.9
	2	1.38	1.5	6.8	1.36	1.6	7.3	1.32	2	8.9
	3	1.36	1.7	6.5	1.32	1.5	7.2	1.32	2	8.6
	Moyenne	1.38	1.6	6.63	1.33	1.63	7.3	1.32	2.23	8.8
Plâtre +45% G.P G (0/2.5)	1	1.31	1.4	5.7	1.20	1.5	6.3	1.19	2	6.9
	2	1.29	1.4	5.8	1.21	1.4	6.3	1.20	1.7	6.9
	3	1.28	1.3	5.9	1.18	1.3	6.2	1.19	1.7	6.9
	Moyenne	1.29	1.36	5.8	1.19	1.4	6.26	1.19	1.8	6.9
Plâtre +15% G.P G (2.5/5)	1	1.55	2.3	8.8	1.45	3	11.5	1.39	3.1	12.9
	2	1.50	2.1	9	1.45	2.5	10.8	1.38	2.8	12
	3	1.47	1.9	8.9	1.46	2.3	10.6	1.38	2.4	11.3
	Moyenne	1.51	2.1	8.9	1.45	2.6	10.96	1.38	2.76	12.06
Plâtre +30% G.P G (2.5/5)	1	1.46	1.5	7.2	1.38	2.2	8.8	1.34	2.9	11.8
	2	1.45	1.5	7.1	1.36	2.1	8	1.33	2.9	10.6
	3	1.44	2	7.3	1.36	1.4	7.6	1.33	2.4	10.3
	Moyenne	1.45	1.66	7.2	1.37	1.9	8.13	1.33	2.73	10.9
Plâtre +45% G.P G (2.5/5)	1	1.35	1.4	6.6	1.28	1.8	7.5	1.28	2	7.6
	2	1.34	1.3	6.6	1.31	1.8	7.5	1.28	1.9	7.8
	3	1.32	1.6	6.5	1.27	1.7	7.1	1.29	1.9	7.9
	Moyenne	1.34	1.43	6.56	1.28	1.76	7.36	1.28	1.93	7.76

IV.2.3. Interprétation des résultats

A partir des résultats des essais physico-mécaniques, on constate que :

➤ L'incorporation des granulats pneumatiques avec différents taux dans les composites de plâtre engendre une diminution de la masse volumique sèche, à 28 j comparativement au plâtre témoin. La diminution de la masse volumique sèche est de l'ordre de 7.53%, 9.59%, et 18.49% pour les dosages de 15%, 30%, et 45% pour la gamme (0/2.5)mm, et une réduction de l'ordre de 5.48%, 8.90%, et 12.33% pour les dosages de 15%, 30%, et 45% pour la gamme (2.5/5) respectivement.

Cette réduction de la masse volumique sèche peut être expliquée par la faible densité de granulats pneumatiques

➤ La variation de la masse volumique sèche dans les composites à base de granulats pneumatiques montre que la gamme (0/2.5)mm donne une faible valeur par rapport à la gamme (2.5/5)mm, ceci montre qu'il y a des vides inter-granulaires (des pores existent dans les granulats pneumatiques)

➤ L'ensemble des essais mécaniques montre que le plâtre témoin représente un comportement mécanique acceptable, par contre les composites à base de granulats pneumatiques on constate une baisse de la résistance à la flexion et à la compression.

➤ Pour le cas de flexion à 28j par rapport au plâtre de référence, les composites de gamme (0/2.5) mm pour les dosages 15%, 30%, et 45% présentent une chute de l'ordre de 36.95%, 48.50%, et 58.43%, respectivement, et 36.26%, 36.95%, et 55.43% pour les dosages 15% ; 30% ; et 45% de la gamme (2.5/5).

➤ Pour la compression on a une réduction de l'ordre 40.83% ; 53.51% : et 63.55% pour les dosages 15% ; 30% : et 45% de la gamme (0/2.5), et 36.29% ; 42.42% ; et 59.01% pour les dosages 15% : 30% : et 45% pour la gamme (2.5/5) respectivement. Cela peut être expliqué par la faible adhérence entre la matrice de plâtre et le granulats pneumatique qui tend à augmenter la porosité dans la matrice et aussi la rigidité faible du granulats pneumatique ;

➤ Les composites à base de granulats pneumatiques de la gamme (0/2.5) mm présentent une résistance faible comparativement au composite à base de granulats pneumatiques de la gamme (2.5/5), celle-ci est dû aux vides entre la matrice et les granulats pneumatiques

➤ A la lumière de ces résultats on peut déduire qu'il existe deux types des porosités :

- porosité de la matrice
- porosité existante à l'intérieur des granulats pneumatiques

IV.3.Résultat des essais sur les mortiers étudiés

IV.3.1.Etat frais

IV.3.1.1. La Maniabilité

Le tableau **IV.5** résume les résultats des mesures de l'étalement pour les différentes formulations de mortier considéré.

Tableau IV-5: Valeurs d'étalement des mortiers à base de granulats pneumatiques

Type de Mortier	N°	l'étalement (%)
Mortier témoin	1	75
	2	80
	3	75
	Moyenne	76.6
Mortier +15% G.P Gamme (0/2.5)	1	65
	2	75
	3	80
	Moyenne	73.3
Mortier +30% G.P Gamme (0/2.5)	1	61
	2	63
	3	62
	Moyenne	62
Mortier +45% G.P Gamme (0/2.5)	1	65
	2	61
	3	63
	Moyenne	63
Mortier +15% G.P Gamme (2.5/5)	1	73
	2	80
	3	75
	Moyenne	76
Mortier +30% G.P Gamme (2.5/5)	1	70
	2	75
	3	80
	Moyenne	75
Mortier +45% G.P Gamme (2.5/5)	1	60
	2	65
	3	60
	Moyenne	61.6

IV.3.2 l'état durci

IV.3.2.1.Résultats des essais physiques

a) La masse volumique

Le tableau IV.6 suivant, résume les résultats des essais physiques, à savoir les masses volumiques à l'état durci de chaque mortier élaboré aux âges 7 ,14 et 28 jours, il y'a lieu de signaler que les résultats représentent la moyenne de trois mesures dans chaque cas.

Tableau IV-6: Masses volumiques de deux gammes de déchets pneumatiques à l'état durci

Mélange	Masse volumique (g/cm ³)		
	état durci		
	7j	14j	28j
Mortier témoin	2.19	2.18	2.17
Mortier +15% G.P Gamme (0/2.5)	1.94	1.91	1.91
Mortier +30% G.P Gamme (0/2.5)	1.75	1.74	1.73
Mortier +45% G.P Gamme (0/2.5)	1.43	1.42	1.40
Mortier +15% G.P Gamme (2.5/5)	2.01	1.99	1.97
Mortier +30% G.P Gamme (2.5/5)	1.81	1.79	1.78
Mortier +45% G.P Gamme (2.5/5)	1.56	1.55	1.55

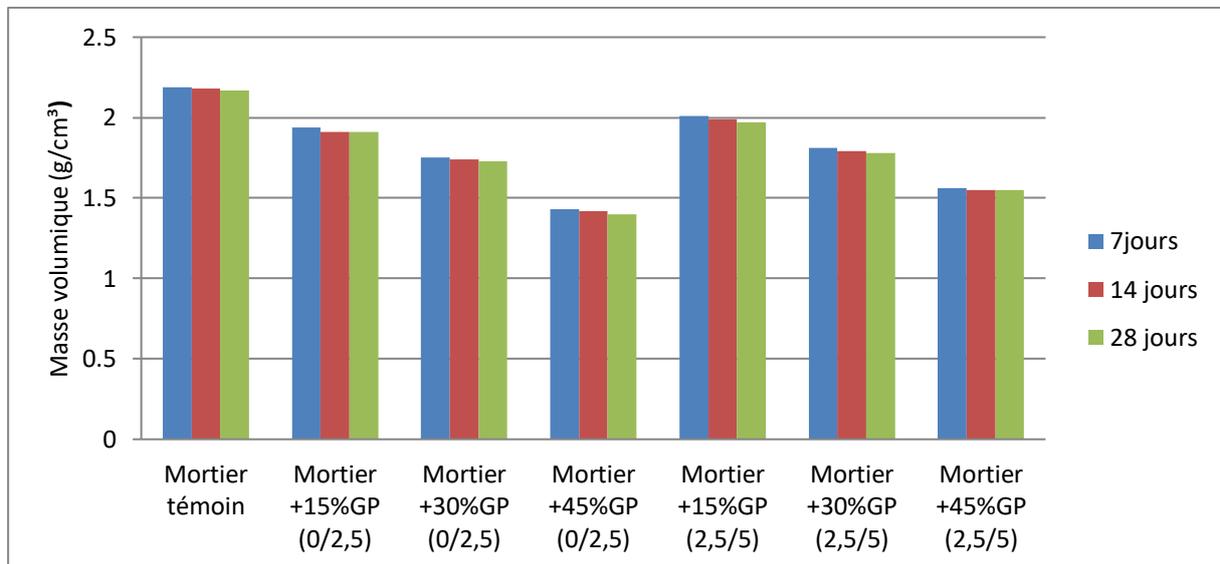


Figure IV-4: Variation des masses volumiques des différents types de Mortier en fonction du temps

b. Remarques sur les résultats d’essais physiques

La figure IV.4 : montre que :

- La masse volumique à l’état durci des mortiers élaborés diminue avec l’augmentation du taux de substitutions en granulat pneumatique
- A chaque fois qu’on augmente la classe granulaire de GDP pour différents pourcentages, la masse volumique augmente
- La masse volumique diminue avec l’âge

IV.3.2.2. Résultats des essais mécaniques

a) Essais de flexion

Le tableau IV.7 suivant, résume les résultats des essais mécaniques en flexion des éprouvettes des différents Mortiers élaborés aux âges 7, 14 et 28 jours, les résultats représentent la moyenne de trois essais dans chaque Mortier étudié

Tableau IV-7 : Résultats des essais de flexion

Mélange	Résistance à 7j MPa	Résistance à 14 j MPa	Résistance à 28j MPa
Mortier témoin	4.53	4.73	6.2
Mortier +15% G.P Gamme (0/2.5)	2.1	2.43	2.93
Mortier +30% G.P Gamme (0/2.5)	1.76	1.8	2.4
Mortier +45% G.P Gamme (0/2.5)	1.3	1.5	1.6
Mortier +15% G.P Gamme (2.5/5)	2.16	2.3	2.83
Mortier +30% G.P Gamme (2.5/5)	1.8	2	2.1
Mortier +45% G.P Gamme (2.5/5)	1.46	1.7	1.73

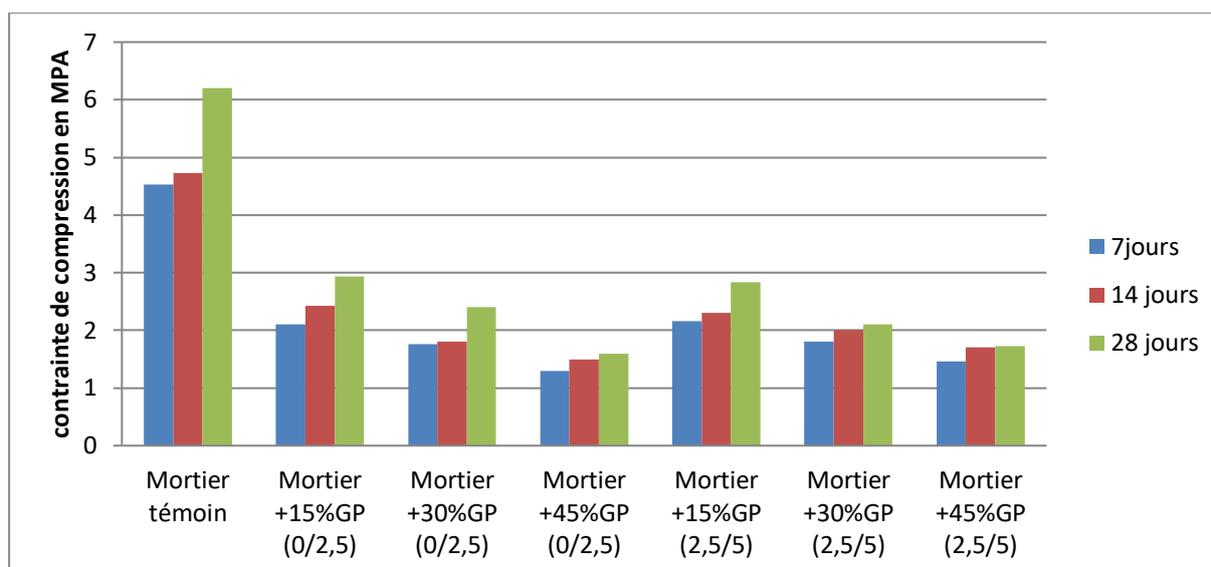


Figure IV-5 : Résistances en flexion des différents Mortiers étudiés en fonction du temps,

b) Essais de compression

Le tableau IV.8 suivant, résume les résultats des essais mécaniques en compression des éprouvettes des différents Mortiers élaborée aux âges 7, 14 et 28 jours. Les résultats représentent la moyenne de trois essais dans chaque Mortier étudié.

Tableau IV-8: Résultats des essais de compression

Mélange	Résistance à 7j MPa	Résistance à 14j MPa	Résistance à 28j MPa
Mortier témoin	32.6	33.46	34.53
Mortier +15% G.P Gamme (0/2.5)	11.26	13.23	15.83
Mortier +30% G.P Gamme (0/2.5)	8	9.03	10.23
Mortier +45% G.P Gamme (0/2.5)	6.1	6.36	6.73
Mortier +15% G.P Gamme (2.5/5)	13.16	15.2	16.36
Mortier +30% G.P Gamme (2.5/5)	8.3	10.53	10.63
Mortier +45% G.P Gamme (2.5/5)	6.6	6.7	7.13

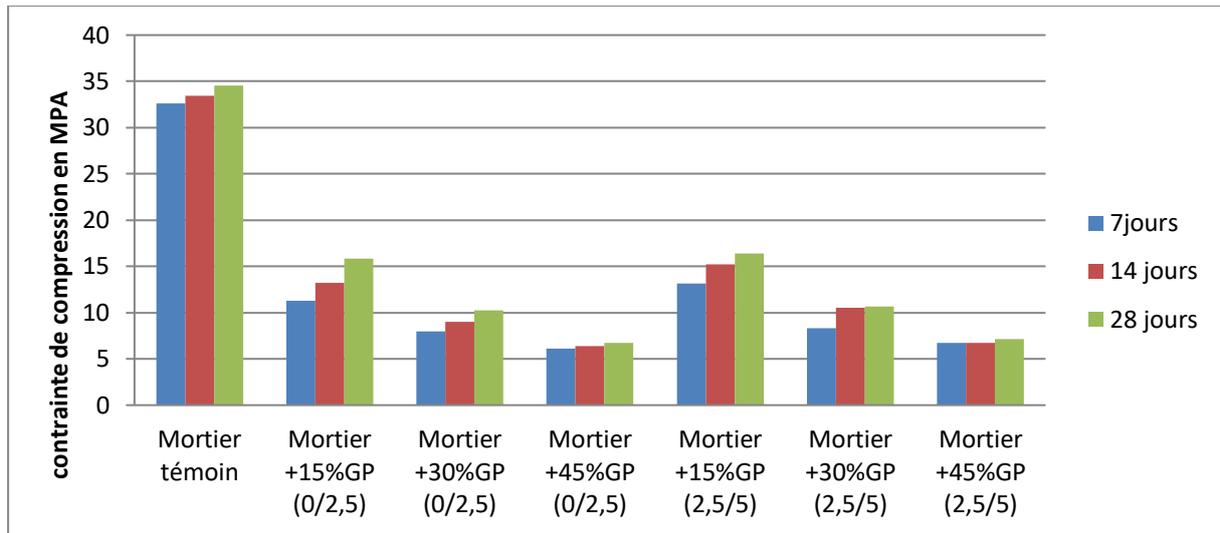


Figure IV-6; Résistances en compression des Mortiers étudiés en fonction du temps

D'après les figures IV.5 et IV.6 on constate :

- ✓ Une chute de la résistance mécanique des mortiers à base de GDP comparativement ou mortier témoin .
- ✓ Lorsque les dosage en granulats pneumatiques augmente, les résistances en flexion et en compression diminuent
- ✓ Les mortiers à base des granulats pneumatiques de la gamme (2.5/5)mm présentent presque la même résistance des mortiers avec la gamme (0/2.5)mm

Tableau IV-9:Résultats des essais physico-mécaniques de l'ensemble des Mortiers étudiés

		7 jours			14 jours			28 jours		
Réf	N°	MV (g/cm ³)	Flexion	compression	MV (g/cm ³)	Flexion	compression	MV (g/cm ³)	Flexion	compression
Mortier témoin	1	2.2	4.8	30.8	2.18	4.5	34	2.16	6.6	33.8
	2	2.2	3.8	34.4	2.19	5.6	34	2.19	6	32.2
	3	2.16	5	32.6	2.18	4.1	32.4	2.17	6	37.6
	Moy	2.19	4.53	32.6	2.18	4.73	33.46	2.17	6.2	34.53
Mortier +15% G.P Gamme (0/2.5)	1	1.93	1.7	12.3	1.91	2.5	14	1.90	3.1	16.3
	2	1.95	2	10.6	1.93	2.1	12.1	1.91	3.1	14.6
	3	1.93	2.6	10.9	1.90	2.7	13.6	1.93	2.6	16.6
	Moy	1.94	2.1	11.26	1.91	2.43	13.23	1.91	2.93	15.83
Mortier +30% G.P Gamme (0/2.5)	1	1.75	1.8	7.9	1.74	1.8	8.8	1.72	2.1	10.5
	2	1.75	1.9	7.9	1.73	1.6	8.6	1.73	3.1	9.5
	3	1.75	1.6	8.2	1.75	2.0	9.7	1.74	2	10.7
	Moy	1.75	1.76	8	1.74	1.8	9.03	1.73	2.4	10.23
Mortier +45% G.P Gamme (0/2.5)	1	1.42	1.2	6.3	1.43	1.5	6.3	1.39	1.6	6.4
	2	1.44	1.4	6	1.43	1.5	6.3	1.42	1.5	6.9
	3	1.42	1.3	6	1.41	1.5	6.5	1.38	1.7	6.9
	Moy	1.43	1.3	6.1	1.42	1.5	6.36	1.4	1.6	6.73
Mortier +15% G.P Gamme (2.5/5)	1	2.02	2.2	13.8	1.99	2.6	15.4	1.97	2.5	16
	2	2.00	1.8	13.8	2.00	1.9	15.4	1.96	3.5	16.3
	3	2.00	2.5	11.9	1.99	2.4	14.8	1.96	2.5	16.8
	Moy	2.01	2.16	13.16	1.99	2.3	15.2	1.97	2.83	16.36
Mortier +30% G.P Gamme (2.5/5)	1	1.81	1.9	8.4	1.80	2.0	10.5	1.78	2.3	10.4
	2	1.80	1.7	8.3	1.78	2.1	10.1	1.79	2.1	11
	3	1.80	1.8	8.2	1.78	1.9	11	1.75	1.9	10.5
	Moy	1.81	1.8	8.3	1.79	2	10.53	1.78	2.1	10.63
Mortier +45% G.P Gamme (2.5/5)	1	1.54	1.5	6.6	1.54	1.7	6.6	1.54	1.8	7.2
	2	1.57	1.5	6.6	1.57	1.7	6.7	1.57	1.7	7.1
	3	1.56	1.4	6.6	1.53	1.7	6.8	1.55	1.7	7.1
	Moy	1.56	1.46	6.6	1.55	1.7	6.7	1.55	1.73	7.13

IV.3.3. Interprétation des résultats

- L'analyse des résultats des essais physiques montre que l'augmentation de la substitution des granulats pneumatiques entraîne une réduction de la masse volumique des mortiers, comparativement au mortier témoin à l'âge de 28j , pour le MGD_P de la gamme(0/2.5) mm avec les taux de 15% ;30% et 45% représentent une perte de la masse de l'ordre de 11.98%, ;20.28% ; et 35.48% respectivement;
- Pour les mortiers à base de granulats pneumatiques de la gamme (2.5/5) avec des taux de 15% ;30% et 45% représente une perte de la masse de l'ordre 9.22%, ;17.97% et 28.57% respectivement ;
- les granulats pneumatiques présentent une faible densité ;
- La masse volumique sèche des mortiers à base de granulats pneumatiques de la gamme (2.5/5)mm diminue plus que pour le cas avec la gamme (0/2.5)mm ,
- L'augmentation de la substitution des granulats pneumatiques dans le mortier influence négativement sur les comportement mécanique . La résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats pneumatiques :
à l'âge de 28 j, pour MGD_P gamme (0/2.5) la perte de la résistance varie de l'ordre 52.74% ;61.29% et 74.19% pour des pourcentages de 15% ;30% et 45% respectivement , et de l'ordre de 54.35% ; 66.13% ; et 72.10% pour les pourcentages de 15% ; 30% ; et 45%) pour la gamme (2.5/5)mm
- Pour les MGD_P de la gamme(0/2,5), la perte de la résistance en compression varie de l'ordre de 54.16% ;70.37% et 80.51% pour des pourcentages de 15%;30% et 45% respectivement, et de l'ordre de 52.62% ; 69.22% ; et 79.35% pour les pourcentages de 15% ; 30% ; et 45% avec la gamme (2.5/5) mm.
- Les facteurs essentiels qui participent dans la réduction des caractéristiques mécaniques sont :
 - la faible adhérence entre la pâte de ciment et les granulats pneumatiques, ce qui crée des hétérogénéités dans les matériaux étudiés et augmente la porosité.
 - La faible rigidité des granulats pneumatiques.
- La réduction de la classe granulaire des déchets pneumatiques engendre une perte de la résistance mécanique ,

IV.4.Conclusion du chapitre

Les différents résultats des essais réalisés nous permettent de mieux comprendre les comportements physico-mécaniques des matériaux étudiés. Les conclusions préliminaires formulées sont :

- L'introduction des granulats pneumatiques dans la composition des matériaux entraîne une perte de la masse volumique sèche. cette réduction est beaucoup plus importante pour le mortier que pour le plâtre ;
- La résistance mécanique diminue plus pour le matériau 'mortier' que pour le plâtre,
- La réduction des résistances est due essentiellement à la porosité observée dans les deux matériaux composites (mortier et plâtre) engendrée par l'incorporation des granulats pneumatiques ;
- Enfin, le comportement mécanique peut-être amélioré en limitant les dosages et en augmentant la classe granulaire.

Conclusion générale

L'étude technique en génie civil vise à identifier toutes les contraintes ayant un impact direct sur les éléments structuraux et la structures elle-même, principalement la justification de la stabilité et la rigidité, le dimensionnement, l'économie, et la durabilité. L'estimation des sollicitations est une étape cruciale pour l'optimisation dimensionnelle et la justification des éléments structuraux.

L'utilisation des matériaux légers dans la construction n'est pas nouvelle en soit. Tel que ces matériaux induisent la diminution des sollicitations au niveau des éléments structuraux, ainsi que la réduction du poids total de l'ouvrage, en outre, sont dotés par des performances spécifiques telles que l'isolation thermiques et acoustique, et qui permettent une conception moderne à faible coût.

Dans notre étude expérimentale nous avons opté pour l'utilisation des granulats des déchets pneumatiques comme alternatifs aux granulats minéraux classiques pour la réalisation de nouveaux matériaux composites légers à base d'une matrice hydraulique notamment le mortier ordinaire et le plâtre, les granulats légers utilisés dans notre recherche ont été choisis selon leur faible densité et leurs caractéristiques physico-mécaniques spécifiques. Ces matériaux composites légers sont dotés par le caractère d'isolation qui induit la diminution de la consommation d'énergie au niveau des bâtiments.

Afin d'optimiser les taux des constituants de nos composites à base des granulats des déchets pneumatiques, il est donc primordial de connaître les propriétés des constituants de ces composites, à cet effet, l'étude expérimentale réalisée nous a permis de déterminer les caractéristiques physiques des granulats pneumatiques. En effet, il a été conclu qu'ils se caractérisent essentiellement par leur faible masse volumique absolue qui varie entre (**940 à 1155 kg/m³**), qui est largement inférieure par rapport à la masse volumique des granulats ordinaire (**2500kg/m³**). Ainsi que la détermination de la formulation appropriée qui permet d'obtenir des mélanges pour mortiers légers et (**P/GDP**) dotés par des caractéristiques mécaniques intéressantes, en présentant une faible masse volumique.

Les différents résultats expérimentaux obtenus notamment les essais de la caractérisation physique des composites réalisés, montrent une chute remarquable de la densité du mortier et du plâtre à base des granulats des déchets pneumatiques à **28 jours**, respectivement (du **1400 à 1970 kg/m³**) et (du **1190 à 1350 kg/m³**), selon la fraction et le dosage en granulats pneumatiques comparativement aux éprouvettes similaires à base du mortier ordinaire et du plâtre, respectivement sont environ (**2170kg/m³**) et (**1460 kg/m³**). Les meilleures éprouvettes élaborées à base de différentes gammes et proportions, ayant des caractéristiques mécanique en compression et en flexion élevées sont définies.

Les essais mécaniques au laboratoire effectués sur les différentes éprouvettes ont permis de déterminer la résistance à la compression et à la flexion des différents composites réalisés.

A titre indicatif, d'après les résultats expérimentaux obtenus, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des spécimens du mortier et plâtre allégés, notamment à la flexion 3-points sur des éprouvettes prismatiques de $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$ qui donnent à 28 jours ; $(\sigma_{f,max} = 2.93 \text{ MPA})$ et $(\sigma_{f,max} = 2.83 \text{ MPA})$ respectivement pour la gamme $(0/2.5\text{mm})$ et $(2.5/5\text{mm})$ des composites à base du mortier ordinaire. Et $(\sigma_{f,max} = 2.73 \text{ MPA})$ et $(\sigma_{f,max} = 3.1 \text{ MPA})$ respectivement pour la gamme $(0/2.5\text{mm})$ et $(2.5/5\text{mm})$ des composites à base du plâtre. La compression uni-axiale des éprouvettes cubiques de $(4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3)$ donne $(\sigma_{c,max} = 15.83 \text{ MPA})$ et $(\sigma_{c,max} = 16.36 \text{ MPA})$ respectivement pour la gamme $(0/2.5\text{mm})$ et $(2.5/5\text{mm})$ des composites à base du mortier ordinaire et $(\sigma_{c,max} = 11.2 \text{ MPA})$ et $(\sigma_{c,max} = 12.9 \text{ MPA})$ respectivement pour la gamme $(0/2.5\text{mm})$ et $(2.5/5\text{mm})$ des composites à base du plâtre, du fait que selon la norme (rilem lc2 vol.11,1978) les résistances données par nos différents essais sont adaptées à l'utilisation dans la construction.

Afin de tirer des conclusions encore plus précises, il serait intéressant en **perspectives** de :

- ✓ Amélioration des performances, en utilisant les adjuvants, et les additions.
- ✓ Conduire des essais thermiques, acoustique, etc ;
- ✓ Réaliser des essais de durabilité.

VI.bibliographique

- [1] Chazara, P., Outils d'élaboration de stratégie de recyclage basée sur la gestion des connaissances: application au domaine du génie des procédés, 2015.
- [2] BOUKOUR Salima- THÈSE de DOCTORAT : Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco- composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés - Université du 08 Mai 1945 - Guelma –
- [3] Dr. A.MERDAS : Cours de matériaux de construction. U.F.A. de Sétif page 37
- [4] Mémoire de Master -l'Université 8 Mai 1945 Guelma -Thème : Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât: Perspectives pour l'Algérie
- [5] Mémoire de Master -l'Université SAAD DAHLEB DE BLIDA 1-ZAKARIA HAMADACHE
- [6] BONNET S, TURATSINZE A et GRANJU J-L. « Effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment ». Annales du bâtiment et des travaux publics N° 6 2004.
- [7] Abdelhalim AIT IDIR : VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES PNEUMATIQUES USAGÉS NON RÉUTILISABLES
- [8] Rapport du Commissaire Enquêteur, "Décision du tribunal administratif de Rouen du 22 septembre 2015(n° E15 000 088/76) demande d'autorisation relative à l'exploitation d'une unité de broyage de pneumatiques usagés et de caoutchoucs techniques". Janvier 2016.
- [9] Abdelhalim AIT IDIR « VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES PNEUMATIQUES USAGÉS NON RÉUTILISABLES » sonatrach. ERA 2017
- [10] : moussai boubaker, seghirimohamed, « béton compacté avec des ajouts granulats caoutchoucs » mémoire de fin d'étude, juin 2009.

- [11] : ministère de l'industrie de la petite et moyenne entreprise et de la promotion de l'investissement « Etude d'un Projet Industriel de Fabrication d'articles en caoutchouc pour automobiles »
- [12] <http://www.guide-dechets-paca.com/spip.php?rubrique5>, consulté 13-11-16.
- [13] Rapport du Commissaire Enquêteur, "Décision du tribunal administratif de Rouen du 22 septembre 2015(n° E15 000 088/76) demande d'autorisation relative à l'exploitation d'une unité de broyage de pneumatiques usagés et de caoutchoucs techniques". Janvier 2016.
- [14] "Directives techniques révisées pour la gestion écologiquement rationnelle des pneus usés et des déchets de pneus". Conférence des Parties à la Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination. Dixième réunion Cartagena, Colombie, 17-21 octobre 2011.
- [15] <http://www.ordimip.com/dechets?id=6>, consulté le 1-11-16.
- [16] LANGUEDOC R. "Guide pratique des déchets", (site Internet google.fr), 2001.
- [17] Belferrag, A. "Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes". Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie. 23 Mai 2016.
- [18] Sadaka, F. "Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes: application au recyclage des déchets pneumatiques". Thèse doctorat de l'université du Maine, France. 2010.
- [19] Aoudia, K. "Recyclage et revalorisation des élastomères usages". Mémoire de magistère. Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou, Algérie. 2014.
- [20] Mavridou, S., Oikonomou, N., Kalofotias, A. "Worldwide survey on best (and worse) practices concerning rubberized asphalt mixtures implementation (number of different cases, extent of application)". AUT- LBM. PRESTE Deliverable 2.1.1. 2010.
- [21] Habib Trouzine, Aissa Asroun, Nasser Asroun, Farid Belabdelouhab, Nguyen Thanh Long : Problématique des pneumatiques usagés en Algérie

- [22] Long, N.T. "Le pneusol: Recherche_réalisation_perspective". Thèse de doctorat. L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France. 1993.
- [23] Ho.A.C., (2010), Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface. Thèse de doctorat, Université INSA de Toulouse. 60-62.
- [24] Güneysi.E., Gesoğlu.M., Özturan T., Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research* 34, 2309–2317, 2004.
- [25] Khaloo.A.R., Dehestani.M., Rahmatabadi P., Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. *Waste Management* 28, 2472– 2482, 2008.
- [26] Garros.M., (2007), Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [27] Kaloush.K.E., Way.G.B., Zhu.H., Properties of Crumb Rubber Concrete. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1914.
- [28] Khatib.Z.K., Bayomy.F.M., Rubberized portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 206-213, 2005.
- [29] Etxeberria,M., Vázquez.E., Marí.A., Barra.M., (2007, May). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp. 735-742.
- [30] Ganjian.E., Khorami.M., Maghsoudi.A.A., (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials – Vol. 23. Numéro 5 – pp. 1828–1836.*
- [31] Turatsinze.A., Bonnet.S., Granju.J.L., Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance. *Construction and Building Materials*, 21: 176181, 2005.
- [32] M. Ho Anh Cuong, (2010). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface. Thèse de Doctorat, Université de Génie Civil, Toulouse, P.
- [33] Fadiel A., Al

Rifaie F., Taher A., Fini E., (2014). Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials. *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, Vol. 7, No. 1, PP. 1–11.

[34] Benazzouk A., (2002). Contribution à la valorisation de déchets de caoutchouc: composites cimentaire à base de caoutchouc compact et cellulaire. Thèse de doctorat, Université de Picardie.

[35] Benazzouk A., Douzane O., Quéneudec M (2004). Transport of fluids in cement–rubber composites. *Cement & Concrete Composites* 26, 21–29. Cité dans (Ho, 2010).

[36] Kerasley E. P. and Wainwright P.J (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement Concr Res*, 31: 805–12. Cité dans (Ho, 2010).

[37] Turatsinze A., Bascoul A., Restrained Crack Widening in Mode I Crack Propagation for Mortar and Concrete. *Advn Cem Bas Mat*, 4:77-92, 1996.

[38] Hobbs D.W., The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration. *Mat. Struct.* 4: 107-114, 1971.

[39] Neville A.M., Propriétés des bétons. Quatrième édition. Edition française par CRIB, Editions Eyrolles, 2000.

[40] Benazzouk A., Quéneudec M., Effet du caractère cellulaire des granulats sur le comportement d'un composite ciment-caoutchouc aux cycles de gel/dégel. *Proceeding of CNR IUT Roanne*, publication de l'Université de St-Etienne, ISBN 2 86272 2200, Tome 2, pp. 477–87, 2001

[41] LATROCH NOUREDDINE : Effet des agrégats à base de déchets plastiques sur les différentes propriétés des matériaux composites mortier-polymère , publication de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

[42] METALSI-TANI F « Etude de praticabilité d'utilisation d'engrenage plastiques dans une pompe hydraulique », mémoire de doctorat en sciences appliquées. Thèse de doctorat, Université de Montréal, Canada, 1986.

[43] VENE J « Les plastiques », éd. Q.C.J, Paris, 1976

- [44] BOUDET A « Voyage au coeur de la matière plastique (les microstructures des polymères) », éd. CNRS, Paris, 2003.
- [45] ALLINGER et Al « Chimie organique (application) », éd. McGRAW-HILLV3, 1984
- [46] DESSARTHE et AL « usinage des matières plastiques, des matériaux composites et des états élastomères », éd. CETM, 1996.
- [47] GIBOUD S « Fiche technique, laboratoire de pharmacie clinique et biotechnique UHP », Nancy, 2009.
- [48]LENOIR J « Peintures, pigment, vernis », éd. ISTRAL BL, Paris, 1959.
- [49] Mohamed Touhami GOUASMI : EFFETS D'AGREGATS LEGERS A BASE DE POLYTEREPHTALATE D'ETHYLENE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS, publication de l'Université d'Oran
- [50] GAUTRON P « Valorisation et recyclage des déchets », 2001.
- [51] DESACHY C « Les déchets : sensibilisation à une gestion écologique », éd. TEC et DOC, 2001.
- [52] HESTIN M « Analyse des contraintes juridiques et techniques pour un marquage des produits portant sur les recommandations de tri », (WWW.ademe.fr), Juin 2013.
- [53] GABIRAULT « Etude de valorisation des déchets plastiques de déchèteries », (WWW.Execetys.fr), Juin 2013.
- [54] Benimam Samir¹, DebiebFarid²,Bentchikou Mohamed¹ et Guendouz Mohamed²
¹Laboratoire LBMPT, Université de Médéa, Algérie
²Laboratoire LME (Ex. LPTRR), Université de Médéa, Algérie

- [55] Lounès AIT GANA, Abderahim MEHANI : Etude et Conception d'un Moule-Palette en Polystyrène Expandé pour un Réfrigérateur ENIEM, publication de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou
- [56] P. J. Herrera-franco, A. Valadez-gonzalez, A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, 2005; 36 : 597- 608.
- [57] HERIHIRI OUIDED: Formulation et Caractérisation des Bétons Légers, publication de l'Université MOHAMED KHIDER – BISKRA
- [58] SENE Licka Khadidiatou , DIEYE Khadijatou: Les bétons à granulats légers -Etudes des bétons à base d'argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal-, publication de l'Université 08 Mai 1945 de Guelma
- [59] Erner, A., Henry, J.F., Billon, N. Mechanical dissipation during plug assisted thermoforming of polystyrene as measured by infrared thermography; *ESAFORM'2004 Conf. Proc.*, Trondheim, Norway (2004).
- [60] <https://www.gralon.net › articles/matériels-et-consommables/ matériel-industriels/lepolystyrène caractéristiques-et-applications-1383.html>
- [61] MAHIOUT Soraya, Mettre en valeur ou bannir le polystyrène-Approche dans un cadre de développement durable, thèse de doctorat, université SHERBOCK, 2014.
- [62] : Mémoire de Génie Civil Laghouat : Effet du type de liant sur les propriétés physicomécaniques et thermiques d'un béton allégé par les billes de polystyrène (Polys-béto), Mai 2017, réalisé par Belkacem ZIREGUE et ABAH Khaled.
- [63] HEIM Philippe, LINARÈS Olivier, HYM Laure, polystyrène et copolymères de styrène, techniques de l'ingénieur, Atofina du groupe Total, France, 2002, référence internet AM3340.
- [64] Chafi, N. Matrice cimentaire renforcée de fibres ; thèse de magistère, Constantine (2005).
- [65] Miled, K., Sab, K., Le Roy, R. Effet d'échelle dans le béton léger de polystyrène expansé ; *Colloque Microstructure et Propriétés des matériaux*, pp. 189- 194. , ENPC (2005).

[66] BELMECHERI OUM HABIBA: Etude d'un composite a base de sable de d'une ciment et granulats en billes de polystyrène expansé -, publication de l'Université Amar Telidji à Laghouat

[67] NA442/2013 Norme Algérienne N° édition : 3 Date : 2005 ICS : 91, 100, 10, ciment composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

[68] NF P 18-554 Norme française décembre 1990, mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux,

[69] NF P 18-555 Norme française décembre 1990, mesure des masses volumiques, coefficients d'absorption et teneur en eau des sables

[70] EN 196-1 Norme française septembre 2016, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances - Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances

[71] NF EN 1015-3. "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie3: détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses)". Octobre 1999.