



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thélidji- Laghouat

FACULTE : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Benouis Halima et Chehrouri Daouia

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Thème

**CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE ET
THERMIQUE D'UN COMPOSITE EN PLATRE A BASE
DES DECHETS DES BOUTEILLES EN PLASTIQUE
RECYCLE.**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr.Bouziani Tayeb	PR	Président
Mr.Ferhat Ahmida	MAA	Examineur
Melle.Djoudi Amina	MCB	Encadreur

Promotion : Juin – 2019

Dédicace

***A** mes chers parents **Mohamed ;Khadra**, pour tous leurs sacrifices,
leurs amour inconditionnels, leurs tendresses leurs soutiens et leurs
prières tout au long de mes études.*

***A** mes chers frères **Lotfi , Benameur** et mes sœurs **Abla, Ilhame,**
Maroua.*

***A** toute ma famille (mes tantes mes oncles).*

A** mes amis **Nadir, Maroua, Fatima Morjanie.

A** mon binôme **Daouia .

***A** tous les enseignants du département de génie civil.*

***A** toute la promotion de génie civil.*

***A** tout ce qui m'aime*

Benouis Halima

Dédicace

Par le bais de ces mots je dédie le fruit de mes années d'études

*à ,ma mère **Fatna** ,mon père **Ahmed** mes sœurs **Naima** ,*

*Khadija ,**Fatima** ,mes frères **Mohamed** , **Morad** ,**Mostafa** ,**Abas***

*,à mes amies **Amina** ,**Souad** ,**Rachida** ,à toute ma famille de près*

ou de loin.

A** mon binôme : **Benouis Halima.

***A** Qui m'ont soutenue tout ou long de la réalisation de ce*

travail.

***Toutes** ces personnes m'ont comblé de bonheur et c'est à mon*

tour de les remercier en leur dédient ce travail

Chehrouri Daouia

Remerciement

Nous commençons par remercier le dieu tout puissant, de nous avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail.

*Nous tenons à remercier notre promotrice, Melle **Djouidi Amina**, pour ses conseils, ses orientations et sa disponibilité durant l'élaboration de ce travail.*

*Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à **Monsieur. Bouziani Tayeb**, pour le grand honneur qu'il nous a fait en présidant le jury de soutenance.*

*Nos vifs grands remerciements et notre sincère gratitude à **Monsieur Ferhat Ahmida** pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse, et pour son appui pendant la réalisation des essais thermiques,*

Nos grands remerciements vont à l'ensemble du personnel du laboratoire Génie mécanique de Laghouat.

*Nos remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil en particulier **Benharzallah Krobba** et à toute l'équipe de laboratoire de génie civil pour tous les efforts qui ont fait à bien mener notre formation et notre projet de fin d'étude.*

*Nous remercions **Mer Attiat Aissa** agent technique chargé bibliothèque de nous avoir mis à notre disposition tout la documentation nécessaire.*

Résumé

La production des matériaux isolants ainsi que les solutions des problèmes environnementaux par le recyclage des déchets industriels et ménagers est le plus important axe de recherche dans le domaine de construction. L'objectif principal de ce travail est de contribuer au développement des matériaux de constructions innovants à base du plâtre, sable de dune ainsi que des déchets des bouteilles en plastiques recyclés.

L'analyse des résultats montre l'effet bénéfique de l'incorporation des déchets plastiques sur l'allègement du plâtre et l'amélioration de son retrait et son isolation thermique mais une réduction de ces propriétés mécaniques et sa porosité.

Donc ces composites peuvent être utilisés comme matériaux isolants conservateurs de l'énergie avec des performances mécaniques suffisantes.

Mots clés : Isolation thermique, propriétés physiques et mécaniques, retrait, porosité, déchets plastiques.

ملخص

يعتبر إنتاج مواد عازلة حراريا و كذا إيجاد حلول للمشاكل البيئية وذلك بتدوير النفايات الصناعية والمنزلية ، محور بحث مهم لاسيما في مجال البناء. لهذا السبب الهدف الرئيسي لهذا العمل هو المساهمة في تطوير مواد بناء مبتكرة متكونة من الجص ، رمل الكثبان وكذلك نفايات القارورات البلاستيكية (بوليثيلين ترفتلات PET) الناتجة عن عملية التدوير .

تحليل النتائج يبين التأثير الايجابي لإدخال النفايات البلاستيكية من أجل تخفيف مادة الجص و تحسين الانكماش ولكن إنقاص في خصائصه الميكانيكية و كذا المسامية لذلك نجد أن هاته المواد المركبة الجديدة بخصائص ميكانيكية كافية ، تصلح كمواد عازلة من أجل المحافظة على الطاقة .

الكلمات مفتاحية: العزل حراري ، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ، الانكماش ،المسامية ،النفايات بلاستيكية .

Abstract

The production of thermally insulating materials as well as the solution of environmental problems by recycling industrial and household waste are the most interesting research in the domain of construction. For this reason the main aim of this work is to contribute to the development of an innovative building materials based plaster, sand of dune as well as recycled waste of plastic bottles (polyethylene terephthalate PET) .

The analyze of results shows the beneficial effect of the incorporation of plastic waste for the lightening plaster, the improvement of shrinkage but a reduction in its mechanical properties and porosity , so these new composites were found suitable for use insulating materials for saving energy with sufficient mechanical performance.

Key words: thermally insulating, mechanical and physical properties, shrinkage, porosity, plastic waste.

Table des matières

Dédicace	
Dédicace	
Remerciement	
Résumé	Erreur ! Signet non défini.
Table des matières	ii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Liste des notations	xii

Chapitre 1: Généralités sur le plâtre

.1.1 Introduction	3
1.2. Plâtre	3
1.2.1. Origines de plâtre	4
1.2.2 .Gypse naturel	4
1.2.3. Gypse de synthèse	5
1.2.4 .Structure cristalline du gypse	6
1.2.5. Forme du gypse	6
1.2.6. Différentes phases du système (CaSO ₄ .H ₂ O)	7
1.2.6.1. Phases semi hydratées α et β	7
1.2.6.2. Les anhydrites	8
1.2.7. Propriétés chimiques et physiques de plâtre semi hydrate	8
1.2.8. Fabrication du plâtre	10
1.2.8.1. Extraction et préparation du gypse	11
1.2.8.2. Préparation du gypse	11
1.2.8.3. Cuisson	12
1.2.8.4. Moutures, mélange, distribution	14
1.2.8.5. Contrôles de fabrication	14
1.2.9. Propriétés physico-mécaniques du plâtre	15
1.2.9.1. Masse volumique absolue	15
1.2.9.2. Densité et porosité	15
1.2.9.3. Prise	16
1.2.9.4. Durcissement	16

1.2.9.5. Durée de prise	17
1.2.9.6. Variation de volume.....	18
1.2.9.7. Adhérence aux matériaux	18
1.2.9.8. Isolation thermique	18
1.2.9.9. Isolation phonique.....	19
1.2.9.10. Résistance mécaniques	19
1.2.10. Variétés de plâtres.....	21
1.2.11. Différents types de plâtre	22
1.2.12. Utilisation de plâtre.....	22
1.2.13. Eléments préfabriqué à base de plâtre	23
1.2.14. Domaine d’application des éléments à base de plâtre	24
1.2.15. Les recommandations du C.N.E.R.IB.....	25
1.3. Conclusions.....	25

Chapitre 2:Les Bétons légers

2.1. Introduction.....	26
2.2. Béton léger	26
2.3. Domaine d’utilisation	29
2.3.1. Béton de remplissage	29
2.3.2. Béton porteurs et isolants.....	29
2.3.3. Béton légers de structure.....	29
2.4. Bétons de granulats légers	30
2.4.1. Différents types de granulats légers.....	30
2.4.2. Propriétés physico-mécaniques et thermiques des Granulats légers	33
2.5.2. Porosité	36
2.5.3. Comportement et performances mécaniques	38
2.5.4. Retrait.....	41
2.5.5. L’absorption.....	41
2.5.6. Sensibilité à l’eau.....	42
2.5.7. Propriétés thermiques	42
2.5.8. Autres propriétés du béton léger	45
2.6. Avantages des bétons légers	45
2.8. Béton Léger à base des granulats en plastique recyclée	46
2.8.1. Plastiques	47

2.8.1.1. Type de matières plastiques	47
2.8.1.2. Méthode de fabrication	48
2.8.1.3. Thermoplastiques.....	48
2.8.2.4. Avantages des plastiques	53
2.9. Recyclage des plastiques	53
2.10. Propriétés des bétons avec déchets plastique recyclé	54
2.11. Conclusions.....	56

Chapitre 3:Caractérisation des matériaux utilisés et techniques expérimentales

3.1. Introduction.....	57
3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés	57
3.2.1. Plâtre	57
3.2.1.1. Masse volumique absolue (NFP 18-555).....	57
3.2.1.2. Masse volumique apparente (NFP 18-555)	58
3.2.1.3. Finesse de mouture (NF B 12.401).....	59
3.2.1.4. Surface spécifique de Blaine du plâtre (EN-196-6).....	59
3.2.1.5. Détermination du taux de gâchage à saturation du plâtre	60
3.2.1.6. Prise (NFB 12 -401).....	61
3.2.1.7. Propriétés mécaniques	62
3.2.1.8. Analyse minéralogique	62
3.2.1.9. Analyse chimique	63
3.2.2. Chaux	63
3.2.3. Sable de dune	63
3.2.3.1. Masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre (EN1097-6).....	64
3.2.3.2. Masse volumique apparente (NFP 18-555)	64
3.2.3.3. Compacité et Porosité (NFP 18-555).....	64
3.2.3.4. Analyse granulométrique (EN 933-1).....	65
3.2.3.5. Equivalent de sable (EN 933-8).....	66
3.2.3.6. Essai d'absorption (NFP 18-555)	67
3.2.3.7. Analyse minéralogique	67
3.2.3.8. Analyse chimique (NF EN 196-2)	69
3.2.4. Déchets des bouteilles en plastique recyclé.....	69
3.2.4.1. Analyse granulométrique du PET (EN 933-1)	69

3.2.4.2. Détermination de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue (NF- P18-555).....	70
3.2.5. Eau de gâchage	71
3.3. Techniques de mesure expérimentale	71
3.3.1. Résistances mécaniques (EN 196-1).....	71
3.3.1.1. Essais de Résistance à la flexion (flexion 3 points).....	71
3.3.1.2. Essais de Résistance à la compression.....	72
3.3.2. Caractéristiques physiques.....	73
3.3.2.1. Variation dimensionnelle (NF P 15-433).....	73
3.3.2.3. Porosité accessible à l'éthanol (ASTM C-642)	74
3.3.3. Caractéristiques thermiques	74
3.3.3.1. Méthodes de mesure des paramètres thermiques.....	75
3.4. Conclusions.....	77

Chapitre 4: Résultats et interprétations

4.1. Introduction.....	78
4.2. Formulation des composites	78
4.3. Mise en œuvre des composites et la confection des éprouvettes	79
4.3.1. Procédure de malaxage	79
4.3.2. Préparation et conditionnement des éprouvettes	79
4.4. Présentation des résultats	80
4.4.1. Etude des Propriétés physiques.....	80
4.4.1.1. Masse volumique apparente.....	80
4.4.1.2. Porosité (%)	83
4.4.2. Etude des Propriétés mécaniques.....	86
4.4.2.1. Résistance à la flexion	86
4.4.2.2. Résistance à la compression	89
4.4.2.3. Etude du retrait.....	91
4.4.3. Propriétés thermiques	94
4.4.3.1. Conductivité thermique.....	94
4.4.3.2. Diffusivité thermique.....	97
4.4.3.3. Chaleur spécifique	97
4.5. Visualisation des surfaces de rupture des composites étudiés par le microscope optique	97

4.6. Conclusions.....	101
Conclusions Générales.....	102
Références Bibliographiques	106
Annexes	115

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1. 1: Organigramme de cycle du plâtre.	3
Figure 1. 2: Différents types de gypse naturel.	5
Figure 1. 3: Projection de la structure cristalline du gypse sur le plan (001)	6
Figure 1. 4: Forme de gypse.	7
Figure 1. 5: Image MEB des plâtres prestia obtenues respectivement par voie humide (α) et voie sèche (β)	8
Figure 1. 6: Extraction en galerie souterrain.....	11
Figure 1. 7: Extraction à ciel ouvert	11
Figure 1. 8: Criblage.....	11
Figure 1. 9: Concassage.....	11
Figure 1. 10: Finesse de mouture.....	11
Figure 1. 11: Four de cuisson du gypse	12
Figure 1. 12: Schéma de déshydratation du gypse	14
Figure 1. 13: Evolution de la densité et du pourcentage des vides avec E/P	15
Figure 1. 14: Influence du rapport E/P sur la résistance mécanique	20
Figure 1. 15: Influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier	20
Figure 1. 16: Plaques de plâtre avec isolant polystyrènes	24
Figure 1. 17: Carreaux de plâtre hydrofuge pour réaliser des cloisons	24
Figure 1. 18: Voutains	25
Figure 1. 19: Chape au plâtre.....	25

Chapitre 2

Figure 2. 1: Représentation des différents types de bétons légers	29
Figure 2. 2: Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats].	30
Figure 2. 3: Différents granulats légers naturels.....	31
Figure 2. 4: Différents granulats légers artificiels	32
Figure 2. 5: Différents granulats organiques.....	32
Figure 2. 6 : Variation de la masse volumique de Béton Plâtre avec des Déchets de Caoutchouc	36
Figure 2. 7: Porosité du béton	37
Figure 2. 8: Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats.....	38
Figure 2. 9: Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jour en fonction de pourcentage des granulats	39
Figure 2. 10: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition Plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jour	39
Figure 2. 11: Variation de la résistance à la compression Plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours	40
Figure 2. 12: Développement de la résistance à la traction du béton de sable avec des déchets de PET en fonction de l'âge	40

Figure 2. 13: Développement de la résistance à la compression du béton de sable avec des déchets de PET en fonction de l'âge	41
Figure 2. 14: Trois types de porosité présentée dans les matériaux.....	42
Figure 2. 15: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour béton de plâtre avec polystyrène	42
Figure 2. 16: Conductivité thermique en fonction du volume de sable remplacé par PET	44
Figure 2. 17: Variation de la conductivité en fonction du rapport liège/plâtre.....	44
Figure 2. 18 : Variation de conductivités thermiques en fonction de pourcentage de polystyrène.....	45
Figure 2. 19: Béton de plâtre avec déchets isolant.....	47
Figure 2. 20: Fils textiles en (PET).....	48
Figure 2. 21: Plastique en (PP).....	48
Figure 2. 22: Citernes en (PEBD).....	48
Figure 2. 23: Polyéthylène à haute densité.....	48
Figure 2. 24: Composition chimiques de PET.....	49
Figure 2. 25: Bouteilles en PET.....	49
Figure 2. 26: Fibre en PET.....	50
Figure 2. 27: Fine particules de PET	50
Figure 2. 28: Agrégat de PET décheté.....	50
Figure 2. 29: Déchets des PET.....	54
Figure 2. 30: Recyclages des PET	54
Figure 2. 31: Pollution de l'environnement par des déchets de PET	54

Chapitre 3

Figure 3. 1: Plâtre « SPA OASIS-GHARDAIA ».....	57
Figure 3. 2: Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue.	58
Figure 3. 3: Dispositif pour l'essai de la masse volumique apparente.	58
Figure 3. 4: Détermination de finesse de mouture.....	59
Figure 3. 5: Appareil de Blaine.....	60
Figure 3. 6: Déroulement d'essai du temps de prise.	61
Figure 3. 7: Diffractogramme de plâtre.....	62
Figure 3. 8: L'essai de mesure de la masse volumique apparente du sable utilisé.....	64
Figure 3. 9: Analyse granulométrique du sable de dune.....	65
Figure 3. 10: Détermination de l'équivalent de sable.....	66
Figure 3. 11: Mesure du coefficient d'absorption.	67
Figure 3. 12: Diffractogramme aux rayons X du sable de dune	68
Figure 3. 13: Vu général à grande échelle, MEB du sable de dune	68
Figure 3. 14: Granulats en PET.....	69
Figure 3. 15: Courbe granulométrique du PET.....	70
Figure 3. 16: Mesure de la masse volumique apparente des déchets PET.	71
Figure 3. 17: Dispositif de flexion 3 points.	72
Figure 3. 18: Dispositif de l'écrasement par compression.	72

Figure 3. 19: Mesure de retrait.....	73
Figure 3. 20:Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.....	75
Figure 3. 21:Dispositif expérimental pour mesuré les caractéristiques thermiques. ..	76

Chapitre 4

Figure 4. 1:Mélange des matériaux sec.....	80
Figure 4. 2:Confection des moules.	80
Figure 4. 3:Variation de la masse volumique de plâtre en fonction du pourcentage des déchets plastiques dans le temps.....	81
Figure 4. 4:Variation de la masse volumique de la composition plâtre + déchets plastiques pour différents pourcentages des déchets plastiques en fonction du temps.	82
Figure 4. 5:Variation de la masse volumique pour le mortier de plâtre en fonction des pourcentages des déchets plastiques dans le temps.	82
Figure 4. 6:Variation de la masse volumique pour le mortier de plâtre en fonction de l'âge et pour différents pourcentages des déchets plastiques	83
Figure 4. 7:Variation de la porosité en fonction du pourcentage des déchets plastiques pour la composition plâtre + déchets plastiques à l'âge 28 jours.	84
Figure 4. 8:Variation de la porosité en fonction du pourcentage des déchets plastiques pour la composition mortier de plâtre + déchets plastiques à l'âge 28 jours.	85
Figure 4. 9:Relationentre la porosité et la masse volumique pour la composition plâtre + déchets plastiques à l'âge de 28 jours.	85
Figure 4. 10:Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition mortier de plâtre + déchets plastiques à l'âge de 28 jours.....	86
Figure 4. 11:Variation de la résistance à la flexion de la composition Plâtre + déchets plastiques avec le temps.....	88
Figure 4. 12:Variation de la résistance à la flexion de la composition Mortier de Plâtre + déchets plastiques dans le temps.	88
Figure 4. 13:Variation de la résistance à la compression de la composition plâtre + déchets plastiques dans le temps.....	90
Figure 4. 14:Variation de la résistance à la compression de la composition mortier de Plâtre + déchets plastiques dans le temps.	90
Figure 4. 15:Variation du retrait au cours du temps de la composition plâtre + déchets plastiques.....	93
Figure 4. 16:Variation du retrait au cours du temps de la composition mortier de Plâtre + déchets plastiques.	93
Figure 4. 17:Variation de la conductivité thermique Plâtre + déchets plastiques à 28 jours.....	95
Figure 4. 18:Relation entre de la conductivité thermique et la porosité de la composition plâtre + déchets plastiques à 28 jours.....	96
Figure 4. 19:Microscope utilisé.	98
Figure 4. 20:Aspect général des compositions plâtre + déchets plastiques PET.	99
Figure 4. 21:Aspect général des compositions mortier de plâtre + déchets plastiques.	100

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1. 1:Classification de la pierre à plâtre.....	4
Tableau 1. 2:Propriétés physiques et mécaniques des semi hydrates Alpha et Béta ..	9
Tableau 1. 3:Caractéristiques des différents phases de déshydratation du gypse.....	10
Tableau 1. 4:Masse volumique absolue des différents produits.	15
Tableau 1. 5:Densité apparentes des différents plâtres.....	16
Tableau 1. 6:Conductivité thermiques des plâtres.	19
Tableau 1. 7:Propriétés des différents types de plâtres.....	22
Tableau 1. 8:Les éléments préfabriqués en plâtre et leurs utilisations.	23

Chapitre 2

Tableau 2. 1:Classification fonctionnelle des bétons légers selon la RILEM	27
Tableau 2. 2:Classification des bétons légers selon la norme ACI 21 213R-87.....	28
Tableau 2. 3 : Choix des granulats en fonction des classes de béton.....	34
Tableau 2. 4: Différents classes de la porosité.....	37
Tableau 2. 5 : Caractéristiques thermiques de quelque matériau.....	43
Tableau 2. 6 : Propriétés mécaniques et thermiques des PET.	52

Chapitre 3

Tableau 3. 1:Résultats finesse de mouture du plâtre.....	59
Tableau 3. 2:Résultats du temps de prise du plâtre.....	61
Tableau 3. 3: Résistance mécanique du plâtre.	62
Tableau 3. 4: Analyse chimique du plâtre.	63
Tableau 3. 5: Analyse chimique de la chaux.	63
Tableau 3. 6: Compacité et porosité de sable de dune.	65
Tableau 3. 7:Equivalent de sable de dune utilisé.	66
Tableau 3. 8:Coefficient d'absorption de sable de dune.	67
Tableau 3. 9:Analyse chimique du sable de dune.....	69
Tableau 3. 10:Caractéristique physique de PET.	70

Chapitre 4

Tableau 4. 1: Formulation de la pâte pure de plâtre à base des déchets en plastique.	79
Tableau 4. 2: Formulation de mortier de plâtre à base des déchets en plastique.	79
Tableau 4. 3:Variation de la masse volumique pour la composition plâtre +déchets plastiques.....	80
Tableau 4. 4: Variation de la masse volumique pour la composition mortier de plâtre +déchets plastiques.	81

Tableau 4. 5: Variation de la porosité pour la composition plâtre + déchets plastiques à l'âge de 28 jours.....	83
Tableau 4. 6: Variation de la porosité pour la composition mortier de plâtre +déchets plastiques à l'âge de 28 jours.	84
Tableau 4. 7:Variation de la résistance à la flexion pour la composition plâtre + déchets plastiques.....	87
Tableau 4. 8:Variation de la résistance à la flexion pour la composition mortier de Plâtre + déchets plastiques.	87
Tableau 4. 9: Variation de la résistance à la compression pour la composition plâtre+ déchets plastiques.....	89
Tableau 4. 10: Variation de la résistance à la compression pour la composition mortier de plâtre + déchets plastiques.	89
Tableau 4. 11:Variation du retrait pour la composition plâtre + déchets plastiques....	92
Tableau 4. 12:Variation du retrait pour la composition mortier de Plâtre +déchets plastiques.....	92
Tableau 4. 13: Variation des propriétés thermique pour la composition plâtre + déchets plastiques.....	94
Tableau 4. 14:Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique.	96

Liste des notations

PGC : Plâtre gros de construction.

PFC : Plâtre fins de construction.

BPPSE : Béton Plâtre avec Polystyrène Expansé.

BPDC : Béton Plâtre avec déchets de Caoutchouc.

V_{vide} : Volume vides contenus dans la matrice de liant.

V_{liant} : Volume total occupé par la pâte de liant .

V_t : Volume totale occupé par la pâte de liant .

PET : Polyéthylène Téréphtalate.

PEBD :Polyéthylène basse densité.

PEHD :Polyéthylène haute densité.

PP :Polypropylène.

PC : Polycarbonate.

PVC : Polychlorure de vinyle (**PVC**).

ρ_{app} : Masse volumique apparente.

γ_{abs} : Masse volumique absolue.

C : Compacité.

P : Porosité (%).

F : Finesse de mouture.

M_f : Module de finesse.

ESV : Equivalent de sable Visuel.

ESP : Equivalent de sable au piston.

A_{abs} : Coefficient d'absorption (%).

PAF : Perte au feu.

R_f: Résistance à la flexion.

R_c: Résistance à la compression .

F_f: Charge à la rupture .

ΔL/L : Variation dimensionnelles.

L_i: Longueur initiale.

L₀: Longueur initiale après 24 heures démoulage.

λ : Conductivité thermique.

a : Diffusivité thermique.

C_p: Chaleur spécifique.

PT: Plâtre Témoin.

PDP: Plâtre avec déchets plastiques.

MP: Mortier de plâtre.

MDP: Mortier de plâtre avec déchets plastiques.

DP : Déchets plastiques.

M_{sat} : Masse de l'échantillon saturé.

M_S : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 105°C.

P_m : Porosité microscopique.

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie est un pays en développement, ce qui augmente le taux de déchets générés par les acteurs économiques. La prise en charge des déchets est parmi les priorités inscrites par les pouvoirs publics, d'autant plus, les déchets peuvent être injectés directement dans plusieurs domaines, notamment le secteur de la construction, qui s'intéresse de plus en plus à la valorisation des déchets. Vu l'obligation de la prise en charge des déchets par la réglementation en vigueur, et l'importance économique, environnementale ainsi que technique que certains déchets inertes (plastique, verre, produits céramiques.....etc.) peuvent apporter au secteur de la construction. Bien entendu, des mesures doivent être prises en compte en amont, entre autres ; l'étude des propriétés des déchets afin de bien cerner leur utilisation.

La recherche actuelle sur les matériaux s'intéresse au développement de nouveaux composites et matériaux de construction, dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques, physiques et thermiques. Parmi ces matériaux, qui peuvent être exploités, notamment le plâtre, le sable dunaire et les déchets plastiques comme granulats.

Notre étude s'inscrit dans le cadre du développement durable, en valorisant les déchets des bouteilles en plastiques recyclés et le sable dunaire qui occupe plus de 60 % de la superficie de l'Algérie. Pour améliorer certaines propriétés physico-mécaniques et thermiques du plâtre, l'idée d'utiliser des déchets des bouteilles en plastiques recyclés comme facteurs d'allègement est une proposition aussi intéressante, non seulement de point de vue économique mais également environnemental. C'est dans cette optique que se sont orientés nos travaux.

Enfin, ce modeste travail est une contribution à la valorisation des déchets de plastiques comme granulats et sable de dunes afin de produire un matériau léger avec des propriétés thermiques et mécanique améliorées.

Dans l'objectif de mettre en œuvre un béton léger pouvant acquérir des performances thermomécaniques appréciables et qui peut être utilisé comme blocs ou panneaux préfabriqués, on a divisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique orientée sur le plâtre, ses propriétés et ses applications.

Le deuxième chapitre donne des généralités sur les bétons légers, les agrégats du polyéthylène téréphtalate PET.

Le troisième chapitre étudie la caractérisation physico-chimique et mécanique des matières premières utilisées pour la préparation des composites étudiés et techniques expérimentales.

Le quatrième chapitre englobe les interprétations des résultats expérimentaux relatifs au comportement physico-mécanique et thermique de la pâte pure et le mortier de plâtre à base des déchets des bouteilles en plastiques recyclés.

Enfin une conclusion générale sur l'étude élaborée et des recommandations et des perspectives à les prendre en considération dans les futures recherches dans ce domaine.

Chapitre 1

Généralités sur le plâtre

1.1. Introduction

Le plâtre est le plus vieux matériau de construction utilisé par l'homme, avec la chaux et la terre cuite. Le plâtre a été découvert depuis l'antiquité, 9000 ans environ avant J.C. Il est alors utilisé comme enduit (extérieur et intérieur). Par la suite, il est utilisé comme joints des blocs de pyramides en Egypte, dans l'ornement des palais et mosquées moyenâgeux.

Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués, carreaux ou plaques (couche de plâtre entre deux cartons). C'est un matériau de grande disponibilité et très connu pour ses qualités : il est favorable à la protection de l'environnement, assez malléable, de faible densité, aux propriétés fonctionnelles remarquables (coupe-feu, isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie des enceintes), décoratif ..., ce qui justifie l'intérêt accordé à ce matériau.

C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu. La conductivité thermique de plâtre est de l'ordre de $0.50 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Contre 1.15 pour le ciment ou 50 pour l'acier. Ces propriétés s'expliquent par la très grande porosité du matériaux (l'air est un excellent isolant) et par la présence d'eau de structure (environ 20 %). Le plâtre dégage de l'eau en présence de chaleur, sans aucun dégagement de gaz toxique ou de fumées [1].

1.2. Plâtre

C'est une poudre qui permet d'obtenir par déshydratation du gypse –roche naturelle ou sous-produit de certaines industries, qui est un sulfate de calcium hydraté de formule $(\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O})$.

La déshydratation se fait selon l'équation suivante :

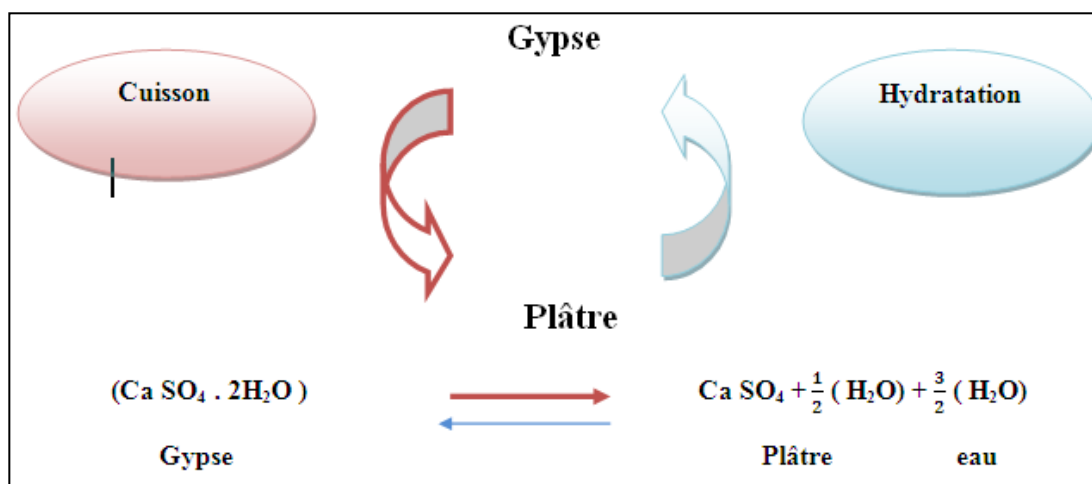


Figure 1. 1: Organigramme de cycle du plâtre.

1.2.1. Origines de plâtre

La pierre à plâtre est un sulfate de calcium qui se rencontre dans la nature sous deux formes :

A. Anhydrite, assez rare, ou sulfate de calcium anhydre répondant à la forme chimique **(Ca SO₄)**.

B. Gypse, très abondant, ou sulfate de calcium di-hydraté a deux molécules d'eau, qui répondant à la formule chimique **(Ca SO₄. 2 H₂O)**. Soit gypse naturel ou bien gypse de synthèse.

La classification de la pierre à plâtre se fait selon sa composition minéralogique (teneur en gypse **T_g**) et chimique (teneur en eau de cristallisation **T_C**).

Tableau 1. 1: Classification de la pierre à plâtre [2].

Classe	Composition minéralogique	Composition chimique
	T _g CaSO ₄ .2H ₂ O %	T _C en eau de cristallisation %
I	T _g ≥ 90	T _C ≥ 18.83
II	80 ≤ T _g ≤ 90	16.74 ≤ T _C ≤ 18.83
III	70 ≤ T _g ≤ 80	14.65 ≤ T _C ≤ 16.74
IV	50 ≤ T _g ≤ 70	11.51 ≤ T _C ≤ 14.65

1.2.2 .Gypse naturel

Le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont les roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées.

Le gypse se cristallise dans le système mono chimique à l'échelle moléculaire, il présente une structure feuilletée dans laquelle alternant une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium .Les principales variétés que l'on rencontre dans la nature sont :

- Sous forme macro-cristallisée : le gypse lamellaire, le fer de lance, le gypse, lenticulaire, la rose des sables.
- Sous forme micro –cristallisée : l'albâtre, le gypse éolien, ou bien de sélénite.



a. Rose des sables [4].



b. Albâtre.



c. Gypse variété sélénite [5].

Figure 1. 2: Différents types de gypse naturel.

1.2.3. Gypse de synthèse

Le gypse de synthèse est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont :

- **Fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse)**

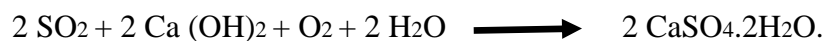
Par attaque sulfurique du phosphate naturel, L'industrie des engrais phosphatés produit du gypse selon la réaction suivante :



- **Fabrication d'autres acides minéraux** (acide borique : borogypse, acide fluorhydrique : fluorogypse) ou organiques : organogypses (acide citrique, tartrique, etc.)
- **Fabrication de l'oxyde de titane** (TiO_2) conduit également à une production de gypse appelé titanogypse,
- **Désulfuration des gaz et fumées**

Le but de cette méthode est d'éliminer le soufre des gaz de combustion des centrales thermiques, pour produire un gypse appelé désulfogypse (Des quantités importantes de phosphogypse et de désulfogypse sont ainsi produites annuellement dans le monde).

La technique de désulfuration la plus couramment adoptée, consiste à absorber le dioxyde de soufre (ainsi que les oxydes d'azote) présent dans les gaz de combustion, par une suspension aqueuse d'hydroxyde de calcium (c'est le classique lait de chaux) selon la réaction ci-dessous:



La désulfuration des gaz de combustion de charbon et de fuel est de plus en plus rendue obligatoire afin de préserver l'environnement. Cela concerne principalement les centrales thermiques au charbon qui produisent de l'électricité, des pays tels que l'Allemagne, la Grande Bretagne, les Etats-Unis, le Japon, pratiquent la désulfuration des fumées [4].

1.2.4 .Structure cristalline du gypse

La structure consiste en l'empilement de couches d'ions de calcium Ca^{2+} et sulfate. La projection de la structure sur le plan (001), figure 1.3 donne une présentation assez nette de la microstructure :

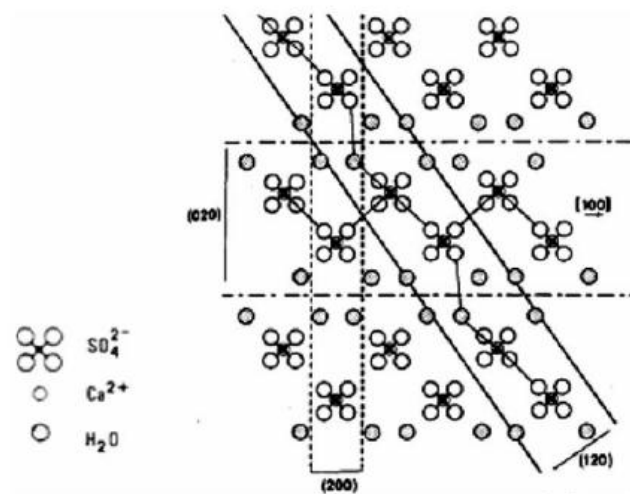


Figure 1. 3 : Projection de la structure cristalline du gypse sur le plan (001) [6].

La structure de gypse est retrouvée en deux formes de liaisons chimiques :

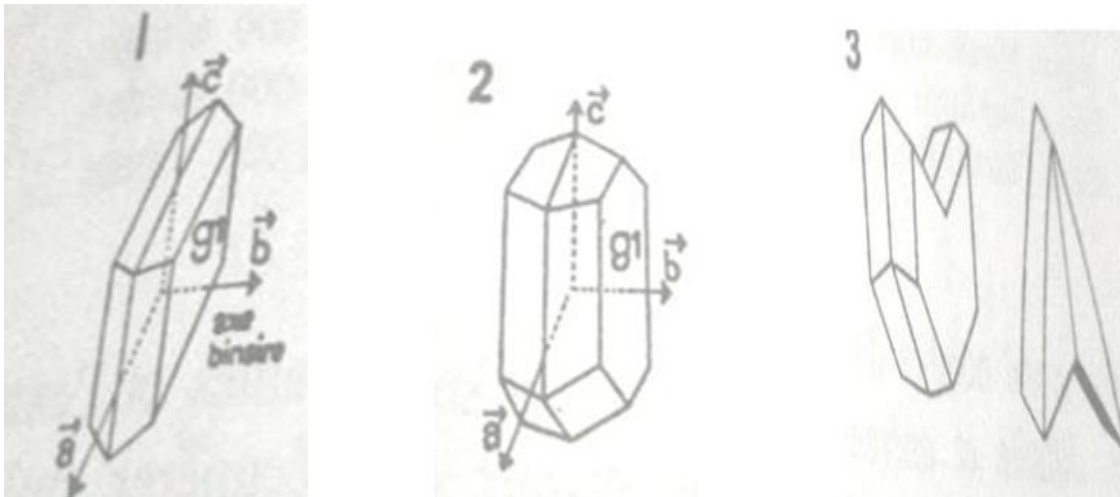
- Des liaisons ioniques (fortes) dans les feuillets $\text{Ca}^{2+}\text{SO}_4^{2-}$ dues aux différences de charges électriques.
- Des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions de sulfate. L'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion de calcium, celles-ci sont beaucoup moins fortes que les liaisons ioniques $\text{Ca}^{2+}\text{SO}_4^{2-}$ [7].

1.2.5. Forme du gypse

Le gypse se présente sous plusieurs variétés qu'on peut grouper en :

A) Gypse cristallisé : en cristaux distincts (sélénite), souvent gros généralement aplatis selon \vec{g} figure a ou prismatiques et allongées parallèlement à \vec{c} figure b. En macles, lamelleux et transparents, dont le fer de lance figure c .

B) Gypse fibreux : agrégats cohérents avec une structure fibreuse , massive ou saccharoïde (albâtre), en grains fins , blancs ou délicatement ombrés , souvent colorés et pouvant contenir des traces d'argiles , d'oxyde de fer ,de calcite (carbonate de calcium Ca CO_3) ou d'anhydrite (Ca SO_4) [3].



a. Cristal aplati suivant g_1 .

b. Cristal prismatique.

c. Macle fer de lance [8].

Figure 1. 3: Forme de gypse.

1.2.6. Différentes phases du système ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

1.2.6.1. Phases semi hydratées Alpha et Béta.

A. Semi hydrate α

Elle est obtenue par cuisson du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en autoclave sous une pression de 1 bar et une température comprise entre 105 et 110 °C .on parle dans ce cas de préparation par voie humide. Il présente sous forme de cristaux bien formés, On obtient alors des plâtres durs, très liquide Ces types de plâtres sont utilisés en tant que plâtre de modelage pour la décoration et la réalisation d'objets d'arts (statues...) mélangés à du plâtre β , ils sont utilisés pour les plâtres α ont des caractéristiques de résistance mécaniques élevées grâce à des taux de gâchage (Eau/plâtre) très faibles de 0,25 à 0,5 d'eau pour 1 de plâtre.

B. Semi hydrate β

Elle est obtenue dans des fours à pression atmosphérique, présentée sous forme de cristaux mal cristallisés et comme plâtre de construction ou préfabrication. Un bon four de cuisson de plâtre β sera celui qui permettra d'obtenir une grande régularité de cuisson du plâtre avec une

composition aussi proche que possible des 100 % de semi-hydrate afin d'avoir un temps de prise long, de l'ordre de 15 à 17 mn (suivant la qualité de la pierre).

Le plâtre obtenu ne devra également pas comporter d'incuit car ils accélèrent le début de prise du mélange ce qui peut gêner le remplissage des moules. On préférera un plâtre cuit à des températures légèrement supérieures et comportant des traces d'anhydre-3.

la figure 1.5 , permet de comparer les deux formes de semihydrate ainsi obtenues.

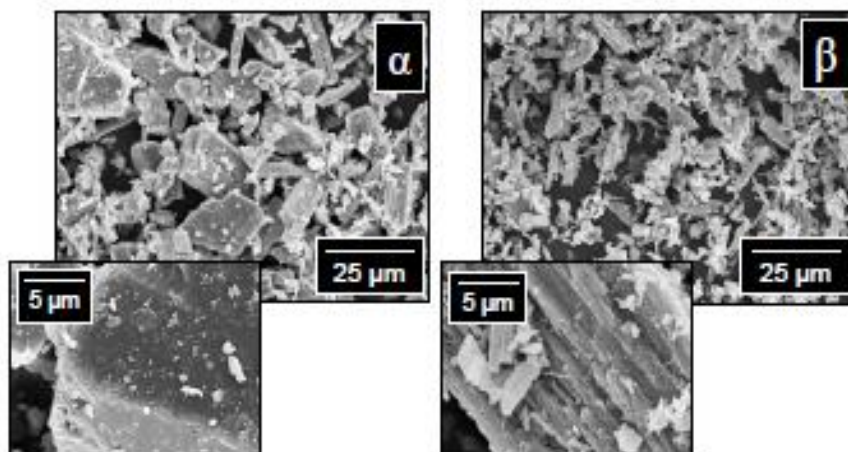


Figure 1. 5 : Image MEB des plâtres prestia obtenues respectivement par voie humide (α) et voie sèche(β) [9].

une étude menée par Lewry et Williamson pour un rapport eau / plâtre de 0.6 montre effectivement que la forme α présente une vitesse d'hydratation plus faible et un temps d'induction plus court que la forme β .C'est pour cette dernière raison que la forme β du plâtre est souvent préférée dans le milieu industriel [10].

1.2.6.2. Les anhydrites

l'anhydrite naturelle de formule chimique CaSO_4 se rencontre dans les formation gypseuses et salifères , ou dans certains gites métallifères. L'anhydrite est aussi obtenue à des températures élevées lors de la cuisson du gypse . Selon la température de cuisson du gypse , on peut obtenir les anhydrites I ,II ,III qui présentent des structures cristallographiques différentes [11].

1.2.7. Propriétés chimiques et physiques de plâtre semi hydrate

Les différents produits de la déshydratation du gypse ayant une application industrielle dans la fabrication des plâtres sont :

le semi hydrate α , le semi-hydrate β et l'anhydrite II (anhydrite insoluble ou surcuit). En outre, l'anhydrite III (ou soluble) peut être présente en quantités variables.

A) Semi-hydrate α

- Compact et cristallin.
- Solubilité dans l'eau est inférieure à celle du composé β .
- Demande peu d'eau gâchage.
- Possède une grande résistance mécanique.
- Obtenue par cuisson humide.
- Donne avec l'eau des mélanges fluides.

B) Semi-hydrate β

- Floconneux et présente des Fissures écailleuses.
- Sa solubilité dans l'eau est supérieure à celle du composé α .
- Donne avec l'eau des mélanges plus épais.
- Demande une plus forte quantité d'eau de gâchage de 70 % .
- Temps de prise plus long.
- Obtenue par cuisson à sec [10].

Le tableau 1.2 donne les propriétés physiques et mécaniques des semi hydrates α et β .

Tableau 1. 2: Propriétés physiques et mécaniques des semi hydrates α et β [12].

Propriétés	Semi – hydrate α	Semi – hydrate β
Masse volumique (kg/m ³)	2670	2630
Temps de prise (min)	15 à 20	25 à 35
Expansion (mm/m)	2,8	1,6
Résistance à la traction (MPa)	6,5	1,3
Résistance à la compression (MPa)	56	5,6
Solubilité dans l'eau à 20 °C en g CaSO ₄	0,63	0.74

Le tableau 1.3 rassemble un certain nombre de données générales physiques et chimiques, concernant les différentes phases de déshydratation du gypse CaSO₄.2H₂O.

Tableau 1. 3: Caractéristiques des différents phases de déshydratation du gypse [12].

Phase	Ca SO ₄ , 2H ₂ O	CaSO ₄ , 1/2H ₂ O		CaSO ₄		
		Forme α	Forme β	Forme III	Forme II	Forme I
Appellation	Gypse (sulfate de chaux)	Semi hydrate α	Semi hydrate β	anhydrite III anhydrite soluble	anhydrite II anhydrite insoluble	Anhydrite I
Système cristallin	Monoclinique	Rhomboédrique		Hexagonal	Orthorhombique	Cubique à faces centrées
Teneur en eau (% en masse)	20,92	6,20	6,20	0	0	0
Masse volumique (Kg/m³)	2,31.10 ³	2,76.10 ³	2,63.10 ³	2,58.10 ³	2,93. 10 ³ à 2,97 .10 ³	2,93 .10 ³ à 3,0 .10 ³
Masse molaire (g/mol)	172,20	145,15	145,15	136,10	136,10	136,10
Volume molaire (cm³/mol)	74,50	52,40	55,20	52,80	45,8 à 46,452	/

1.2.8. Fabrication du plâtre

Le plâtre est fabriqué à partir de gypse naturel (roche sédimentaire extraite de mines ou de carrières souterraines), de gypse de synthèse (produit par le traitement des fumées des centrales thermiques ou à partir de déchets industriels).

La fabrication du plâtre nécessite plusieurs étapes :

- l'extraction et la préparation du gypse ;

- la cuisson ;
- l'obtention des produits finis.

1.2.8.1. Extraction et préparation du gypse

L'extraction se pratique en carrières souterraines ou à ciel ouvert en utilisant des équipements de forage spécifiques et des explosifs non polluants.



Figure 1. 6 : Extraction en galerie souterrain [34]. **Figure 1.7** : Extraction à ciel ouvert [35].

1.2.8.2. Préparation du gypse

Avant d'être introduit dans les fours, le gypse subit un **concassage** et un **criblage** avec recyclage en fonction du procédé de cuisson a pour but de réduire le gypse extrait de la carrière en produits plus fins. Le gypse peut éventuellement être séché dans des cylindres rotatifs avant d'être cuit. Des stocks sont constitués pour éviter de créer des discontinuités dans l'approvisionnement des fours.



Figure 1. 8 : Criblage. **Figure 1. 9** : Concassage. **Figure 1. 10** : Finesse de mouture [36].

1.2.8.3. Cuisson

Cette opération permet d'obtenir par une déshydratation plus ou moins poussées du gypse, les divers éléments constitutifs du plâtre. La déshydratation des gypses est donc fonction de la température, de la durée de cuisson, de la nature du gypse, de la granulométrie mais également d'autres paramètres comme la pression de vapeur d'eau.

Il existe de nombreux appareillages de cuisson que l'on classe habituellement selon les suivantes :

- **Mode de cuisson** : il ya deux types de procédés : Par voie sèche ou humide .
 - ✓ Cuisson en voie sèche (destinée pour la fabrication du plâtre bêta).
 - ✓ Cuisson en voie humide (destinée pour la fabrication du plâtre Alpha).
- **Type de four** : fixe, rotatif, autoclaves, ou autre.



Figure 1. 11 : Four de cuisson du gypse [10].

A) Cuisson en atmosphère sèche

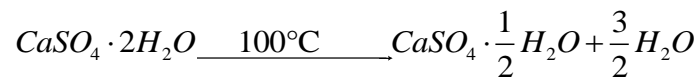
Cuisson par voie sèche est la méthode la plus utilisée pour obtenir la plus grande partie du plâtre. Elle permet d'obtenir le semi-hydrate β , sous une pression atmosphérique grâce à des températures variant entre 110 à 180 °C ,le chauffage est effectué dans divers types de fours, ces fours permettent la fabrication, suivant les températures, soit du semi-hydrate (entre 110 et 180 °C), soit du plâtre surcuit anhydrite II (au-delà de 500 °C).

B) Cuisson en atmosphère humide

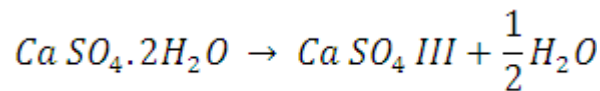
Cuisson du gypse effectuée en milieu aqueux à une température supérieure à 100 °C, soit en autoclave sous pression autoclave sous pression (2 à 12 atmosphères), ce procédé est utilisé pour obtenir le (semi-hydrate α) de très bonne qualité, elle est utilisée pour les plâtre spéciaux et pour le moulage dentaire, cette voie a pour objet d'une faible production (plâtre dentaire) et possède de fortes résistances mécaniques [12].

En fonction de la température, on obtient des différents produits de déshydratation du gypse :

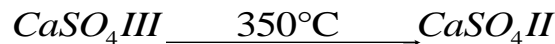
1-Aux environs de 100 °C, on obtient les **semi-hydrates β** suivant la réaction :



2-Vers 200 °C, on obtient l'**anhydrite III** ou anhydrite soluble (instable) qui se réhydrate très rapidement en semi-hydrate au contact de l'eau en phase vapeur :

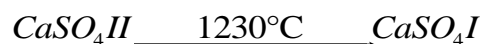


3-Vers 350 °C, l'anhydrite III se transforme en **anhydrite II** stable (surcuit) :



L'anhydrite II se réhydrate lentement au contact de l'eau liquide.

4-Vers 1230 °C se produit à nouveau une réaction de transformation :



L'anhydrite I ne se réhydrate que très difficilement.

5-Au-delà de 1250 °C, on obtient la décomposition de l'**anhydrite I** :



Remarque : De point de vue structurelle, l'hémi hydrate α est bien cristallisé et demande peu d'eau pour le gâchage (rapport massique eau sur plâtre (E/P=0.3), tandis que l'hémi hydrate β présente une structure très poreuse avec un gâchage adéquat qui ne peut être réalisé qu'à des rapports E/P > 0.6 [13].

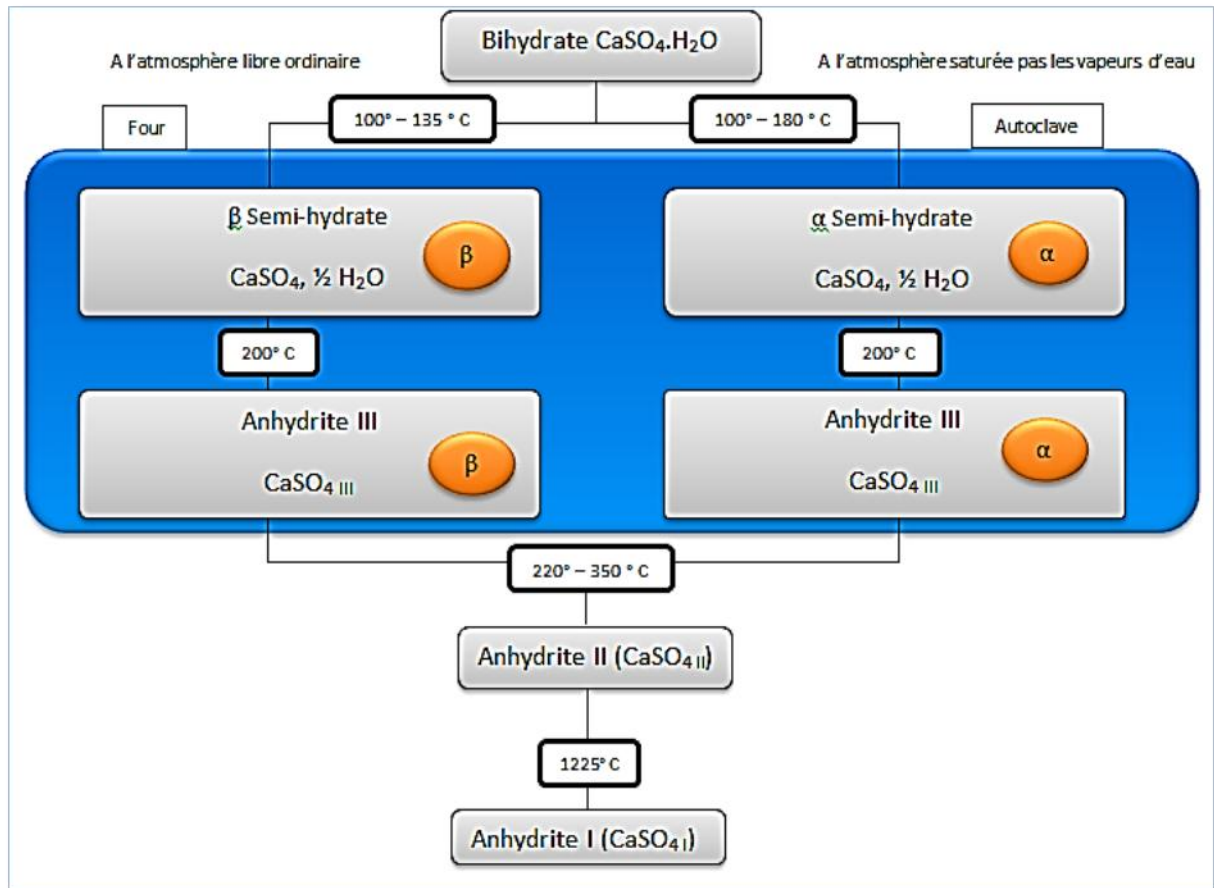


Figure 1. 12 : Schéma de déshydratation du gypse [14].

1.2.8.4. Moutures, mélange, distribution

Après la cuisson les différents sortes de sulfates de chaux (semi-hydrates et de l'anhydrite) sont mélangées et broyées à la finesse voulue , la finesse de mouture obtenue dépend de l'utilisation du plâtre (1500 et 12000 cm^2/g) .Le plâtre stocké quelques jours parfait son homogénéisation et subit un vieillissement favorable à sa qualité. Le produit final (plâtre) est stocké en silos, puis commercialisé soit en sacs de 25 ou 40 Kg, soit en vrac dans des récipients [12].

1.2.8.5. Contrôles de fabrication

La marche des appareils de production est contrôlée en permanence et régulée par des cabines de télécommande. Au sortir des fours et avant la mise en silo, les caractéristiques chimiques et physiques du produit sont contrôlées périodiques. Ces contrôles portent notamment sur la granulométrie, les temps de prise et les résistances mécaniques en flexion et en compression. Les contrôles effectués varient selon la nature des plâtres fabriqués. Ils sont destinés à garantir, dans tous les cas, le respect des caractéristiques souhaitées par l'utilisateur.

1.2.9. Propriétés physico-mécaniques du plâtre

1.2.9.1. Masse volumique absolue

D'après Cherait [15], les masses volumiques absolues des différents produits sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. 4: Masse volumique absolue des différents produits [15].

Produit	Formule chimique	Masse volumique (g/cm ³)
Gypse	CaSO ₄ , 2H ₂ O	2.30
Semi-hydrate « α »	CaSO ₄ , 1/2H ₂ O	2.65
Semi-hydrate « β »	CaSO ₄ , 1/2H ₂ O	2.75
Anhydrite	CaSO ₄	2.90

1.2.9.2. Densité et porosité

A l'état durci les plâtres courants présentent une densité qui décroît en fonction de l'augmentation du taux de gâchage E/P. La porosité est d'autant plus élevée que le pourcentage des vides augmente. Ce pourcentage a tendance à croître avec le taux de gâchage E/P. Ainsi plus le taux de gâchage du plâtre est important plus le pourcentage de vides présente dans le matériau à l'état durci augmente. Figure 1.13.

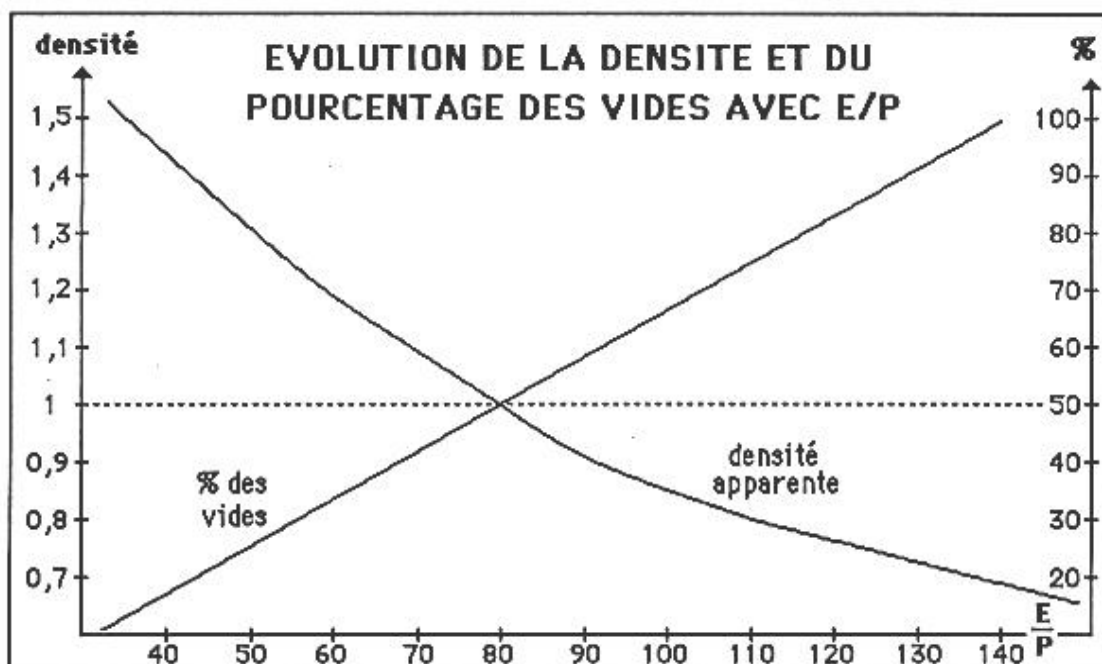


Figure 1. 13 : Evolution de la densité et du pourcentage des vides avec E/P [16].

La densité de plâtre apparente varie en fonction des facteurs :

- Finesse de mouture.
- Rapport E/P.

D'après **Papadakis [17]**, la densité apparente diminue régulièrement lorsque la finesse du plâtre augmente en effet plus les grains sont fins plus le pourcentage du vide est important lors de remplissage d'un même volume. Tableau 1.5 présente les valeurs de la densité apparente des différents plâtres.

Tableau 1. 5:Densité apparentes des différents plâtres [17].

Catégorie du plâtre	Densité apparente (g/cm ³)
Plâtre gros de construction	1.00
Plâtre fin de construction	0.90
	0.80
Plâtre à mouler ordinaire	0.60
Plâtre à mouler ordinaire très fin à projeter	0.40

1.2.9.3. Prise

Lorsqu'on gâche le plâtre avec l'eau pour obtenir une pâte fluide, la prise est la réaction d'hydratation inverse de la cuisson, elle est vive très rapide, elle s'accompagne :

- Forte dégagement de chaleur (réaction exothermique).
- Légère augmentation de volume due à la cristallisation très rapide (0.5 % au bout d'une heure et de 1 % en 24 heures) .C'est le phénomène de prise , s'oppose au retrait susceptible d'accompagner le séchage, et garantit ainsi l'enduit de tout fissuration [3].

1.2.9.4. Durcissement

Le durcissement des plâtres peut être obtenu soit utilisation d'un plâtre spécial, soit à défaut, par incorporation de produits au moment du gâchage. Le processus de durcissement comporte 3 phases :

-Dissolution des produits du semi -hydrate de Ca.

-l'hydratation du semi -hydrate aboutissant à la formation du double hydrate de Ca .

-Cristallisation du double hydrate.

A) Facteur influents sur la prise et le durcissement

- Température la durée la plus courte aux environs 30 °C (Cependant, pour certains plâtres une diminution de température augmente la solubilité du semi-hydrate et le nombre de germes de cristallisation ce qui a pour effet une accélération de prise).
- Quantité d'eau de gâchage : plus la quantité d'eau importante plus la prise est lente.
- Mode de cure et durée de malaxage (il ne doit pas dépasser une minute).
- L'addition de certains adjuvants.
- Présence et absence de surcuit et d'incuit : ces quantités de surcuits et d'incuits influent négativement sur les propriétés finales du plâtre [2].

B) Incorporation d'adjuvants

Pour de nombreuses utilisations dans le bâtiment, l'art ou l'industrie, il est nécessaire de retarder ou accélérer la prise du plâtre pour permettre un travail plus facile.

▪ Accélérateurs de prise

- Chlorure de sodium (sel de cuisine NaCl) .
- Carbonate d'ammonium (sel ammoniac).
- Sulfate de potassium et les sulfates de calcium.
- Bisulfite de sodium [18].

▪ Retardateurs de prise

- Chaux grasse à la dose de 15 g.
- Borax à la dose de 20 g.
- Chlorure de calcium à la dose de 10 g.
- Phosphates.
- Gélatine, la colle, la caséine [2].

1.2.9.5. Durée de prise

La durée de prise est celle qui correspond à la consistance pâteuse du plâtre, et donc à son temps d'emploi.

Le mécanisme de la prise explique qu'elle ne soit pas instantanée, qu'elle varie avec la constitution du plâtre et qu'elle demande d'autant plus de temps que la quantité d'eau de gâchage est plus grande.

1.2.9.6. Variation de volume

La variation de volume de plâtre, comme la proposition de **CHASSEVENT**, dues à :

- L'hydratation des plâtres et qui sont origine chimique.
- Condition extérieurs et qui sont d'origine physique.
- Le coefficient de dilatation des plâtres est de l'ordre de 15 à 20 $\mu/m/^{\circ}C$ [10].

D'après les études **Sattler ;Bruckner [19]**, le processus de prise et de durcissement des pâtes de plâtre est associé à deux principales variations volumiques internes opérant en opposition par rapport à l'autre :

- Une **contraction volumique** (retrait endogène), résultant du fait que le volume des produits de la réaction d'hydratation cristaux de gypses est inférieur à la somme des volume initiaux (eau + anhydre) .
- Une **expansion volumique** (gonflement de prise) , résultant de la croissance progressive des cristaux de gypse au cours de la texturation du matériaux et enduisant une légère augmentation du volume externe de la pâte [19].

1.2.9.7. Adhérence aux matériaux

L'adhérence du plâtre aux pierres ou à la brique est bien. Ainsi qu'aux métaux, le plâtre causé la corrosion du fer et de l'acier surtout à l'état frais. Lorsqu'il est humide. Au cours de gâchage et le moulage du plâtre, ne peut pas armer comme le ciment, mais on fait avec des armatures galvanisées. Par contre à une mauvaise adhérence avec le bois et les surfaces lisses.

1.2.9.8. Isolation thermique

Le plâtre employé seul ou en association avec d'autres matériaux, améliore nettement l'isolation thermiques des parois, en raison de son faible coefficient de conductivité thermique (0.4 à 0.6 Kcal /m.h.°c) qui varie avec la densité et la teneur en eau, les plâtres spéciaux qui incorporent des charge d'agrégats légers qui ont des conductivités thermique de l'ordre de 0.18 à 0.2 $W.m.^{-1}k^{-1}$.Le tableaux 1.6 présente les valeurs de la conductivité thermique qui sont variés avec la densité et la teneur en eau [20].

Tableau 1. 6: Conductivité thermiques des plâtres [20].

Plâtre	Densité (Kg/m ³)	Conductivité thermiques (W/m°C)
Plâtres gâches serrés à très serrés, des plâtres THD et projetés.	1100 à 1300	0.50
Les carreaux de plâtre à parements lisses.	900 à 1000	0.35
Plâtre allèges à la perlite	600 à 900	0.30 à 0.25

1.2.9.9. Isolation phonique

L'isolation phonique, mesurée en décibels (**dba**), croît avec la masse et décroît avec la rigidité de la paroi. Les cloisons en carreaux de plâtre présentent des caractéristiques phoniques comparables à celle des cloisons de briques ou de parpaings [21].

1.2.9.10. Résistance mécaniques

La résistance mécanique varie en fonction de plusieurs paramètres: la nature et finesse de plâtre, taux de gâchage E/P, temps de prise, milieu de conservation, humidité et adjuvants (augmente la durée de prise).

A. Résistance à la compression

La résistance mécanique du plâtre diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage (E/P). D'après Papadakis [17], les résistances diminuent lorsque la teneur en eau augmente, lorsque le rapport (E/P) passe de 0.55 à 0.80.

En plus, il montre que pour une conservation en atmosphère sèche, les résistances sont doublées entre 2 heures et 1 jour, quadruplées entre 2 et 7 jours. Après 28 jours ou 90 jours les résistances n'augmentent pratiquement plus [17].

La courbe ci-dessous donne l'influence du rapport E/P sur la résistance mécanique.

La figure 1.14 montre que les résistances mécaniques à la compression décroissent avec l'augmentation du rapport E/P. Ceci explique, une fois la cristallisation achevée, l'eau de gâchage non fixée chimiquement quitte le matériau au cours de gâchage. Le départ de cette eau crée une porosité interne. En conséquence, plus le plâtre est gâché avec beaucoup d'eau, le pourcentage des vides augmente et la résistance à la compression baisse.

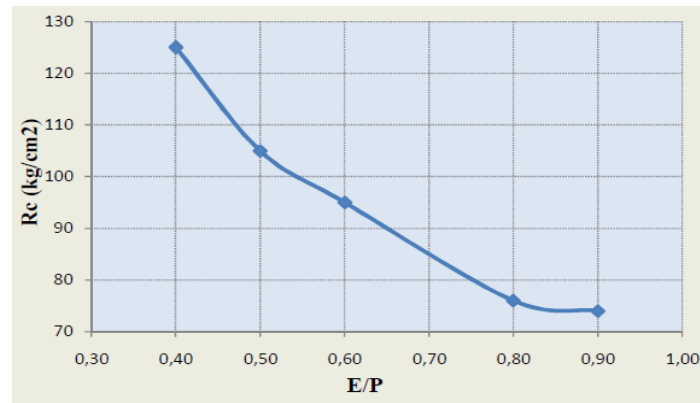


Figure 1. 14 : Influence du rapport E/P sur la résistance mécanique [22].

Pour l'obtention d'une meilleure ouvrabilité et une résistance satisfaisante, on prend un rapport $E/P = 0,6$, ces résultats presque conformes aux recherches et recommandations de C.N.E.R.I.B [2].

B. Influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier

La courbe ci-dessous montre que l'ajout de sable de dunes provoque une diminution de résistance à la compression par rapport à la pâte pure de plâtre. Figure 1.15 présente l'influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier.

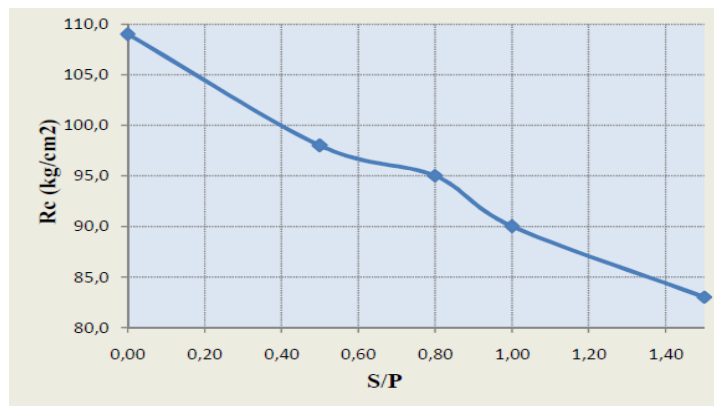


Figure 1. 15 : Influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier [22].

Le C.N.E.R.I.B [2], montre que les meilleures ouvrabilités et une bonne résistance mécanique en compression ont été obtenues avec un rapport $S/P = 0,5$ en poids équivalent à $S/P = 0,4$ en volume.

1.2.9.11. Résistance au feu

Le plâtre est un matériau incombustible, l'eau contenue dans le plâtre ou di hydrate de sulfate de calcium en se vaporisant au cours d'un incendie, absorbe ainsi la chaleur et retarde la

montée en température .au cours d'un incendie, le plâtre ne libère pas de produit toxique, mais seulement de la vapeur d'eau.

Il est classé A1 selon la décision de la commission européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits appartenant aux classes à aucune contribution à l'incendie '' lorsqu'il ne contient pas plus de 1% en masse ou en volume de matière organique répartie de manière homogène . Pour les cloisons, il existe un essai de résistance au feu qui en détermine son classement anciennement appelé '' **coupe-feu**'', qui combinent une faible densité et une bonne résistance au feu. Alors le plâtre est un excellent matériau pour la protection contre l'incendie et la résistance au feu [23].

1.1.9.12. Taux de gâchage

Le rapport E/P est le rapport entre la quantité d'eau utilisée pour hydrater une quantité poudre de plâtre ou héli hydrate. Ce rapport est appelé le taux de gâchage , la quantité stœchiométrique d'eau nécessaire pour hydrater l'héli hydrate en gypse est de 18.6 % en masse ($E/P = 0.186$) pour obtenir une pâte fluide et facile à utiliser, en général le gâchage du plâtre se fait avec un rapport E/P (0.3-0.5) pour l'héli hydrate α et un rapport (0.5 -1.2) pour l'héli hydrate β . L'eau en excès par rapport à celle stœchiométrique doit s'évaporer ce qui provoque la formation de pores, cette porosité est celle en fonction de taux de gâchage, entrainait une diminution des propriétés mécaniques [24].

1.2.10. Variétés de plâtres

L'industrie plâtrière fournit en fonction des différents paramètres en présence :

- Nature des gypses.
- Procédés de fabrication.
- Finesse de mouture.
- Mélanges et ajouts.

Plusieurs catégories de plâtre dont les caractéristiques propres peuvent ainsi répondre aux différentes exigences des utilisateurs.

Les produits commercialisés sont différenciés en fonction de :

- Granularité, plâtre gros ''G'',ou plâtre fin ''F''.
- Mode de mise en œuvre , manuelle ''M'',projection mécanique ''P''.
- Temps d'emploi ''1, 2,3'' suivant qu'il est court allongé ou long.

- Dureté, normal ‘‘ N’ ou très haute ‘‘THD’’ [25].

1.2.11. Différents types de plâtre

On distingue deux types de plâtres couramment utilisés dans la construction, classés en fonction de : granularité, durée de prise, on distingue quatre qualités de plâtre :

- Le plâtre gros ou fin , a prise rapide . Symbole **PGC1, PFC1**.
- Le plâtre gros ou fin , a prise retardée Symbole **PGC2, PFC1**.

Les propriétés des différents types de plâtres sont présentées dans le tableau 1.7.

Tableau 1. 7: Propriétés des différents types de plâtres [26].

Type	refus au tamis de 800 μ m	Eau de gâchage	Temps de prise (min)	Consommation (5 m ² / sac de 40 kg)
Plâtre Gros	$5 \leq r < 20\%$	75 à 100%	8 à 25 min	8 kg/m ²
Plâtre Fin	$r < 1\%$	40 à 100%	30 à 60 min	8 à 12 kg/m ²

1.2.12. Utilisation de plâtre

Cimenteries

- Les gypses mélangés au clinker pour régulariser la prise des ciments dans les teneurs minimales de 2 %.

Agriculture

- Le gypse apporte les ions calcium et sulfate nécessaires à la croissance des plantes, en évitant l'augmentation du pH comme dans le cas de l'apport de chaux
- Dans les engrais et amendements (floculation des argiles) .

Bâtiments

- Le plâtre mélangé à la chaux grasse (10 à 15%) et au sable donne un mortier très utilisé comme enduit extérieur et intérieur.
- emploie le plâtre gros pour la première couche d'application sur les plafonds et les murs, pour les travaux de remplissage, on utilise le plâtre fin pour la dernière couche de finition.
- utilisés souvent pour cloison, plafond, contre-mur ou isolation thermique et acoustique et la résistance au feu.

- Rattrapage d'irrégularités importantes et localisées du support.
- Montage de maçonneries.
- Travaux de réparation et réhabilitation.

Autre utilisations

- Comme charge minérale pour plastiques, peintures, papiers, traitements des eaux.

1.2.13. Eléments préfabriqué à base de plâtre

Les éléments les plus utilisés dans les bâtiments sont des matériaux confectionnés en usine sont :

- Eléments à faces lisses pour parois verticales.
- Plaques hydrofugées.
- Carreaux et plaques (sandwich de plâtre compris entre deux feuillets de carton).
- Résistance aux chocs : plaques de très haute dureté.
- Absorption acoustique : plaques perforées.
- Eléments de décoration : plaques pré-imprimées.
- Moules pour vaisselle et sanitaires.

Les éléments à base de plâtre couramment utilisés pour la construction des murs et planchers sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. 8 : Les éléments préfabriqués en plâtre et leurs utilisations [2].

Eléments	Dimensions (cm)	Matériaux de constructions	Utilisation
Blocs pleins	14x20x40 10x20x40	-Mortier ou béton de plâtre. -Mortier de plâtre. -Plâtre pur.	-Mur porteur. -Double paroi de mur. Porteur et cloison.
Blocs creux	20x20x40 15x20x40	-En Mortier ou béton de plâtre. -En Mortier de plâtre. -Plâtre pur.	-Mur porteur -Double paroi -Cloison.
Carreaux de plâtre	5x66x50 7x66x50 10x66x50	-Plâtre pur.	-Uniquement en doublage. -Double paroi. -Cloison.
Voûtains	15x54x40	-Plâtre pur ou mortier	-Elément de plancher.

1.2.14. Domaine d'application des éléments à base de plâtre

Soltane [27] présente le prototype réalisé à Biskra avec éléments suivants :

- Blocs en béton de plâtre ;
- Planchers premier niveau et terrasse sont constitués à base de poutrelles semi – préfabriquées en béton armé et une dalle de compression en béton coulé sur des vouîtains en plâtre comme coffrage perdu. Les parties restantes ont remplies du béton de plâtre.

Les recherches actuelles, au **Maroc [28]** , ont pour objectif l'introduction du plâtre dans de nouvelles utilisations tel que le prototype de Rabat dont les éléments utilisés sont :

- Des dalles en plâtre armé pour planchers des voûtes.
- Mur non porteur en carreaux de plâtre.

Aldeberet [29], pour la rénovation des salles de dépôt du grand Louvre, a choisi le plâtre sous multiples formes :

- Des cloisons destinées à devenir support de cinoises (droites cintrées ou autoporteuses suspendus à la charpente).
- Des plafonds de staff.

Le **C.S.T.B [30]** montre que l'utilisation des plaques de plâtre permet de remettre à niveau des sols déformés ,lors de la réhabilitation des bâtiments, cette technique de chape sèche apporte des performances d'isolation acoustique et thermique et ne demande pas le renforcement de la structure en raison de son faible poids.

Les figures ci-dessous présentent les différentes utilisations du plâtre.



Figure 1. 16 : Carreaux de plâtre hydrofuge pour réaliser des cloisons [31].



Figure 1. 17: Plaques de plâtre avec isolant polystyrènes [32].



Figure 1. 18 : Voutains [28].



Figure 1. 19 : Chape au plâtre [33].

1.2.15. Les recommandations du C.N.E.R.I.B

- Les constructions en murs porteurs de « plâtre » ne sont autorisés que pour les ouvrages simples à un ou deux niveaux, quel que soit leur usage.
- Le plâtre entrant dans la construction des blocs de mortier ou de béton de plâtre est un plâtre de construction.
- Elles s'appliquent pour les constructions en zones à sismicité faible ou nulle (zone 1 et 0 du RPA 81). Pour les zones 2 et 3, il y a lieu de compléter les présentes recommandations par les exigences du RPA 81 [2].

1.3. Conclusions

Il ressort de cette bibliographie sur les plâtres que malgré l'existence de beaucoup de recherches dans le domaine plâtre, il n'y pas des méthodes universellement connues pour la formulation des mortiers et des bétons de plâtre et quelles recommandations du C.N.ER.I.B. sont venues combler un vide existant dans ce domaine dont l'essentiel sont comme suit :

- Le taux de gâchage à saturation du plâtre $E/P = 0.60$.
- Dans le cas de mortier de plâtre on prend $S/P = 0.50$ car un excès du sable diminue les résistances mécaniques.

Pour faciliter la mise en œuvre du plâtre on ajoute la chaux aérienne comme retardateur de prise et qui n'affecte les propriétés mécaniques du plâtre.

En fin, pour améliorer les propriétés des plâtres on va ajouter quelques matériaux tels le sable de dune, les déchets de plastiques recyclées, la chaux pour l'introduire d'une façon rationnelle dans le domaine de bâtiments.

Chapitre 2

Les Bétons légers

2.1. Introduction

Les bétons légers connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, dans cette période connaissent un regain d'intérêt, qui semble tout à fait mérité en raison de leurs propriétés. Il est très important de bien définir dès le départ, ce qu'est un béton léger, La commission R.I.L.E.M des bétons légers propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 Kg/m^3 . Cependant d'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes, Cormon[37] appelle béton léger un béton dont la masse volumique apparente à 28j inférieure à 1800 Kg/m^3 (1973) dans les conditions normales de conservation (température de 20° et 65% d'humidité relative).

De même L.A.C.I Institut American du béton limite la masse volumique apparente des bétons à 1800 kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours. Par contre Short et Kinniburg [38] considèrent que la masse volumique apparente sèche d'un béton léger doit être inférieurs à 1775 Kg/m^3 . Ainsi en Allemagne fédérale la norme DIN1042, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 Kg/m^3 [39].

En fin il est difficile de donner une définition précise des bétons en se basant sur une limite supérieure de la masse volumique apparente. Cependant la définition avancée par Cormon [37] semble la plus intéressante, car elle est proche des valeurs limites de masse volumique généralement admises et surtout car elle est la plus précise quant aux conditions de conservation du béton et à la date de mesure [40].

2.2. Béton léger

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles applications, ce qui le distingue du béton ordinaire, est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m^3 , tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m^3 . D'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m^3 . Les béton légers sont des bétons constitués de granulats de faible densité (billes de polystyrènes, argile, schiste ,particules de bois , granulats plastiques etc) ou éventuellement de mousse cellulaire. Ils sont utilisés pour des éléments porteurs à condition que l'on possède des granulats permettant d'atteindre les résistances voulues ;dans la rénovation sur plancher bois et dans l'allégement des structures.

L'utilisation des bétons légers en construction signifie par une amélioration des performances thermiques, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel, un gains de temps et de matériel et donc un positionnement plus intéressant par rapport à la compétitivité économique [41].

L'institut de génie civil de l'université de Sydney en Australie a adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leurs utilisations dans la construction. Tableau 2.1 Cette classification a été recommandée par la suite par la commission **RILEM** [42].

Tableau 2. 1: Classification fonctionnelle des bétons légers selon la RILEM [42].

Classe	I	II	III
Béton léger	Béton léger de construction	Béton léger de construction et d'isolation	Béton léger d'isolation
Masse volumique (kg/m³)	< 1800	Non précisée	Non précisée
Résistance la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W.m⁻¹.K⁻¹)	/	< 0.75	< 0.3

L'augmentation du volume d'air, ou des vides, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Le guide **A.C.I.21-213R-87** [43] distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci puisque la masse volumique et la résistance sont étroitement liées [44,45] ce qui explique pourquoi la norme **ACI21-213R-87** classifie les bétons en fonction de la masse volumique en trois catégories une autre classification des bétons légers est celle de la norme ACI21-213R-87. Tableau 2.2.

Tableau 2. 2: Classification des bétons légers selon la norme ACI 21 213R-87 [43].

Classe du béton	Masse volumique (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa) (MPa)
Béton de granulats léger de structures	1350 à 1900	≥ 17
Le béton de résistance Moyenne	800 à 1350	7 à 17
Le béton léger de faible masse volumique	300 à 800	< 7

En faisant varier la densité des granulats, on peut arriver à fabriquer différents types de béton qui sont appelés bétons spéciaux [46].

On note trois dénominations pour ces bétons, soient :

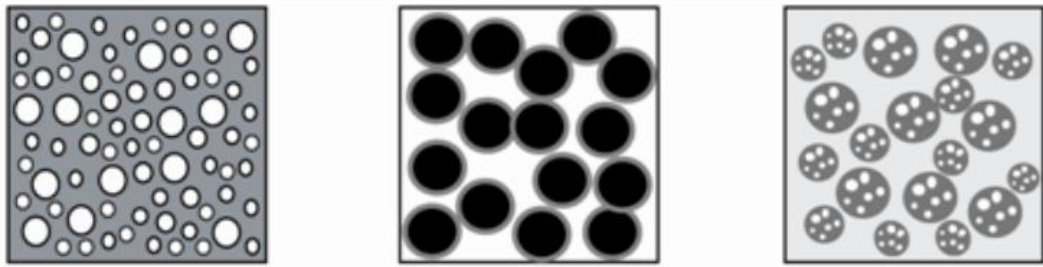
2.2.1. Béton cellulaire, lorsque l'air est incorporé dans la pâte d'un liant, par création d'une réaction chimique dans la masse ou utilisant agent moussant ou agent expansif, ce type de béton caractérisé par une très grande légèreté, très bonne isolation thermique et une grande résistance au feu.

2.2.2. Béton caverneux, ou béton sans fines lorsqu'il vient remplacer les granulats fins entre les gros granulats. un gain de légèreté et une bonne isolation thermique.

2.2.3. Béton à granulats légers, lorsque les granulats sont allégés dont l'air se trouve dans les granulats eux-mêmes. [47], présentant une structure alvéolaire ou cellulaire. Parmi ces granulats, on trouve :

- Granulats minéraux naturels préparés et non préparés,
- Granulats artificiels préparés et non préparés,
- matériaux organiques.

La figure 2.2 montre la représentation des différents types de bétons légers.



Béton cellulaire

Béton caverneux

Béton de granulats léger

Figure 2. 1: Représentation des différents types de bétons légers [38].

2.3. Domaine d'utilisation

Les domaines d'utilisation préférentiels des bétons légers sont divers, on peut les diviser en trois domaines d'utilisation :

2.3.1. Béton de remplissage

Leur masse volumique est faible comprise entre 300 et 800 kg/m³ et ne sont pas porteurs [48]. Leurs contraintes en compression sont faibles. Ils sont en générale de bons isolants thermiques. Ces bétons sont utilisés principalement :

- Protection d'étanchéité sur terrasse ;
- Remplissage de vides et comblement de galeries, murs non ou peu porteurs ;
- Formes de pente de toiture-terrasse et d'éléments manufacturés.

2.3.2. Béton porteurs et isolants

leur masse volumique varie de 1000 à 1300 kg/m³. Ils présentent des caractéristiques mécaniques nettement supérieures. Les qualités isolantes de ces types de bétons sont naturellement inférieures mais suffisantes pour assurer le confort thermique sous certaines épaisseurs. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- Murs banches ou Pièces préfabriqués (panneaux allèges) ;
- Planchers des constructions métalliques à grandes surfaces, protection incendie.

2.3.3. Béton légers de structure

Ils ont une masse volumique de 1700 à 1800 kg/m³. Dans cette classe, figurent les bétons destinés à être armés ou précontraints pour la construction de structures. Ils présentent des résistances caractéristiques à la compression qui dépassent 20 MPa. Ces bétons sont utilisés pour :

- Portées importantes (poutres, voiles) ;

- Structures marines immeubles ;
- Restauration d'anciens immeubles etc [49].

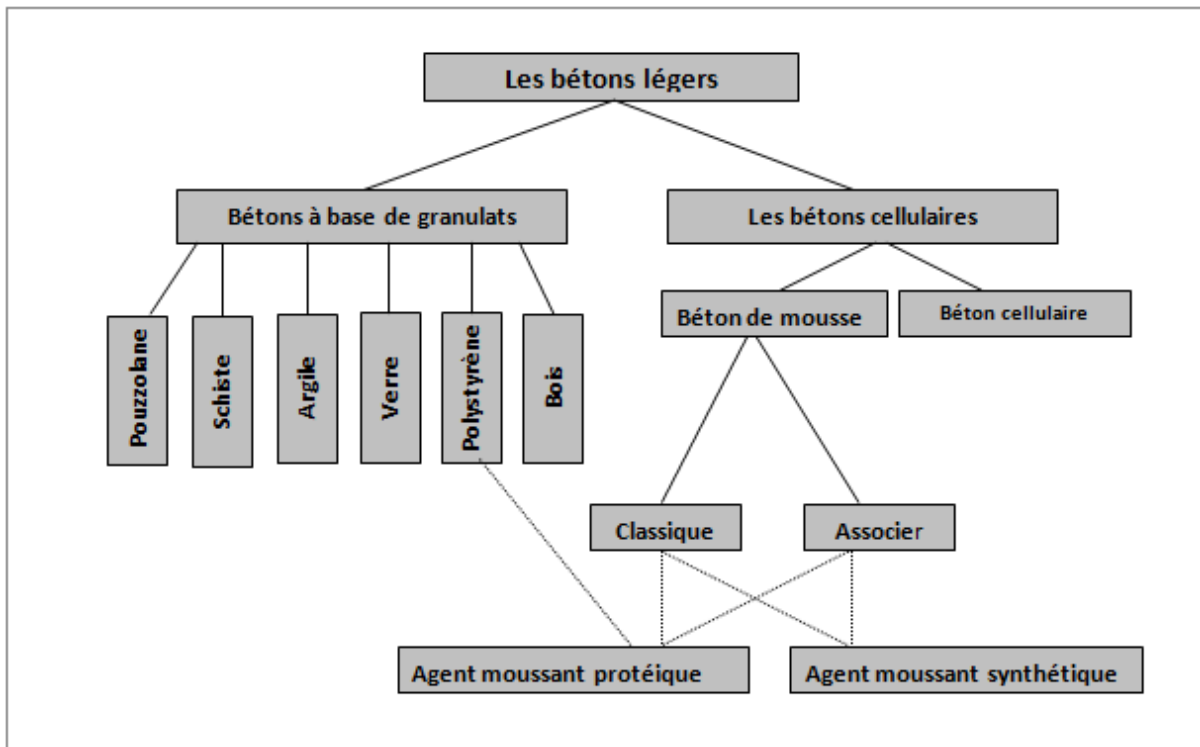


Figure 2. 2: Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [50].

2.4. Bétons de granulats légers

Ce sont des bétons dans lesquels des granulats normaux ont été remplacés par des granulats légers, ils peuvent être pleins ou caverneux, dans ce dernier cas, la granulométrie est fortement discontinue et les éléments fins sont partiellement ou totalement supprimés. Les comportements physiques et mécaniques des bétons de granulats légers sont dictés par le type de granulats légers utilisés, et par leurs propriétés physiques et mécaniques d'une part, et d'autre part par la nature de la matrice utilisée. Selon les exigences demandées et selon le béton utilisé, le choix du type de granulats et de la nature de la matrice s'avère important [20].

2.4.1. Différents types de granulats légers

La caractéristique essentielle d'un granulats légers est sa porosité élevée, ce qui se traduit par une faible densité apparente. Certains granulats légers se trouvent dans la nature alors que d'autres sont fabriqués à partir de matériaux naturels ou de sous-produits industriels.

A. Matériaux naturels

Ce sont des matériaux minéraux naturels non préparés qui n'ont subi que de traitement mécaniques tels que lavage, broyage et tamisage [51] ,[45].Les granulats légers naturels ne sont pas très utilisés même si leur emploi permet de confectionner des bétons de résistance moyenne [46].

La figure 2.3 présente quelques exemples de granulats naturels: OPS (Oil Palm Shell), la diatomite et le laitier volcanique.



a.OPS

b.Diatomite

c.Laitier volcanique

Figure 2. 3: Différents granulats légers naturels [52].

B. Matériaux artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore polystyrène expansé, soit végétal (copeaux de bois) et fibre cellulosique (cas de l'Alfa) [47].

Les bétons confectionnés avec des granulats d'argile ou de schiste expansés ont généralement une résistance plus élevée qu'un béton confectionné avec d'autres types de granulats légers.

Ces granulats sont classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisant à l'expansion et par conséquent, à une diminution de la densité apparente. On distingue :

➤ Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique

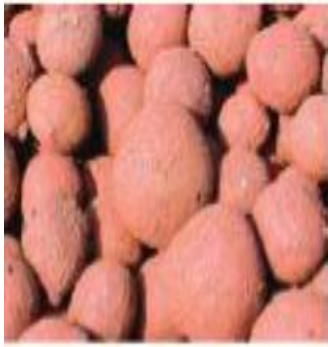
Ces matériaux sont des minéraux naturels préparés .Cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier: l'argile, le schiste et l'ardoise expansées ou frittées, la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.

➤ **Matériaux artificiels ne subissant pas de traitement thermique**

Comme le Mâchefer.

➤ **Matériaux artificiels obtenus par divers traitements spéciaux**

Comme le laitier expansé et les cendres volantes frittées [53].



a. Argile expansée



b. Schiste expansé



c. Laitier refroidie à l'air

Figure 2. 4: Différents granulats légers artificiels [52].

C. Matériaux organiques

Produits organiques, naturels ou artificiels, tels que liège, copeaux de bois, balle de riz, polystyrène expansé, matériaux dont l'utilisation rentre dans le cadre de valorisation des déchets qui a un effet positif sur l'aspect environnemental et l'apport économique de ce type de granulats. En effet plusieurs travaux ont été réalisés où la matrice est composée essentiellement de déchets industriels ou de matières locales.



a. Copeaux de bois



b. Granulats en caoutchouc

Figure 2. 5: Différents granulats organiques [54].

L'allègement de la matrice a été réalisé par différents procédés à savoir, l'utilisation de granulats légers, notamment, les granulats de bois et de caoutchouc, ou la création d'une structure cellulaire, soit par réaction chimique, ou par entrainement d'air [45,55,52].

2.4.2. Propriétés physico-mécaniques et thermiques des Granulats légers

Les propriétés spécifiques des granulats pouvant avoir une influence sur les caractéristiques du béton et qui sont :

2.4.2.1. Forme des grains et aspect de surface

La forme et en particulier l'aspect de surface influent sur l'adhérence matrice-renfort. Les granulats légers peuvent présenter des différences considérables quant à la forme et l'aspect des grains, suivant l'origine et les procédés de fabrication, la forme peut être cubique et assez régulière, en majorité arrondie ou anguleuse et irrégulière. Les aspects de surface peuvent aller depuis l'aspect relativement lisse avec des alvéoles fins jusqu'à l'aspect irrégulier avec des alvéoles petits ou gros [51].

2.4.2.2. Taille des granulats

Sur presque toutes les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons. Selon leurs grosseurs les granulats légers sont classés en deux classes :

- **Granulats légers fins**

Ils sont principalement composés de matériaux cellulaires d'origine minérale, conforme aux prescriptions suivantes :

- a. Ils ont une granulométrie inférieure à 5 mm
- b. Ils ont une densité sèche inférieure à 1100 kg/m^3 .

- **Granulats légers gros**

- a. Ils ont une granulométrie de 5 à 19 mm.
- b. Ils ont une densité sèche inférieure à 880 kg/m^3 .

2.4.2.3. Masse volumique

Grace à leur structure cellulaire, les granulats légers ont une masse volumique plus faible que celle des granulats normaux. Elle est fortement liée à la porosité du granulat et à la densité de la matière d'origine du granulat.

Le tableau 2.3 fixe le choix des granulats en fonction de la classe du béton :

Tableau 2. 3 : Choix des granulats en fonction des classes de béton [51].

Dénomination	Classe du Béton	Masse volumique apparente des granulats (kg/m ³)		
		< 350	De 350 à 550	>550
Isolant thermique	I	(+)	+	0
Isolant thermique	I	(+)	+	0
Isolant thermique et /ou porteur	II	+	(+)	+
De structure	IV	0	(+)	+
De structure de haute résistance	V	0	(+)	(+)

(+) utilisation recommandée + utilisation possible 0 utilisation impossible

2.4.2.4. Résistance des granulats

La résistance des granulats varie selon leur type et leur origine, les granulats de béton de structure, généralement durs et résistants et contribuent en conséquence dans la résistance du béton. La résistance des granulats est plus faible que la résistance à la compression nominale du béton dans lequel ils sont incorporés .ce type de granulats ne peut être utilisé que dans des bétons de plus faible résistance .la résistance inadéquate des granulats limite leur utilisation puisque leurs propriétés physiques influent sur la résistance des bétons même quand ils sont eux –mêmes assez résistants pour ne pas se fracturer prématurément , si l’on compare des bétons fabriqués avec différents granulats, on observe que leur influence sur la résistance des bétons est qualitativement la même : peu importe les proportions des mélanges et peu importe si le béton est soumis à des essais de compression ou de traction. Il est possible que l’influence des granulats sur la résistance des bétons ne soit pas seulement due à leur résistance mécanique, mais aussi, à un certain degré, à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison [46].

2.4.2.5. Porosité et absorption

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% [56].La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d’absorption. Par ailleurs, la porosité des granulats varie proportionnellement à la

taille des grains. En raison de leur structure poreuse, les granulats légers ont tendance à absorber plus d'eau que les granulats normaux. La porosité des granulats, leur perméabilité et leur absorption influencent certaines de leurs propriétés : leur liaison, leur stabilité chimique, leur résistance à l'abrasion ainsi que la résistance du béton au gel et dégel [46].

Un essai d'absorption de 24 heures montre que les granulats légers absorbent généralement 5 à 20% en poids du granulat. Cette absorption dépend de la structure des pores du granulat (porosité ouverte; porosité fermée), de leur taille et de la morphologie interne des granulats [57].

2.4.2.6. Caractéristiques thermiques des granulats légers

En générale, les propriétés thermiques des bétons légers sont directement liées à celles des granulats, ainsi qu'au degré de saturation du matériau. Les granulats légers manufacturés, obtenus à partir de procédés à très haute température, sont généralement caractérisés par une meilleure stabilité thermique que les granulats rigides naturels [58].

2.5. Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons de granulats légers

2.5.1. Masse volumique

La masse volumique est une caractéristique fondamentale du béton léger. en raison de son grand effet sur les propriétés mécaniques et thermiques ou même variations dimensionnelles [46].

Elle dépend principalement de la

- Masse volumique des granulats ;
- Composition du béton léger ;
- Quantité d'eau absorbée par les granulats.

La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants.

Bennacer et Chebabhi [54], montrent que la masse volumique apparente des bétons élaborés (BPPSE, BPDC) diminue rapidement aux 7 premiers jours due à l'évaporation de l'eau, puis elle commence à se stabiliser à partir de l'âge de 14 jours. En augmentant le dosage en granulats de polystyrène et le déchet de caoutchouc la masse volumique décroît.

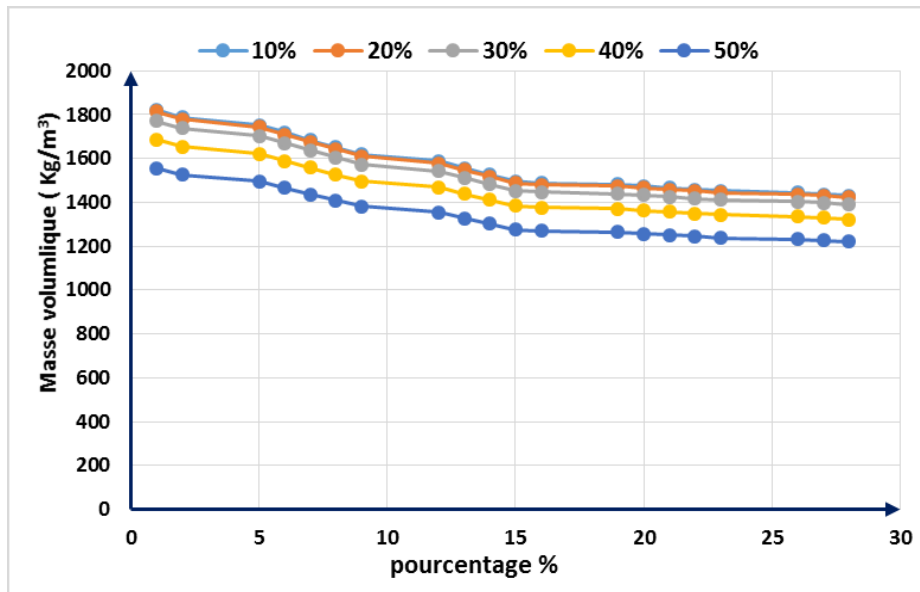


Figure 2. 6 : Variation de la masse volumique de béton de plâtre avec des déchets de caoutchouc [54].

Akçaözöğlü et al ont constaté que les densités à l'état frais et durcis des composites contenant des déchets plastique sont diminuées avec l'augmentation de la quantité d'agrégats de PET dans le mélange de béton. La réduction des poids unitaires peut s'expliquer par la faible masse volumique du plastique PET par rapport à l'agrégat conventionnel [59].

Pedreno-Rojas et al montre que les déchets de polycarbonate réduit les densités des composites à base de plâtre. [87]

2.5.2. Porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités. Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée, due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique. La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant. La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H. varie entre $0.01 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre $5 \mu\text{m}$ et $1000 \mu\text{m}$. L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$P_m = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{liant}}}$$

Avec :

P_m : Porosité microscopiques.

V_{vide} : Volume des vides contenus dans la matrice de liant (m^3).

V_{liant} : Volume total occupé par la pâte de liant (m^3).

Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité microscopique du matériau [60].

D'après [61], la porosité est de l'ordre de 9% d'un béton hydraulique de 36% d'un béton d'argile expansé, de 75 à 82% d'un béton cellulaire et de 52% d'un béton de bois.

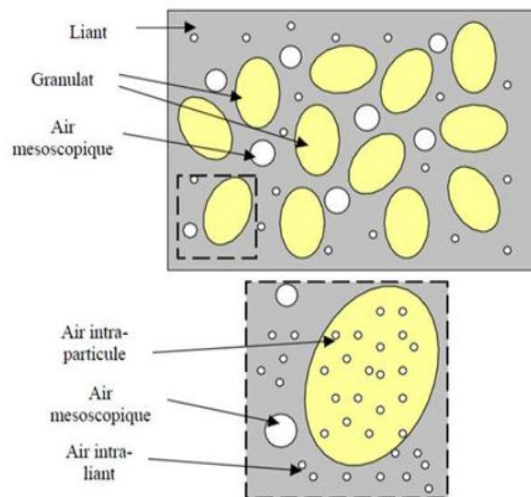


Figure 2. 7: Porosité du béton [60].

Selon la taille moyenne des pores et selon l'état physique de l'eau contenue dans le milieu poreux, la Porosité peut être classée comme le montre le tableau 2.4 [62].

Tableau 2. 4: Différents classes de la porosité [62].

Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0.0001 mm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement
0.0001 à 2.5 mm	Porosité capillaire	Eau capillaire et eau gravitaire
> 2.5mm	Macroporosité	eau gravitaire dominante

2.5.3. Comportement et performances mécaniques

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Dans le cas du béton cellulaire, la grande proportion de vides d'air dans le matériau est un facteur essentiel dans le niveau de performances.

D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats diminue [37].

Les résistances à la compression principales des bétons légers peuvent atteindre 500 et 600 Kg/cm^2 . Elles seront plus ou moins importantes en fonction de la nature et du dosage des constituants, ainsi que le traitement du béton.

Les résistance en traction peuvent atteindre des valeurs maximales de 5 à 7.6 MPa pour des bétons d'une masse volumique moyenne de 1940 Kg/m^3 [63].

Bennacer et Chebabhi [54] montrent que la résistance à la flexion et la résistance à la compression des bétons de plâtre (BPPSE, BPDC), diminuent avec l'augmentation de la teneur des polystyrènes expansés et des déchets de Caoutchouc.

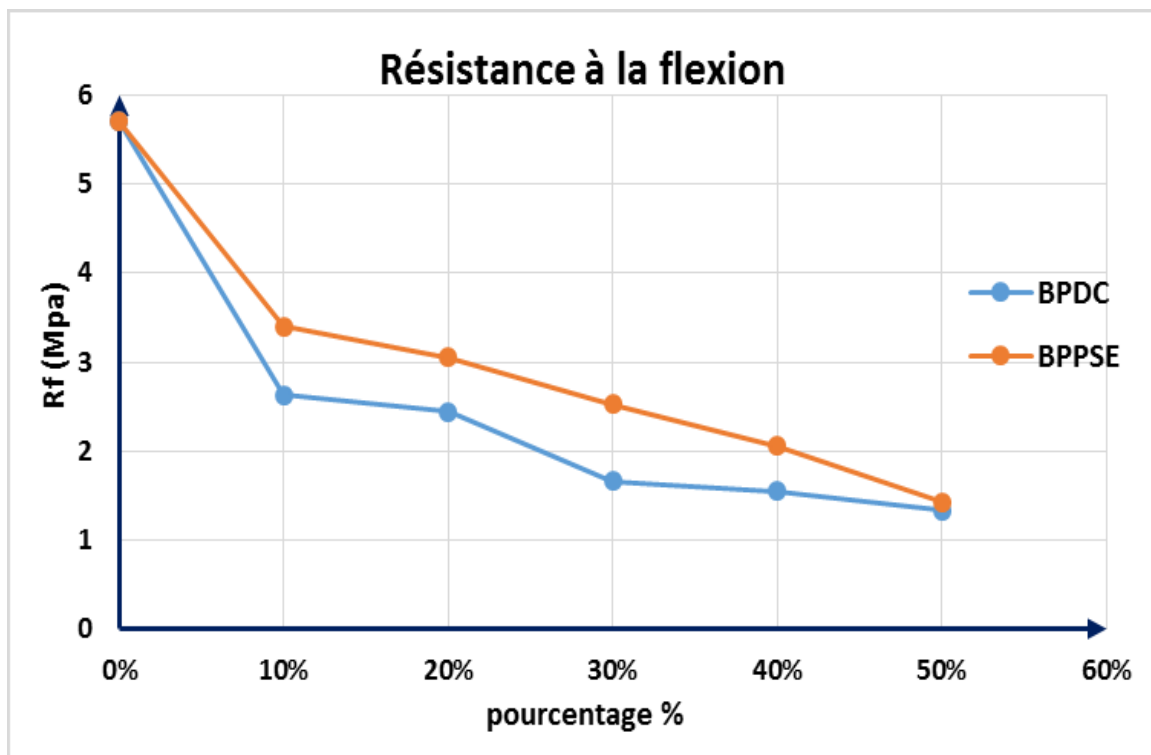


Figure 2. 8: Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats [54].

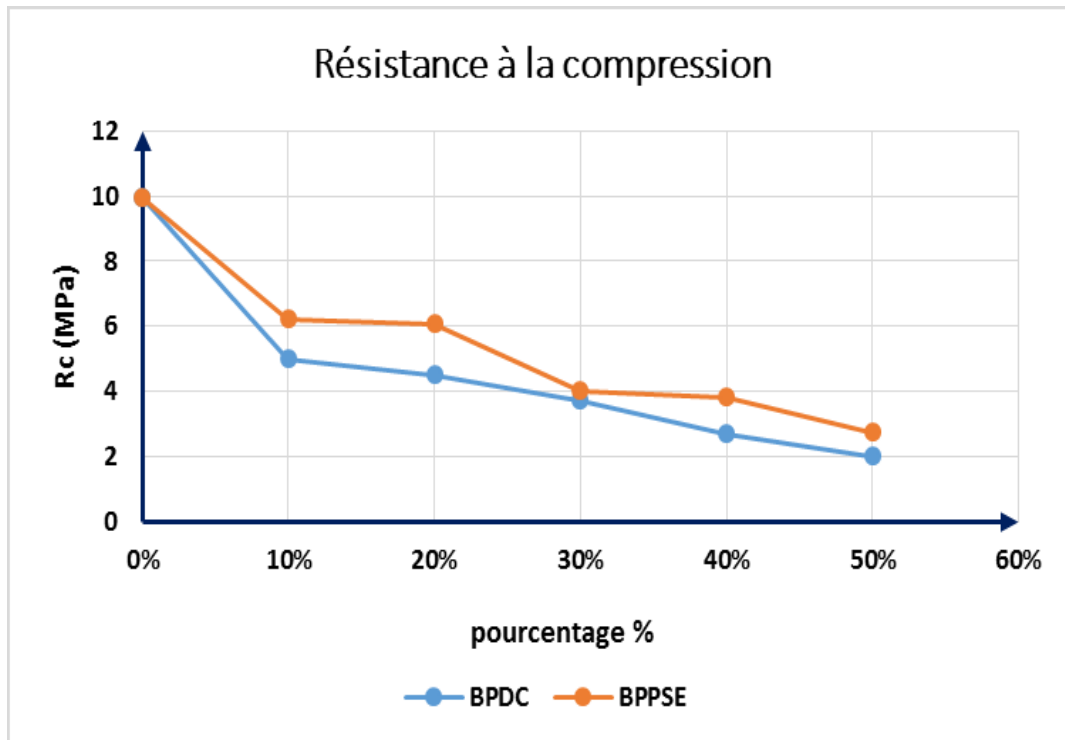


Figure 2. 9: Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jour en fonction de pourcentage des granulats [54].

Kassou [64] montre que la résistance à la compression et à la flexion de béton de plâtre à base de copeaux de bois diminuent avec l'ajout des copeaux de bois.

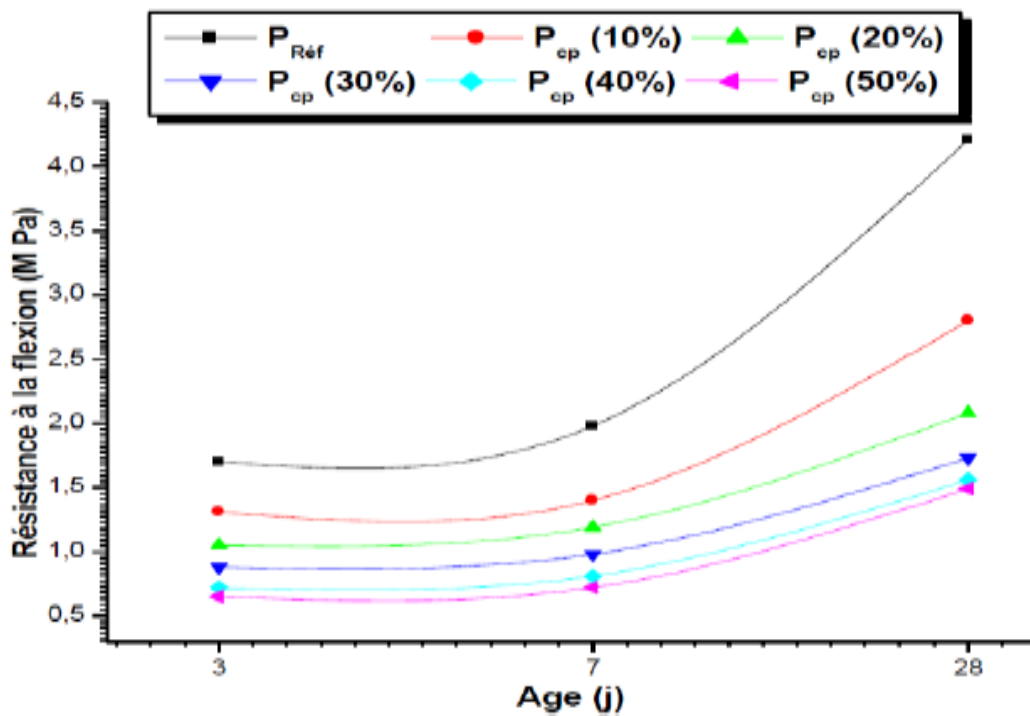


Figure 2. 10: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition Plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jour [64].

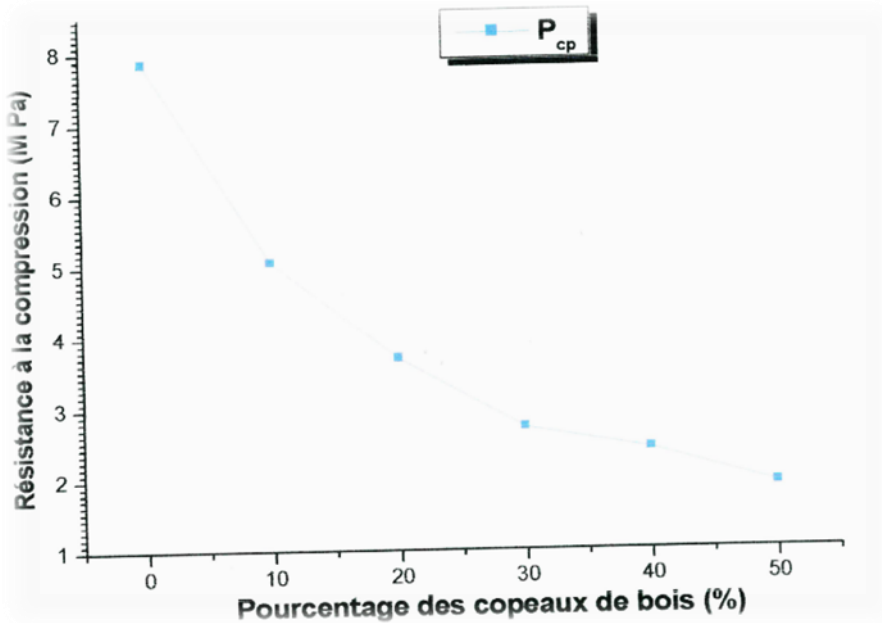


Figure 2. 11: Variation de la résistance à la compression Plâtre + copeaux de bois à l'âge de 28 jours [64].

Cherifi et Slimani [65] à trouver que pour le mortier de ciment à base des déchets PET montrent que la résistance à la compression et à la traction du composite avec déchets de PET augmentent en fonction de l'âge (7j, 14j, 28j et 60j). Elle est de l'ordre de 4.32 MPa à l'âge de 7 jours jusqu'à 6.56 MPa à la traction et à la compression 26 MPa à l'âge de 60 jours.

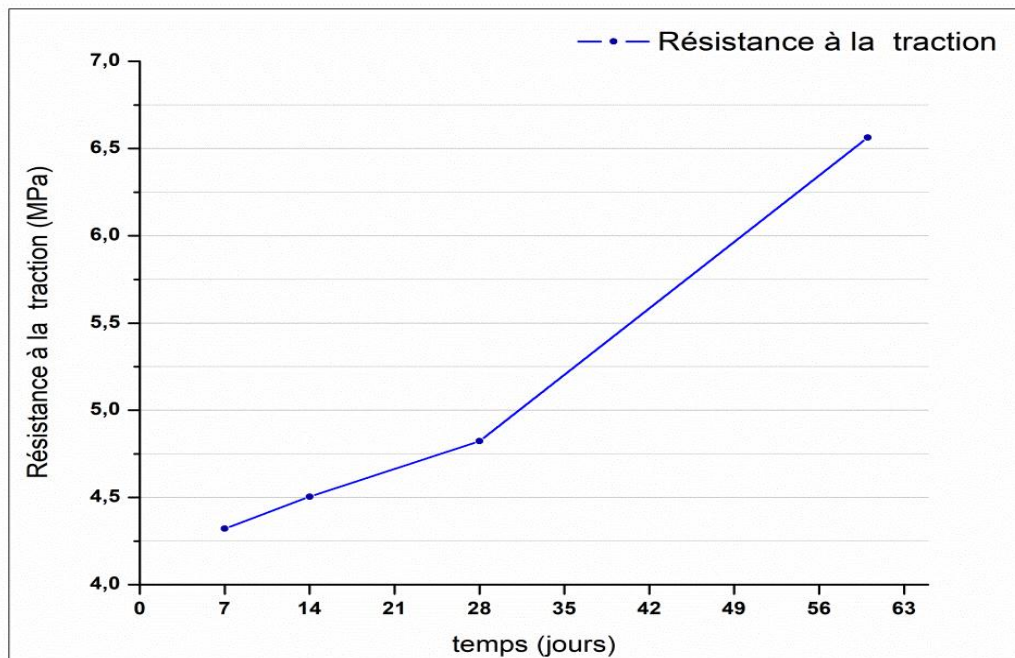


Figure 2. 12: Développement de la résistance à la traction du béton de sable avec des déchets de PET en fonction de l'âge [65].

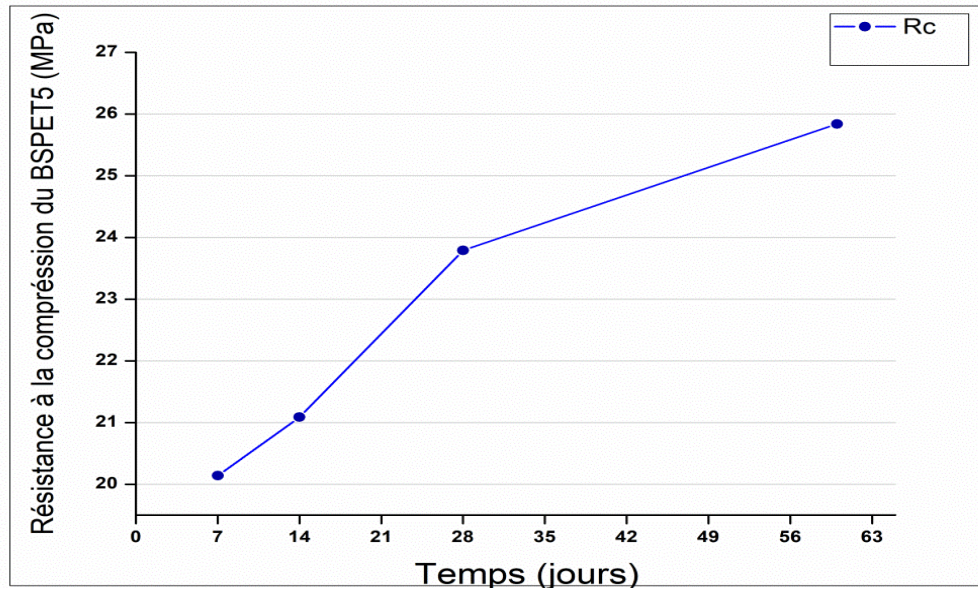


Figure 2. 13: Développement de la résistance à la compression du béton de sable avec des déchets de PET en fonction de l'âge [65].

2.5.4. Retrait

Le retrait des bétons légers est plus important que les bétons traditionnels car l'eau absorbée par les granulats se trouve progressivement restituée, retardant ainsi la déshydratation du mortier. Le retrait au séchage du béton léger est de 5 à 40 % plus élevé que celui du béton ordinaire et les bétons confectionnés avec les granulats d'argiles, de schiste et laitier expansé sont dans la gamme des plus faibles retraits [46]. Le retrait relatif peut être évalué selon le dosage en eau et selon le degré de dessiccation.

2.5.5. L'absorption

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. L'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée (les vides sont inter communicants) [45].

Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus (porosité close ou porosité vacuolaire dénommée aussi porosité résiduelle). Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption (Figure 2.14).

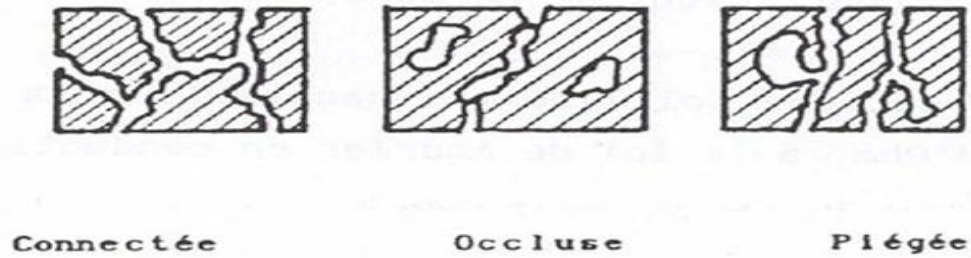


Figure 2. 14: Trois types de porosité présentée dans les matériaux [63].

Bennacer et Chebabhi [54] montrent que l'augmentation des dosages des granulats de polystyrène, entraîne une diminution d'absorption d'eau.

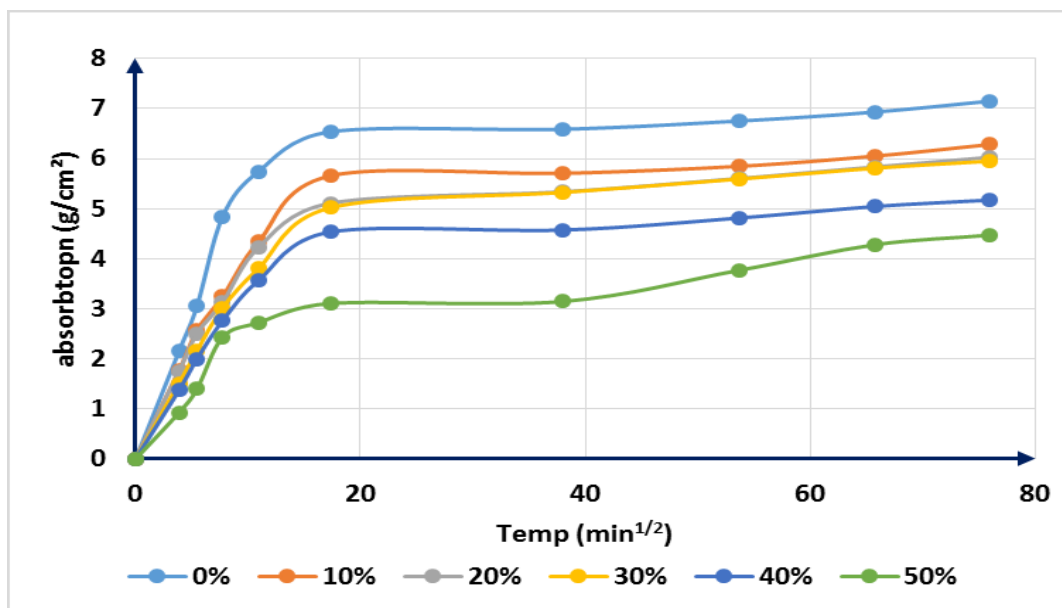


Figure 2. 15: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour béton de plâtre avec polystyrène [54].

2.5.6. Sensibilité à l'eau

Les granulats, poreux et perméables, permettent les transferts hydriques sous forme liquide et sous forme vapeur. Dans le cas d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas d'eau vapeur, on parle de sorption-désorption.

2.5.7. Propriétés thermiques

2.5.7.1. Conductivité thermique

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique λ . Cette dernière est définie comme le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Plus le matériau

est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau [66].

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs [41].

En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ($\Phi \approx 80\%$) ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible.

2.5.7.2. Chaleur spécifique

Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en $J/(kg.K)$. Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de $1^\circ C$. Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure. Le tableau suivant permet de comparer des caractéristiques thermiques de quelques matériaux.

Tableau 2. 5 : Caractéristiques thermiques de quelque matériau [67].

Matériaux	ρ (kg/m^3)	Porosité ϵ (%)	C ($J/kg/K$)	λ ($W/m.K$)
Air	1.2	-	1000	0.026
Eau liquide	998	-	4180	0.602
Béton hydraulique	2330	8	1050	1.80 à 2.00
Béton argile expansé	1600	36	900	0.46
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82	880	0.16 à 0.33
Béton de bois	600 à 900	52	1200	0.09 à 0.30
Brique	1800	-	860	1.15

D'après Hannawi et al [68], les agrégats plastiques ont tendance à ralentir la propagation de la chaleur qui à son tour diminue la conductivité thermique du composite. En outre, L'incorporation des agrégats plastiques cause une augmentation du volume des vides d'air, la conductivité

globale a diminué en raison de la très faible conductivité thermique de l'air (0,024 W / m.K).
Figure 2.16 présente une relation entre la conductivité thermique et la densité sèche des composites.

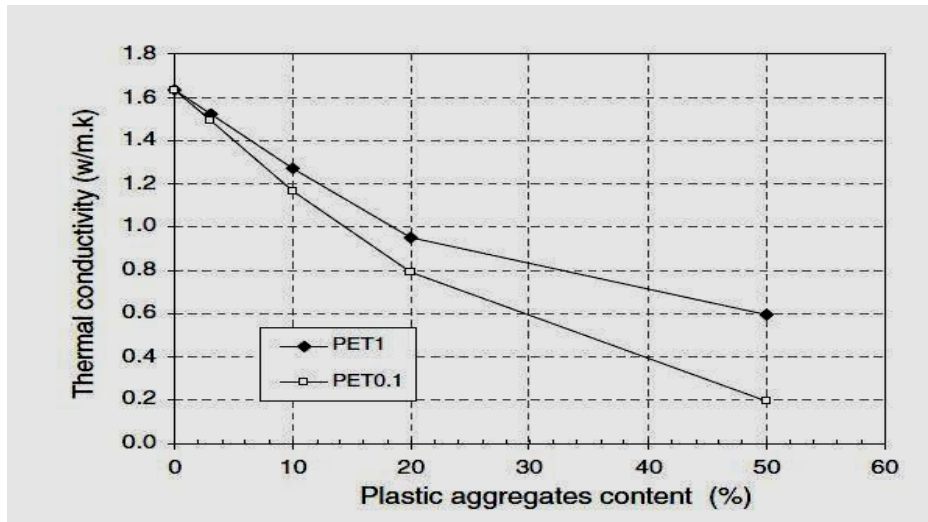


Figure 2. 16: Conductivité thermique en fonction du volume de sable remplacé par PET [68].

Les études de Zitanies [69] et d'après la figure 2.17 ci-dessous , montrent que la conductivité thermique des plâtres décroît en fonction du dosage en liège. Les échantillons allégés donnent des valeurs entre 0.18 et 0.47 W/m.C°. En termes de taux d'isolation, le liège permet l'augmentation du pouvoir d'isolation de 75%.

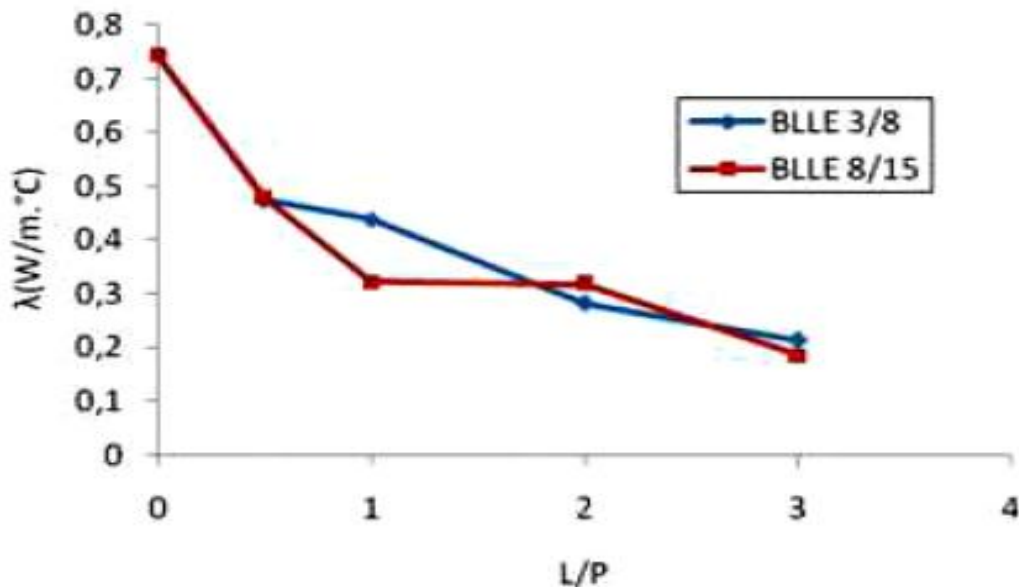


Figure 2. 17: Variation de la conductivité en fonction du rapport liège/plâtre [69].

Laoubi et al [70], montrent que les déchets de caoutchouc améliorent le pouvoir isolant des bétons de plâtre.

Guergab et Abdehali [22] , montrent que la conductivité thermique des bétons de plâtre diminue avec l'augmentation de pourcentage des granulats de polystyrène.

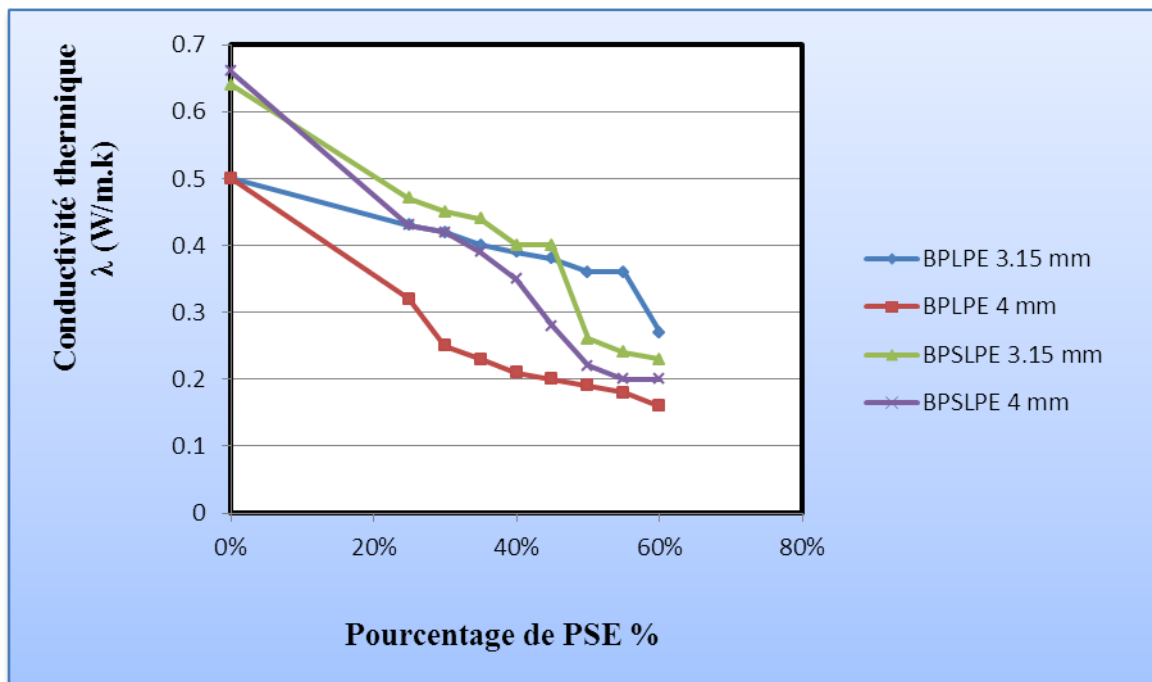


Figure 2. 18 : Variation de conductivités thermiques en fonction de pourcentage de polystyrène [22].

Valeria et al ont trouvé que l'ajout combiné de déchets de PET en particules et de copeaux de bois fait accroître la conductivité thermique des composites à base de plâtre [88].

2.5.8. Autres propriétés du béton léger

La résistance au gel, elle est très bonne, malgré la teneur en eau absorbée, car de nombreux pores non saturés subsistent, qui permettent l'expansion de la glace. Il faut noter en outre une bonne aptitude au bétonnage par temps froid, car la faible conductivité thermique permet au béton de conserver la chaleur de prise du ciment [71].

2.6. Avantages des bétons légers

On peut les classer en trois catégories et qui sont:

2.6.1. Avantages techniques

- Matériau plus légers.
- Meilleure isolation thermique, qualité appréciable du point de vue de la consommation d'énergie dans le bâtiment.

- Meilleure tenue aux conditions extrêmes de température : gel et feu.

2.6.2. Avantages de mises en œuvre

- Mise en œuvre simple et traditionnelle, sans vibration.
- Coffrages plus légers.
- Faciles à manipuler et à déplacer.
- Pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs.

2.6.3. Avantages économiques

- Economie sur le ferrailage des éléments.
- Utilisés en préfabrication, les bétons légers permettent aussi de diminuer les coûts de transport et d'installation.
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Possibilité d'utilisation dans les zones sismiques à cause du gain de poids.
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations [46].

2.7. Inconvénients des bétons légers

- Résistance mécanique plus faible en général, dans le domaine des valeurs élevées
- Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes.
- Néanmoins des matériaux fragiles et peu résistants à la traction. Mais L'utilisation de fibres métalliques demeure une solution efficace pour en augmenter la résistance à la fissuration.
- Faible module élastique des granulats légers augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations différées. (déformabilités instantanée et différée plus grandes).
- Le béton de déchets plastiques est peu compact par rapport au béton naturel 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).

2.8. Béton Léger à base des granulats en plastique recyclée

La réutilisation des emballages de polyéthylène dans des matériaux de construction, tel que le béton de granulats de plastique recyclés, est un nouveau concept de recyclage des déchets plastiques dans les pays en développement comme le Sénégal [72].

Le béton constitue donc un bon matériau pour la récupération puisqu'il est facile d'incorporer des matériaux recyclés lors de sa fabrication. Toutefois, une expérimentation est nécessaire pour

évaluer les performances de ces matériaux recyclés comme granulats sur les propriétés du béton à l'état frais et durci.

Un des objectifs principaux de ce travail de recherche est, non seulement de produire un béton léger, mais également de lui incorporer des matériaux recyclés. Les matériaux recyclés légers peuvent représenter une excellente source de granulats compte tenu du rejet quotidien d'une quantité importante de produits de consommation. L'utilisation de matériaux recyclés dans le béton favoriserait, d'une part, la récupération des matériaux en circulation et, d'autre part, la protection des ressources naturelles. Le béton ainsi produit pourrait être utilisé pour fabriquer une multitude de produits de consommation et, par le fait même, redonner une seconde vie à ces déchets. Il existe plusieurs types de matériaux recyclés. Cependant, compte tenu des critères de sélection établis (disponibilité, coût, masse volumique, résistance mécanique, etc.), deux matériaux retiennent particulièrement l'attention : les plastiques et les caoutchoucs [73].

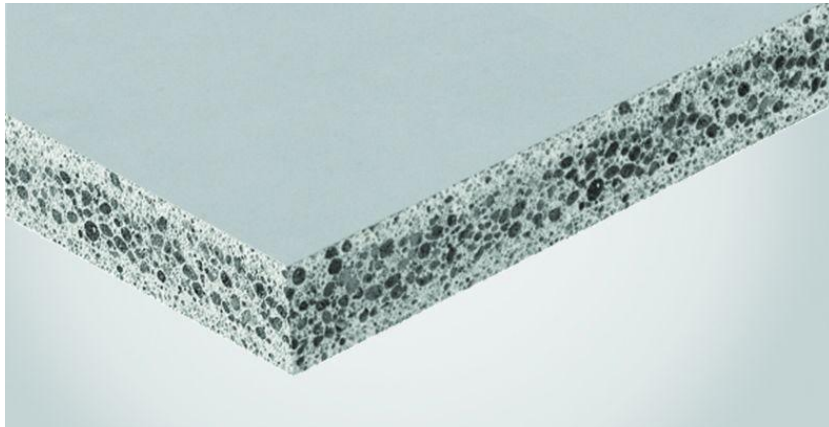


Figure 2. 19: Béton de plâtre avec déchets isolant [73].

2.8.1. Plastiques

Il existe deux groupes de plastique : les thermodurcissables, dont le durcissement, obtenu si chaud, est irréversible, et les thermoplastiques, qui se ramollissent sous l'effet de la chaleur et durcissent au froid de façon réversible.

2.8.1.1. Type de matières plastiques

Les plastiques sont des matériaux déformables : ils peuvent être moulés ou modelés facilement, en général à chaud et sous pression. Leur facilité de mise en forme, résistance aux chocs, aux variations de température, à l'humidité, aux détergents. Les rendent utiles dans tous les domaines : emballage, bâtiment, automobile, électricité, etc. Il existe un grand nombre de plastiques aux propriétés différentes, on les classe en trois grandes catégories:

- Thermoplastiques,
- Thermodurcissables,
- Elastomères [74].

2.8.1.2. Méthode de fabrication

Pour les thermoplastiques, la méthode consiste à réduire les produits récupérés en petites particules et de les faire fondre pour obtenir une toute nouvelle résine pouvant servir au moulage de nouveaux produits. Puisqu'il est impossible de les faire refondre, les thermodurcissables sont concassés en particules de dimension désirée et ils utilisés comme matériaux de remplissage.[77]

2.8.1.3. Thermoplastiques

C'est de polymère pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié.

La transformation est réversible et renouvelable un grand nombre de fois, les thermoplastiques sont ainsi facilement recyclables. Cependant ils ne sont pas biodégradables et ont une « durée de vie » de plusieurs centaines d'années.

Les figures ci-dessous représentèrent des différents thermoplastiques.



Figure 2. 20: Fils textiles en (PET) [81].



Figure 2. 21: Plastique en (PP) [84].



Figure 2. 22: Citernes en (PEBD) [83].

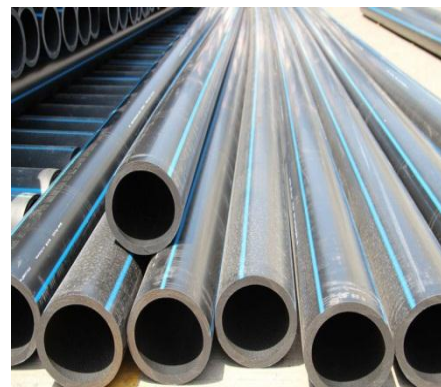


Figure 2. 23: Polyéthylène à haute densité [83]

A. Le polyéthylène téréphtalate (PET)

Le polyéthylène téréphtalate est un polyester qui est obtenue par une réaction de polycondensation de l'acide téréphtalique avec l'éthylène glycol. C'est un polymère linéaire thermoplastique avec un haut degré de cristallinité qui peut être mis en forme par extrusion, injection et moulage ou par soufflage et thermoformage. la formule moléculaire du PET peut être représentée par $(C_{10}H_8O_4)$ [75].

Les PET est surtout employé pour la fabrication de fibres textiles ou de films, les emballages de boisson.

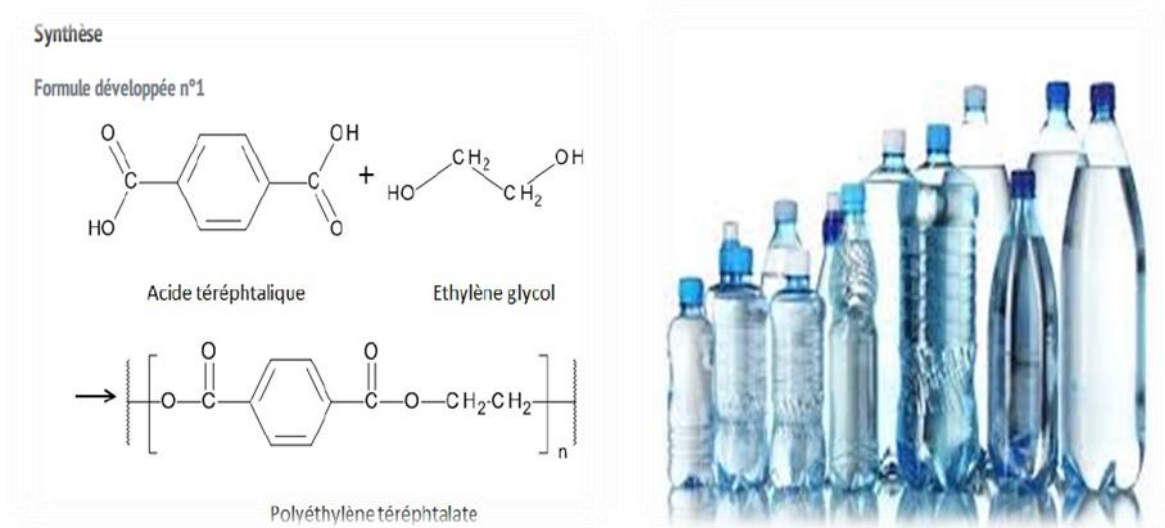


Figure 2. 24: Composition chimiques de PET [74]. **Figure 2. 25:** Bouteilles en PET [75].

B. Type des PET

1. Fibre en plastique

On les trouve sous des formes et des dimensions diverses. Parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des matériaux du Génie Civil et les Travaux Publics on peut citer : Les fibres de polypropylène, les fibres végétales et métalliques.

2. Fines particules des PET

On obtient la poudre des bouteilles de PET par l'écrasement de ses dernières. Les tailles moyennes des particules de PET étaient respectivement de 0,26 et 1,14 cm (Respectivement petites et grandes) et elles ont été estimées sur la base de mesures effectuées sur des micrographies au moyen d'une loupe électronique [76].

3. Agrégats

Le granulat en plastique est produit à partir de flops en plastique. Ce matériau est constitué de prédécesseurs et des grains de PET de taille égale, exempts de niveau microscopique [85].

Ils existent :

- Les granulat déchiqueté (une forme angulaire) .
- Agrégats de PET fins et grossiers.
- Agrégat de PET en forme de pastille.

Les figures ci-dessous représentent les différents types des PET .



Figure 2. 26: Fibre en PET [77] .



Figure 2. 27: Fine particules de PET [76].



Figure 2. 28: Agrégat de PET déchiqueté.

C. Préparation d'agrégats en plastique

La majorité des agrégats en plastique qui ont été utilisés dans les différentes études, ont été préparés à partir des déchets de plastique provenant de différentes sources en général les bouteilles en plastique :

- Broyées dans laboratoire. (différentes types de concasseurs comme ceux à hélice ou à lames sont utilisées pour broyer les déchets) [21].

- La séparation des étapes de broyage est également adoptée après broyage normale pour augmenter l'adhérence des agrégats avec la pâte. Par exemple **Remadnia et al [78]** ont déchiqueté les pièces en plastique dans une étapes de plus en utilisant un broyage et pour faciliter une adhérence à la matrice d'agrégats dure à la forme dont les déchets plastiques ont été traités.
- Lavage a été réalisé avant et après broyage pour éliminer les impuretés présentes dans les déchets plastiques [78].
- Le broyage des déchets de PET a génère des particules en forme de flocon de PET dans la classe de taille de 10-14 mm avec une petite quantité de particules fines.
- Le chauffage et la fusion du matériau est effectué de telle manière à permettre l'extraction de contaminants volatils.
- Le procédé d'extrusion est relativement court, ce qui limite l'apparition de réactions secondaires lors de l'étape de fusion. Après passage à travers une filière, l'état fondu est recueilli dans un bain de refroidissement qui solidifie le polymère granulé avant d'être mis dans un Outil de coupe rotatif dans l'eau. Le mélange de l'eau et des grains de polymère est soumis à un Séparateur vibrant, puis les grains de polymère (granulats de plastique) sont centrifugés pour éliminer l'excès d'eau.

D. Propriétés physico-chimiques du PET

Le PET possède une température de transition vitreuse se situant autour de 80°C et une température de fusion élevée, environ 260°C, grâce à la présence d'un noyau benzénique. Le noyau confère aussi un aspect semi rigide au PET. Il possède également de bonnes propriétés mécaniques et thermiques, une grande résistance chimique et une faible perméabilité aux gaz. Le PET est un polymère semi-cristallin, la masse volumique de la phase cristalline est de 1,515 g.cm³ et celle de la phase amorphe est de 1,335 g.cm³ Le poly téréphtalate d'éthylène broyé doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique [65].

E. Propriétés mécaniques et thermiques du PET

Les propriétés mécaniques et thermiques du polymère poly téréphtalate d'éthylène sont représentées par le tableau suivant :

Tableau 2. 6 : Propriétés mécaniques et thermiques des PET [79].

Point de fusion	254 °C
Conductivité thermique	0.13 W/m.K
Coefficients de dilatation thermique des plastiques	(de 4 à 20 x 10 ⁻⁵ /°C; de 2 à 11 x 10 ⁻⁵ /°F)
Capacité thermique de masse	1.1-1.3 KJ/Kg K
Champ d'application	-20 à +100 °C
Résistance à la traction	70 MPa
L'allongement à la rupture	70 %
Module de flexion	2.0 MPa
Densité	1.34 Kg/dm ³
Perméabilité aux gaz	Médiocre
Perméabilité à l'humidité	Très bonne
Module de traction	2.9 GPa
Résistance aux choc	de 0 à +100 °C

F. Masse spécifique

La masse spécifique de la plupart des plastiques est bien plus faible que celle des métaux. La masse spécifique des polymères et des plastiques se situe normalement entre 0.83 et 2.50 g/cm³. Pour les plastiques alvéolaires elle peut des cendres jusqu'à 0.01 g/cm³ et pour les plastiques contenant des charges, elle peut atteindre 3.50 g/cm³ [77].

I. Densité

Les plastiques ont tous une densité différente ce qui permet aussi de les identifier partiellement. Pour pouvoir faire l'expérience, découpez des fragments d'emballage dans des parties pleines (les poches d'air fausseraient la densité) et disposez-les dans un verre transparent rempli d'eau. Les plastiques qui flottent sont le PP et le PE car ils ont une densité inférieure à 1. Le PS expansé flotte également grâce aux nombreuses bulles d'air qui y sont incluses. Lorsqu'on ajoute du sel à l'eau, on remarque que les autres bouts de plastique s'élèvent progressivement : dans l'ordre on a le polystyrène (non expansé), le PVC et le PET [85].

G. Résistance au feu

Les plastiques se comportent différemment sous l'action du feu: certains s'enflamment, d'autres brûlent rapidement ou lentement, et d'autres sont auto-extinguibles. La nature des polymères et des substances comme les charges, les matériaux de renforcement, les plastifiants ou les adjuvants ignifugeants, déterminent le degré d'inflammabilité.

Les polymères halogénés, tel que le PVC ou le PVC chloruré, sont naturellement ignifuges; lorsqu'ils sont chauffés, ils libèrent des gaz halogènes qui interrompent la réaction d'oxydation en chaîne par radicaux libres. Cependant, si l'on ajoute des plastifiants, le PVC devient inflammable. La résistance au feu des plastiques peut être améliorée par l'adjonction d'adjuvants appropriés ou par l'emploi de polymères naturellement ignifugeants [80].

2.8.2.4. Avantages des plastiques

- Excellentes propriétés d'isolation thermique et électrique.
- Coût de production relativement bas.
- Capacité de combiner avec d'autres matériaux comme l'aluminium, du papier, adhésifs.
- Résistance aux produits chimiques, à l'eau à l'impact.
- Réduction de la consommation énergétique.
- Réduction des émissions du dioxyde de carbone CO₂, dioxyde de soufre (SO₂).

2.9. Recyclage des plastiques

Le recyclage des plastiques doit être pris en considération dans tout programme de gestion des déchets plastiques. En plus de la réduction des quantités des déchets plastiques dans des décharges, il peut aussi contribuer de manière significative à la conservation des matières premières pétrochimiques et l'économie d'énergie [81]. Rebeiz et Craft [82] ont rapporté qu'il y'a quelques contraintes technologiques en produits utiles qui sont :

- La contamination des déchets plastiques par d'autres matériaux tels que les déchets organique et métaux qui peuvent endommager l'équipement utilisé dans le retraitement des déchets.
- Les plastiques ne sont pas des matériaux homogènes tels que l'aluminium ou le papier , mais se composent d'un grand nombre de nuance avec différentes propriétés et structures moléculaires , chaque composant en plastique dans un déchets mixtes a un comportement de fusion différent , rhéologie et stabilité thermique [83].
- Les mélanges de matières plastiques sont généralement non miscibles et forment des phases discrètes et insolubles dans une phase continue.

- Les stocks d'alimentation en déchets plastiques habituellement ne sont pas uniformes tout le temps.



Figure 2. 29: Déchets des PET [83].



Figure 2. 30: Recyclages des PET [82].



Figure 2. 31: Pollution de l'environnement par des déchets de PET [65].

2.10. Propriétés des bétons avec déchets plastique recyclé

La documentation sur le béton confectionné avec des granulats à base de matières plastiques se concentre sur les propriétés mécaniques du béton (Soroushian et coll., 199) visent que :

- L'ajout de matières plastiques contribue à diminuer le retrait au séchage du béton.
- Les particules relativement plates, dont la dimension nominale est de 10 mm, forment un pont en travers des fissures.

- Substitution de 20% du sable par des matières plastiques améliore la résistance à la flexion du béton d'un facteur de 4 à 5 comparativement au béton de contrôle et d'un facteur 8 lorsque ce pourcentage passe à 40 % [86].
- L'incorporation de matières plastiques s'est toutefois révélée néfaste quant à la résistance à la compression. Cette diminution de la résistance peut être attribuée, d'une part, à la diminution de la masse volumique et, d'autre part, à la faible rigidité des matières plastiques (module d'élasticité inférieur à 1GPa) [77,80].

2.11. Conclusions

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique, une introduction en premier lieu sur les bétons léger, ces classifications, ses propriétés, ses utilisations.

En second lieu nous avons présenté une connaissance actuelle sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de plâtre avec les caoutchoucs, polystyrène, copeaux de bois, liège, polyéthylène téréphtalate (PET).

Les bétons légers font partie des bétons spéciaux. Malgré qu'ils soient récemment élaborés, ils ont fait l'objet de plusieurs études et recherches en raison de leurs performances physiques liées à leur légèreté et à leur pouvoir isolant thermique et acoustique.

En plus, la crise du logement ; le coût énorme de la consommation d'énergie et les répercussions de certains déchets sur l'environnement, ont fait des bétons légers parmi les bétons les plus réclamés dans le domaine de l'isolation de la construction. Mais la principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module élastique et la résistance du béton, matériaux poreux pulvérulents...

A la base des classes de béton léger en fonction de la densité et les valeurs limites de la résistance mécanique et de la conductivité thermique ; nous avons retenu les valeurs ciblés suivantes :

- Pour un béton léger de construction : la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m^3 , une résistance à la compression supérieure à 15 MPa.
- Pour un béton léger d'isolation et de construction (isolant porteur): la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m^3 , une résistance à la compression supérieure à 3.5 MPa et une conductivité thermique inférieure à $0.75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Classe II).

- Pour un béton léger d'isolation (élément de remplissage): la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m^3 , elle peut descendre jusqu'à 300 kg/m^3 , une résistance à la compression supérieure à 0.50 MPa et une conductivité thermique inférieure à $0.30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Classe III).

Chapitre 3

**Caractérisation des matériaux utilisés et
techniques expérimentales.**

3.1. Introduction

Les recherches actuelles s'orientent vers l'élaboration des matériaux composites innovants.

Dans le but de valoriser les matériaux locaux, on a formulé un composite à base de plâtre, sable de dune et déchets des bouteilles en plastiques recyclés. Dans le présent de chapitre, on a essayé de déterminer les propriétés physico-mécaniques, l'analyse minéralogique et les compositions chimiques des matériaux utilisés.

3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

3.2.1. Plâtre

Le plâtre utilisé est commercialisé par l'usine « SPA OASIS –GHARDAIA » de la zone industrielle de Bounoura, il est disponible dans le marché dans des sacs plastiques de 40 Kg. La figure 3.1 présente un sac du plâtre utilisé dans ce travail expérimental.



Figure 3. 1: Plâtre « SPA OASIS-GHARDAIA ».

3.2.1.1. Masse volumique absolue (NFP 18-555)

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de l'éthanol contenu dans un densimètre de châtelier de 50 cm³ (figure 3.2), lorsqu'on introduit le plâtre dont on cherche la masse volumique absolue. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\gamma_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \dots \dots \dots .(3.1)$$

Avec

M₁ : Masse de (Chatelier + l'éthanol).

M_2 : Masse de (Chatelier + l'éthanol+ 60 g plâtre).

V_1 : Volume initial d'éthanol.

V_2 : Volume final de liquide après introduction du plâtre.



Figure 3. 2: Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue.

La masse volumique absolue obtenue du plâtre est **2507.21 kg/m³**.

3.2.1.2. Masse volumique apparente (NFP 18-555)

Elle est déterminée par la méthode de récipient standard de volume connu de 1 litre. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_T - M_R}{V} \dots\dots\dots(3.2)$$

M_T : Masse Totale.

M_r : Masse de récipient standard.

V : Volume apparent.



Figure 3. 3: Dispositif pour l'essai de la masse volumique apparente.

La masse volumique apparente obtenue du plâtre est **887 kg/m³**.

3.2.1.3. Finesse de mouture (NF B 12.401)

L'essai consiste à peser le refus sur tamis et calculer la finesse qui est le rapport entre la masse du refus et la masse totale à l'aide des tamis d'ouverture 8/4/2 mm selon la norme **NF B 12.401** (figure 3.4). Cet essai vise à identifier le type de plâtre selon sa finesse de mouture. Les résultats récapitulés dans le tableau 3.1, sont calculés par la formule suivante :

$$F = \frac{M_r}{M_p} \times 100 \dots \dots \dots (3.3)$$



Figure 3. 4: Détermination de finesse de mouture.

D'après les résultats obtenus dans le tableau 3.1 et en les comparants avec le tableau 1.7 (chapitre1) , on remarque que le refus : **5 % < r < 20 %**,ce qui indique que le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction **PGC**.

Tableau 3. 1: Résultats finesse de mouture du plâtre.

Tamis		Refus r en (%) de la masse initial	
Module	Ouverture (µm)	Essai 1	Essai 2
30	800	6.66	6.66
27	400	10	10
24	200	13.33	20

3.2.1.4. Surface spécifique de Blaine du plâtre (EN-196-6)

Le principe est la détermination du temps de passage à travers une certaine quantité du plâtre 3 g , d'une certaine quantité d'air dans des conditions déterminées (figure 3.5) on crée une dépression grâce à une tube manométrique et on mesure le temps de descente du liquide

entre deux repères. La perméabilité étant liée à la surface spécifique des grains [97]. On peut donc le calculer à l'aide du temps (t) relevé grâce à la formule ci-dessous :

$$A = K \cdot \sqrt[3]{e} \cdot \sqrt{t} / \gamma_s(1 - e) \cdot \sqrt{\eta} \dots\dots\dots(3.4)$$

Avec

K : constant de l'appareil.

e : porosité.

γ_s : Masse volumique absolue du plâtre.

η : viscosité dynamique de l'air, à la température de l'expérience.

La surface spécifique du plâtre utilisé est **2533.27 cm² /g**.



Figure 3. 5: Appareil de Blaine.

3.2.1.5. Détermination du taux de gâchage à saturation du plâtre

La quantité de gâchage à saturation est la quantité de plâtre en (g), humidifié lors de son versement dans 100 g d'eau. Cette valeur est déterminée selon la norme **NFB 12-401** comme suit :

-On prend 100 ml d'eau dans un bécher de 250 ml.

-On saupoudre le plâtre dans le bécher pendant 30 secondes jusqu'à ce que le niveau de plâtre soit à 50 ml, et pendant la deuxième 30 secondes atteindre 100 ml et on continue l'opération jusqu'à ce que la quantité d'eau soit absorbée par le plâtre et cela pendant la deuxième minute.

Le rapport P/E pour le gâchage à saturation est égal à :

$$\frac{P}{E} = \frac{M1 - M0}{100} \dots\dots\dots(3.5)$$

Avec

M₀ : Masse de l'eau, en grammes ;

M₁ : Masse de l'eau et la masse de plâtre, en grammes.

D'après plusieurs tentatives pour la détermination du taux de gâchage à la saturation du plâtre nous avons trouvé que le rapport $E/P = 0.60$ donne une meilleur maniabilité (Voire annexe 7), ce qui est en accord avec les résultats de **Hamida [97] et Djoudi [90]** et recommandé par **CNERIB [2]**.

3.2.1.6. Prise (NFB 12 -401)

Cet essai permet de déterminer la durée et la facilité de la mise en œuvre du plâtre. Après le gâchage de saturation, le mélange plâtre + eau est versé sur une plaque de verre à l'aide d'un couteau on tranche la galette, le début de prise est caractérisé par la fermeture de coupure.

Le temps de prise est déterminé, si une certaine pression du pouce sur la galette ne fait plus sortir de l'eau. La photo ci dessous présente les étapes du déroulement de l'essai.

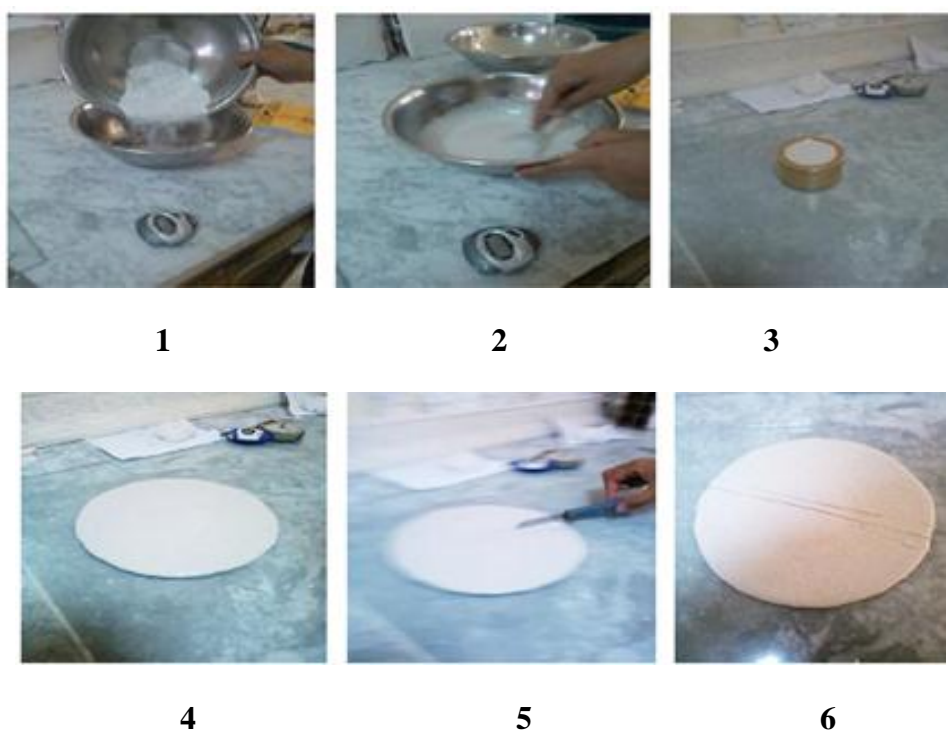


Figure 3. 6: Déroulement d'essai du temps de prise.

A une température de 20 °C, les temps du début de prise et de la fin de prise du plâtre utilisé sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 3. 2: Résultats du temps de prise du plâtre.

Rapport E/P	Temps début de prise (min)	Temps fin de prise (min)
E/P = 0.60	4 min 20 s	9.5 min 40.5 s

D'après les résultats de prise du plâtre obtenue et on les comparant avec le tableau 1.7 (chapitre 1) on a constaté que le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction avec un temps de prise de 5.5 min 20.5 sec.

3.2.1.7. Propriétés mécaniques

Les essais de la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) avec un rapport E/P = 0.60. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous .

Tableau 3. 3: Résistance mécanique du plâtre.

Propriétés mécaniques	
Résistance à la compression à 28 j	11.5 MPa
Résistance à la flexion à 28 j	3.88 MPa

3.2.1.8. Analyse minéralogique

La diffractométrie des rayons X est une technique de plus en plus utilisée pour l'étude de la composition minéralogique des matériaux. Cette technique est disponible au niveau de l'université de Laghouat. Cet essai concerne les matériaux cristallisés. Il est réalisé à l'aide d'un diffractomètre de rayons X. Celui-ci est équipé d'un tube à anode de cuivre de rayonnement $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1.54056 \text{ \AA}$ et un compteur proportionnel.

D'après le diffractogramme de la figure 3.7, on remarque que le constituant essentiel du plâtre est le (Hemi-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{ H}_2\text{O}$).

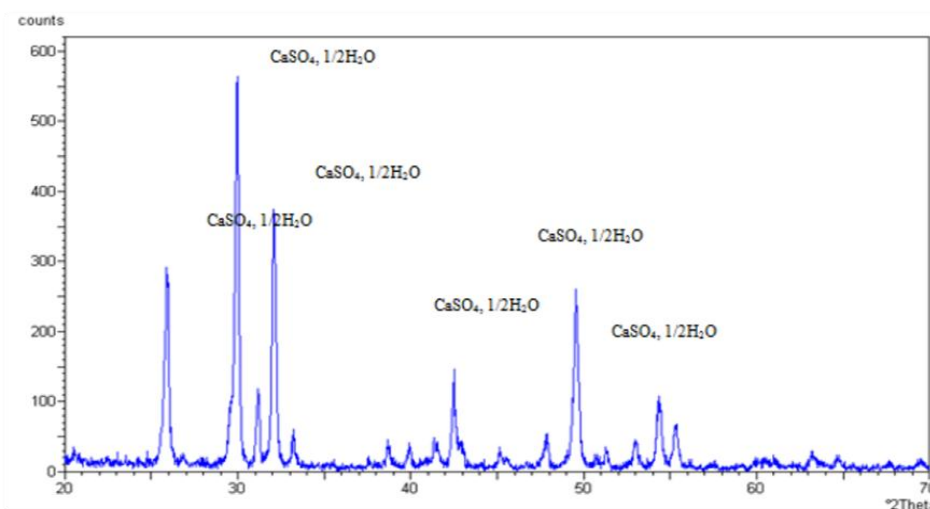


Figure 3. 7: Diffractogramme de plâtre.

3.2.1.9. Analyse chimique

Une analyse chimique du plâtre utilisé a été effectuée dans l'usine de sa fabrication afin de déterminer la composition et la teneur de chaque composant. Les résultats de l'analyse chimique obtenus sont reportés sur la fiche technique du plâtre et donnés dans le tableau 3.4.

Tableau 3. 4: Analyse chimique du plâtre [97].

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	PAF
Pourcentages (%)	0.28	0.1	0.01	34.03	1.75	40.45	0.06	0.05	0.01	5.39

D'après le tableau 3,4, on remarque que le plâtre utilisé contient des pourcentages appréciables de (SO₂) et de (CaO), ce qui affirme que le constituant le plus essentiel dans le plâtre utilisé est le sulfate de calcium (CaSO₄).

3.2.2. Chaux

On a utilisé la chaux vive de Berriane wilaya de Ghardaïa comme retardateur de prise du plâtre, car elle diminue la solubilité de ce dernier et permet d'augmenter son temps d'emploi. En plus elle n'affecte pas ses propriétés mécaniques [90].

Les résultats de l'analyse chimique obtenus sont reportés sur la fiche technique du chaux et donnés dans le tableau 3.5 (voir annexe 4).

Tableau 3. 5: Analyse chimique de la chaux.

Composants	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO actif	MgO	SO ₄
Pourcentages (%)	Traces	Traces	59 % à 64 %	21 % à 23 %	Traces

D'après le tableau 3.5, le pourcentage le plus prépondérant est le CaO.

3.2.3. Sable de dune

Le sable de dunes est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz [91].

Le sable utilisé dans notre étude est le sable de dunes de la région nord de la ville de Laghouat.

3.2.3.1. Masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre (EN1097-6)

Selon la norme **EN 1097-6** décrit plusieurs méthodes de mesure des masses volumiques absolues. Cet essai consiste à mesurer des différentes masses M_s , M_1 et M_2 est donné par la relation suivante :

$$\gamma_{abs} = \frac{M_s}{M_s - (M_2 - M_1)} \dots \dots \dots (3.6)$$

Avec

M_s : Masse d'échantillon 'sable'.

M_1 : Masse de pycnomètre remplis d'eau.

M_2 : Masse de pycnomètre remplis d'eau et de quantité de sable 130 g.

On a obtenu une masse volumique absolue du sable de **2635.20 kg/m³**.

3.2.3.2. Masse volumique apparente (NFP 18-555)

Elle est déterminée par la méthode du récipient standard de volume connu, il s'agit de remplir un volume de 1000 cm³ et pesé la masse totale.



Figure 3. 8: L'essai de mesure de la masse volumique apparente du sable utilisé.

La masse volumique apparente du sable de dune utilisé est de **1491.33 kg/m³**.

3.2.3.3. Compacité et Porosité (NFP 18-555)

Si l'on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

$$C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}} (\%) \quad ; \quad P = 1 - C (\%) \dots\dots\dots(3.7)$$

Les résultats de porosité et compacité sont représentés dans le tableau 3.6.

Tableau 3. 6: Compacité et porosité de sable de dune.

γ_{app} (kg/m ³)	γ_{abs} (kg/m ³)	$C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}}$ (%)	$P = 1 - C$ (%)
1491.33	2635.20	56 %	43 %

3.2.3.4. Analyse granulométrique (EN 933-1)

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains. selon la norme **EN 933-1**. On effectue une analyse granulométrique en utilisant une série normalisée de tamis à mailles carrées, elle est permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de chaque catégorie de noms de granulats en fonction des dimensions (fines, sables ...).

Les résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé sont représentés dans la figure 3.9 ci-dessous et le tableau (voir annexe 2).

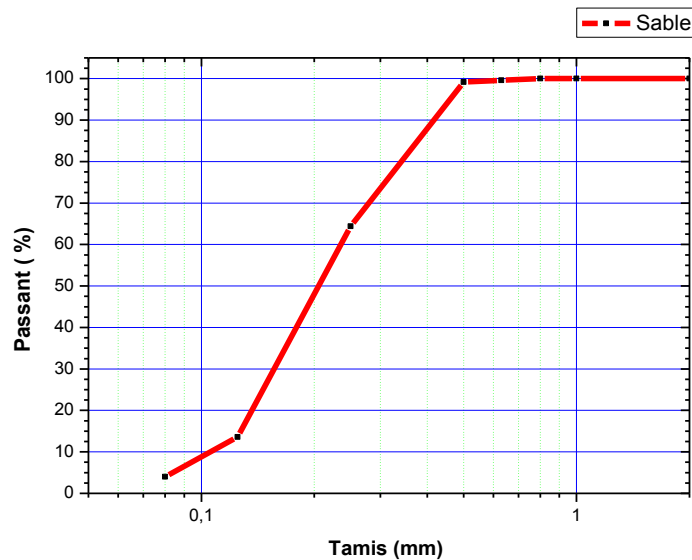


Figure 3. 9: Analyse granulométrique du sable de dune.

D'après la figure 3.9, on constate que le sable utilisé est à granulométrie continue.

❖ **Module de finesse de sable (EN 933-1).**

Le module de finesse M_f du sable est défini comme suit :

$$Mf = \sum \frac{RC}{100} = (0+0+0.8+35.60+86.40) = 1.228$$

Avec : R_C : Refus cumulé en % sur les tamis 4 ;2 ;1 ;0.5 ;0.25 ;et 0.125 .On a obtenu un module de finesse du sable égale à 1.228. Lorsque MF est comprise entre $1.8 > 1.228 < 2.8$.le sable de dune utilisé est un sable très fin.

3.2.3.5. Equivalent de sable (EN 933-8)

L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable.

Après 20 min de préparation de l'essai on mesure les hauteurs suivantes :

- Hauteur H_1 : Sable propre +élément fins.
- Hauteur H_2 : Sable propre seulement.
- Hauteur H'_2 : Sable propre seulement à l'aide du piston.

Equivalent de sable sont déterminés **ESV** visuel et **ESP** piston par les relations suivantes :

$$Esv = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \dots\dots\dots(3.8)$$

$$Esp = \frac{H'_2}{H_1} \times 100 \dots\dots\dots(3.9)$$

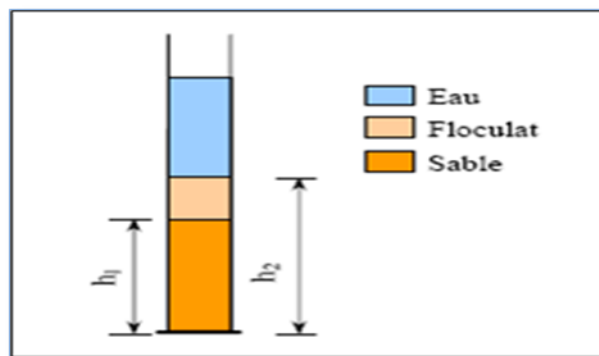


Figure 3. 10: Détermination de l'équivalent de sable.

Les résultats d'équivalent de sable sont représentés sur le tableau 3.7.

Tableau 3. 7: Equivalent de sable de dune utilisé.

Essais	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H'_2 (cm ³)	E_{SV} (%)	E_{SP} (%)
1	10.6	9.4	9	88.67	85
2	11	10.1	9	91.81	82
Moyenne	10.5	9.5	9	90.24	84

D'après les résultats obtenus de l'équivalent de sable, on peut constater que le sable de dune utilisé est un sable très propre à pourcentage des fines argileuses négligeables très pratique pour un béton d'une ouvrabilité satisfaisante, convenant au béton à haute qualité.

3.2.3.6. Essai d'absorption (NFP 18-555)

Le coefficient d'absorption correspond au rapport de l'augmentation de la masse d'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 h et 20 °C à la masse de l'échantillon sec .La figure 3.11 présente la mesure du coefficient d'absorption. Il est donné par la relation suivante :

$$\text{Abs (\%)} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \dots\dots\dots (3.10)$$

M_{sat} : Masse de l'échantillon saturé.

M_s : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 105 C°.



Figure 3. 11: Mesure du coefficient d'absorption.

Le tableau 3.8 regroupe les résultats du coefficient d'absorption de sable utilisé.

Tableau 3. 8: Coefficient d'absorption de sable de dune.

M_{sat} (g)	M_s (g)	Abs (%)
0.324	0.320	1.25

✓ Alors le coefficient d'absorption d'eau de sable de dune est **1.25 % < 2.5 %** ce qui acceptable d'après [96] et les recommandations du **CNERIB [2]**.

3.2.3.7. Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique du sable de dune utilisé est représentée sur la figure 3.12.

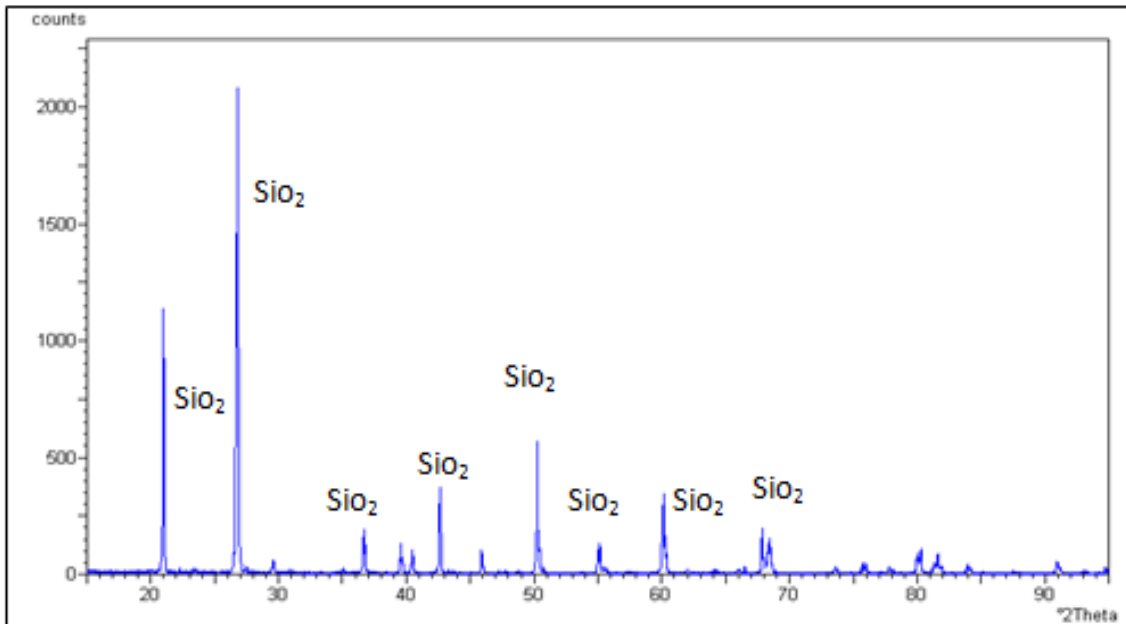


Figure 3. 12: Diffractogramme aux rayons X du sable de dune [52].

Le diffractogramme de la figure 3.12 obtenu par analyse minéralogique de ce sable, menée par rayons X au diffractomètre, confirme la présence du composant minéralogique de l'espèce SiO_2 (quartz) [92].

❖ Morphologie des grains de sable de dune

Une photo du sable dunaire à grande échelle visualisé par microscope électronique à balayage (M.E.B), effectué par Bederina [93] au laboratoire de l'I.U.T d'Amiens en France montre que la majorité des grains possèdent des formes arrondies avec une faible angularité Figure 3.13.

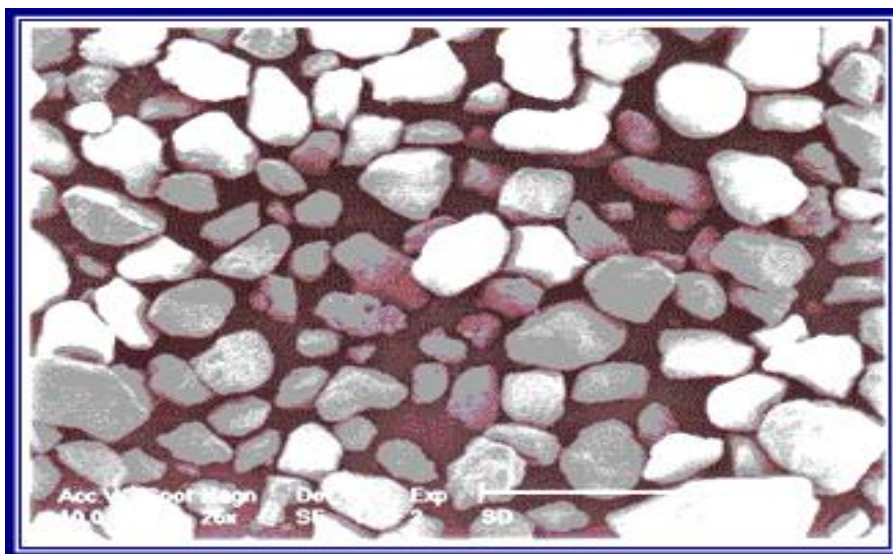


Figure 3. 13: Vu général à grande échelle, MEB du sable de dune [93].

3.2.3.8. Analyse chimique (NF EN 196-2)

Ces analyses concernent la détermination des proportions des composants organiques contenus dans le sable et teneur de chaqu'un de ces composants. Cet essai réfère par la norme **NF EN 196-2** .Le tableau 3.9 regroupe les résultats de l'analyse chimique du Sable de dune utilisé.

Tableau 3. 9: Analyse chimique du sable de dune [64].

Désignation	Insolubles	Sulfates	Carbonates	Chlorures
(%)	95.920%	0.89%	2.6%	Traces

L'analyse chimique montre que le sable analysé, présente un fort pourcentage d'insolubles (SiO_2), ce qui montre que le matériau est issu d'une roche dure de nature siliceuse [64].

3.2.4. Déchets des bouteilles en plastique recyclé

Les granulats utilisés sont des déchets des bouteilles en plastique recyclé (Polyéthylène téréphtalate PET) ramené de l'usine de recyclage Amouri à Laghouat. Selon la fiche technique de l'usine, ce granulat en PET lors de recyclage possède une température de fusion d'environ 285 à 310 °C. Il est obtenu par le broyage très fin des bouteilles.



Figure 3. 14: Granulats en PET.

3.2.4.1. Analyse granulométrique du PET (EN 933-1)

L'analyse granulométrique a été réalisé selon la norme **EN933-1 et EN 933-2**.On a utilisé des tamis des différents diamètres selon la granulométrie de PET.

Les résultats d'analyse granulométrique du déchet utilisé sont représentés dans la figure 3.15 et le tableau (voir annexe 2).

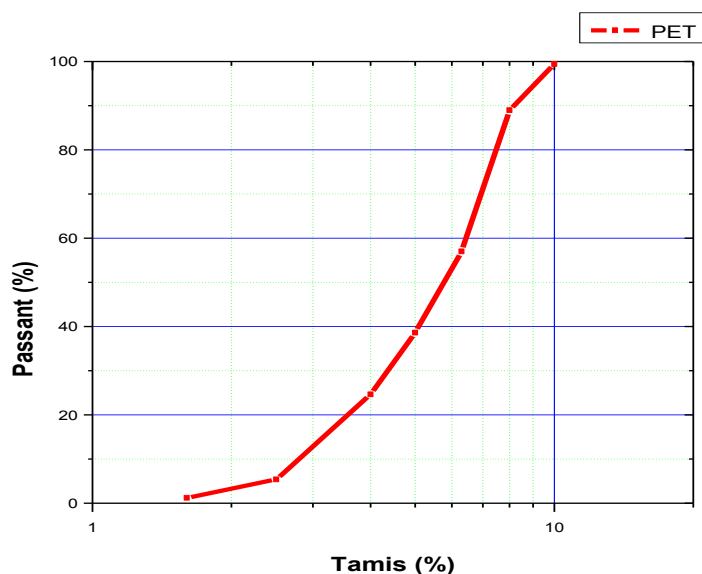


Figure 3. 15: Courbe granulométrique du PET.

D'après la courbe granulométrique, on remarque que les PET possèdent une granulométrie continue qui s'étale entre 1 à 10 mm (**D max = 10 mm**), avec forme irrégulier.

3.2.4.2. Détermination de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue (NF- P18-555)

Les essais sont effectués sur trois échantillons de déchets en plastique au laboratoire de génie civil, les résultats sont regroupés sur le tableau 3 .10.

Tableau 3. 10: Caractéristique physique de PET.

Masse volumiques absolue (kg/m ³) (NF P 18-555)	Masse volumiques apparent (kg/m ³) (NF P 18-555)	L'absorption après 24h (%)
1150	257	0 %

La masse volumique apparent des déchets en plastiques recyclé est **257 kg/m³** et l'absorption est nulle parce que les déchets plastiques sont hydrophobes. Figure 3.16 représente la méthode de mesure la masse volumique apparente des déchets plastiques.

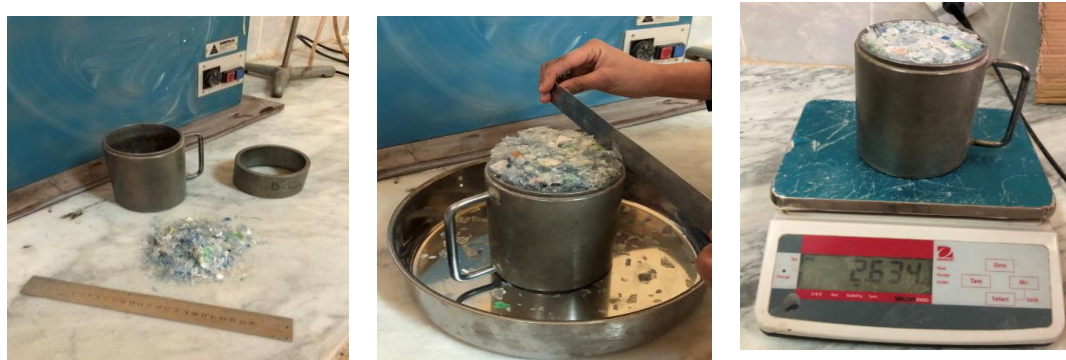


Figure 3. 16: Mesure de la masse volumique apparente des déchets PET.

3.2.5. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable du réseau public de la ville de Laghouat. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5. Si le choix a été porté sur cette eau, c'est sa pureté et l'absence des excès des teneurs de sels, de sulfates et d'acides et ceux-ci on se basant sur le rapport fourni par le laboratoire ADE de Laghouat (Algérienne des eaux de Laghouat ex EPDEMIA).

3.3. Techniques de mesure expérimentale

3.3.1. Résistances mécaniques (EN 196-1)

L'essai de flexion à trois points et l'essai de compression sont réalisés selon la norme **EN 196-1**, sur les échantillons réalisés, moyennant un appareil d'essais mécanique de marque "CONTROLS" de charge maximale de 100 KN muni d'un ordinateur . La valeur de la charge de rupture est lue directement sur le fichier résultat [89].

3.3.1.1. Essais de Résistance à la flexion (flexion 3 points)

Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques (4× 4×16) cm³ , rompus en flexion puis en compression et on a pris la moyenne des résultats trouvés de l'écrasement de 3 éprouvettes en flexion et des 6 demi -éprouvettes résultantes en compression à chaque jour prévu [89].

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

$$R_f = \frac{3.F_f.L}{b^3} \dots\dots\dots (3.11)$$

L : Distance entraxe des rouleaux d'appuis de l'éprouvette (4x4x16) cm³ (L= 100 mm).

R_f: Résistance à la flexion en MPa.

F_f: Charge à la rupture en N.

b: Largeur de la section carrée du prisme en mm ($b = 40 \text{ mm}$).

La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion, tel que celui représenté sur la figure 3.17.



Figure 3. 17: Dispositif de flexion 3 points.

3.3.1.2. Essais de Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur des six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni axiale sur bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. La résistance à la compression est calculée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \dots \dots \dots (3.12)$$

R_c: Résistance à la compression en MPa.

F_c: Charge à la rupture en N.

A: L'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires en mm^2 (1600 mm^2).

La figure 3.18. Montre le dispositif de l'écrasement par compression.



Figure 3. 18: Dispositif de l'écrasement par compression.

3.3.2. Caractéristiques physiques

3.3.2.1. Variation dimensionnelle (NF P 15-433)

▪ Les mesures de retrait ont été réalisées sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ à l'aide de Retractomètre, présenté dans la figure 3.19. Les éprouvettes sont conservées à l'air libre dans une température de l'ordre de $20 \text{ C}^\circ \pm 5^\circ$ et une humidité relative $45\% \pm 5\%$.

Après démoulage, l'éprouvette est placée verticalement entre deux billes de l'appareil. Les valeurs du retrait sont lues sur comparateur placé sur l'éprouvette, la valeur correspondant à la valeur de référence, la mesure suivante effectuée au temps (t) étant L_f . Le retrait enregistré au temps (t) est donné par la relation suivante:

$$\frac{\Delta L}{L} = \left| \frac{L_f - L_i}{16} \right| \dots\dots\dots (3.13)$$

Le retrait étant exprimé par :

L_f : la longueur finale.

L_i : la longueur initiale.

L_0 : La longueur initiale après 24 heures de démoulage.



Figure 3. 19: Mesure de retrait.

3.3.2.2. Masse volumique

Les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont pesées régulièrement au cours du temps et cela à l'aide d'une balance avec précision de 0.1g. Les masses volumiques aux âges de 7 jours, 14 jours et 28 jours sont mesurées lors de cette étude.

3.3.2.3. Porosité accessible à l'éthanol (ASTM C-642)

Il s'agit d'un essai assez simple conformément à la norme ASTM C-642, et consiste à :

- Découpage des échantillons en forme cubique ($2 \times 2 \times 2$) cm³.
- Sécher l'échantillon à l'étuve à 103 °C, jusqu'à masse constante (pendant au moins 24 heures) notée la masse (M_s).
- Immerger l'échantillon dans une casserole d'éthanol et chauffer jusqu'à ébullition.
- L'échantillon reste immergé pendant 5 heures, ensuite essuyé et peser .Soit (M_h) sa masse .

La porosité accessible à l'éthanol est déterminée par la relation suivante :

$$P (\%) = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \dots \dots \dots (3.14)$$

3.3.3. Caractéristiques thermiques

Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels : La conductivité thermique « λ » et la diffusivité « a ».

Ceux-ci dépendent des caractéristiques des constituants intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et des conditions de conservation.

- **La conductivité thermique « λ »** : est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température. Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique [64].

Parmi les facteurs qui influent sur la conductivité thermique des matériaux de construction, citons : la porosité et la teneur en eau.

- **La diffusivité thermique « a »** d'un matériau exprime la vitesse de propagation d'une Perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en (mm/s²). Plus la diffusivité d'un matériau est faible, plus le matériau est thermiquement isolant.

- **L'effusivité thermique** est la propriété d'un corps à arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact, elle est caractérisée par un coefficient d'arrachement ou effusivité, $b = \sqrt{\lambda \rho c}$ exprimée en (J.m⁻².s^{-1/2}.K⁻¹) [56].

- **Chaleur spécifique** est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en J/ (kg.K). Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de

masse de 1°C. Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente.

3.3.3.1. Méthodes de mesure des paramètres thermiques

De nombreuses méthodes de mesure de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermiques des matériaux s'appuient donc sur la détermination d'un champ de température dans des échantillons de géométrie connue, en imposant des conditions aux limites constantes ou variables avec le temps. Parmi ces méthodes, citons deux méthodes les plus utilisées, il s'agit de la technique de la sonde mono tige à faible inertie thermique, et la méthode de la sonde plane **TPS** (Transient Plane Source ou Hot Disk).

Pour nos mesures on a utilisé la technique de la sonde plane **TPS**, en raison de sa capacité de détermination de la conductivité et la capacité thermique des matériaux contrairement à la méthode de la sonde mono tige qui ne permet de déterminer que la conductivité thermique, de plus les erreurs liées à la résistance de contact sont minimales dans la **TPS** que dans la sonde mono tige [94].

A. Dispositif expérimental

L'essai consiste à placer en sandwich la sonde TPS (figure 3.20) et la relier à un circuit électrique. La variation de la résistance aux Bornes du pont de Whestone, ΔU permet d'accéder à la différence de potentielle $\Delta E(t)$ aux bornes de l'élément TPS. Une relation entre $\Delta E(t)$ et la variation de température dans l'élément **TPS** peut être établie. Celle-ci est fonction de la diffusivité thermique a et de conductivité thermique λ . Un traitement mathématique approprié permet d'accéder à λ . a et ensuite c [41].



Figure 3. 20:Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.

B. Avantage de la méthode TPS

Les principaux avantages de la technique TPS sont :

- Elle peut faire la mesure de plusieurs paramètres thermiques à la fois.
- La différence entre l'évolution de la température entre la couche d'isolation et le milieu étudié, permet d'étudier des matériaux avec des conductivités thermiques différentes (couches minces), elle ne demande pas un matériel sophistiqué.
- Les mesures peuvent être faites sur des échantillons de diverses formes et de différentes tailles, à condition de posséder au moins une surface plane.

C. Conception de l'élément TPS

L'élément TPS qui doit être utilisé dans cette méthode doit être constitué d'un élément résistif jouant, à la fois, le rôle de résistance chauffante et de capteur de température. Il peut, en principe, avoir plusieurs formes (rectangulaire, disque, etc.) et plusieurs tailles suivant la configuration géométrique de l'échantillon et le type de matériau utilisé. Pour des raisons de commodité, tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, deux configurations ont été retenues pour le modèle résistif TPS, la forme rectangulaire et la forme disque. Cependant il existe plusieurs tailles du capteur afin de pouvoir effectuer des mesures sur des échantillons de différentes dimensions.

Dans ce travail, l'élément TPS utilisé est en forme de disque, dont le capteur TPS est constitué d'une feuille métallique en Nickel en forme de spirales bifilaires insérées entre deux couches isolantes en Kapton, Teflon ou Mica pour des températures inférieures à 200°C. Les épaisseurs de la feuille et de la couche de Kapton sont respectivement de 10 et 25 μm [95].



Figure 3. 21:Dispositif expérimental pour mesurer les caractéristiques thermiques.

3.4. Conclusions

L'étude de caractérisation des matériaux utilisés montre que :

- Le plâtre utilisé est un plâtre de qualité d'après la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ élevée.
- L'étude de la finesse de mouture et de la prise montre que notre plâtre est un plâtre gros de construction à temps de prise court d'où la nécessité du retardateur de prise.
- Le sable de dune est un sable siliceux et propre.

La caractérisation des déchets utilisés montre une masse volumique absolue de **1150 kg/m³** et masse volumique apparente de **257 kg/m³** et une granulométrie de classe 10 mm.

Chapitre 4

Résultats et interprétations

4.1. Introduction

Les matériaux étudiés dans ce chapitre sont des composites à base de plâtre, chaux 6 %, sable de dune, et déchets plastiques dont la résistance mécanique est assurée par la matrice de plâtre et l'isolation est assurée par les déchets des bouteilles en plastique recyclé.

La formulation des composites élaborés dans cette étude est basée sur les méthodes inspirées des travaux expérimentaux effectués par **Hafsi [98]** et par **Djoudi [90]**.

En deuxième lieu, ce travail expérimental consiste à discuter les résultats des propriétés physico-mécaniques et thermiques au cours de l'âge 7, 14, 28 jours telles que : Masse volumique apparente, Résistance à la flexion, Résistance à la compression, La porosité, La variation dimensionnelle (retrait), La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique.

4.2. Formulation des composites

L'absence d'une méthode universelle pour la formulation des composites à base de plâtre nous a conduit à suivre les recommandations pour la construction en plâtre donnée par le **CNERIB [2]** et les travaux de **Djoudi [90]**.

- Tout d'abord, on fixe le taux de gâchage à saturation du plâtre $E/P = 0,60$.
- On fixe le rapport $S/P = 0,5$ en poids, car un excès de sable diminue les propriétés mécaniques des matériaux à base de plâtre selon le guide [2].
- On ajoute 6% de la chaux aérienne comme retardateur de prise.

On donne les compositions suivantes :

- **Composition 1** : (Témoin) pâte pure en plâtre avec un rapport $E/P = 0,6$.
- **Composition 2** : pâte pure en plâtre + déchets plastiques de **0 % à 25 %** avec un pas de 5%.
- **Composition 3** : plâtre + sable de dune + déchets plastiques de **0 % à 25 %** avec un pas de 5% .

Dans ce chapitre ; nous allons examiner l'effet de l'ajout des déchets plastiques PET et le sable de dune sur les propriétés physico-mécanique et thermique de la pâte pure en plâtre et le mortier de plâtre.

Les résultats de la formulation de la pâte pure et le mortier de plâtre à base des déchets plastique PET sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 4. 1: Formulation de la pâte pure de plâtre à base des déchets en plastique (PET).

Composition (kg/m ³)	Masse de déchets (g)	Masse de plâtre (g)	E/P	Masse de l'eau (g)	Masse de chaux en g (6%)
PT (0 %)	0	900	0.6	540	54
PDP (5 %)	47.7	900	0.6	540	54
PDP (10%)	95.4	900	0.6	540	54
PDP (15%)	143.10	900	0.6	540	54
PDP (20%)	190.80	900	0.6	540	54
PDP (25%)	238.50	900	0.6	540	54

Tableau 4. 2: Formulation de mortier de plâtre à base des déchets en plastique (PET).

Pourcentages des déchets (%)	Masse de déchets (g)	Masse de plâtre (g)	E/P	Masse de l'eau (g)	Masse de chaux en g (%)	S/P	Masse de sable (g)
MP (0%)	0	900	0,6	540	54	0,5	450
MDP (5%)	70.20	900	0,6	540	54	0,5	450
MDP (10%)	140.40	900	0,6	540	54	0,5	450
MDP (15%)	210.60	900	0,6	540	54	0,5	450
MDP (20%)	280.80	900	0,6	540	54	0,5	450
MDP (25%)	351.00	900	0,6	540	54	0,50	450

4.3. Mise en œuvre des composites et la confection des éprouvettes

4.3.1. Procédure de malaxage

Le mélange s'effectue sans malaxeur de la façon suivante :

- On mélange les matériaux, plâtre, sable, déchets à sec figure 4.1.
- Eteindre complètement la chaux aérienne dans l'eau de gâchage.
- On Verse le produit dans l'eau, en malaxant bien le mélange durant 30 secondes

4.3.2. Préparation et conditionnement des éprouvettes

- Après le malaxage, on met la composition dans les moules, la mise en moule est faite sans vibration à raison de 2 couches piquées à la truelle pour éviter le problème de ségrégation figure 4.2.

- Les éprouvettes sont conservées à l'air libre de laboratoire. Après 24 heures, les éprouvettes de forme prismatique (4x4x16) cm³ sont démoulées et conservées dans une température de l'ordre de 20 C° ±5° et une humidité relative 45% ±5 %.



Figure 4. 1: Mélange des matériaux sec.



Figure 4. 2: Confection des moules.

4.4. Présentation des résultats

Les résultats de la variation des propriétés physico-mécaniques et thermiques de la pâte pure et le mortier de plâtre avec des différents dosages des déchets plastiques sont présentés sur les figures et les tableaux ci-dessous.

4.4.1. Etude des Propriétés physiques

4.4.1.1. Masse volumique apparente

Les résultats de la masse volumique des composites à l'état durci en fonction des pourcentages des déchets plastiques et de l'âge des éprouvettes sont regroupés dans les tableaux 4.3, 4.4 et les figures 4.3 et 4.4.

Tableau 4. 3: Variation de la masse volumique pour la composition **plâtre +déchets plastiques (PET).**

Compositions (Kg/m ³)	Age en jours		
	7j	14j	28j
PT (0 %)	1425.78	1270.31	1250.00
PDP (5%)	1376.71	1241.60	1246.09
PDP (10%)	1371.09	1231.44	1222.65
PDP (15%)	1347.65	1229.29	1210.93
PDP (20%)	1328.13	1213.86	1203.13
PDP (25%)	1289.06	1206.83	1171.87

Tableau 4. 4: Variation de la masse volumique pour la composition **mortier de plâtre +déchets plastiques (PET)**.

Compositions (Kg/m ³)	Age en jours		
	7j	14j	28j
MP	1700.50	1565.62	1498.67
MDP (5%)	1668.75	1500.58	1483.04
MDP (10%)	1652.34	1484.96	1453.75
MDP (15%)	1615.85	1457.81	1411.44
MDP (20%)	1580.70	1430.85	1379.68
MDP (25%)	1390.63	1394.14	1281.87

D'après la figure 4.3 et le tableau 4.3, on remarque que la masse volumique des compositions **plâtre + déchets plastiques** diminue rapidement durant les 14 premiers jours. Ceci est due à l'évaporation de l'eau.

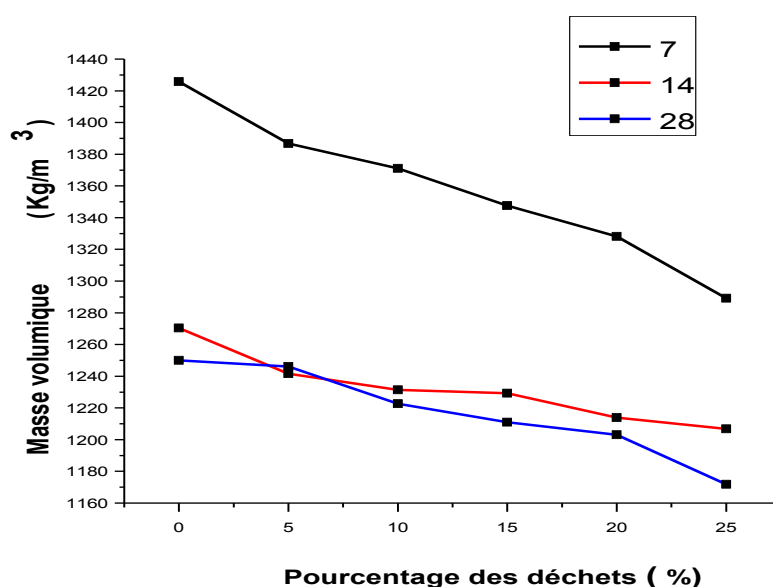


Figure 4. 3: Variation de la masse volumique de plâtre en fonction du pourcentage des déchets plastiques dans le temps.

la figure 4.4, montre que l'augmentation des déchets plastiques diminue la masse volumique de la composition **plâtre + déchets plastiques**, la plus faible valeur a été enregistrée au pourcentage 25 % (1281.87kg/ m³), et cela est due au fait que l'introduction des déchets plastiques crée des vides à l'intérieur de la matrice, d'où la diminution de la masse volumique du composite.

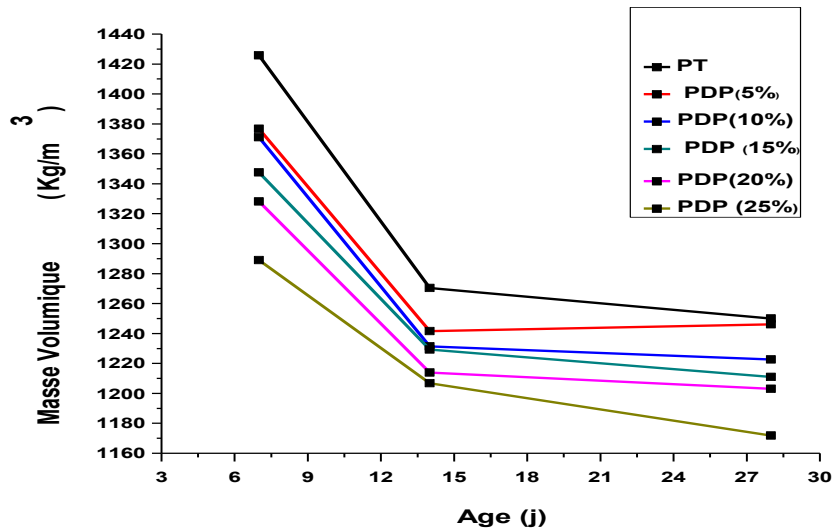


Figure 4. 4: Variation de la masse volumique de la composition **plâtre + déchets plastiques** pour différents pourcentages des déchets plastiques en fonction du temps.

D'après la figure 4.5 et le tableau 4.4, on remarque que la masse volumique du mortier de plâtre décroît légèrement avec augmentation des déchets plastiques, cela est due à la masse volumique faible des déchets en plastiques incorporées. Notons que les faibles masses volumiques des composites étudiés sont obtenue à l'âge de 28 jours.

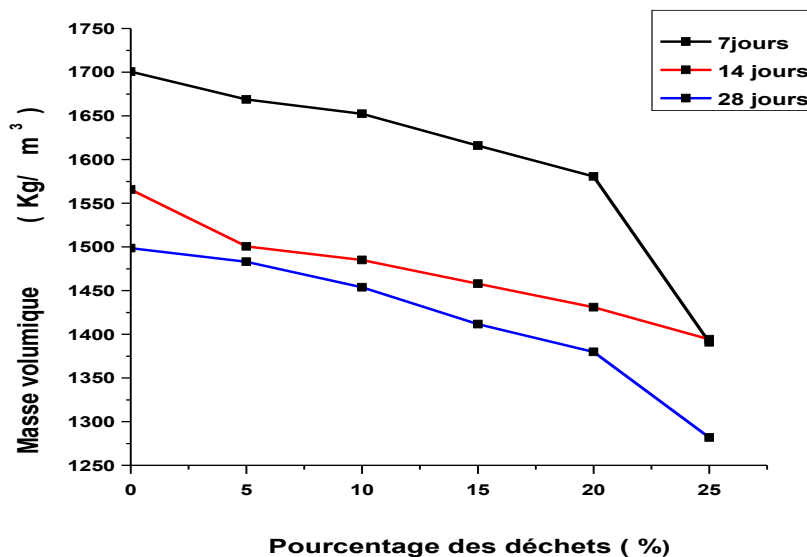


Figure 4. 5: Variation de la masse volumique pour le mortier de plâtre en fonction des pourcentages des déchets plastiques dans le temps.

La figure 4.6, montre que l'incorporation des déchets plastiques dans le mortier de plâtre a fait décroître leur masses volumiques et cela peut être attribué à la faible masse volumique des déchets utilisé ($M_v=257 \text{ kg/m}^3$) d'où l'effet bénéfique de l'allègement du matériau élaboré.

Nos résultats sont en accord avec les différentes recherches Yazoghli et al [100] et Saikia and Brito [81] sur le mortier de ciment avec des granulats en PET.

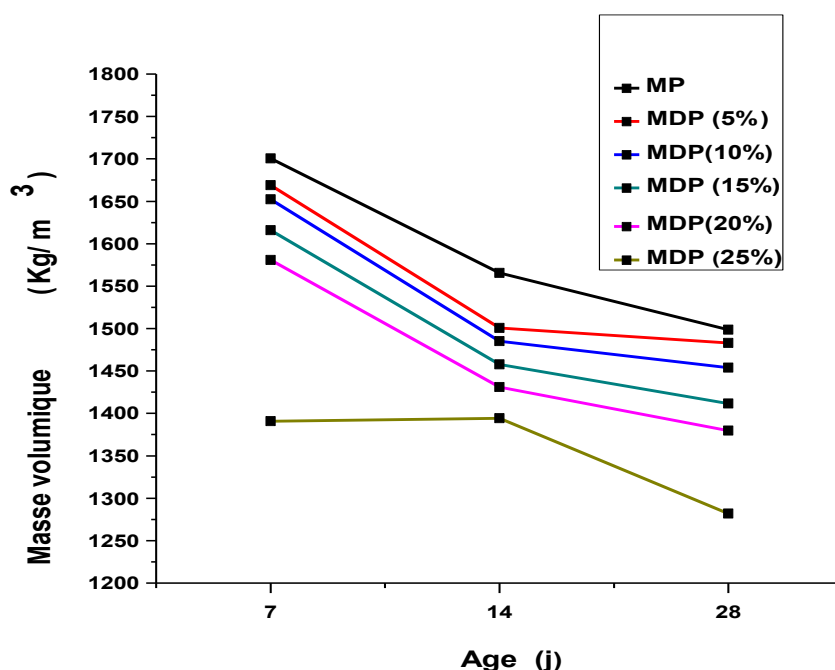


Figure 4. 6:Variation de la masse volumique pour le mortier de plâtre en fonction de l'âge et pour différents pourcentages des déchets plastiques.

4.4.1.2. Porosité (%)

La porosité des composites provient de celle de la matrice et celle du granulat, elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction des volumes des vides dans le matériau par rapport au volume totale [62].

Les résultats de la porosité des compositions à l'âge de 28 jours des éprouvettes est regroupés dans les tableaux 4. 5 et 4.6, et illustrés sur les courbes des figures 4.7 et 4.8.

Tableau 4. 5: Variation de la porosité pour la composition plâtre + déchets plastiques à l'âge de 28 jours.

Déchets en %	0	5	10	15	20	25
Composition	PT	PDP (5%)	PDP (10%)	PDP (15%)	PDP (20%)	PDP (25%)
Porosité (%)	20	21	21	22	22.5	25

Tableau 4. 6: Variation de la porosité pour la composition **mortier de plâtre + déchets plastiques** à l'âge de 28 jours.

Déchets en %	0	5	10	15	20	25
Compositions	MP	MDP(5%)	MDP(10%)	MDP (15%)	MDP (20%)	MDP (25%)
Porosité (%)	16.5	16.5	17	18	19	24

D'après le tableau 4.5 et la figure 4.7, on constate que la porosité de la composition plâtre + déchets plastiques croît légèrement avec l'augmentation des pourcentages des déchets plastiques, elle atteint une valeur maximale égale à 25 % qui correspond au pourcentage 25 % de déchets. Ce phénomène est due au fait que l'ajout des déchets plastiques au matrice plâtre crée des vides dans la composition, ce qui est en accord avec les travaux de [52], et aussi à l'effet de la forme des grains de déchets (irrégulière) ce qui perturbe l'état de surface des éprouvettes.

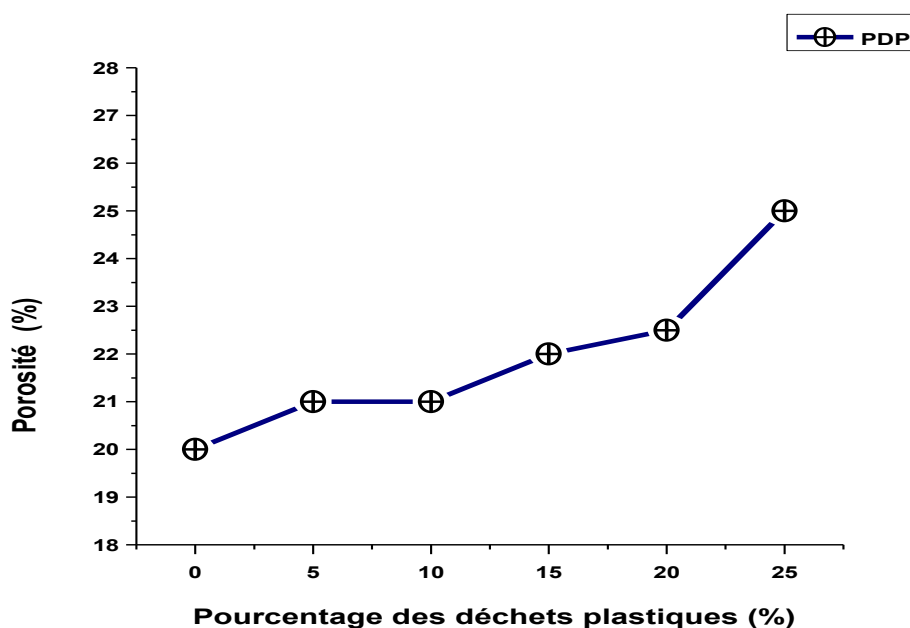


Figure 4. 7: Variation de la porosité en fonction du pourcentage des déchets plastiques pour la composition **plâtre + déchets plastiques** à l'âge 28 jours.

la figure 4.8 montre que la porosité du mortier de plâtre diminue par rapport à la pâte pure en plâtre et cela est due à l'ajout des grains de sable qui a comblé les vides existants dans le plâtre, la porosité du mortier de plâtre augmente sensiblement avec le pourcentage des déchets plastiques. Nos résultats sont en accord avec les recherches [52].

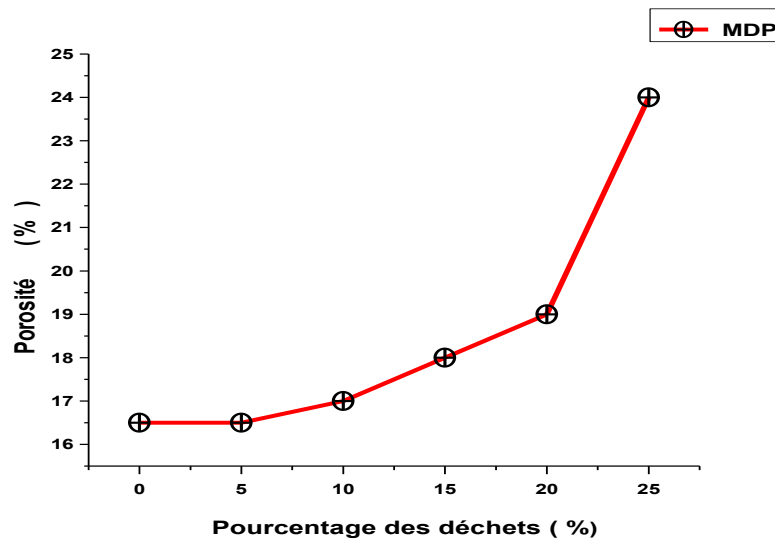


Figure 4. 8: Variation de la porosité en fonction du pourcentage des déchets plastiques pour la composition **mortier de plâtre + déchets plastiques** à l'âge 28 jours.

A. Relation entre la porosité et la masse volumique

Dans le but de connaître l'influence de la porosité sur les caractéristiques physico-mécaniques des compositions, nous avons effectué une étude croisée sur les deux paramètres à savoir la masse volumique et la porosité. La relation entre les deux paramètres des différentes compositions (plâtre + déchets plastiques) et (mortier de Plâtre + déchets plastiques + sable dunaire) à l'âge de 28 jours est représentée sur les figures 4.9 et 4.10.

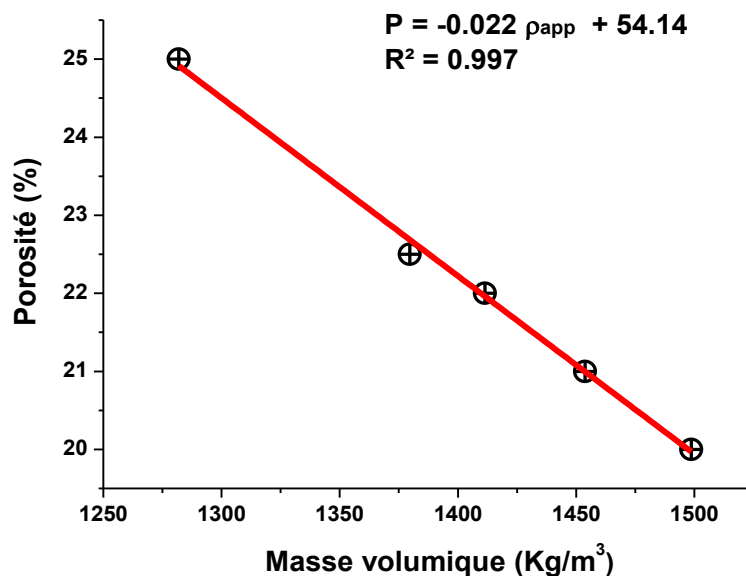


Figure 4. 9: Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition **plâtre + déchets plastiques** à l'âge de 28 jours.

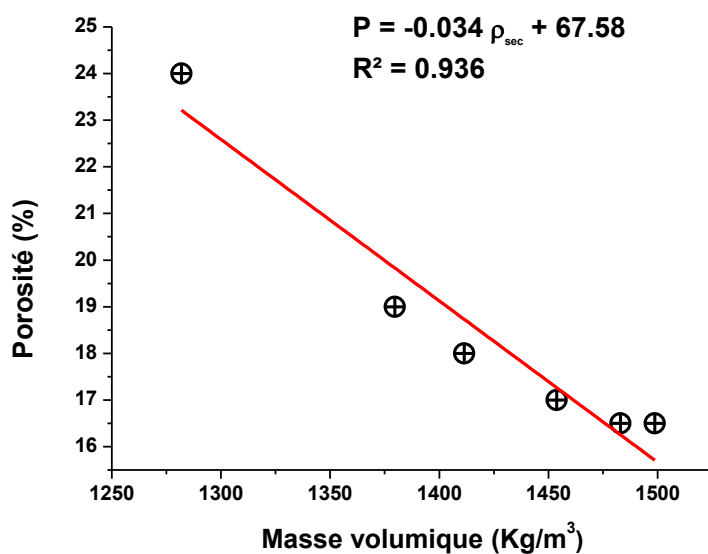


Figure 4. 10: Relation entre la porosité et la masse volumique pour la composition **mortier de plâtre + déchets plastiques** à l'âge de 28 jours.

D'après les figures 4.9 et 4.10, on remarque que la relation entre la porosité des compositions plâtre + déchets plastiques et mortier de plâtre +déchets plastiques et la masse volumique est inversement proportionnelle. C'est -à -dire plus le matériau est poreux plus sa masse volumique diminue.

La régression sur les points expérimentaux obtenu est performante avec des coefficients de corrélation de l'ordre $R = 0.997$ pour la composition plâtre + déchets plastiques et de l'ordre $R = 0.936$ pour la composition mortier de plâtre + déchets plastiques.

4.4.2. Etude des Propriétés mécaniques

4.4.2.1. Résistance à la flexion

Les résultats des essais mécaniques réalisés sur les différentes compositions étudiés sont regroupés dans les tableaux et les figures ci-dessous.

Tableau 4. 7: Variation de la résistance à la flexion pour la composition **plâtre + déchets plastiques (PET)**.

Compositions	Age en jours		
	7j	14j	28j
PT (0 %)	1.81	2.00	3.23
PDP (5%)	1.61	2.17	3.60
PDP (10%)	1.52	2.67	3.35
PDP (15%)	1.74	2.83	3.02
PDP (20%)	1.69	3.01	1.45
PDP (25%)	1.36	2.11	2.14

Tableau 4. 8: Variation de la résistance à la flexion pour la composition **mortier de Plâtre + déchets plastiques (PET)**.

Compositions	Age en jours		
	7j	14j	28j
MP (0 %)	1.36	1.40	3.28
MDP (5%)	1.61	2.25	3.02
MDP (10%)	1.59	1.76	2
MDP (15%)	1.51	2.92	3.51
MDP (20%)	1.40	3.15	4
MDP (25%)	1.30	3.27	3.73

D'après les figure 4.11 et 4.12 on remarque que pour les deux composites plâtre + déchets plastiques et mortier de plâtre + déchets plastiques, la résistance à la flexion évolue dans le temps jusqu'au l'âge de 28 jours pour tous les pourcentages sauf pour le pourcentage 20 % de composite plâtre + déchets plastiques, ce qui peut être expliqué par l'examen de facies de rupture en vérifiant l'adhérence (matrice + déchets plastiques).

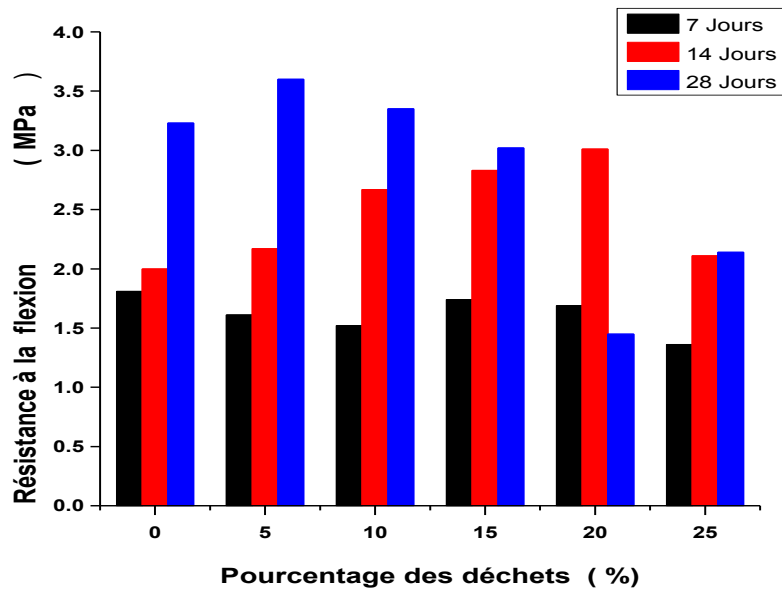


Figure 4. 11: Variation de la résistance à la flexion de la composition plâtre + déchets plastiques dans le temps.

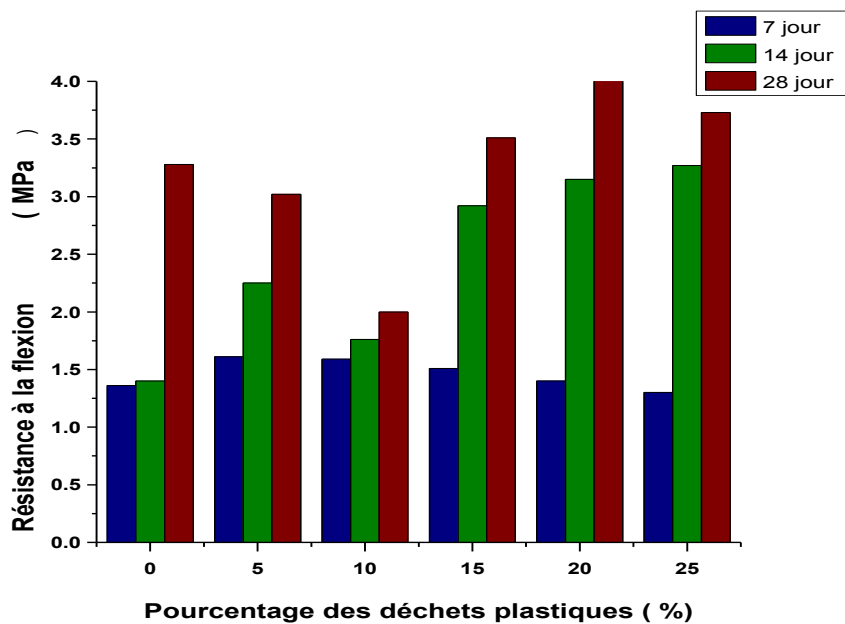


Figure 4. 12: Variation de la résistance à la flexion de la composition **Mortier de Plâtre + déchets plastiques** dans le temps.

La résistance à la flexion pour les composites plâtre + déchets plastiques croît jusqu'au la valeur 3.60 MPa et qui correspond au pourcentage de 5 % après elle décroît pour les autres pourcentages cela due à un excès des déchets plastiques, ce qui ont accord les travaux de Djoudi [101].

La figure 4.12, montre que la résistance à flexion de mortier avec déchets plastiques décroît pour les pourcentages 5 % et 10 %, cela est due à la perturbation de squelette minérale par l'introduction des déchets plastiques après elle augmente jusqu'à à la valeur 4 de MPa et qui correspond au pourcentage 20 % , et décroît pour le pourcentage 25 %.

4.4.2.2. Résistance à la compression

Les mesures de la résistance à la compression des différentes compositions ont été effectuées sur les 06 demi –éprouvettes, issues de l'essai de flexion. Rappelons que la description de l'essai est présentée au chapitre 3 .

Les résultats des essais sur les différentes compositions sont regroupés dans les tableaux 4.9, 4.10 et illustrés par les courbes des figures ci-dessous.

Tableau 4. 9: Variation de la résistance à la compression pour la composition **plâtre+ déchets plastiques (PET)**.

Compositions	Age en jours		
	7j	14j	28j
PT (0 %)	2.61	7.7	11.5
PDP (5%)	2.64	5.85	8.64
PDP (10%)	2.85	6.71	8.04
PDP (15%)	2.62	5.08	7.16
PDP (20%)	2.61	5.86	7.91
PDP (25%)	2.53	4.8	6.6

Tableau 4. 10: Variation de la résistance à la compression pour la composition **mortier de plâtre + déchets plastiques (PET)**.

Compositions	Age en jours		
	7j	14j	28j
MP (0 %)	2.54	3.93	8.13
MDP (5%)	2.71	6.36	6.78
MDP (10%)	2.54	5.18	7.01
MDP (15%)	3.17	6.44	7.27
MDP (20%)	2.49	6.67	7.49
MDP (25%)	1.95	6.33	6.88

D'après la figure 4.13 et 4.14, on remarque que la résistance à la compression des deux composites évolue régulièrement dans le temps jusqu'au l'âge de 28 jours.

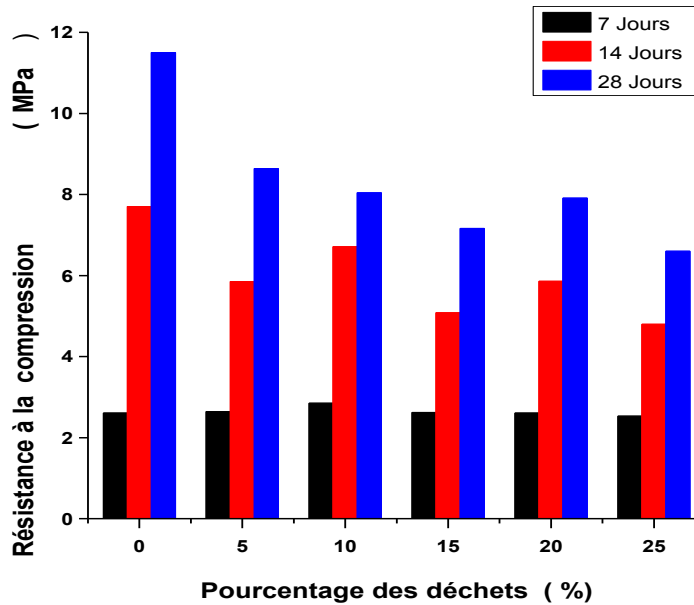


Figure 4. 13: Variation de la résistance à la compression de la composition **plâtre + déchets plastiques** dans le temps.

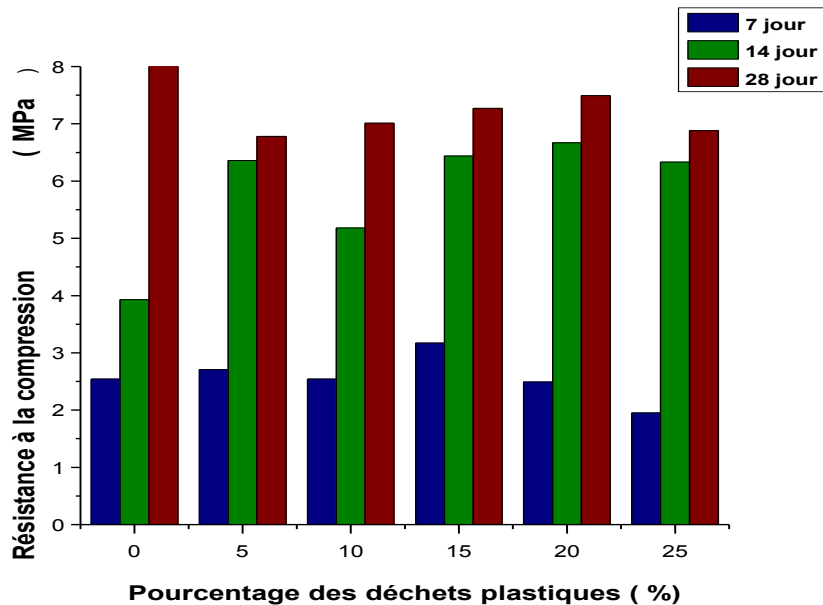


Figure 4. 14: Variation de la résistance à la compression de la composition **mortier de Plâtre + déchets plastiques** dans le temps.

La figure 4.13 montre que la résistance à la compression du composite (plâtre + déchets plastiques) diminue avec l'augmentation du pourcentage des déchets plastiques et cela par rapport au plâtre témoin (sans déchets plastiques) à 28 jours.

En plus une augmentation de la résistance à la compression a été notée au pourcentage 20 % après une chute de la résistance à 25 %, cette augmentation est due au remplissage des pores du plâtre avec du polymère PET ce qui en accord avec les résultats de Colack [102], qui a travaillé sur le plâtre avec les fibres de polymère thacrylate en poids.

La figure 4.14 montre que la résistance à la compression du mortier de plâtre avec les déchets plastiques croît dans le temps pour tous les pourcentages de déchets plastiques de (0% à 25 %). Par rapport au mortier de plâtre seul la résistance à la compression décroît en fonction du pourcentage des déchets plastiques, cela peut être attribué à la perturbation du squelette minérale du mortier de plâtre par l'ajout des déchets plastiques. Une augmentation de la résistance à la compressions des mortiers de plâtre avec déchets plastiques a été enregistrée pour le pourcentage 20 % après elle chute et cela est due à une perte de maniabilité due à un excès de déchets plastiques.

Nos résultats sont en accord avec **Saikia et Brito [81]** et **Yazoghli et al [100]** qui expliquent que les facteurs qui peut être responsables de la faible résistance à la compression du béton contenant un pourcentage élevé des agrégats de plastique sont:

- La très faible force d'adhérence entre la surface des déchets plastiques et la pâte de ciment;
- La nature hydrophobe des déchets plastiques, qui peuvent inhiber la réaction d'hydratation du ciment en limitant le mouvement de l'eau.

4.4.2.3. Etude du retrait

Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage .Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du plâtre ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage ; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite [64]. Pour chaque formulation testée, nous avons mesuré les variations dimensionnelles de trois éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$).

La variation du retrait de différentes compositions étudiées en fonction de l'âge en jours est représentée dans les tableaux 4.11, 4.12 et les figures 4.15, 4.16 ci-dessous.

Tableau 4. 11: Variation du retrait pour la composition **plâtre + déchets plastiques (PET)**.

Compositions ($\mu\text{m/m}$)	Age en jours						
	1	3	7	14	21	28	30
PT (0%)	62.5	197.91	256.25	266.66	266.66	266.66	266.66
PDP (5 %)	32.25	137.5	147.91	120.83	104.16	104.16	104.16
PDP (10 %)	37.5	131.25	131.25	118.75	102.08	102.08	102.08
PDP (15 %)	70.83	112.5	166.66	233.33	245.83	245.83	245.83
PDP (20 %)	93.75	110.41	137.5	147.91	131.25	131.25	131.25
PDP (25 %)	85.41	114.58	120.83	156.25	170.83	175	175

Tableau 4. 12: Variation du retrait pour la composition **mortier de plâtre + déchets plastiques (PET)**.

Compositions ($\mu\text{m/m}$)	Age en jours						
	1	3	7	14	21	28	30
MP (0%)	372.91	310.41	270.83	210.41	200	166.66	166.66
MDP (5 %)	52.08	133.33	222.91	172.91	166.66	165	165
MDP (10 %)	22.916	27.08	104.16	91.66	108.33	108.33	108.33
MDP (15 %)	29.16	135.41	179.16	150	151	151	150
MDP (20 %)	43.75	43.75	62.5	62.5	186.75	196.875	196
MDP (25 %)	287.5	287.5	215.625	214.75	228.85	228.85	228.85

D'après la figure 4.15, on remarque que l'ajout des déchets plastiques a un effet bénéfique sur le retrait de plâtre. Le retrait de plâtre avec déchets plastiques évolue rapidement au jeune âge.

Puis il se stabilise dans le temps. Les meilleurs résultats sont obtenus pour le pourcentage 10%. Nos résultats sont désaccord avec des travaux réalisés sur le plâtre avec les copeaux de bois et cela due à la nature des granulats utilisés.

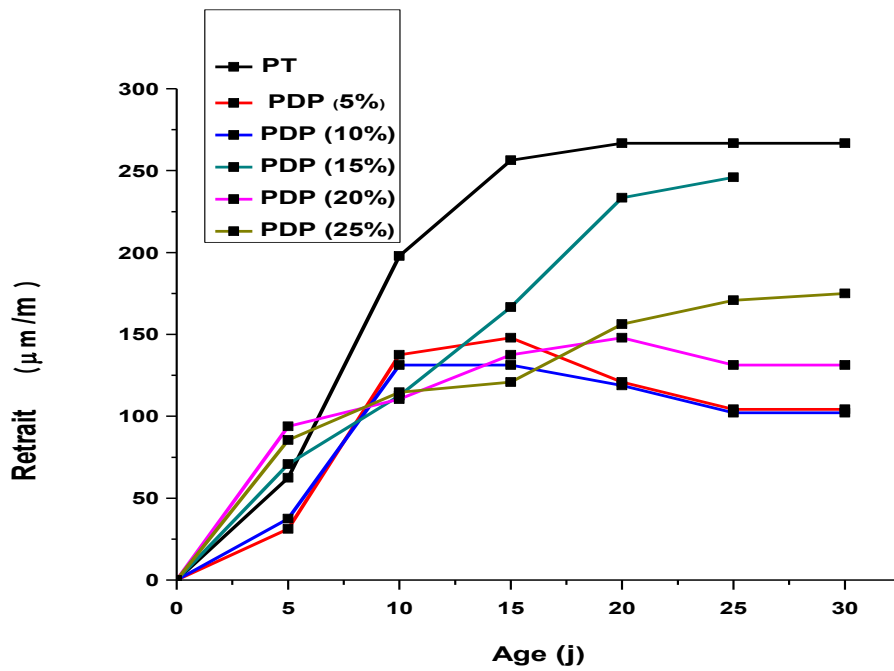


Figure 4. 15: Variation du retrait au cours du temps de la composition **plâtre + déchets plastiques**.

La figure 4.16, montre que le retrait de mortier de plâtre avec déchets plastiques est inférieur par rapport au plâtre seul. Puis il se stabilise dans le temps. La présence des granulats des déchets plastiques a diminué le retrait parce que il n'influe pas sur la réaction d'hydratation cela est due leur nature hydrophobe.

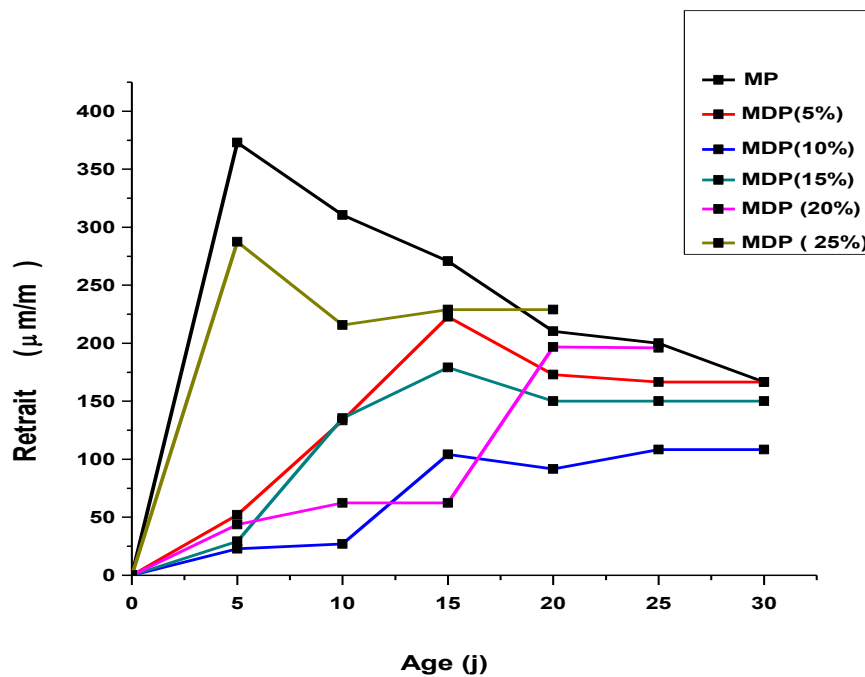


Figure 4. 16: Variation du retrait au cours du temps de la composition **mortier de Plâtre + déchets plastiques**.

4.4.3. Propriétés thermiques

Pour répondre à l'objectif fixé dans le cadre de cette recherche, à savoir le comportement thermique des matériaux de construction étudiés, nous avons entrepris des mesures de conductivité thermique, diffusivité thermique et chaleur spécifique sur des échantillons du plâtre avec des déchets plastiques PET, à l'âge de 28 jours et à l'état sec.

Les mesures sont effectuées sur des échantillons de $(4 \times 4 \times 2)$ cm³ au laboratoire de recherche de génie civil à l'université de Laghouat par la technique TPS (**Transient Plane Source ou Hot Disk**).

Les résultats des propriétés thermiques des compositions des plâtres +déchets plastiques sont représentés sur le tableau 4.13

Tableau 4. 13: Variation des propriétés thermique pour la **composition plâtre + déchets plastiques (PET).**

Composition	Conductivité thermique W/m.°c	Diffusivité thermique mm/s ²	Chaleur spécifique J/kg.K
PT(0 %)	0,500	0,430	1090
PDP (5%)	0,430	0,382	1124
PDP (10%)	0,430	0,427	1057
PDP (15%)	0,424	0,399	1112
PDP(20%)	0,424	0,374	1104
PDP (25%)	0,410	0,354	1127

4.4.3.1. Conductivité thermique

D'après la figure 4.17, on observe que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation des déchets plastiques, cette diminution atteint une valeur de 0.41 W/m.°c . Ce qui est due à l'incorporation du PET dans le plâtre, et qui réduit la densité et entraîne une diminution de la conductivité par rapport au plâtre témoin. En effet, la conductivité thermique dépend de la densité, de l'état d'humidité ainsi que des caractéristiques des constituants du matériau. Plus le matériau est dense, plus sa conductivité thermique est élevée.

Hannawi et al [68] montrent que l'incorporation des agrégats plastiques cause une augmentation du volume des vides d'air, la conductivité globale est diminuée en raison de la très faible conductivité thermique de l'air (0.024 W/m.K) et la conductivité thermique des déchets plastiques est de 0.13 W/m.K..

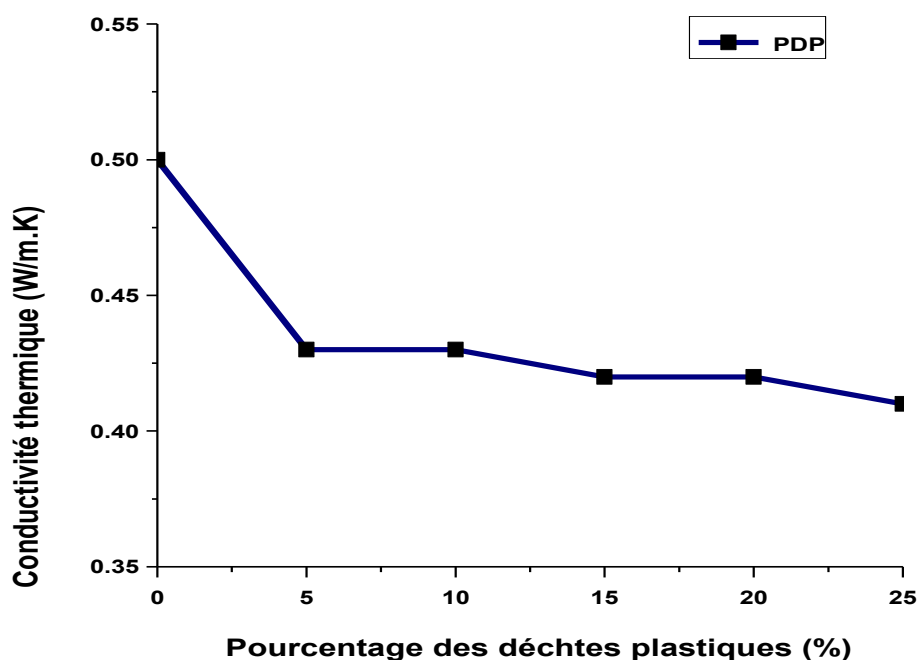


Figure 4. 17: Variation de la conductivité thermique plâtre + déchets plastiques à 28 jours.

Les propriétés thermiques de la composition mortier de plâtre avec déchets plastiques n'ont été pas mesurées car par expérience et en s'appuyant sur les différents de recherche sur cet axe que l'ajout de sable ($\lambda = 0.80$ W/m.K) fait accroître la conductivité thermiques des matériaux [52,99,64]. La conductivité du mortier de plâtre obtenu dans cette étude est de 0.60 W/m. $^{\circ}$ C dans cette étude.

En plus les travaux de Abdelmoune [95] montre que l'ajout de sable influera considérablement sur la masse volumique du mélange plâtre – sable et donc sur sa chaleur spécifique, il s'ensuit une augmentation de la diffusivité thermique. Notons que la chaleur spécifique du mortier de plâtre est de 1120 J/kg.K et la diffusivité thermiques est de 0.54 mm/s².

A. Relation entre la conductivité thermique et la porosité

La figure 4.18 représente la relation entre la conductivité thermique et la porosité de PDP à 28 jours.

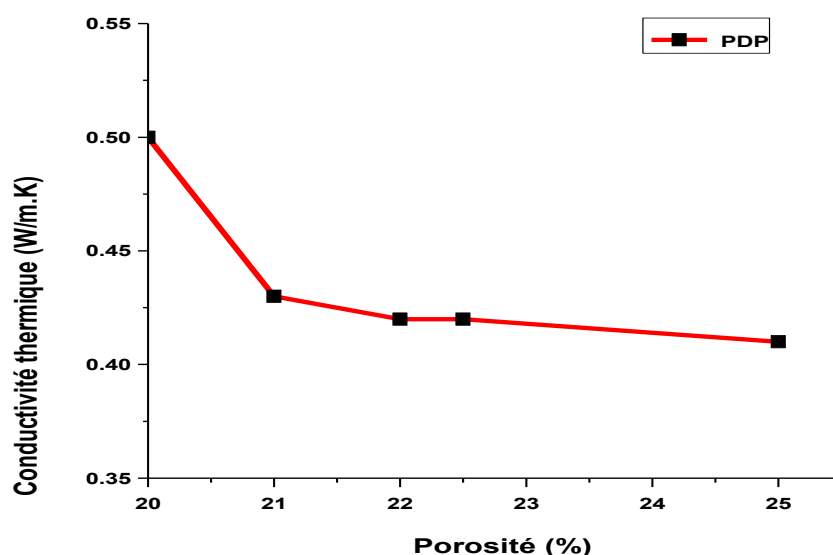


Figure 4. 18: Relation entre de la conductivité thermique et la porosité de la composition **plâtre + déchets plastiques** à 28 jours.

La littérature montre que plus la porosité du matériau est grande, plus sa conductivité thermique est faible et le matériau devient plus isolant ce qui a été montré par la figure 4.18, qui montre la variation de la conductivité thermique en fonction de la porosité, ces deux paramètres étroitement liés varient du sens inverse c.à.d. que la porosité des compositions plâtre avec déchets plastiques est inversement proportionnelle à la conductivité thermique.

B. Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique

Le tableau ci-dessous représente la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique en fonction de pourcentage des déchets plastiques.

Tableau 4. 14: Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique du PDP.

Pourcentage des déchets plastiques (%)	0	5	10	15	20	25
Masse volumique (Kg/ m ³)	1250	1246.09	122.65	1210.93	1203.13	1171.87
Conductivité thermiques (W /m.c)	0.50	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41

D'après le tableau 4.14, on constate que la masse volumique est inversement proportionnelle à la conductivité thermique, c.-à-d, plus la composition est dense plus sa conductivité thermique est plus grande, ce qui est en accord avec les travaux de Mahboubi et Khalfi sur plâtre + granulats des sachets plastiques [52].

4.4.3.2. Diffusivité thermique

D'après le tableau 4.13, on remarque que la diffusivité thermique diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage des déchets plastiques, c'est probablement due à la forme et la texture de la surface des déchets plastiques, qui gêne le flux de chaleur et cela par rapport au plâtre témoin.

4.4.3.3. Chaleur spécifique

Le tableau 4.13 montre que la chaleur spécifique des plâtres + déchets plastiques augmente légèrement par rapport au plâtre seul (0% de déchets plastiques). Nos résultats sont en accord avec les travaux de Kassou sur les composites en plâtre + copeaux de bois [64].

4.5. Visualisation des surfaces de rupture des composites étudiés par le microscope optique

Pour un matériau à base de plâtre, la plupart des propriétés sont liées à sa structure. Il est nécessaire donc, de faire une caractérisation microscopique. Cette dernière a été concentrée sur l'aspect général des matériaux étudiés, sur l'adhérence matrice- déchets plastiques, mortier de plâtre déchets plastiques.

La visualisation des surfaces de rupture a été faite au laboratoire de recherche de génie mécanique de l'université de Laghouat. Par un microscope optique en réflexion de type : LEICA DMLM. Ce microscope est équipé d'une caméra CCD 5 Méga pixel couleur reliée à un PC.

La figure 4.19 représente le microscope utilisé pour la visualisation des surfaces de rupture par un agrandissement de 30 fois.



Figure 4. 19: Microscope utilisé. (Lieca 500 X).

Les visualisations des échantillons sous le microscope optique sont présentées dans les figures ci-dessous.

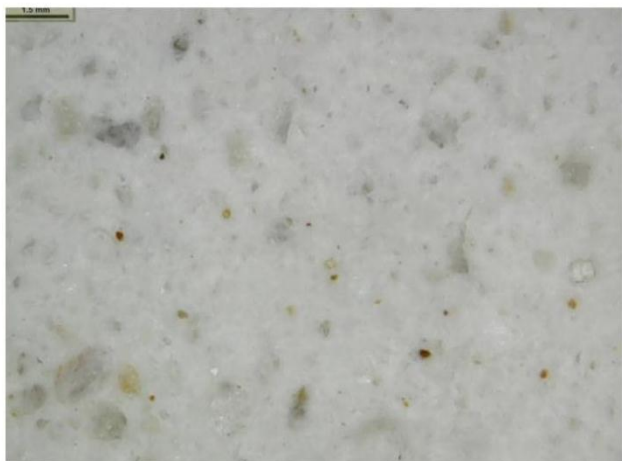


Image 1 : plâtre pur.



Image 2 : plâtre + 5% DP.



Image 3 : plâtre + 10 % DP.



Image 4 : plâtre + 15 % DP.



Image 5 : plâtre + 20 % DP.



Image 6 : plâtre + 25 % DP.

Figure 4. 20: Aspect général des compositions **plâtre + déchets plastiques PET.**

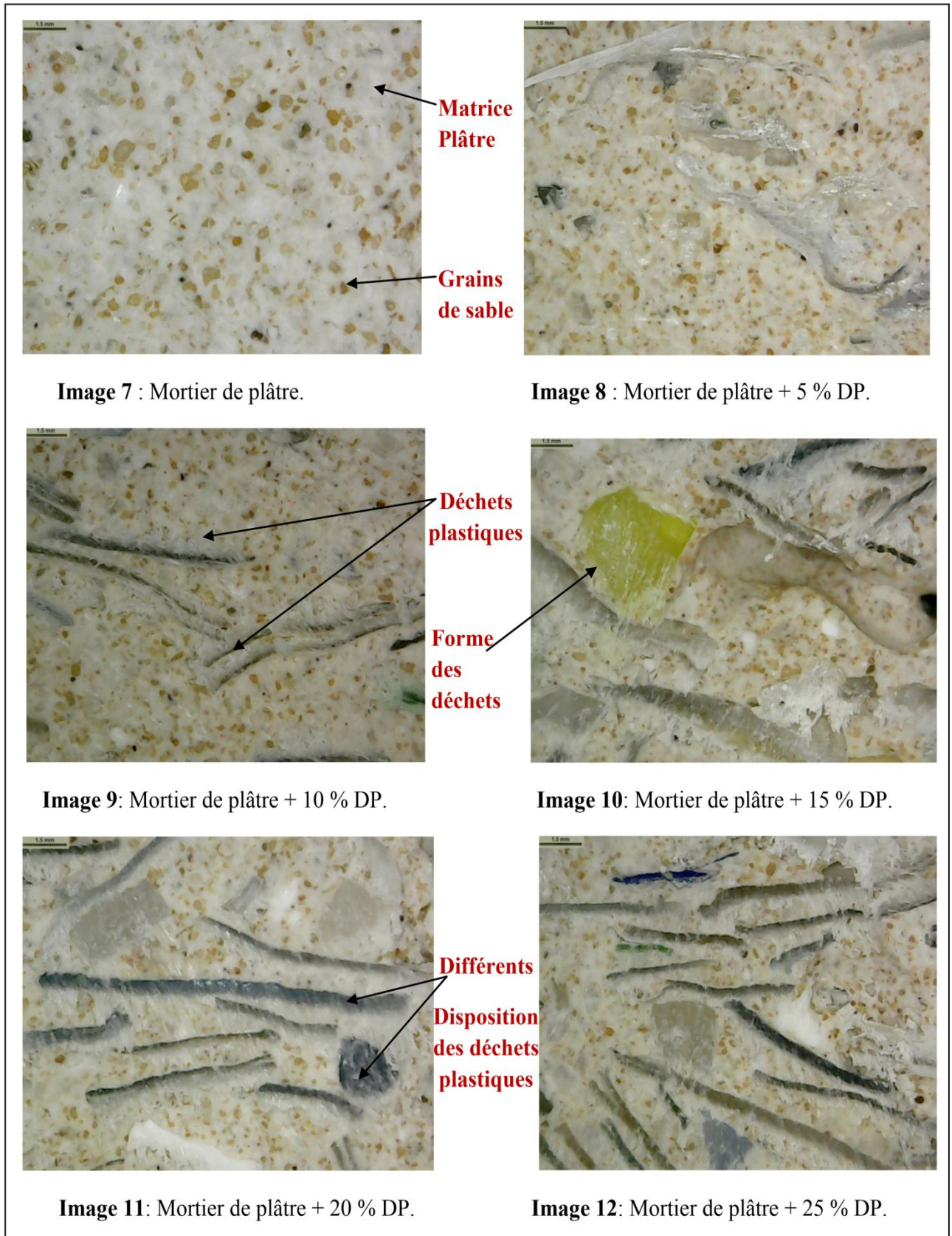


Figure 4. 21: Aspect général des compositions mortier de plâtre + déchets plastiques PET.

- L'image 1 montre la microstructure poreuse de la matrice plâtre.
- D'après l'image 2, on observe des points mécaniquement faibles à cause du pourcentage faible des déchets plastiques.
- L'image 3, 4, et 5 montrent les différentes dispositions des déchets plastiques dans la matrice plâtre, ce qui influence sur les propriétés mécaniques et thermiques du matériau.
- L'image 6 montre une bonne répartition des déchets plastiques dans la matrice plâtre avec une bonne liaison interfaciale.
- L'image 7 montre les grains de sable qui comblent les vides existants dans la matrice du plâtre poreux.
- L'image 8 montre une mauvaise répartition des déchets plastiques due à leur faible pourcentage ajoutée au mortier de plâtre.
- L'image 9, 10, 11 et 12 montrent différentes dispositions des déchets plastiques dans la matrice mortier de plâtre et que l'adhérence mortier-déchets plastiques est très performante.
- D'après la figure 4.21, on voit que l'adhérence sable-plâtre est bonne. Ceci est peut-être dû aux grains de sable qui comblent graduellement les vides existants dans la matrice.

4.6. Conclusions

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent clairement l'effet des déchets plastiques et du sable dunaire sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des composites étudiés.

1. La masse volumique diminue avec l'augmentation des déchets plastiques et augmente avec l'ajout de sable dunaire, il est de 1250 Kg/m^3 à 1171.87 Kg/m^3 pour la composition **plâtre + déchets plastiques** et de 1498.67 Kg/m^3 à 1281.87 Kg/m^3 pour la composition **mortier de plâtre + déchets plastiques**.
2. L'étude de la porosité montre que l'ajout des déchets plastiques augmente la porosité, elle est de 20 à 25 % pour la composition **plâtre + déchets plastiques**, et de 16.5 à 24 % pour la composition **mortier de plâtre + déchets plastiques**.
3. L'étude de retrait a montré que l'ajout des déchets plastiques diminue le retrait pour les deux compositions PDP et le MDP. On a pu obtenir pour le plâtre seul une valeur de l'ordre $266.66 \mu\text{m/m}$ et que l'ajout de 10 % des déchets plastiques a fait diminuer cette valeur à $102.08 \mu\text{m/m}$.

En ajoutant le sable, le retrait du plâtre augmente de 166 à 372.91 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le mortier de plâtre et en incorporant juste 10% de déchets plastiques a fait diminuer le retrait de mortier de plâtre de 372.91 à 108.33 $\mu\text{m}/\text{m}$.

4. L'ajout des déchets plastiques a fait diminué la résistance à la compression de 11.5 MPa pour le plâtre témoin à 6.6 MPa pour le plâtre + 25 % de déchets plastiques et pour le mortier de plâtre de 8.13 MPa à 6,78 MPa pour le mortier de plâtre + 25 % de déchets plastiques.

5. Les meilleurs résultats de la résistance à la flexion sont obtenus pour le plâtre + déchets plastiques et elle est de l'ordre de 3.60 MPa. Concernant le mortier de plâtre une nette amélioration est obtenue pour la composition mortier de plâtre + 20 % de déchets plastiques et elle est de l'ordre de 4 MPa et cela est due à la bonne adhérence mortier + déchets plastiques.

6. On conclue que l'augmentation des teneurs des déchets plastiques diminue la masse volumique apparente et augmente la porosité, car plus la composition est dense, plus sa porosité diminue.

7. Les résultats montrent que la conductivité thermique des composites étudiés est fortement influencé par l'ajout des éléments de faible densité au plâtre, comme les déchets plastiques. Ces derniers permettent de l'alléger, c'est-à-dire de diminuer la masse volumique des composites à base de plâtre.

8. Thermiquement l'ajout des déchets plastiques augmente la porosité, ce qui a fait abaisser la conductivité thermique de 0.50 à 0.41 $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ pour la composition plâtre + déchets plastiques. D'après la littérature la diminution de la conductivité thermique introduit des performances thermiques à l'enveloppe du bâtiment.

9. La diffusivité thermiques diminue en fonction de l'augmentation des déchets plastiques ce qui ralentit la vitesse de flux de chaleur et cela par rapport au plâtre seul.

10. L'augmentation des déchets plastiques n'influe pas beaucoup sur la chaleur spécifiques cela est due à la nature des déchets plastiques.

En fin on peut dire que la conductivité thermique des composites étudiés est incluse dans l'intervalle des conductivités thermiques des matériaux isolants (0.50 - 0.60 $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$) donné par Neville [46].

Conclusions Générales

Conclusions générales

La présente étude s'intègre parfaitement à la logique du développement durable et cela par la valorisation des déchets plastiques de bouteilles en plastiques (PET) et l'utilisation des matériaux locaux tels que le plâtre qui ne produit que de l'eau comme résidu lors de sa fabrication et le sable de dune qui occupe plus de 60 % de la superficie de l'Algérie. Donc l'objectif principal de nos travaux c'était de contribuer au développement d'un matériaux de construction innovant tout en prenant en compte les contraintes d'impacts environnemental, et économique notamment dans le secteur de la maison individuelle.

Une fois la problématique définie, le bilan des connaissances est réalisé, les matières premières caractérisés et les composite formulés, notre travail s'est articulé autour de deux axes principaux.

-Le premier axe traite l'influence de l'ajout des granulats de polyéthylène téréphtalate sur les propriétés physico-mécaniques des composites à base de plâtre et les résultats révèlent l'apport positif de ces granulats plastiques en matières d'allègement des composites. En effet l'incorporation de 25 % en poids de granulats de PET permet de réduire la masse volumique du composite de 1250 à 1171,87 Kg/m³ pour le plâtre seul et 1498.67 à 1281.87 Kg/m³ pour le mortier de plâtre.

-L'augmentation du pourcentage des déchets plastiques a fait accroître la porosité de 20 à 25 % pour la composition Plâtre + déchets plastiques et diminue pour le mortier de plâtre avec des déchets plastiques. Ce qui est en accord avec les résultats de différents expérimentateurs.

-La résistance à la flexion évolue dans le temps jusqu'au 28 jours. Les meilleurs résultats sont obtenus à 5 % de déchets plastiques avec une valeur de 3.60 MPa pour la composition plâtre + déchets plastiques et elle est de l'ordre de 4 MPa pour le mortier de plâtre + déchets plastiques, qui correspond à 20 % de déchets plastiques.

-Les meilleurs résultats de la résistance à la compression sont obtenus pour le composite Plâtre + déchets plastiques, elle est de l'ordre de 8.64 MPa et qui correspond à 5 % de déchets plastiques. Par contre pour le mortier de plâtre + déchets plastiques, on a enregistré une résistance de 7.49 MPa et qui correspond à 20 % de déchets plastiques.

-L'ajout des déchets plastiques a un effet bénéfique sur le retrait des deux composites. Le retrait est diminué de $266.66 \mu\text{m}/\text{m}$ à $102.08 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le plâtre + déchets plastiques et de $166.66 \mu\text{m}/\text{m}$ à $108.33 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le mortier de plâtre + déchets plastiques. Ces valeurs obtenues de retrait correspondent à un pourcentage de 10 % de déchets plastiques pour les deux composite (PDP, MDP).

- La conductivité thermique est fortement influencé par l'ajout des déchets plastiques au plâtre, elle est diminuée avec l'augmentation des pourcentages des déchets plastiques. Les meilleurs résultats sont obtenus pour le pourcentage 25 % de déchets et qui est de l'ordre $0.41 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ contre $0.50 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ pour le plâtre seul d'où l'amélioration du pouvoir isolant, et on a enregistré une augmentation de la conductivité thermique pour le mortier de plâtre $0.60 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$.

-La diffusivité thermique diminue en fonction du pourcentage des déchets plastiques elle est de $0.354 \text{ mm}/\text{s}^2$ pour le plâtre + déchets plastiques contre $0.43 \text{ mm}/\text{s}^2$ pour le plâtre seul.

-L'introduction du sable a fait augmenter la diffusivité thermique à $0,54 \text{ mm}/\text{s}^2$ par rapport au plâtre seul.

-La chaleur spécifique varie sensiblement en fonction du pourcentage des déchets plastiques et est-elle de l'ordre $1127 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ pour le pourcentage 25 % contre $1090 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ pour le plâtre seul.

-D'après les propriétés thermo-physiques obtenus on a conclu que notre composite plâtre + déchets plastiques peut entrer en concurrence avec les autres matériaux thermiquement isolants dans l'enveloppe des bâtiments.

-Notre composite plâtre + déchets plastiques et Mortier de plâtre peuvent être utilisés comme béton léger de construction et d'isolation classe II (tableau 2.1 du chapitre 2) selon les recommandations de RILEM et selon l'ACI, les meilleures résistances pour le composite plâtre + déchets plastiques et mortier de plâtre sont incluses dans l'intervalle de 7 à 17 MPa avec des masses volumiques incluses dans l'intervalle de 800 à $1350 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ce qui nous permet de le classer dans la classe des bétons de résistance moyenne (tableau 2.2 du chapitre 2).

-Donc les composites élaborés peuvent être utilisés comme porteur dans les zones à faible sismicité et isolants ou isolants porteur dans les régions sahariennes à faible pluviométrie.

Recommandation et perspectives de recherches

-Pour les future recherches, nous recommandons faire une étude de corrélation entre les propriétés mécaniques et la microstructure du composite avec un microscope électronique à balayage.

-Etude de durabilité des composite de plâtre à base de déchets plastiques, en vérifiant la comptabilité chimique entre la matrice plâtre et les déchets plastiques.

-Etude de comportement phonique du composite de plâtre à base des déchets plastiques.

-Etude de comportement hygrothermiques.

-Modélisation des propriétés thermo-physiques.

- Etude de l'effet de l'adjuvantage des mélanges à base de plâtre.

-Etude du comportement thermo-physique des bétons en fonction de leur destination notamment dans le cas des murs extérieurs d'une habitation en milieu aride afin de minimiser des facteurs climatiques extérieurs pour cela une application théorique par simulation par le logiciel Energy Plus pour déterminer les températures de surfaces intérieures et extérieures du murs et de la technique constructive.

En fin, nous espérons que cette étude contribuera à une large diffusion des éléments à base de plâtre et de bétons de plâtre légers à base des déchets plastiques.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1].**Meille, S.** Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure. Thèse de doctorat, Ecole doctorale de matériaux de Lyon, France.2010.p.218.
- [2].**C.N.E.R.I.B.** Recommandation pour la Construction en plâtre', Centre National d'Etude et de Recherche Intégré au Bâtiment.1993.
- [3].**Costes, J.** Le plâtre traditionnel et moderne, Edition Eyrolles. Paris.1995.
- [4].**Rachedi, M.** Contribution à l'Etude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier. Mémoire de magister, Université kasdi Merbah, Ouargla .2013.p.133.
- [5].**Fabien Betene, E.** Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, 2012.p.190.
- [6].**Amart Amathieu, L.** Influence d'adjudants organiques sur la texture cristalline du plâtre pris. Thèse de doctorat, Université d'Aix Marseille France. 1986.p.
- [7].**Edgar-Alejandro Pachon-Rodriguez.** Étude de l'influence de la dissolution sous contrainte sur les propriétés mécaniques des solides -fluage du plâtre . Thèse de doctorat. Université Claude Bernard - Lyon I. Français, 2011.
- [8].Syndicat Nationale des Industrie du plâtre .1971.
- [9].**Hamouda, J.**Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique France.2006.p.183.
- [10].**Amitouche, N. Foughali, Y.** Contribution à l'étude des propriétés physicomécanique des plâtres Alfa et Béta avec l'ajout des fibres et de super plastifiants. Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira Bejaïa .2016.p.142.
- [11].**Jacques Vieill Efon Coh, O.** Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux, série pedal.vol.XVII, N°3.1979. PP.195 -223.
- [12].**Daniel, D.** Plâtre. "Techniques de l'Ingénieur", 'Traité Construction' (C910) : jan.2002.p.24.

- [13].**Abreal, A.** Le gypse... Plus qu'un minéral, un minéral :<https://w.w.w. prene vande meulentrof.nl>.
- [14].[https://fr.scribd.com/document/293362988/Schema-Fabrication- Plâtre](https://fr.scribd.com/document/293362988/Schema-Fabrication-Plâtre).
- [15].**Cherait, Y. Nafa, Z.** Eléments de matériaux de construction et essai, Edition direction de publication universitaire Guelma.2006.
- [16].**Réunion.** Matériaux de construction, collection des cours de l'école chez soi, édition Eyrolles.1986.
- [17].**Papadakis, M. Venuat, M.** Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre. Edition Dunod.Paris. 1970.
- [18].Matériaux de construction, généralité <https://fr. source .com. document>.
- [19].**Sattler, H and Bruckner, HP.** Changes in volume and density the hydration of gypsum bindres as a function of the quantity of water oavailable , Z KG International .2001.
- [20].**Herihiri, O.** Formulation et Caractérisation des Bétons légers. Mémoire de Magister. Université Mohamed khider – Biskra. Algérie.2010. p.135.
- [21].**Chelabi, H. Taleb, Z.** Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre. Mémoire de Master. Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira.2017.
- [22].**Guergab .Z, Abdelhali .H.** Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre léger à base de granulats de polystyrène expansé. Mémoire de Master. Université Amar Thélidji à Laghouat.2013.
- [23].Le plâtre ; physico-chimie – Fabrication et emplois. Edition-Eyrolles .1982.
- [24].**Mamadou Diaga Seck** . Compréhension des mécanismes de séchage des matériaux de construction cas du plâtre. Thèse de doctorat Pari-Est, Ecole doctorale science , Ingénierie et Environnement , France.2015.
- [25].**Claude, J.** Bidaux, Plâtre, Murs, Formes, Volumes, Editions Erollyses 61, boulevard Saint-Germain, 75240 Paris cedex 05.2002.
- [26].**Festa, J.** Le Plâtre et ses applications traditionnelles et modernes Edition Erolles.1996.

- [27].**Soltane, M.L** .Contrôle technique d'un prototype de quatre logements en plâtre à Biskra C.N.R.I.B, colloque maghrébin sur la construction en matériaux locaux , Matloc 91,1991. PP.101-104.
- [28].**Sonebi, M** .Opération expérimentale d'un logement construit en mortier de plâtre banche à Rabat .Laboratoire public et d'essai (L.P.E.E) –Centre expérimentale du bâtiment, Octobre ,1989.
- [29].**Aldeberet, R** .Rénovation du grand Louvre à la gloire du plâtre . Le moniteur des travaux publics et du bâtiment, 1992. N° 41615, PP.56-68.
- [30].**C.S.T.B**. Préparation des sols, des plaques de plâtre en chape flottante sèche .Le monteur des sols, murs, plafonds, ISSN, 1992, PP.1162-3497.
- [31].Page Wikipédia – plaques et carreaux de plâtre – 2011.
- [32].[https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi3qv_OnaziAhVhxoUKHVddA9sQMwhFKAcwBw&url=http%3A%2F%2Ftravaux.over-blog.com%2Farticle.Carraux de plâtre hydrofuge pour réaliser des cloisons](https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi3qv_OnaziAhVhxoUKHVddA9sQMwhFKAcwBw&url=http%3A%2F%2Ftravaux.over-blog.com%2Farticle.Carraux%20de%20pl%C3%A2tre%20hydrofuge%20pour%20r%C3%A9aliser%20des%20cloisons), Consulté le Mai 2019.
- [33].<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.planete>. Consulté le Mai 2019.
- [34].http://ruedeslumieres.morkitu.org/apprendre/telecharger/gypse_PDF/Gypse%20V%20-%20La%20fabrication%20du%20pl%20tre.pdf .Consulté le Mai 2019.
- [35].<http://idgt.over-blog.com/article-visite-de-la-carriere-de-cormeilles-en-p-57577272.html>. Consulté le Mai 2019.
- [36].https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.planetetp.com%2Flocal%2Fcache-vignettes%2FL440xH260%2F1_cle6ebda5-25.69098.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.planete-tp.com%2Fconcassage-a1031.html&docid=0JYAJ-eEpy.Préparation de gypse .Consulté le Mai 2019.
- [37].**Cormon, P** . Bétons légers d'aujourd'hui, Edition Eyrolles.Paris.1961.
- [38].**Short, A., Kinniburg,w**. Light weight concrete.CR. Books.

- [39].**Contant, M.** Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux .Projet d'application présenté à l'école de technologie supérieur .Ecole de technologie supérieur l'université du Québec édition .Montréal 14 Avril 2000.
- [40].**Benkhalfa, B .** Contribution a l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments armés préfabriqués .Thèse de magistère. Université d'Annaba. 1988.
- [41].**Ziregue, A .**Comportement physico-mécanique et thermique d'un béton à base de sable calcaire allégé par des granulats de liège : Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique du composite. Thèse doctorat. Université Amar Thélidji de Laghouat.2018. p.118.
- [42].**RILEM.** Commission des bétons légers, Terminologie et définitions. Matériaux et Construction, 1970.N°13, pp.60-69.
- [43].**ACI21-213R-87.**Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan.1994.
- [44]. **Cerozo, V.** Propriétés mécanique, thermiques et acoustiques d'un matériau à base des particules végétales ; approche expérimentale et modalisation .Thèse de doctorat. INSI.2005.
- [45].**Ledhem, A.** Construction à l'étude d'un béton de bois, mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois . Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. France .1997.
- [46].**Neville, A. M.,** "Propriétés des Bétons", traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris.2000.p.806.
- [47].**Yang, k.** Caractérisation mécanique des bétons de granulats légers, expérience et modélisation. Thèse de doctorat de l'université de Cergy –pontoise.2008.
- [48].Document Technique Réglementaire 1997 : D.T.R C3-2, Algérie.
- [49].**Ammari, M.** Contribution à l'amélioration des propriétés physico-mécaniques d'un béton de sable léger à base de pailles d'orge. Mémoire de Magister. Université Amar Thélidji Laghouat.2016.
- [50].**Narayanan.N and Ramamurthy.K , OOB.** Structure and Proprieties of aerated concrete; a review : cement and concrete research, vol 22 Issue 5, 2000,pp.321-329.
- [51].**Arnoud, M . Virlogeux, M .** Granulats et Bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.1986.

- [52].**Mahboubi, D . Khalfi, M.** Etude des propriétés physico-mécaniques d'un composite en plâtre à base de déchets en plastique recyclé. Mémoire de Master. Université Amar Thélidji Laghouat.2018.p.164.
- [53].**Ziregue, A.** Valorisation de coproduits industriels influence de différents acteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment., Thèse de Magister, Université de Laghouat.2005.
- [54].**Bennacer, S. Chebabhi , M .** Elaboration d'un béton de plâtre allégé par des déchets industriels en vue de leur utilisation dans l'isolation des bâtiments. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA.2017.p.123.
- [55].**Ayadi , A. Iratini, A.** Elaboration et caractérisation d'un matériaux isolant à base de déchets de verre , Proceeding of international Seminary CEOMAT02, M'sila. Algérie 10-11 Mars 2002.pp.413-421.
- [56].**Ferhat, A.** Caractérisation physico-mécanique à court terme d'un Béton léger élaboré à partir d'agrégat pouzzolanique. Mémoire de Magister. Université d'Oran.2002.p.174.
- [57].**Papadakis, M.** Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre, édition Dunod.1970.
- [58].**Amoroso, G.G. Bacatselos, D.** Recherche d'un béton léger à base de polystyrène expansé facile à mettre en œuvre. Matériaux de construction. 1979.12(5) : pp.37-48.
- [59].**Akçaözöglu, S., Akçaözöglu, K., Duran Atiş, C.** Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA).2013.
- [60].**Ben Brahim, S. Toual, S .** L'étude de l'effet de la porosité sur le comportement physico-mécanique et thermique d'un béton cellulaire à base de sable calcaire et siliceux obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Mémoire de Master, Université Amar Thélidji.2018.
- [61].Propriétés mécaniques et thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : Approche expérimentale et modélisation théoriques .2005.243.f.INSA Lyon.
- [62].**Bederina, M.** Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons de sable à base de déchets de bois . Thèse de doctorat ENP Alger.2007.
- [63].**Ziregue, B . Abah , K.** Effet du type de liant sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques d'un béton allégé par les billes de polystyrène (polys-béton), Mémoire de Magister. Université de Laghouat .2017.

- [64].**Kassou, Y.** Contribution à l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments. Elaboration d'un composite plâtre –bois. Mémoire de Magister. Université Amar Thélidji 2016.p.115.
- [65].**Cherifi, R. Slimani, Y.** Etude d'un composite à base de ciment, sable de dunes et déchets de plastiques. Mémoire de magister. Université Amar Thélidji.2018.p.80. [66].**Bentchikou, M.** Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique (Cas de béton de fibres de papiers recyclés). Thèse de Doctorat de l'ENP d'Alger. 2008.
- [67].**Guettala, A . Merzghiche, B . Chebili, R.** Valorisation d'un déchet industriel pour la confection d'un béton de sable , Proceeding of International Seminary GEMAT'. 02,M'sila. Algérie 10-11 Mars 2002 pp.413-421.
- [68].**Hannawi,K., Kamali-Bernard, S., Prince, W,** Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. Waste Management .vol .30 ,Issue 11 , 2010,pp.2312-2320.
- [69].**Zitani, I.** Caractérisation physico -mécanique et thermique d'un béton de plâtre léger à base des granulats de liège. Mémoire d'ingénieur d'état en Génie Civil Université de Laghouat .2011.
- [70].**Laoubi H., Meddah A., Bedrina M., Djoudi A.,** Les performances thermomécaniques d'un béton de plâtre léger a base de déchets de caoutchouc. 3rd international symposium on materials and sustainable Development ISMSD2017 .Boumerdes - Algeria, November 07 & 08.2017.
- [71].**Roger Iacox, Albert Fuentes.** Traité de béton Armé. Editions Eyrolles, Paris.1982.
- [72].**Niang F., Coulibaly A., Cisse., I.K.** Modélisation numérique du comportement mécanique du béton léger de plastiques recyclés. Ecole Supérieure lytechnique – Thiès – Sénégal. Vol. 1, N°1 2001.pp.53-66.
- [73].**Benimam S., Debieb F., Bentchikou M., et Guendouz M.,** .Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton. See discussions, stats, and author profiles for this publication at:<https://www.researchgate.net/publication/275374542>.Mater web of conférence ISSN 2261-236.EDP sciences.2014.
- [74].Famille de plastiques et leurs usages. Mobi -Science.Briand.
- [75].**Gouasmi, M.** Effets d'agrégats légers à base de Polyéthylène téréphtalate sur les propriétés des mortiers. Mémoire de Magistère. Université d'Ohan, 2013.

- [76].**Suganthy P., Chandrasekar D.,** . Utilization of pulverized plastic in cement concrete as fine aggregate.2013.
- [77].**Guendouze, M.** Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériaux de construction à base de déchets plastiques: application au béton de sable. Doctorat. Université yahia farès de médéa.2017.
- [78].**Remadnia A., Dheilly RM., LaidoudiB., Quéneudec M.,** .Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates.constr Build Master. 2009; 23:3118-23.
- [79].**Benosman, A., kazi, N., Senhadji, Y., Taibi, H., M, M.** Mechanical strengths of modified PET mortar composites in aggressive MgSO4 medium: ACI & B.S predictions 4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1173375>.2017.
- [80].**Yarahmadi N., Jakubowicz I., Gevert T.,** . Effets of repeated extrusion on the proprieties and durability of rigid PVC scrap. Polymer Degradation and stability 73(1). 2001. 93-99.
- [81].**Saikia D.N., Brito J.,** Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. Construstuction and Building Materials, Vol 52 N° 15, 2014 ,pp236-244.
- [82].**Rebieiz K.S., Craft A.P.,** Plastic waste management in construction : Technological and institutional issues .Resources , conservation and Recycling 2014,15,245-257.
- [83].**Guissem, L.** Contribution à l'amélioration des proprieties du polyéthylène téréphtalate PET recycle, Mémoire de Magistère . Université Ferhat Abbas-Setif, 2007.
- [84].<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjA5LCJqniAhXFyIUKHUmQDQQMwhjKBgwGA&url=http%3A%2F%2Ffr.chinahawkingpack.com%2Fpharmaceutical-packaging-films%2Fmultilayer-casting-films%2Fpp-plastic-packaging-roll-film.html&psig=AOvVaw07xD2-LcG-fCHNDR2Jeag4&ust=1558436383226541&ictx=3&uact=3>
- [85].**KouSC, LeeG, PoonCS, laiWL.** Properties of ligh weight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scaped PVC pipes. Waste Manage 2009,29: 621-8.
- [86].**Veronica Calderon, Matthieu Horgnies,** Polymères recyclés dans la fabrication du plâtre, .Techniques de l'Ingénieur. 2013. pp.03.

- [87].**Pedreno-Rojas, M.J. Morales-conde, F. Pérez-Galvez , P.Rubio-de Hiter.**Influence of polycarbonate waste on gypsum composites :Mechanicale and envirimental study. Journal of cleaner production , volume 218,1 May 2019, payes 21-37.
- [88].**Valeria . Corinaldesi, Jcopo Donnini, Alessandro. Nardinocchi.** Light weight plaster containing plastic waste for sustainable and energy efficient building,construction and building matériels, volume 94,30 septembre 2015, pp.337-345.
- [89].**Dupain, R.** Granulats, sols, Ciment et Béton, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Editions castella -25, rue Montage-75005 Paris.
- [90].**Djoudi, A .** Caractérisation Structurale et Rhéologique des Bétons de Plâtre et leurs Renforcements par des Fibres Végétales du Palmier Dattier'. Mémoire de Magister, Université de Laghouat ,2001.
- [91].**Djoudi , A.** Etude de la durabilité et le comportement thermo-phonique des bétons de plâtre renforcés avec les fibres végétales du palmer .Thèse de Doctorat. 2015.
- [92].**Gueddouda, M.K.** Caractérisation et stabilisation des sols expansifs; colloque international, Sols et Matériaux à Problèmes ; Tunisie, -34.2007. pp.27.
- [93].**Bedrina, M.** Characterizations mécanique et microstructure des bétons de sables locaux : effets des fillers et la nature des sables sur le comportement mécanique du matériaux .Mémoire de magister , Université Amar Thélidji de Laghaut.2000.
- [94].**Ziregue, A .** Influence de différents facteurs d'allégement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-c iment. Mémoire de magister. Université Amar Thélidji de Laghouat.2005.
- [95].**Abdelmoumen Chaker, A .** Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 1999.
- [96].**Dreux, G . Festa, J.** Nouveau guide du béton .Edition Eyrolles, Mai 1998.
- [97].**Hamida, M.L.** Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction .Magister en physique énergétique , UMC,2010.
- [98].**Hafsi, F .** Contribution à l'étude de l'isolation thermique des bâtiments dans la régions sahariennes. Mémoire de Magister. Université Amar Thélidji Laghouat.2010.
- [99].**Djoudi A., Khenfer M.M., Bali A., Bouziani T., .** Effect of the addition of date palm fibers on thermal properties of plaster concrete: experimental study and modeling. Journal of adhesion science and technology, Volu 28 , 2014. pp.2100-2111.

[100].Yazoghli O., Dheilily R.M., Quéneudec M., . Valorization of post-consumer waste plasticin cementitious concrete composites
27.<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>.2007.

[101].Djoudi A., Kehenfer M.M., khenfer., Bali A., .Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier SBEIDCO.1st International conférence on sustainable Built Environnement Infrastructures in Developing Countries,ENESET Oran 2009.

[102].Colak, A. Physicol and mechanical properties of polymer-plaster composites .Journal Matériel letters, 60, 2006, pp.1977-1982.

Les Normes utilisés

NFP 18-555 : Détermination de la masse volumique absolue et apparente.

NF B 12.401 : Mesure de la finesse de mouture du plâtre.

NFB 12-401 : Détermination du taux de gâchage à saturation du plâtre.

NFB 12 -401 : Détermination de la prise de plâtre.

EN 1097-6 : Masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre de sable.

NFP 18-555 : Compacité et Porosité.

EN 933-1: Détermination du module de finesse de sable.

EN 933-8 : Essai de l'équivalence de sable.

NFP 18-555 : Essai d'absorption.

NF EN 196-2 : Analyse chimique.

EN933-1 et EN 933-2 : Essai de caractérisation des matériaux –L'analyse granulométriques.

EN 196-1 : Déterminer la contrainte de flexion et compression de mortier

NFP 15-433 : Mesure de retrait.

ASTM C642 : Détermination de la porosité accessible à l'éthanol.

Annexes

Annexes 1

Tableau A.1.1: Propriétés physiques et mécaniques du plâtre.

Masse volumique absolue	$\gamma_{abs} = 2507.21 \text{ kg/m}^3$	NFP 18-555
Masse volumique apparent	$\gamma_{app} = 887 \text{ kg/m}^3$	NFP 18-555
Finesse de Blaine	$S = 2533.27 \text{ cm}^2/\text{g}$	NFP EN 196-6
Refus sur le tamis 800 μm	6.66 %	NFP 12-401
Refus sur le tamis 200 μm	17 %	
Temps de prise (E/P = 0.6)	Début de prise = 4min 40 sec Fin de prise = 10 min 41 sec	NFP 12-401
Résistance à la compression à 28 jours.	$R_c = 11.5 \text{ MPa}$	EN 196-1
Résistance à la Traction à 28 jours.	$R_t = 3.88 \text{ MPa}$	EN 196-1

Tableau A.1.2: Caractéristiques physiques du sable de dune.

Masse volumique absolue	$\gamma_{abs} = 2635.20 \text{ kg/m}^3$	EN 1097-6
Masse Volumique apparent	$\gamma_{app} = 1491.33 \text{ kg/m}^3$	NF P 18-555
Compacité et porosité	$C = 56 \%$ et $P = 43 \%$	NFP 18-555
Module de finesse	1.228	EN 933-1
Equivalent de sable	ESV = 90.24 % ESP = 84 %	EN 933-8
Teneur en eau	$\omega = 0.4 \%$	/

Annexes 2

Tableau A.2.1: Analyse granulométrique du sable de dune.

Coefficient AFNOR	Diamètre des tamis (mm)	Masse Refus partiel (g)	Masse Refus Cumulée (g)	Refus cumulée (%)	Passant (%)
34	2	0	0	0	100
31	1	0	0	0	100
30	0.8	0	0	0	100
29	0.63	0.002	0.002	0.4	99.60
28	0.5	0.002	0.004	0.8	99.2
25	0.25	0.174	0.178	35.60	64.40
22	0.125	0.254	0.432	86.40	13.60
20	0.08	0.048	0.480	96.00	4
Fond	F	0.016	0.496	99.20	0

Tableau A.2.2: Analyse granulométrique des déchets plastiques.

Coefficient AFNOR	Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus Cumulée(g)	Refus cumulée (%)	Passant (%)
41	10	0.006	0.006	0.600	99.40
40	8	0.104	0.110	11.04	88.96
39	6.3	0.320	0.430	43.00	57.00
38	5	0.184	0.614	61.40	38.60
37	4	0.140	0.754	75.40	24.60
35	2.5	0.192	0.946	94.60	5.40
33	1.6	0.042	0.988	98.80	1.20
Fond	Fond	0.008	0.996	99.60	0.4

Annexes 3



Figure A.3.1. Différents mélange réalisés.



Figure A.3.2. Écrasement des éprouvettes pour les différentes compositions MDP et PDP.



Figure A.3.3. Confection de moule.



Figure A.3.4. Mortier de plâtre.

Annexes 5

Variation des masses volumiques en fonction des jours 7 et 14 jours.

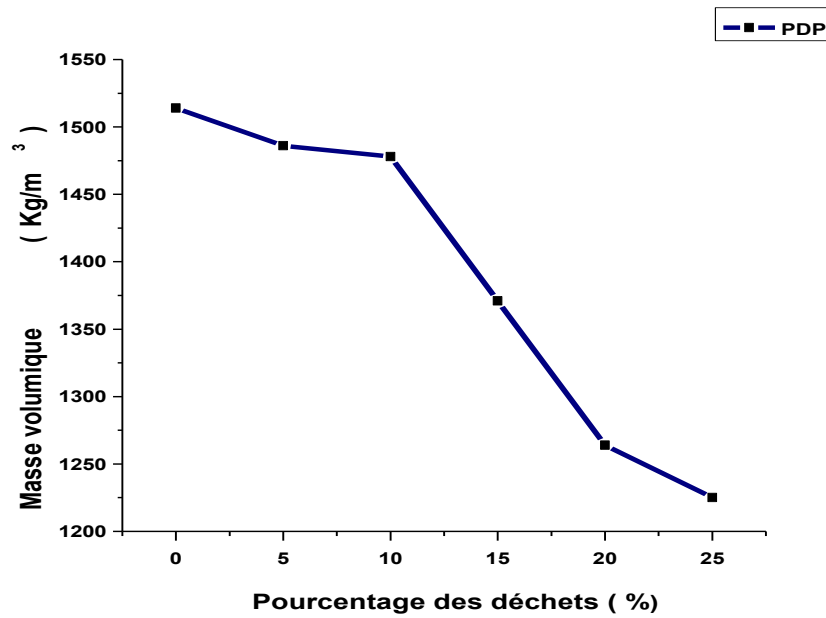


Figure A.5.1: Variation de la masse volumique à 7 jour pour la composition **plâtre + déchets plastiques**.

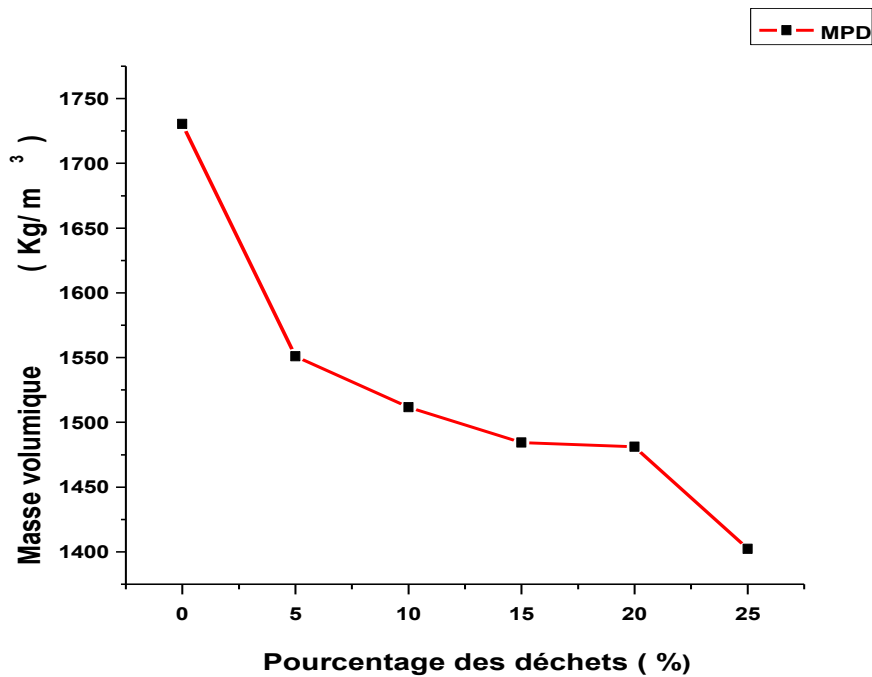


Figure A.5.2. Variation de la masse volumique à 7 jours pour la composition mortier de **plâtre + déchets plastiques**.

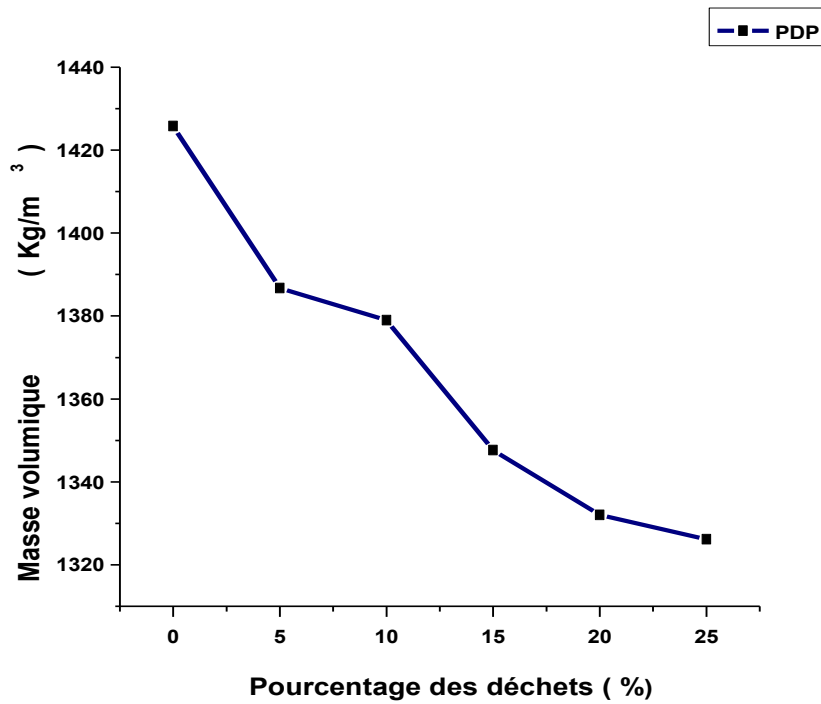


Figure A.5.3: Variation de la masse volumique à 14 jour pour la composition **plâtre + déchets plastiques**.

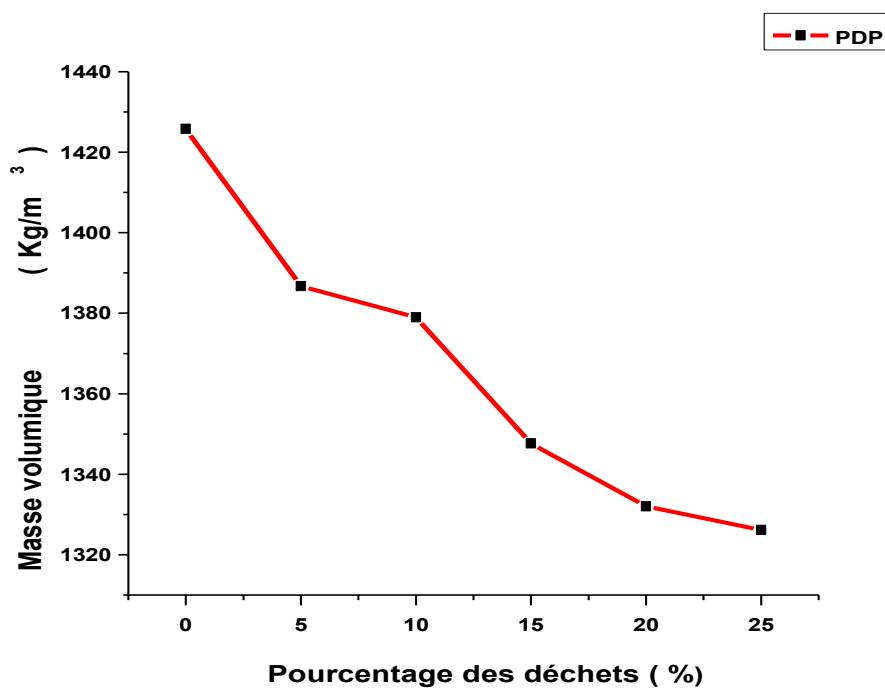
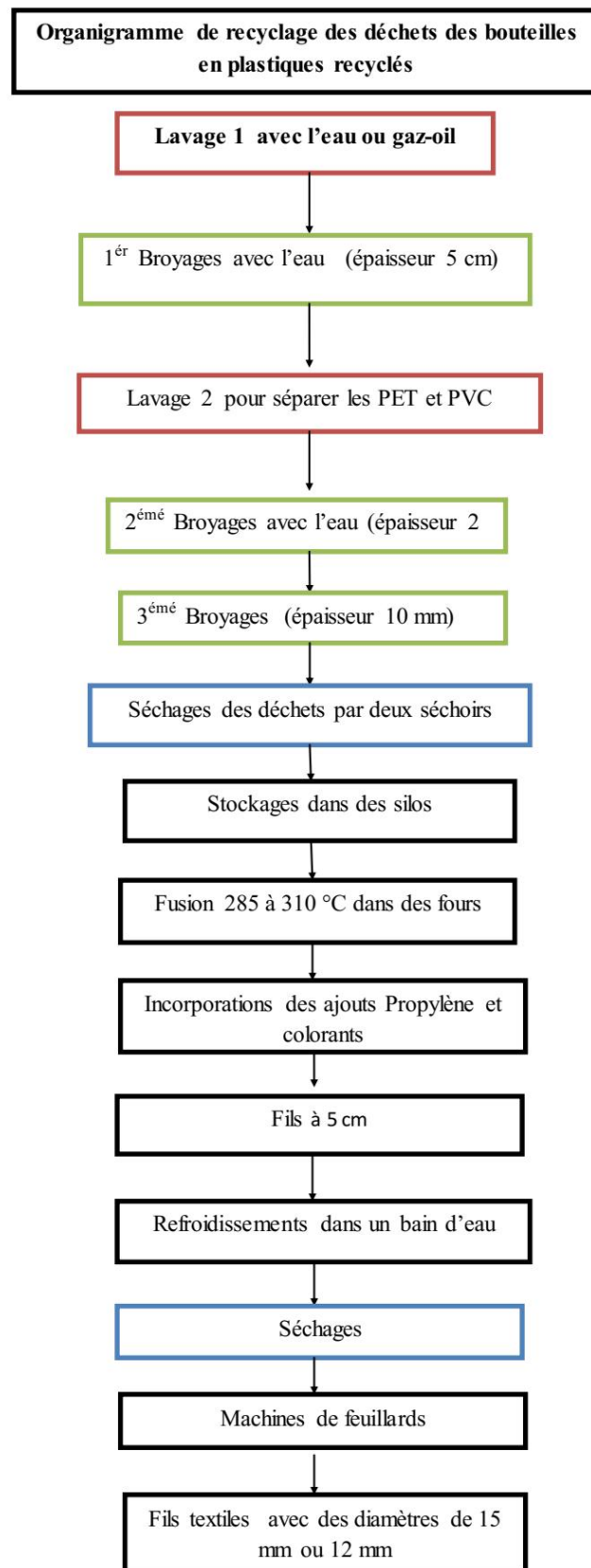


Figure A.5.4: Variation de la masse volumique à 14 jours pour la composition mortier **de plâtre + déchets plastiques**.

Annexes 6



Annexes 7**Détermination de taux de gâchage à saturation**

Masse d'eau (kg)	Masse de (eau+ plâtre + bécher)	Masse de (eau +bécher)	Masse de plâtre (kg)	E/P
0.094	0.438	0.194	0.244	0.40
0.1	0.462	0.194	0.268	0.37
0.1	0.378	0.194	0.184	0.54
0.1	0.358	0.194	0.164	0.60
0.1	0.356	0.194	0.162	0.61
0.1	0.362	0.194	0.168	0.59

ملخص:

يعتبر إنتاج مواد عازلة حراريا و كذا إيجاد حلول للمشاكل البيئية وذلك بتدوير النفايات الصناعية والمنزلية ، محور بحث مهم لاسيما في مجال البناء. لهذا السبب الهدف الرئيسي لهذا العمل هو المساهمة في تطوير مواد بناء مبتكرة متكونة من الجص ، رمل الكثبان وكذلك نفايات القارورات البلاستيكية (بوليثين ترفتلات PET) الناتجة عن عملية التدوير .

تحليل النتائج يبين التأثير الايجابي لإدخال النفايات البلاستيكية من أجل تخفيف مادة الجص و تحسين الانكماش ولكن إنقاص في خصائصه الميكانيكية و كذا المسامية لذلك نجد أن هاته المواد المركبة الجديدة بخصائص ميكانيكية كافية ، تصلح كمواد عازلة من أجل المحافظة على الطاقة .

الكلمات مفتاحية : العزل حراري ، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ، الانكماش ،المسامية ،النفايات بلاستيكية .

Abstract

The production of thermally insulating materials as well as the solution of environmental problems by recycling industrial and household waste are the most interesting research in the domain of construction. For this reason the main aim of this work is to contribute to the development of an innovative building materials based plaster, sand of dune as well as recycled waste of plastic bottles (polyethylene terephthalate PET) .

The analyze of results shows the beneficial effect of the incorporation of plastic waste for the lightening plaster, the improvement of shrinkage but a reduction in its mechanical properties and porosity , so these new composites were found suitable for use insulating materials for saving energy with sufficient mechanical performance.

Key words: thermally insulating, mechanical and physical properties, shrinkage, porosity, plastic waste.

Résumé

La production des matériaux isolants ainsi que les solutions des problèmes environnementaux par le recyclage des déchets industriels et ménagers est le plus important axe de recherche dans le domaine de construction. L'objectif principal de ce travail est de contribuer au développement des matériaux de constructions innovants à base du plâtre, sable de dune ainsi que des déchets des bouteilles en plastiques recyclé.

L'analyse des résultats montre l'effet bénéfique de l'incorporation des déchets plastiques sur l'allègement du plâtre et l'amélioration de son retrait et son isolation thermique mais une réduction de ces propriétés mécaniques et sa porosité.

Donc ces composites peuvent être utilisés comme matériaux isolants conservateurs de l'énergie avec des performances mécaniques suffisantes.

Mots clés : Isolation thermique, propriétés physiques et mécaniques, retrait, porosité, déchets plastiques.