

الجمهورية
الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم
العلمي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة
أبو بكر بلقايد -
تلمسان

UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAÏD – TLEMCEM –



Mémoire d'obtention du diplôme de **MASTER** en

Génie Civil

Spécialité : **Structure**

Thème :

Contribution à l'étude du comportement des
composite de plâtre à base de déchets

Présenté par :

BELKAID Abdelkarim Farize

GOURMALA Ines Nihel

Devant le jury compose de :

M TALEB Omar

MCA

Univ-Tlemcen

Président

Mme BELAIDI Amina

MCB

Univ-Tlemcen

Examinatrice

M HOUTI Farid Brahim

MAA

Univ-Tlemcen

Encadrant

M BENOSMAN Ahmed Sofiane

Pr

ESSA-Tlemcen

Encadrant

2024-2025

Remerciement

Le présent travail a été réalisé au laboratoire de Génie Civil de l'Université ABOU BEKR BELKAID, TLEMCEM.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu pour nous avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de notre stage et à l'élaboration de ce travail de fin d'études.

*Nos remerciements les plus sincères vont à **Monsieur HOUTI Farid Brahim**, enseignant à la Faculté de Technologie de Chetouane – Tlemcen, pour nous avoir proposé ce sujet, suivi tout au long de notre travail, et pour ses conseils précieux ainsi que son encadrement attentif et rigoureux.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement le **Professeur BENOSMAN Ahmed Soufiane**, enseignant à l'École Supérieure des Sciences Appliquées de Tlemcen, pour sa disponibilité, son écoute constante, et l'aide qu'il nous a apportée tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent aussi au **Dr TALEB Omar**, Président du jury, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions **Madame BELAIDI Amina**, enseignante-chercheure et examinatrice, pour l'attention qu'elle a portée à notre mémoire et pour ses remarques pertinentes et constructives.*

*Nous adressons enfin nos sincères remerciements au **Groupe CHIALI** et à la **direction de la Chaux – Saïda**, pour leur collaboration, leur disponibilité et le soutien matériel qu'ils nous ont apporté durant la phase expérimentale de notre travail.*

Dédicaces

Je dédie ce travail, avec tout mon respect et ma gratitude :

À ma chère mère, pour son amour infini, ses prières silencieuses et son soutien indéfectible.

Ta patience, ton courage et tes sacrifices sont la véritable source de ma réussite. Que Dieu te protège et te garde toujours à mes côtés.

À mon père, Allah yarahmou, lui qui a toujours été à mes côtés et m'a soutenu tout au long de ma vie. Son absence me pèse, mais sa présence continue de vivre dans mon cœur.

À mes frères et sœurs, pour leur présence constante, leur affection et leurs encouragements.

À ma binôme Ines, pour sa collaboration, son sérieux, sa patience

À mes amis et amies, pour leur fidélité, leur écoute et leur présence précieuse dans toutes les étapes.

À ma promotion, pour les souvenirs partagés, l'entraide et la solidarité qui ont marqué ces belles années universitaires.

Et enfin, à tous les professeurs de génie civil qui m'ont transmis leur savoir avec passion et bienveillance, et qui ont contribué à ma formation tout au long de ce parcours.

-Belkaid Farize Abdelkarim-

Dédicaces

Je dédie ce travail, avec tout mon respect et ma gratitude :

*À **ma chère mère**, Pour ton amour sans fin, tes prières silencieuses et ton soutien inébranlable. Ta patience, ton courage et tes sacrifices discrets sont le véritable secret de ma réussite. Que Dieu te garde et t'accorde une vie longue à mes côtés.*

*À **mon cher père**, Pour ta présence discrète mais puissante, ton amour silencieux et ta confiance indéfectible. Ton courage, tes sacrifices invisibles et ta force tranquille ont été le socle sur lequel j'ai construit ma route. Que Dieu te protège et t'accorde encore de longues années à mes côtés.*

*À **ma sœur jumelle**, ma moitié, mon reflet, merci pour ta présence silencieuse mais essentielle, tu es mon soutien le plus précieux.*

*À **mes deux frères** merci pour votre force discrète et votre encouragement constant.*

*Une pensée toute particulière à **mon grand-père**, Allah yerahmou. Son amour pour le savoir, sa fierté silencieuse et son soutien durant toutes les étapes de ma vie ont marqué profondément mon parcours. Il me manque terriblement, et c'est avec beaucoup d'émotion que je lui dédie une part de ce travail.*

*À **mes deux grands-mères**, votre amour et vos prières sont un trésor précieux. Merci d'être toujours là, avec douceur et tendresse, à chaque étape de ma vie.*

*À **mon oncle** pour sa gentillesse et ses prières bienveillantes.*

*Je remercie **mon binôme Fariz** pour son sérieux, sa coopération et son esprit d'équipe tout au long de cette recherche.*

*Je n'oublie pas d'exprimer ma gratitude aux **membres de l'Archi Club**, que j'ai eu l'honneur de présider. Merci pour votre énergie, votre engagement et tous les précieux moments d'entraide partagés.*

*Mes remerciements vont également à **chahla** pour son aide précieuse et la pertinence de ses conseils, qui ont contribué à l'avancement de ce travail.*

*Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble **des enseignants** qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours universitaire, pour leur disponibilité, leurs conseils et leur dévouement*

-Gouramala Ines Nihel-

Liste des Figures

Figure 1 : Phase du plâtre.....	5
Figure 2 : Différents systèmes de cristallisation du gypse.....	6
Figure 3 : L'extraction du gypse à ciel ouvert et souterraine.....	9
Figure 4 : Concassage du gypse.....	9
Figure 5 : Four de cuisson du gypse.....	9
Figure 6 : Influence du rapport E/P sur la densité.	13
Figure 7 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques.	13
Figure 8 : blocs pleins et alvéolés.....	15
Figure 9 : Cloison intérieure.....	16
Figure 10 : Différentes type de fibres.....	18
Figure 11 : Différents éprouvettes réalise.....	20
Figure 12 : Agrégats du caoutchouc et copeaux de bois.....	21
Figure 13 : Briques pleines à base de plâtre avec six trous ronds symétriques, mesurant $85 \times 55 \times 185 \text{ mm}^3$	21
Figure 14 : État et fissures du bloc après le test de compression.....	22
Figure 15: bloc alvéolaire	23
Figure 16 : Tri sélectif des déchets.....	26
Figure 17 : Projet de valorisation des déchets organiques	27
Figure 18 : Processus de recyclage du verre.....	27
Figure 19 : Impact des déchets plastiques sur l'environnement.....	28
Figure 20 : Déchets de démolition.....	28
Figure 21 : Formule chimique du PVC.....	29
Figure 22 : Schéma de fabrication du composant de base : la résine PVC.....	30
Figure 23 : étape pour obtenir PVC broyé.....	32
Figure 24 : Direction de Chiali.....	32
Figure 25 : Plâtre KNAUF.....	36
Figure 26 : Chaux hydratée.....	37

Figure 27 : Dechet de PVC.....	37
Figure 28: Masse volumique du plâtre.....	38
Figure 29 : Masse volumique du sable.....	39
Figure 30 : Masse volumique du déchet de PVC.....	40
Figure 31: fibre polypropylène.....	40
Figure 32 : Tamiseuse d'analyse granulométrique.....	41
Figure 33 : Courbes granulométrique du sable et du déchet.....	41
Figure 34: Essai d'étalement	43
Figure 35: moule (4 x 4 x 16) cm ³	45
Figure 36: les constituants utilisés.....	46
Figure 37: dessin de bloc alvéolaire avec différents coupe	48
Figure 38: Moule du bloc alvéolaire	49
Figure 39: Différents constituants.....	50
Figure 40 : Procédure de moulage pour la fabrication d'un bloc alvéolaire a) – Huilage du moule à l'aide d'un pinceau à pointe fine ,b) Ajout des constituants secs dans le bidon ,d) Incorporation des fibres de polypropylène c) Malaxage manuel des constituants,, e) Ajout de l'eau, f) Malaxage manuelle g) Malaxage mécanique à l'aide d'une perceuse, h) La pâte et prête h) Coulage de la pâte dans le moule g) Mise en place du couvercle du moule, k) Arasage de la surface supérieure, l) Retrait des cylindres en PVC. m) Démoulage du bloc ,n) Bloc et prête	52 et 53
Figure 41: moule (25,5 x 25,5 x 2) cm ³	53
Figure 42: Diffèrent constituants pour la formulation des plaques.....	54
Figure 43: Détermination de la masse des éprouvettes (4×4×16 cm ³)	56
Figure 44: Duromètre Shore C.....	56
Figure 45: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction.....	57
Figure 46: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.....	58
Figure 47: Essai d'absorption capillaire.....	58
Figure 48: Les échantillons dans l'étuve (Cycle Etuve-Immersion)	59
Figure 49: Les échantillons dans l'eau (Cycle Etuve-Immersion)	59
Figure 50: Appareil pour essai de vitesse des ultrasons.....	60
Figure 51: Bloc alvéolaire (33×25×8 cm ³)	60

Figure 52: Duromètre Shore C.....	61
Figure 53: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction sur les blocs.....	62
Figure 54: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.....	62
Figure 55: Dispositif pour l'essai d'impact sur les plaque	63
Figure 56: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j et 28j.....	68
Figure 57: Variation de la dureté en fonction des pourcentages du déchet de PVC et de fibres de polypropylène 14j.....	69
Figure 58: Variation de la dureté en fonction des pourcentages du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j.....	69
Figure 59:Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des déchets de PVC et de fibres de polypropylène à 14j.....	70
Figure 60:Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des déchets de PVC et de fibres de polypropylène à 28j.....	71
Figure 61:Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j.....	72
Figure 62:Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j.....	72
Figure 63: Variation de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j.....	73
Figure 64 : Variation de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j.....	74
Figure 65: Variation de l'absorption capillaire en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j.....	75
Figure 66: Variation de l'absorption capillaire en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j.....	75
Figure 67 : Résistance à la compression avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours.....	77
Figure 68 : Résistance à la flexion avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours.....	78
Figure 69 : Dureté Shore C avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours.....	79
Figure 70 : Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours.....	80
Figure 71: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène	82

Figure 72: Variation de la dureté en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène	83
Figure 73: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène	84
Figure 74: Variation de la résistance a la flexion en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène	85
Figure 75 : L'essai de traction sur le bloc sans fibre PP.....	86
Figure 76 : L'essai de traction sur le bloc sans fibre PP.....	86
Figure 77: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène.....	87
Figure 78: Variation du diameter d'impact en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène	87
Figure 79: Variation de la hauteur d'impact en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène	88
Figure 80: a)0% 0% , b)80% 0% , c)140% 0% , d)0% 2%, e)80% 2%, f)140% 2%.....	89

Listes des tableaux

Tableau 1 :Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate.....	11
Tableau 2 : Propriétés du PVC.....	31
Tableau 3:Temps de prise du plâtre.....	38
Tableau 4: Propriété physique du plâtre et la chaux.....	39
Tableau 5: Propriété de fibre polypropylène.....	40
Tableau 6: Les résultats des essais du sable et déchet.....	42
Tableau 7 : Pourcentage des fibre par rapport au rapport E/P.....	43
Tableau 8 : Résultats de l'essai d'étalement selon le taux de PP et de déchet de PVC.....	44
Tableau 9: les différentes taux des composites	46
Tableau 10: Formulations des blocs alvéolaires.....	49
Tableau 11 :récapitulation des normes applicables, des dimensions des échantillons et des protocoles expérimentaux associés aux essais mécaniques et physiques des matériaux à base de plâtre.....	64

Tableau 12: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène.....67

Tableau 13: les effets des deux cycle étuve immersion sur différentes formulations....76

Tableau 14 : résumé final des essais.....86

Liste abréviation

Symboles	Désignations	Unités
ρ	La densité	kg/m^3
R_f	Résistance à la flexion	MPa
F_f	Charge à la rupture	N
B	Largeur de la section carrée du prisme	mm
L	Distance entraxe des rouleaux d'appuis de l'éprouvette	mm
R_c	Résistance à la compression	MPa
F_c	Charge à la rupture	N
α	Largeur de la section carrée	mm
I	L'absorption	mm
m_t	La variation de la masse de l'éprouvette à l'instant (t)	g
A	La surface du spécimen en contact avec l'eau	mm^2
d	La masse volumique d'eau	g/mm^3
T	le temps	s
S	Le coefficient de sorptivité	$(g.s^{0,5})$
PA6	Fibre type Nylon	

Sommaire

Introduction généralité	2
Partie A : Généralités sur le plâtre.....	4
I.1 Historique	4
I.2 Définition.....	4
I.3 Applications du plâtre	5
I.4 Gypse et anhydrite	5
I.4.1 Gypse naturel.....	6
I.4.1.1 Formes cristallines	6
I.4.1.2 Propriétés physico-chimiques	7
I.4.2 Anhydrite	7
I.4.3 Gypse de synthèse.....	7
I.5 Fabrication du plâtre à partir de gypse naturel	8
I.5.1 Extraction et préparation du gypse	8
I.5.2 Concassage et calibrage	9
I.5.3 Cuisson	9
I.5.4 Élaboration des produits finis.....	10
I.6 Principales propriétés du plâtre	10
I.6.1 La prise du plâtre	10
I.6.2 Durcissement	11
I.6.3 Isolation thermique et régulation de l'humidité	11
I.6.4 Gestion de l'humidité intérieure.....	12
I.6.5 Isolation acoustique	12
I.6.6 Correction acoustique	12
I.6.7 Résistance au feu	12
I.7 Propriétés mécanique et mise en œuvre du plâtre	13
I.7.1 Pâte pure de plâtre.....	13
I.7.1.1 Propriétés de la pâte pure	13

I.8 L'utilisation de plâtre :	14
I.8.1 L'utilisation du plâtre comme enduit.....	14
I.8.2 La fabrication de cloisons	14
I.8.3 La réalisation de plafonds et faux plafonds	14
I.8.4 Blocs en plâtre et préfabrication des murs	15
I.8.4.1 Introduction	15
I.8.4.2 Types de blocs en plâtre	15
I.8.4.3 La préfabrication des murs en plâtre	16
I.8.4.4 Applications.....	16
I.8.4.5 Perspectives	17
I.9. Les fibres	17
1.10 Les types de fibres	17
1.10. 1 Nature et origine du polypropylène (PP)	19
1.10.2 Effets sur les composites à base de plâtre	19
1.10.3 Effets négatifs à surveiller	19
1.10.4 Intérêt environnemental.....	19
I.11 Les différents travaux réalisés sur le plâtre	20
I.11.1 Investigation expérimentale d'un nouveau bloc écologique fabriqué par mélange de plâtre et de sable désertique	20
I.11.2 Investigation expérimentale d'un nouveau modèle de blocs isolants en plâtre de gypse	20
I.11.3 Fabrication et propriétés de produits à base de plâtre incorporant des matériaux recyclés de bois et de caoutchouc	21
I.11.4 Caractérisation mécanique de composites à base de plâtre contenant des matériaux inertes et isolants issus de déchets de construction et de démolition, et application ultérieure en tant que bloc de plâtre	22
I.11.5 Prototype de blocs alvéolaires en plâtre avec ajout de déchets plastiques pour cloisons : évaluation physico-mécanique, de la résistance à l'eau et du cycle de vie	22
I.11.6 Contribution à l'étude des matériaux composites plâtre/déchets	23

I.11.7 Contribution à l'étude des matériaux composites biosourcés à base de plâtre	24
I.11.8 Contribution à l'étude de la durabilité d'un mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier	24
Partie B : Généralités sur les déchets	25
I.1. Introduction.....	25
I.2. Caractérisation des déchets.....	25
I.3. Réutilisation des déchets	25
I.3.1 Recyclage des déchets.....	25
I.3.2 L'intérêt du recyclage	26
I.4 Les divers types de déchets	26
I.4.1 Déchets organiques (verts).....	26
I.4.2 Déchets en verre	27
I.4.3 Déchets plastiques.....	27
I.4.4 Déchets inertes.....	28
I.4.5 Déchets ultimes.....	28
I.4.6 Déchet de fin de construction.....	28
I.5 Historique du PVC	29
I.6 Définition sur le PVC.....	29
I.7 Origine du PVC.....	29
I.8 Les propriétés du PVC	30
II.8.1 Procédure pour obtenir du PVC broyer.....	31
I.9 Présentation de l'entreprise chaili.....	32
I.9.1 PVC – Société Chiali	33
I.9.2 Bénéfices du recyclage chez Chiali	33
I.9.3 Caractérisation du PVC employé par Chiali.....	33
I.10 Conclusion	34
II.1 Introduction	36

II.2 Matériaux utilisés.....	36
II.2.1 Le plâtre	36
II.2.2 Le sable	37
II.2.3 La chaux.....	37
II.2.4 Le déchet de PVC	37
II.2.5 Eau de gâchage.....	38
II.3 Propriétés physiques des matériaux.....	38
II.3.1 Propriétés physiques du plâtre	38
II.3.1.1 Masse volumique	38
II.3.2 Propriétés physiques de la chaux	38
II.3.2.1 Masse volumique	38
II.3.3 Propriétés physiques du sable et du déchet de PVC	39
II.3.3.1 Masse volumique du sable.....	39
II.3.3.2 Masse volumique du déchet de PVC	40
II.3.3.3 Propriétés physiques du polypropylène	40
II.3.3.4 Analyse granulométrique du sable et du déchet de PVC	41
II.4 Confection du mortier	42
II.4.1 Définition du mortier	42
II.4.2 Étude de la composition du mortier de plâtre	42
II.4.2.1 Détermination du rapport E/P.....	43
II.4.2.2 Détermination du rapport S/P	43
II.4.2.3 Résultats des essais d'étalement	44
II.4.2.4 Dosage de la chaux.....	44
II.4.2.5 Méthode de dosage des constituants :	44
II.4.3 Préparation des échantillons	45
II.4.4 Formulation du mortier	46
II.4.4.1 Matériels utilisés	46
II.4.4.2 Mode d'emploi	47
II.5 Préparation des blocs alvéolaire	48
II.5.1 Définition	48

II.5.2 Matériel utilisé.....	50
II.5.3 Procédure de fabrication	51
II.6 Confection des plaques en plâtre	53
II.6.1 Définition des plaques	53
II.6.2 Composition et formulation	54
II.6.3 Mode opératoire – Fabrication des plaques (25 × 25 × 2 cm ³)	54
II.6.4 Essais réalisés sur les plaques	55
II.7 Description des essais expérimentaux à réaliser	55
II.7.1 Mesure de la masse volumique	55
II.7.2 Évaluation de la dureté en surface (Shore C)	56
II.7.3 Test de flexion en traction (essai trois points)	57
II.7.4 Évaluation de la résistance à la compression.....	57
II.7.5 Test d’absorption par capillarité	58
II.7.6 Essai combiné étuve-immersion pour la réversibilité hydrique	59
II.7.7 Essai de vitesse des ultrasons (UPV)	59
II.8 Méthodologie des essais pour les blocs alvéolaires	60
II.8.1 Caractéristiques physiques et mécaniques.....	60
II.8.2 Dureté de surface (Shore C).....	61
II.8.3 Résistance à la flexion	61
II.8.4 Résistance à la compression.....	62
II.9 Essai réalisé sur les plaques	63
II.9.1 Essai d’impact	63
II.10 Conclusion.....	65
III.1 Introduction	67
III.2 Les essais réalisés sur le mortier (4*4*16) cm	67
III.2.1 Densité	67
III.2.2 Dureté superficielle (Shore C)	68
III.2.3 Résistance à la compression	70
III.2.4 Résistance à la Traction par flexion	72

III.2.5 Vitesse des Impulsions Ultrasonores (UPV) :	73
III.2.6 Absorption Capillaire	74
III.2.7 Essai d'immersion-étuve (28 jours – deux cycles).....	76
III.2.7.1 Résistance à la compression	77
III.2.7.2 Résistance à la traction par flexion	78
III.2.7.3 Essai de dureté Shore C –avant/après immersion-étuve :.....	79
III.2.7.4 Essai UPV – comparaison avant/après immersion-étuve	80
III.2.8 Conclusion	80
III.3 Les essais réalisés sur les blocs alvéolaire (33*25*8) cm.....	81
III.3.1 Essai de Densité	81
III.3.2 Essai de Dureté Shore C	83
III.3.3 Essai de Compression.....	84
III.3.4 Essai de Traction	85
III.4 Les essais réalisée sur les plaques (25*25*2) cm	86
III.4.1 Densité	86
III.4.2 Diamètre d'impact.....	87
III.4.3 Hauteur d'impact (résistance au choc).....	88
III.5. Conclusion	88
Conclusion générale	91

Résumé :

Le plâtre est considéré comme l'un des matériaux de construction les plus répandus au monde en raison de sa disponibilité, de sa facilité d'emploi et de son faible coût. Toutefois, il présente certaines limitations, notamment en matière de résistance mécanique et d'isolation acoustique, ce qui restreint son utilisation dans des applications spécifiques.

Dans ce contexte, notre étude vise à valoriser des déchets plastiques, en particulier du polychlorure de vinyle (PVC) broyé, issus de l'industrie locale, en les intégrant dans des mortiers de plâtre en substitution volumique du sable à différents taux (0 %, 40 %, 80 %, 120 %, 140 %). L'objectif est d'évaluer l'impact de ces ajouts sur les propriétés physiques, mécaniques et acoustiques des mortiers.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'incorporation du PVC permet d'alléger considérablement les mortiers, avec une réduction de poids allant jusqu'à 20 % pour un taux de remplacement de 140 %. De plus, les formulations avec 80 % de déchets et 2 % de fibres ont présenté un bon compromis entre légèreté, dureté superficielle (jusqu'à 74 Shore C) et isolation acoustique, ce qui les rend adaptées à la fabrication de blocs pour cloisons intérieures dans les bâtiments d'habitation.

Mots clés : Mortier de plâtre, PVC recyclé, déchets plastiques, résistance mécanique, isolation phonique, légèreté, dureté superficielle.

Abstract :

Plaster is considered one of the most widely used construction materials in the world due to its availability, ease of application, and low cost. However, it presents several limitations, particularly in terms of mechanical strength and sound insulation, which restrict its use in specific applications.

In this study, we aim to valorize plastic waste, specifically ground polyvinyl chloride (PVC), by incorporating it into plaster mortars as a volumetric substitute for sand at different replacement rates (0%, 40%, 80%, 120%, 140%). The objective is to evaluate the influence of these additions on the physical, mechanical, and acoustic properties of the mortar.

Experimental results showed that the incorporation of PVC significantly reduces the weight of the mortars, with up to 20% weight reduction at 140% replacement. Furthermore, formulations containing 80% PVC waste and 2% fibers demonstrated a good balance between lightness, surface hardness (up to 74 Shore C), and sound insulation, making them suitable for manufacturing blocks used in interior partition walls of residential buildings.

Keywords: Plaster mortar, recycled PVC, plastic waste, mechanical strength, sound insulation, lightweight, surface hardness.

المخلص :

يُعد الجبس من أكثر مواد البناء استخدامًا في العالم، وذلك بفضل توفره الواسع وسهولة استخدامه وتكلفته المنخفضة. إلا أنه يعاني من بعض العيوب، لا سيما من حيث المقاومة الميكانيكية والعزل الصوتي، مما يحد من استعماله في بعض التطبيقات الخاصة.

المطحونة، من خلال (PVC) تهدف هذه الدراسة إلى تثمين نفايات بلاستيكية، وتحديدًا نفايات البولي فينيل كلورايد إدماجها في ملاط الجبس كبديل للرمل بنسب مختلفة (0%، 40%، 80%، 120%، 140%). وتهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير هذه الإضافات على الخواص الفيزيائية والميكانيكية والصوتية للملاط.

يؤدي إلى تخفيف ملحوظ في وزن الملاط بنسبة قد تصل إلى PVC أظهرت النتائج التجريبية أن إدماج نفايات الـ 2% من PVC 20% عند تعويض 140% من الرمل. كما بينت التركيبات التي تحتوي على 80% من نفايات الـ والعزل الصوتي، مما يجعلها مناسبة (Shore C تصل إلى 74) الألياف توازنًا جيدًا بين الخفة والصلابة السطحية لصناعة الكتل المستعملة في الجدران الداخلية للمباني السكنية.

المعاد تدويره، النفايات البلاستيكية، المقاومة الميكانيكية، العزل الصوتي، الخفة، PVC ملاط الجبس، :الكلمات المفتاحية الصلابة السطحية

Introduction générale

Introduction générale

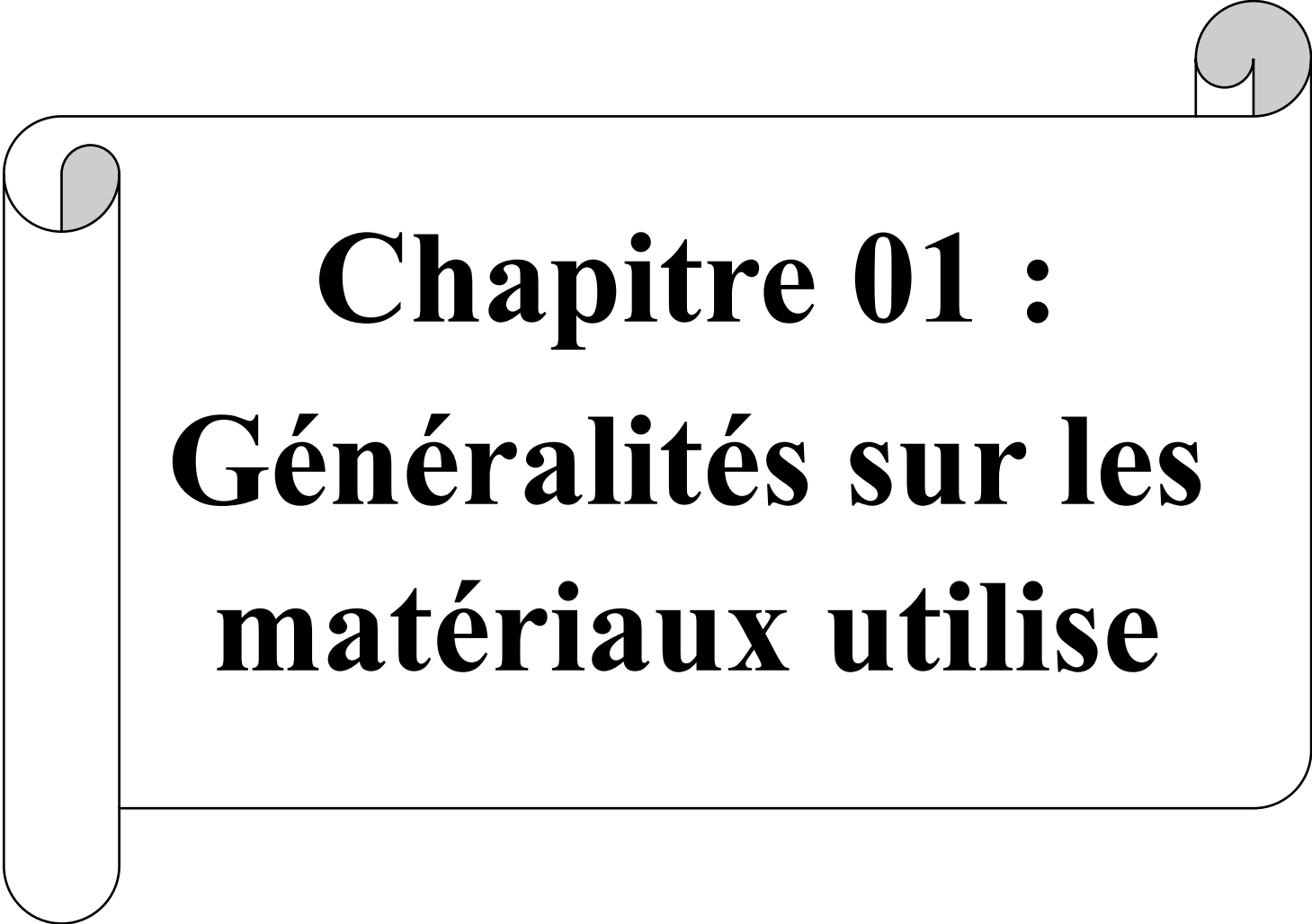
Dans un contexte de transition écologique, le secteur du bâtiment est de plus en plus sollicité pour intégrer des pratiques durables et responsables. Cela passe notamment par le développement de matériaux alternatifs permettant de limiter l'exploitation des ressources naturelles, de valoriser des déchets et de réduire l'impact environnemental global de la construction. Les matériaux composites à base de liants tels que le plâtre, associés à des ajouts biosourcés ou recyclés, représentent une solution prometteuse dans cette démarche.

Le plâtre est un matériau largement utilisé dans le monde, apprécié pour sa disponibilité, son faible coût et sa facilité de mise en œuvre. Toutefois, il reste limité par sa faible résistance mécanique et sa sensibilité à l'humidité. Afin d'améliorer ses propriétés tout en favorisant l'économie circulaire, de nombreuses recherches se sont penchées sur l'intégration de déchets plastiques et de renforts fibreux dans sa formulation.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié l'incorporation de déchets de polychlorure de vinyle (PVC) broyé, à différents taux de substitution du sable (0 %, 40 %, 80 %, 120 %, 140 %), ainsi que l'ajout de fibres de polypropylène en proportions de 1 %, 2 % et 3 %. En plus des essais réalisés sur mortier, nous avons fabriqué des blocs alvéolaires et des plaques avec des formulations spécifiques (0 %, 80 %, 140 % de PVC et 0 %, 2 % de fibres polypropylène). Ces blocs ont été conçus dans l'objectif d'une utilisation en cloisonnement intérieur, en vue d'améliorer l'isolation thermique et acoustique, de réduire le poids des éléments, tout en maintenant une résistance mécanique suffisante pour des applications non porteuses.

L'objectif de ce mémoire est donc double : d'une part, évaluer l'influence des déchets de PVC et des fibres de polypropylène sur les propriétés mécaniques, physiques et acoustiques du mortier de plâtre ; d'autre part, proposer une solution de fabrication de blocs légers destinés aux murs intérieurs, répondant aux exigences d'isolation, de durabilité et de performance.

- Le **Chapitre 1** : Présentation des caractéristiques du plâtre et revue des déchets plastiques et végétaux utilisés dans les matériaux de construction.
- **Chapitre 2** : Description de la méthodologie expérimentale, formulation des mélanges, procédés de fabrication et protocoles d'essais.
- **Chapitre 3** : Analyse et discussion des résultats obtenus sur les mortiers, blocs et plaques.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the top and bottom edges, framing the text.

Chapitre 01 : **Généralités sur les** **matériaux utilise**

Partie A : Généralités sur le plâtre

I.1 Historique

L'utilisation du plâtre remonte à la période néolithique, aux alentours de 9000 av. J.-C., époque à laquelle il était déjà couramment employé. La trace la plus ancienne connue de son usage a été retrouvée à Çatalhöyük, en Anatolie, datant d'environ 7000 av. J.-C., où du plâtre a été identifié sous forme d'enduit mural. Ce matériau a également été largement exploité par les civilisations sumérienne, assyrienne, et surtout égyptienne, notamment dans la fabrication de masques funéraires. L'un des exemples les plus anciens est celui du roi Téty, daté de 2400 av. J.-C., découvert sur le site de Saqqarah.

À l'époque moderne, l'usage du plâtre s'est fortement répandu à la suite d'un édit de Louis XIV en 1667, qui imposait son application sur les maisons à structure boisée. Cette mesure faisait suite au grand incendie de Londres de 1666, soulignant les propriétés ignifuges du plâtre.

Aujourd'hui, le plâtre est utilisé sous différentes formes : en enduits directement appliqués ou sous forme d'éléments préfabriqués tels que des carreaux ou des plaques (constituées d'une couche de plâtre entre deux feuilles de carton). Il est particulièrement apprécié en intérieur pour ses qualités isolantes (thermiques et acoustiques) ainsi que pour sa bonne résistance au feu.[1]

I.2 Définition

Le plâtre est obtenu à partir du gypse, un minéral naturel composé de sulfate de calcium di-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que l'on rencontre sous forme d'albâtre ou de cristaux de sélénite. Ce gypse est extrait principalement dans des carrières ou des mines souterraines, puis il subit une cuisson modérée, généralement entre 110 °C et 150 °C, afin d'éliminer une partie de son eau de cristallisation. Ce traitement thermique permet d'obtenir une poudre blanche : le plâtre, constitué de sulfate de calcium semi-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$).

Selon la pression de vapeur d'eau lors de la cuisson, deux formes distinctes de semi-hydrate peuvent être produites : le type α et le type β [2]. Si le gypse est chauffé à une température plus élevée, aux alentours de 290 °C, il se transforme en anhydrite (CaSO_4), une forme complètement déshydratée également appelée « plâtre surcuit ».



Figure 1 : Phase du plâtre

I.3 Applications du plâtre

Les Rencontres Régionales du Gypse et du Plâtre, organisées le 23 mai 2008 à l'Europôle de l'Arbois à Aix-en-Provence (France), ont mis en lumière l'importance majeure du plâtre dans notre société. Aujourd'hui, ses domaines d'application sont multiples et variés.

Les produits proposés par Les Industries du Plâtre, acteur national majeur détenant environ 95 % du marché, en sont une illustration concrète. Le secteur du bâtiment reste le principal utilisateur du plâtre, qu'il s'agisse de constructions neuves, de rénovations ou d'aménagements intérieurs. On le retrouve dans les revêtements muraux et de sols, les cloisons de distribution, les plafonds, la décoration, la protection contre l'incendie, la régulation de l'humidité ambiante, ainsi que dans l'isolation acoustique.

Au-delà de la construction, le plâtre trouve également sa place dans le domaine artistique, notamment pour le moulage de formes et la restauration d'œuvres d'art. Ce matériau polyvalent fait donc partie intégrante de notre quotidien.

I.4 Gypse et anhydrite

Le sulfate de calcium se trouve dans la nature principalement sous deux formes :

- **Hydratée**, avec deux molécules d'eau par molécule de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : c'est le **gypse**.
- **Anhydre**, sans eau (CaSO_4) : c'est l'**anhydrite**.

Dans certaines conditions géologiques spécifiques, il peut aussi exister sous une forme intermédiaire, hydratée avec une demi-molécule d'eau ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), appelée bassanite.

Cette forme est instable dans les conditions normales et se retrouve en très faible quantité (moins de 1 %) dans les gisements de gypse.

Le gypse et l'anhydrite peuvent également être produits comme sous-produits d'industries chimiques ou par désulfuration des fumées industrielles. Ces formes peuvent être utilisées, tout comme les gypses naturels, pour la fabrication de plâtre et de produits à base de plâtre[2]

I.4.1 Gypse naturel

Le gypse fait partie des roches évaporitiques, les plus solubles dans l'eau. Il se forme généralement par évaporation de l'eau de lagunes marines saturées en sels. Toutefois, l'origine des grands dépôts de gypse très pur (jusqu'à 18 à 20 m d'épaisseur) reste débattue. Les plus grands gisements datent des ères secondaire (Trias et Jurassique) et tertiaire (Éocène et Oligocène).[2]

I.4.1.1 Formes cristallines

Le gypse cristallise selon le **système monoclinique**, avec une structure en couches alternant entre eau et sulfate de calcium.

On distingue plusieurs formes naturelles :

- **Macrocrystallines** : gypse lamellaire, en fer de lance, lenticulaire, rose des sables.
- **Microcrystallines** : albâtre, gypse fibreux, saccharoïde, éolien.

Celui utilisé dans l'industrie du plâtre est généralement du gypse saccharoïde, une roche à grains fins. Il est rarement pur, étant souvent mélangé à des impuretés comme l'argile, le calcaire, la silice, la dolomie ou l'anhydrite. D'autres impuretés, en faibles quantités, lui donnent des teintes variées (rose, beige, gris...).

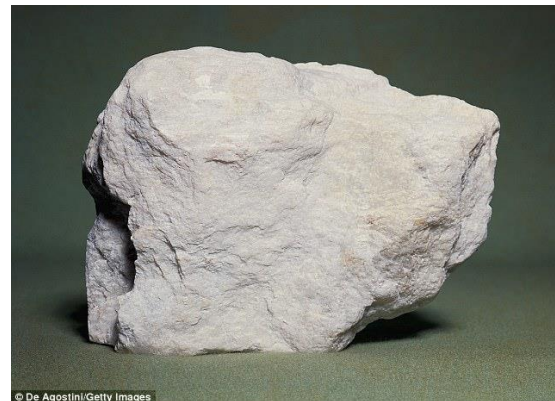


Figure 2 : Différents systèmes de cristallisation du gypse

I.4.1.2 Propriétés physico-chimiques

- **Formule chimique** : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- **Masse volumique** : 2 310 kg/m³
- **Système cristallin** : monoclinique
- **Solubilité dans l'eau (en g de CaSO_4 /kg d'eau)** :
 - à 3 °C : 1,81
 - à 20 °C : 2,04
 - à 38 °C : 2,10 (solubilité maximale)
 - à 100 °C : 1,69

Remarque : le gypse est plus soluble dans l'eau salée (comme l'eau de mer).

Dureté (échelle de Mohs) : entre 1,5 et 2, selon la face cristalline.

I.4.2 Anhydrite

L'anhydrite (CaSO_4), naturelle, se trouve dans des formations riches en gypse ou en sel, ou parfois dans certains gisements métallifères. Elle peut se former par évaporation marine, comme le gypse, ou par **déshydratation lente** de celui-ci sous haute pression lors de plissements géologiques.

En France, elle est principalement exploitée en Lorraine, notamment pour :

- **la fabrication du ciment,**
- la réalisation **de liants** pour murs de sécurité dans les anciennes mines.

Des liants à base d'anhydrite sont aussi produits en Allemagne, Grande-Bretagne, Pays-Bas et France, surtout pour les chapes de sols.

L'anhydrite chimique est issue comme sous-produit lors de la fabrication :

- de l'acide fluorhydrique (principalement),
- de l'acide phosphorique (accessoirement).

I.4.3 Gypse de synthèse

Le gypse de synthèse est issu de réactions chimiques industrielles. Ses principales origines sont :densi

- la production d'acide phosphorique (phosphogypse),
- la fabrication d'autres acides minéraux ou organiques (borogypse, fluorogypse, organogypses issus d'acides citrique, tartrique, etc.),

- la désulfuration des gaz de combustion, générant du désulfogypse (FGD gypsum ou REA Gips), très courant dans les centrales thermiques.

Chaque année, d'importantes quantités de phosphogypse et de désulfogypse sont produites dans le monde. Face aux contraintes environnementales et à l'urbanisation croissante, l'exploitation du gypse naturel devient de plus en plus difficile, notamment en Île-de-France où la majorité des réserves sont inaccessibles.

C'est pourquoi l'usage de gypses de synthèse constitue une alternative intéressante pour l'industrie du plâtre.

Cependant, des tentatives d'utilisation du phosphogypse dans les années 1960-1970 ont été progressivement abandonnées, en raison :

- du coût élevé de purification des impuretés issues des phosphates naturels,
- de sa teneur élevée en humidité (17,5 à 25 %), nécessitant un séchage plus intense que pour le gypse naturel, qui contient peu d'eau.

I.5 Fabrication du plâtre à partir de gypse naturel

La production du plâtre à partir de gypse naturel se déroule en trois grandes étapes :

I.5.1 Extraction et préparation du gypse

Le gypse est extrait soit à ciel ouvert, soit en galeries souterraines :

- **Extraction souterraine** : Utilisée lorsque la couche de recouvrement est épaisse (plus de cinq fois l'épaisseur du gypse) ou lorsque le gisement se trouve sous une zone protégée. L'exploitation se fait alors selon la méthode des chambres et piliers abandonnés. Toutefois, cette technique est de moins en moins utilisée, car elle nécessite souvent de laisser une partie importante du gypse en place.
- **Extraction à ciel ouvert** : Cette méthode permet de récupérer la totalité du gypse, mais elle est plus sensible aux conditions météorologiques (accès difficile, humidité du matériau).

Une fois extrait, le gypse est concassé et criblé en fonction du procédé de cuisson prévu. Il peut également être séché dans des tambours rotatifs. Des stocks sont constitués pour garantir un approvisionnement continu des unités de cuisson.[3]



Figure 3: L'extraction du gypse à ciel ouvert et souterraine

1.5.2 Concassage et calibrage

Le concassage (voir Fig. 4) réduit les blocs de gypse en fragments plus petits, Généralement inférieurs à 100 mm. Ces fragments peuvent alors être transportés facilement, notamment par bandes, vers l'usine de transformation.



Figure 4: Concassage du gypse

1.5.3 Cuisson

La cuisson du gypse peut se faire selon deux procédés :



Figure 5: Four de cuisson du gypse

- **En voie sèche**, pour la production du plâtre bêta.
- **En voie humide (voir Fig. 5)**, pour la production du plâtre alpha.

I.5.4 Élaboration des produits finis

Après cuisson, le gypse est broyé puis mélangé à divers adjuvants. Ces derniers permettent de modifier les propriétés du plâtre final (temps de prise, expansion, fluidité, etc.) afin de répondre aux exigences spécifiques des clients. En parallèle, des contrôles réguliers sont réalisés dès l'extraction pour vérifier l'humidité et la pureté du gypse. Ces analyses orientent les réglages des étapes de cuisson, de broyage et de mélange, garantissant ainsi une qualité constante des produits finis commercialisés.[3]

I.6 Principales propriétés du plâtre

I.6.1 La prise du plâtre

Lorsque de l'eau est ajoutée au plâtre, les formes semi-hydratée (hémihydrate) et anhydre du sulfate de calcium se dissolvent. Ce processus déclenche la réaction de cristallisation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui marque le début de la prise.

La réaction chimique peut être représentée comme suit :



Ce phénomène résulte principalement de la différence de solubilité entre l'hémihydrate et le dihydrate. À 20°C, l'hémihydrate a une solubilité d'environ **9 g/L**, tandis que celle du dihydrate (gypse) est nettement plus faible, autour de **2 g/L**. Ainsi, en présence d'eau, l'hémihydrate se dissout, ce qui crée une solution saturée. Le dihydrate précipite alors, entraînant la sursaturation en ions sulfate et la formation de nouveaux cristaux de gypse – ce qui provoque le durcissement du matériau.

En pratique, environ **95 % de l'hémihydrate** est converti en gypse en **30 minutes**, et la réaction est généralement complète en moins de deux heures.

Bien que la quantité théorique d'eau nécessaire soit **de 36 g pour 145 g de plâtre**, une quantité bien plus importante (**jusqu'à 4 à 5 fois plus**) est utilisée afin d'obtenir une pâte suffisamment fluide et maniable.

Tableau 1: Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate

Propriétés	Semi-Hydrate α	Semi-Hydrate β
Masse volumique (Kg/m ³)	2,76 .10 ³	2,63 .10 ³
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 de CaSO ₄ pour 100 cm ³)	0,63	0,74

La vitesse de prise peut être ajustée à l'aide de différents additifs :

- a) **Accélérateurs** : Utilisés principalement dans la fabrication d'éléments préfabriqués, ils réduisent le temps de durcissement. Parmi eux, on trouve le gypse finement moulu issu du recyclage, qui fournit de nombreux points de cristallisation, ainsi que les ions sulfatés, qui favorisent la précipitation.
- b) **Retardateurs** : Pour ralentir la prise, on peut utiliser des phosphates alcalins, des acides organiques ou leurs sels, comme l'acide citrique ou les citrates.

1.6.2 Durcissement

Le processus de durcissement comporte trois phases :

- Dissolution des produits du semi-hydrate de Calcium,
- L'hydratation du semi-hydrate aboutissant à la formation du double hydrate de

Calcium,

- La cristallisation de double l'hydrate

1.6.3 Isolation thermique et régulation de l'humidité

Grâce à sa faible conductivité thermique, le plâtre est un bon isolant. Il peut être utilisé seul ou en combinaison avec d'autres matériaux pour améliorer l'isolation des parois. Appliqué sous forme d'enduit sur des murs en béton ou en terre cuite, il forme une couche continue qui limite les déperditions de chaleur. Certains types de plâtres dits "spéciaux" sont enrichis d'agréments légers qui renforcent encore davantage leurs performances thermiques.

1.6.4 Gestion de l'humidité intérieure

Le plâtre étant un matériau poreux, il participe aux échanges d'humidité avec l'environnement intérieur. Même lorsqu'il est recouvert de peinture, de papier peint ou de tissu, ces revêtements restent en grande partie perméables à la vapeur d'eau, à l'exception des finitions imperméables comme les peintures laquées ou les revêtements plastiques utilisés dans les pièces humides.

Ainsi, le plâtre joue un rôle dans la régulation de l'hygrométrie des espaces intérieurs. Il peut aussi être utilisé pour améliorer les performances isolantes d'un mur existant, notamment en doublage, ou dans la construction de cloisons à haut rendement acoustique. L'efficacité d'un doublage est généralement renforcée lorsque les deux parois possèdent des masses et des épaisseurs différentes, séparées par une lame d'air, éventuellement complétée par un isolant.

1.6.5 Isolation acoustique

Sur le plan acoustique, le plâtre suit les principes généraux de la transmission du son. La géométrie des pièces et la nature des matériaux influencent fortement la propagation sonore. Toutefois, la capacité du plâtre à être moulé et préfabriqué en éléments variés, y compris décoratifs, permet de concevoir des surfaces aux formes capables de limiter les réflexions sonores excessives. Il est ainsi possible de créer des panneaux ou structures en plâtre qui atténuent efficacement les nuisances sonores dans un espace donné.

1.6.6 Correction acoustique

À l'intérieur d'une pièce, le son se propage aussi par réflexions successives sur les parois c'est le phénomène de réverbération. Grâce à sa capacité à être façonné en éléments complexes, le plâtre permet la conception de solutions architecturales qui atténuent ces effets. Par ailleurs, en cas d'incendie, le plâtre ne dégage ni fumée toxique, ni gaz corrosifs ou asphyxiants, ce qui en fait un matériau sûr sur le plan sanitaire et environnemental.

1.6.7 Résistance au feu

Le plâtre se distingue par sa très bonne tenue au feu, propriété reconnue depuis l'Antiquité. Il peut jouer un rôle protecteur en remplissant les espaces entre les éléments de construction, formant ainsi une barrière efficace contre les flammes. Cette protection peut également être assurée par des enduits projetés à base de plâtre spécialement formulé

pour résister au feu, ou encore par des enduits traditionnels renforcés à l'aide d'une armature légère solidement fixée à la structure.[3]

I.7 Propriétés mécanique et mise en œuvre du plâtre

Le plâtre peut être utilisé dans le génie civil sous forme de pâte pure, en mortier ou en blocs

I.7.1 Pâte pure de plâtre

Contrairement au ciment, la pâte de plâtre pure est obtenue par saupoudrage de la poudre de plâtre dans l'eau jusqu'à saturation de celle-ci. Le taux de gâchage à saturation est le rapport du poids de l'eau utilisée pour la mise en œuvre du plâtre sur le poids de celui-ci et il est déterminé selon la norme (NF B12-401)[4].

I.7.1.1 Propriétés de la pâte pure

Les courbes ci-dessous donnent l'influence du rapport E/P sur la densité et sur la résistance mécanique de la pâte pure du plâtre.[5]

a) La densité

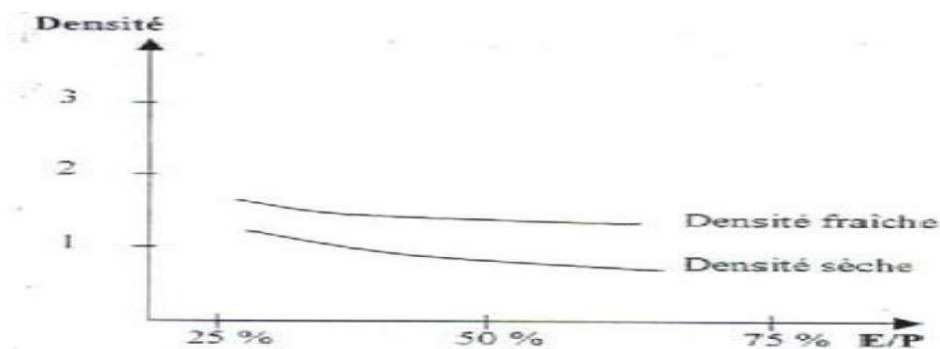


Figure 6: Influence du rapport E/P sur la densité [5].

b) Les résistances mécaniques

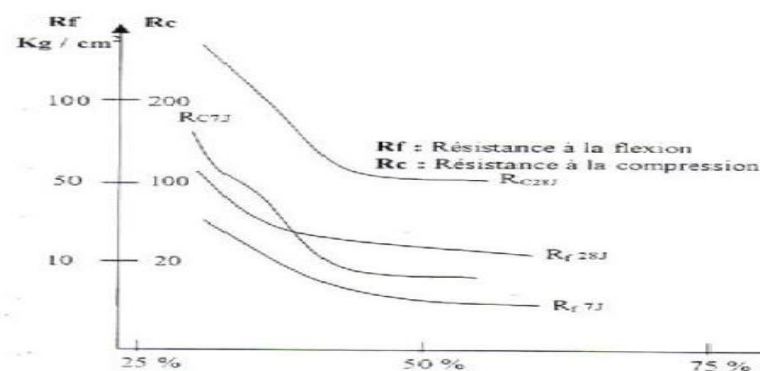


Figure 7 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques[5].

On remarque que le rapport E/P influe directement sur les propriétés de produit résultant où lorsque le rapport E/P élevé provoque une porosité élevée. Le matériau devient moins dense d'où une chute sur les résistances mécaniques.

Selon [6] pour l'obtention une meilleure ouvrabilité et une résistance satisfaisante, recommande l'utilisation d'un rapport E/P= 0,6.

I.8 L'utilisation de plâtre :

I.8.1 L'utilisation du plâtre comme enduit

Le plâtre est particulièrement apprécié pour sa capacité à réguler l'humidité dans une construction. Grâce à sa porosité, il permet des échanges efficaces entre l'air intérieur et extérieur. Ainsi, en cas d'humidité excessive, le plâtre absorbe naturellement l'excédent, puis le libère lorsque l'air ambiant devient plus sec.

En plus de ses propriétés hygrométriques, le plâtre offre une bonne isolation thermique. Lorsqu'il est appliqué comme revêtement mural, il contribue au maintien d'une température intérieure stable.

Ces qualités font du plâtre un matériau de choix pour les enduits, notamment pour la protection des murs extérieurs.[7]

I.8.2 La fabrication de cloisons

Le plâtre présente également de nombreux avantages sur le plan environnemental :

- C'est un matériau naturel ;
- Il contribue à améliorer la qualité de l'air intérieur ;
- Il est entièrement recyclable.

Ces caractéristiques en font une solution idéale pour l'aménagement intérieur. Depuis plusieurs décennies, des plaques de plâtre associées à des matériaux isolants comme le polystyrène sont couramment utilisées pour réaliser des cloisons. Elles permettent de séparer les espaces tout en assurant une isolation thermique et acoustique efficace.

I.8.3 La réalisation de plafonds et faux plafonds

Le plâtre est aussi largement utilisé pour la création de plafonds et de faux plafonds. Les artisans emploient généralement des plaques prêtes à poser, qu'ils fixent sur des structures métalliques ou en bois.

Sous forme de poudre ou de pâte à mélanger, le plâtre peut également servir à corriger les défauts ou irrégularités sur les surfaces, notamment les façades.

I.8.4 Blocs en plâtre et préfabrication des murs

I.8.4.1 Introduction

L'usage du plâtre dans les éléments préfabriqués est en constante évolution, notamment grâce à ses propriétés mécaniques, son faible coût et sa facilité de mise en œuvre. Les blocs et panneaux en plâtre permettent de répondre aux exigences de la construction moderne en matière de rapidité, de durabilité et de performance thermique et acoustique[8].

I.8.4.2 Types de blocs en plâtre

Les blocs ou carreaux de plâtre sont des éléments modulaires, fabriqués à base de plâtre moulé. On distingue principalement :

- **Les blocs pleins** : utilisés pour des cloisons robustes et acoustiques.
- **Les blocs alvéolés** : plus légers, ils facilitent le transport et la pose.
- **Les blocs hydrofuges** : destinés aux pièces humides.
- **Les blocs coupe-feu** : renforcés pour la résistance au feu.
- **Les blocs décoratifs et techniques** : intégrant des fibres ou des matériaux recyclés.

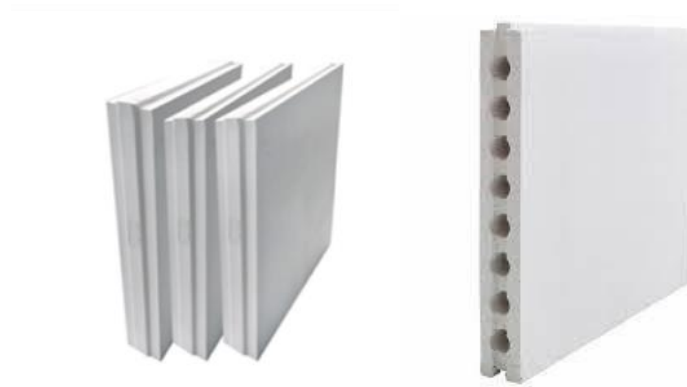


Figure 8: Blocs pleins et alvéolés

Ces blocs sont emboîtables (système rainure-langue), ce qui permet une mise en œuvre rapide et précise sur chantier [9].

I.8.4.3 La préfabrication des murs en plâtre

La préfabrication consiste à produire des panneaux ou modules muraux en usine à partir de plâtre coulé dans des moules spécifiques, parfois avec des renforts en fibres de verre, métal ou polymères.

Avantages :

- **Gain de temps:** réduction du délai de chantier.
- **Qualité contrôlée:** production en environnement maîtrisé.
- **Performance thermique et acoustique:** possibilité d'intégrer des isolants.
- **Personnalisation:** finitions, dimensions et intégration de réseaux (gaines électriques ou hydrauliques).

Exemples :

- Panneaux sandwich avec âme isolante (polystyrène, laine de roche).
- Modules autoportants utilisés dans la construction modulaire (logements, bureaux, écoles).
- Panneaux décoratifs préfinis, directement peints ou revêtus [10].

I.8.4.4 Applications

- Cloisons intérieures dans les bâtiments résidentiels et tertiaires.
- Murs techniques dans les hôpitaux, hôtels ou ERP (établissements recevant du public).
- Construction modulaire avec assemblage de murs en atelier puis montage sur site[11]

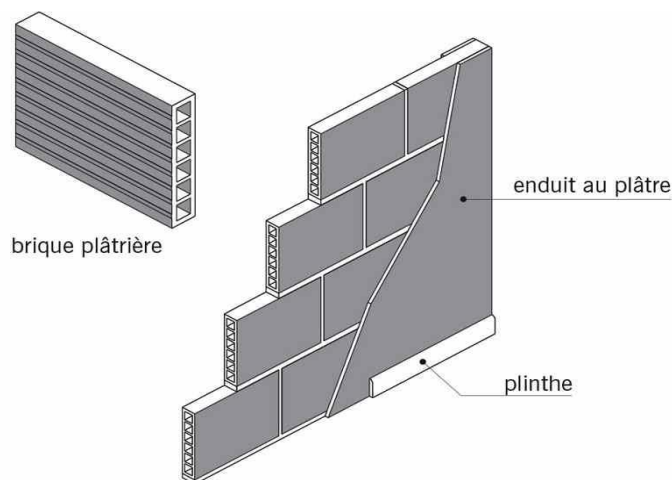


Figure 9: Cloison intérieure

I.8.4.5 Perspectives

L'intégration de déchets recyclés (ex. : PVC broyé, fibres végétales) dans la fabrication des blocs en plâtre offre des perspectives intéressantes en matière de durabilité et d'économie circulaire. Par ailleurs, la numérisation (BIM, impression 3D) permet de pousser encore plus loin la personnalisation et l'optimisation des systèmes préfabriqués en plâtre[8]

I.9. Les fibres

Les fibres sont des éléments discontinus, de forme généralement cylindrique, dont la nature, le diamètre et la longueur peuvent varier. Elles sont incorporées dans une matrice, soit de manière aléatoire, soit avec une orientation préférentielle selon les exigences de l'application.

En plus de leur utilisation dans les matériaux composites, les fibres constituent l'unité de base des structures textiles. On distingue deux grandes catégories de fibres selon leur longueur :

- **Les fibres courtes**, ou fibres discontinues, mesurant généralement entre 20 et 150 mm
- **Les filaments continus**, qui présentent une grande longueur.

Il existe une grande diversité de fibres, différenciées par :

- **leur origine** (naturelle, artificielle ou synthétique),
- **leur forme** (droite, ondulée, en aiguille, etc.),
- **leur taille** (macrofibres ou microfibres),
- **et leurs propriétés mécaniques.**

Le choix d'un type de fibre pour une application donnée dépend de sa compatibilité avec la matrice ainsi que du mode de sollicitation du composite envisagé.

1.10 Les types de fibres

Le marché offre un large éventail de fibres classées en différentes familles. Le choix de la fibre à utiliser est crucial, car chaque type possède des caractéristiques spécifiques qui le rendent plus ou moins adapté à un usage particulier.[12]

Le type de fibre sélectionné aura un impact direct sur les performances du matériau composite, notamment en ce qui concerne :

- La densité,
- La résistance à la traction et à la compression,
- La résistance aux chocs et à la fatigue,
- Le module d'élasticité,
- Les conductivités thermique et électrique,
- La stabilité dimensionnelle,
- La résistance aux conditions environnementales et bien sûr, le coût.



Figure 10: Différentes type de fibres[12]

Les fibres utilisées dans les matériaux composites ou les structures renforcées se distinguent par leur origine. Elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- **Fibres naturelles d'origine minérale ou végétale** : par exemple, l'amiante ou la cellulose ;
- **Fibres synthétiques d'origine minérale** : comme les fibres de verre, de carbone ou les fibres métalliques ;
- **Fibres synthétiques d'origine organique** : telles que les polyamides, le polypropylène, les fibres acryliques, le Kevlar ou encore les fibres d'aramide.

La fibre de polypropylène (PP) est une fibre synthétique issue de la polymérisation du monomère de propylène, un dérivé pétrochimique. Elle appartient à la famille des

polyoléfinés et est largement utilisée dans de nombreux domaines industriels, notamment dans le secteur du bâtiment pour le renforcement des matériaux cimentaires. Les fibres PP utilisées dans les mortiers sont généralement de type mono filament ou fibrillé, avec des longueurs variantes entre 3 mm et 20 mm, selon l'application souhaitée .[12]

1.10.1 Nature et origine du polypropylène (PP)

- Ces déchets sont broyés ou coupés en fibres pour être intégrés dans des composites à base de plâtre.
- Cela constitue une approche écoresponsable, valorisant des matériaux non biodégradables.

1.10.2 Effets sur les composites à base de plâtre

Améliorations apportées par le PP :

- Diminution significative de l'absorption d'eau (jusqu'à -37 % avec 10 % de PP)

→ Très bénéfique pour les applications en zones humides.

- Amélioration de la résistance à l'humidité et résilience après cycles de mouillage-séchage.
- Amélioration locale de la compacité (à faibles dosages, ex. 2,5 %) grâce à une meilleure distribution granulométrique[13].

1.10.3 Effets négatifs à surveiller

Baisse modérée de la résistance mécanique (surtout à la flexion) avec des taux élevés.

→ À cause de la faible interaction chimique entre la matrice de plâtre et le PP (zone de transition interfaciale ITZ).

1.10.4 Intérêt environnemental

- Réduction des déchets plastiques.
- Production de **matériaux plus durables et légers** pour des applications non porteuses comme **les plaques de faux plafond ou les éléments de cloisonnement**[13].

I.11 Les différents travaux réalisés sur le plâtre

I.11.1 Investigation expérimentale d'un nouveau bloc écologique fabriqué par mélange de plâtre et de sable désertique

Cette étude expérimentale porte sur le développement de blocs écologiques à base de mortier composite constitué de plâtre et de sable désertique. Plusieurs proportions de sable ont été testées pour analyser leur influence sur les propriétés physiques et mécaniques des mélanges, telles que la densité, l'absorption et la résistance à la compression. Les résultats montrent que l'ajout de sable améliore les caractéristiques du mortier, notamment en augmentant la densité et en réduisant l'absorption. Un mélange optimal composé de 50 % de sable et 50 % de plâtre a été identifié, offrant une résistance comparable à celle du plâtre pur. Les blocs fabriqués avec ce mélange sont légers, isolants, présentent une bonne surface et conviennent parfaitement à la construction de cloisons intérieures, alliant ainsi performance et respect de l'environnement.[14]



Figure 11: Différents éprouvettes réalisées[14]

I.11.2 Investigation expérimentale d'un nouveau modèle de blocs isolants en plâtre de gypse

Les matériaux de construction écologiques constituent une alternative aux matériaux classiques, offrant de nombreux avantages environnementaux. Cette étude consiste en une investigation expérimentale d'un nouveau type de blocs en plâtre de gypse. Dans un premier temps, un mélange de plâtre de gypse et d'eau a été préparé. La composition optimale du mélange a été déterminée en fonction des propriétés mécaniques et physiques, telles que l'absorption d'eau, la température d'hydratation, la densité, et la résistance à la compression de différents mélanges de plâtre et d'eau réalisés en variant la dose d'eau.

La seconde partie de cette étude vise à étudier un nouveau design de blocs écologiques préparés à partir du mélange optimal d'eau et de plâtre de gypse. Ces nouveaux blocs sont perforés afin de les alléger et de réduire leur conductivité thermique, dans le but de les rendre plus isolants. Des essais expérimentaux ont été réalisés sur les prototypes de blocs,

incluant la mesure des tolérances dimensionnelles, la résistance à la compression, la densité, la planéité, l'absorption d'eau, l'humidité résiduelle, la dureté de surface, et la conductivité thermique.

Les résultats expérimentaux montrent que ces nouveaux blocs présentent une très faible densité et une résistance à la compression suffisante pour la construction de murs. De plus, leur procédé de fabrication est très simple et rapide. Enfin, les propriétés physiques et mécaniques obtenues confèrent à ces blocs en plâtre de gypse un potentiel d'utilisation pour la construction de cloisons intérieures.[15]

I.11.3 Fabrication et propriétés de produits à base de plâtre incorporant des matériaux recyclés de bois et de caoutchouc

Une étude expérimentale a été menée sur la fabrication de produits à base de plâtre (échantillons cylindriques et briques pleines) contenant des fractions de copeaux de bois et de particules de caoutchouc recyclés. Les matériaux ont été mélangés au plâtre et à l'eau dans différentes proportions, puis moulés et séchés à l'air libre.[16]

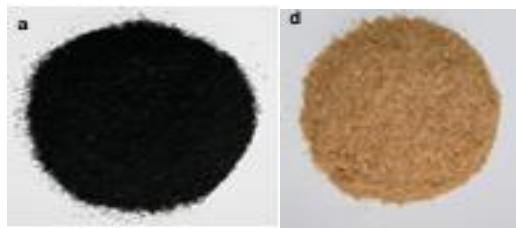


Figure 12: Agrégats du caoutchouc et copeaux de bois[16]

Les meilleurs résultats mécaniques ont été obtenus avec des particules grossières, tant pour le bois que le caoutchouc, à condition que leur proportion ne dépasse pas 25 %. La conductivité thermique n'a pas varié de manière significative selon la nature ou la taille des particules. Les échantillons à particules fines (25 %) ont montré une absorption acoustique similaire.



Figure 13: Briques pleines à base de plâtre avec six trous ronds symétriques, mesurant $85 \times 55 \times 185 \text{ mm}^3$ [17]

Les briques pleines présentaient une résistance légèrement supérieure lorsque la charge était appliquée sur leur grande face latérale. Elles offraient également une isolation thermique meilleure que les briques classiques, mais inférieure à celle des briques isolantes. Les émissions de COV restaient conformes aux normes réglementaires[17].

I.11.4 Caractérisation mécanique de blocs de plâtre incorporant des matériaux recyclés

Cette étude évalue l'intégration de déchets de construction et démolition (céramique, béton et polystyrène expansé) dans une matrice de plâtre pour fabriquer des enduits ou éléments préfabriqués pour cloisons intérieures. Des échantillons de plâtre ont été élaborés avec différentes proportions de ces déchets (25 %, 50 % et 75 %), puis testés pour leurs propriétés physiques et mécaniques (densité, résistance, absorption, conductivité thermique). Les formulations les plus performantes ont été allégées en remplaçant partiellement les déchets minéraux par du polystyrène expansé [18]

Un bloc de plâtre en configuration sandwich ($40 \times 20 \times 10$ cm) a été réalisé et testé avec succès. Les résultats montrent que l'ajout de ces déchets améliore les performances du plâtre tout en réduisant l'impact environnemental, grâce à la réutilisation de matières résiduelles.[18]



Figure 14: État et fissures du bloc après le test de compression

I.11.5 Prototype de blocs alvéolaires en plâtre avec ajout de déchets plastiques pour cloisons : évaluation physico-mécanique, de la résistance à l'eau et du cycle de vie

Face aux enjeux environnementaux croissants, le secteur du bâtiment s'oriente vers des matériaux plus durables, intégrant des déchets en substitution partielle aux matières premières traditionnelles. Cette étude propose un prototype de bloc alvéolaire en plâtre destiné aux cloisons intérieures, dans lequel le liant (plâtre ou ciment) est partiellement remplacé par deux types de déchets plastiques : **le polypropylène et le nylon.**

Deux formulations optimisées issues de recherches antérieures (**7,5 % de polypropylène et 2,5 % de nylon en poids**) ont été comparées à un bloc de référence. Les performances physiques, mécaniques (**masse volumique, dureté de surface, résistances en flexion et en compression**), thermiques et d'étanchéité à l'eau ont été évaluées. Une analyse environnementale simplifiée, centrée sur le potentiel de réchauffement climatique et l'énergie incorporée, a également été réalisée.

Les résultats montrent une amélioration notable des performances mécaniques, en particulier avec les fibres de nylon. On observe aussi une baisse significative de la conductivité thermique et de la perméabilité à l'eau. Enfin, l'utilisation de déchets permet une légère réduction de l'impact environnemental, grâce à la diminution de la quantité de plâtre utilisée[19].



Figure 15: Bloc alvéolaire

I.11.6 Contribution à l'étude des matériaux composites plâtre/déchets

L'étude menée par Ben Youbi et Hammoumi (2020) porte sur le renforcement du plâtre à l'aide de fibres plastiques récupérées à partir de déchets de sacs de plâtre de la marque KNAUF. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de différents teneurs en fibres (comprises entre 0 % et 2 %, pour une longueur de 12 mm) sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites à base de plâtre[20].

Les résultats ont montré que l'ajout de fibres plastiques tend à réduire la résistance à la flexion et à la compression, ce qui est attribué à la géométrie des fibres et à leur orientation aléatoire dans la matrice. Cette réduction de performance mécanique serait également liée à l'augmentation de la porosité dans les mélanges. En revanche, l'absorption d'eau diminue légèrement avec l'incorporation de fibres, et les meilleurs résultats ont été observés pour une teneur de 0,5 %. Enfin, une légère augmentation de la conductivité thermique a été notée avec l'ajout de fibres.[20]

I.11.7 Contribution à l'étude des matériaux composites biosourcés à base de plâtre

Ce travail s'inscrit dans la continuité des recherches menées par Chaouche et Akaf, dans une démarche de valorisation de déchets issus de l'industrie oléicole locale, à travers leur incorporation dans des mortiers de plâtre en remplacement volumique du sable à différents taux (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %). L'objectif est d'évaluer l'effet de cette substitution sur les propriétés physiques, mécaniques et acoustiques des mortiers. Les résultats expérimentaux montrent que l'ajout de grignons d'olive permet d'alléger les mortiers, avec une réduction de masse atteignant 16 % pour un taux de remplacement de 100 %. Par ailleurs, le mortier contenant 25 % de déchet présente une dureté superficielle Shore C de 76 ainsi qu'une bonne performance en isolation phonique, ce qui en fait un candidat prometteur pour une utilisation dans les bâtiments résidentiels.[21]

I.11.8 Contribution à l'étude de la durabilité d'un mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier

L'objectif principal de cette étude est de valoriser l'utilisation de matériaux locaux tels que le plâtre, le sable de dunes et les fibres de palmier dattier, tout en améliorant leurs propriétés mécaniques, physiques et leur durabilité. Dans leurs travaux, Rachedi et ses collaborateurs ont d'abord fixé la longueur des fibres de palmier dattier à 10 mm, en les incorporant au mortier selon différents pourcentages (0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 %). Ils ont constaté que le taux de 1,5 % de fibres offrait les meilleures performances. Ensuite, en maintenant ce pourcentage optimal (1,5 %), ils ont fait varier la longueur des fibres de 10 à 40 mm. Les résultats ont montré qu'une longueur de 20 mm produisait les performances les plus satisfaisantes. L'étude conclut que les mortiers renforcés par des fibres végétales présentent de très bonnes propriétés physiques, ce qui ouvre la voie à leur utilisation dans divers domaines de la construction, notamment pour la fabrication de plaques murales préfabriquées, de murs porteurs ou de revêtements de façades[22].

Partie B : Généralités sur les déchets

I.1. Introduction

Les déchets comprennent divers matériaux en fin de vie, tels que les papiers, les restes alimentaires, les substances radioactives, les produits chimiques, les huiles de moteur et les emballages, représentant ainsi tous les résidus laissés sur place. L'augmentation significative de la population mondiale, le développement industriel et les avancées technologiques ont entraîné une accumulation de déchets, posant un risque pour l'environnement, la santé et la sécurité des individus. Cela nécessite l'engagement de chaque individu, organisation et gouvernement pour remédier à cette situation. Le développement économique et industriel des dernières décennies, associé à la nécessité de protéger l'environnement, a encouragé l'adoption de nouveaux matériaux en raison de leurs performances physiques et chimiques. Ces matériaux présentent des caractéristiques très différentes de celles des matériaux de construction traditionnels tels que le béton et le métal. Il est donc essentiel de comprendre leurs propriétés mécaniques et leur évolution dans le temps pour garantir leur efficacité dans ces nouvelles applications[20].

I.2. Caractérisation des déchets

Les déchets se caractérisent actuellement par une variété de dimensions et sont définis de manière différente selon le secteur et le point de vue choisi (économique, environnemental, sociétal, etc.).[23]

Les déchets sont définis comme l'ensemble des substances qui n'ont plus de valeur ou d'utilité.[24]

I.3. Réutilisation des déchets

La réutilisation comprend l'ensemble des actions visant à offrir une nouvelle vie aux déchets, qu'elles soient obligatoires ou non un traitement ou une transformation préalable : réemploi, recyclage, réintégration dans le cycle de production, etc. En revanche, le traitement fait référence à toute opération de valorisation ou d'élimination impliquant la préparation préalable des déchets[25]

I.3.1 Recyclage des déchets

Le recyclage des déchets se réfère à la réintégration de matériaux dans le cycle de production, notamment leur accumulation dans les déchets. Ces matériaux sont ensuite

transformés en produits ou en matières pour leur usage original, ou pour d'autres applications qui ne relèvent pas du recyclage traditionnel, comme la valorisation énergétique, la réutilisation des déchets de construction et les activités de remblayage.

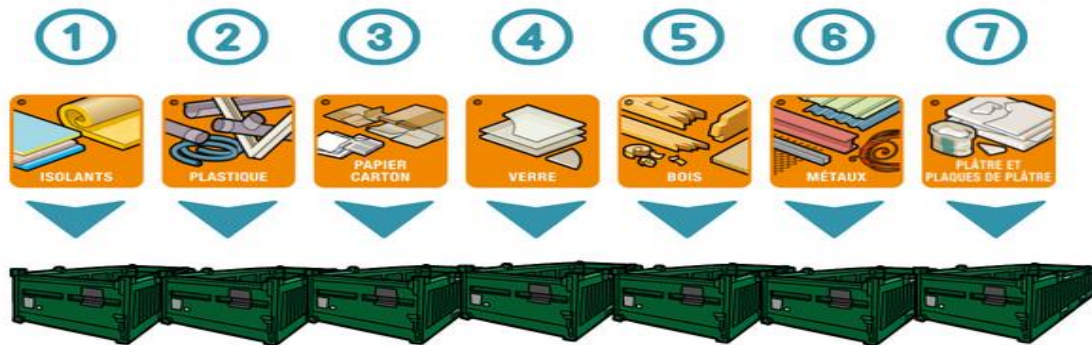


Figure 16: Tri sélectif des déchets.

I.3.2 L'intérêt du recyclage

Il réduit la production de déchets, qui peuvent être convertis en matières premières secondaires, ce qui diminue la pression sur les ressources naturelles. La croissance actuelle du recyclage est le résultat de plusieurs éléments, tels que la consommation continue de ressources, leur épuisement progressif, ainsi que la dépendance à l'approvisionnement de nos pays, sans omettre les impacts environnementaux notables qui impliquent l'exploitation de ces ressources [26]

I.4 Les divers types de déchets

I.4.1 Déchets organiques (verts)

Ces déchets proviennent des résidus générés par l'entretien des espaces verts. En agriculture, ils sont généralement compostés, bien qu'ils puissent également être utilisés sous forme broyée, sans passer par le compostage. Les sources de déchets organiques sont variées : feuilles mortes, tontes de gazon, tailles de haies et d'arbustes, résidus d'élagage, déchets de jardin collectés séparément, déchets de fleurissement, ainsi que plantes et fleurs fanées, et déchets de potager [27]



Figure 17 : Projet de valorisation des déchets organiques

I.4.2 Déchets en verre

Ce terme englobe tous les déchets constitués de verre, tels que les bouteilles. Le verre est une matière première de haute pureté pour la fabrication de nouveau verre, car il peut être réutilisé sans perte de qualité. Cette réutilisation permet de diminuer les déchets ainsi que la consommation de matières premières et d'énergie. De plus, la réutilisation des bouteilles engendre des économies significatives en énergie et en matières premières.



Figure 18: Processus de recyclage du verre

I.4.3 Déchets plastiques

Le plastique est omniprésent et pose un danger, se retrouvant dans nos foyers, à l'extérieur et même sur les lieux de travail. Il représente une menace considérable pour la nature et l'environnement, ainsi que pour de nombreuses espèces animales, constituant ainsi un risque pour l'ensemble de la planète.



Figure 19: Impact des déchets plastiques sur l'environnement

I.4.4 Déchets inertes

Les déchets inertes ne présentent pas de danger pour l'environnement, ne se décomposent pas, ne brûlent pas et n'engendrent aucune réaction physique ou chimique nuisible. Parmi les déchets inertes, on trouve des pavés, du sable, des granulats, des tuiles, du béton et du dallage. Ils proviennent de diverses sources : chantiers de démolition, réhabilitation, construction, entretien des ouvrages existants, travaux publics, mines et carrières, etc.

I.4.5 Déchets ultimes

Les déchets ultimes désignent des résidus qui ne peuvent être ni recyclés ni valorisés énergétiquement, et qui ne sont plus considérés comme économiquement traitables à l'heure actuelle.

I.4.6 Déchet de fin de construction

Les déchets de fin de construction englobent tous les résidus produits lors des travaux de construction, incluant les déchets inertes et les déchets industriels non dangereux, tels que les déchets industriels spéciaux (D.I.S).[28]

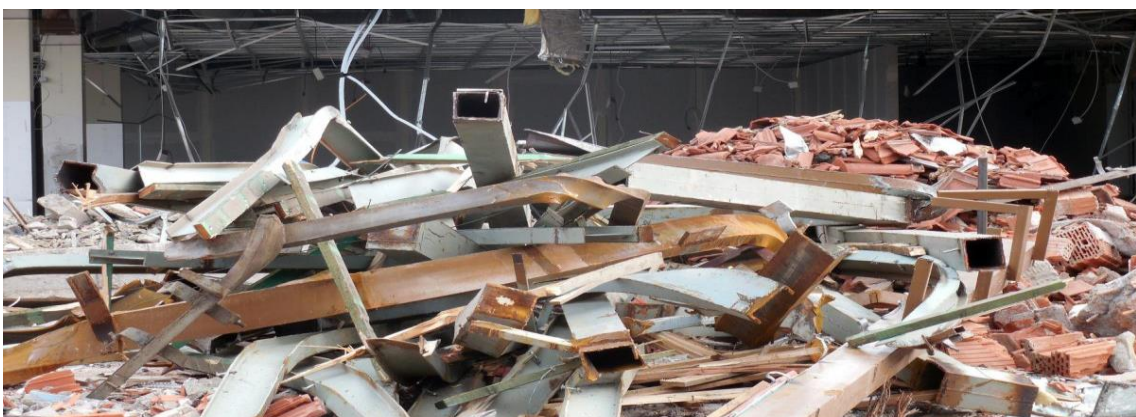


Figure 20: Déchets de démolition

I.5 Historique du PVC

Le polychlorure de vinyle a été découvert par accident à au moins deux occasions au cours du XIXe siècle, d'abord en 1835 par Henri Victor Regnault et en 1872 par Eugen Baumann. Dans les deux cas, le polymère est apparu comme un solide blanc dans des bouteilles de chlorure de vinyle après exposition à la lumière solaire.[29]

Au début du XXe siècle, les chimistes russes Ivan Ostromislensky et Fritz Klatte ont tous deux tenté d'utiliser le PVC dans des produits commerciaux, mais leurs efforts ne furent pas couronnés de succès à cause des difficultés de transformation du polymère. En 1926, Waldo Semon, en collaboration avec la société B.F. Goodrich, a développé une méthode de plastification du PVC en le mélangeant avec des additifs.[30] Ceci a permis de rendre le matériau plus flexible et plus facile à fabriquer, genèse du succès commercial du PVC.

I.6 Définition sur le PVC

Le PVC est un polymère synthétique, de formule $-(\text{CH}_2 - \text{CHCl})_n$ (figure 16), obtenu par polymérisation radicalaire (réaction en chaîne) du chlorure de vinyle monomère (CVM) $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ [31]

Une molécule de PVC contient 750 à 1500 monomères. Au cours de sa fabrication, des additifs sont incorporés afin d'optimiser certaines de ses caractéristiques.

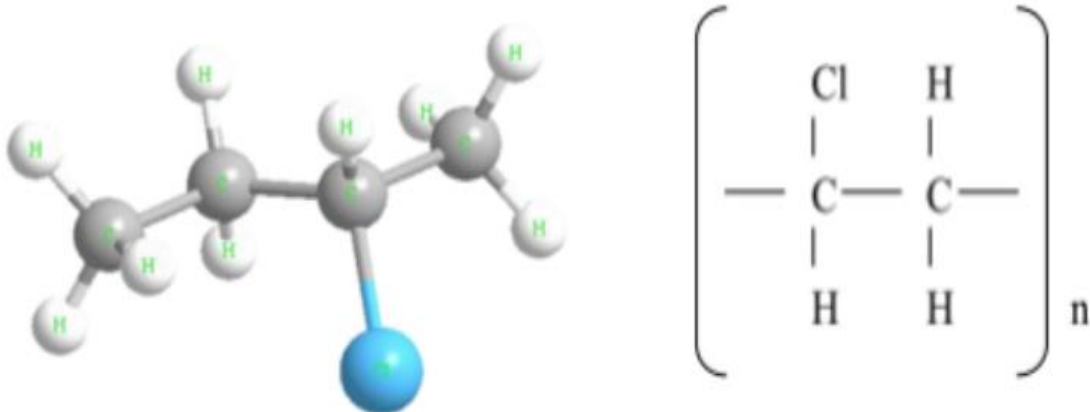


Figure 21: Formule chimique du PVC

I.7 Origine du PVC

Le polychlorure de vinyle, communément désigné par l'acronyme PVC, est un polymère thermoplastique largement utilisé, qui peut être amorphe ou légèrement cristallin. Sa formule chimique est généralement formulée comme $-(\text{CH}_2 - \text{CHCl})_n$.

Sa production repose sur l'utilisation de sel, une ressource naturelle abondante représentant 57 % de sa composition, et de dérivés pétroliers, qui en constituent 43 %. Ces derniers proviennent des résidus générés lors de la transformation du pétrole brut en carburant. Le PVC se présente sous forme de poudre blanche, à laquelle divers adjuvants tels que des lubrifiants, des stabilisants, des plastifiants et des charges sont ajoutés en fonction de l'application finale.[32]

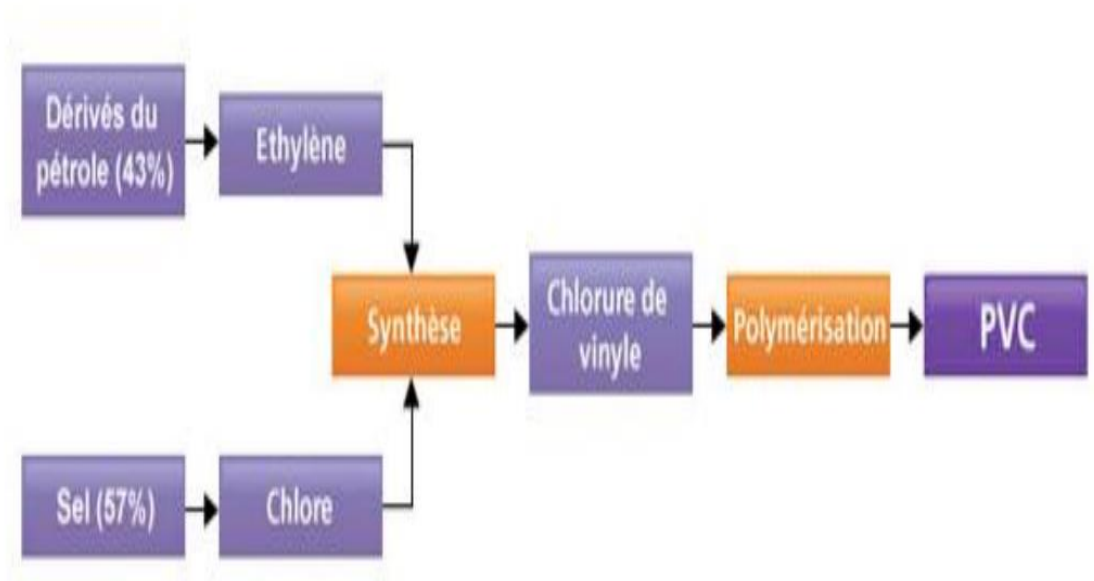


Figure 22: Schéma de fabrication du composant de base : la résine PVC

I.8 Les propriétés du PVC

Il s'agit d'un plastique dur et solide résistant à l'eau, à la combustion et aux UV, auquel on ajoute souvent des plastifiants pour améliorer sa souplesse. Ce matériau se caractérise également par une très bonne résistance chimique aux acides, Par contre, il est sensible à certains solvants organiques (aromatiques, cétoniques). Les composites à base de PVC présente une bonne tenue au vieillissement naturel.

Le polychlorure de vinyle ne doit pas être brûlé avec d'autres déchets en plein air car il dégage de l'acide chlorhydrique en présence de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Il peut être recyclées après utilisation. Il est généralement ductile. comme le montre (le tableau 2).[33]

Tableau 2: Propriétés du PVC[33]

PROPRIETES	PVC
Masse Volumique kg /m ³	1.03-1.58
Résistance à la traction °C	160-220
Résistance à la traction MPa	41-52
Module de traction GPa	2.41-4.14
Allongement à la rupture,%	2-80
Résistance à l'impact (J/m)	21-1068
Température de distorsion à chaud °C	57-82
Tf °C	160-220
Tg °C	75-105

II.8.1 Procédure pour obtenir du PVC broyer

Collecte des déchets de PVC : Les déchets proviennent de chantiers de construction, de démolition ou de rebuts industriels (tuyaux, profilés, câbles, menuiseries, etc.) (figure 23). [34]

Tri des matériaux: Les déchets sont triés afin de séparer le PVC des autres plastiques, métaux ou matériaux contaminants, ce qui peut être réalisé manuellement ou à l'aide de machines de tri optique ou densimétrique.

Nettoyage: Le PVC est nettoyé pour éliminer les impuretés (poussières, colles, huiles, etc.), avec un lavage à l'eau froide ou chaude selon le degré de salissure. **Broyage :** Le matériau propre est ensuite broyé en fragments plus petits, appelés broyat de PVC (généralement de 5 à 15 mm), qui peuvent être utilisés directement dans certains procédés ou être granulés.

Tamisage et séparation finale: Le broyat est tamisé pour obtenir une granulométrie uniforme, et un tri magnétique ou densimétrique peut être effectué pour éliminer les résidus métalliques ou plastiques indésirables.

Stockage: Le PVC broyé peut être stocké comme matière prête à l'emploi pour la fabrication de nouveaux produits ou extrudé/fusionné pour produire des granulés recyclés destinés à l'injection ou à l'extrusion plastique.

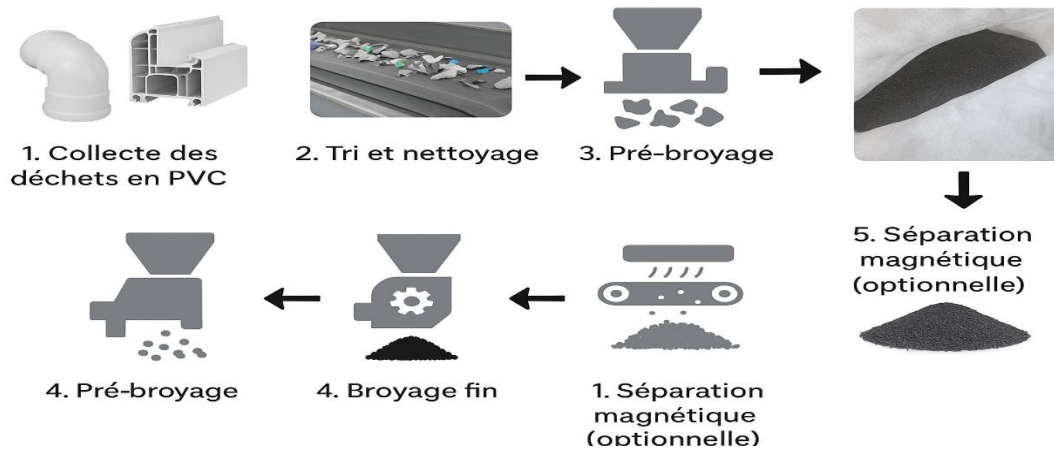


Figure 23: Etape pour obtenir PVC broyé[34]

I.9 Présentation de l'entreprise CHIALI

Le Groupe CHIALI, établi en 1981 à Sidi Bel Abbès, se positionne comme un acteur industriel prépondérant en Algérie dans le secteur de la transformation des matériaux thermoplastiques. Grâce à une stratégie d'expansion progressive et à une diversification maîtrisée de ses activités, l'entreprise s'est affirmée comme une référence dans divers domaines, tels que la production de canalisations en PVC et PEHD, la menuiserie en PVC, les solutions d'irrigation, les travaux hydrauliques, l'isolation thermique et acoustique, ainsi que la promotion immobilière. Avec plusieurs filiales spécialisées, le groupe privilégie l'innovation technologique, la qualité des produits et le respect des normes internationales pour répondre aux besoins croissants du marché national et régional. De plus, à travers sa structure de formation interne, CHIALI Académie, le groupe démontre un engagement constant envers le développement des compétences et le renforcement des capacités locales, contribuant ainsi de manière significative au tissu économique algérien[35].



Figure 24 : Direction de Chiali

1.9.1 PVC – Société CHIALI

Le PVC (Polychlorure de Vinyle) produit par la société Chiali, située à Sidi Bel-Abbès en Algérie, est un matériau plastique thermoplastique utilisé pour la fabrication de divers produits industriels, principalement dans les domaines du bâtiment, des travaux publics, de l'hydraulique, de l'électricité et des télécommunications. Chiali se positionne comme l'un des principaux acteurs algériens dans la transformation du PVC et la production de systèmes de canalisation complets, en fabriquant des tubes, des raccords, des gaines et des profils conformes aux normes nationales (NA) et internationales (ISO, EN).[35]

1.9.2 Bénéfices du recyclage chez CHIALI

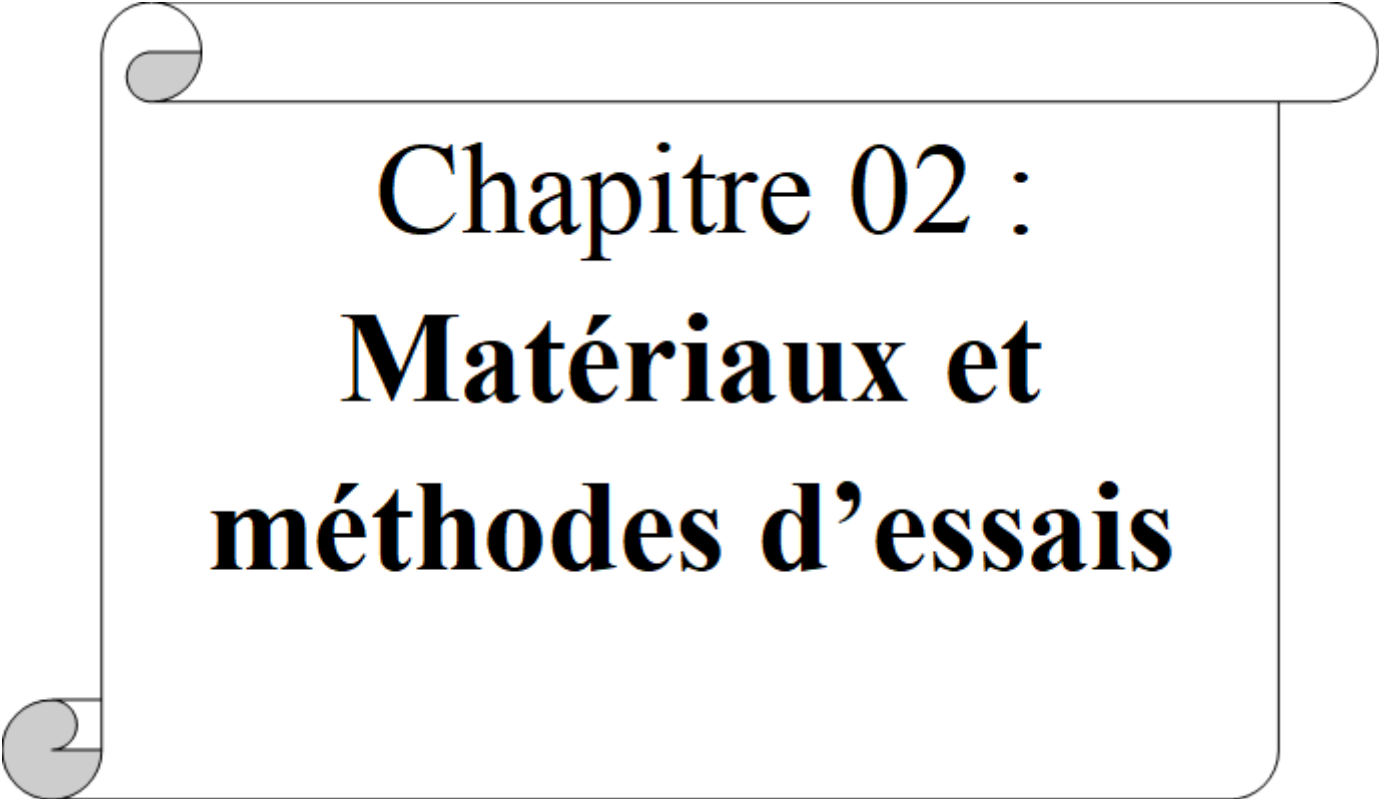
Diminution des dépenses associées à l'acquisition de matières premières non traitées, réduction des déchets industriels entraînant un impact environnemental réduit, prolongation de la durée de vie du PVC, un matériau entièrement recyclable, participation à une économie circulaire locale conforme aux normes écologiques, et promotion d'une communication responsable où le groupe met en avant la recyclabilité de ses produits comme un atout commercial et écologique.[35]

1.9.3 Caractérisation du PVC employé par CHIALI

Le PVC-U (Polychlorure de Vinyle non plastifié) produit par la société Chiali se distingue par ses performances techniques remarquables et sa grande adaptabilité. Reconnu pour son savoir-faire dans la transformation des matériaux thermoplastiques, l'entreprise offre un PVC rigide qui présente une résistance mécanique et chimique exceptionnelle, particulièrement adaptée aux exigences des secteurs de la construction, de l'hydraulique et des infrastructures. Ce matériau se distingue par une stabilité dimensionnelle notable, une résistance aux agents corrosifs tels que les acides, les bases et les sels, ainsi qu'une capacité à supporter la pression et les chocs dans des conditions d'utilisation normales. Avec une durée de vie dépassant 50 ans, il constitue une solution durable et fiable. Sa plage de fonctionnement thermique, généralement comprise entre -10°C et +60°C, lui permet de conserver ses propriétés dans divers contextes climatiques. De plus, son caractère recyclable s'inscrit dans une démarche de responsabilité environnementale, en phase avec les tendances actuelles en matière de développement durable[35].

I.10 Conclusion

Face aux enjeux croissants liés à la gestion des déchets, tant sur le plan environnemental qu'économique, l'intégration de ces déchets dans des matériaux de construction tels que le plâtre constitue une alternative prometteuse. En adoptant des démarches de broyage et de valorisation, il devient possible de réduire l'impact écologique tout en conférant une seconde vie à des matériaux autrefois considérés comme inutiles. Le plâtre, par sa nature recyclable et adaptable, se prête particulièrement bien à cette logique de réutilisation, en permettant la fabrication de produits légers, durables et économiques. Cette approche s'inscrit pleinement dans les principes du développement durable, conciliant réduction des déchets, préservation des ressources et création de valeur économique.

A decorative border resembling a scroll, with a grey shadow on the top and bottom edges, framing the text.

Chapitre 02 :
Matériaux et
méthodes d'essais

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, un programme expérimental a été mis en place afin de caractériser les matières premières ainsi que le déchet de PVC utilisé dans la formulation des mortiers à base de plâtre. L'étude vise à évaluer les propriétés physiques, mécaniques des matériaux à travers une série d'essais normalisés.

Inscrit dans une démarche de transition écologique, ce travail de recherche a pour ambition de concevoir des blocs en plâtre allégés destinés aux cloisons intérieures, en explorant des alternatives durables aux constituants classiques. Plus précisément, l'étude porte sur les effets de la substitution partielle du sable par du PVC broyé, combinée à l'ajout de fibres de polypropylène (PP), sur les performances mécaniques, thermiques et hydriques des blocs produits.

Ce projet poursuit un double objectif : d'une part, valoriser des déchets plastiques non recyclés, et d'autre part, réduire l'impact environnemental des matériaux de construction, tout en assurant une compatibilité avec les exigences techniques du secteur du bâtiment.

II.2 Matériaux utilisés

Les composites étudiés sont confectionnés à partir du plâtre, sable, chaux et de déchet de Pvc

II.2.1 Le plâtre

Le plâtre utilisé dans cette étude est fourni par l'entreprise KNAUF (figure 25), située à Boufatis dans la wilaya d'Oran. Il s'agit d'un plâtre de construction adapté aux travaux d'aménagement intérieur, que ce soit pour des constructions neuves ou en rénovation, à l'exception des environnements humides et des surfaces extérieures.



Figure 25: Plâtre KNAUF

II.2.2 Le sable

Le sable utilisé dans notre étude est un sable composé de granulats roulés, prélevé de la carrière d'El Bouihi, wilaya de Tlemcen.

II.2.3 La chaux

La chaux utilisée dans cette recherche sert à retarder la prise du plâtre (figure 26). Elle diminue sa solubilité, prolongeant ainsi son temps d'emploi sans altérer ses propriétés mécaniques (C.N.E.R.I.B).



Figure 26: Chaux hydratée

II.2.4 Le déchet de PVC

Le matériau utilisé dans ce projet de fin d'études provient du recyclage de déchets plastiques en PVC (figure 27). Ces déchets ont été récupérés auprès du Groupe Chiali, situé à Sidi Bel Abbés. Avant leur incorporation dans les mortiers, le PVC a été tamisé à l'aide de tamis de 3,15 mm afin d'obtenir une granulométrie homogène, adaptée à son utilisation dans la formulation de mortiers.



Figure 27: Déchet de PVC

II.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage est une eau de robinet, dépourvue d'impuretés, provenant de l'Algérienne des Eaux (ADE) située dans la commune de Chetouane, wilaya de Tlemcen.

II.3 Propriétés physiques des matériaux

II.3.1 Propriétés physiques du plâtre

II.3.1.1 Masse volumique

La masse volumique apparente du plâtre se situe aux alentours de $724,667 \text{ kg/m}^3$ (figure 28), tandis que sa masse volumique absolue varie généralement entre 1300 et 1450 kg/m^3 avec une moyenne de 1375 Kg/m^3 .

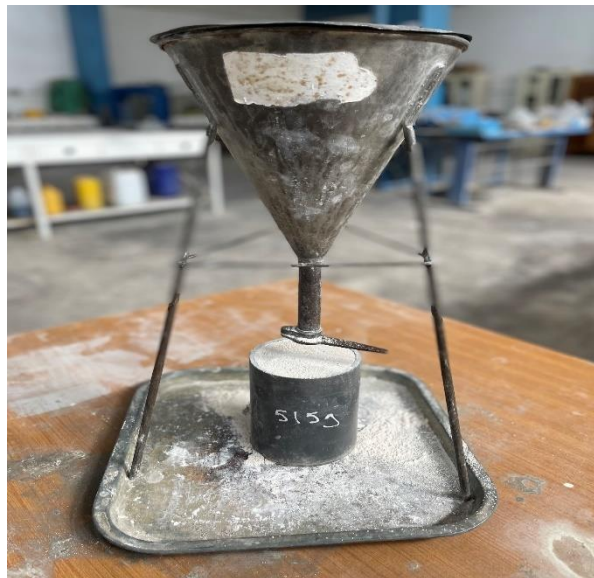


Figure 28: Masse volumique du plâtre

Tableau 3: Temps de prise du plâtre

D.F.P	Début de prise	Fin de prise
Plâtre	4.30 min	6.30 min
Plâtre + Chaux	9.40 min	12 min

II.3.2 Propriétés physiques de la chaux

II.3.2.1 Masse volumique

La masse volumique apparente de la chaux est de 548.5 kg/m^3 , tandis que sa masse volumique absolue est de 2200 kg/m^3 .

Tableau 4: Propriété physique du plâtre et la chaux

Propriétés physique	Plâtre	Chaux
Surface spécifique (SSB)	3026 cm ² /g	6500 cm ² /g
Masse volumique apparente (ρ)	724,667 kg/m ³	548.5 kg/m ³
Masse volumique absolue	1375 Kg/m ³	2200 kg/m ³

II.3.3 Propriétés physiques du sable et du déchet de PVC

II.3.3.1 Masse volumique du sable

La masse volumique apparente du sable est de 1377 kg/m³, tandis que sa masse volumique absolue, déterminée par la méthode du ballon, est de 2694 kg/m³, et par la méthode de l'éprouvette graduée, de 2500 kg/m³.

**Figure 29:** Masse volumique du sable

II.3.3.2 Masse volumique du déchet de PVC

Pour ce matériau, la masse volumique apparente obtenue est de **626.6 kg/m³**.



Figure 30: Masse volumique du déchet de PVC

II.3.3.3 Propriétés physiques du polypropylène

Tableau 5: Propriété de fibre polypropylène

Propriété	Valeur approximative
la masse volumique apparente	20.53 g/cm³
Point de fusion	~ 160–165 °C
Résistance à la traction	300–600 MPa (selon origine)
Module d'élasticité	1,5–2,5 GPa
Absorption d'eau	Très faible (hydrophobe)
Couleur	Généralement blanc / gris

Le PP est léger, résistant à l'humidité, chimiquement inerte, et ne se corrode pas.[14]

Il est également flexible, ce qui lui permet d'absorber de l'énergie sous contrainte.



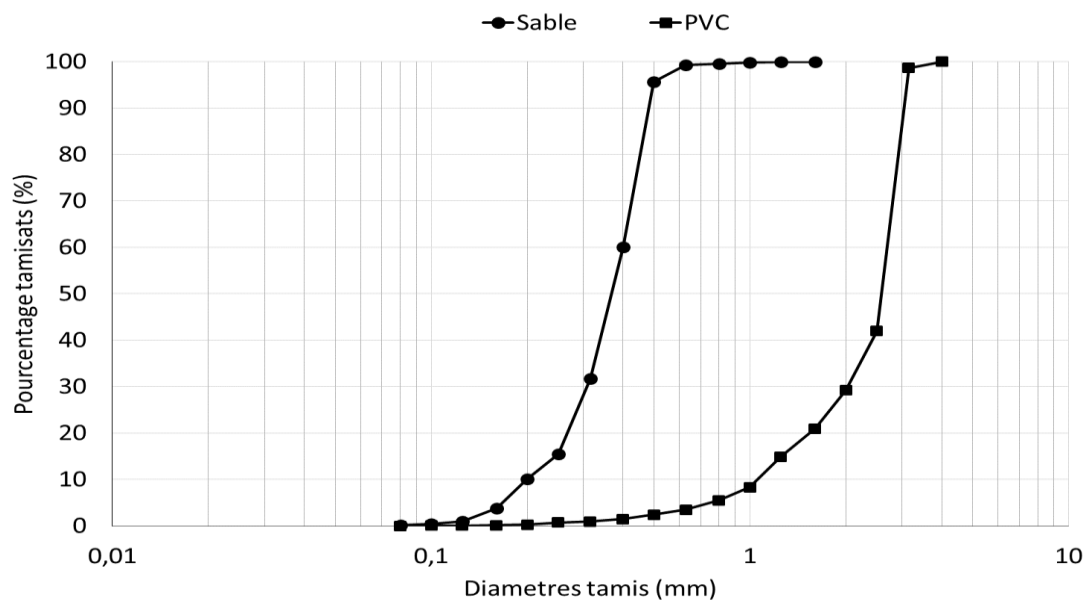
Figure 31: fibre polypropylène

II.3.3.4 Analyse granulométrique du sable et du déchet de PVC

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat et de calculer le module de finesse, conformément à la norme NF P 18-540.



Figure 32: Tamiseuse d'analyse granulométrique



La courbe granulométrique du sable et du déchet de PVC est représentée dans (la figure 33)afin de comparer leurs distributions granulaires. Il est possible d'observer que le sable présente une teneur en fines plus importante que le déchet de PVC.

Tableau 6: Les résultats des essais du sable et déchet

Les essais	Sable	Déchet
Masse volumique apparente (Kg /m³)	1377	626.6
Masse volumique absolue (Kg /m³)	2694	/
Equivalent de sable visuel	92.5	/
Equivalent de sable avec piston	61	/
L'essai d'absorption	1.8%	0%
Module de finesse	1.6	4.4

D'après le tableau 6 on remarque que le sable naturel possède une densité élevée, une granulométrie fine et un forte capacité d'absorption d'eau, ce qui favorise une bonne compacité dans les mélanges. En revanche, le déchet de PVC broyé est plus léger, imperméable et présente une granulométrie plus grossière, ce qui permet d'alléger les blocs et d'améliorer leur résistance à l'humidité, tout en nécessitant un ajustement de la formulation pour compenser sa nature non minérale.

II.4 Confection du mortier

II.4.1 Définition du mortier

Le mortier à base de plâtre est élaboré en mélangeant du plâtre, du sable, de l'eau et une quantité de chaux, qui agit comme un retardateur de prise.

II.4.2 Étude de la composition du mortier de plâtre

II.4.2.1 Détermination du rapport E/P

Le rapport eau/plâtre (E/P) est un paramètre fondamental dans la formulation des mortiers à base de plâtre, influençant directement la consistance, l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques du matériau durci. Dans le cadre de cette étude, des essais d'étalement (figure 34) ont été réalisés afin d'ajuster ce rapport en présence de fibres de polypropylène (PP).



Figure 34: Essai d'étalement

Les fibres de PP, de nature hydrophobe et à géométrie variable, modifient la rhéologie du mélange :

- Elles augmentent la friction interne et limitent la mobilité de la pâte.
- Elles ont tendance à retenir l'eau mécaniquement (effet filet ou amas fibreux), réduisant ainsi l'eau libre disponible pour l'étalement.

Ainsi, pour conserver une maniabilité acceptable, le rapport E/P a été ajusté en fonction du pourcentage de fibres PP incorporées, comme suit :

Tableau 7: Pourcentage des fibre par rapport au rapport E/P

Pourcentage de fibres PP	Rapport E/P
1 %	0,70
2 %	0,75
3 %	0,80

D'après le tableau 7 valeurs ont été validées à l'issue d'essais expérimentaux d'étalement visant une consistance standard autour de 10 à 11,5 cm, en cohérence avec les normes d'usage

II.4.2.2 Détermination du rapport S/P

Selon les recommandations du CNERIB (Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment), un rapport sable/plâtre (S/P) de 0,5 en masse est conseillé pour les mortiers de plâtre classiques, car il garantit un bon compromis entre :

la résistance mécanique (sable = squelette granulaire), et la ouvrabilité/mise en œuvre (plâtre = liant).

Ce rapport a donc été conservé dans toutes les formulations, y compris celles intégrant du PVC broyé ou des fibres de PP en substitution partielle du sable.

II.4.2.3 Résultats des essais d'étalement

Les essais de consistance ont été effectués pour différents dosages en fibres de PP et taux de substitution de sable par du PVC broyé. Le tableau suivant récapitule les valeurs d'étalement (en cm) obtenues :

Tableau 8: Résultats de l'essai d'étalement selon le taux de PP et de déchet de PVC

Déchet PVC / Sable (%)	1%	2%	3%
0 % déchet (100 % sable)	10 cm	9.5 cm	10.75 cm
40 % déchet / 60 % sable	10.5 cm	10 cm	11.5 cm
80 % déchet / 20 % sable	10 cm	11.75 cm	11.75 cm
120 % déchet (0 % sable)	11 cm	10 cm	9 cm
140 % déchet (0 % sable)	10.5 cm	9.5 cm	9.5 cm

Une tendance à la hausse de l'étalement est observée avec l'augmentation du pourcentage de PVC, en raison de la légèreté et forme arrondie des grains de plastique favorisant la fluidité.

Cependant, l'ajout de fibres PP a un effet inverse, en diminuant l'étalement pour un même rapport E/P, confirmant leur effet structurant dans le mélange.

Le compromis optimal entre maniabilité et performances a été trouvé avec 2 % de PP et 80 % de PVC, donnant une excellente ouvrabilité (≈ 11.75 cm) et une densité raisonnable.

II.4.2.4 Dosage de la chaux

La quantité de chaux incorporée correspond à 6% de la masse totale du plâtre, conformément aux préconisations du C.N.E.R.I.B.

II.4.2.5 Méthode de dosage des constituants :

Les constituants ont été dosés en masse afin d'assurer une meilleure précision et reproductibilité des formulations. Ce choix évite les erreurs liées aux différences de densité apparente, notamment entre le sable (1377 kg/m^3) et le PVC broyé ($626,6 \text{ kg/m}^3$). Un dosage en volume aurait faussé les proportions, car un même volume n'aurait pas représenté la même masse de matériau, ce qui affecterait les propriétés du composite.

II.4.3 Préparation des échantillons

Les mortiers étudiés sont élaborés en respectant un rapport S/P de 0,5 en poids et un dosage de 6% de chaux par rapport à la masse du plâtre. La quantité de mélange est ajustée pour remplir des moules de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (figure 35).

Dans cette étude, des échantillons de mortier ont été élaborés en remplaçant progressivement le sable par du déchet de PVC broyé, selon des taux de substitution massique de 0 %, 40 %, 80 %, 120 % et 140 % (voir tableau 9). Le rapport eau/plâtre (E/P) a été ajusté à chaque formulation afin de maintenir une maniabilité adéquate. Les pourcentages de substitution retenus ont été définis sur la base des études préliminaires menées par M. Houti Farid.[37]



Figure 35: moule ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$)



Figure 36: les constituants utilisés

Tableau 9: Les différents taux des composites

Matériaux	0% Déchet 100% Sable			40% Déchet 60% Sable			80% Déchet 20% Sable			120% Déchet 0% Sable			140% Déchet 0% Sable		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%	1%	2%	3%	1%	2%	3%	1%	2%	3%
Sable (g)	1050			630			210			0			0		
Déchet PVC (g)	0			191.119			382.239			573.359			668.919		
P.P (g)	21	42	63	21	42	63	21	42	63	21	42	63	21	42	63
Plâtre (g)	2079	2058	2037	2079	2058	2037	2079	2058	2037	2079	2058	2037	2079	2058	2037
E/P	0.7	0.75	0.8	0.7	0.75	0.8	0.7	0.75	0.8	0.7	0.75	0.8	0.7	0.75	0.8
Eau (g)	1455.3	1543.5	1629.6	1455.3	1543.5	1629.6	1455.3	1543.5	1629.6	1455.3	1543.5	1629.6	1455.3	1543.5	1629.6
Chaux (g)	126			126			126			126			126		

II.4.4 Formulation du mortier

II.4.4.1 Matériels utilisés

- **Balance électrique :**

Une balance électrique avec une précision de mesure de **0.001** et une capacité minimale de 10 Kg, nous permet de peser les quantités nécessaires avec une grande précision

- **Malaxeur :**

Malaxeur est équipé d'une cuve de capacité de cinq litres et d'une pale qui peut tourner à deux vitesses différentes (lentes et rapides)

II.4.4.2 Mode d'emploi

La préparation des éprouvettes a été réalisée selon un protocole rigoureux visant à garantir l'homogénéité du mélange, la reproductibilité des résultats et la conformité aux dimensions standardisées. La fabrication des mortiers s'effectue dans des conditions ambiantes du laboratoire, avec une température de **17 °C** et une humidité relative d'environ **60 HR**. Les différentes étapes sont détaillées ci-dessous :

- Préparation et mélange à sec des constituants principaux

Dans un premier temps, les constituants secs – à savoir le plâtre, la chaux, le sable (ou le substitut tel que le PVC broyé) – sont pesés selon les proportions définies, puis mélangés manuellement à sec pendant **25 secondes**. Cette étape permet une première homogénéisation du mélange.

- Ajout et incorporation des fibres de polypropylène (PP)

Une fois le mélange de base homogène, les fibres de polypropylène sont incorporées. Un second malaxage à sec est effectué pendant 20 secondes afin d'assurer une distribution uniforme des fibres dans l'ensemble du mélange.

- Ajout de l'eau et malaxage manuel

L'eau est ensuite ajoutée en une seule fois. Un malaxage manuel est réalisé pendant **15 secondes**, permettant une première hydratation du plâtre et l'activation du processus de liaison entre les constituants.

- Malaxage mécanique

Le mélange est transféré dans un malaxeur mécanique pour un malaxage final d'une durée de **20 secondes**. Cette étape vise à obtenir une pâte homogène, de consistance régulière, exempte de grumeaux et bien préparée pour le moulage.

- Remplissage des moules

Le mélange est coulé dans des moules normalisés de dimensions **4 × 4 × 16 cm**, en trois couches successives. Après chaque couche, des coups de compactage sont appliqués (**à l'aide d'une tige et par vibration légère**) afin d'éliminer les bulles d'air, de favoriser une bonne compacité et d'assurer une répartition homogène du matériau dans le moule.

- Finition, démoulage et conservation

Une fois le remplissage terminé, la surface est nivelée pour assurer une finition correcte. Après la fin de prise, les éprouvettes sont démoulées avec précaution puis placées sur un support propre et légèrement humidifié pour leur conservation en ambiance humide jusqu'aux essais.

Les éprouvettes de dimension **(4x4x16) cm³** seront destinées aux essais de :

- Résistance à la compression
- Résistance de traction par flexion
- Détermination de la densité
- Absorption capillaire
- Etuve immersion
- Dureté superficielle

II.5 Préparation des blocs alvéolaire

II.5.1 Définition

Les blocs alvéolaires des dimensions standards de **33 × 25 × 8 cm³** (figure 37) , en plâtre étudiés dans ce travail sont destinés à des applications en cloisonnement intérieur. Ils sont élaborés à partir d'un mélange composé de plâtre, sable, eau, chaux (comme retardateur de prise), déchet de **PVC broyé** en remplacement du sable, et fibres de polypropylène incorporées pour renforcer les performances mécaniques du matériau (figure 39).

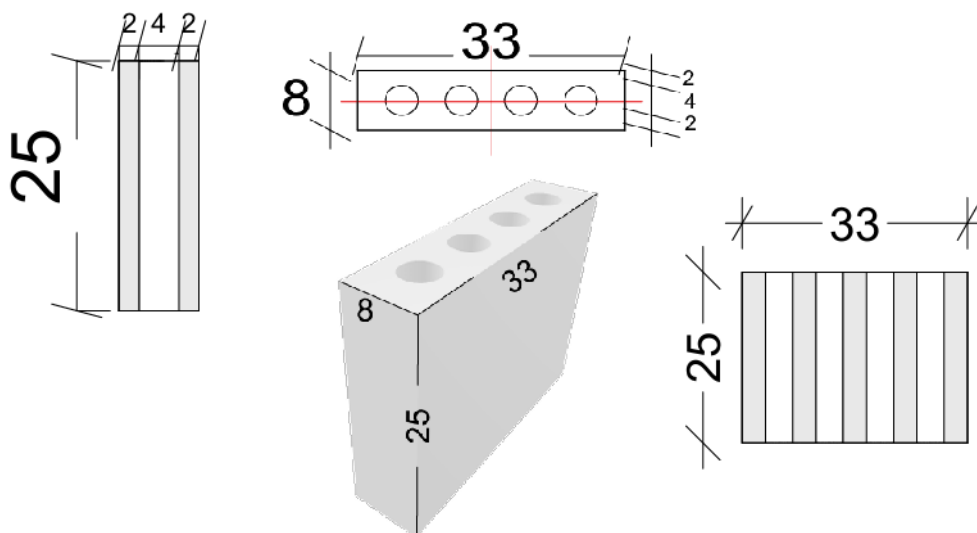


Figure 37: dessin de bloc alvéolaire avec différentes coupes



Figure 38: Moule du bloc alvéolaire

Suite à la confection et aux essais réalisés sur les mortiers à 14 et 28 jours, il a été constaté que les formulations contenant 0 %, 80 % et 140 % de PVC broyé ont donné les meilleurs résultats en termes de résistance à la traction.

Par ailleurs, l'ajout de **2 %** de fibres de polypropylène (**en masse du plâtre**) a permis d'améliorer significativement la résistance à la flexion, apportant au matériau une meilleure tenue mécanique globale.

Ainsi, le matériau final est un composite plâtre–PVC–fibres, pensé pour être à la fois léger, performant et économique, en valorisant des déchets plastiques tout en respectant les exigences fonctionnelles des éléments de cloison.

Les rapports eau/plâtre (E/P) utilisés sont :

Matériaux	0% Déchet 100% Sable		80% Déchet 20% Sable		140% Déchet 0% Sable	
	Sable (g)	2400	2300	480	460	0
PVC (g)	0	0	874	820.8	1529.5	1436.45
P.P (g)	0%	2%	0%	2%	0%	2%
	0	92	0	92	0	92
Plâtre (g)	4800	4508	4800	4508	4800	4508
E/P	0.6	0.75	0.6	0.75	0.6	0.75
Eau (g)	2880	3381	2880	3381	2880	3381
Chaux	288	270.48	288	270.48	288	270.48

Tableau 10: Formulations des blocs alvéolaires

- **0,6** pour les formulations sans fibres,
- **0,75** pour les formulations avec **2 % de fibres**, ces valeurs ayant été déterminées lors des essais précédents.



Figure 39: Différents constituants

Les blocs alvéolaires fabriqués ont des dimensions standards de **33 × 25 × 8 cm** (figure 51) et seront soumis aux essais suivants :

- Résistance à la compression
- Densité
- Shore C
- UPV
- Résistance à la flexion
- Tolérance dimensionnelle

II.5.2 Matériel utilisé

- **Balance électronique:** pour un dosage précis des matériaux (**précision: 0,001 g**).
- **Perceuse avec fouet spécial:** pour le malaxage du mélange dans un bidon.
- **Bidon en plastique:** utilisé comme cuve de mélange.
- **Table vibrante:** pour éliminer l'air et assurer une bonne compaction pendant le moulage.

II.5.3 Procédure de fabrication

La fabrication des blocs alvéolaires s'effectue dans des conditions ambiantes du laboratoire, avec une température de **20 °C** et une humidité relative d'environ **56 %**.

- Préparation du moule :

Avant le début du mélange, les moules sont soigneusement nettoyés, puis huilés à l'aide d'un pinceau pointu trempé dans de l'huile de démoulage (Figure 40.a), afin de faciliter l'extraction des plaques après la prise.

- Mélange à sec initial :

Les composants secs — plâtre, sable, PVC broyé et chaux — sont pesés avec précision (Figure 40.b), puis mélangés manuellement pendant environ **45 secondes**.

- Ajout des fibres (si présentes) :

Les fibres de polypropylène, représentant **2 %** de la masse de plâtre, sont incorporées au mélange sec, puis mélangées durant **30 secondes** supplémentaires (Figure 40.c,d).

- Ajout de l'eau et malaxage :

L'eau est ajoutée en une seule fois. Un premier malaxage manuel est effectué pendant 30 secondes, suivi d'un malaxage mécanique à l'aide d'une perceuse équipée d'un mélangeur, pendant encore **30 secondes**, jusqu'à obtention d'un mélange homogène. (Figure 40. e,f,g,)

- Prémélange manuel final :

Juste avant le moulage, un malaxage manuel rapide est effectué pendant environ **20 secondes** pour garantir l'uniformité du mélange. (Figure 40.h)

- Moulage sur table vibrante :

Le moule, déjà positionné sur une table vibrante, est rempli en trois couches successives. Chaque couche est vibrée pendant environ **10 secondes** afin d'assurer une bonne compaction du matériau et l'évacuation des bulles d'air. (Figure 40.i)

- Finition :

Une fois le moule complètement rempli, un couvercle est placé, puis le surplus de matériau est arasé pour garantir les dimensions exactes du panneau. (Figure 40.j,k)

- Démoulage et cure :

Le démoulage est réalisé **20 minutes** après le durcissement du matériau, lorsque le matériau présente une résistance suffisante. Les tuyaux en PVC sont alors retirés, et les blocs alvéolaires sont soigneusement démoulés. Afin d'assurer une bonne hydratation avant les essais, les blocs sont ensuite conservés dans des sachets plastique (Figure 40.1.m)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



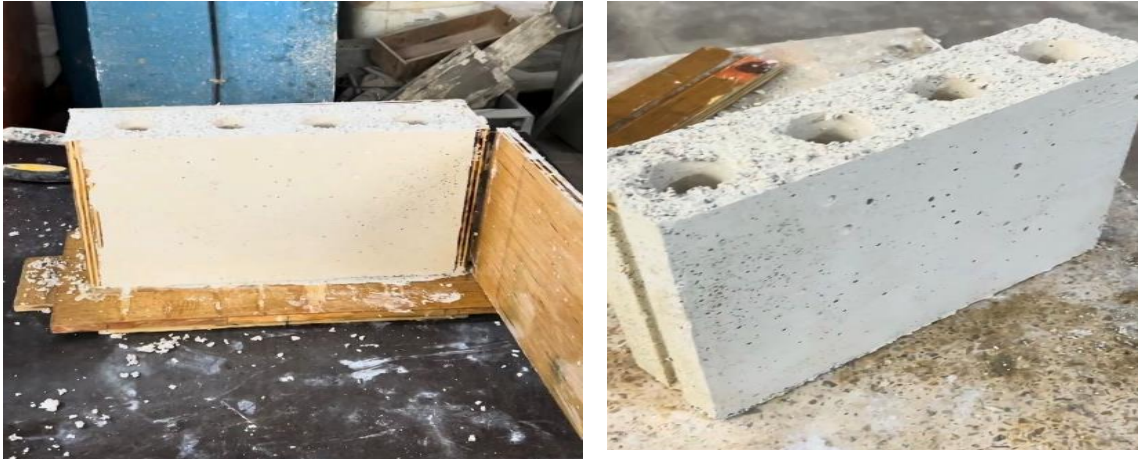
(j)



(k)



(l)



(m)

(n)

Figure 40 : Procédure de moulage pour la fabrication d'un bloc alvéolaire a) – Huilage du moule à l'aide d'un pinceau à pointe fine ,b) Ajout des constituants secs dans le bidon ,d) Incorporation des fibres de polypropylène c)Malaxage manuel des constituants,, e)Ajout de l'eau, f)Malaxage manuelle g) Malaxage mécanique à l'aide d'une perceuse, h)La pâte et prêle h)Coulage de la pâte dans le moule g) Mise en place du couvercle du moule, k) Arasage de la surface supérieure, l) Retrait des cylindres en PVC. m)Démoulage du bloc.n) Bloc et prêle

II.6 Confection des plaques en plâtre

II.6.1 Définition des plaques

Les plaques en plâtre ont été élaborées à partir du même mélange que celui utilisé pour les panneaux, avec pour objectif de les soumettre à des essais spécifiques portant sur leur comportement mécanique (Figure 41). Elles sont conçues à base de plâtre, sable, PVC broyé, chaux et fibres de polypropylène, afin d'évaluer l'effet de ces ajouts sur la résistance à l'impact et à la flexion. les dimensions des plaques sont de $25 \times 25 \times 2 \text{ cm}^3$



Figure 41: moule ($25,5 \times 25,5 \times 2 \text{ cm}^3$)

II.6.2 Composition et formulation

Le dosage, les rapports E/P, les taux de substitution du sable par le PVC broyé (0 %, 80 %, et 140 %), ainsi que les taux de fibres de polypropylène (2 %) (Figure 42) sont identiques à ceux utilisés pour les blocs alvéolaires, déterminés à partir des essais de consistance réalisés sur le mortier



Figure 42: Différents constituants pour la formulation des plaques

II.6.3 Mode opératoire – Fabrication des plaques (25 × 25 × 2 cm³)

- Préparation des constituants secs :

Peser les constituants principaux (plâtre, chaux, sable ou PVC broyé) en masse selon les proportions définies. Mélanger manuellement à sec pendant 25 secondes pour homogénéiser le mélange.

- Incorporation des fibres de polypropylène (PP) :

Ajouter les fibres de PP au mélange sec, puis effectuer un second malaxage à sec pendant 20 secondes afin d'assurer une distribution uniforme des fibres.

- Ajout de l'eau et malaxage manuel :

Verser l'eau en une seule fois sur le mélange sec. Mélanger manuellement pendant 15 secondes pour initier l'hydratation du plâtre et activer la liaison entre les constituants.

- Malaxage mécanique final :

Transférer le mélange dans un malaxeur mécanique pour un malaxage final de 20 secondes. L'objectif est d'obtenir une pâte homogène, sans grumeaux, prête à être coulée.

- Moulage des plaques :

Verser la pâte dans des moules de dimensions $25 \times 25 \times 2$ cm³ préalablement nettoyés et légèrement huilés pour faciliter le démoulage. Vibrer légèrement le moule pour éliminer les bulles d'air .

- Finition et prise :

Niveler la surface avec une règle ou une spatule. Laisser la plaque prendre jusqu'au début de prise .

- Démoulage et conservation :

Après le début de prise, les plaques sont démoulées avec précaution, puis placées sur un film plastique propre afin de maintenir l'hydratation avant la réalisation des essais.

II.6.4 Essais réalisés sur les plaques

Les plaques confectionnées ont été destinées à un essai principal :

- Essai d'impact : pour tester leur comportement face à des sollicitations dynamiques ou chocs localisés

II.7 Description des essais expérimentaux à réaliser

II.7.1 Mesure de la masse volumique

La densité des différents mortiers élaborés a été déterminée à partir de la masse d'éprouvettes standards de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³. La masse volumique est obtenue en divisant la masse mesurée (M) par le volume (V) correspondant au gabarit de l'échantillon (Figure 43), selon la formule suivante

$$\rho = M/V \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

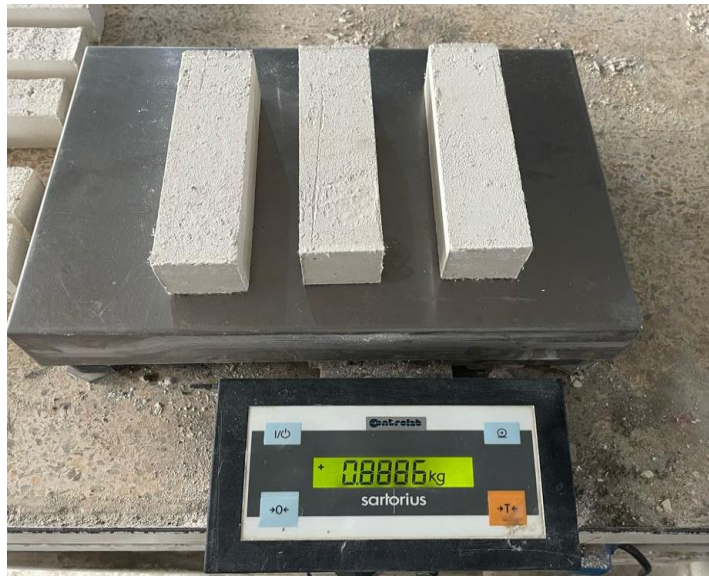


Figure 43: Détermination de la masse des éprouvettes (4×4×16 cm³)

II.7.2 Évaluation de la dureté en surface (Shore C)

La dureté en surface des matériaux a été évaluée selon la norme EN 13279-2 (2014) à l'aide d'un duromètre Shore C (Figure 44). Les mesures ont été prises sur deux faces longitudinales de chaque échantillon prismatique (4 × 4 × 16 cm), en appliquant une pression verticale en huit points distincts. Trois éprouvettes ont été testées pour chaque formulation, et la valeur moyenne des mesures a été retenue comme indicateur de dureté.



Figure 44: Duromètre Shore C

II.7.3 Test de flexion en traction (essai trois points)

La résistance à la traction par flexion a été mesurée conformément à la norme EN 13279-2 (2014), à l'aide d'un essai de flexion en trois points appliqué sur les éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$ cm) (Figure 45). La charge est appliquée à une vitesse de 50 ± 10 N/s jusqu'à rupture. La résistance à la flexion (R_f) est calculée selon la formule :

$$R_f = \frac{1.5 * F_f * L}{B^3}$$

avec :

- F_f : charge à la rupture en N
- L : distance entre les appuis ($L=10$ cm)
- B : largeur de la section carrée ($b=40$ mm)



Figure 45: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

II.7.4 Évaluation de la résistance à la compression

L'essai de compression est réalisé conformément à la norme NF P18-406. Une charge croissante est appliquée verticalement sur l'échantillon jusqu'à sa rupture (Figure 46). La résistance à la compression (R_c) est calculée par la relation suivante :

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

avec :

- F_c : charge à la rupture (N)
- a : largeur de la section carrée ($a=40$ mm)



Figure 46: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression

II.7.5 Test d'absorption par capillarité

Cet essai vise à déterminer la porosité ouverte des échantillons. Les éprouvettes sont partiellement protégées avec un ruban adhésif en aluminium, puis placées dans une étuve à 40°C pendant 48 heures. Ensuite, elles sont immergées à une hauteur de 0,5 cm dans l'eau (Figure 47). L'eau absorbée est mesurée à plusieurs intervalles de temps (1 min, 5 min, 10 min, ..., jusqu'à 6h), selon la norme ASTM C1585-20

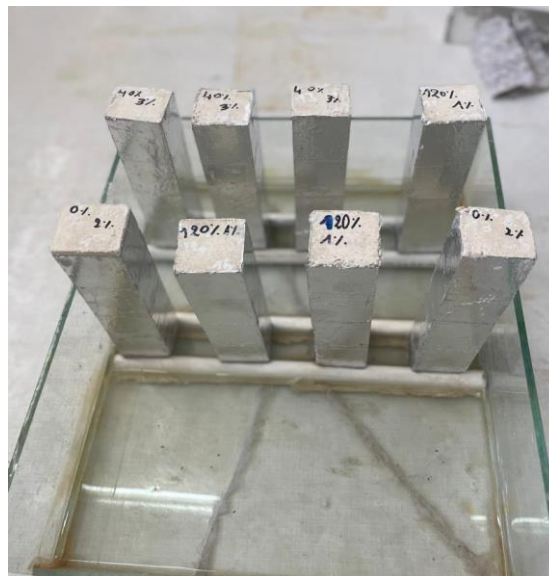


Figure 47: Essai d'absorption capillaire

II.7.6 Essai combiné étuve-immersion pour la réversibilité hydrique

Cet essai permet d'évaluer la capacité du matériau à sécher après une saturation complète en eau. Les éprouvettes sont d'abord immergées dans l'eau pendant 48 heures, puis placées dans une étuve à 40°C pendant deux jours. Ce cycle est répété deux fois (Figure 48.49). À la fin du processus, la dureté (Shore C), la résistance à la flexion et la résistance à la compression sont mesurées pour comparer les résultats avec ceux d'échantillons non immergés.



Figure 48: Les échantillons dans l'étuve

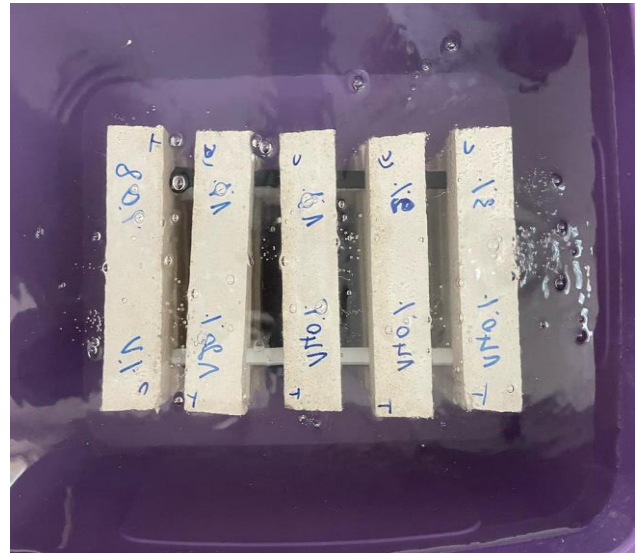


Figure 49: Les échantillons dans l'eau

II.7.7 Essai de vitesse des ultrasons (UPV)

L'essai par ultrasons a pour objectif d'évaluer l'homogénéité et la qualité interne du matériau, notamment la présence de défauts ou de fissures internes. Il est réalisé selon la norme EN 12504-4, à l'aide d'un appareil de mesure de la vitesse des ondes ultrasonores à travers l'échantillon. (Figure 50)

Deux transducteurs (émetteur et récepteur) sont placés de part et d'autre de l'éprouvette, et la vitesse de propagation des ondes (V) est mesurée en fonction du temps de transit (T) et de la longueur parcourue (L) selon la relation :

Cet essai est non destructif et permet une évaluation rapide de la compacité du matériau.



Figure 50: Appareil pour essai de vitesse des ultrasonsI

II.8. Méthodologie des essais pour les blocs alvéolaire :

II.8.1 Densité

Densité apparente à l'état sec : cette propriété a été déterminée selon les prescriptions de la norme NF EN 196-6, en calculant le rapport entre la masse sèche et le volume des blocs testés. La valeur finale correspond à la moyenne arithmétique obtenue à partir de quatre échantillons pour chaque formulation des blocs alvéolaire.



Figure 51 : Bloc alvéolaire ($33 \times 25 \times 8 \text{ cm}^3$)

II.8.2 Dureté de surface (Shore C)

Avant les essais mécaniques destructifs, une évaluation de la dureté a été réalisée conformément à la norme EN 12859 (2012). Chaque plaque ($330 \times 250 \times 80$ mm) a été positionnée sur une surface plane horizontale pour permettre la mesure à l'aide d'un duromètre Shore C (Figure 52). Neuf mesures ont été réalisées sur chaque face, ont été retenues pour le calcul de la moyenne. Trois échantillons ont été analysés pour chaque bloc alvéolaire.



Figure 52: Duromètre Shore C

II.8.3 Résistance à la flexion

Cette propriété a été mesurée en soumettant les blocs ($330 \times 250 \times 80$ mm) à un essai de flexion trois points, selon la norme EN 12859 (2012). L'échantillon était soutenu par deux appuis cylindriques espacés de 230 mm (Figure 53), tandis qu'une charge continue de 20 N/s était appliquée au centre jusqu'à rupture. Les résultats sont exprimés comme la moyenne des valeurs mesurées sur deux blocs.

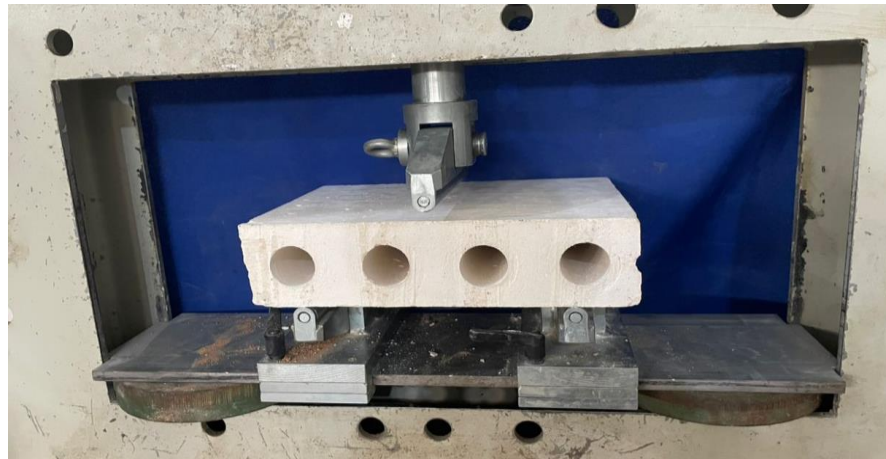


Figure 53: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction sur les blocs

II.8.4 Résistance à la compression

En l'absence de norme spécifique pour les blocs de plâtre, les recommandations de la norme EN 12390-4, relative aux éléments de maçonnerie, ont été suivies. Des éprouvettes de $330 \times 250 \times 80$ mm, découpées à partir des échantillons ayant subi l'essai de flexion, ont été utilisées. Une charge centrée applique, à une vitesse de $0,05 \text{ N/mm}^2/\text{s}$, jusqu'à la rupture (Figure 54). Deux mesures ont été effectuées pour chaque formulation, et la moyenne a été retenue comme valeur représentative.

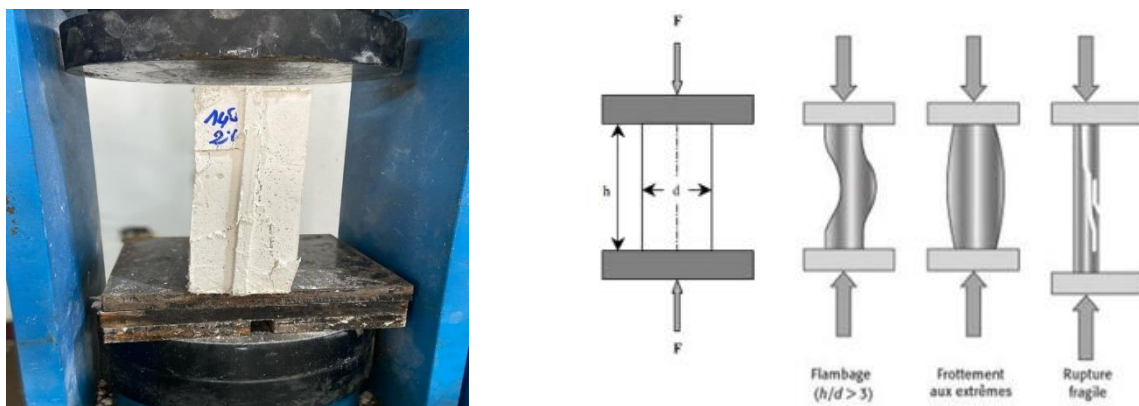


Figure 54: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression

II.9 Essai réalisé sur les plaques

II.9.1 Essai d'impact

Un essai complémentaire de dureté de surface, selon la norme NF EN 520[40]. Ce test consiste à mesurer l'empreinte laissée à la surface par l'impact d'une petite bille en acier de 48mm de diamètre et pesant 440 g, lâchée d'une hauteur de 50 cm, comme le montre (la Figure 55). Cinq mesures sont effectuées par échantillon, puis les résultats sont moyennés et exprimés en millimètres.

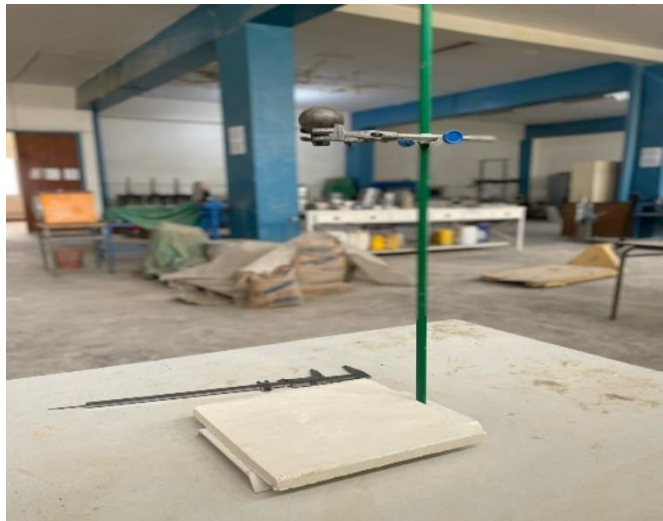


Figure 55: Dispositif pour l'essai d'impact sur les plaques

Tableau 11 : Récapitulation des normes applicables, des dimensions des échantillons et des protocoles expérimentaux associés aux essais mécaniques et physiques des matériaux à base de plâtre

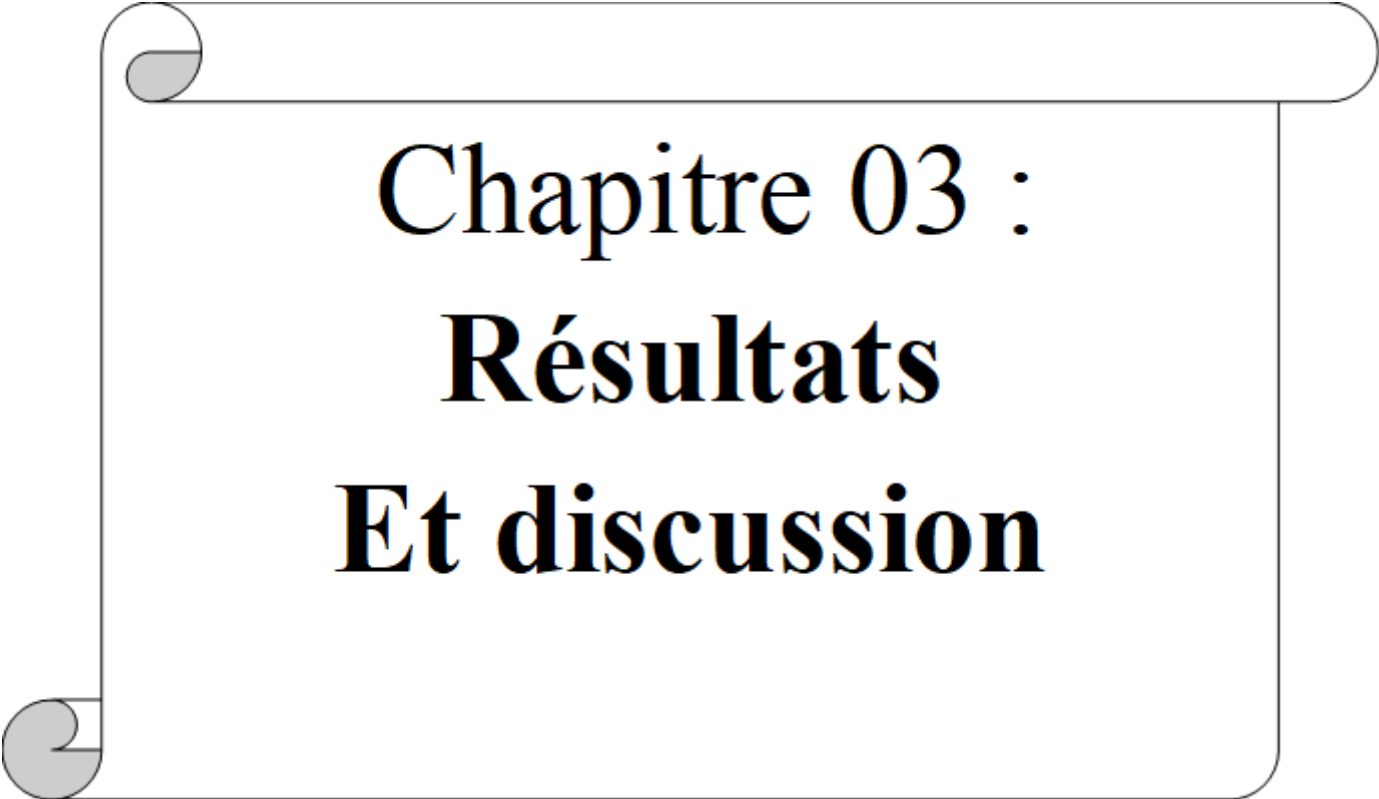
Essai	Norme	Dimensions des échantillons	Méthode / Détails
Dureté en surface (Shore C)	EN 13279-2 (2014) / EN 12859 (2012)	Prismes : $4 \times 4 \times 16$ cm / Blocs : $330 \times 250 \times 80$ mm	8 points de mesure sur 2 faces (prismes) ou 9 mesures par face (blocs), et on obtient la moyenne
Flexion (prismes)	EN 13279-2 (2014)	$4 \times 4 \times 16$ cm	Essai trois points, charge de 50 ± 10 N/s jusqu'à rupture.
Compression (prismes)	EN 13279-2 (2014)	$4 \times 4 \times 16$ cm	Charge verticale croissante jusqu'à rupture.
Absorption capillaire (prismes)	ASTM C1585-20	$4 \times 4 \times 16$ cm	Séchage à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (48 h), immersion à 0,5 cm, mesure jusqu'à 6 h.
Ultrasons (UPV)	EN 12504-4	$4 \times 4 \times 16$ cm	Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers l'échantillon.
Densité apparente (blocs)	NF EN 196-6	$330 \times 250 \times 80$ mm	Masse sèche / volume, moyenne sur 2 échantillons.
Flexion (blocs alvéolaires)	EN 12859 (2012)	$330 \times 250 \times 80$ mm	Essai trois points, appuis espacés de 233 mm, charge de 20 N/s jusqu'à rupture.
Compression (blocs alvéolaires)	EN 12390-4	$330 \times 250 \times 80$ mm	Vitesse de 0,05 N/mm ² /s jusqu'à rupture.
Impact (plaques)	NF EN 520	$250 \times 250 \times 20$ mm	Bille acier $\varnothing 48$ mm, 440 g, chute de 50 cm. 5 mesures, moyenne exprimée en mm.

II.10 Conclusion

Ce deuxième chapitre a permis de poser les bases expérimentales de notre étude en caractérisant minutieusement les différents constituants utilisés dans l'élaboration des mortiers à base de plâtre. Chaque matériau – plâtre, sable, chaux, fibres de polypropylène et déchet de PVC broyé – a fait l'objet d'une analyse physique complète afin de mieux comprendre ses propriétés et son impact potentiel sur le comportement final du composite.

Dans une démarche écoresponsable, l'intégration du déchet de PVC en remplacement partiel ou total du sable, couplée à l'ajout de fibres synthétiques, vise à concevoir des matériaux allégés aux performances optimisées pour des applications en cloisonnement intérieur. Les essais de formulation ont permis d'identifier les dosages optimaux en termes de rapport eau/plâtre (E/P), sable/plâtre (S/P) et chaux, garantissant une bonne maniabilité du mélange tout en respectant les exigences normatives.

Enfin, la mise en œuvre rigoureuse des protocoles de fabrication des mortiers, blocs alvéolaires et plaques en plâtre, ainsi que la préparation des échantillons destinés aux essais mécaniques et physiques, assurent la reproductibilité des résultats et la fiabilité des futures analyses. Ce socle expérimental solide permettra, dans le chapitre suivant, d'évaluer les performances des formulations élaborées et de valider leur potentiel en tant que solutions durables pour le secteur du bâtiment.



Chapitre 03 :
Résultats
Et discussion

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'un programme expérimental visant à étudier l'effet de l'ajout de déchets de PVC broyé et de fibres de polypropylène (PP) à différents taux de substitution sur les mortiers de plâtre.

Sur la base des résultats obtenus concernant la résistance mécanique des mortiers à l'état durci, les taux optimaux de déchets et de fibres ont été déterminés. Ces taux ont ensuite été utilisés pour la fabrication de blocs alvéolés et de plaques.

La résistance mécanique de ces nouveaux éléments, notamment sous différentes conditions d'humidité, a été évaluée afin d'analyser leur comportement et leur performance globale.

III.2 Les essais réalisées sur le mortier (4*4*16) cm

III.2.1 Densité

Le tableau 12 montre l'évolution de la densité selon le pourcentage de déchet de PVC ajouté, mesurée à 14 et 28 jours.

Tableau 12: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène

Déchet / PP	14j			28j		
	PP1%	PP2%	PP3%	PP1%	PP2%	PP3%
0%	1,371	1,332	1,276	1,368	1,316	1,276
40%	1,304	1,236	1,185	1,288	1,262	1,215
80%	1,207	1,174	1,132	1,226	1,176	1,132
120%	1,168	1,129	1,082	1,186	1,129	1,078
140%	1,166	1,137	1,103	1,168	1,126	1,093

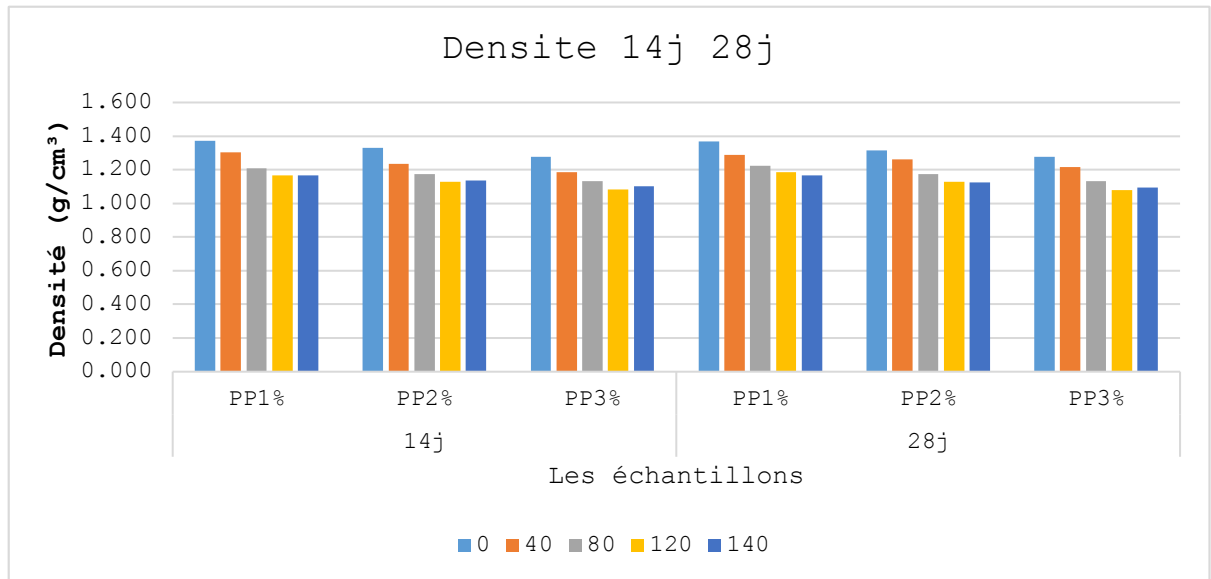


Figure 56: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j et 28j

D'après le tableau 12 et la (figure 56), on observe une diminution progressive de la densité des mortiers à mesure que la teneur en déchets de PVC augmente, et ce, quel que soit le pourcentage de fibres de polypropylène ou l'âge du matériau (14 ou 28 jours). Cette évolution s'explique principalement par la faible masse volumique du PVC, qui remplace partiellement les granulats traditionnels plus lourds comme le sable.

À titre d'exemple, pour un dosage de 1 % en fibres de polypropylène, la densité passe de 1,371 g/cm³ (0 % de PVC) à 1,166 g/cm³ (140 % de PVC), soit une réduction d'environ 15 %. L'effet des fibres reste secondaire, avec des variations limitées, généralement comprises entre 5 et 7 %, en raison de leur faible proportion dans la formulation. Entre 14 et 28 jours de cure, les différences de densité sont faibles, voire légèrement décroissantes, ce qui peut s'expliquer par des phénomènes tels que le retrait ou la perte d'eau libre.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, notamment les recherches portant sur l'incorporation de grignon d'olive, qui montrent également une baisse de densité atteignant 16 % pour un remplacement intégral. Ainsi, l'intégration de déchets de PVC permet d'obtenir des mortiers allégés, de manière similaire à d'autres approches utilisant des matériaux recyclés.[33, 36]

III.2.2 Dureté superficielle (Shore C)

(Les figures 57 et 58) présentes les résultats de la dureté superficielle Shore C en fonction des pourcentages de déchet de PVC et de fibres de polypropylène.

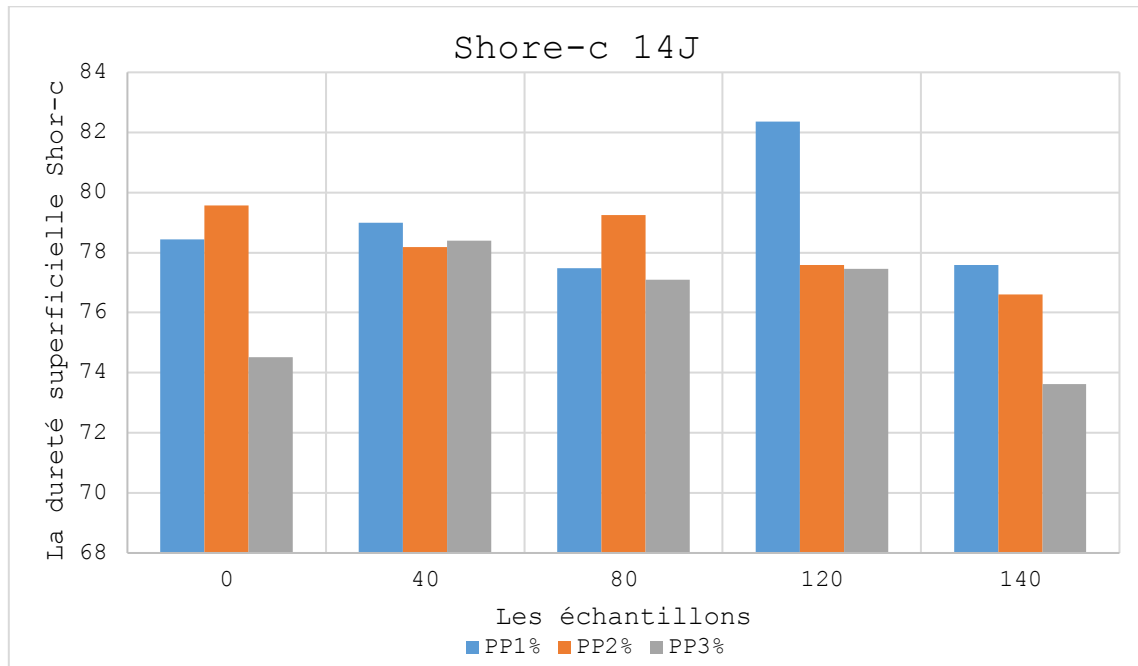


Figure 57: Variation de la dureté en fonction des pourcentages du déchet de PVC et de fibres de polypropylène 14j

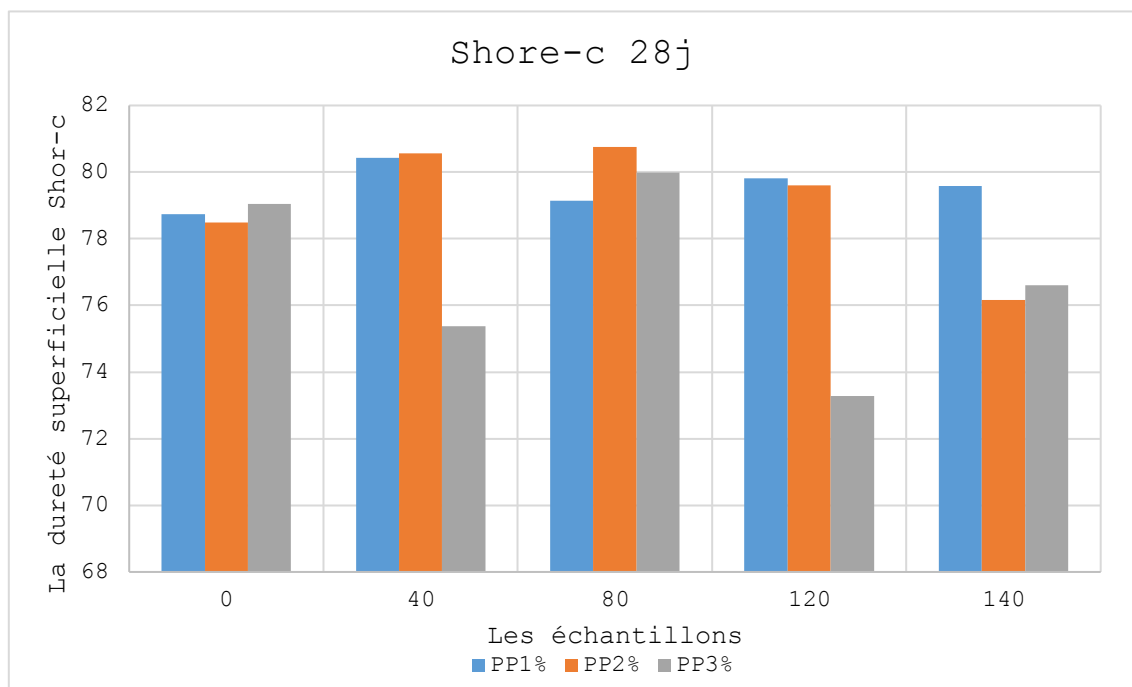


Figure 58: Variation de la dureté en fonction des pourcentages du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j

Les résultats montrent que la dureté Shore C des mortiers incorporant des déchets de PVC reste globalement stable (entre 70 et 82 Shor-C), quel que soit le taux de substitution (0 à 140 %) ou le dosage en fibres de polypropylène (1 % à 3 %). Cette stabilité est remarquable, notamment pour la formulation avec 1 % de fibres, qui atteint 82,37 Shor-C à 120 % de PVC. Une légère baisse est toutefois observée avec 3 % de fibres à forte teneur en déchets (73,61 Shor-C à 140 %). Le temps de cure influence peu la dureté, sauf pour certaines formulations spécifiques. Contrairement à d'autres études qui indiquent une perte au-delà de 25 % de substitution, les composites testés ici conservent de bonnes performances même à des taux élevés, ce qui les rend prometteurs pour des applications nécessitant une surface résistante [33], [34].

III.2.3 Résistance à la compression

(Les figures 59 et 60) présentent la variation de la résistance à la compression des mortiers de plâtre en fonction des pourcentages de fibres de polypropylène et de déchet de PVC, mesurée à 14 et 28 jours.

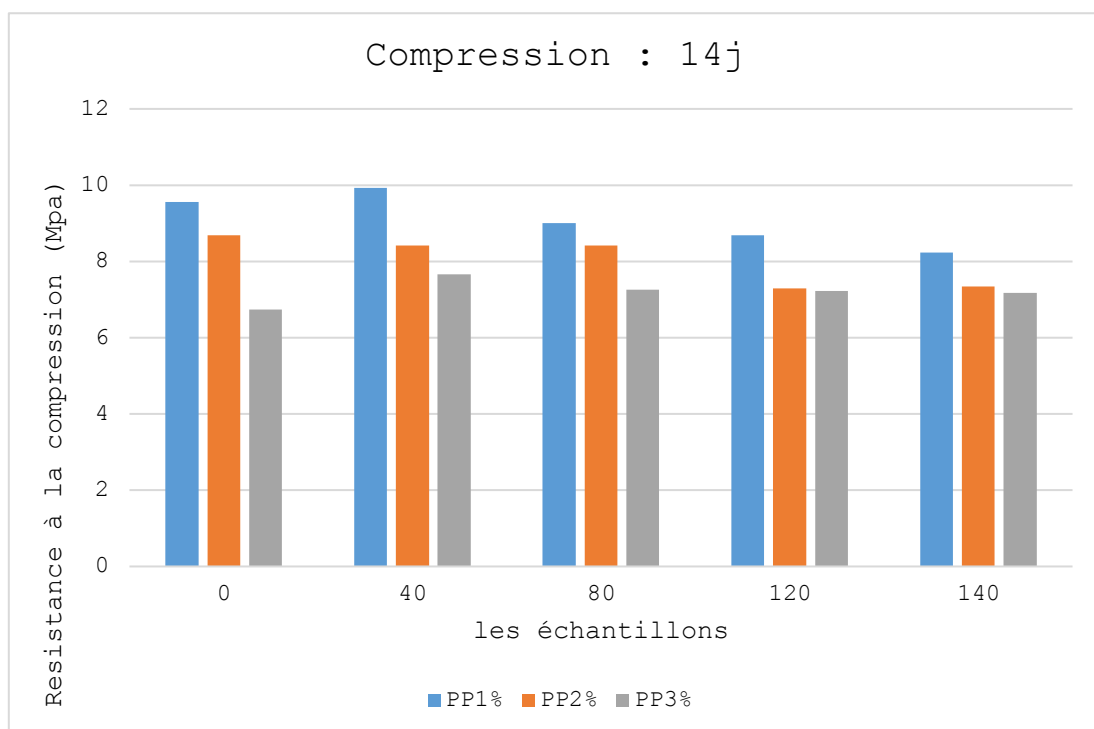


Figure 59: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des déchets de PVC et de fibres de polypropylène à 14j

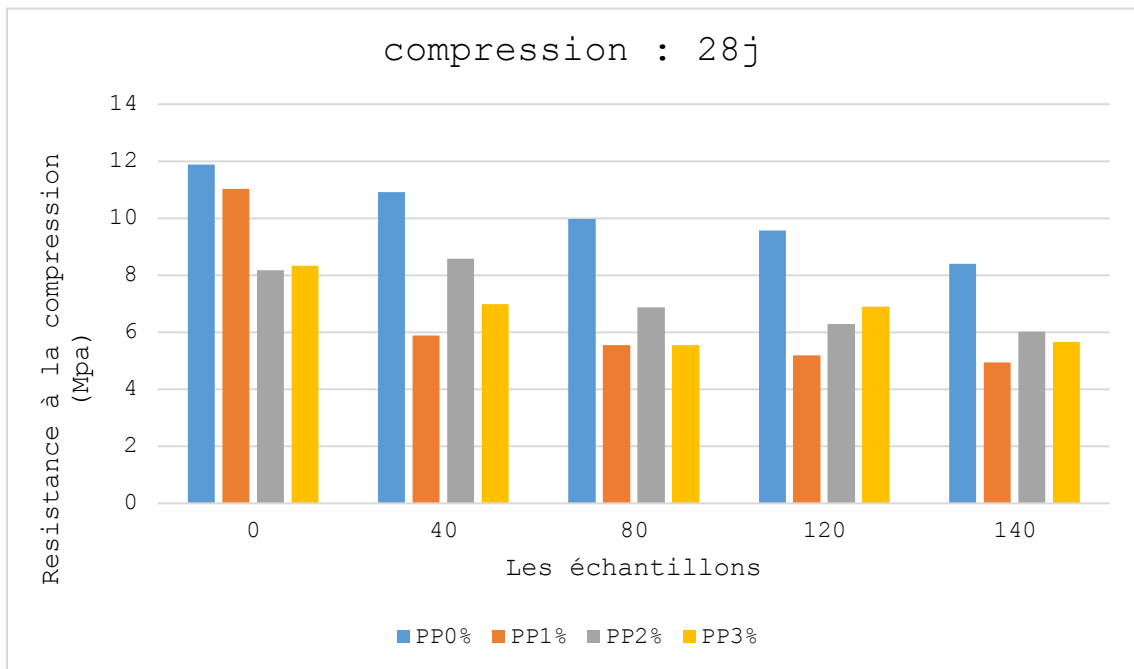


Figure 60: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des déchets de PVC et de fibres de polypropylène à 28j

Les essais de compression indiquent une diminution de la résistance du plâtre avec l'incorporation de déchets PVC (figure 59,60), en raison de leur nature inerte qui fragilise la matrice. La littérature indique des baisses pouvant atteindre 57 %, souvent associées à une porosité accrue. Les fibres de polypropylène n'apportent pas d'amélioration significative à la résistance et peuvent même diminuer la compacité. Le plâtre pur présente la meilleure performance, tandis qu'un seuil critique est noté autour de 140 % de déchets PVC. Un compromis acceptable pour des applications non structurales serait un dosage modéré (40 % de déchets PVC et 1-2 % de fibres PP), avec une amélioration potentielle par un traitement de surface des déchets [33, 34, 36].

III.2.4 Résistance à la Traction par flexion

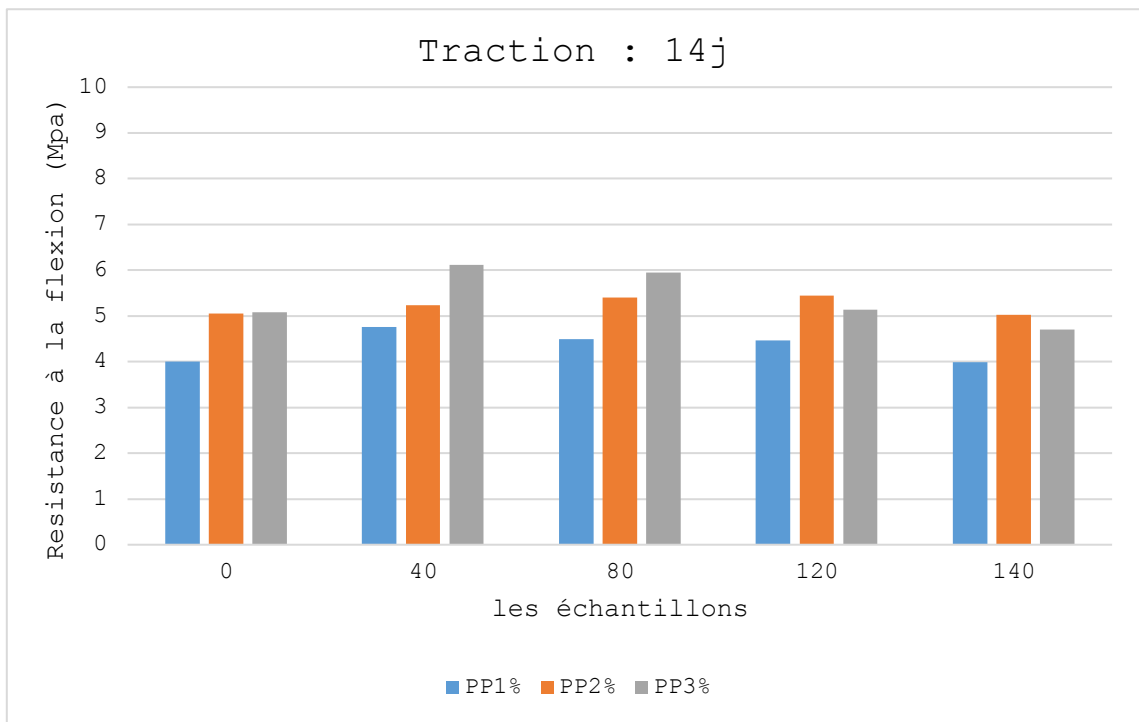


Figure 61: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j

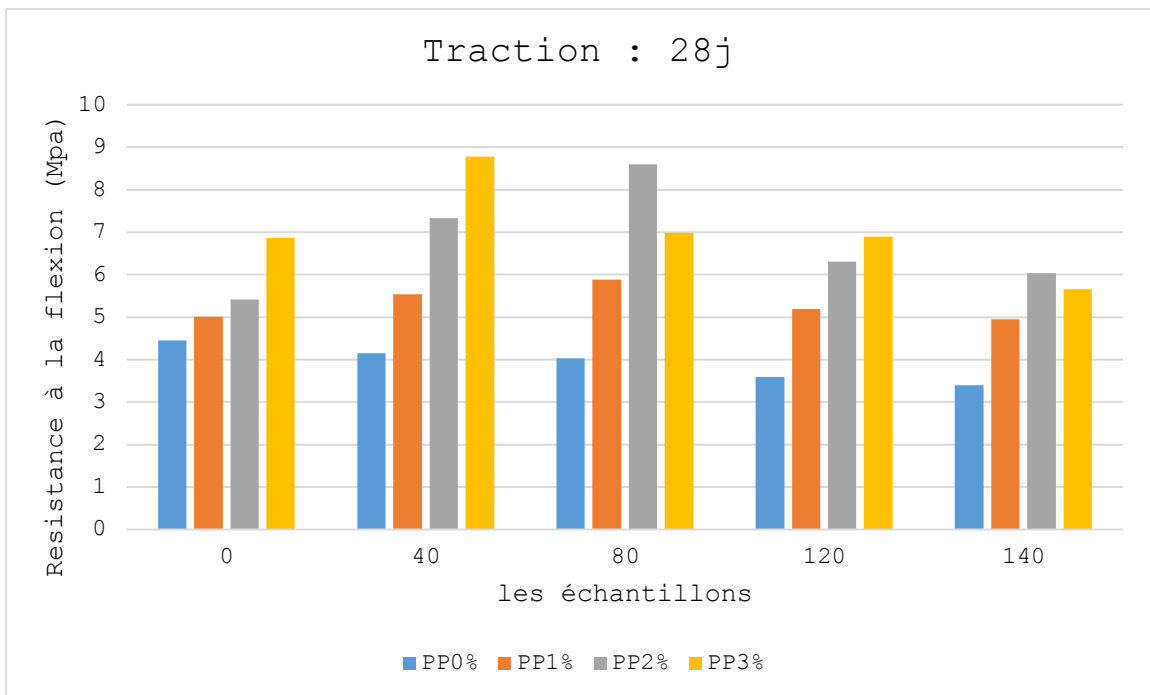


Figure 62: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j

D'après (la figure 61,62) l'ajout de fibres de polypropylène (PP) renforce considérablement la résistance, surtout après 28 jours de durcissement. Par exemple, un mélange contenant 3 % de fibres PP et 80 % de déchets PVC atteint 8,78 MPa, tandis qu'un plâtre sans fibres n'atteint que 4,45 MPa. Ce progrès s'explique par la capacité des fibres à freiner la propagation des fissures. Cependant, certaines recherches indiquent que des fibres excessivement longues peuvent compromettre la maniabilité du matériau. À la différence des déchets PVC, d'autres ajouts, tels que le grignon d'olive, diminuent fortement la résistance (-73 % à 14 jours). Dans cette étude, même avec un pourcentage élevé de déchets PVC (jusqu'à 80 %), toutes les formulations respectent la norme EN 13279-2 (2014), qui exige un minimum de 1 MPa. Un dosage de 2 à 3 % de fibres PP, associé à jusqu'à 80 % de déchets PVC, représente donc une option viable pour des applications non structurales.

III.2.5 Vitesse des Impulsions Ultrasonores (UPV) :

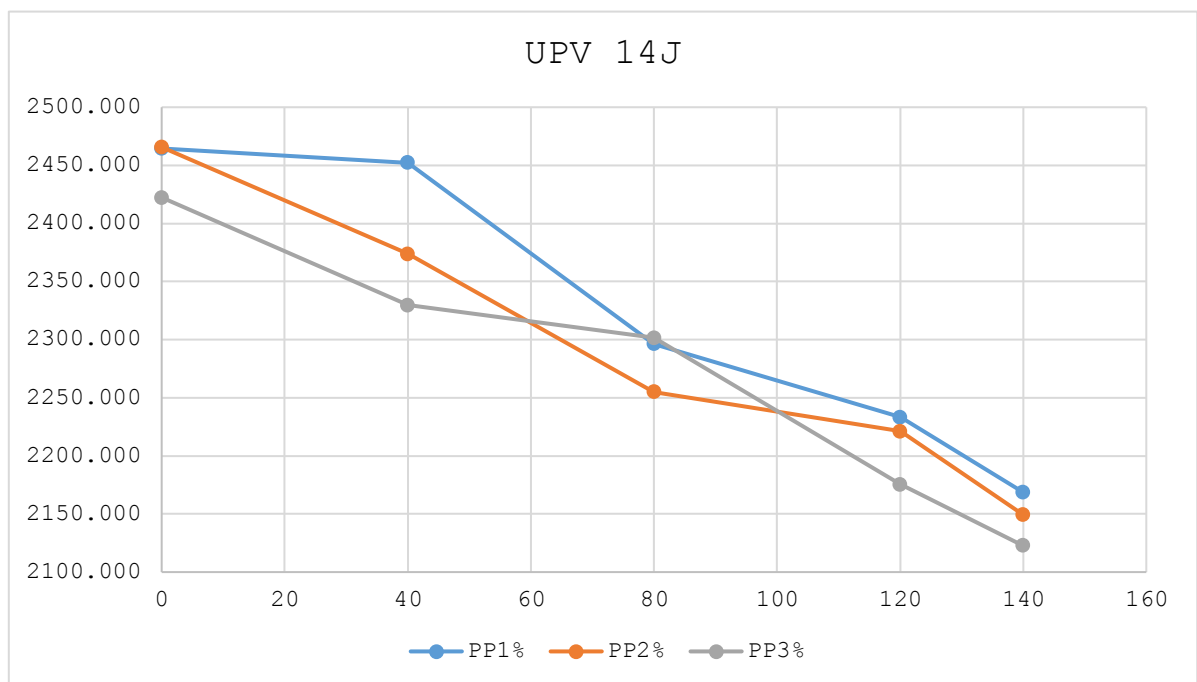


Figure 63: Variation de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j

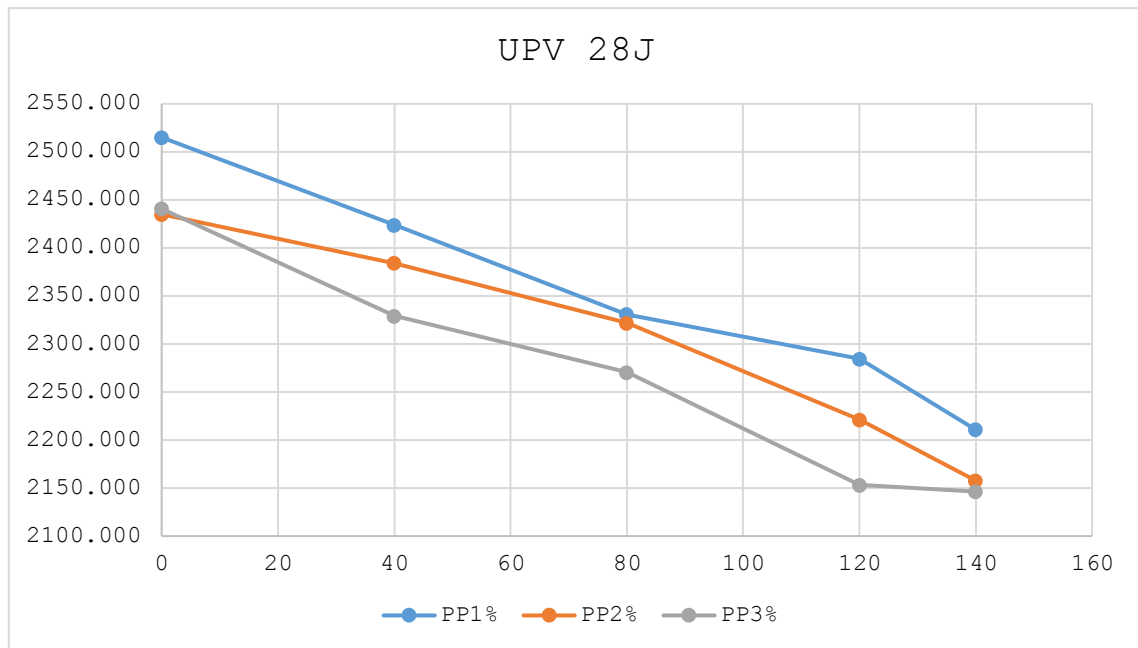


Figure 64: Variation de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j

L'incorporation de déchets PVC diminue progressivement la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, ce qui reflète une réduction de la densité et une augmentation de la porosité. Les valeurs maximales sont atteintes avec du plâtre pur (0 % PVC), tandis que les vitesses les plus faibles sont observées avec le taux maximal de déchets (140 %), ce qui confirme une perte de compacité. Les fibres de polypropylène n'apportent pas d'amélioration significative à la transmission ultrasonore, leur rigidité acoustique limitée et les microvides générés annulant tout effet positif. Bien que le durcissement entre 14 et 28 jours améliore légèrement la cohésion du matériau, cet effet reste marginal pour les mélanges à forte teneur en PVC. Pour des applications secondaires, une formulation équilibrée (40 à 80 % de déchets PVC et 1 à 2 % de fibres) offre le meilleur rapport performance/structure. Ces résultats soulignent l'importance de contrôler les dosages afin d'assurer des propriétés mécaniques adaptées à l'utilisation prévue.

III.2.6 Absorption Capillaire

L'absorption d'eau par capillarité a été étudiée pour tous les mortiers, avec incorporation de déchets de PVC et de fibres de polypropylène, aux âges de 14 et 28 jours.

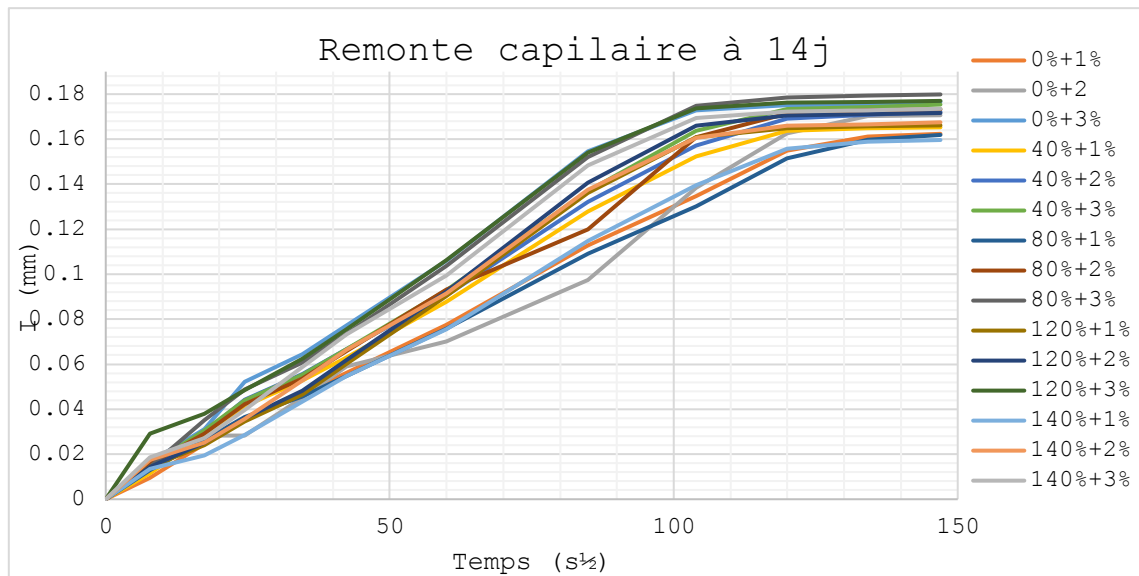


Figure 65: Variation de l'absorption capillaire en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 14j

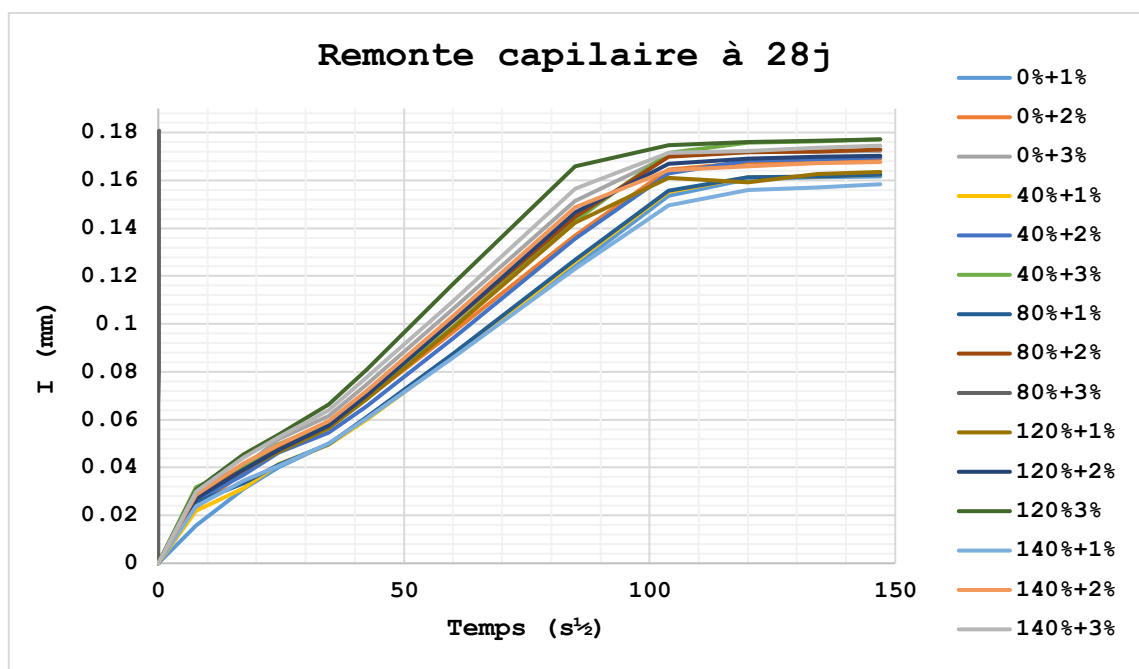


Figure 66: Variation de l'absorption capillaire en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène à 28j

Les tests de remontée capillaire effectués à 14 et 28 jours montrent une absorption qui augmente avec le temps, atteignant un plateau aux alentours de 140 minutes. L'ajout de déchets de PVC provoque une hausse significative de l'absorption, en raison de leur impact sur la porosité du matériau. Une tendance comparable est notée avec le grignon d'olive, confirmant l'effet des ajouts poreux sur la capillarité. À 28 jours, les valeurs

d'absorption diminuent légèrement par rapport à celles de 14 jours, indiquant un raffermissement progressif de la matrice grâce à l'hydratation prolongée du plâtre. De plus, les échantillons renforcés avec 3 % de fibres PP affichent une absorption légèrement plus élevée, ce qui est en accord avec la littérature : les fibres favorisent une microstructure plus poreuse. Néanmoins, les différences entre les formulations demeurent modérées, suggérant que la capillarité des composites est globalement maîtrisée, surtout après 28 jours de maturation. Ces résultats mettent en évidence l'influence des ajouts sur la porosité, tout en démontrant que le matériau conserve une stabilité acceptable sur le long terme.

III.2.7 Essai d'immersion-étuve (28 jours – deux cycles)

Les résultats des échantillons soumis à deux cycles de mouillage-séchage a 28 jours

Tableau 13: les effets des deux cycle étuve immersion sur différentes formulations

	Poids sec (g)	Cycle 01				Cycle 02			
		Poids après saturation (g)	Absorption d'eau (%)	Poids après séchage (g)	Poids /Poids initial	Poids après saturation (g)	Absorption d'eau (%)	Poids après séchage (g)	Poids /Poids initial
0%1%	1049,8	1297,6	23,60	1067,4	1,68	1296,8	23,53	1049,2	-0,1
0%2%	1002,8	1265	26,15	1001,8	-0,10	1269,8	26,63	1056,6	5,4
0%3%	970,4	1241,4	27,93	966,2	-0,43	1240,8	27,86	1023,4	5,5
40%1%	1028	1287	25,19	1051	2,24	1288,8	25,37	1078,2	4,9
40%2%	963,8	1225,2	27,12	990	2,72	1227,6	27,37	969,8	0,6
40%3%	925	1204,8	30,25	948	2,49	1207	30,49	982,4	6,2
80%1%	939	1187,6	26,47	965,8	2,85	1191,6	26,90	945,4	0,7
80%2%	901,4	1176,8	30,55	933,6	3,57	1180,6	30,97	899,4	-0,2
80%3%	875,8	1158,2	32,24	923	5,39	1161,2	32,59	961	9,7
120%1%	905,2	1160	28,15	971,4	7,31	1169	29,14	902,4	-0,3
120%2%	870,2	1136,2	30,57	882,2	1,38	1139,2	30,91	896,2	3,0
120%3%	837,4	1115	33,15	850,4	1,55	1117,4	33,44	904	8,0
140%1%	915,8	1162,2	26,91	950,6	3,80	1166	27,32	909,4	-0,7
140%2%	866,2	1128	30,22	899,8	3,88	1132,6	30,76	877	1,2
140%3%	835,2	1112,6	33,21	843	0,93	1117,6	33,81	888,6	6,4

Les tests de remontée capillaire effectués à 14 et 28 jours montrent une absorption qui augmente avec le temps, atteignant un plateau aux alentours de 140 minutes. L'ajout de déchets de PVC provoque une hausse significative de l'absorption, en raison de leur impact sur la porosité du matériau. Une tendance comparable est notée avec le grignon d'olive, confirmant l'effet des ajouts poreux sur la capillarité. À 28 jours, les valeurs d'absorption diminuent légèrement par rapport à celles de 14 jours, indiquant un raffermissement progressif de la matrice grâce à l'hydratation prolongée du plâtre. De plus, les échantillons renforcés avec 3 % de fibres PP affichent une absorption légèrement plus élevée, ce qui est en accord avec la littérature : les fibres favorisent une microstructure plus poreuse. Néanmoins, les différences entre les formulations demeurent modérées, suggérant que la capillarité des composites est globalement maîtrisée, surtout après 28 jours de maturation. Ces résultats mettent en évidence l'influence des ajouts sur la porosité, tout en démontrant que le matériau conserve une stabilité acceptable sur le long terme.

III.2.7.1 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression avant et après les essais d'étuve et d'immersion sont présentés.

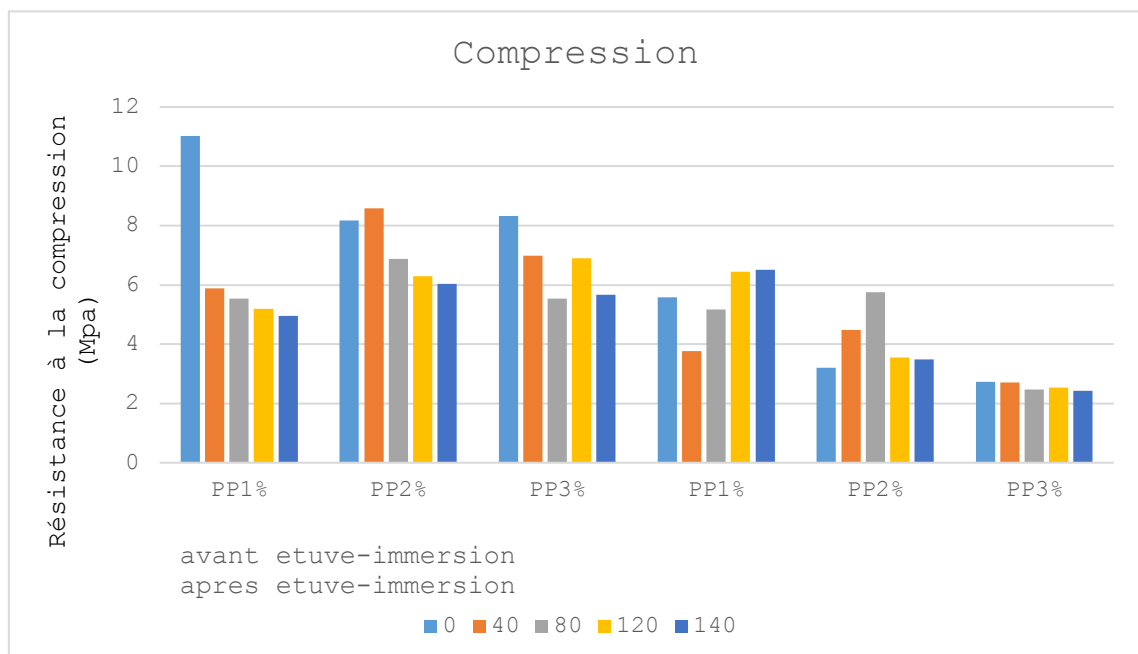


Figure 67 : Résistance à la compression avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours

Après deux cycles d'immersion et d'étuve, les mortiers composés de PVC et de fibres de polypropylène, en particulier ceux contenant 1 % de fibres, démontrent une bonne stabilité en compression, même face aux conditions de vieillissement. Par exemple, avec 140 % de déchets, la résistance diminue modérément de 8,41 MPa à 6,52 MPa, ce qui reste satisfaisant. Les formulations contenant 1 % de polypropylène affichent les meilleures résistances, ce qui suggère une microstructure plus homogène et une réduction des fissures dues aux cycles. En revanche, selon la littérature, les tests de traction sur des composites à base de grignon d'olive montrent un comportement opposé, avec une augmentation significative de la résistance après traitement, notamment pour les mortiers B0 (+17 %) et B2 (+42 %). Cette amélioration peut être attribuée à une meilleure cohésion ou à un durcissement post-traitement dans ces matériaux spécifiques[33].

III.2.7.2 Résistance à la traction par flexion

La résistance à la flexion a été mesurée sur des mortiers de plâtre avant leur exposition à deux cycles successifs d'étuvage et d'immersion.

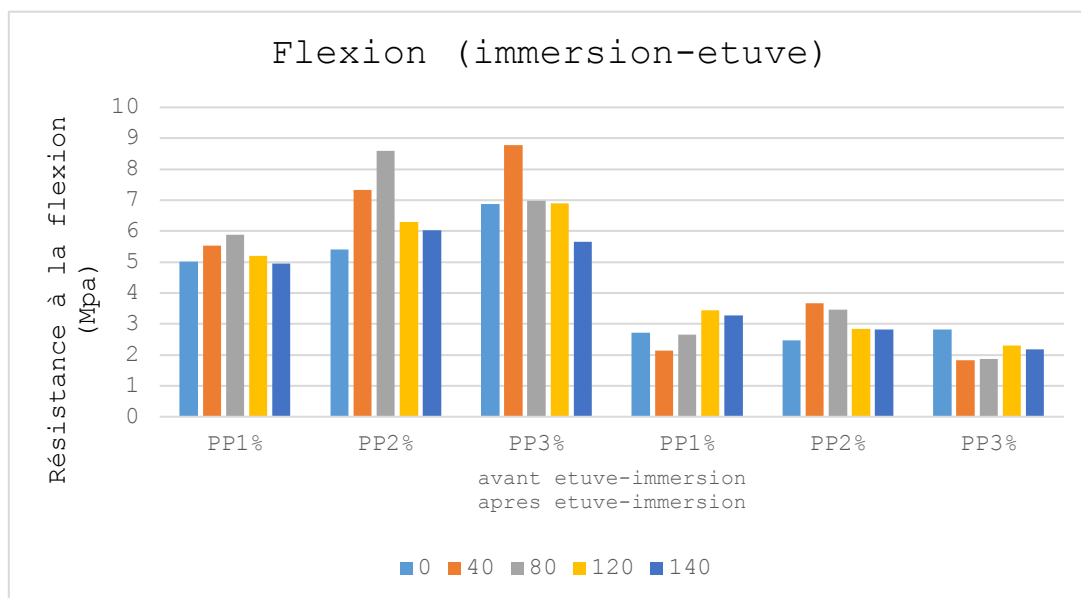


Figure 68: Résistance à la flexion avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours

L'essai de traction à la flexion indique que les cycles d'immersion et d'étuve ont un impact négatif sur les formulations contenant des fibres de PP, en particulier celles à 3 %, où la résistance diminue considérablement (de 6,87 MPa à 2,81 MPa à 0 % de déchets). Cette dégradation est attribuée à la détérioration des interfaces entre les fibres et le plâtre sous l'influence de l'humidité et des chocs thermiques. Les formulations avec 2 % de fibres semblent plus stables, surtout à 40 % de déchets, affichant une résistance de 3,66 MPa,

ce qui suggère un bon équilibre entre résistance et durabilité. En comparaison, les résultats de compression des mortiers à base de grignon d'olive montrent une baisse de résistance pour B1, B2 et B4 après exposition à l'eau, tandis que B3 présente une légère amélioration, bien que cela reste marginal. Cela met en évidence une hétérogénéité dans le comportement face à l'humidité en fonction du dosage en déchets.

III.2.7.3 Essai de dureté Shore C –avant/après immersion-étuve :

Les résultats de la dureté superficielle Shore C obtenus avant l'application de deux cycles étuve-immersion sont présentés pour les différents mortiers étudiés dans la figure 70 :

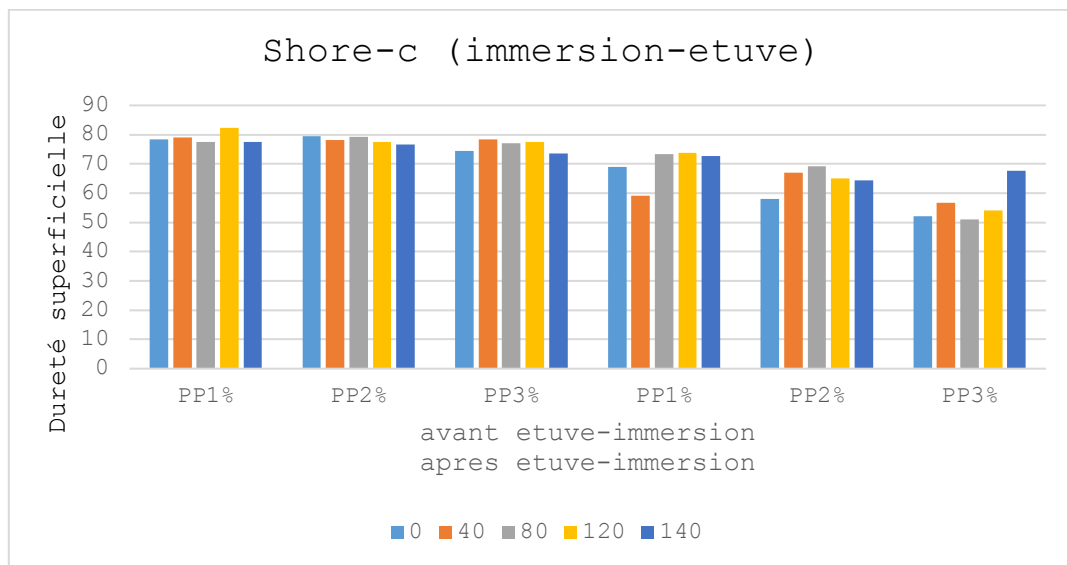


Figure 69: Dureté Shore C avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours.

Les cycles d'immersion et d'étuve entraînent une diminution générale de la dureté Shore C par rapport aux valeurs normales à 28 jours. Par exemple, l'échantillon PP1% sans déchet voit sa dureté passer de 68,97 à 59,19, ce qui traduit une perte de rigidité superficielle due à l'absorption d'eau et aux chocs thermiques. Les formulations à forte teneur en fibres (notamment PP3%) présentent les valeurs les plus faibles, atteignant jusqu'à 52,19 à 0 % de déchet, ce qui indique qu'une trop grande quantité de fibres peut engendrer des défauts et affaiblir la matrice. En revanche, les formulations PP1% conservent de meilleures performances après vieillissement, montrant une cohésion fibre-matrice supérieure et une résistance accrue aux conditions agressives.

III.2.7.4 Essai UPV – comparaison avant/après immersion-étuve

Les résultats de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) obtenus avant l'application de deux cycles étuve-immersion sont présentés pour les différents mortiers

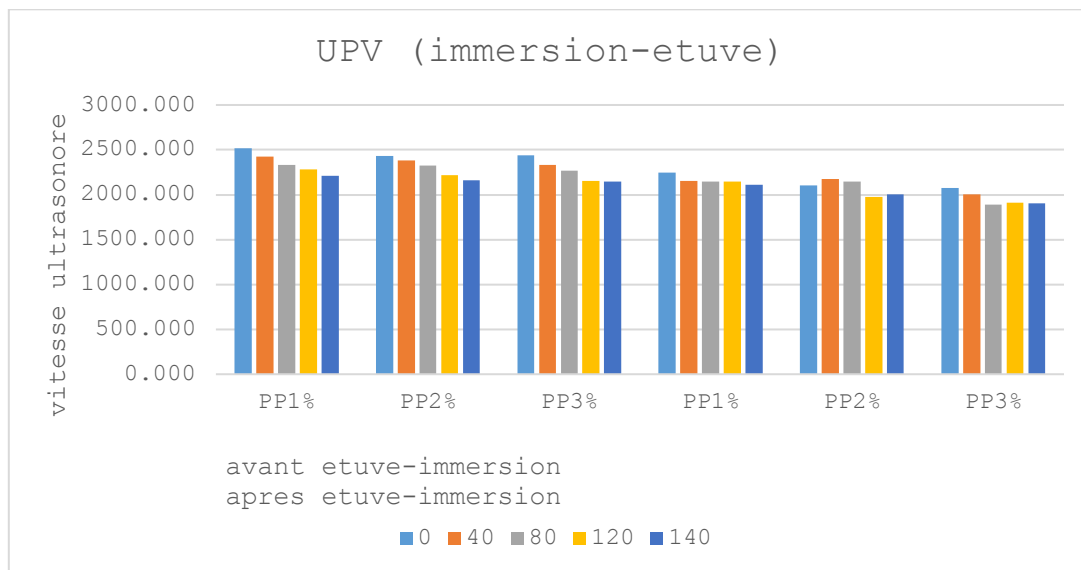


Figure 70: Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) avant et après le cycle étuve-immersion à 28 jours

L'essai **UPV** montre une diminution des vitesses de propagation des ondes ultrasonores après les cycles immersion-étuve, traduisant une dégradation de la compacité et de la structure interne. Par exemple, l'échantillon **PP1%** sans déchet passe de **2515 m/s** à **2249,3 m/s**, tandis que les formulations **PP3%** chutent plus fortement **jusqu'à 1902 m/s**, signe d'un affaiblissement structurel plus important. Cette baisse est liée à la formation de microfissures, à la perte de cohésion fibre-matrice, et à l'humidité résiduelle. Les formulations **PP1%** conservent la meilleure stabilité microstructurale face à ces sollicitations

III.2.8 Conclusion

L'ensemble des résultats expérimentaux met en évidence l'impact significatif de l'ajout de déchets de PVC broyé, en substitution du sable, et de fibres de polypropylène (PP), sur les performances mécaniques, physiques et durables des mortiers.

L'ajout de **PVC** permet d'alléger considérablement le matériau, réduisant sa densité, tout en maintenant des propriétés mécaniques acceptables jusqu'à un certain seuil. L'introduction de **fibres de polypropylène** améliore particulièrement la **résistance à la traction par flexion**, mais peut réduire la compacité si elle est excessive. Les essais de

durabilité (immersion-étuve) ont montré que certaines formulations conservent mieux leurs performances que d'autres, soulignant l'importance d'un dosage équilibré.

Sur la base de l'ensemble des essais, trois pourcentages de substitution en déchets PVC se distinguent selon les objectifs recherchés :

- **0 % (formulation de référence)** : meilleures résistances mécaniques (compression et flexion), densité élevée – matériau plus lourd. Moins durable sur le plan environnemental.
- **80 %** : bon compromis entre résistance mécanique et durabilité, idéal pour des applications nécessitant une certaine solidité.
- **120 %** : formulation **optimale globale**, offrant le meilleur équilibre entre légèreté, résistance à la compression et performance en flexion. Convient aux **blocs alvéolaires non porteurs**.
- **140 %** : formulation **extrêmement légère**, mais avec une baisse sensible de la résistance. À réserver pour des usages où la masse est plus critique que la solidité (ex : remplissage ou isolation).

Concernant les fibres de PP, un taux de **2 %** a montré les **meilleurs résultats globaux**, en particulier pour la flexion, sans trop nuire à la cohésion du mélange.

III.3 Les essais réalisés sur les blocs alvéolaire (33*25*8) cm

À partir des résultats sur les mortiers, trois pourcentages de déchet PVC (0 %, 80 % et 140 %) et deux taux de fibres PP (0 % et 2 %) ont été choisis pour la fabrication des blocs alvéolaires. Ces choix se basent sur leurs bonnes performances mécaniques, notamment en résistance à la compression et à la flexion. L'objectif est de développer des blocs légers, durables et adaptés aux cloisons, tout en valorisant des déchets plastiques.

III.3.1 Essai de Densité

La densité indique la compacité du matériau. C'est un critère essentiel pour la portance et le transport.

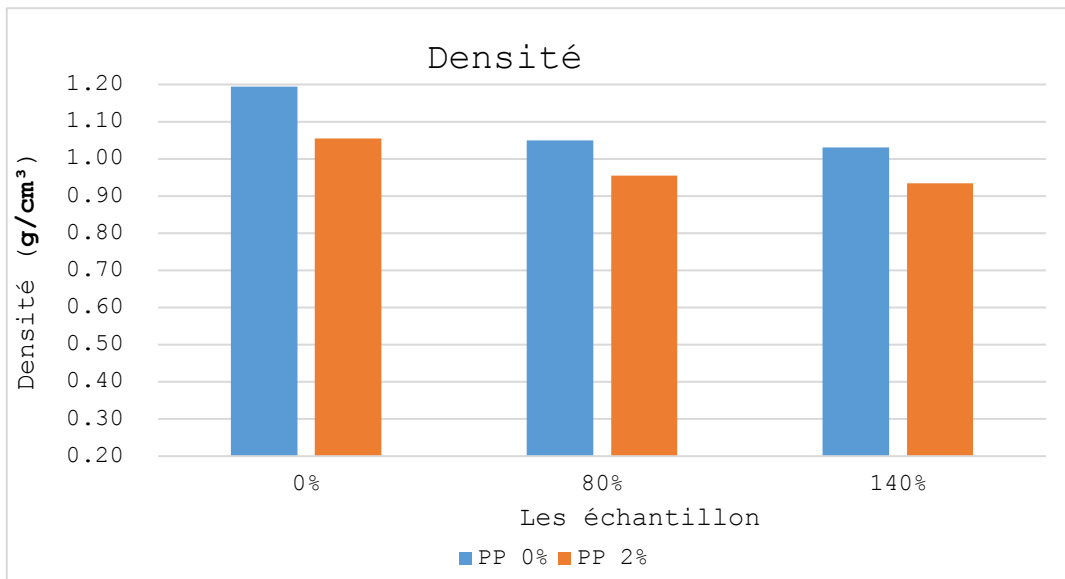


Figure 71: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène

Les résultats indiquent une réduction progressive de la densité des blocs alvéolaires en plâtre à mesure que le taux de substitution en PVC broyé augmente, cette diminution étant accentuée par l'ajout de fibres de polypropylène. À 140 % de PVC et 3 % de fibres, la densité descend jusqu'à 0,94, mettant en évidence l'allègement des blocs. Ce phénomène contraste avec certaines recherches, telles que celle de Romero-Gómez et al., où l'incorporation de déchets plastiques (PP et PA6) dans des composites de gypse a conduit à une légère augmentation de la densité, attribuée à une meilleure compacité interne, une granulométrie fine et une bonne adhérence entre les particules plastiques et la matrice. Dans notre étude, la structure alvéolaire, associée à la faible densité du PVC et à une interface probablement moins cohésive, favorise une densité réduite. Cette légèreté peut constituer un atout pour des applications non porteuses telles que les cloisons intérieures, mais elle nécessite un contrôle rigoureux des performances mécaniques afin d'assurer la durabilité des blocs [32].

III.3.2 Essai de Dureté Shore C

Cet essai mesure la dureté superficielle des blocs, utile pour évaluer leur résistance à l'abrasion et aux charges localisées

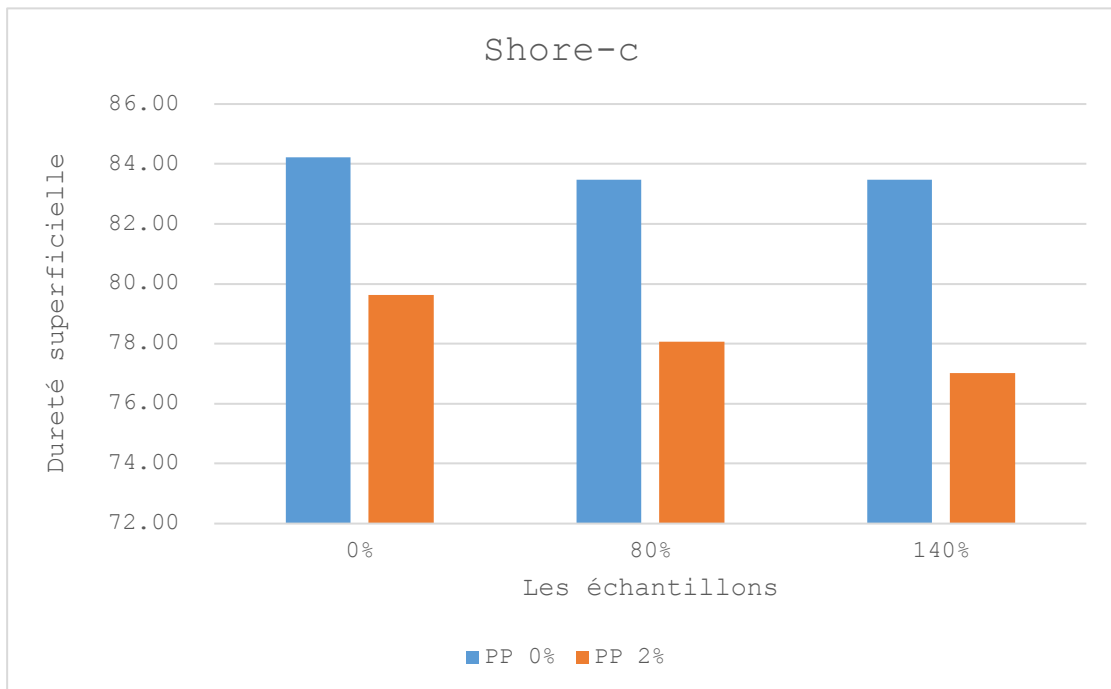


Figure 72: Variation de la dureté en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène

L'incorporation de fibres de polypropylène dans les blocs alvéolaires provoque une réduction modérée de la dureté superficielle Shore C, avec des valeurs variant de 82–84 à 75–79, même en l'absence de PVC. Cette tendance se confirme également à des concentrations de PVC plus élevées (80 % et 140 %). En revanche, la littérature suggère que l'ajout de déchets plastiques tels que les fibres de PA6 ou les particules de PP n'influence que faiblement la dureté, qui demeure élevée (entre 95,1 et 95,8 Shore C), ce qui permet de classer ces matériaux parmi les blocs à haute densité. Cette disparité pourrait être attribuée à une meilleure compatibilité entre les polymères et la matrice, à une structure plus compacte, ou à un ancrage plus efficace des fibres dans les formulations examinées, contrairement aux blocs alvéolaires étudiés dans ce travail [32].

III.3.3 Essai de Compression

Cet essai mesure la capacité des blocs à résister à une charge verticale.

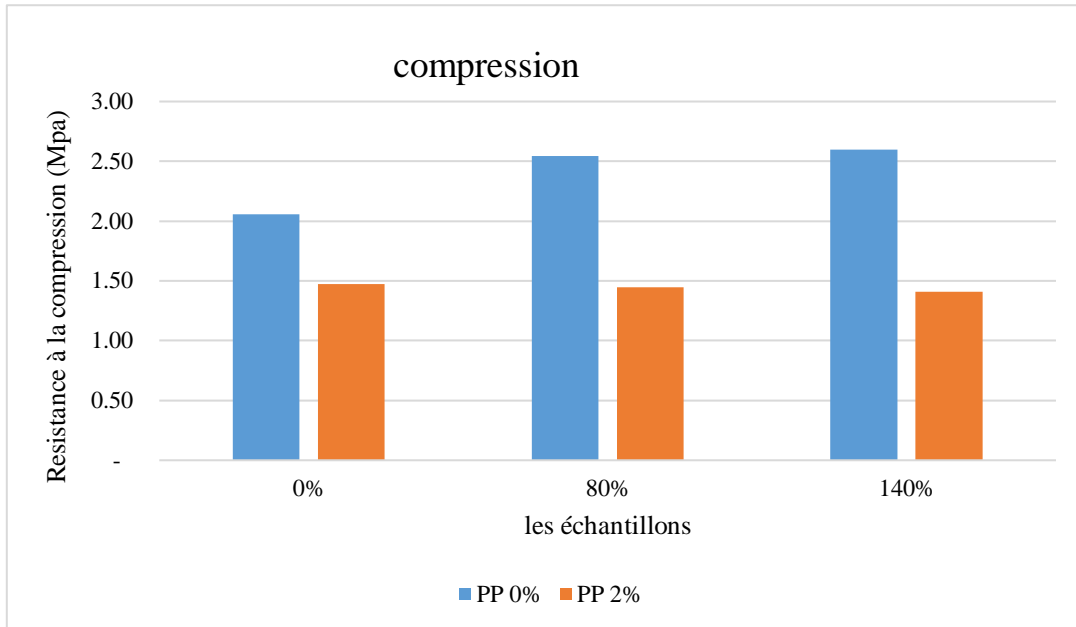


Figure 73: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de PVC et de fibres de polypropylène

Le remplacement partiel du sable par du PVC broyé augmente la résistance à la compression des blocs alvéolaires, atteignant jusqu'à 2,60 MPa avec 140 % de PVC sans fibres. En revanche, l'incorporation de fibres de polypropylène diminue cette résistance, en raison d'une dispersion inadéquate et d'une compacité insuffisante. La littérature présente des résultats similaires : les fibres PA6 renforcent la résistance dans de petits blocs, mais leur efficacité décroît à une échelle plus grande, en particulier avec des alvéoles. Ces constatations mettent en évidence l'importance d'optimiser la formulation en fonction de la géométrie des blocs afin de maintenir les performances mécaniques [32].

III.3.4 Essai de Traction

Les résultats de la résistance à la flexion obtenus sur des blocs alvéolaires en plâtre incorporant des déchets de PVC et des fibres de polypropylène, a 28 jours, sont illustrés dans la figure 77.

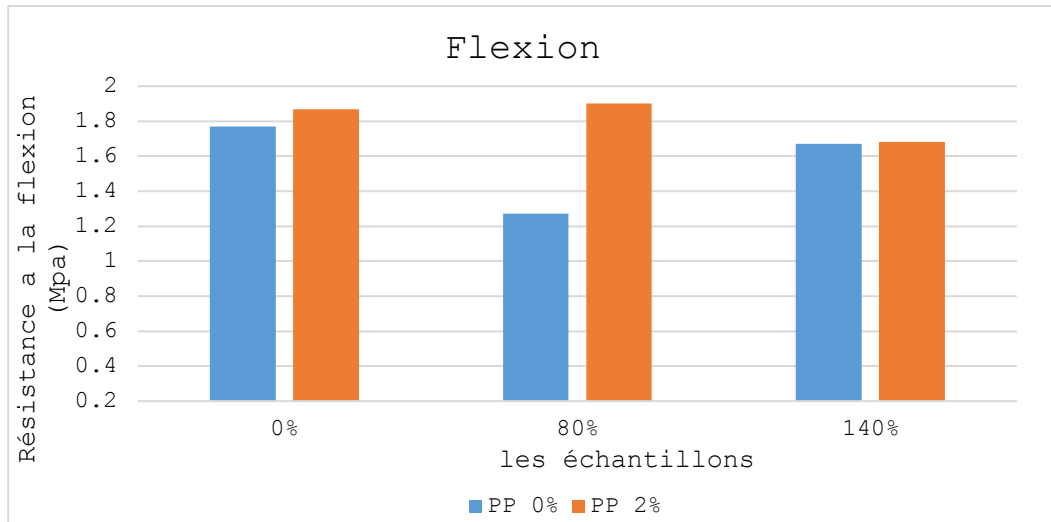


Figure 74: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène

L'analyse de traction révèle que les fibres de PP augmentent légèrement la résistance des blocs avec une faible teneur en PVC (de 1,77 à 1,87 MPa), mais leur impact est minimal à des teneurs élevées. À 80 % de PVC, la résistance diminue, tandis qu'à 140 %, elle augmente sans l'ajout de fibres, ce qui suggère une meilleure distribution du PVC. En comparaison, les études antérieures montrent que les fibres de PA6 améliorent significativement la résistance à la flexion (~8 %), alors que les fibres de PP entraînent une diminution (~6,5 %). Cette différence peut être attribuée à la supériorité mécanique des fibres de PA6. En somme, les fibres de PP présentent un effet limité et sont moins efficaces que les fibres de PA6 mentionnées dans les recherches précédentes [32].



Figure 75 : L'essai de traction sur le bloc sans fibre PP

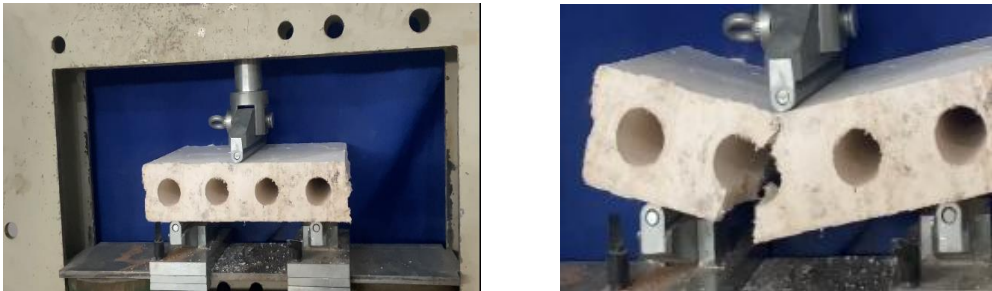


Figure 76 : L'essai de traction sur le bloc avec fibre PP

Tableau 14: Résumé final des essais

Essai	Influence du PVC	Influence des fibres de PP
Traction	Diminue à 80 %, remonte à 140 %	forte amélioration
Compression	Légère Augmentation sans fibres	Forte diminution avec fibres
Dureté	Assez stable	Baisse nette avec fibres
Densité	Diminue régulièrement	Diminue encore plus avec fibres

III.4 Les essais réalisées sur les plaques (25*25*2) cm

III.4.1 Densité

La densité des blocs alvéolaires diminue globalement avec l'augmentation du taux de PVC, notamment à 80 %, où elle atteint un minimum de 1,11 g/cm³ avec 2 % de fibres de PP. L'incorporation de fibres accentue légèrement cette diminution, en raison de la faible densité du PVC broyé et de la dispersion des fibres, qui créent davantage de vides dans la matrice

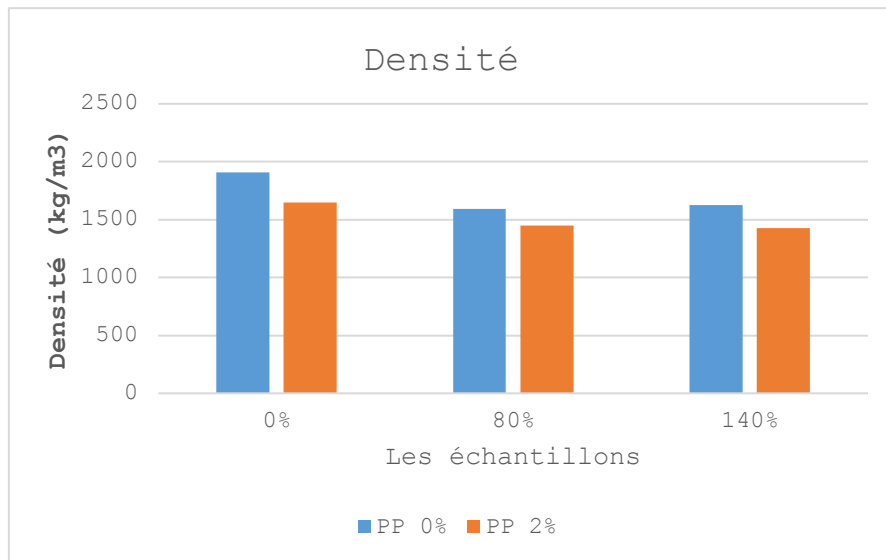


Figure 77: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène

III.4.2 Diamètre d'impact

L'incorporation de PVC dans les blocs accroît la taille de l'empreinte d'impact, ce qui indique une absorption d'énergie moins efficace. En revanche, les fibres de polypropylène réduisent la fissuration et augmentent la résistance aux chocs. La littérature indique que le caoutchouc (ELT), en raison de son élasticité, diminue l'empreinte d'impact, contrairement au PVC. Ces distinctions mettent en évidence l'effet opposé de ces deux types de déchets plastiques sur la durabilité des matériaux [35].

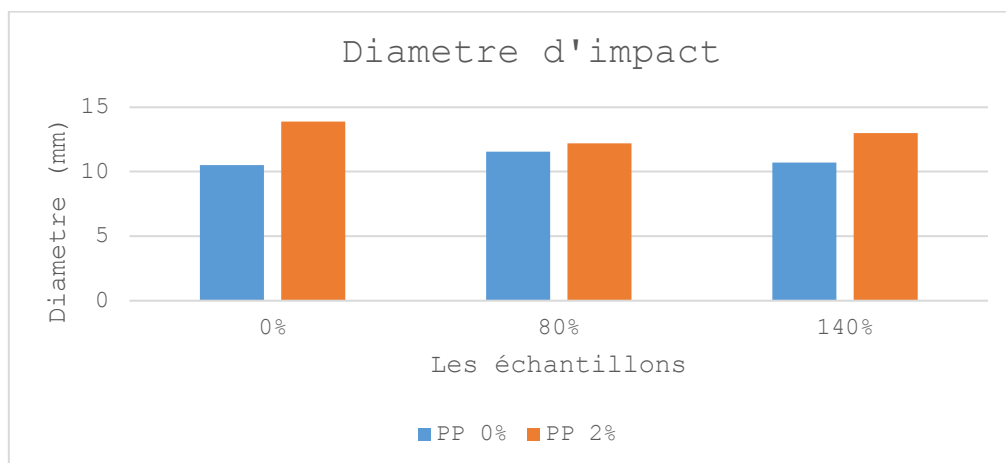


Figure 78: Variation du diamètre d'impact en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène

III.4.3 Profondeur d'impact (résistance au choc)

Les fibres de polypropylène augmentent considérablement la résistance à l'impact en hauteur. Avec 0 % de PVC, l'incorporation de 2 % de fibres permet d'atteindre 1,03 m, alors qu'en l'absence de fibres, la hauteur est de 0,58 m. À 140 % de PVC, la hauteur diminue légèrement, mais demeure supérieure avec les fibres (0,90 m contre 0,61 m). Cela valide le rôle d'amortissement des fibres, même dans un matériau allégé.[36]

$$\frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

- **D**: diamètre de la bille = 48cm
- **d** : diamètre de l'empreinte laissée
- **f** : profondeur de l'empreinte

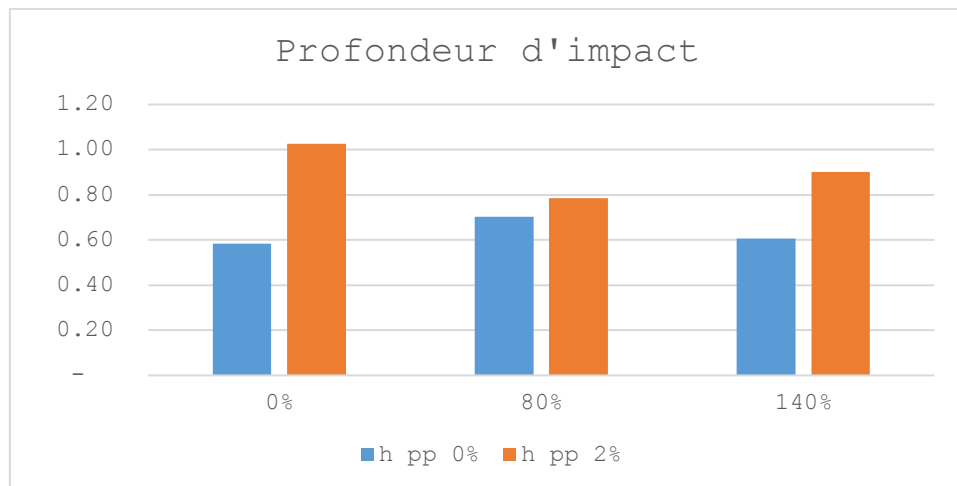
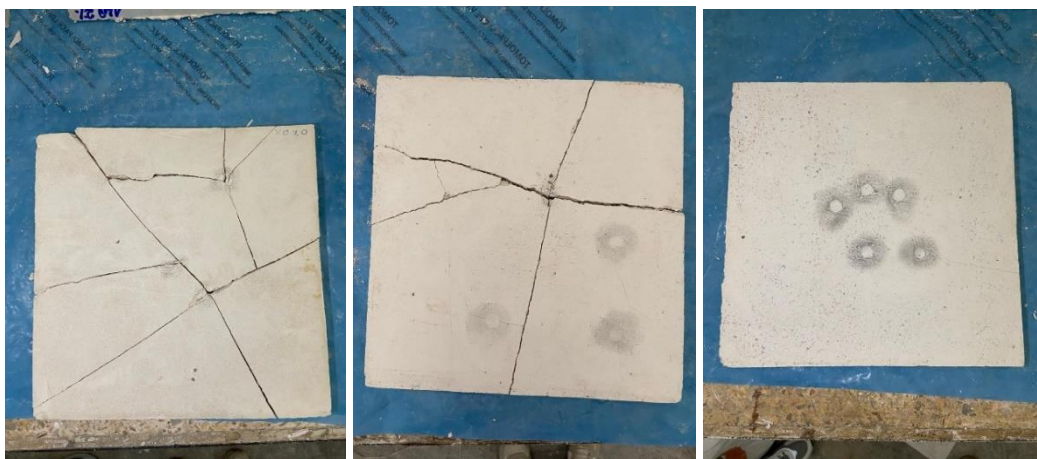


Figure 79: Variation de la hauteur d'impact en fonction du pourcentage du déchet PVC et fibre polypropylène



(a)

(b)

(c)

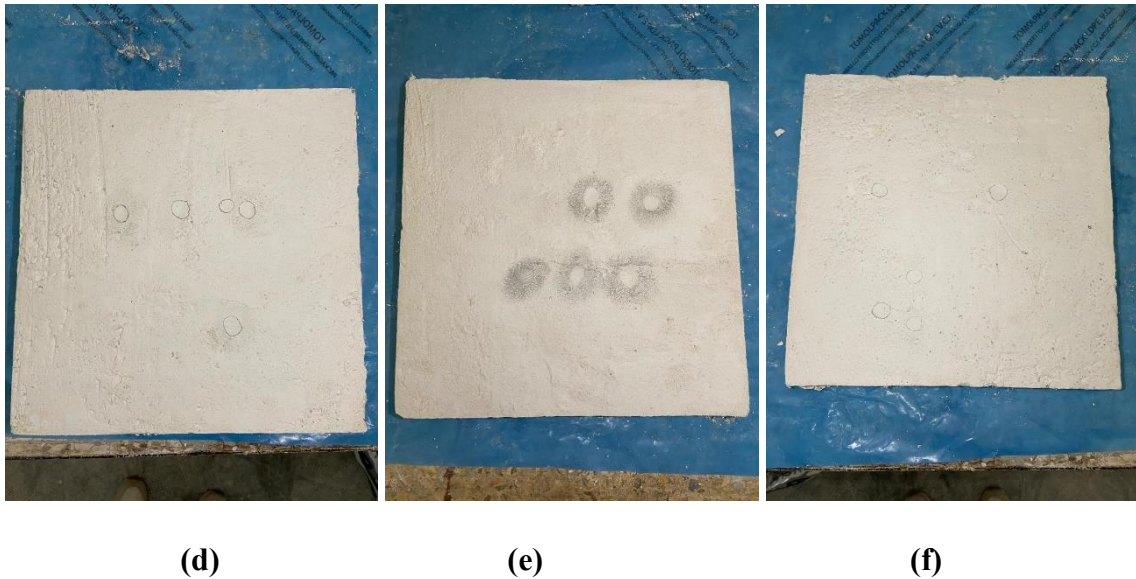


Figure 80: a)0%PVC 0%PP , b)80%PVC 0%PP , c)140%PVC 0%PP , d)0%PVC 2%PP, e)80%PVC 2%PP, f)140%PVC 2%PP

L'essai d'impact a révélé que l'échantillon témoin sans ajout de déchets ni de fibres était très fragile, se cassant dès la première chute. L'introduction de 80 % de déchets de PVC a légèrement amélioré la résistance, avec une rupture à la deuxième chute. Les échantillons contenant soit 140 % de déchets, soit des fibres de polypropylène (2 %) combinées à 0 % ou 80 % de déchets ont montré une excellente performance, ne se rompant pas après cinq chutes, démontrant l'effet renforçant des fibres et/ou d'un taux élevé de PVC sur la résistance aux chocs.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer l'influence de l'incorporation de déchets de PVC broyé et de fibres de polypropylène sur les performances physico-mécaniques de composites à base de plâtre. Les essais ont révélé que l'augmentation du taux de PVC réduit significativement la densité des matériaux, favorisant leur légèreté, mais engendrant une baisse de compacité à taux élevés (120 % et 140 %). L'ajout de fibres, notamment à 2 %, a amélioré la dureté superficielle, la résistance à la traction par flexion et la stabilité face aux cycles humidité-séchage.

Les meilleures performances globales ont été obtenues pour la formulation combinant 80 % de PVC et 2 % de fibres, offrant un bon équilibre entre masse réduite, tenue mécanique et durabilité. Les blocs et plaques issus de cette formulation sont jugés adaptés pour les cloisons intérieures non porteuses. Ces résultats soulignent l'intérêt de ce type de composites dans le cadre d'une construction plus durable, intégrant des matériaux recyclés et contribuant à la valorisation des déchets plastiques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Des prototypes normalisés d'éléments en plâtre allégé – mortiers (4×4×16 cm) , blocs alvéolaires (33×25×8 cm) et plaques planes (25×25×2 cm) – ont été développés en incorporant des déchets de PVC broyé en substitution partielle du sable, ainsi que des fibres de polypropylène (PP) comme renfort. Les performances physico-mécaniques, hydriques et à l'impact de ces éléments ont été évaluées expérimentalement et comparées au matériau de référence, permettant de tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de PVC permet de réduire la densité des matériaux jusqu'à 20%, tout en gardant une résistance mécanique satisfaisante jusqu'à 80% de substitution.
- Les fibres PP, notamment à 2%, améliorent la résistance à la flexion et aux chocs, avec des performances maximales observées à 80% de PVC.
- Les essais d'absorption et de vieillissement ont montré que les formulations à base de 2% de fibres sont plus stables face à l'humidité et aux cycles thermiques.
- La dureté de surface diminue légèrement avec les fibres, mais reste dans des limites acceptables.
- Les mortiers avec 80% de PVC et 2% de fibres PP offrent le meilleur compromis entre résistance mécanique et durabilité.
- Les formulations à 140% de PVC sont les plus légères et conviennent aux éléments de remplissage ou d'isolation.
- Les plaques renforcées avec 2 % de fibres PP ont présenté les meilleures performances à l'impact, idéales pour des systèmes préfabriqués.

Ainsi, les composites à base de plâtre incorporant des déchets plastiques proposés présentent des performances prometteuses pour des applications en cloisonnement ou en panneaux intérieurs non porteurs. Les déchets de PVC permettent d'obtenir des matériaux plus légers, plus durables et plus économiques, en réduisant le recours aux matières premières traditionnelles. Les fibres de PP renforcent quant à elles le comportement en traction et face aux chocs. Enfin, bien que les taux de substitution en PVC aient été élevés, l'intérêt environnemental est manifeste grâce à la réduction des ressources naturelles utilisées et à la valorisation des déchets plastiques. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'amélioration de la dispersion des fibres et le recours à des procédés de traitement des déchets moins énergivores, afin d'optimiser à la fois les performances mécaniques, l'impact économique et l'empreinte écologique de ces matériaux.

Références Bibliographies

- [1] M. Sylvain, « Étude de comportement mécanique du plâtre prise en relation avec sa microstructure », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon (France), 2001.
- [2] D. Daligand, « Plâtre », *Superstructures Bâtim.*, mai 2002, doi: 10.51257/a-v3-c910.
- [3] A. Noui, « Plâtre ». Institut des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Batna 2, s.d.
- [4] A. Djoudi, « Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leur renforcement par les fibres végétales du palmier dattier », Thèse de magister, Université de Laghouat, Laghouat, Algérie, 2001.
- [5] M. Rachedi, « Contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier », Thèse de doctorat.
- [6] C.N.E.R.I.B. (Centre National d'Études et de Recherche Intégrées au Bâtiment), « Recommandations pour la construction en plâtre », Centre National d'Études et de Recherche Intégrées au Bâtiment (CNERIB), Algérie, Rapport technique, 2003.
- [7] Expert-plâtrier.com, « Les différentes utilisations du plâtre », expert-plâtrier.com. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.expert-platrier.com/differentes-utilisations-platre>
- [8] Espazium, « Le plâtre ». 2023. Consulté le: 23 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.espazium.ch/fr/actualites/le-platre-ce-bon-rien-si-extraordinaire>
- [9] Techniques de l'Ingénieur, « Produits préfabriqués en plâtre ». 2022. Consulté le: 23 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/platre-c910/produits-prefabriques-c910niv10006.html>
- [10] Livios, « Préfabrication : les principaux avantages ». n.d. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.livios.be/fr/article/48290/prefabrication/>
- [11] Knauf, « Les avantages des blocs de plâtre ». n.d. [En ligne]. Disponible sur: <https://knauf.com/fr-BE/produits-phares/solutions-a-base-de-platre/isolava/avantages-blocs-platre>
- [12] M. Yagoub, « Évaluation de la qualité du béton de fibres in situ : cas de béton autoplaçant avec des fibres mixtes », *Arch. L'Université Biskra*.
- [13] M. I. Romero-Gómez, R. V. Silva, I. Flores-Colen, et J. De Brito, « Influence of polypropylene residues on the physico-mechanical and water-resistance properties of gypsum plasters », *J. Clean. Prod.*, vol. 371, p. 133674, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133674.
- [14] O. Benjeddou, C. Soussi, M. Benali, et R. Alyousef, « Experimental Investigation of a New Ecological Block Made by Mixing Gypsum Plaster and Desert Sand », *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 45, n° 5, p. 4037-4052, mai 2020, doi: 10.1007/s13369-020-04362-4.
- [15] H. Y. Binti Katman, W. J. Khai, O. Benjeddou, et N. Mashaan, « Experimental Investigation of a New Design of Insulation Gypsum Plaster Blocks », *Buildings*, vol. 12, n° 9, p. 1297, août 2022, doi: 10.3390/buildings12091297.
- [16] S. Adamopoulos, D. Foti, E. Voulgaridis, et C. Passialis, « Manufacturing and Properties of Gypsum-Based Products with Recovered Wood and Rubber Materials », *BioResources*, vol. 10, n° 3, p. 5573-5585, juill. 2015, doi: 10.15376/biores.10.3.5573-5585.
- [17] S. Adamopoulos, D. Foti, E. Voulgaridis, et C. Passialis, « Manufacturing and Properties of Gypsum-Based Products with Recovered Wood and Rubber Materials », *BioResources*, vol. 10, n° 3, p. 5573-5585, juill. 2015, doi: 10.15376/biores.10.3.5573-5585.
- [18] P. Villoria Sáez, M. Del Río Merino, M. Sorrentino, C. Porras Amores, J. Santa Cruz Astorqui, et C. Viñas Arrebola, « Mechanical Characterization of Gypsum Composites Containing Inert and Insulation Materials from Construction and Demolition Waste and

- Further Application as A Gypsum Block », *Materials*, vol. 13, n° 1, p. 193, janv. 2020, doi: 10.3390/ma13010193.
- [19] M. I. Romero-Gómez, R. V. Silva, J. De Brito, et I. Flores-Colen, « Prototype of alveolar gypsum blocks with plastic waste addition for partition walls: Physico-mechanical, water-resistance and life cycle assessment », *J. Clean. Prod.*, vol. 432, p. 139810, déc. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139810.
- [20] Benyoubi, T. ; Hammoumi, S., « Contribution à l'étude des matériaux composites plâtres/déchets ». 2020.
- [21] Chaouche, M. W et Akaf, H. F, « Contribution à l'étude des matériaux composites biosourcés à base de plâtre », Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie, Génie Civil, spécialité Structures, 2023.
- [22] R. M., K. A, et Mokhtari, A, « Contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier », *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 20, n° 2, p. 243-251.
- [23] Nations Unies (ou ONU / Secrétariat de Bâle, selon le cas), « Convention de Bâle ». 1989. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.basel.int/>
- [24] Barles, S., « Les rejets du métabolisme ». 2005.
- [25] Gobbo, E., « Déchets de construction, matière à conception : Analyse des stocks et flux de matières dans le cadre des opérations de rénovation énergétique en Région de Bruxelles-Capitale ». novembre 2015.
- [26] Union européenne / Parlement européen, « Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil ». 19 novembre 2008. [En ligne]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>
- [27] « Les déchets domestiques : Typologie et classification ». 2019.
- [28] D.D.construction, « Déchets de chantier / déconstruction : gestion et valorisation ». 2008. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.clikeco.com/P-57-88-F1-dechets-de-chantier-deconstruction-gestion-et-valorisation.html>
- [29] D. C. Miles et J. H. Briston, « Technologie des polymères ». DUNOD, 1968.
- [30] B. J, *Les matières plastiques : chimie et applications*. Paris: Technique et Documentation – Lavoisier, 1982.
- [31] S. M. Shin, H. Jon, Y. H. Kim, et A. Okuwaki, « Plasticizer leaching from flexible PVC in low temperature caustic solution », *Polymer Degradation and Stability (abrégé « Polym. Degr. & Stab. »)*, vol. 78, p. 511-517, 2002.
- [32] M. Malha, « Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de doum », Thèse de Doctorat, Université Mohammed V, Agdal, Faculté des Sciences, Rabat, 2013. [En ligne]. Disponible sur: http://toubkal.imist.ma/bitstream/handle/123456789/9626/THESE_MALHA.pdf
- [33] I. Slama, « Caractéristiques physico-mécaniques des composites bois-plastiques provenant de la valorisation des résidus des panneaux MDF – étude des possibilités de recyclage », Thèse de maîtrise en ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, 2008.
- [34] Profialis, « Profialis – Fabricant de profilés PVC pour menuiseries ». s.d. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.profialis.com>
- [35] Groupe Chiali, « Produits et activités PVC ». s.d. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.chiali.com>
- [36] M. Álvarez, P. Santos, P. Lopes, D. Abrantes, et D. Ferrández, « Performance Characterisation of a New Plaster Composite Lightened with End-of-Life Tyres' Recycled Materials for False Ceiling Plates », *Materials*, vol. 15, n° 16, p. 5660, août 2022, doi: 10.3390/ma15165660.

- [37] F.B. Houti , H. Hachemi, A.S. Benosman, O. Taleb, C. Seladji, M. Mouli, I.F.Z. Mesli, A. Badache, M. Arici, Assessment of hygrothermal performance in plaster mortar composites incorporating polyvinyl chloride waste aggregates. *J Build Rehabil* 10, 91 (2025). <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00599-4>.