



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique

جامعة محمد البشير الابراهيمي برج بوعريريج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

قسم الهندسة المدنية

Département de génie civil



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **Master**

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil

THEME

Etude des propriétés-physico-mécaniques d'un composite à base de plâtre

Présenté par :

Tahar BOUAISSI

Soutenu le : -0/07/2025

Encadré par :

Dr. Hamza LAOUBI

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Je remercie avant tout Allah de m'avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail.

Au terme de ce modeste travail, je remercie mon encadreur Dr.

LAOUBI HAMZA, pour ses conseils, ses orientations et sa Disponibilité Durant l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil en et à toute l'équipe de laboratoire de génie civil pour tous les Efforts qui ont fait à bien mener nôtre formation et notre projet de fin D'étude.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont contribué De près ou de loin à la préparation de ce travail.

Je remercie ma famille et tous mes amis.

BOUAISSI TAHAR

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents.

À ma femme qui m'a toujours soutenu et aidé.

À ma fille : AROUA-YOUMNA-OUITINE

Et mon fils : ABD EL MOUDJIB

À mes frères et sœurs.

À ma grande famille.

À tous mes amis.

BOUAISSI TAHAR

Résumé

Cette recherche s'inscrit dans une démarche globale de valorisation des ressources locales et d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment dans les régions arides de l'Algérie. Elle porte sur le développement d'un matériau de construction innovant sous forme de mortier léger. La formulation est composée de plâtre comme liant principal, associé au sable de dunes, à la perlite expansée comme granulats légers, et aux fibres de polypropylène comme renfort. Ce matériau composite est destiné à la fabrication de blocs pour murs extérieurs.

L'étude associe des essais expérimentaux et une simulation thermique dynamique afin d'évaluer les propriétés thermo-mécaniques et l'efficacité énergétique du composite. L'ajout de perlite a permis de réduire la conductivité thermique tout en allégeant la matrice. Bien que les performances mécaniques diminuent légèrement, elles restent conformes aux normes. L'incorporation de fibres de polypropylène a permis d'améliorer la résistance à la flexion.

La modélisation thermique, réalisée avec CYPETHERM-EPlus, a révélé une réduction notable des besoins énergétiques annuels. Ces résultats confirment le potentiel de ce matériau comme solution durable et adaptée au contexte climatique local.

Mots-clés : Plâtre, Perlite expansée, Propriétés thermo-mécaniques, Simulation thermique, Efficacité énergétique, Durabilité

Abstract

This research is part of a broader effort to promote the use of local resources and enhance the energy efficiency of buildings, particularly in the arid regions of Algeria. It focuses on the development of an innovative construction material in the form of a lightweight mortar. The formulation consists of plaster as the main binder, combined with dune sand, expanded perlite as a lightweight aggregate, and polypropylene fibers for reinforcement. This composite material is intended for the production of exterior wall blocks.

The research combines experimental testing and dynamic thermal simulation to evaluate the composite's thermo-mechanical properties and energy efficiency. The addition of expanded perlite reduced thermal conductivity while lightening the matrix. Although mechanical strength slightly decreased, values remained within normative limits. The incorporation of polypropylene fibers improved flexural strength.

Thermal modeling using CYPETHERM-EPlus showed a significant reduction in annual energy demands. These results highlight the potential of this material as a sustainable and climate-adapted solution.

Keywords:

Plaster, Expanded Perlite, Thermo-Mechanical Properties, Thermal Simulation, Energy Efficiency, Sustainability

المخلص

تندرج هذه الدراسة ضمن جهود شاملة تهدف إلى تجميع الموارد المحلية وتحسين كفاءة الطاقة في المباني، خاصة في المناطق الجافة من الجزائر. وتركز على تطوير مادة بناء مبتكرة على شكل مونة خفيفة. تتكوّن هذه الخلطة من الجص كمادة رابطة أساسية، ممزوجة برمل الكثبان، والبيرلايت الموسعة كمادة حبيبية خفيفة، وألياف البولي بروبيلين للتدعيم. تهدف هذه المادة المركبة إلى تصنيع كتل للجدران الخارجية.

تجمع الدراسة بين اختبارات تجريبية ومحاكاة حرارية ديناميكية لتقييم الخصائص الحرارية والميكانيكية للمادة المركبة. ساهمت إضافة البيرلايت في تقليل التوصيلية الحرارية وتخفيف وزن المزيج. وعلى الرغم من الانخفاض الطفيف في الأداء الميكانيكي، تبقى القيم ضمن الحدود المقبولة. كما حسّنت ألياف البولي بروبيلين من مقاومة الانحناء.

أظهرت النمذجة الحرارية باستخدام برنامج CYPETHERM-EPlus انخفاضًا ملحوظًا في الاحتياجات الطاقوية السنوية، مما يبرز إمكانيات هذا المركب كحل مستدام ومتكيف مع المناخ المحلي.

الكلمات المفتاحية: الجص، البيرلايت الموسعة، الخصائص الحرارية والميكانيكية، المحاكاة الحرارية، الفعالية الطاقوية، الاستدامة.

NOMENCLATURE

MPP : Mortier Plâtre Perlite

MPPF : Mortier Plâtre Perlite Fibre polypropylène

E/P : Eau / Plâtre

S/P : Sable / Plâtre

ρ_{app} : Masse volumique apparente.

ρ_{abs} : Masse volumique absolue.

R_c : Résistance à la compression (MPa)

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 (mm)

ρ : Masse volumique de l'apparente (kg/m^3).

γ_s : Masse volumique absolu (kg/m^3).

M_f : Module de finesse

E_s : Equivalent de sable

C_p : Compacité

P : Porosité (%).

V : Volume (cm^3)

M : Masse (g)

λ : Conductivité thermique (W/mK).

C_p : Chaleur spécifique massique ($\text{KJ/m}^3 \cdot \text{K}$).

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

الملخص

Nomenclature

Sommaire

Liste Des Figures

Liste De Tableaux

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I: GÉNÉRALITEÉS ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE 3

INTRODUCTION	3
I. CONTEXTE ENERGETIQUE DU SECTEUR DU BATIMENT EN ALGERIE	3
I.1. Économie d'Énergie lors de la phase d'utilisation des batiments.....	4
I.2. Gypse	4
1) la pierre a plâtre.....	4
2) Gisement De Gypse	6
I.3. Plâtre	7
I.3.1. Structure Cristalline Du Semi-hydrate	8
I.3.2. Microstructure du plâtre.....	9
I.3.3. Comportements Du Plâtre.....	9
1) Comportement Mécanique :.....	9
2) Comportement Hygrométrique :	10
3) Comportement Thermique Et Au Feu :.....	11
I.4. Mortier De Plâtre	12
I.4.1. Méthode De Composition Du Mortier De Plâtre	12
I.4.2. Comportement Mécaniques Du Mortier De Plâtre	12
I.4.3. Le Comportement Thermique Du Mortier De Plâtre	13
I.5. Béton De Plâtre	14
I.5.1. Méthode De Composition Du Béton De Plâtre.....	14
I.5.2. Mode Opérateur	14
I.5.3. Durabilité Des Bétons De Plâtre	15
I.6. Domaine d'application des Eléments A Base De Plâtre	16

a) Dans La Construction.....	16
II. GENERALITES SUR LES BETONS LEGRS.....	18
1-Béton cellulaire	18
2-Béton caverneux.....	18
3-Béton à granulats légers	18
II.1. Propriétés Des Bétons Légers	19
1) Conductivité Thermique :	19
2) Résistance Mécanique.....	19
3) Ouvrabilité	19
III.1. Études Sur L'incorporation Des Additions Dans Des Composites De Plâtre.....	19
a) L'augmentation de la résistance :	20
b) L'amélioration du comportement thermique :	20
c) La réduction de la densité.....	21
<input type="checkbox"/> Introduction de vides ou d'alvéoles dans la géométrie du matériau	21
<input type="checkbox"/> L'occlusion de l'air dans la matrice de plâtre	22
<input type="checkbox"/> Ajout de granulats légers.....	22
a) Minéraux naturels :	23
b) Les produits organiques naturels :	23
c) Artificielles :.....	24
IV. LA PERLITE.....	25
<input type="checkbox"/> Propriétés	25
V. FIBRES DE POLYPROPYLENE :	26
CONCLUSION	27

CHAPITRE II:MATÉRIAUX UTILISÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES 28

INTRODUCTION	28
I. MATIERES PREMIERES.....	28
I.1. Plâtre	28
I.1.1. Caractéristiques Chimiques.....	28
I.1.2. Propriétés physiques	29
I.1.2.1. Masse volumique absolue (NFP 18-555) :	29
I.1.2.2. Caractéristiques techniques.....	29
I.2. Sable De Dune	30
I.2.1. Propriétés Physiques	30
I.3. Granulats De Perlite Expansés	31
I.4. Fibres De Polypropylène :	31
I.5. Eau De Gâchage.....	32
II. TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES	32
II. 1. Propriétés Physico-Mécanique Des Composites :	32
II. 1. 1. La Masse Volumique :	32
II. 1.2. Traction Par Flexion	32
II.1. 3. Essai De compression :	33
II. 2. Caractérisation Thermo-Physiques.....	33
II. 2. 1. Méthodologie.....	34
III. FORMULATION DES MORTIERS DE PLATRE ALLEGE PAR DES GRANULATS DE PERLITE EXPANSE	35
CONCLUSION	37

CHAPITRE III:RÉSULTATSEXPÉRIMENTAUX ETANALYSE

38

INTRODUCTION :	38
I. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE	38
I.1. Masse volumique apparente.....	38
I.2. Résistance Mécanique :.....	39
I.3. Étude Des Proprietes Thermique	41
I.3.1. Conductivité Thermique	42
I.3.2. La Chaleur Spécifique Volumique	43
I.3.3. Impact de la régulation thermique Rapide Sur Le Confort Dans Le Bâtiment.....	44
II. ANALYSE DES PROPRIETES THERMOMECANIQUES D’UN MORTIER DE PLATRE ARME DE FIBRES DE POLYPROPYLENE	45
II.1. Comportement mécanique du mortier de plâtre renforcé :	45
II.2. Comportement thermique du mortier de plâtre renforcé :	46
II.3. Recommandations constructives pour les ouvrages en plâtre en contexte algérien :	48
III.1. Zones d’application :	48
III.2. Limites d’utilisation :	48
III.3. Analyse des performances du produit développé :	48
CONCLUSION	49

CHAPITREIV : ÉVALUATION ENERGETIQUE D’UNE MAISON EN FONCTION DES MATERIAUX DE L’ENVELOPPE MURALE

50

INTRODUCTION	50
I. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA VILLE DE M’SILA,	50
II.TRANSFERT DE CHALEUR ET LE CONFORT THERMIQUE	51
III. QUANTIFICATION DES GAINS ÉNERGETIQUES	52
III. 1. Demande énergétique mensuelle de chauffage et de refroidissement.	55
CONCLUSION	57
CONCLUSION GENERALE	58
PERSPECTIVES DE RECHERCHE :	59
REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES	60

Liste Des Figures

Chapitre I : Généralités et synthèse bibliographique

Fig. I. 1. Répartition de la consommation énergétique finale par secteur	3
Fig. I. 2. Morphologie du cristal de gypse.....	5
Fig. I. 3. Structure cristalline du gypse d'après De Jong et Bouman	5
Fig. I. 4. Structure atomique du semi hydrate sur le plan (001).	8
Fig. I. 5. Images MEB (5 μ) des plâtres : a-semi hydrate α ; b-semi hydrate β	9
Fig. I. 6. Enchevêtrement des cristaux du plâtre (image MEB - 20 μ m).....	9
Fig. I. 7. Données expérimentales de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre.	10
Fig. I. 8. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier :(a) en flexion ;(b) en compression.....	12
Fig. I. 9. Influence du rapport S/P sur la résistance mécanique (a) en flexion ; (b) en compression ...	13
Fig. I. 10. Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton.	15
Fig. I. 11. Prototype avec mur en terre stabilisée et voutains en mortier de plâtre.	17
Fig. I. 12. Voutains en mortier de plâtre.....	17
Fig. I. 13. Aspect de la perlite expansé.....	25
Fig. I. 14. Fibres polypropylènes.....	27

Chapitre II : matériaux utilisés et techniques expérimentales

Fig. II. 1. Plâtre utilisé.....	28
Fig. II. 2. L'essai de la masse volumique absolue de plâtre	29
Fig. II. 3. Analyse granulométrique du sable de dune utilisé.	30
Fig. II. 4. La perlite utilisée.	31
Fig. II. 7. Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques «CT Mètre».	34
Fig. II. 8. Confection des moules	36

Chapitre III : Résultats expérimentaux et analyse

Fig. III. 1. Variation de la densité des composites étudiés en fonction Teneur en perlite (%).....	38
Fig. III. 2. Variation de résistance à la flexion des mortiers étudiés en fonction de la teneur de la perlite expansé.	39
Fig. III. 3. Variation de résistance à la compression des mortiers étudiés en fonction de la teneur de la perlite expansé.....	40
Fig. III. 4. Variation de la résistance à la compression de mortiers étudiés en fonction de la masse volumique.....	41
Fig. III. 5. Variation de conductivités thermiques λ en fonction du teneur des granulats de perlite expansé.....	42
Fig. III. 6. Relation entre la conductivité et la masse volumique des mortiers étudiés.	43
Fig. III. 7. Variation de chaleur spécifique volumique Cv en fonction du teneur des granulats de perlite expansé.....	44
Fig. III. 8. Variation de résistance à la flexion des mortiers étudiés en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.....	45
Fig. III. 9. Variation de résistance à la compression des mortiers étudiés en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.....	46
Fig. III. 10. Variation de conductivités thermiques λ et de chaleur spécifique volumique Cv des mortiers étudiés en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.	47

Chapitre IV ; Evaluation énergétique d'une maison en fonction des matériaux de l'enveloppe murale

Fig. IV. 1. Schéma du transfert de chaleur dans un mur extérieur.....	51
Fig. IV. 2. Vue en plan niveau 1.	53
Fig. IV. 3. Modèle 3D.	53
Fig. IV. 4. Disposition des murs à double paroi : (a) en parpaing, (b) en brique) en bloc PPF	54
Fig. IV. 5. Bilan énergétique du bâtiment mois par mois.....	55
Fig. IV. 6. Demande énergétique annuelle de chauffage et de climatisation pour les différents cas ...	55
Fig. IV. 7. Bilan énergétique du bâtiment par année.....	57

Liste De Tableaux

Chapitre I : Généralités et synthèse bibliographique

Tab I. 1. Classification de la pierre à plâtre.....	5
Tab I. 2. Quelques exploitations de gypse en Algérie.....	6
Tab I. 3. Caractéristiques du système CaSO ₄ et ses hydrates.....	8
Tab I. 4. Caractéristiques thermiques du plâtre.....	11
Tab I. 5. Classification fonctionnelle de RILEM.....	18
Tab I. 6. Caractéristiques de la perlite expansée.....	26
Tab I. 7. Propriétés physiques et mécaniques des fibres de polypropylène.....	26

Chapitre II : matériaux utilisés et techniques expérimentales

TAB. II. 1. Fiche technique de plâtre COLPA.....	29
TAB. II. 2. Caractéristiques physiques du sable d'Oued souf.....	30
TAB. II. 3. Caractéristiques techniques de la perlite.....	31
TAB. II. 4. Caractéristiques des Fibres de polypropylène :	31
TAB. II. 5. Compositions pondérales de MPP.....	36
TAB. II. 6. Compositions pondérales de MPPF.....	37

Chapitre IV ; Evaluation énergétique d'une maison en fonction des matériaux de l'enveloppe murale

Tab. IV. 2. Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction.....	52
--	----

Introduction générale

Dans le domaine du génie civil, la performance énergétique des bâtiments constitue aujourd'hui un enjeu majeur, au croisement des préoccupations environnementales, économiques et sociétales. L'enveloppe bâtie, et en particulier les parois murales, joue un rôle déterminant dans le bilan thermique global d'un bâtiment, influençant directement les échanges de chaleur entre l'environnement extérieur et les espaces intérieurs.

Dans les régions soumises à de fortes amplitudes thermiques ; comme c'est le cas dans de nombreuses zones arides et semi-arides d'Algérie ; la question de l'isolation thermique devient primordiale. Or, les matériaux traditionnellement employés dans le secteur résidentiel, tels que le parpaing ou la brique creuse, présentent des limites bien connues en matière de régulation thermique et de capacité de stockage de chaleur.

Dans ce contexte, le plâtre ; matériau localement abondant, économique et facile à mettre en œuvre, apparaît comme une alternative prometteuse. Toutefois, ses propriétés intrinsèques, telles que sa faible inertie thermique, sa sensibilité à l'humidité et ses performances mécaniques limitées, restreignent son emploi aux applications non structurelles ou faiblement sollicitées.

Cette recherche vise à dépasser ces limitations en développant un mortier composite innovant, formulé à partir de plâtre, de perlite expansée ; un granulat léger aux propriétés isolantes reconnues, de fibres de polypropylène, et de sable de dune. L'objectif est de concevoir un matériau allégé, performant sur le plan thermique, et conforme aux exigences mécaniques du CNERIB, destiné à la réalisation d'éléments d'enveloppe dans des zones arides et à faible sismicité. Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources locales, de réduction de la consommation énergétique des bâtiments, et de promotion de solutions constructives durables, adaptées aux réalités climatiques et économiques du contexte algérien.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires :

- **Chapitre I** : Un état de l'art sur les matériaux à base de plâtre et les approches de formulation de composites légers intégrant des granulats alternatifs et des fibres. Il met en évidence les limites des matériaux conventionnels dans le contexte thermique et réglementaire algérien, justifiant ainsi le recours à une démarche innovante.
- **Chapitre II** : La caractérisation physico-chimique des matières premières (plâtre, sable de dune, perlite, fibres de polypropylène), la présentation des techniques expérimentales employées, ainsi que la méthodologie de formulation des composites.
- **Chapitre III** : L'analyse des résultats expérimentaux obtenus. Une attention particulière est portée à l'influence de la perlite sur la densité, la résistance mécanique (compression et flexion), la conductivité thermique et la chaleur spécifique volumique. L'effet du renforcement par fibres de polypropylène est également évalué en vue d'optimiser les performances globales du matériau.
- **Chapitre IV** : Une évaluation énergétique à l'échelle du bâtiment, à travers une simulation thermique dynamique réalisée avec le logiciel CYPETHERM EPlus. Cette simulation permet de quantifier l'impact du matériau développé sur les besoins en chauffage et en climatisation, en comparaison avec des solutions conventionnelles comme le parpaing ou la brique creuse.

En définitive, ce travail vise à démontrer la faisabilité technique et énergétique d'un mortier composite à base de plâtre allégé et renforcé, adapté aux conditions climatiques de l'Algérie et aux exigences normatives locales. Il contribue à la transition vers des constructions plus durables et efficaces, en s'appuyant sur une mobilisation intelligente des ressources locales disponibles.

CHAPITRE I: GÉNÉRALITEÉS ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

L'impact environnemental du secteur de la construction se distingue donc par la forte consommation d'énergie que supposent la demande de chauffage et de climatisation des bâtiments. Par ailleurs, la construction évolue de jour en jour, ce qui a rendu nécessaire la réflexion sur des nouveaux matériaux éco-efficaces minimisant l'exploitation des ressources naturelles, contribuant à réduire la quantité d'énergie consommée lors de la fabrication et de l'utilisation finale et générant moins de déchets.

I. Contexte énergétique du secteur du bâtiment en Algérie

L'Algérie n'est qu'une partie de la réalité planétaire en matière de consommation d'énergie et de risques environnementaux. Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie en Algérie [1]. La figure I.1 montre la part de chaque secteur d'activité dans la consommation globale en Algérie pour l'année 2023, et confirme que la consommation globale des ménages est évaluée à 24,7 Mtep. En matière d'électricité, la consommation du secteur résidentiel atteint 6,563 Mtep, tandis que pour le gaz naturel, la consommation de ce même secteur s'élève à 10,6 Mtep. Ainsi, la consommation totale du secteur résidentiel représente 34,44 % de la consommation nationale, qui s'élève à 54,2 Mtep [2].

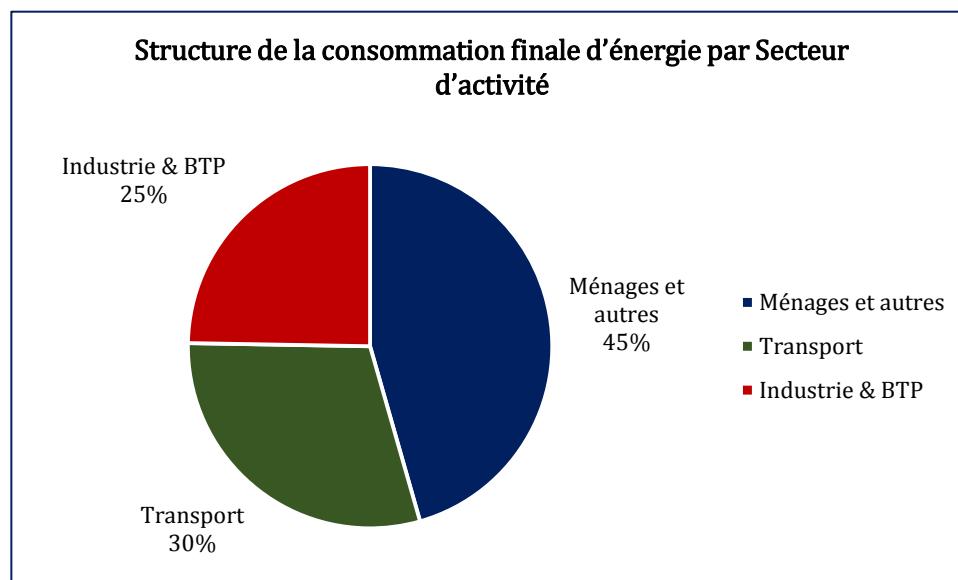


Fig. I. 1. Répartition de la consommation énergétique finale par secteur [2]

D'autre part, la consommation des matériaux de construction a connu une hausse annuelle de 6,8 % par rapport à 2022. L'industrie cimentaire représente la première source des émissions

avec un facteur d'émission de CO₂ relativement grand (0.5071 tonne de CO₂ par tonne de Clinker [4] et 0.3 kg SO₂ par tonne de ciment).

L'énergie nécessaire pour la production des matériaux de construction présente 40,75% du total consommé par le secteur industriel.

Du point de vue technique, l'une des alternatives les plus remarquables est l'amélioration du comportement thermique de l'enveloppe pour la réduction de la consommation de chauffage et de refroidissement. En fait, les réglementations nationales sont de plus en plus exigeantes à cet égard, ce qui se traduit généralement par une augmentation de la quantité de matériau d'isolation thermique ajoutée dans l'enveloppe des bâtiments.

I.1. Économie d'Énergie lors de la phase d'utilisation des bâtiments

La réduction de la consommation énergétique des bâtiments passe principalement par l'optimisation de leur enveloppe thermique. L'isolation constitue, à cet égard, l'une des stratégies les plus efficaces, tant sur le plan technique qu'économique. Elle permet de limiter les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur, en hiver comme en été, en fonction de l'épaisseur des matériaux et de leur conductivité thermique. Les matériaux isolants, caractérisés par une conductivité thermique très faible, jouent ainsi un rôle majeur dans l'amélioration de l'efficacité énergétique, notamment dans le secteur résidentiel.

Face aux exigences croissantes des réglementations thermiques, l'augmentation de l'épaisseur des matériaux isolants devient fréquente. Le développement de matériaux de construction performants constitue donc un enjeu majeur. Le plâtre, issu du gypse, se distingue par sa disponibilité, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût, ce qui en fait un matériau intéressant à valoriser dans le cadre d'une approche de construction durable [1].

I.2. Gypse

1) la pierre à plâtre

La pierre à plâtre est une roche sédimentaire cristalline qui existe dans la nature sous deux formes principales : l'anhydrite (CaSO₄), forme anhydre relativement rare, et le gypse (CaSO₄ · 2H₂O), beaucoup plus abondant. Ce dernier contient environ 79 % de sulfate de calcium et 21 % d'eau cristalline. Cette composition chimique est également valable pour le gypse transformé artificiellement par cuisson puis réhydratation. Le gypse peut être extrait de gisements naturels, généralement exploités en carrières, ou obtenu comme sous-produit industriel, notamment sous forme de phosphogypse [8,9].

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

Tab I. 1. Classification de la pierre à plâtre [8].

Classe	Composition minéralogique	Composition chimique
	Tg : % en CaSO ₄ , 2H ₂ O	Tc : % en eau de cristallisation
I	Tg ≥ 90	Tc ≥ 18,83
II	80 ≤ Tg ≤ 90	16,74 ≤ Tc ≤ 18,83
III	70 ≤ Tg ≤ 75	14,65 ≤ Tc ≤ 16,74
IV	0 ≤ Tg ≤ 70	11,51 ≤ Tc ≤ 14,65

Pour la production du plâtre, il est recommandé d'utiliser la pierre à plâtre dont la teneur en gypse est supérieure à 70 % (classe I, II et III). Le sulfate de calcium déshydraté (CaSO₄, 2H₂O) cristallise dans le système monoclinique (Figure I.2)

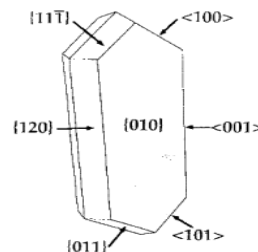


Fig. I. 2. Morphologie du cristal de gypse [9].

Sa structure révèle un édifice cristallin construit sur un empilement de deux types de feuillets qui s'alternent parallèlement au plan (010). Les doubles feuillets d'ions calcium Ca⁺² et sulfate SO₄ (tétraèdre avec un atome de soufre au centre des atomes d'oxygène) sont séparés par des doubles feuillets de molécules d'eau. Cet arrangement explique le clivage très aisé des cristaux de gypse d'orientation (010). Le gypse comporte des liaisons ioniques dans les feuillets (Ca⁺²/SO₄) dues aux différences de charges électriques, (liaisons fortes), et des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions sulfate, l'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion calcium. Figure I.3 montre la structure cristalline du gypse. Morphologie du cristal de gypse [1]

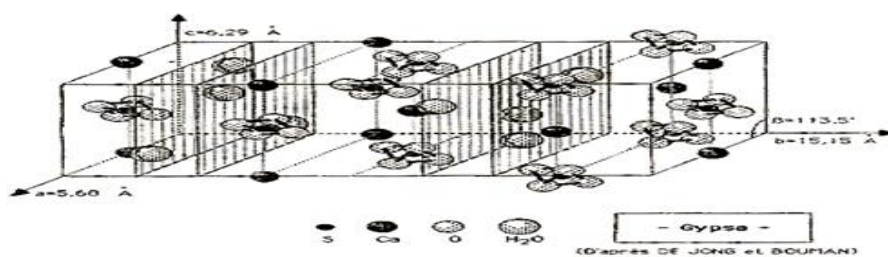


Fig. I. 3. Structure cristalline du gypse d'après De Jong et Bouman

2) Gisement De Gypse

L'Algérie est un pays à fort potentiel de production de gypse. Les grands gisements existent à Dahra (région du chlef), Djebel Chagga, Mostaganem, Arzew, Sidi Bel abbés, Habouch (montagnes mina) et les Babors. Le tableau I.2 donne quelque production de gypse à travers l'Algérie [1].

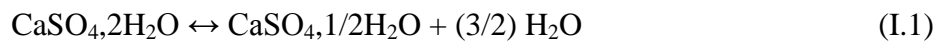
Tab I. 2. Quelques exploitations de gypse en Algérie [10].

Wilaya	Nom de l'exploitation
ALGER	SCAL SPA SOCIÉTÉ DES CIMENTS ALGÉROISE
BATNA	ZIDANE MARBRE CARRIÈRE DE PLÂTRE BOUHAREB HEDDA EURL CARRIÈRE PLÂTRE BELLAHCÈNE MESSAOUD SARL
BÉJAÏA	BENAMARA EURL
BISKRA	ENTREPRISE DE PLÂTRE ET DÉRIVÉS SPA PLÂTERIE EL GHAZAL EURL
BOUIRA	ENFA PLÂTRE (GYPSE, PLÂTRE) SARL ERCC SPA
CONSTANTIN E	SPDE SPA
GHARDAÏA	GHARDAÏA PLÂTRE SARL PLÂTRE DU SUD SPA SPDC SPA PLÂTRERIE DE GHARDAÏA FILIALE ERCC
GUELMA	GYPSE EN NADOR EURL
KHENCHELA	IKHLASSE SARL
MASCARA	E. MA.CO EPE (UNITÉ PLÂTRIÈRE D'OGGAZ) ERCO EPE/SPA
MILA	BOUSBAÂ ET AÏSSAOUI (GYPSE EL HASSI AÏSSAOUI ET ASSOCIÉS) SNC SO. PLAT SPASOCIÉTÉ DES PLÂTRES DE GRAREM GOUGA
M'SILA	CHALLA PRODUCTION DE PLÂTRE SARL EL DJABES (DOKMANE ABDELATIF) EURL
ORAN	ERCO PLÂTRE (SODEPAC) SPA
SÉTIF	GUELLAL PLÂTRE D'OR SARL GUESMIA D'EXTRACTION ET PRÉPARATION DE GYPSE EURL CARRIÈRE DYR EURL
TÉBESSA	MANDRA SOUTIRAGE ET PRÉPARATION DE SOL SARL
TISSEMSILT	PLÂTRIÈRE DE SIDI BOUTOUCHENT SARL

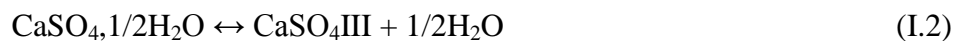
I.3. Plâtre

Le terme « plâtre » est utilisé pour désigner un matériau solide que l'on appelle autrement plâtre, c'est aussi la poudre ou encore le semi hydrate qui permet, après gâchage d'obtenir dit « matériau solide ». La fabrication de cette poudre consiste à éliminer partiellement de l'eau de constitution du gypse. Les phénomènes de cristallisation, qui ont lieu sont décrits, par plusieurs auteurs [9, 11-14] et peuvent se résumer comme suit : en procédant à la cuisson entre 100°C et 140°C, on obtient les semi hydrates α et β selon que celle-ci est effectuée sous vapeur d'eau ou à l'air [1].

La transformation s'effectue suivant l'équation :



Si on poursuit la cuisson vers 200°C, on a l'anhydrite III ou l'anhydrite soluble. Très instable, il se réhydrate assez rapidement en semi hydrate au contact avec l'eau en phase vapeur. Sa structure cristalline est hexagonale. L'équation de la transformation est alors :



L'anhydrite III se transforme en anhydrite II, de structure cristalline orthorhombique, lorsqu'on est aux alentours de 250°C à partir du semi hydrate α et vers 400°C à partir du semi hydrate β :



Dans le cas où on cuit au-delà de 1200°C, on obtient l'anhydrite I, sa structure cristalline est cubique à faces centrées, la réaction se produit conformément à l'équation :



Les semi hydratent α et β sont les principaux produits utilisés. Le taux de gâchage E/P varie fréquemment entre 0,5 et 1,2 dans le cas des semi hydrates β pour des utilisations courantes comme matériau de construction et entre 0,3 et 0,5 dans le cas du type α [15] utilisé dans la fabrication des céramiques ou bien dans l'industrie dentaire [10]. Sur une quantité d'eau utilisée pendant le gâchage, seule une faible fraction 18,6% [15] participe à la réaction chimique. La quantité d'eau en sus permet d'obtenir une bonne fluidité de la pâte. Elle détermine aussi la porosité du matériau après prise.

Le tableau I.3 ci-dessous dressé par EVE [15] en 2003 résume les principales caractéristiques du gypse et des produits ci-dessus décrits obtenus lors de sa cuisson. Ces informations sont aussi disponibles dans la référence [11].

Tab I. 3. Caractéristiques du système CaSO₄ et ses hydrates [11].

Phase	Gypse	Semi hydrate α	Semi hydrate β	Anhydre III	Surcuit
Système cristallin	Monoclinique	Rhomboédrique		Hexagonal	Orthorhombique
Teneur en eau	20.93 %	6.21 %		ϵ %	0
Masse moléculaire	172.17 g	145.15 g		136.14 g	136.14 g
Masse volumique	2.31 g/cm ³	2.76 g/cm ³	2.63 g/cm ³	2.95 g/cm ³	2.95 g/cm ³
Solubilité 25°C	2.4 g/l d'eau	6.5 g/l d'eau	9.0 g/l d'eau	9.9 g/l d'eau	2.7 g/l d'eau
Préparation		Voie humide	Voie sèche		
Chaleur d'hydratation		- 4100 cal/mol	- 4600 cal/mol		
Cristallisation		Compacte	Spongieuse		
Surface spécifique		Faible	Élevée		

I.3.1. Structure Cristalline Du Semi-hydrate

La structure cristallographique du semi hydrate α et β a été étudiée par plusieurs auteurs notamment Bershadskii F.G et Mchedlov-Petrosyan O.P. cités par S. EVE [15] ; elle est dite rhomboédrique (figure I.4) ; la différence est que le premier a une structure non poreuse alors que le second est poreux comme on peut l'observer sur les images MEB de la figure I.5. C'est ce qui justifie la différence dans leurs applications [1].

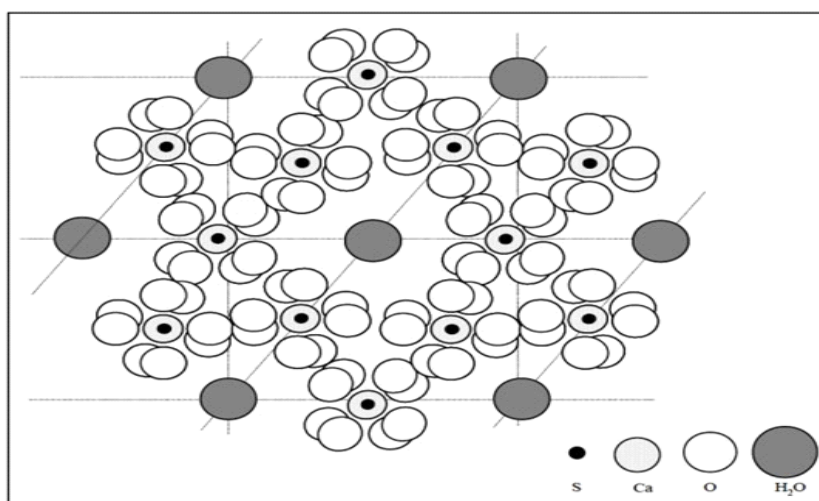


Fig. I. 4. Structure atomique du semi hydrate sur le plan (001) [15].

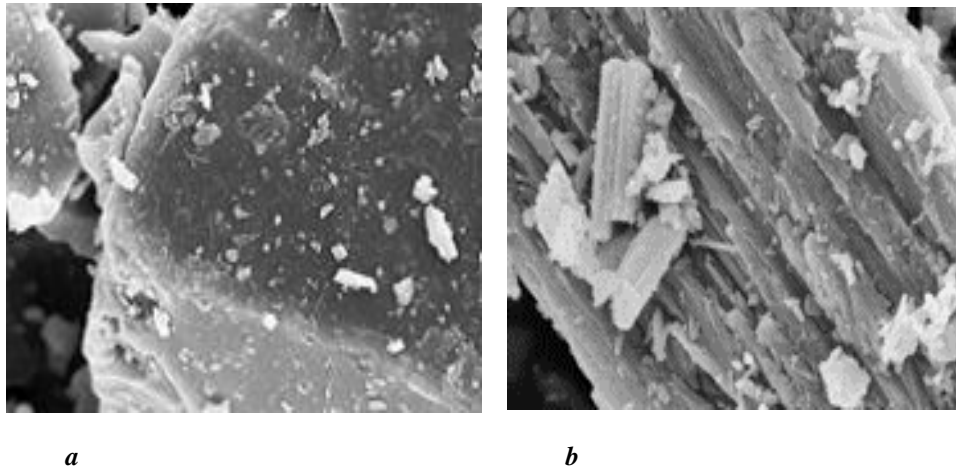


Fig. I. 5. Images MEB (5 μ m) des plâtres : a-semi hydrate α ; b-semi hydrate β [9].

I.3.2. Microstructure du plâtre

Très récemment, Sylvain MEILLE, Sophie EVE et Hamadou JAFFEL [9, 15-16] ont étudié la microstructure du plâtre. Ils trouvent qu'elle est très poreuse. Son taux de porosité est par exemple de 55% pour un taux de gâchage E/P égale à 0,8 ; sa microstructure est constituée de cristaux en forme d'aiguilles ou de plaquettes enchevêtrés. Leur liaison est de type feuilleté pour certains et de type tenon- mortaise pour d'autres. L'image MEB de la figure I.6 permet de visualiser cette présentation de la microstructure du plâtre [1].

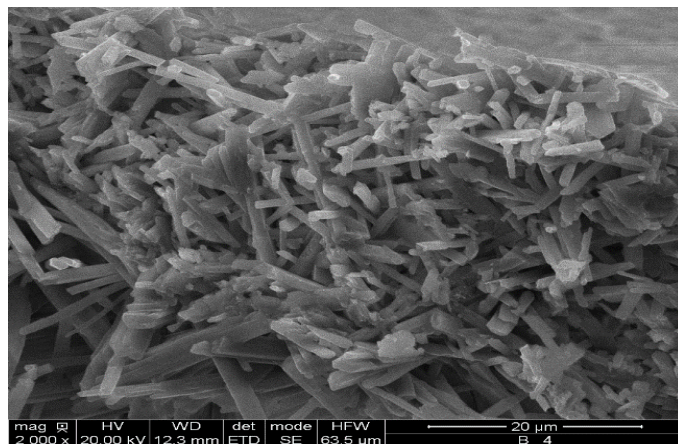


Fig. I. 6. Enchevêtrement des cristaux du plâtre (image MEB - 20 μ m) [1].

I.3.3. Comportements Du Plâtre

1) Comportement Mécanique :

Le plâtre est un matériau, en général, dur et fragile, ses caractéristiques mécaniques dépendent du type de semi hydrate α ou β , de la mise en œuvre, principalement du taux de gâchage et de l'effet de masse. La loi de comportement du plâtre est étudiée en flexion 3 ou 4 points. Le comportement obtenu est linéaire, avec une rupture brutale et fragile, quelle que soit la vitesse d'essai imposée [1].

2) Comportement Hygrométrique :

Le plâtre est très sensible à l'eau. L'intérêt de l'étude de son comportement hygrométrique se trouve dans l'examen de son influence sur les performances structurelles par exemple. Suite à l'affirmation de SATTLER [17-18], selon laquelle le plâtre pris mouillé est plastique, Philippe COQUARD [13] procède à une vérification en menant un essai de flexion sur une poutre de plâtre mouillée comparée à une poutre sèche et confirme cette affirmation. Il précise que cette plasticité s'explique par des glissements au niveau des interfaces inter cristallines et non au sens conventionnel du terme. M. Saadaoui et autres [19] en 2004, montrent que l'accroissement du taux d'absorption de l'humidité augmente le glissement entre les cristaux justifiant le comportement viscoélastique du matériau mouillé. Trois ans plus tôt, S. MEILLE [16] étudiait le comportement du plâtre pris humide et faisait le même constat.

En 2002, P. BOUSTINGORRY [12] établit l'isotherme de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre de $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ à l'isotherme Nelson du gypse (figure I.7).

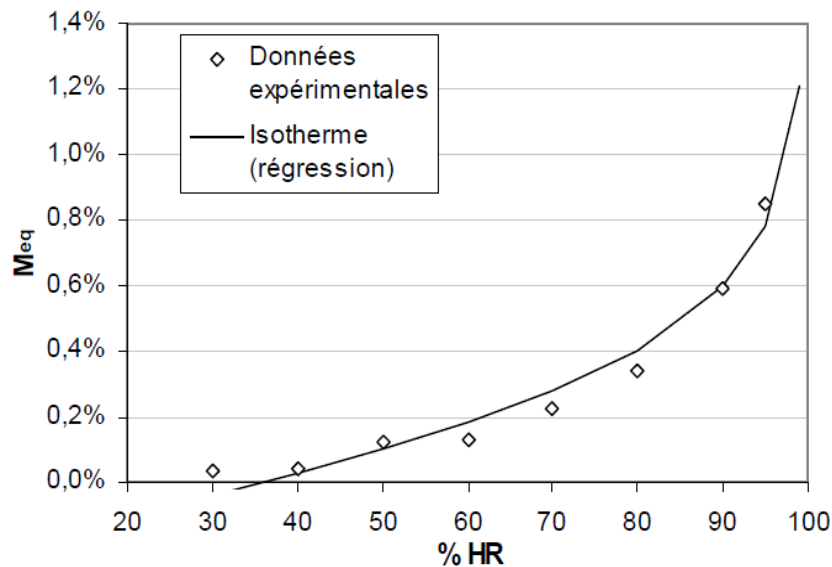


Fig. I. 7. Données expérimentales de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre [12].

On en conclut que le plâtre absorbe davantage d'eau pour un taux d'humidité relative important. L'étude du plâtre en présence de l'eau est aussi justifiée pour comprendre son comportement vis-à-vis de l'humidité dans des applications fonctionnelles. Des essais de laboratoire [11] permettent de découvrir que ce matériau de construction contribue à amortir les variations hygroscopiques de l'environnement dans lequel il est utilisé [1].

3) Comportement Thermique Et Au Feu :

Des études [11, 20-21] nous permettent à ce jour de montrer qu'il faudrait une énergie calorifique importante (environ 711 kJ par kg de plâtre) pour libérer les 20% en masse d'eau liées chimiquement ; pour faire évaporer cette eau par la suite, il faudrait encore dépenser 1255 kJ par kg de plâtre. Il est présentement connu que la température du plâtre reste inférieure à 140°C tant que toute l'eau n'est pas libérée et vaporisée, que sous l'action du feu sur le plâtre ne donne naissance à aucun gaz ou vapeur de caractère toxique, corrosif ou asphyxiant, aucune fumée ni de produit susceptible d'activer le feu. Il est donc classé comme coupe-feu selon le critère d'isolation I.

La structure poreuse du plâtre qui résulte du départ d'eau lors du séchage et subsiste après déshydratation fait du plâtre un mauvais conducteur de la chaleur. Le tableau 1.4 donne les caractéristiques thermiques du plâtre. Le plâtre présente une faible conductivité thermique ; c'est un bon isolant thermique. Le pouvoir isolant thermique du plâtre est désormais connu : trois à quatre fois celui du béton et deux à trois fois celui de la terre cuite [1].

Tab I. 4. Caractéristiques thermiques du plâtre [11].

Matériau ou application	Masse volumique sèche ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique utile λ (W. /m. K)	Capacité thermique massique C_p (J. kg-1. K-1)	Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	
				Sec	Humide
Plâtre	600	0,18	1 000	10	4
Plâtre	900	0,30	1 000	10	4
Plâtre	1 200	0,43	1 000	10	4
Plâtre	1 500	0,56	1 000	10	4
Plaque de plâtre	900	0,25	1 000	10	4
Enduit isolant au plâtre	600	0,18	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 000	0,40	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 300	0,57	1 000	10	6
Plâtre et sable	1 600	0,80	1 000	10	6

I.4. Mortier De Plâtre

Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogénéisé de plâtre, de sable et d'eau. Des études antérieures [8] imposent les limites des caractéristiques que doit avoir le sable utilisé, aussi bien dans le mortier que dans le béton de plâtre.

I.4.1. Méthode De Composition Du Mortier De Plâtre

Le C.N.E.R.I.B [8] (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées au Bâtiment) donne la méthode de composition du mortier de plâtre comme suit :

- Il faut ajouter le taux de mouillage du sable au taux de gâchage E/P relatif au plâtre pour obtenir un mortier maniable, c.-à-d. :
- Détermination de la quantité d'eau de gâchage du mortier (eau nécessaire à la saturation augmentée de l'eau de mouillage du sable).

Pour la confection du mortier de plâtre, on recommande le mode opératoire suivant

- Mélanger à sec le plâtre et le sable ;
- Éteindre complètement la chaux aérienne dans l'eau de gâchage ;
- Ajouter progressivement cette eau aux matériaux avec malaxage.

I.4.2. Comportement Mécaniques Du Mortier De Plâtre

Des travaux ont visé à améliorer la connaissance du mortier de plâtre du point de vue de son élaboration, de son comportement face à des sollicitations. Ils ont aussi mis l'accent sur l'amélioration des ces caractéristiques. Une étude entreprise par le C.N.E.R.I.B [8] montre l'influence du rapport E/P (Eau/Plâtre) sur les résistances mécaniques du mortier de plâtre.

La courbe ci-dessous montre la variation de la résistance mécanique à 28 jours des mortiers en plâtre en fonction du rapport E/P et avec un rapport S/P = 0,5.

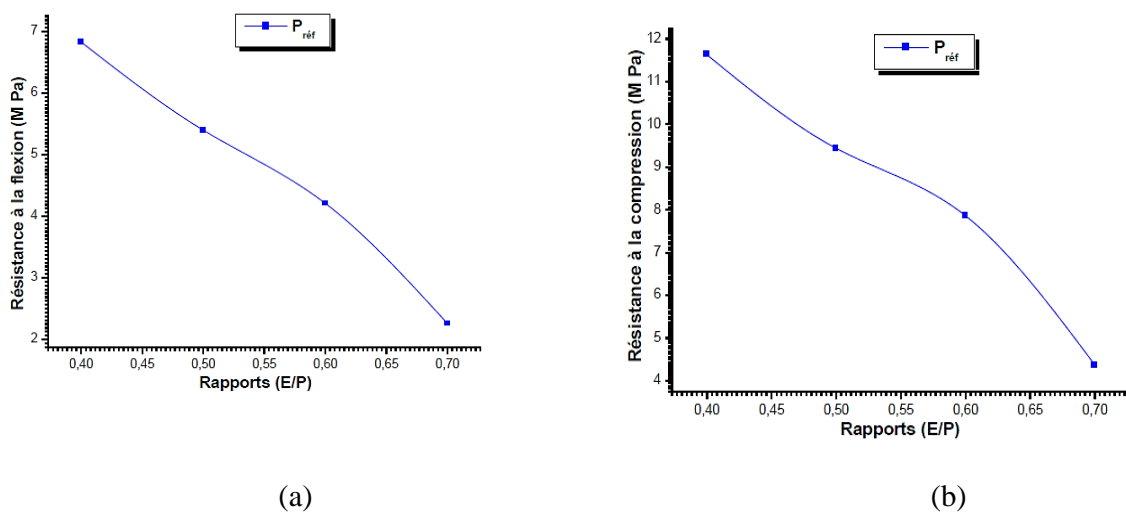


Fig. I. 8. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier : (a) en flexion ; (b) en compression [8].

D'autres études antérieures [22] constatent que la résistance mécanique du mortier de plâtre augmente avec la proportion de sable ajoutée, puis décroît quand le rapport S/P (Sable/Plâtre) devient important (Fig. I.9).

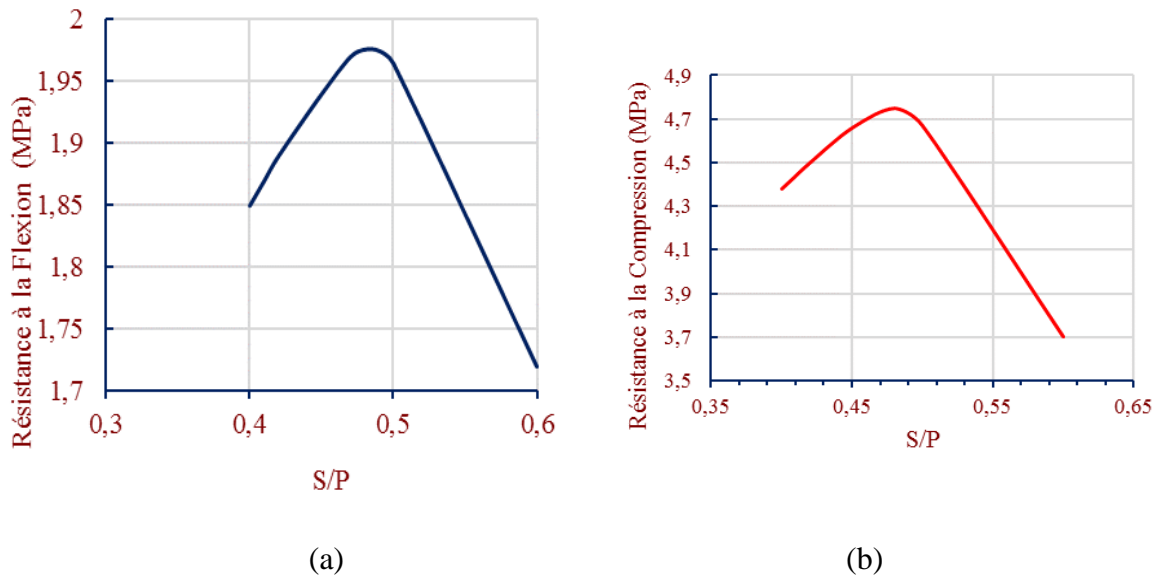


Fig. I. 9. Influence du rapport S/P sur la résistance mécanique (a) en flexion ; (b) en compression [22]

Derbani et al. [23] ont étudié l'effet de compactage sur le comportement thermomécanique des mortiers de plâtre ; ils ont constaté que le compactage améliore les performances mécaniques du mortier ; ils ont pu atteindre plus de 7 MPa en flexion, ce qui représente une évolution entre 28% à 31% pour respectivement 1mn et 5 mn de compactage par rapport au même mortier coulé simplement. Pour la résistance à la compression, ils ont réussi à atteindre plus de 21 MPa, l'équivalent d'une progression entre 62% et 68% pour les mêmes temps de compactage suscités [1]

I.4.3. Le Comportement Thermique Du Mortier De Plâtre

Abdelmoumen [24] constate que la conductivité thermique λ du mortier de plâtre augmente avec la proportion de sable ajoutée. La diffusivité thermique du plâtre augmente pour de faibles proportions de sable ajouté, puis décroît quand le taux S/P devient important. L'ajout de sable influe considérablement sur la masse volumique du mélange « plâtre-sable » et, donc, sur sa chaleur spécifique, il s'ensuit une augmentation de la diffusivité thermique.

Avec une mise en œuvre par le compactage [23], la conductivité thermique à différents dosages en sable subit une évolution plus importante, les valeurs sont presque doubles du même mortier coulé simplement. Cet accroissement est induit par l'augmentation de la densité qui a lieu suite à la réduction des volumes des vides causée par le compactage [1].

Fig. I.10. Conductivité thermique des différents mortiers de plâtre à différents temps de compactage [23].

I.5. Béton De Plâtre

Il est possible d'obtenir un matériau d'excellentes qualités en incorporant à un mortier de plâtre des agrégats ayant une granulométrie étudiée. La résistance d'un tel conglomerat dépasse habituellement la résistance du mortier de plâtre seul. Pour obtenir un béton de plâtre, il faut tout d'abord disposer d'un bon mortier de plâtre, c'est à dire d'un mortier ayant un facteur E/P réduit. Par ailleurs, la mise en œuvre du béton de plâtre par vibration permet d'améliorer les propriétés du béton en épaississant sa pâte [1].

I.5.1. Méthode De Composition Du Béton De Plâtre

La composition des bétons a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (liant, sable, gravier et eau) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possèdent après durcissement les meilleures caractéristiques (étanchéité, résistances mécaniques, etc.) [1].

Les méthodes de composition du béton de ciment ne trouvent pas leur validité dans le cas du béton de plâtre. Pour cette raison, une combinaison des méthodes de Valette et de Faurry a été proposée par le C.N.E.R.I.B [8].

- 01 sac de plâtre : 40 kg ;
- Gravier 5/15 : 60 – 80 kg ;
- Chaux éteinte : 01 à 1,5 kg ;
- Eau : 16 à 24 l.

I.5.2. Mode Opératoire

- Après la détermination de la composition du béton de plâtre, on procède comme suit :
- Mélanger mécaniquement, à sec le plâtre, le gravier et le sable ;
- Faire éteindre complètement la chaux ;
- Mélanger la chaux éteinte au reste de l'eau de gâchage ;
- Ajouter progressivement ce mélange (eau + chaux) aux constituants (plâtre + gravier + sable) ;
- Éviter un long malaxage, pour ne pas accélérer la prise.

Djoudi [25] montre que la maniabilité croît avec l'augmentation du rapport S/G (Sable/Gravier) et que la composition granulaire optimale pour le béton de plâtre témoin (qui donne une maniabilité maximale) correspond à un rapport $S/G = 0,29$.

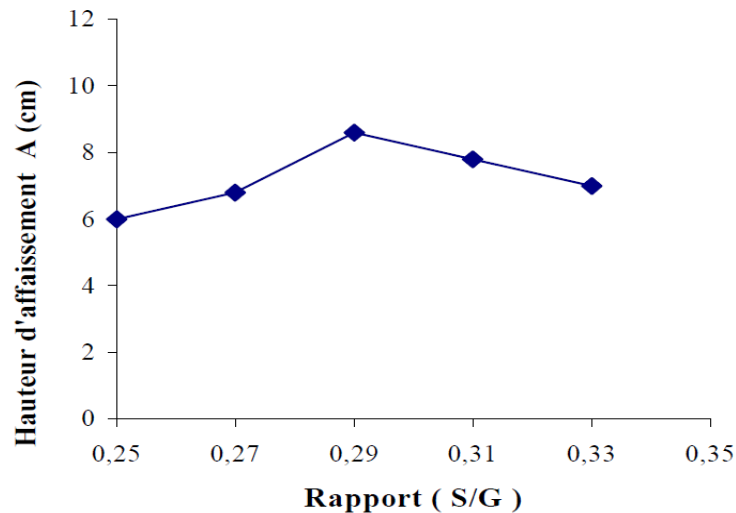


Fig. I. 10. Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton [25].

I.5.3. Durabilité Des Bétons De Plâtre

Parmi les variables influant sur la durée de vie des bâtiments, on peut compter, outre les conditions climatiques et l'entretien, la qualité de la construction et son mode d'utilisation. Datant de plus d'un siècle, les toitures en formes de voutes et coupoles et des maçonneries réalisées en pierre de gypse hourdées au plâtre ont conservés leur forme initiale sans fissurations importantes. Mais les matériaux classiques (acier, béton, etc.) pour des raisons économiques et technologiques, ont progressivement remplacé l'utilisation des pierres et du plâtre.

Le deuxième point qui limite l'utilisation du plâtre en extérieur et à certains types d'ouvrages est sa faible résistance aux intempéries.

Dans le but de procurer une plus grande durabilité aux matériaux à base de plâtre, différentes études, dans ce sens, ont été élaborées [1]. On peut citer :

- Pour modifier certaines caractéristiques du plâtre et utiliser des matériaux localement disponibles, DEBOUCI et al. [26] ont envisagé l'utilisation de la chaux compte tenu de son rôle dans les enduits. Il ressort des essais effectués que l'ajout de chaux au plâtre améliore sensiblement ses propriétés.
- D'autres études [27] préconisent, pour l'utilisation d'éléments à base de plâtre dans les murs extérieurs, d'adopter les proportions de chaux suivantes :
- Pour la confection des blocs, on propose 4 à 8 % de chaux par rapport à la masse du plâtre. Cette proportion assure un temps de coulabilité suffisant et une bonne protection contre l'action de l'eau ;

- Dans la composition des enduits, on propose 10 à 25 % de chaux. Cette composition assure une meilleure maniabilité, une bonne imperméabilité et une plus grande dureté.
- Des essais, effectués en Pologne [18], montrent qu'une chute de résistance à la compression entre 50 à 60 % est enregistrée pour des échantillons de béton de plâtre non imperméabilisés exposés aux conditions atmosphériques. Pour cela il est recommandé d'utiliser une lessive d'hyposulfite pour des teneurs de l'ordre de 2 à 3 %.
- D'autres études, réalisées en Australie sur des poutres en béton de plâtre armé, montrent que la résistance mécanique du béton de plâtre armé avec ou sans chaux diminue. L'addition de 10 % en poids de chaux au plâtre semble empêcher la réaction de corrosion entre l'acier et le plâtre [19].
- Lanzon et Garcia-Ruiz [27], ont étudié l'effet de l'acide citrique sur les propriétés mécaniques des enduits de construction en plâtre.
- Belayachi et al. [28] ont examiné les effets du cyclage séchage-humidification et du gel-dégel sur les propriétés physiques de nouveaux matériaux composites paille-plâtre proposées pour l'isolation de bâtiment. Ils concluent que le composite n'a pas été affecté par les cycles gel-dégel, mais il y a un changement prépondérant sur les propriétés du composite dû au vieillissement causé par le 'mouillage-séchage'. La capacité plus élevée de la paille d'orge d'absorber l'humidité est l'inconvénient principal pour le composite final [1].

I.6. Domaine d'application des Eléments A Base De Plâtre

a) Dans La Construction

Le plâtre peut être utilisé comme éléments de mur ou de plancher :

- Les blocs pleins ou creux pour murs porteurs ou de remplissage.
- Les hourdis ou voûtains comme élément de plancher.

Soltane [29] présente le prototype réalisé à Biskra avec les éléments suivants :

- Des blocs en béton de plâtre, pour les murs ;
- Quant aux planchers, premier niveau et terrasse, ils sont constitués à base de poutrelles semi-préfabriquées en béton armé et d'une dalle de compression en béton coulé sur des voûtains en plâtre comme coffrage perdu. Les parties restantes ont été remplies de béton de plâtre.

Zuber [30], en vue de la recherche d'un procédé de construction destiné aux zones tropicales sèches, dont les composants sont en mortier de plâtre, a utilisé :

- Un bloc creux 20 x 20 x 40 cm³ pour les murs ;

- Une dalle 60 x 52 x 8 cm³ pour les planchers ;
- Une pièce armée en U de 20 x 20 x 10 cm³, utilisable soit en coffrage linteaux, soit en marche qui doit être couverte d'un revêtement anti-abrasion ;
- Une poutrelle en plâtre armé de 12 x 14 cm².

Aldeberet[31], pour la rénovation des salles d'exposition du grand Louvre, a choisi le plâtre sous multiples formes :

- Des cloisons destinées à devenir support de cinoises (droites cintrées ou autoporteuses suspendues à la charpente) ;
- Des doublages thermiques et acoustiques en plâtre ;
- Des plafonds de staff. Certains ont une surface de plusieurs dizaines de mètres carrés d'un seul tenant.

Le **C.S.T.B. [32]** montre que l'utilisation des plaques de plâtre permet de remettre à niveau des sols déformés. Lors de la réhabilitation des bâtiments ; cette technique de chape sèche apporte des performances d'isolation acoustique et thermique et ne demande pas le renforcement de la structure en raison de son faible poids.

Dernièrement au niveau du **CNERIB**, il a été réalisé un prototype, avec une grande performance énergétique (fig. I.12), des murs en béton de terre stabilisée, avec comme élément de remplissage du plancher, des voutains en mortier de plâtre (Fig. I.13).

La montre les températures intérieures et extérieures du prototype



Fig. I. 11. Prototype avec mur en terre stabilisée et voutains en mortier de plâtre [33].



Fig. I. 12. Voutains en mortier de plâtre [33].

II. Généralités Sur Les Bétons Légers

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux développés par les ingénieurs. Ses caractéristiques spécifiques suggèrent de nouvelles applications architecturales. Ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m³, tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1850 kg/m³. La technologie de ces nouveaux bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement [36]. Son faible poids, sa résistance et ses autres propriétés le rendent pertinent à être utilisé dans des conditions de mise en

Chantiers plus spécifiques. De plus, l'utilisation d'un béton de masse volumique faible peut permettre de construire sur un sol de faible capacité portante [1].

La masse volumique du béton léger est diminuée par la substitution d'une certaine partie solide du matériau par des poches d'air que nous appellerons vides. Nous distinguons 3 types de béton léger suivant la localisation de ces vides [1] :

1-Béton cellulaire : lorsque l'air est incorporé dans la pâte d'un liant.

2-Béton caverneux : ou béton sans fines lorsque les granulats fins, se trouvant entre les gros granulats, sont remplacés par des gros granulats.

3-Béton à granulats légers : lorsque les granulats sont allégés, l'air se trouve dans les granulats eux-mêmes [37].

Une classification fonctionnelle est recommandée par RILEM [38], basée sur les travaux de Kass J.L. et Campbell D [39] qui ont dressé une classification selon l'utilisation des bétons légers d'après leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques (Tab. I.5).

Tab I. 5. Classification fonctionnelle de RILEM [38]

Classe	I	II	III
Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m ³)	< 1800	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W/m/K)	–	< 0.75	< 0.30

II.1. Propriétés Des Bétons Légers

Parmi les propriétés des bétons légers, on peut citer, à titre d'exemple :

1) Conductivité Thermique :

L'une des caractéristiques les plus importantes des bétons légers est leur pouvoir isolant. Cette propriété est caractérisée par des paramètres thermo physiques qui sont : la conductivité thermique ' λ ' la chaleur spécifique ' c ' la diffusivité thermique ' a ' et l'effusivité thermique ' b '. Le pouvoir isolant est déterminé par la nature du matériau et celle du granulat. La figure 1.15 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des bétons légers ; il est bien clair que la valeur de λ augmente avec la masse volumique.

2) Résistance Mécanique

La résistance des bétons de granulats légers en compression est inférieure à celle des bétons classiques réalisés avec des granulats denses. Cette résistance décroît proportionnellement avec la densité du béton. Cependant, avec de bons granulats et de bons sables naturels, ainsi qu'une augmentation du dosage en ciment, des résistances de même catégorie que celles des bétons ordinaires peuvent être atteintes. La résistance en traction est également plus faible.

3) Ouvrabilité

L'ouvrabilité est également difficile à réaliser, toujours à cause des granulats qui absorbent de l'eau. Pour y remédier, on peut faire recours à certains adjuvants, comme les entraîneurs d'air ou les plastifiants.

III.1. Études Sur L'incorporation Des Additions Dans Des Composites De Plâtre

Une grande partie des recherches sur le plâtre, en tant qu'un matériau composite, repose sur l'étude de la modification de ses propriétés par l'incorporation des additions. Par exemple, Jiang et luan [49] incorporent de la poudre de sépiolite pour améliorer le comportement des composites de plâtre vis-à-vis de l'eau ; Huang et al. [50] incorporent du carbonate de calcium pour augmenter la résistance au feu des composites de plâtre avec du liège ; Rame zani et al. [51] incorporent de la sciure de bois pour améliorer le comportement acoustique ; quant à Hummel et al. [52], ces derniers incorporent de la zéolite au plâtre pour améliorer ces propriétés physico-mécaniques [1].

Cependant, la plupart des études sur l'incorporation des additions dans les composites de plâtre seul portent sur :

a) L'augmentation de la résistance :

Les principales additions utilisées comme renfort sont essentiellement des matériaux fibreux naturels, minéraux ou synthétiques. Parmi les études rencontrées, celles réalisées par :

- **Djouidi** et al. [25] qui ont essayé de résoudre des problèmes d'environnement en Algérie causés par l'abondance de fibres de palmier dattier ainsi que leur incinération ; ces auteurs ont entrepris d'utiliser ces fibres au renforcement du plâtre, afin de valoriser ces ressources biologiques. Les résultats rapportés révèlent un changement complet du comportement rhéologique du matériau, une augmentation considérable de sa résistance à la flexion et à la compression, avec une ductilité meilleure, tout en améliorant son seuil de fissuration.
- **Del Río Méridon** et **Comino** [53] qui ont étudié l'influence du degré de désensibilisé de la fibre de verre E sur le comportement mécanique et la maniabilité du composite et sur son aptitude au façonnage.
- **Dalmay** et al. [54] qui ont étudié l'effet de l'incorporation des fibres de chanvre et des fibres de lin.
- **Zhang** et al. [55] qui ont analysé le renforcement des composites de plâtre avec des fibres de coton.
- **Mohandesi** et al. [56] qui ont étudié la résistance des composites de plâtre renforcés de fibres de polypropylène et de poly-paraphénylène et téréphtalamide (kevlar) répartis de manière aléatoire dans une matrice de plâtre.
- **Iucolano** et al. [57] qui ont étudié la résistance mécanique des composites de plâtre renforcés avec de la fibre d'abaca.
- **Lima** et **Faria** [58] qui ont analysé le renforcement des composites de plâtre avec des fibres d'avoine et de laine.
- **Leiva** et al. [59] qui ont étudié le comportement d'un composite avec des cendres d'enveloppe de riz en observant des résultats positifs en termes de la résistance à la compression et de la dureté de surface.

b) L'amélioration du comportement thermique :

Ces dernières années, de nombreuses études ont analysé l'amélioration du comportement thermique du plâtre, parmi lesquelles :

- **Pichniarczyk** et al. [60] ont étudié les propriétés d'un composite de plâtre sursaturé avec une solution d'acide sulfurique et de résines de silicone comme matériau de remplacement possible pour l'isolation thermique, présentant des caractéristiques similaires à celles de la laine minérale.

- Demir et Baspinar [61] ont analysé l'effet des additions de fumée de silice et de perlite sur le comportement thermique des composites de plâtre.
- Borreguero et al. [62] ont étudié l'amélioration du comportement thermique des blocs de plâtre en les ajoutant à des matériaux à changement de phase.
- Xi et al. [63] ont analysé l'amélioration des propriétés thermiques d'une plaque de plâtre additionnée de vermiculite.
- Baspinar et Kahraman [64] ont incorporé des granules de silice expansée en tant qu'agrégat d'allègement, obtenant ainsi de meilleures propriétés thermiques.
- Vimmrová et al. [65] ont étudié le comportement thermique de composites de plâtre allégés avec du sulfate d'aluminium et du carbonate de calcium, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 70%, accompagnée de pertes de résistance mécanique de 93% en flexion et de 97% en compression, ou avec du sulfate d'aluminium et de l'acide citrique, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 30%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 66% en flexion et de 77% en compression.
- Oliver [66] a conçu un panneau de plâtre doté de propriétés thermiques améliorées et incorporant des matériaux à changement de phase.
- Cherki et al. [67] utilisaient des granulats de liège pour améliorer l'isolation thermique des panneaux de plâtre pour les faux plafonds.
- Gencil et al. [68] ont analysé l'effet de la diatomite sur le comportement thermique des composites de plâtre [1].

c) La réduction de la densité

La densité est un facteur qui a été étudié en profondeur pour ce matériau et même pour d'autres matériaux composites. Ce facteur est également lié au comportement thermique, après avoir trouvé trois méthodes différentes pour le réduire [1] :

- L'introduction de trous ou d'alvéoles dans la géométrie du matériau ;
- L'occlusion de l'air dans la matrice de plâtre ;
- et l'ajout de granulats légers.

- **Introduction de vides ou d'alvéoles dans la géométrie du matériau**

L'une des principales applications des composites de plâtre est celle des produits préfabriqués. Vu que cette méthode ne nécessite pas l'addition d'additifs, ni des granulats, elle constitue l'un des systèmes les plus utilisés dans les éléments préfabriqués, principalement la céramique et le béton, pour obtenir des briques, voûtes, blocs, etc. En fait, de nombreux panneaux pour

cloisons, comportant des trous ou des alvéoles dans leur matrice pour les alléger, ont été réalisés.

- **L'occlusion de l'air dans la matrice de plâtre**

La procédure la plus élémentaire pour introduire de l'air dans la matrice du composite de plâtre consiste à augmenter la quantité d'eau de mélange. Dans ce cadre, on ajoute généralement une teneur en eau plus élevée que nécessaire afin de réaliser un meilleur mélange et d'obtenir un produit plus plastique pouvant être moulé. Une fois que le plâtre est pris, l'excès d'eau s'évapore à travers la masse de plâtre, laissant une microporosité dans la matrice du composite. Cette porosité est d'autant plus grande que l'on ajoute plus d'eau que nécessaire [1].

Il existe plusieurs études, qui ont été menées dans ce sens, afin d'augmenter cette microporosité dans la matrice du composite ; différents additifs ont été utilisés par différents auteurs, parmi lesquels on cite :

Del Río merino et Hernández Olivares [69] ont analysé l'effet des additifs entraînant l'air et des agents moussants commercialisés pour les mortiers et les bétons sur une matrice de plâtre et ont observé que, malgré la formation de microbulles, l'entraînant l'air ne permettent pas de réduire la densité, et avec l'utilisation de moussant, on peut réduire la densité de 7%, mais, malheureusement, cette réduction entraîne une perte importante de résistance mécanique qui est de 17% en flexion et de 52% compression Vimmrov á et al. [70] ont étudié le comportement

Thermique des composites de plâtre allégés avec du sulfate d'aluminium et du carbonate de calcium, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 70%, accompagnée de pertes de résistance mécanique de 93% en flexion et de 97% en compression, ou avec du sulfate d'aluminium et de l'acide citrique, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 30%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 66% en flexion et de 77% en compression.

Huang et al. [71] utilisaient du dioxyde de manganèse pour catalyser le peroxyde d'hydrogène en l'utilisant comme agent moussant dans les composites de plâtre.

- **Ajout de granulats légers**

Les granulats légers, également appelés charges légères ou granulats légers, ont été utilisés pour alléger les matériaux depuis l'Antiquité. Les granulats légers actuellement utilisés peuvent être des matières premières ou des déchets et peuvent être classés en :

a) Minéraux naturels :

Proviennent de la désintégration naturelle ou artificielle de roches telles que la ponce, les pouzzolanes ou les tufs volcaniques, ou d'un processus industriel par lequel le minerai est chauffé pour se dilater. Certains exemples de ceux-ci sont la perlite, la vermiculite ou l'argile expansée.

Il existe de nombreuses études sur l'incorporation de ces granulats légers dans les composites de plâtre, parmi lesquelles celles réalisées par :

Del Río Merino et al. [72] comparent l'effet de différents granulats légers utilisés dans les composites de plâtre pour leur application dans les éléments préfabriqués, y compris la perlite, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 23%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 38% en flexion et de 14% en compression, la vermiculite exfoliée, avec laquelle ils ont réussi à réduire la densité de 13%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 25% en flexion et de 34% en compression et d'argile expansée, avec laquelle ils ont réussi à réduire la densité de 20%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 45%.

Gmouh et al. [73] et Vimrov á [70] ont analysé le comportement mécanique d'un composite de plâtre allégé à la perlite et ont observé que l'utilisation de ce granulats permettait de réduire la densité de 42%, diminuant également la résistance mécanique de 64% en flexion et de 83% en compression.

Yong et al. [74] ont étudié les propriétés d'un panneau de plâtre allégé avec de la vermiculite.

b) Les produits organiques naturels :

Tels que le liège, les cosses de céréales ou les copeaux de bois, qui sont généralement des déchets agro-alimentaires ou végétaux. Il existe plusieurs études sur l'incorporation de ces granulats légers dans les composites de plâtre, parmi lesquelles, celles réalisées par :

- Hernández Olivares et al. [75] qui ont conçu une plaque de plâtre avec des granulés de liège allégés jusqu'à 43%, avec une perte de résistance de 57% en flexion et de 76% en compression.
- Zhou et al. [76] ont étudié des composites allégés à la sciure de bois et renforcés au latex.
- Leiv a Aguilera et Del Río Méridon [77] ont analysé les propriétés des composites de plâtre avec différents pourcentages d'enveloppe de riz, réduisant la densité d'environ 4%, accompagnée d'une perte de résistance de 37% en flexion et de 60% en compression.

c) Artificielles :

qui sont constitués de sous-produits industriels, tels que les scories de l'industrie sidérurgique et les cendres volantes provenant de la combustion de charbon pulvérisé dans des centrales thermiques, de sous-produits transformés, tels que les scories expansées, ou de matériaux organiques transformés, tels que certains polymères synthétiques. Dans ce dernier groupe, il existe de nombreuses études, principalement sur l'incorporation de matières organiques élaborées, parmi lesquelles on peut souligner celles réalisées par :

- González Ma dari aga [78] a conçu une plaque de plâtre stratifiée allégée avec un résidu de polystyrène expansé, réduisant sa densité de 56%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique en flexion et en compression de 83%.
- Karaman et al. [79] ont analysé les propriétés physiques et mécaniques des composites de plâtre contenant des résidus de bouteilles en plastique PET (polyéthylène téréphtalate) et leur éventuelle application dans les constructions agricoles et ont observé qu'avec cet agrégat, il était possible de réduire la densité et d'améliorer le comportement thermique, mais la résistance mécanique a été García Santos [80] a étudié les composites de plâtre allégés avec des billes de polystyrène, réduisant leur densité de 39%, accompagnés d'une réduction de la résistance mécanique de 45% en flexion et 76% en compression.
- Gutierrez González et al. [81] ont étudié la compatibilité entre les résidus de plâtre et de polyamide afin d'obtenir un matériau léger aux propriétés thermiques améliorées, permettant
- Réduction de la densité de 13%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 59% en flexion et de 61% à la compression.
- Gutierrez González et al. [82] qui ont incorporé des résidus de polyuréthane aux composites de plâtre, obtenant un allègement de 46%, perdant à leur tour une partie de leur résistance mécanique : 81% en flexion et une 77% en compression.
- Khalil et al. [83] qui ont étudié les propriétés des composites de plâtre avec de la fumée de silice et du gel de silice et ont observé qu'avec ces additifs, il était possible d'alléger ces composites.
- Herero et al. [84] ont analysé l'influence de la proportion et de la granulométrie des ajouts de déchets de pneumatiques dans les composites de plâtre, en réduisant sa densité de 37%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique : 86% en flexion et 96% en compression.

- Jiménez Rivero et al. [85] ont analysé les propriétés des composites de plâtre contenant des résidus de caoutchouc provenant des enveloppes d'isolation de tuyaux, en réduisant la densité de 24%, accompagnées d'une perte de résistance mécanique de 54% en flexion et de 67% en compression.

IV. La Perlite

Une roche d'origine volcanique siliceuse naturelle, la perlite possède la propriété de prendre de l'expansion après broyage et cuisson. Lorsque chauffée à des températures variant de 900 à 1100 C°, elle peut dilater de quatre à vingt fois en volume. Lors de la dilatation, les particules de perlite forment des granules blancs qui présentent de minuscules cavités.

• Propriétés

- Bon isolant thermique.
- Imputrescible.
- Inaltérable.
- Non toxique. • 100% Écologique.
- Incombustible.
- Matériau léger.
- Résistant à la compression et au poinçonnement.

La Perlite sert comme isolant thermique et phonique sous les planchers dans les murs, pour les toits et les tuyaux, Elle offre une bonne résistance thermique.



Fig. I. 13. Aspect de la perlite expansé

La faible densité et la texture poreuse de la perlite expansée combinées à une faible conductivité thermique, une capacité d'insonorisation remarquable et des propriétés chimiques neutres expliquent son utilisation répandue et sa valeur commerciale dans trois grands secteurs : la construction, l'horticulture et les applications industrielles [86].

Tab I. 6. Caractéristiques de la perlite expansée [86]

Caractéristiques	Échantillon	Silice SiO ₂	73.20%
Couleur	Blanche	Al ₂ O ₃	13.50 %
% Blancheur	78	Fe ₂ O ₃	1.20 %
Indice de réfraction	1.484	CaO	0.65%
Densité spécifique après exp. (lb/pi. cu.)	4.5 – 5.5	MgO	0.30 %
Densité en vrac (lb/pi. Cu.)	65 – 68	K ₂ O	3.90 %
Absorption d'eau (% poids)	443	Na ₂ O	3.35 %
Absorption d'huile (% poids)	275	TiO ₂	0.06 %
Humidité (%)	0.66	H ₂ O	2.5 %
Perte au feu (%)	1.21		
Densité humide (kg/m ³)	103		
PH (ASTM-1208)	8.6		

V. Fibres De Polypropylène :

Utilisé dans l'industrie textile depuis 1954, le polypropylène est un polymère appartenant à la famille des polyoléfines, obtenu par cristallisation. Grâce à sa résistance élevée à la traction, pouvant atteindre 800 MPa, sa grande déformabilité et son imputrescibilité, cette fibre a progressivement gagné en popularité.

La fabrication des fibres de polypropylène s'effectue par extrusion, un procédé qui permet de leur donner une forme régulière et définie. Ce processus est suivi d'un étirage, qui oriente les molécules dans une direction spécifique afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques.

L'utilisation des fibres de polypropylène dans les mortiers et les bétons remonte à 1960. Toutefois, les premières applications significatives datent de 1967 en Angleterre. À cette époque, elles étaient intégrées dans des panneaux décoratifs d'une épaisseur de 33 cm, utilisés pour orner les façades des bâtiments, mais aussi pour la réalisation de branchements et de pieux [35].

Il est à noter que, bien que le polypropylène puisse s'oxyder sous une exposition prolongée au soleil, son intégration dans la matrice du béton le protège efficacement des rayons ultraviolets [87].

Tab I. 7. Propriétés physiques et mécaniques des fibres de polypropylène [87].

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique (Kg/m ³)	Module D'élasticité (Mpa)	Elongation à la rupture (%)
Polypropylène	0.5 à 4	5 à 7.5	900	4000 à 800	8



Fig. I. 14. Fibres polypropylènes

Conclusion

Il ressort, de l'étude bibliographique de cette partie, que malgré la diversité des actions de recherche dans la filière plâtre dans le monde, il n'existe pas encore des méthodes connues universellement à adapter pour la formulation et la caractérisation des bétons de plâtre. Donc les recommandations de construction avec le plâtre en Algérie sont venues combler un vide existant dans ce domaine. Elles ont été élaborées sur la base des travaux entrepris par le **C.N.E.R.I.B** (essais en labo, prototypes, etc.).

L'un des buts de développement durable est la rationalisation de l'utilisation de l'énergie. L'efficacité énergétique dans le bâtiment est un volet d'action de plusieurs intervenants, les normes visant la rationalisation de la consommation énergétique jouent un rôle important dans le maintien de ce concept. C'est avec l'optimisation de l'aspect technique et normatif que les bâtiments à grande efficacité énergétique, soit généralisée et non seulement des prototypes servant dans le discours politique.

Nous avons également essayé de recueillir le maximum des études effectués par quelques auteurs sur les propriétés physico-chimiques et minéralogique des composites en plâtre qui contribuent à la valorisation et au développement des ressources naturelles et locales.

CHAPITRE II: MATÉRIAUX UTILISÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Introduction

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des caractéristiques physiques et chimiques des différentes matières premières utilisées dans la préparation des composites étudiés, alors que la deuxième partie est réservée à la description des techniques expérimentales utilisées.

I. Matières Premières

Les composants essentiels de notre béton sont le plâtre, la perlite expansée, le sable de dune ; fibres de polypropylène et l'eau de gâchage.

I.1. Plâtre

Le plâtre utilisé est produit à partir du gypse extrait des gisements de El-Adjiba (Bouira), par l'entreprise S.P.A COLPA - Manhar gypse. Il s'agit d'un plâtre à prise rapide, conforme aux normes européennes, destiné aux éléments en staff (corniches, rosaces, etc.).



Fig. II. 1. Plâtre utilisé.

I.1.1. Caractéristiques Chimiques

Tab II. 1. Analyse chimique du plâtre utilisé.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO	Perte au feu (%)
Pourcentage (%)	0,8	0,29	0,16	34,05	2,56	37,8	0,09	0,05	0,92	0,01	0,01	23,22

Les résultats de l'analyse chimique du plâtre utilisé sont présentés par le tableau II.1. Les résultats ainsi obtenus montrent que le plâtre utilisé contient environ % de sulfate de calcium di hydraté ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), soit plus de 90 %, ce qui permet de le classer en classe I [8]. Il est clair que les deux espèces les plus prédominantes sont le SO_3 et le CaO , ce qui confirme que le sulfate de calcium est le constituant principal du plâtre utilisé

I.1.2. Propriétés physiques

I.1.2.1. Masse volumique absolue (NFP 18-555) :

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de l'éthanol contenu dans un densimètre de Chatelier de 100 cm³ (figure II.2), lorsqu'on introduit le plâtre dont on cherche la masse volumique absolue. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$$

Avec M_1 : Masse de (Chatelier + essence).

M_2 : Masse de (Chatelier + essence + plâtre).

V_1 : Volume initial d'essence. V_2 : Volume final de liquide après introduction du plâtre



Fig. II. 2. L'essai de la masse volumique absolue de plâtre

La masse volumique absolue obtenue du plâtre est 2501.38 kg/m³.

I.1.2.2. Caractéristiques techniques

TAB. II. 1. Fiche technique de plâtre COLPA

Rapport de gâchage	Début de prise	Fin de prise	Densité apparente	Dureté superficielle	La finesse Tamis 100µm	Tamis 200µm
1.33	1-2 min	3-4 min	0.65-0.75kg	80 shore C	≤20%	≤ 10%

I.2. Sable De Dune

Les régions du sud disposent de grands gisements de sable de dune ; ce sable est non ou peu exploité. Afin de valoriser ces richesses naturelles et du point de vue environnemental, on a choisi le sable de dune dans la présente étude ; ce sable provient de la région sud de la ville Oued souf.

I.2.1. Propriétés Physiques

Les résultats de l'analyse granulométrique, illustrés par la Figure II.3, montrent que ce sable est de classe granulaire 0/0.63mm présentant une granulométrie continue et serrée. La valeur de l'équivalent de sable montre qu'il est très propre et exempt de matières gypseuses et de matières organiques. Ce sable est fortement recommandé pour la production des bétons et mortier de plâtre de bonnes qualités [8]. Ses propriétés physiques sont présentées dans le tableau II.5.

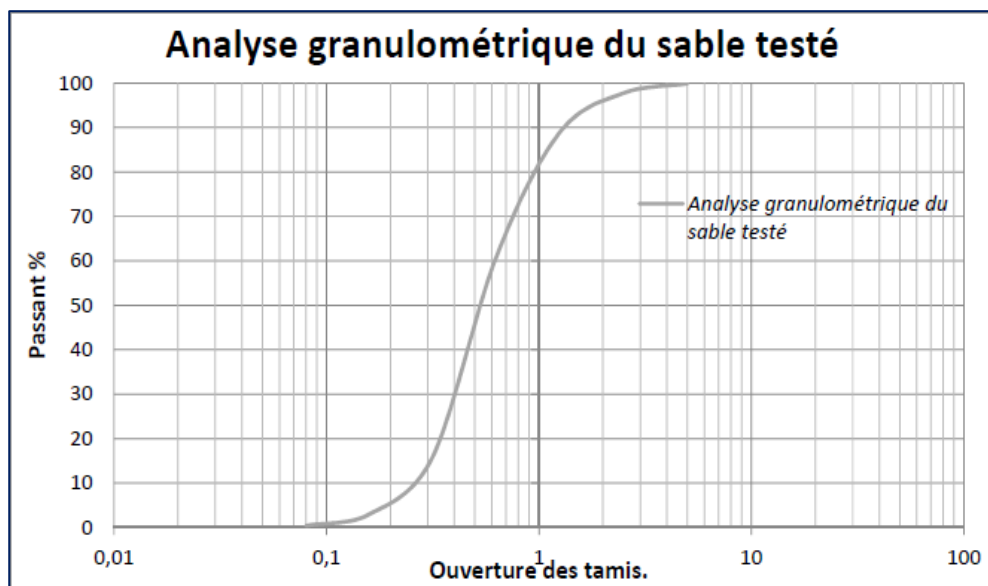


Fig. II. 3. Analyse granulométrique du sable de dune utilisé.

TAB. II. 2. Caractéristiques physiques du sable d'Oued souf.

Masse volumique apparente (kg/m ³)	1602
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2500
Compacité (%)	64
Porosité (%)	36
Module de finesse	3.83
Equivalent de sable (%)	91

I.3. Granulats De Perlite Expansés

Produit manufacturé par l'usine TOUAB, la perlite expansée se présente sous forme de poudre blanche à faible densité et excellente capacité d'isolation thermique. (Figure II.4)



Fig. II. 4. La perlite utilisée.

Les principales propriétés physico-mécaniques de la perlite sont regroupées dans le tableau II. 3

TAB. II. 3. Caractéristiques techniques de la perlite

Densité apparente (kg/m^3)	50 - 80
Densité absolue (kg/m^3)	60
Couleur	Blanc/gris-blanc
Valeur PH	7 -9
Quantité de SiO_2	60 – 80 %

I.4. Fibres De Polypropylène :

Les fibres polypropylènes utilisées sont nommées GRANIFIBRE. L'incorporation de ces fibres dans le béton ou mortier réduit la fissuration.

TAB. II. 4. Caractéristiques des Fibres de polypropylène :

Longueur de la fibre	12 mm
Densité	0.9
Point de fusion	150 C0
Module de Young	3 KN / mm^2
Allongement à la rupture	50%
Section de la fibre	30microns



Fig. II.5 : Fibres polypropylènes

I.5. Eau De Gâchage

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire

II. Techniques De Mesure Expérimentales

Afin de bien apprécier le comportement global des composites étudiés, une analyse complète a été réalisée en évaluant plusieurs propriétés clés : la densité, la résistance à la flexion, la résistance à la compression, ainsi que les propriétés thermiques (conductivité thermique, et chaleur spécifique).

II. 1. Propriétés Physico-Mécanique Des Composites :

II. 1. 1. La Masse Volumique :

Les éprouvettes 4x4x16cm³ sont pesées régulièrement au cours du temps et cela à l'aide d'une balance avec précision de 0.1g. Les masses volumiques mesurés à l'âge de 28 jours

II. 1.2. Traction Par Flexion

L'essai s'effectue à l'aide d'une machine automatique de type Control conformément à la norme européenne EN 12390 et EN 196-1. L'essai d'écrasement en traction par flexion sollicitant l'éprouvette en flexion à 3 points a été réalisé comme montré par la Figure II. 6a. L'essai consiste à centrer la charge, à l'appliquer progressivement jusqu'à rupture à une vitesse de 5 kg/s, et à enregistrer la charge maximale supportée par l'éprouvette. Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de (4x4x16 cm³) à raison de trois à quatre éprouvettes pour chaque composition. Plus de détails sur cet essai sont montrés sur la Fig. II. 6b.

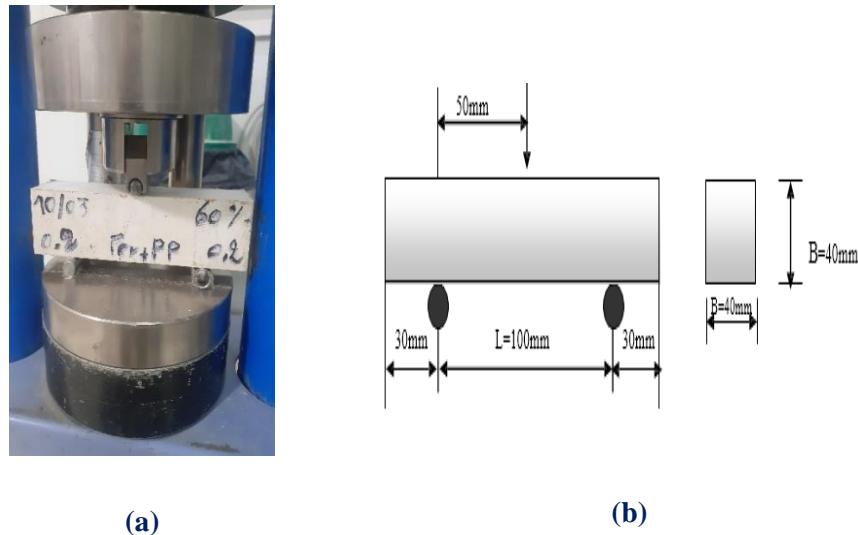


Fig. II. 6. Dispositif de l'essai de Traction par Flexion.

II.1. 3. Essai De compression :

L'essai de compression est effectué à l'aide d'une presse universelle de type Controls, conformément à la norme européenne EN 12390 et EN 196-1. L'essai consiste à placer les demi-prismes de l'éprouvette résultant de l'essai de flexion, entre les plateaux de la presse sous des sections de $40 \times 40 \text{ mm}^2$ (Fig. II.7). L'essai consiste à faire appliquer une charge progressivement jusqu'à rupture à une vitesse de 240 kg/s , et enregistrer la charge maximale supportée par l'éprouvette.

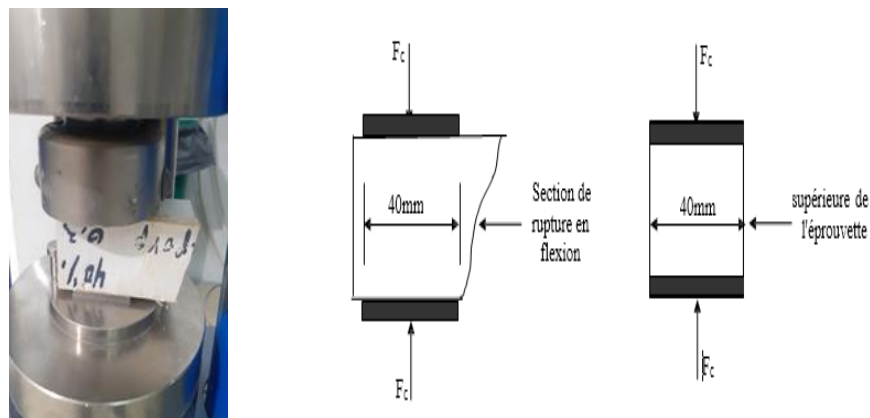


Fig. II. 7. Détail de l'essai de compression.

II. 2. Caractérisation Thermo-Physiques

Les essais ont été effectués au Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), situé à Alger. Ce centre, spécialisé dans l'étude des matériaux de construction, dispose d'équipements permettant de caractériser les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des matériaux de construction.

Dans le cadre de cette étude, les essais suivants ont été réalisés :

- Mesure de la conductivité thermique (λ) : réalisée à l'aide d'un appareil CT-Mètre, permettant de déterminer la capacité d'un matériau à conduire la chaleur.
- Mesure de la chaleur spécifique (C_p) : permet de connaître la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme de matériau d'un degré Celsius.

Les mesures ont été effectuées sur des échantillons découpés à partir d'éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, après un temps de maturation de 28 jours dans des conditions normales de laboratoire. Chaque essai a été répété afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats.

Ces essais ont pour objectif d'évaluer l'efficacité thermique des formulations de plâtre léger à base de perlite et de fibres de polypropylène, et de comparer les performances en fonction des différentes compositions.

II. 2 .1. Méthodologie

Principales phases de réalisation de la prestation :

1. Collecte des informations nécessaires pour assurer la traçabilité de l'essai ;
2. Pré-étuvage, découpage et rectification (sauf si déjà réalisés par le demandeur) ;
3. Étuvage à masse constante puis mesure et validation de la masse volumique ; v Essais de conductivité thermique ;
4. Dépouillement complet et rédaction du rapport.

Pour une mesure au CT Mètre, on dispose une sonde contenant un fil résistif entre deux plaques d'échantillon. Cette paire d'échantillons, initialement isotherme, est soumise à un flux thermique délivré sous forme d'effet Joule par le fil résistif. L'évolution de température mesurée au cours du temps par un thermocouple, également contenu dans la sonde à une distance connue du fil chaud, permet de déterminer la conductivité thermique du matériau.



Fig. II. 5. Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques «CT Mètre».

III. Formulation Des Mortiers De Plâtre Allège Par Des Granulats De Perlite Expansé

L'absence d'une méthode universelle pour la formulation des bétons mortiers de plâtre, nous a conduits à suivre les recommandations pour la construction en plâtre donnée par CNERIB [8].

- Tout d'abord, on fixe le rapport $E/P = 0.60$ qui équivaut au taux de gâchage à saturation.
- Pour le sable, on prend un rapport $S/P = 0.50$ en poids qu'a été également limité par le CNERIB, car, selon leur guide, un excès de sable diminue les propriétés mécaniques des matériaux à base de plâtre [8].
- Concernant les granulats légers, on a essayé d'incorporer les particules de perlite expansées dans mortier de plâtre (plâtre + sable). Le pourcentage de perlite expansé utilisé varie de 0 à 60 % avec un pas de 10 % par substitution volumique du sable ;
- Afin d'éviter le problème de ségrégation en raison de la légèreté des granulats, l'ordre d'introduction des différents constituants du béton dans le malaxeur, en marche, était le suivant :
 - Introduction de la moitié de l'eau ;
 - Introduction du plâtre, perlite expansé et sable dunaire pendant 30 s ;
 - Ajouter l'eau restante ;
 - Malaxer l'ensemble à vitesse rapide pendant 30s ;
 - Arrêter le malaxeur et enlever au moyen d'une raclette tout le plâtre adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci ;
 - Reprendre, ensuite, le malaxeur jusqu'au moment où le composite devient un mélange homogène, sans dépasser 2 min.

Pour la caractérisation physicomécanique des bétons élaborés dans ce travail, on a choisi les éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

La mise en moule est faite, sans vibration, à raison de 3 couches piquées à la truelle chacune pour éviter tout problème de ségrégation pouvant affecter l'homogénéisation des échantillons. Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées à l'air libre du laboratoire en les couvrant d'une toile en plastique. Après 24 heures, les échantillons de composite de plâtre ont été démoulés et conservés dans les conditions du laboratoire pendant 28 jours afin d'obtenir la résistance caractéristique.

❖ On a veillé à ce que les échantillons de conservation soient comme suit :

- Température (C°) : $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Humidité (%) : $45\% \pm 5\%$



Fig. II. 6. Confection des moules

Les résultats de la formulation des mortiers de plâtre légers à base des granulats de perlite (MPP) est illustré sur le tableau II.6 ci-dessous

TAB. II. 5. Compositions pondérales de MPP.

Substitution (%)	Plâtre (g)	Eau (g)	Sable (g)	Perlite (g)
0	1950	1170	975	0
10	1950	1170	878	2,3
20	1950	1170	780	4,7
30	1950	1170	683	7
40	1950	1170	585	9,4
50	1950	1170	488	11,7
60	1950	1170	390	14,1

Pour renforcer la structure et améliorer la résistance à la fissuration, des fibres de polypropylène ont été ajoutées. Le dosage de ces fibres a été fixé à 0,1 %, 0,2 % et 0,3 %, en pourcentage du poids de plâtre utilisé dans chaque formulation.

Ainsi, pour chaque taux de perlite (40 % et 60 %), trois dosages en fibres ont été testés, ce qui donne au total six combinaisons de formulation.

L'ensemble des formulations étudiées MPPF est présenté dans le tableau **II.7**, détaillant les proportions massiques des constituants pour chaque combinaison.

TAB. II. 6. Compositions pondérales de MPPF.

Substitution (%)	Fibres PP (%)	Plâtre (g)	Eau (g)	Sable (g)	Perlite (g)	Fibres PP (g)
40	0.1	1950	1170	585	9.4	1.95
40	0.2	1950	1170	585	9.4	3.9
40	0.3	1950	1170	585	9.4	5.85
60	0.1	1950	1170	390	14.1	1.95
60	0.2	1950	1170	390	14.1	3.9
60	0.3	1950	1170	390	14.1	5.85

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des essais de caractérisation des matériaux étudiés et du matériel ainsi utilisé. Dans la première partie, les différentes analyses physiques et chimiques menées sur les matières premières montrent qu'il n'y a aucun risque qui peut affecter les propriétés du composite et les priver, par conséquent, d'une éventuelle utilisation comme matériaux de construction. Toutes les caractéristiques physiques et chimiques sont bonnes ou acceptables. Les caractéristiques obtenues dans cette partie d'étude vont sûrement nous aider à interpréter les résultats expérimentaux qu'on va trouver pour le composite envisagé. En deuxième partie de ce chapitre, les techniques expérimentales, qui ont été utilisées pour la détermination des différents paramètres étudiés, ont été présentées.

CHAPITRE III: RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE

Introduction :

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les propriétés physico-mécaniques d'un matériau de construction léger, utilisant le plâtre comme liant, ainsi que le sable de dunes et la perlite expansée comme granulats. La nouveauté de ce travail réside dans l'association simultanée de la perlite et du sable de dunes dans une matrice à base de plâtre, pour obtenir un mortier léger, économique et offrant une meilleure isolation thermique.

La première partie porte sur l'étude du comportement thermo-physique des mortiers, tandis que la seconde examine l'effet du renforcement par fibres de polypropylène.

I. Résultats Expérimentaux Et Analyse

L'interprétation des résultats est axée sur l'étude de l'effet de l'incorporation des granulats de perlite expansé (PE) sur les propriétés du mortier à base de plâtre.

I.1. Masse volumique apparente

La densité constitue l'un des premiers critères permettant de qualifier un matériau de construction comme étant léger ou non. Dans le cadre de cette étude, il a été observé que la densité des bétons de plâtre incorporant des granulats de perlite expansés tend à se stabiliser dès l'âge de 14 jours. Les valeurs mesurées à 28 jours, représentées à la Figure III.1,

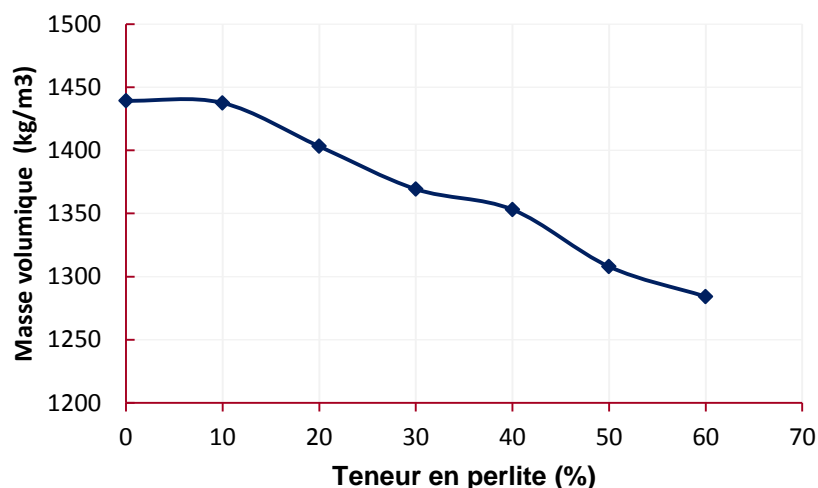


Fig. III. 1. Variation de la densité des composites étudiés en fonction Teneur en perlite (%)

Il est clair que la masse volumique du mélange de référence (0% de perlite expansé), qui est d'environ 1439 kg/m^3 , est beaucoup plus faible que celle du béton de ciment qui est d'environ 2100 kg/m^3 [65]. Donc, même sans perlite expansé, un mortier de plâtre est beaucoup plus

léger que le mortier de ciment. En augmentant la quantité des granulats de perlite, la densité du mortier a diminué. C'est tout à fait normal, puisque la densité de ce type de granulat est plus faible qu'un granulat minéral. En effet, cette réduction de densité est due à la substitution partielle du sable de dune par des granulats légers.

Par rapport au mortier de référence (sans perlite expansée), une réduction de la densité d'environ 11 % a été observée avec l'introduction de 60 % de particules de perlite expansée.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans d'autres travaux de la littérature, en particulier ceux portant sur l'incorporation de granulats légers dans des matrices à base de plâtre.

Laoubi et al. Ainsi que San Antonio-González et al. Ont étudié des composites légers à base de plâtre, en y intégrant différentes proportions de granulats légers, tels que le polystyrène expansé ou des particules issues de déchets de caoutchouc. Leurs résultats montrent que l'augmentation de la teneur en granulats légers conduit à une diminution de la densité du composite [1 ; 88]

I.2. Résistance Mécanique :

Les variations des résistances à la flexion et à la compression à 28 jours du mortier de plâtre, en fonction de la proportion de granulats de perlite expansés, sont présentées respectivement dans les figures III.2 et III.3

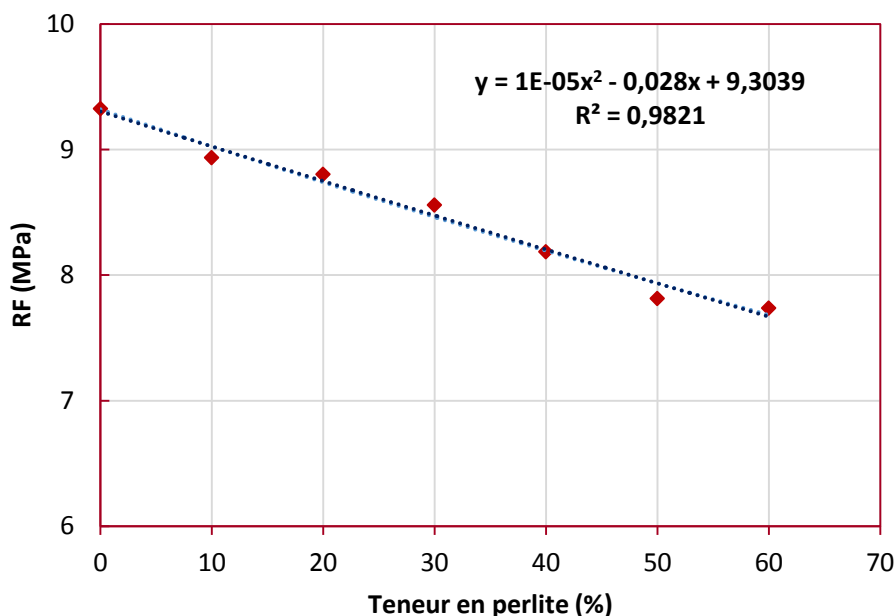


Fig. III. 2. Variation de résistance à la flexion des mortiers étudiés en fonction de la teneur de la perlite expansé.

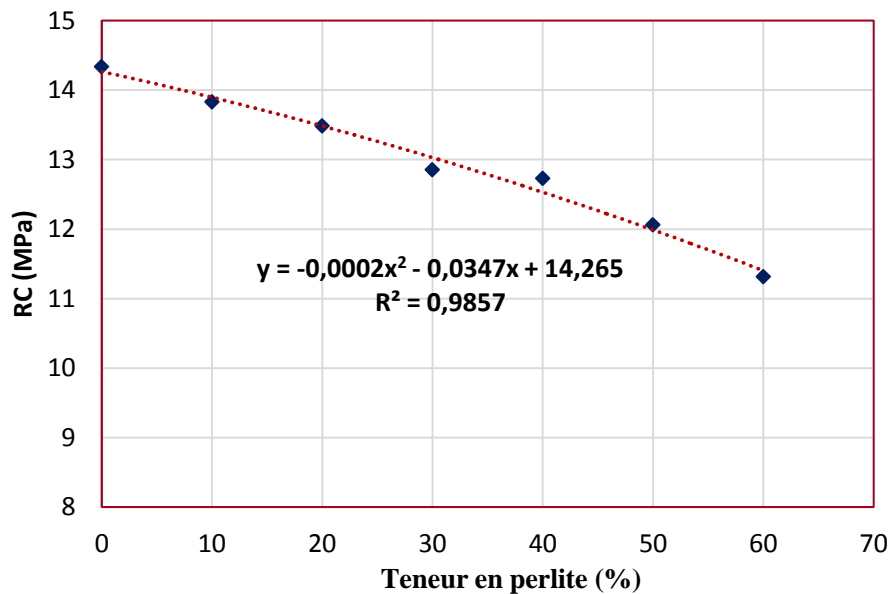


Fig. III. 3. Variation de résistance à la compression des mortiers étudiés en fonction de la teneur de la perlite expansé.

Il est clairement observé que la résistance mécanique du mortier de plâtre, tant en compression qu'en flexion, diminue avec l'augmentation de la teneur en granulats de perlite expansée. Pour une proportion de 60 % de perlite, la résistance à la flexion chute de 9,3 MPa à 7,7 MPa, tandis que la résistance à la compression passe de 14,3 MPa à 11,3 MPa. Ces diminutions correspondent à une densité variant de 1439 à 1284 kg/m³. Lorsque la proportion de perlite expansée atteint 60 %, la perte de performance mécanique atteint environ 17 % en flexion et 21 % en compression. Cette tendance confirme une relation bien connue dans le domaine des matériaux de construction : la diminution de la densité entraîne généralement une réduction significative de la résistance mécanique. Dans le cadre de cette étude, comme l'illustre la Figure III.4, la diminution de la densité du mortier induite par la substitution partielle du sable par la perlite expansée est directement corrélée à une baisse de ses performances mécaniques. Cette réduction est attribuée, d'une part, au remplacement des grains de sable (plus rigides et résistants) par des particules de perlite expansée (plus souples et moins résistantes), et d'autre part, à la faible capacité de ces particules à résister à la compression. En effet, la perlite expansée, en raison de sa faible rigidité et de sa grande déformabilité, ne contribue pas significativement à la résistance du composite. De plus, elle ne participe pas aux réactions chimiques avec la matrice à base de plâtre, contrairement à certains autres types de granulats. Dans le cas de la flexion, la baisse de résistance peut également s'expliquer par une adhérence limitée entre la matrice de plâtre et les particules de perlite, comparée à celle observée avec le sable de dune. Il est raisonnable de penser que, si

l'adhérence « matrice – perlite » était améliorée, la flexibilité de la perlite pourrait être mieux exploitée pour contribuer à la résistance en flexion du composite.

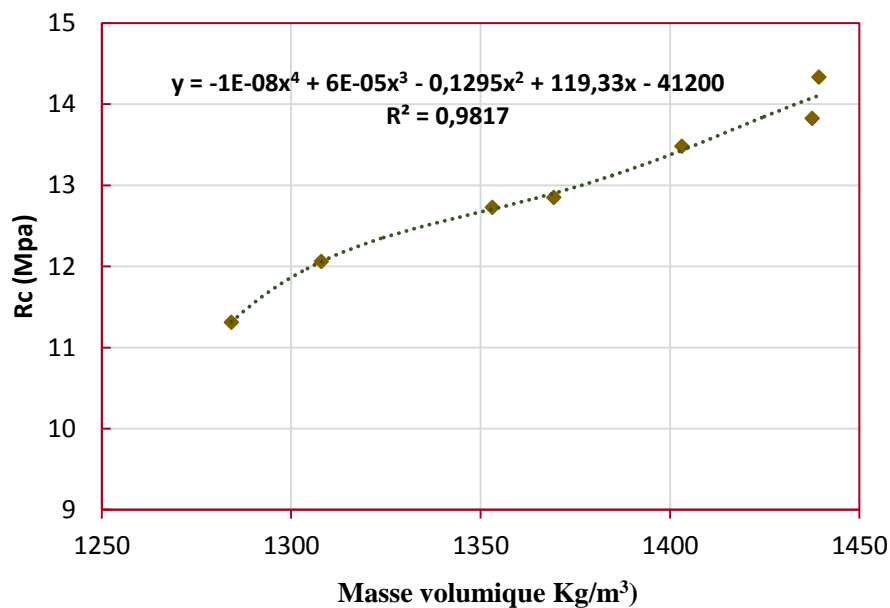


Fig. III. 4. Variation de la résistance à la compression de mortiers étudiés en fonction de la masse volumique.

La relation entre la densité et la résistance à la compression suit une **courbe polynomiale**, caractérisée par un **coefficient de corrélation élevé**, proche de **1**. Ce comportement met en évidence une corrélation forte entre l'allègement du matériau et la perte de performance mécanique.

I.3. Étude Des Propriétés Thermique

Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient essentiellement au travers de deux paramètres usuels : la conductivité thermique « λ » et la chaleur spécifique volumique « C_v ». Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants et de la microstructure du matériau.

Cette partie vise à décrire le comportement thermique du mortier de plâtre allégé par les granulats de perlite expansé à partir de l'étude de la conductivité, la chaleur spécifique volumique.

I.3.1. Conductivité Thermique

Les valeurs de la conductivité thermique des mortiers étudiés sont illustrées dans la figure III.5.

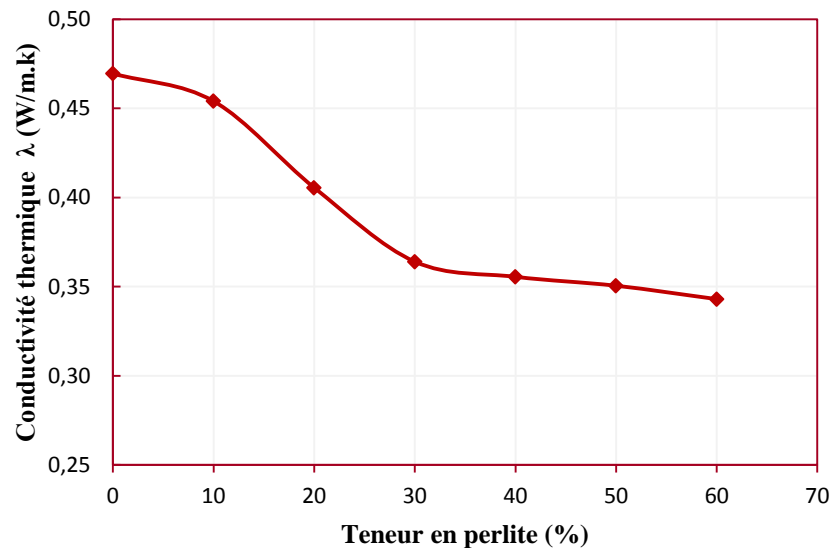


Fig. III. 5. Variation de conductivités thermiques λ en fonction du teneur des granulats de perlite expansé

Selon la figure III.7, on constate que la conductivité thermique diminue au fur et à mesure que le pourcentage de perlite expansé augmente. La conductivité thermique la plus basse, qui est de **0,34** W.m⁻¹.k⁻¹, est obtenue avec une addition de 60 % de granulats de perlite expansé ; cela représente une diminution d'environ **26,9** % par rapport au mortier témoin, qui semble tout à fait normal, puisque des granulats minéraux (sable de dune) ont été remplacés par des granulats de perlite caractérisée par une plus faible conductivité thermique. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec celles de la littérature. Sergiu-Mihai et al. [89] ainsi que P. Jira. Étal [86 ,88,90] ont fait la même observation dans le cas de l'addition de polystyrène expansé ou de polystyrène extrudé dans un composite de plâtre seul ; et même avec des composites à base de plâtre et granulats de caoutchouc ou de liège [84-85,91].

En outre, la conductivité thermique obtenue avec le mortier de contrôle (sans perlite) est conforme aux recommandations de RILEM qui préconise, pour un béton léger de construction et d'isolation (classe II). Cette constatation est en accord avec de nombreuses études réalisées sur des composites de plâtre ou de ciment basés sur les granulats de perlites expansé [21,24] et même avec des composites à base de chaux et de « pierre d'olive » [25].

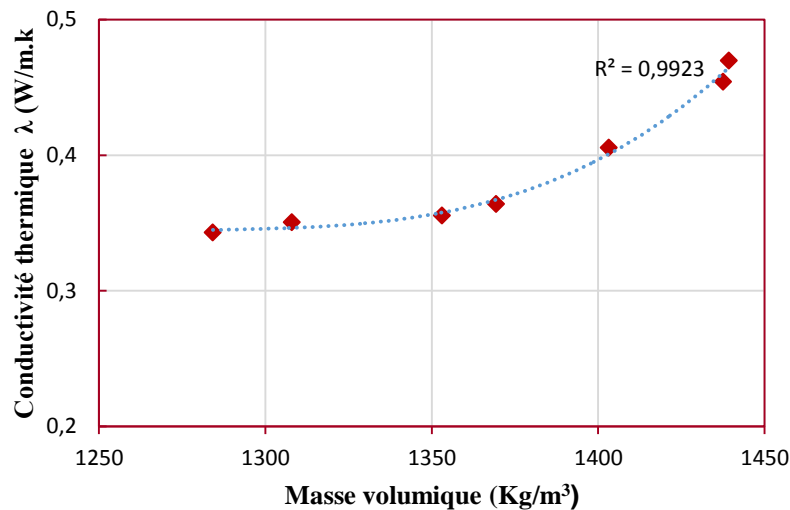


Fig. III. 6. Relation entre la conductivité et la masse volumique des mortiers étudiés.

Par conséquent, on peut déduire que l'addition de perlite expansé joue un rôle important dans l'allègement du béton et la réduction de sa conductivité thermique (λ). Pour notre étude et d'après la figure III. 8. La variation de la conductivité thermique en fonction de la densité suit une fonction polynomiale avec un coefficient de corrélation proche de 1. Selon les résultats obtenus, la densité du matériau diminue de 1439 kg / m^3 à 1284 kg / m^3 , lorsque la teneur en perlite expansé augmente de 0 à 60 %, la conductivité thermique diminue de 0,47. à 0,34 W/m.K., soit une amélioration de 26,9. %.

I.3.2. La Chaleur Spécifique Volumique

La chaleur spécifique volumique (C_v) d'un matériau correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un mètre cube de ce matériau d'un degré Celsius (ou Kelvin). Plus cette valeur est élevée, plus le matériau peut stocker de chaleur, ce qui signifie qu'il mettra plus de temps à changer de température face à une variation thermique.

Les valeurs de la chaleur spécifique volumique des mortiers étudiés sont illustrées dans la figure III.7

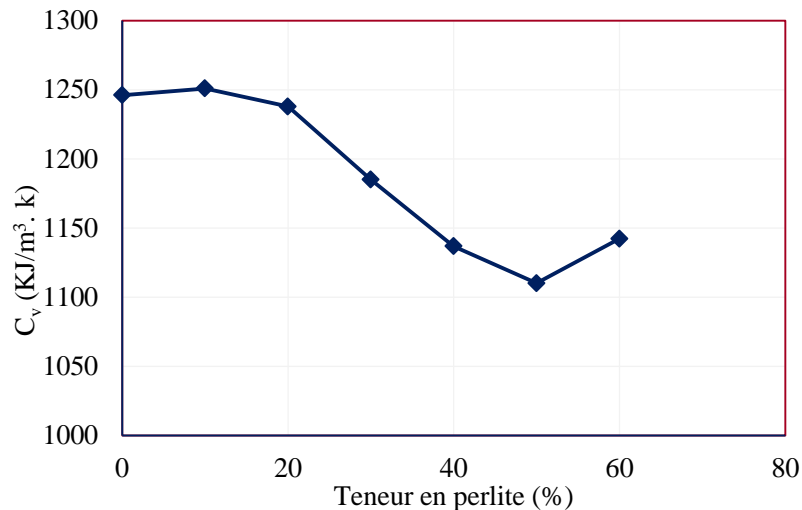


Fig. III. 7. Variation de chaleur spécifique volumique C_v en fonction du teneur des granulats de perlite expansé

Dans notre étude, l'ajout de perlite expansée réduit la densité du mortier, entraînant une baisse de sa chaleur spécifique volumique. Cela implique que le matériau nécessite moins d'énergie pour augmenter ou diminuer sa température, ce qui favorise une régulation thermique plus rapide. En d'autres termes, le mortier MPP peut se réchauffer et se refroidir plus vite, ce qui peut être avantageux pour limiter les effets de surchauffe diurne ou pour mieux s'adapter aux variations rapides de température.

Ce comportement peut être particulièrement utile dans les applications où une réponse thermique dynamique est souhaitée, complétant ainsi l'effet isolant apporté par la réduction de la conductivité thermique.

I.3.3. Impact de la régulation thermique Rapide Sur Le Confort Dans Le Bâtiment

La capacité d'un matériau à réguler rapidement sa température joue un rôle clé dans le confort thermique intérieur. Un matériau avec une faible chaleur spécifique volumique, comme notre mortier enrichi en perlite expansée, peut rapidement s'adapter aux variations de température extérieure. Cela permet notamment de limiter les pics de chaleur pendant la journée en évitant une accumulation excessive de chaleur à l'intérieur, tout en facilitant un refroidissement plus rapide la nuit.

Cette dynamique améliore la qualité de vie des occupants en réduisant les sensations d'inconfort liées aux fluctuations thermiques, et peut aussi contribuer à diminuer les besoins en climatisation ou chauffage artificiels, participant ainsi à l'efficacité énergétique du bâtiment.

Ainsi, en combinant une faible conductivité thermique (meilleure isolation) avec une chaleur spécifique volumique réduite (régulation rapide), le mortier contenant de la perlite expansée offre un avantage double : protéger contre les pertes de chaleur tout en assurant une réponse thermique dynamique favorable au confort.

II. Analyse des propriétés thermomécaniques d'un mortier de plâtre armé de fibres de polypropylène

II.1. Comportement mécanique du mortier de plâtre renforcé :

Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la résistance à la flexion et à la compression en fonction de la teneur en fibres de polypropylène pour deux formulations de mortier de plâtre contenant respectivement 40 % et 60 % de perlite expansée (MPP40, MPP60).

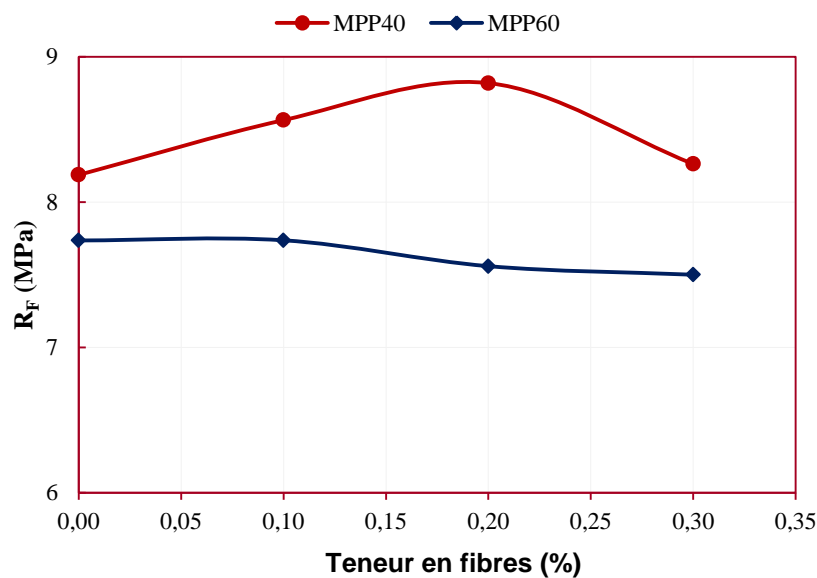


Fig. III. 8. Variation de résistance à la flexion des mortiers étudiés en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.

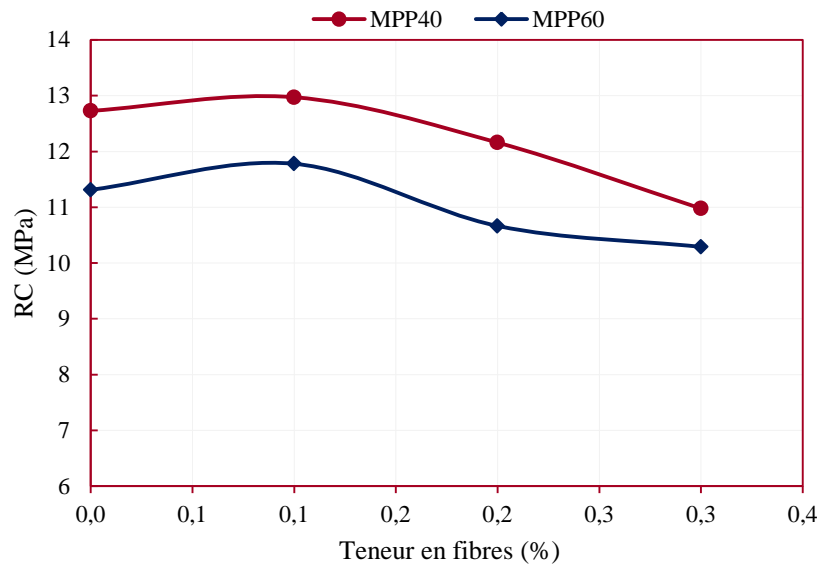


Fig. III. 9. Variation de résistance à la compression des mortiers étudiés en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.

L'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la flexion, surtout à faible dosage (jusqu'à 0,2 %), en particulier dans les mortiers contenant 40 % de perlite. Avec une amélioration à 0,2 % de fibres, atteignant 8,82 MPa, soit une augmentation de plus de 7 % par rapport au témoin (8,19 MPa) ; Au-delà, la résistance diminuée légèrement, en raison d'une dispersion irrégulière des fibres sou à une perte de cohésion au sein de la matrice.

En compression, une légère amélioration est observée à 0,1 %, mais des taux plus élevés entraînent une baisse de performance liée à une perte de compacité. Une optimisation du dosage est donc nécessaire pour équilibrer gain en flexibilité et maintien de la résistance.

II.2. Comportement thermique du mortier de plâtre renforcé :

Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la conductivité thermique et à la chaleur spécifique volumique (Cv) en fonction de la teneur en fibres de polypropylène pour deux formulations de mortier de plâtre contenant respectivement 40 % et 60 % de perlite expansée (MPP40, MPP60).

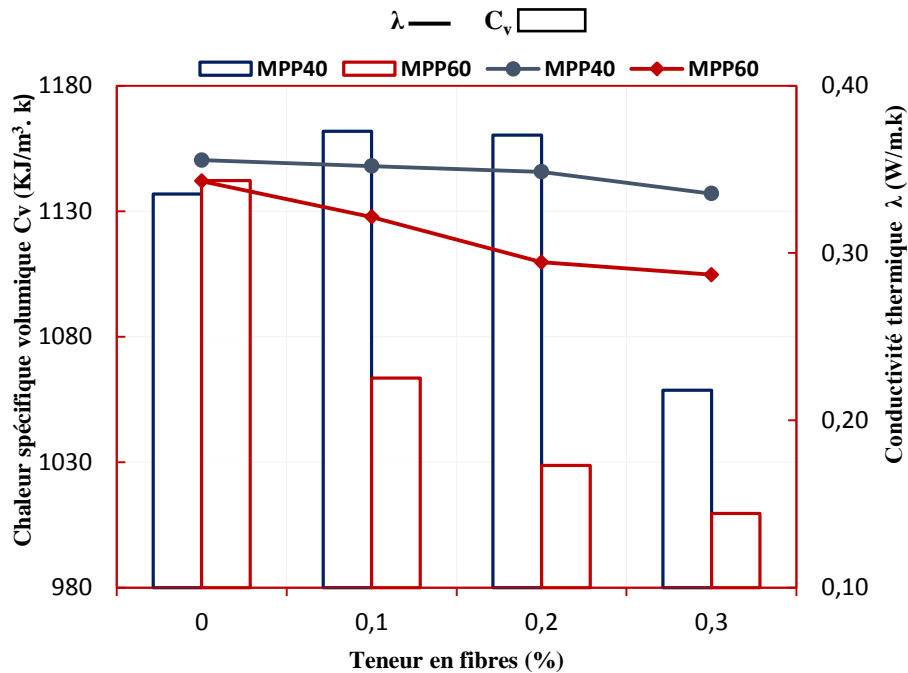


Fig. III. 10. Variation de conductivités thermiques λ et de chaleur spécifique volumique C_v des mortiers étudiés en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.

L'ajout de fibres de polypropylène entraîne une baisse progressive de la conductivité thermique (λ) dans les deux formulations. Cette réduction s'explique par la faible conductivité thermique propre aux fibres, ainsi que par leur capacité à perturber la continuité de la matrice, introduisant des interfaces supplémentaires qui diffusent le flux de chaleur.

- À 40 % de perlite, la conductivité thermique diminue de 0,360 à 0,3355 W/m·K, soit une diminution d'environ 6,8 %.
- À 60 % de perlite, la baisse est plus marquée, passant de 0,340 à 0,287 W/m·K, ce qui correspond à une diminution d'environ 15,6 %.
- En ce qui concerne la chaleur spécifique volumique (C_v), une diminution notable est observée au-delà de 0,2 % de fibres :
- Pour 40 % de perlite, C_v passe de 1160,25 à 1058,65 kJ/m³·K, soit une baisse de 8,75 %.
- Pour 60 % de perlite, C_v chute de 1142,25 à 1009,55 kJ/m³·K, correspondant à une diminution de 11,6 %.

Le matériau bénéficie d'un équilibre favorable entre isolation et inertie thermique :

- La réduction de la conductivité thermique limite les échanges rapides de chaleur.

- La chaleur spécifique volumique, bien que légèrement réduite, reste à un niveau permettant un stockage thermique significatif.

Cette combinaison assure une régulation thermique efficace, caractérisée par une limitation des fluctuations rapides de température et une restitution différée de la chaleur.

II.3. Recommandations constructives pour les ouvrages en plâtre en contexte algérien :

Dans le cadre de notre objectif de développer un matériau destiné à la fabrication de blocs pour murs porteurs extérieurs, les résultats obtenus sont particulièrement encourageants. Conformément aux Recommandations techniques pour les constructions en plâtre établies par le CNERIB [8], l'utilisation de blocs, mortiers ou bétons de plâtre est autorisée dans le secteur du bâtiment, à condition que les matériaux utilisés soient conformes aux spécifications techniques et offrent des caractéristiques régulières et contrôlées.

III.1. Zones d'application :

Les recommandations s'appliquent principalement aux zones à sismicité faible ou nulle. Toutefois, pour les zones à sismicité moyenne ou forte (zones 2 et 3), l'application est possible sous réserve de renforcer la structure, en intégrant des chaînages horizontaux et verticaux conformément aux prescriptions parasismiques en vigueur pour les maçonneries.

III.2. Limites d'utilisation :

- Murs porteurs en plâtre : Les ouvrages à base de plâtre sont limités aux constructions simples d'un ou deux niveaux, peu importe leur usage ou fonction. La résistance à la compression des blocs doit être d'au moins 4 MPa, mesurée après 28 jours de durcissement.
- Sensibilité à l'humidité : Le plâtre étant sensible à l'humidité, son utilisation est recommandée principalement dans des zones à faible hygrométrie et à précipitations limitées. Il est conseillé de prévoir un soubassement en béton armé ou en pierres dures et une toiture débordante pour assurer la protection du matériau contre l'eau et prolonger sa durabilité.

III.3. Analyse des performances du produit développé :

Notre mortier élaboré à base de plâtre, sable, perlite expansée et fibres de polypropylène. Les résultats obtenus mettent en évidence les performances suivantes :

- Résistance à la compression : supérieure à 11 MPa

- Résistance à la flexion : supérieure à 7 MPa
- Conductivité thermique : 0,29 W/m·K

Ces performances dépassent largement les exigences minimales définies par la norme NF EN 771-1, l'Euroco de 6 (NF EN 1996-1-1) ainsi que les recommandations du CNERIB, qui fixent à 4 MPa la résistance minimale à la compression pour les matériaux destinés aux murs porteurs extérieurs. Par ailleurs, la faible conductivité thermique mesurée ($\lambda = 0,29$ W/m·K) confirme le bon potentiel isolant du matériau.

Les résultats obtenus sont très prometteurs pour l'utilisation de ces blocs en murs porteurs extérieurs. Toutefois, pour garantir leur durabilité, il est essentiel de les protéger contre l'humidité à l'aide d'un enduit hydraulique ou d'un bardage adapté, conformément aux règles techniques et aux recommandations du **CNERIB**.

Conclusion

L'incorporation de perlite permet d'obtenir un mortier à la fois léger avec des performances mécaniques acceptables. L'ajout de fibres de polypropylène, lorsqu'il est bien dosé, améliore notamment la résistance à la flexion. Cependant, pour éviter toute dégradation des propriétés, il est crucial d'optimiser précisément les proportions des composants afin de garantir un bon compromis entre légèreté, isolation thermique et résistance mécanique.

CHAPITRE IV : Évaluation énergétique d'une maison en fonction des matériaux de l'enveloppe murale

Introduction

L'enveloppe murale constitue un élément clé dans la régulation thermique d'un bâtiment. Elle joue un rôle essentiel en limitant les pertes de chaleur en hiver, en réduisant les apports thermiques indésirables en été et, par conséquent, en améliorant le confort intérieur tout en diminuant la consommation énergétique globale. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des murs extérieurs influence directement ces performances.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser l'impact d'un matériau composite, utilisé sous forme de blocs pour la réalisation des murs extérieurs, sur les besoins énergétiques du bâtiment en matière de chauffage et de refroidissement. Cette évaluation est menée à travers une simulation thermique annuelle. L'étude prend en compte les conditions climatiques spécifiques de la ville de M'sila, caractérisée par de fortes amplitudes thermiques, afin de déterminer dans quelle mesure cette solution constructive permet une optimisation énergétique par rapport aux matériaux conventionnels tels que le parpaing et la brique.

I. Caractéristiques Climatiques De La Ville De M'sila,

Située dans le centre de l'Algérie, la ville de M'sila est classée en zone climatique D selon la classification nationale, avec une latitude de 35,7°N et une longitude de 4,5°E. Elle est soumise à un climat semi-aride, caractérisé par des étés très chauds et secs et des hivers froids, avec de forts contrastes thermiques journaliers. La température moyenne du mois le plus froid (janvier) est d'environ 6,5 °C, tandis que la température maximale moyenne en été dépasse les 50 °C. Les amplitudes thermiques entre le jour et la nuit sont marquées, accentuant les écarts de température ressentis par les occupants. L'humidité relative est généralement faible, oscillant entre 30 % en été et jusqu'à 65 % en hiver.

Ce profil climatique fait de M'sila un site d'étude pertinent pour évaluer la performance énergétique et l'efficacité des matériaux de construction destinés à améliorer le confort thermique dans les régions à forte amplitude thermique.

II. Transfert De Chaleur Et Le confort thermique

Le confort thermique dans les constructions est lié directement au transfert de chaleur à travers l'enveloppe bâtie, entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. Dans cette étude, le flux de chaleur qui traverse le mur est considéré dans une seule direction de (x) et dépend du temps (t). La géométrie du problème est montrée dans la Fig. IV. 1. Pour ce problème, l'équation du transfert de chaleur, par conduction, s'écrit comme suit en fonction de (T, t, x) :

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{IV} - 1)$$

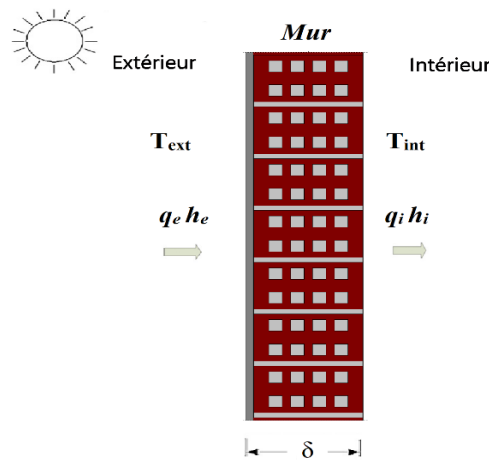


Fig. IV. 1. Schéma du transfert de chaleur dans un mur extérieur.

Avec (λ) : la conductivité thermique, (ρ) : la masse volumique et (c_p) : la chaleur spécifique du matériau qui constitue le mur. Pour résoudre ce problème, deux conditions aux limites et une condition initiale sont exigées. Elles peuvent être écrites comme suit [92, 93] :

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_i [T_{x=0}(t) - T_i], \quad k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_o [T_{sa}(t) - T_{x=L}(t)]. \quad (\text{IV} - 2)$$

Où, h_i est le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface intérieure du mur, h_o est le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface extérieure du mur, $T_{x=0}$ est la température de la surface intérieure du mur, $T_{x=L}$ est la température de la surface extérieure du mur, T_i est la température de la chambre et $T_{sa}(t)$ est la température sol-air (température extérieure combinée périodiquement avec les radiations solaires).

Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la simulation sont portées dans le tableau 1.

TAB. IV. 1. Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction

Matériaux De construction	Masse volumique (kg/m³)	Conductivités thermique (W/mK)
Parpaing	1300	1,1
Brique	900	0,48
Mortier de ciment	2100	1,40
Bloc de PPF	1248	0,295

III. Quantification Des gains Énergétiques

Afin d'intégrer le matériau, sujet d'étude, dans un bâtiment, nous avons choisi une cellule type pour étudier l'impact de l'utilisation de ce matériau comme bloc pour la construction du mur extérieur sur la consommation énergétique, et par conséquent sur le confort thermique de l'individu.

Notre investigation est menée sur une habitation individuelle supposée dans la ville de M'sila. Les figures IV.2, et 3 représentent successivement le plan de la transversal le (niveau 1) et un modèle 3D, en utilisant le logiciel CYPETHERM EPlus.

CYPETHERM EPlus est un logiciel destiné à l'étude de la simulation des performances énergétiques des bâtiments avec le moteur de calcul Energy Plus™ (version 9.1), il permet une création rapide du projet :

- Calcul de la demande énergétique du chauffage et du refroidissement ;
- Évolution de la température des locaux ;
- Affichage des bilans énergétiques mensuelle et annuelle.

Le logiciel complet CYPETHERM EPlus, est disponible en version d'évaluation gratuite.

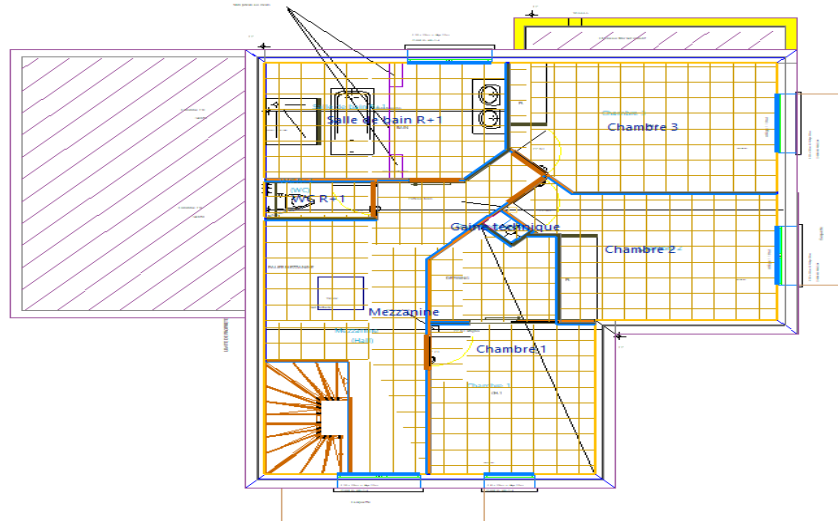


Fig. IV. 2. Vue en plan niveau 1.

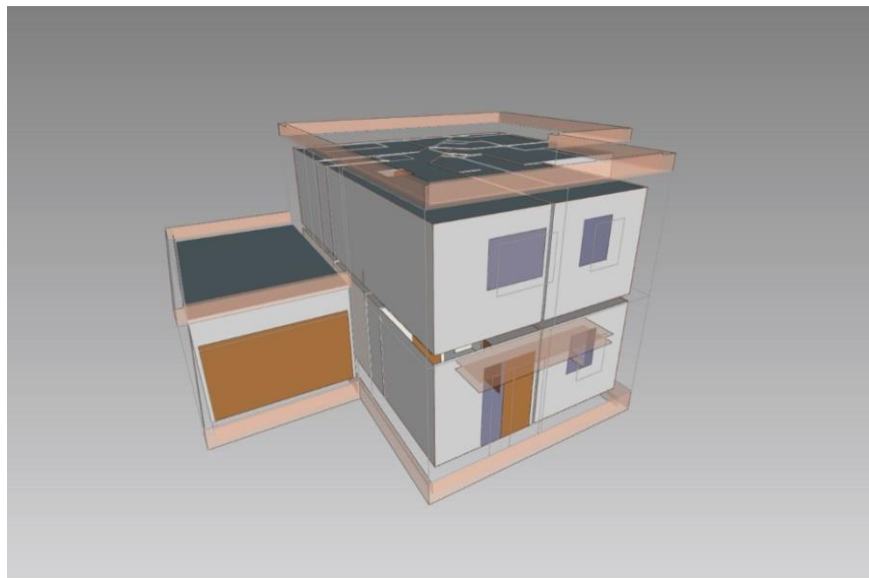
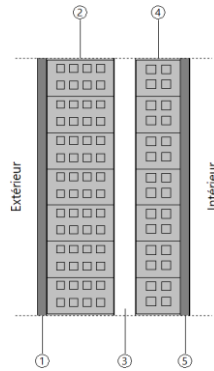


Fig. IV. 3. Modèle 3D.

Afin de modéliser le bâtiment, les matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe (plancher haut, plancher bas, murs extérieurs, portes et fenêtres) ont été définis. Leurs propriétés thermo-physiques ont été extraites du document technique réglementaire algérien DTR C 3-2 [94].

Dans le cadre de l'évaluation de la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment, une analyse comparative a été réalisée sur la base de trois configurations de murs extérieurs : un mur à double paroi en parpaing, un mur à double paroi en briques, et un mur conçu à partir de notre matériau composite à base de PPF.

Paroi extérieure en parpaing : MP

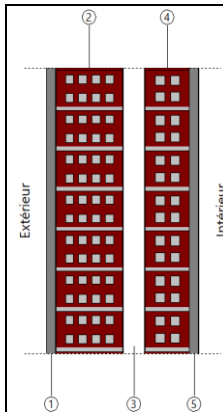


Liste des couches :

- | | |
|-----------------------|----------|
| 1 - Mortier de ciment | 2.00 cm |
| 2 - Parpaing | 15.00 cm |
| 3 - lame d'air | 5.00 cm |
| 4 - Parpaing | 10.00 cm |
| 5 - Mortier de ciment | 2.00 cm |

Caractéristiques Transmittance thermique, $U : 1.64 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Épaisseur totale 34.00 cm

Paroi extérieure en Brique : MB

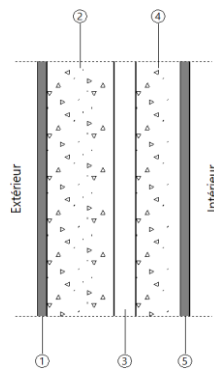


Liste des couches :

- | | |
|-----------------------------|----------|
| 1 - Mortier de ciment | 2.00 cm |
| 2 - Brique | 15.00 cm |
| 3 - lame d'air non ventilée | 5.00 cm |
| 4 - Brique | 10.00 cm |
| 5 - Mortier de ciment | 2.00 cm |

Caractéristiques Transmittance thermique, $U : 1.11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Épaisseur totale 34.00 cm

Paroi extérieure en bloc du notre matériau : MPPF



Liste des couches :

- | | |
|-----------------------------|----------|
| 1 - Mortier de ciment) | 2.00 cm |
| 2 - Bloc PPF | 15.00 cm |
| 3 - lame d'air non ventilée | 5.00 cm |
| 4 - Bloc PPF | 10.00 cm |
| 5 - Mortier de ciment | 2.00 cm |

Caractéristiques Transmittance thermique, $U : 0.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Épaisseur totale 34.00 cm

Fig. IV. 4. Disposition des murs à double paroi : (a) en parpaing, (b) en brique) en bloc PPF

III. 1. Demande énergétique mensuelle de chauffage et de refroidissement.

Répondant uniquement à la demande énergétique à couvrir, par les systèmes de chauffage et de refroidissement, les nécessités énergétiques au cours de la simulation annuelle, sont montrées dans les figures IV.5 et 6 suivants :

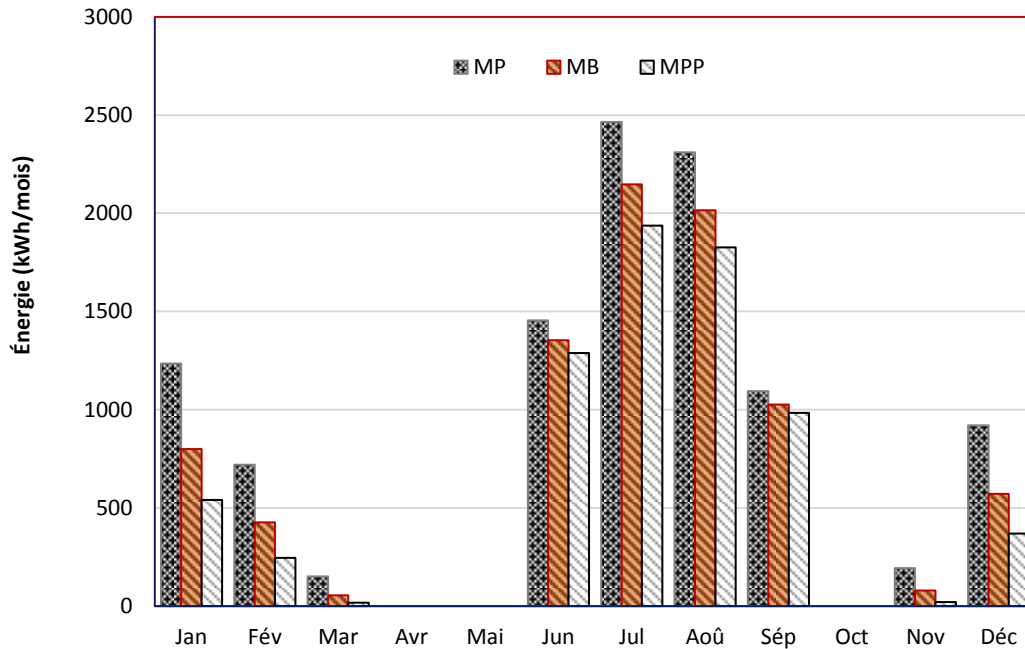


Fig. IV. 5. Bilan énergétique du bâtiment mois par mois .

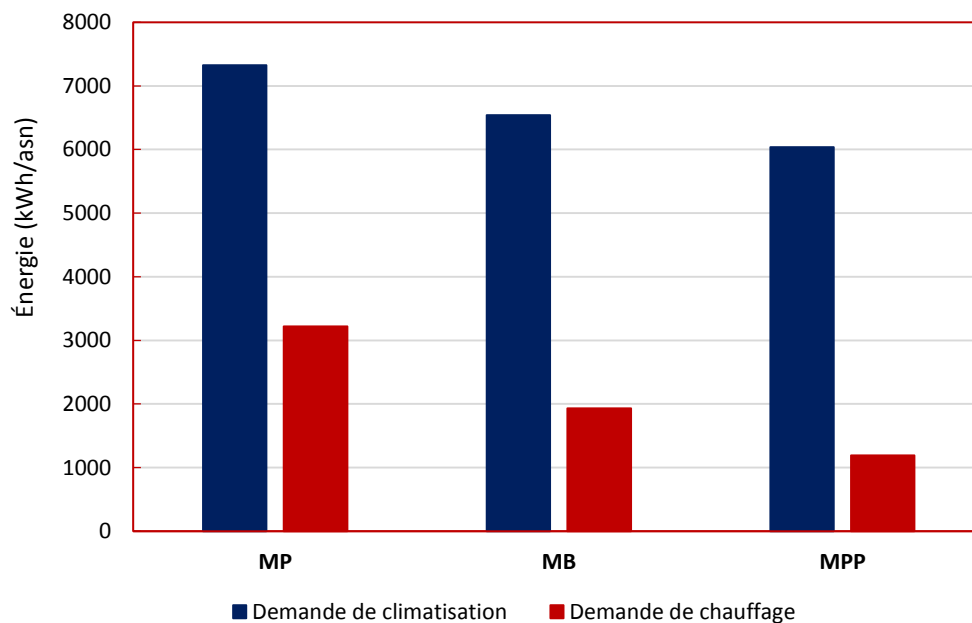


Fig. IV. 6. Demande énergétique annuelle de chauffage et de climatisation pour les différents cas.

Les résultats issus de la simulation thermique ont permis d'évaluer les besoins annuels en énergie du bâtiment en fonction du type de murs extérieurs.

Dans le cas d'un mur à double paroi en parpaing, les besoins en chauffage atteignent 3219,56 kWh/an, tandis que ceux en climatisation s'élèvent à 7324,47 kWh/an, pour une consommation totale annuelle de 10 544,03 kWh.

L'option d'un mur en brique permet une amélioration notable, avec des besoins réduits à 1930,31 kWh/an pour le chauffage et 6542,47 kWh/an pour la climatisation, soit un total de 8472,78 kWh/an.

Avec l'adoption du bloc composite PPF, les performances énergétiques sont significativement améliorées : les besoins en chauffage chutent à 1193,40 kWh/an et ceux en climatisation à 6034,89 kWh/an, pour une consommation globale de 7228,29 kWh/an.

Ces résultats révèlent des gains notables en efficacité énergétique :

- Pour le chauffage, le bloc PPF permet une réduction des besoins de :
 - **38,18 %** par rapport au mur en brique,
 - **62,93 %** par rapport au mur en parpaing.
- Pour la **climatisation**, les économies atteignent :
 - **7,76 %** par rapport au mur en brique,
 - **17,61 %** par rapport au mur en parpaing.

Les résultats présentés dans la figure IV.7 confirment que le matériau composite PPF, utilisé pour la constitution de l'enveloppe murale extérieure, contribue significativement à l'amélioration du confort thermique du bâtiment, en permettant une réduction notable des besoins énergétiques annuels. Comparée aux autres configurations, l'utilisation du bloc PPF permet un gain énergétique global de l'ordre de 14,7 % par rapport au mur en brique, et de 31,4 % par rapport au mur en parpaing.

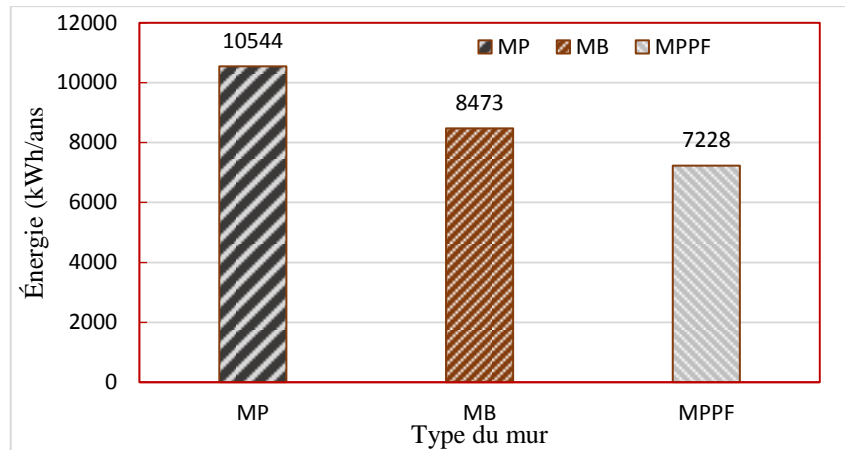


Fig. IV. 7. Bilan énergétique du bâtiment par année

C'est un chiffre significatif, bien sûr, si on prend en compte que l'amélioration est limitée aux murs extérieurs seulement.

Cette performance globale résulte principalement de la faible conductivité thermique et de la bonne inertie du matériau, ce qui permet de limiter à la fois les pertes de chaleur en hiver et les apports indésirables en été. Ainsi, le composite PPF constitue une solution constructive efficace, durable et particulièrement adaptée aux régions soumises à de fortes amplitudes thermiques, comme la ville de M'sila.

Cette amélioration s'explique par la présence de perlite expansée, qui assure la fonction principale d'isolant thermique dans le mortier, et par la structure poreuse du plâtre, qui contribue également à réduire les transferts thermiques. L'ajout de fibres de polypropylène, bien que n'ayant qu'un effet marginal sur la conductivité thermique, renforce la cohésion du matériau et limite l'apparition de microfissurations, susceptibles d'altérer ses performances dans le temps.

CONCLUSION

Ce chapitre a démontré, à travers une simulation thermique, que l'utilisation de blocs composites à base de PPF pour les murs extérieurs permet une nette amélioration de la performance énergétique du bâtiment. Comparé aux murs en parpaing et en brique, le bloc PPF réduit considérablement les besoins en chauffage et en climatisation, grâce à sa faible conductivité thermique. Ces résultats confirment son efficacité pour un meilleur confort thermique, en particulier dans les régions à forte amplitude thermique comme M'sila.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans une démarche de développement d'un matériau de construction innovant, léger à base de plâtre, de sable de dunes, de perlite expansée et de fibres de polypropylène, en vue de son utilisation dans les blocs pour murs porteurs extérieurs. À travers une approche expérimentale et numérique, ce travail a permis d'examiner en profondeur les propriétés physico-mécaniques, thermiques et énergétiques du matériau développé.

L'incorporation de la perlite expansée a permis de réduire la masse volumique du mortier d'environ 11 %, tout en diminuant la conductivité thermique jusqu'à 0,29 W/m·K, soit une amélioration de 26,9 %. Ce gain confirme l'efficacité de la perlite expansée dans l'amélioration de l'isolation thermique du matériau. La diminution de masse s'accompagne néanmoins d'une légère baisse des résistances mécaniques ;

La résistance à la flexion chute de **9,3 MPa à 7,7 MPa**, tandis que la résistance à la compression passe de **14,3 MPa à 11,3 MPa**. Ces diminutions correspondent à une densité variant de **1439 à 1284 kg/m³**.

L'introduction de fibres de polypropylène, en particulier à faible taux (0,2 %), a montré un effet positif sur la résistance à la flexion, atteignant une amélioration de plus de 7 %. Cette optimisation permet de compenser partiellement la perte de cohésion induite par l'ajout de perlite, en améliorant la ductilité du matériau.

Toutefois, les valeurs de résistances obtenues restent conformes aux exigences du CNERIB et des normes NF EN 771-1 et Euroco de 6, pour des applications murales porteuses.

Enfin, la simulation énergétique menée sur un modèle de bâtiment a permis de confirmer l'impact positif du notre bloc composite sur les performances thermiques du bâti. Comparé aux configurations traditionnelles (parpaing ou brique), l'utilisation du bloc PPF permet une réduction significative des besoins annuels en chauffage et en climatisation, avec un gain énergétique global de l'ordre de 14,7 % par rapport à la brique, et de 31,4 % par rapport au parpaing. Ce résultat met en évidence le potentiel de ce matériau pour contribuer à l'amélioration de l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment.

En conclusion, le matériau composite étudié offre un bon compromis entre légèreté, isolation thermique et performance mécanique. Il constitue une solution durable et économique pour la construction de murs porteurs extérieurs, répondant aux défis actuels en matière de performance énergétique et de valorisation de ressources locales.

Perspectives de recherche :

Des perspectives de recherche restent ouvertes, notamment :

- Optimisation des formulations : approfondir l'étude des dosages de perlite et de fibres pour maximiser à la fois la performance mécanique et thermique du matériau, tout en garantissant une bonne durabilité.
- Comportement en conditions réelles : réaliser des essais en conditions climatiques réelles afin de mieux comprendre la résistance à l'humidité, au vieillissement et à la variabilité thermique.
- Développement d'enduits et protections : concevoir des solutions d'enduits ou de bardages compatibles pour protéger efficacement le matériau contre l'humidité et les agressions extérieures.
- Analyse environnementale : évaluer l'impact environnemental global du matériau via une analyse du cycle de vie (ACV), afin de confirmer son intérêt dans une démarche de construction durable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Hamza LAOUBI "Etude du comportement thermo-mécanique et durabilité d'un béton à base de plâtre allégé par des granulats de polystyrène » Thèse de doctorat » Université Amar Telidji– Laghouat ; 2021
- [2] Ministère de l'Energie et des Mines et des Energies Renouvelables, Bilan énergétique national année 2023, Edition 2024.
- [3] BarkliHacene, ChabanEssam,B. Ben Youcef "La construction écologique en Algérie : question du choix ou de moyens" revue énergie renouvelables, Vol 14 .2011
- [4] BoukliHacene, ChabAnesa, Ben Youcef Amara "l'impact environnementale d'une habitation écologique », Revue des énergies renouvelables ", Voll3 NI4P [545-559].2010
- [5] Egenhoper, C., Jansen, J., Bakker, S.&Jussila Hammes, J., 2006.RevisitingEUPolicyOptions for Tackling Climate Change: A Social Cost-Benefit Analysis of GHG Emissions Reduction Strategies, Bruselas: Centre for European Policy Studies
- [6] Egenhoper, C., Jansen, J., Bakker, S.&Jussila Hammes, J., 2006.RevisitingEUPolicyOptions for Tackling Climate Change: A Social Cost-Benefit Analysis of GHG Emissions Reduction Strategies, Bruselas: Centre for European Policy Studies.
- [7] B. M. Mansour, A. C. Soukaina, B. Benhamou, B. S. Jabrallah, (2013), "Thermal characterization of a Tunisian gypsum plaster AS Construction Material", Energy Procedia, 42,680-688.
- [8] C.N.E.R.I.B., Recommandations pour la construction en plâtre. Ministère de l'Habitat, Centre national d'études et de recherches intégrées au bâtiment, 1993.
- [9] Jaffel H, Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique91128 Palaiseau Cedex, France, 2006, P.159.
- [10]Site :www.mem-algeria.org.Ministere de l'Energieetdemines
- [11] DaligandD., Plâtre.Techniquesdel'Ingénieur, TraiteConstructionC910, 2002.
- [12] Pascal BOUSTINGORRY. Elaboration d'un matériau composite amatrice gypse et renfort bois fragmente- Amélioration de la résistance au visage de produits préfabriqués en gypse. Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne et Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [13] Coquard, P, Resistance mécanique du plâtressecsethumides. Thèse de doctorat, l'Université d'Aix-Marseille III : France, 1992, P. 93.
- [14] C. BEZOU. Etudes des caractéristiques cristallographiques, thermodynamiques et microstructurales des produits de des hydratations du gypse. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 1991.
- [15] Sophie EVE. Comportementalapriseetcaracterisationmecaniquedemateriauxcomposites Abase de plâtre. PhD thésis, Université de Caen, 2003.

- [16] Milles., Etude du comportement mécanique du plâtre en relation avec sa microstructure
Thèse de doctorat de l'INSA Lyon, France, 2001, p.219.
- [17] SATTLER H. The importance of porosity for the properties of hardened gypsum plaster products. ZKG International, pages 54-62, 1997.
- [18] H. Sattler and H.-P. Bruckner. Changes in volume and density during the hydration of gypsum binder as a function of the quantity of water available. ZKG International, 54 Num.9 P.522-, 2001.
- [19] Saadaoui M., Meille S., Reynaud P., and Fantozzi G. Internal friction study of the influence of humidity on set plaster. Journal of European Ceramic Society, 25 :3281-3285, 2005.
- [20] Les Industries du plâtre. La plaque de plâtre au cours de la construction durable.
<http://www.lesindustriesduplatre.org>,
- [21] VIGNES J-L, ESSADDAM H, and DALIGAND et D. Une vie de plâtre : Expériences de Chimie sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un matériau. Bulletin de l'Union des Physiciens N° 790, pages 145-164
- [22] Ghoulam Allah S., Etude des caractéristiques des matériaux de construction de zaouïa Ya Tidjania de Ghemar, Oued Souf. Préparation d'un mortier de plâtre pour restauration. Institut d'archéologie. Université d'Alger 2. 2011, P.143 (Document en arabe).
- [23] S. Dorbani, F. Kharchi, F. Salem, K. Arroudj, N. Chioukh Influence of the Addition of Sand and Compaction on the Mechanical and Thermal Performances of Plaster.
- [24] Abdelmoumen Chaker A., Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 1999
- [25] Djoudi A., Khenfer M.M., Bali A., Kadri E.H., Debicki G., Performance of date palm fibers reinforced plaster concrete. International journal of physical sciences, Vol.7(21),2012 : pp.2845- 2853.
- [26] Debouci.Z., Teggour. H., Chili. T., Rôle de la chaux dans les protections extérieures en plâtre. Séminaire pour la construction en plâtre. C.N.E.R.I. B, 4, 5,6 Décembre 1989.
- [27] M. Lanzon, P.A. Garcia-Ruiz, (2012), "Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters", Construction and Building Materials, 28(1), 506-511
- [28] N. Belaya chi, D. Hoxha, M. Slaimia, (2016), "Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation", Construction and Building Materials, 28(1), 912-91.
- [29] Soltane. M. L., Contrôle technique d'un prototype de quatre logements en plâtre à Biskra., colloque maghrébin sur la construction en matériaux locaux. MATLOC 91, C.N.E.R.I.B, 1991, pp. 101 -104.
- [30] Zuber.F., Pour une construction en plâtre. Communication, (Plâtre La Farge), 1989.

- [31] Aldebert.R., Rénovation du Grand Louvre a la gloire du plâtre. Le moniteur des travaux publics et du bâtiment, N° 41615, 1992, pp. 56 -68.
- [32] C.S.T.B., Préparation des sols, des plaques de plâtre en chape flottante sèche. Le moniteur des sols, murs, plafonds, 1992, pp. 1162 -3497.
- [33] DJOUDI Amina ; Etude de la durabilité et du comportement thermo-phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres végétales du palmier dattier ; Thèse de Doctorat ; Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 2015 pp30
- [34] Chérait Y et Nafa Z, Eléments de matériaux de construction et essai, édition Direction de publication universitaire Guelma. 2006
- [35] Camara O., Le plâtre P.S.O.A dans la construction au Sénégal. Séminaire international sur le plâtre en Algérie., du 3 au 5 Décembre 1989.
- [36] Cormon.P. Bétons légers d'aujourd'hui ; collection U.T.I. Edition ; Eyrolles Paris
- [37] Hung NGUYEN Bétons de structure a propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique ; thèse de doctorat, université de Cergy-pontoise ; 2013 pp17
- [38] RILEM (1970). Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction (Terminology and definition. Materials and Construction). N°13, pp. 60-69.
- [39] J.L Kass ; D. Campbell-Allen, Functional classification of lightweight concrete, matériaux et Constructions, vol.5, n°27, pp.171-172, 1972
- [40] J-Frarn ; AGASSANT ; Plastiques et composites Ref.Internet:42147, 3ème édition
- [41] J.P Yvrard, expérimentation et modélisation du comportement mécanique du polystyrène expansé, thèse de doctorat, université de Lille ,1998.
- [42] Rapport du laboratoire de contrôle technique et d'expertise, Etude et analyse du polystyrène expansé Avril 1998, Alger
- [43] Bing Chen, Juanyu Liu. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cément and Concrète Research*. 34 (2004) 1259-1263.
- [44] Karim MILED Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé, thèse de doctorat, l'école nationale des ponts et chaussées, 2005.
- [45] Gonzalez Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded polystyrene) recycled beads mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*, 60(509), pp. 35-43.
- [46] Bing Chen, Juanyu Liu, Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cément and Concrète Research* 34 (2004), pp.1259-1263.
- J.M Chaix ; G. Laviales ; D. Quenard, structure et propriétés d'un matériaux poly

- [47] Phasiquemodèle : le Béton légers isolant thermique, compte rendu de fin d'étude, CSTB Grenoble mars (1989).
- [48] K Ganeshbabu, D. Saradhi Babu, Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates, *Cement and Concrete Composites* 26(2004), pp.605-611.
- [49] Jiang, H. & Luan, C., 2011. Preparation and Absorption/Desorption Performance of Gypsum- based Humidity Controlling Materials. *Journal of Wuhan Université of Technologie-Mater*, 26(4).
- [50] Huang, K., Liang, H.&Hung, M., 2010.Improvementinfirepreventionperformanceofcork-gypsumdecorativematerialsbyapplyingporous waste. *InternationalJournalofPhysicalSciences*, Volume5, pp.2038-2044
- [51] Ramezani, H., Shandab, S. &Nouri, A., 2012.Studyeffectsofwoodfibercontenton physical, mechanical and acoustical properties of wood-fiber-filled gypsum composites. *Matériaux Research*, Volume 15, pp. 236-241.
- [52] Hummel, H.et al., 2007. Examination of the exposure- and odour-reducingcharacteristics of gypsum-based building materials containing zeolite. *Bauphysik*, 29(6), pp. 430-435.
- [53] DelRioMerino, M. Comino, P., 2001.Influenciadelgradodedispersabilidaddelafibradevidrio E en el comportamientomecanico y la trabajabilidad de la escayola. *Matérielles de construcción*, 51(261), pp. 33-44.
- [54] Dalmay, P. etal. 2010. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemporflaxfibres on the properties of set gypsum. *J Mater Sci*, Volume 45, pp. 793-803.
- [55] Zhang, W. H., Li, G. Z. & Liu, M. R., 2011. Properties research of cotton fiber reinforced gypsum-based composites. *Advanced Matériels Research*, Volume en 194, pp. 1759-1762.
- [56] Mohan desi, J.A., Sangghaleh, A., Nazari, A.&Pour Javad, N., 2011.Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites. *Computationnel Matériels Science*, Volume 50, pp. 1619-1624.
- [57] Iucolano, F., Caputo, D., Leboffe, F. & Liguori, B., 2015. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. *Construction and Building Matériels*, Volume n 99, pp. 184-191.
- [58] Lima, J. & Faria, P., 2016. Eco-Efficient Earthen Plasters: The Influence of the Addition of Natural Fibers. *Natural fibers: advancesinscience and technology towards industrial applications: from science to market*, Volume n 12, pp. 315-327.
- [59] Leiva Aguilera, M. J., Del Rio Merino, M. & Villoria Saez, P., 2016. Feasibility of plaster composites with rice husk waste. *ZKG dry mix spécial* 2016, pp. 30-40.
- [60] Pichniarczyk, P., Malata, G.&Szelaq, H., 2005.The polymer impregnate dgypsummineral wool as anew, alternative material for thermal insulation. *Cement Weapon*

Béton.

- [61] Demir, I. & Baspınar, M. S., 2008. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. *Construction and Building Materials*, 22(6), p. 1299-1304.
- [62] Borreguero, A. M. et al., 2010. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), pp. 1164-1169.
- [63] Xi, Y. G., Ping, T., Liu, H. & Chen, J., 2011. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.
- [64] Baspınar, M. S. & Kahraman, E., 2011. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macro porous silica granules. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp. 3327-3333
- [65] Vimmrova, A., Nazmunnahar, M. & Cerny, R., 2016. Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. *Cément Wapno Beton*, 19(5), pp. 299-307.
- [66] Oliver, A., 2012. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy and Buildings*, Volumen 48, pp. 1-7.
- [67] Cherki, A.A.-b. y otros, 2014. Experimental thermal properties characterization of insulating Cork-gypsum composite. *Construction and Building Materials*, Volumen 54, pp. 202-209.
- [68] Genteel, O. y otros, 2016. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 732-740.
- [69] Del Rio Merino, M. & Hernandez Olivares, F., 2004. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solids addition. *Matériels de Construcción*, 54(275).
- [70] Vimmrova, A., Keppert, M., Svoboda, L. & Cerny, R., 2011. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cément and Concrete Composites*, 33(1), pp. 84-89.
- [71] Huang, B., Xiang, Y. & Li, D. X., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Matériels Science Forum*, Volumen 743, pp. 222-227.
- [72] Del Rio Merino, M., Dominguez, J. D. & Hernandez Olivares, F., 1998. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), pp. nov.-dic.
- [73] Gmouh, A., Samdi, A., Moussa, R. & Gomina, M., 2001. Lightened plaster-based composite materials: Elaboration and mechanical properties. *Silicates industriels*, Volumen 5-6, pp. 61-66
- [74] Yong, G. X., Tong, J.P., Hai, F. L. & Ji, M., 2010. Preparation and Properties of

Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.

[75] Hernandez-Olivares, F., Bollati, M., DelRioMerino, M. & Parga-Landa, B., 1999. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp. 179-186.

[76] Zhou, S. y otros, 2013. The preparation and performance of gypsum-based composites. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 310, pp. 46-50.

[77] Leiva Aguilera, M. & Del Rio Méridos, M., 2014. Escayola aditivada con residuos agrícolas : cascara de arroz y cascara tritura da. En: e. a. C. Llinares-Millan, ed. *Construction and Building Research*. Switzerland: Springer, pp. 463-470.

[78] Gonzalez Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded polystyrene) recycled beads mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*, 60(509), pp. 35-43.

[79] Kamman, S., Sahin, S., Gunal, H. & Orung, I., 2006. Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, Volumen 6, pp. 1119-1122.

[80] Garcia Santos, A., 2009. PPP-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Materials de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.

[81] Gutierrez-Gonzalez, S. et al. 2013. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, Volume 38, pp. 407-412.

[82] Gutierrez-Gonzalez, S. y otros, 2012. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 653-658

[83] Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A. & El-Shahat, M., 2013. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. *Materials de Construcción*, 63(312), pp. 529-537.

[84] Herrero, S., Mayor, P. & Hernandez Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, Volume n 47, pp. 633-642.

[85] Jiménez Rivero, A, de Guzman Baez, A. & Garcia Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster - ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, Volume n°55, pp. 146-152.

[86] Gonzalez Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya.

[87] Veischi, S. & Yousefi, A., 2003. The use of polystyrene in lightweight brick production. *Iranian Polymer Journal*, 12(4), pp. 323-329.

[88] El-Bashir, S., 2007. Thermal and mechanical properties of plywood sheets based on polystyrene/silica nano composites and palm tree fibers. *Polymer Bulletin*, 70(7), pp. 2035-

2045.

[89] San-Antonio-Gonzalez A, Merino M, Arrebola C, Villoria-Saez P. Lightweight material made with gypsum and EPS waste with enhanced mechanical strength. *J Mater Civ Eng.* 2016 ;28 :04015101.

[90] Zitani. I., Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre à base de granulats de liège. Mémoire d'ingénieur, Université de Laghouat, 2011, P. 83.

[91] A. Bicer, F. Kar, Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth, *Thermal Science and Engineering Progress* (2017), doi: [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.tsep.2017.02.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.tsep.2017.02.008)

[92] Madandoust, R., Ranjbar, M. M. & Mousavi, S. Y., 2011. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 25(9), pp. 3721-3731

[93] H. Asan, Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and decrement factor. *Building and Environment.* 32 (2000) 197-203.

DTR C 3-2 "règlementation thermique des bâtiments d'habitation, Règle de calcul des déperditions calorifiques, fascicule 1" CNERIB, 1997.