

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie civil



Mémoire Présenté en vue de l'Obtention du Diplôme de Master

FILIERE : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Intitulé :

*Développement et caractérisation de mortier de plâtre modifié
par polymère pour panneaux légers et isolants*

Présenté par :

Brahimi Zohir

Soutenu le :/..../2026

Devant le jury :

Président : Université de Bordj Bou Arreridj

Encadreur : Hamza LAOUBI MCB Université de Bordj Bou Arreridj

Co-Encadreur : Abdelmalek GOUFI MCB Université de Bordj Bou Arreridj

Examineur : Université de Bordj Bou Arreridj **Examineur :**

..... Université de Bordj Bou Arreridj

Remerciements

Je remercie Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé et la volonté nécessaires pour entamer et terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. LAOUBI HAMZA. Je le remercie pour la qualité de son encadrement, sa patience et sa rigueur exceptionnelle.

Mes remerciements s'adressent également à tous mes professeurs et enseignants durant mon cursus, ainsi qu'à l'ensemble des membres du département de génie civil.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui me connaissent de près ou de loin et qui m'ont toujours souhaité du bien.

À tous ces intervenants, j'exprime ma profonde gratitude et mon respect et gratitude.

Dédicaces

je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour leurs sacrifices, leur amour et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À ma famille, pour leurs encouragements et leur présence à mes côtés .est mes amis, pour leur soutien et les bons moments partagés.

À mon encadreur, Dr. LAOUBI Hamza, pour ses précieux conseils et son accompagnement . est tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation.

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce mémoire.

Sommaire

Table des matières

Liste des figures i

Liste des tableaux
viii

Introduction Générale 1

Chapitre I : Généralités sur le plâtre et le mortier de plâtre
..... 11

I.1. Introduction 3

I.2. La pierre à plâtre..... 3

I.2.1. Le gypse : variétés et structure.....	3
I.2.2. Classification de la pierre à plâtre.....	4
I.2.3. Gisements de gypse en Algérie	5
I.3. Le plâtre.....	7
I.3.1. Définition	7
I.3.2. Le processus de transformation.....	7
I.3.3. Classification des héli-hydrates	8
a) Héli-hydrate α (voie humide).....	8
b) Héli-hydrate β (voie sèche).....	8
I.3.4. Microstructure du plâtre durci.....	9
I.4. Comportement du plâtre	10
I.4.1. Cinétique d'hydratation.....	10
I.4.2. Comportement mécanique	10
I.4.3. Comportement hygrométrique et absorption d'eau.....	11
I.4.4. Comportement thermique et au feu.....	12
I.5. Le mortier de plâtre	13
I.5.1. Définition et constituants	13
I.5.2. Méthode de composition.....	13
I.5.3. Comportement mécanique du mortier de plâtre.....	14
I.5.4. Comportement thermique du mortier de plâtre.....	15
I.5.5. Domaines d'application	16
I.6. Constituants secondaires de modification	16
I.6.1. La perlite expansée.....	16
a) Origine géologique et composition chimique	17
b) Procédé d'expansion et propriétés	18
I.6.2. Les déchets de pneumatiques : fibres courtes de caoutchouc recyclé.....	20

a) Contexte et gisement	20
b) Constitution et composition	20
c) Valorisation matière et fractions de broyage	20
I.7. Modification du mortier de plâtre par le latex	21
I.7.1. Généralités sur les polymères	21
I.7.2. Concept de mortier modifié au polymère (PMM).....	22
I.7.3. Le latex comme adjuvant polymérique	22
I.8. Réglementation algérienne sur les plâtres	23
I.9. Conclusion	23
Références bibliographiques.....	Error! Bookmark not defined.
Chapitre II : Matériaux et méthodes	25
II.1. Introduction	26
II.2. Matières premières	26
II.2.1. Plâtre	26
II.2.1.1. Composition chimique.....	26
II.2.1.2. Propriétés physiques	27
II.2.2. Sable de dune	28
II.2.2.1. Masse volumique apparente.....	28
II.2.2.2. Masse volumique absolue.....	29
II.2.3. Perlite expansée	30
II.2.4. Fibres de caoutchouc recyclé (FPRP).....	30
II.2.5. Latex	32
II.3. Plan expérimental.....	33
II.3.1. Principe et choix du plan	33
II.3.2. Variables du plan.....	33

II.3.3. Formulation de base.....	33
II.3.4. Matrice expérimentale	34
II.3.5. Mode opératoire de confection des éprouvettes	34
II.4. Techniques de mesure expérimentales	35
II.4.1. Masse volumique apparente.....	35
II.4.2. Résistance à la flexion	35
II.4.3. Résistance à la compression	36
II.4.4. Absorption d'eau par capillarité (sorptivité).....	36
II.5. Conclusion.....	37
Chapitre III : Résultats et Discussion	37
III.1. Introduction.....	38
III.2. Masse volumique apparente.....	38
III.2.1. Effet des facteurs	39
III.3. Résistance à la compression.....	40
III.3.1. Effet des facteurs	40
III.4. Résistance à la flexion	41
III.4.1. Effet des facteurs	42
III.5. Évolution temporelle et coalescence du latex	42
III.6. Absorption d'eau par capillarité	43
III.6.1. Effet des facteurs	44
III.7. Conclusion partielle	44
Conclusion Générale.....	46

Résumé

Résumé

Le plâtre, l'un des liants minéraux les plus anciens, présente une fragilité, une sensibilité à l'humidité et une forte absorption capillaire qui restreignent son domaine d'emploi. Cette étude évalue l'effet conjoint de trois additifs : perlite expansée (PE), fibres de caoutchouc recyclées issues de pneumatiques en fin de vie (FCR) et latex polymère (LAT), sur les propriétés physiques, mécaniques et hydriques d'un mortier de plâtre. Un plan d'expériences de BoxBehnken à trois facteurs et trois niveaux a généré quinze formulations, complétées par un mélange de référence plâtre-sable (M0). La masse volumique apparente, les résistances en compression et en flexion à 28 et 60 jours et l'absorption d'eau par capillarité ont été mesurées.

La perlite expansée gouverne au premier ordre la masse volumique apparente, qu'elle réduit jusqu'à 17,4 % à pleine substitution du sable, au prix d'une pénalité en compression à 28 jours par dilution de la matrice liante et multiplication des interfaces plâtre-perlite. Les fibres de caoutchouc améliorent la ductilité sans modifier substantiellement la résistance maximale. Le latex pénalise la résistance à 28 jours, son film polymère n'étant pas encore coalescé, mais entraîne entre 28 et 60 jours des gains de résistance nettement supérieurs à la référence,

traduisant la coalescence progressive du film au sein de la matrice de gypse. L'interaction PE × LAT change de signe entre les deux échéances, ce qui constitue le résultat le plus significatif de l'étude. Le mélange M11 (PE = 0 %, FCR = 2 %, LAT = 1 %) présente la sorptivité la plus faible de l'ensemble des formulations, inférieure à celle de la référence, démontrant que l'incorporation d'additifs peut améliorer simultanément l'allègement et la tenue à l'eau pour des applications non porteuses.

Mots-clés : mortier de plâtre allégé ; perlite expansée ; fibres de caoutchouc recyclées ; latex polymère ; sorptivité ; coalescence du latex.

ملخص

يُعَدّ الجصّ من أقدم المواد الرابطة المعدنية المستخدمة في البناء، غير أنّ هشاشته وحساسيته للرطوبة وارتفاع امتصاصه الشعري للماء تحدّد من مجالات استعماله. تتناول هذه الدراسة التأثير المشترك لثلاث إضافات : البيرلايت الممدّد (PE)، وألياف المطاط المعاد تدويرها من الإطارات المنتهية الصلاحية (FCR)، واللاتكس البوليمري (LAT)، على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والمائية لمُلاط جصّي. اعتمد تصميم بوكس -بنكّن بثلاثة عوامل وثلاثة مستويات، فأنتج خمس عشرة خلطة أكملت بخطة مرجعية من الجصّ والرمل (M0). جرى قياس الكثافة الظاهرية، ومقاومتَي الانضغاط والانثناء عند 28 و60 يوماً، وامتصاص الماء بالخاصية الشعرية .

يهيمن البيرلايت الممدّد على الكثافة الظاهرية، إذ يخفّضها إلى بما يقارب 17,4 % عند الاستبدال الكلي للرمل، في مقابل خسارة في مقاومة الانضغاط عند 28 يوماً نتيجة تخفيف المصفوفة الرابطة وتعدّد الواجهات بين الجصّ والبيرلايت. تحسّن ألياف المطاط الليونة دون تغيّر جوهري في المقاومة القصوى. ويضعف اللاتكس مقاومة الانضغاط عند 28 يوماً لكون غشائه البوليمري لم يلتحم بعد، لكنّه يحدث بين 28 و60 يوماً مكاسب أعلى بكثير من المرجع، بفضل التحام تدريجي لغشاء البوليمر داخل المصفوفة الجصّية. ويعكس التفاعل $PE \times LAT$ إشارته بين العمرين، وهو أبرز نتيجة لهذه الدراسة. تسجّل الخلطة (PE = 0 %، FCR = 2 %، LAT = 1 %) M11 أدنى قيمة لمعامل الامتصاص الشعري بين الخلطات، أقلّ من المرجع، ممّا يبرهن على أنّ إدماج الإضافات يمكن أن يحسّن تخفيف الوزن ومقاومة النفاذ الشعري في أيّ واحد، لتطبيقات غير حاملة.

الكلمات المفتاحية : ملاط جصّي خفيف الوزن؛ بيرلايت ممدّد؛ ألياف مطاط معاد تدويرها؛ لاتكس بوليمري؛ معامل الامتصاص الشعري؛ التحام اللاتكس .

Abstract

Gypsum is one of the oldest mineral binders, but its brittleness, moisture sensitivity and high capillary absorption restrict its field of use. This study investigates the combined effect of three additives: expanded perlite (PE), recycled rubber fibers from end-of-life tires (RRF) and a polymer latex (LAT), on the physical, mechanical and water-transport properties of a gypsum mortar. A three-factor, three-level Box-Behnken design generated fifteen mixes, supplemented by a plaster-sand reference mix (M0). Bulk density, compressive and flexural strength at 28 and 60 days, and capillary water absorption were measured.

Expanded perlite governs at first order the bulk density, reducing it by up to 17.4 % at full sand replacement, at the cost of a 28-day compressive-strength penalty through binder-matrix dilution and the multiplication of paste-perlite interfaces. Recycled rubber fibers enhance ductility without substantially altering peak strength. Latex penalizes 28-day compressive strength, as its polymer film has not yet coalesced, but drives between 28 and 60 days strength gains markedly higher than the reference, reflecting the progressive coalescence of the film within the gypsum matrix. The PE $\times$ LAT interaction reverses sign between the two ages, the most significant outcome of the study. Mix M11 (PE = 0 %, RRF = 2 %, LAT = 1 %) exhibits the lowest sorptivity of the formulations, lower than the reference, demonstrating that additive incorporation can simultaneously improve weight reduction and capillary resistance for nonload-bearing applications.

Keywords: lightweight gypsum mortar; expanded perlite; recycled rubber fibers; polymer latex; sorptivity; latex coalescence.

Liste des figures

Figure I-1. Variétés cristallines du gypse : (1) cristal aplati selon g1, (2) cristal prismatique, (3) macle en fer de lance [9].	4
Figure I-2. Cycle gypse-plâtre [7].	7
Figure I-3. Comparaison morphologique des cristaux d'hémi-hydrate α et β au MEB [21].	8
Figure I-4. Enchevêtrement des cristaux de gypse dans le plâtre durci (image MEB) [20].	9
Figure I-5. Isotherme de reprise d'humidité d'une éprouvette de plâtre [3].	11
Figure I-6. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier de plâtre à S/P = 0,5 : (a) flexion ; (b) compression [5].	13
Figure I-7. Influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier de plâtre : (a) flexion ; (b) compression [6].	14
Figure I-8. Conductivité thermique des mortiers de plâtre selon le dosage en sable et le temps de compactage [11].	14
I-9. Carreaux de plâtre pleins et alvéolés [18].	15
Figure I-10. Cloison intérieure en briques plâtrières avec enduit en plâtre [19].	15
Figure I-11. Granulats de perlite [19].	16
Figure II-1. Plâtre COLPA – Manhargyps utilisé dans l'étude.	26
Figure II-2. <i>Essai de masse volumique absolue du plâtre par pycnométrie à l'essence.</i>	27
Figure II-3. Courbe granulométrique du sable de dune d'Oued Souf.	28
Figure II-4. Dispositif de mesure de la masse volumique apparente du sable.	29
Figure II-5. Perlite expansée utilisée dans l'étude.	30
Figure II-6. Fibres de caoutchouc recyclé utilisées dans l'étude.	31
Figure II-7. Latex SikaLatex® Pro utilisé dans l'étude.	32

Figure II-8. Confection et mise en moule des éprouvettes.	35
Figure II-9. Dispositif de l'essai de flexion 3 points (a) schéma ; (b) photo.	36
Figure II-10. Dispositif de l'essai de compression (a) schéma ; (b) photo.	36
Figure III-1. Masse volumique apparente des seize formulations.	38
Figure III-2. Résistance à la compression à 28 et 60 jours.	40
Figure III-3. Résistance à la flexion à 28 et 60 jours.	41
Figure III-4. Cinétique d'absorption capillaire des seize formulations.	43

Liste des tableaux

Tableau I-1. Classification de la pierre à plâtre [22].	4
Tableau I-2. Principales exploitations de gypse en Algérie [15].	5
Tableau I-3. Caractéristiques thermiques du plâtre et de produits dérivés [8].	12
Tableau I-4. Composition chimique typique de la perlite brute [19, 25].	16
Tableau I-5. Propriétés physiques et thermiques typiques de la perlite expansée [24, 10, 28].	17
Tableau I-6. Classification commerciale des variétés courantes de perlite expansée.	18
Tableau I-7. Composition pondérale de pneus usagés selon l'usage [12].	19
Tableau I-8. Variétés de fractions caoutchoutiques issues du broyage des pneus usagés.	20
Tableau I-9. Normes algériennes (NA) applicables aux plâtres [4].	22
Tableau II-1. Analyse chimique du plâtre utilisé.	27
Tableau II-2. Caractéristiques techniques du plâtre COLPA – Manhargyps.	27
Tableau II-3. Caractéristiques physiques du sable de dune d'Oued Souf.	29
Tableau II-4. Caractéristiques physiques de la perlite expansée.	30
Tableau II-5. Caractéristiques des fibres de caoutchouc recyclé.	31
Tableau II-6. Caractéristiques techniques du latex SikaLatex® Pro.	32
Tableau II-7. Formulations du plâtre modifié étudiée.	34

Introduction

Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

Le plâtre est l'un des plus anciens liants minéraux utilisés en construction. Obtenu par calcination du gypse naturel, il se distingue par sa rapidité de prise, sa légèreté relative, ses propriétés coupe-feu et son faible impact énergétique à la fabrication. Ces qualités en font un matériau de choix pour les enduits intérieurs, les cloisons et les éléments préfabriqués. Malgré ces atouts, le mortier de plâtre ordinaire souffre de limitations bien documentées : une fragilité intrinsèque élevée, une résistance en flexion modeste et une sensibilité marquée à l'eau qui restreignent son domaine d'emploi aux locaux secs et excluent toute application structurale ou semi-extérieure.

Face à ces contraintes, la modification des matrices à base de plâtre par incorporation d'additifs fonctionnels constitue une voie de recherche active. Trois familles de constituants retiennent particulièrement l'attention dans la littérature récente. La perlite expansée, granulat minéral léger d'origine volcanique, permet d'abaisser significativement la masse volumique du composite et d'améliorer ses performances thermiques, au prix d'une réduction des résistances mécaniques qu'il convient de maîtriser. Les fibres courtes de caoutchouc recyclé, issues du broyage des pneumatiques hors d'usage, introduisent une déformabilité qui atténue la fragilité de la matrice plâtreuse et constituent une voie de valorisation d'un déchet solide abondant en Algérie. Le latex, dispersion colloïdale de polymère styrène-butadiène, modifie la structure poreuse du matériau durci par coalescence progressive d'un film polymère, avec des effets différés sur les résistances mécaniques et la perméabilité à l'eau.

L'incorporation simultanée de ces trois constituants dans un mortier de plâtre pose le problème de leurs interactions mutuelles, dont les effets sur les propriétés finales ne peuvent être anticipés par une approche univariée classique. Cette étude se propose d'examiner, à travers un programme expérimental systématique, l'influence combinée de la perlite expansée, des fibres de caoutchouc recyclé et du latex sur les propriétés mécaniques, hydriques et de masse volumique d'un mortier de plâtre formulé à partir de matériaux locaux.

Le mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre établit le cadre bibliographique : il présente le plâtre comme liant minéral, ses mécanismes d'hydratation, ses comportements mécanique et hygrométrique, puis le mortier de plâtre et ses paramètres de formulation, avant de caractériser les trois additifs retenus et de rappeler les principes de la modification par

polymère. Le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés, les caractéristiques physiques et chimiques de chaque constituant, le programme expérimental et les techniques de mesure

Introduction Générale

employées. Le troisième chapitre présente et discute les résultats obtenus pour les seize formulations étudiées : masse volumique apparente, résistances en compression et en flexion à 28 et 60 jours, et absorption d'eau par capillarité. Une attention particulière est portée à l'évolution temporelle des propriétés mécaniques entre 28 et 60 jours. Une conclusion générale synthétise enfin les apports du travail et ouvre sur les perspectives.

Chapitre I

Généralités sur le plâtre et le mortier de plâtre

I.1. Introduction

Le plâtre compte parmi les plus anciens liants minéraux employés en construction. Apprécié pour sa rapidité de prise, sa légèreté et sa bonne tenue au feu, il présente néanmoins une faible résistance en flexion, une fragilité élevée et une sensibilité marquée à l'eau qui restreignent son domaine d'emploi. La compréhension du comportement du plâtre et du mortier de plâtre, ainsi que des paramètres de formulation qui les gouvernent, constitue donc un préalable indispensable à toute démarche d'optimisation.

Ce chapitre présente les bases bibliographiques nécessaires à l'étude. La pierre à plâtre est d'abord caractérisée, suivie du plâtre comme liant et de son comportement mécanique et hygrométrique. Le mortier de plâtre est ensuite présenté, avant un aperçu des constituants secondaires utilisés dans cette étude (perlite expandée, fibres courtes de caoutchouc recyclé et latex) et un rappel du cadre normatif algérien.

I.2. La pierre à plâtre

La pierre à plâtre est la matière première dont est issu le plâtre. Elle est constituée principalement de sulfate de calcium se présentant dans la nature sous deux formes hydratées : le **gypse** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), forme dihydratée la plus abondante, et l'**anhydrite** (CaSO_4), forme anhydre, plus rare et de cristallisation plus dense. La fabrication du plâtre exploite essentiellement la première forme.

I.2.1. Le gypse : variétés et structure

Le gypse cristallise dans le système monoclinique. On le rencontre sous plusieurs variétés selon les conditions de gisement : *cristallisé* (sélénite), à cristaux transparents lamellaires ou prismatiques ; *fibreux*, à structure fibreuse ; *saccharoïde* (albâtre), massif à grain fin ; à *grains fins*, pouvant contenir des impuretés (argile, oxydes de fer, calcite, anhydrite).

Les cristaux de gypse sont fréquemment maclés ; la macle dite « en fer de lance » (**Figure I.1**) en est la forme la plus emblématique. La structure cristalline est lamellaire, constituée de feuillets parallèles au plan (010). À l'intérieur d'un feuillet, les liaisons entre ions calcium Ca^{2+} et tétraèdres sulfate SO_4^{2-} sont fortes (ioniques) ; entre feuillets, des liaisons hydrogène plus faibles relient les molécules d'eau. Cette anisotropie de liaison explique le clivage facile du gypse selon le plan (010) et conditionne la cinétique de déshydratation lors de la calcination.

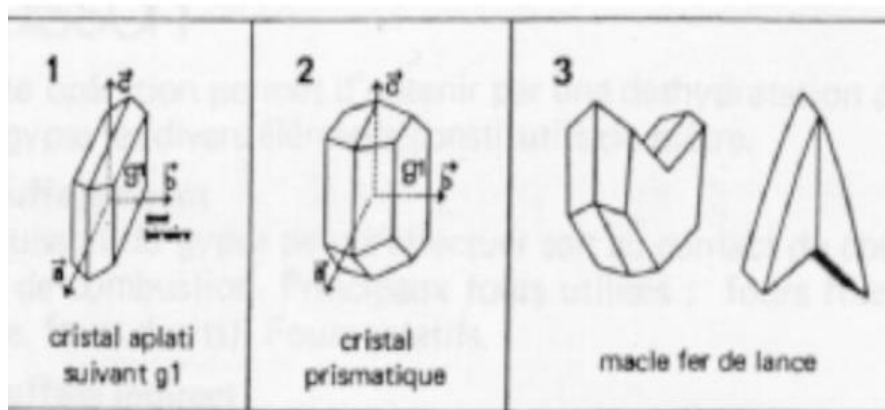


Figure I-1. Variétés cristallines du gypse : (1) cristal aplati selon g_1 , (2) cristal prismatique, (3) macle en fer de lance [1].

I.2.2. Classification de la pierre à plâtre

La qualité d'une pierre à plâtre se caractérise par deux paramètres : sa teneur en gypse T_g (composition minéralogique, exprimée en pourcentage massique de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et sa teneur en eau de cristallisation T_c (composition chimique, en pourcentage massique). Le **Tableau I.1** résume la classification normative en quatre classes [2].

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

Classe	Composition minéralogique T_g : % en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Composition chimique T_c : % eau de cristallisation
I	$T_g \geq 90$	$T_c \geq 18,83$
II	$80 \leq T_g < 90$	$16,74 \leq T_c < 18,83$
III	$70 \leq T_g < 80$	$14,65 \leq T_c < 16,74$
IV	$T_g < 70$	$11,51 \leq T_c < 14,65$

Une pierre de classe I, riche en gypse pur, est destinée à la fabrication de plâtres de qualité (modelage, prothèse). Les classes II à IV correspondent à des qualités décroissantes, utilisées pour la fabrication de plâtres de construction.

I.2.3. Gisements de gypse en Algérie

L'Algérie dispose d'un fort potentiel gypsifère. Les principaux gisements sont localisés dans la région du Chélif (Dahra), à Mostaganem, Arzew, Sidi Bel Abbès, dans les monts des Babors, à Djebel Chegga et à Habouch dans les monts Mina. À l'est, des exploitations significatives sont actives dans les wilayas de Mila, Khenchela, Tébessa et Constantine. Le **Tableau I.2** dresse une liste représentative des exploitations recensées sur le territoire national.

Tableau I-2. Principales exploitations de gypse en Algérie [3].

Wilaya	Exploitations
Alger	SCAL SPA, Société des Ciments Algéroise ; Zidane Marbre
Batna	Carrière de Plâtre Bouchareb Hedda EURL ; Carrière Plâtre Bellahcène Messaoud SARL
Béjaïa	Benamara EURL
Biskra	Entreprise de Plâtre et Dérivés SPA ; Plâterie El Ghazal EURL
Bouira	COLPA (Cosider Lafarge Plâtre Algérie) SPA, usine d'El Adjiba, gisement d'Ahnif, marque « Manhargyps » ; ENFA Plâtre SARL ; ERCC SPA
Constantine	SPDE SPA
Ghardaïa	Ghardaïa Plâtre SARL ; Plâtre du Sud SPA ; SPDC SPA
Guelma	Gypse en Nador EURL
Khenchela	Ikhlasse SARL
Mascara	E.MA.CO EPE (Unité Plâtrière d'Oggaz) ; ERCO EPE/SPA

Mila	Bousbaâ et Aïssaoui SNC ; SO.PLAT SPA
M'Sila	SARL Taouab (Bou Saâda), fabrication de plaques, carreaux et hourdis ; Challa Production SARL ; El Djabes EURL
Oran	Knauf Plâtres Fleurus (KPF), usine de Hassiane Toual (Benfréha), gisement de Sidi Boutbal ; ERCO Plâtre (SODEPAC) SPA
Sétif	Guellal Plâtre d'Or SARL ; Guesmia (extraction et préparation de gypse) EURL
Tébessa	Carrière Dyr EURL ; Mandra SARL
Tissemsilt	Plâtrière de Sid Boutouchent SARL

Cette répartition géographique étendue, couplée à l'abondance des gisements, justifie le développement de filières locales valorisant le plâtre comme liant pour les enduits, les éléments de cloison et les éléments décoratifs préfabriqués.

Le secteur a connu une transformation industrielle notable depuis le milieu des années 2000, structurée autour de trois opérateurs majeurs. Le groupe allemand Knauf est entré sur le marché en 2006 par la création de Knauf Plâtres Fleurus (KPF) en partenariat avec ERCO ; l'usine de Hassiane Toual (Benfréha, wilaya d'Oran), implantée à proximité du gisement de Sidi Boutbal, a vu sa capacité portée à environ 600 000 tonnes par an de plâtre et 35 millions de m² par an de plaques à la suite d'une extension achevée en 2021. La société COLPA (Cosider Lafarge Plâtre Algérie) exploite depuis 2008 l'usine d'El Adjiba (wilaya de Bouira), alimentée par le gisement d'Ahnif, et commercialise notamment le plâtre de construction et le plâtre médical sous la marque Manhargyps. Enfin, la SARL Taouab, basée à Bou Saâda (wilaya de M'Sila), constitue le principal opérateur national d'origine purement algérienne, avec une production diversifiée de plaques de plâtre, carreaux et hourdis.

I.3. Le plâtre

I.3.1. Définition

Le plâtre est un liant aérien obtenu par déshydratation partielle du gypse. Sa fabrication par cuisson modérée, entre 120 °C et 180 °C selon le degré de déshydratation visé, conduit principalement à la formation du sulfate de calcium héli-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), forme de base utilisée pour les plâtres commerciaux.

I.3.2. Le processus de transformation

La transformation du gypse en plâtre repose sur une réaction de déshydratation thermique appelée *calcination*. Réalisée typiquement entre 120 °C et 150 °C, elle aboutit à la perte des trois quarts de l'eau de cristallisation selon la réaction :



Lors du gâchage avec l'eau, l'héli-hydrate se réhydrate par dissolution-recristallisation en gypse, conférant au matériau ses propriétés de prise et de durcissement. Le cycle gypse ↔ plâtre, schématisé sur la **Figure I.2**, est complètement réversible sur le plan chimique mais irréversible sur le plan microstructural : le gypse reformé après hydratation présente une organisation cristalline et une porosité différentes de celles de la roche d'origine.

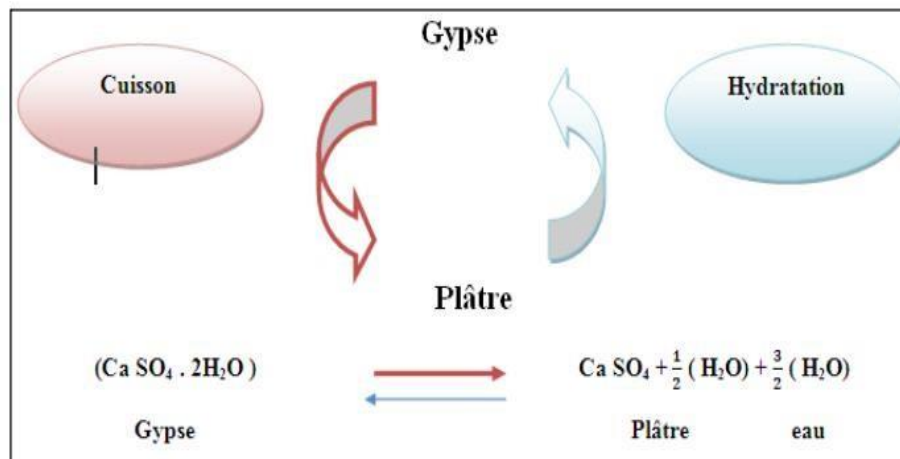


Figure I-2. Cycle gypse-plâtre [4].

Si la cuisson est poursuivie au-delà de 200 °C, l'anhydrite (CaSO_4 anhydre) est obtenue. Sa présence résiduelle dans un plâtre de construction est indésirable car elle perturbe la cinétique de prise.

Sur le plan thermodynamique, la prise du plâtre repose sur une différence marquée de solubilité entre l'héli-hydrate (6,5 à 9,0 g·L⁻¹ à 25 °C) et le gypse (2,4 g·L⁻¹). Lors du gâchage, la

dissolution de l'hémi-hydrate sursature la solution interstitielle vis-à-vis du gypse ; ce dernier précipite alors sous forme de cristaux enchevêtrés assurant la cohésion du matériau. La solubilité résiduelle du gypse ainsi formé ($2,4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) est à l'origine de la sensibilité du plâtre durci à l'eau : en milieu humide, une dissolution partielle des contacts inter-cristallins affaiblit la cohésion du réseau.

I.3.3. Classification des hémi-hydrates

Selon les conditions de cuisson, deux variétés morphologiques d'hémi-hydrate sont obtenues, désignées α et β [5]. Elles se distinguent par leur procédé de fabrication, leur morphologie cristalline, leur demande en eau et leurs performances finales (**Figure I.3**).

a) Hémi-hydrate α (voie humide)

Obtenu par cuisson en autoclave sous vapeur saturante ($\sim 1 \text{ bar}$) à $105\text{--}110^\circ\text{C}$, l'hémi-hydrate α se présente sous forme de cristaux compacts et bien formés. Sa faible demande en eau ($E/P = 0,25$ à $0,50$) permet d'obtenir un matériau durci de faible porosité et de résistance mécanique élevée. Il est principalement employé en modelage d'art, en prothèse dentaire, et comme constituant des plâtres haute résistance.

b) Hémi-hydrate β (voie sèche)

Produit par cuisson à pression atmosphérique entre 120 et 180°C dans des fours industriels, l'hémi-hydrate β est constitué de cristaux plus petits et de morphologie irrégulière. Sa demande en eau plus élevée ($E/P = 0,60$ à $0,80$) se traduit par une porosité importante et des résistances mécaniques moindres. C'est la forme utilisée pour les plâtres de construction courants : enduits, carreaux, plaques.

La régularité de la cuisson est critique : une cuisson incomplète laisse subsister des *incuits* (gypse non transformé) qui se comportent comme des accélérateurs de prise ; une surcuisson conduit à l'apparition d'anhydrite III instable, qui modifie la cinétique d'hydratation.

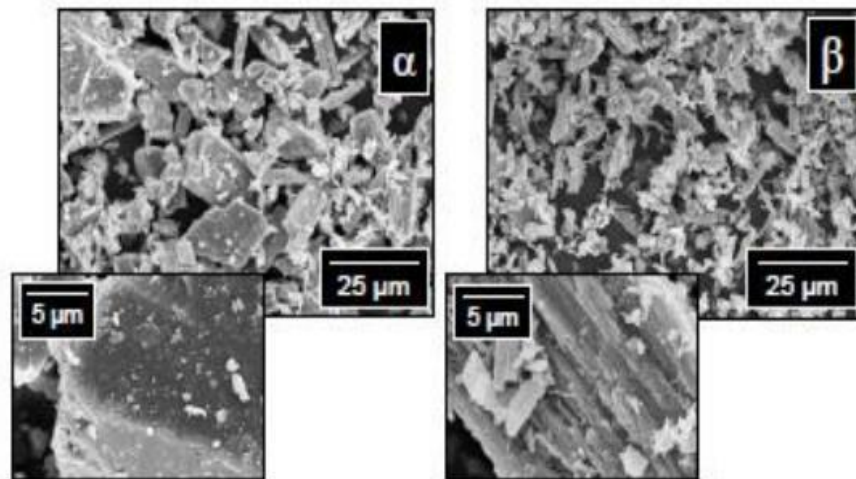


Figure I-3. Comparaison morphologique des cristaux d'hémi-hydrate α et β au MEB [5].

I.3.4. Microstructure du plâtre durci

Le plâtre durci présente une microstructure très poreuse, dont la porosité totale dépend essentiellement du rapport E/P de gâchage. Meille [6] a rapporté une porosité totale d'environ 55 % pour un E/P = 0,8, valeur représentative des plâtres de construction.

Cette microstructure est constituée d'un enchevêtrement de cristaux de gypse en forme d'aiguilles ou de plaquettes, dont la cohésion résulte de deux types de contacts : (i) des liaisons feuilletées par interpénétration des plans cristallins, et (ii) des contacts géométriques de type tenon-mortaise. L'observation au MEB (**Figure I.4**) met en évidence ce réseau aciculaire désordonné qui constitue la trame du matériau durci.

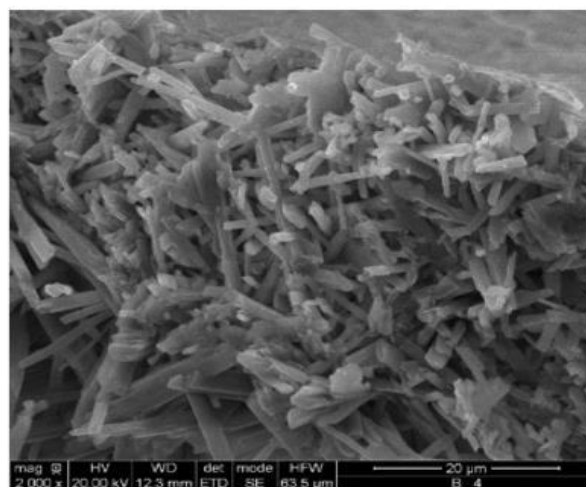


Figure I-4. Enchevêtrement des cristaux de gypse dans le plâtre durci (image MEB) [6].

I.4. Comportement du plâtre

I.4.1. Cinétique d'hydratation

Le gâchage du plâtre est un phénomène de dissolution-recristallisation. À l'ajout d'eau à la poudre d'hémi-hydrate, un mélange homogène se forme ; après une période apparente de latence, le mélange se rigidifie progressivement avec dégagement de chaleur. Les techniques d'analyse calorimétrique et de diffraction des rayons X ont permis d'identifier quatre étapes successives [7, 8] :

- **Dissolution** : mise en solution rapide de l'hémi-hydrate jusqu'à saturation de la solution interstitielle en sulfate de calcium.
- **Période d'induction** : phase apparente de latence durant laquelle se forment les premiers germes de gypse.
- **Accélération** : croissance et multiplication exothermiques des cristaux de gypse, responsables de la prise mécanique.
- **Décélération et durcissement** : épuisement progressif de l'hémi-hydrate, structuration finale du réseau cristallin.

Sur la quantité totale d'eau introduite au gâchage, seule une faible fraction (de l'ordre de 18 % [8]) participe effectivement à la réaction chimique de réhydratation. L'eau en excès assure la fluidité de la pâte et conditionne directement la porosité finale du matériau durci. C'est la raison pour laquelle le rapport E/P est le paramètre dominant des propriétés mécaniques et hygrométriques du plâtre.

I.4.2. Comportement mécanique

Le plâtre durci est un matériau dur mais fragile. Avant tout essai mécanique, l'éprouvette est portée à 45 °C sous environ 20 % d'humidité relative jusqu'à masse constante, faute de quoi l'humidité résiduelle modifie sensiblement les valeurs mesurées [6]. La norme algérienne NA 526 régit la détermination des caractéristiques mécaniques du plâtre.

La loi de comportement du plâtre pris à l'état sec est sensiblement linéaire jusqu'à la rupture, sans plasticité notable, avec une rupture brutale. Les performances mécaniques dépendent essentiellement de plusieurs facteurs :

- **la nature de l'hémi-hydrate** : à E/P égal, l'hémi-hydrate α conduit à une résistance plus élevée que l'hémi-hydrate β en raison de sa cristallisation plus compacte.
- **le rapport E/P de gâchage** : la résistance décroît de façon monotone avec E/P, par augmentation de la porosité capillaire.
- **la porosité totale** : paramètre intégrateur le plus simple, déterminée à partir de la masse volumique du gypse pur et de la masse volumique du plâtre durci.
- **les conditions de mise en œuvre** : compactage, vibration, conditions de séchage.

Une relation expérimentale simple relie la résistance mécanique à la porosité totale du matériau durci : à porosité décroissante, la résistance croît, traduisant la mise en charge plus efficace du squelette cristallin.

I.4.3. Comportement hygrométrique et absorption d'eau

Le plâtre est un matériau fortement hydrophile. La solubilité résiduelle du gypse ($2,4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ à 25°C) et l'importance de la porosité capillaire en font un matériau particulièrement sensible à l'eau. Deux mécanismes couplés expliquent la dégradation mécanique en présence d'eau :

- **dissolution partielle du gypse** aux contacts inter-cristallins, qui affaiblit les liaisons feuilletées en présence d'eau libre dans la porosité capillaire.
- **glissement intercristallin**, facilité par l'eau adsorbée aux interfaces, qui agit comme lubrifiant et autorise des micromouvements relatifs entre cristaux sous charge.

Quantitativement, la chute de résistance entre l'état sec et l'état saturé peut atteindre 50 % [1, 9], ce qui restreint sensiblement le domaine d'emploi du plâtre en milieu humide. L'isotherme expérimentale de reprise d'humidité (**Figure I.5**) montre une absorption faible jusqu'à environ 70 % d'humidité relative, puis une croissance rapide par condensation capillaire dans la porosité fine.

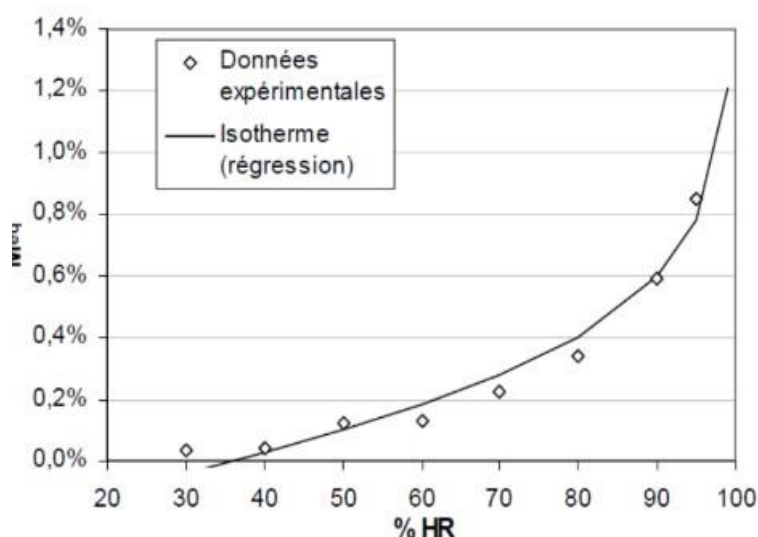


Figure I-5. Isotherme de reprise d'humidité d'une éprouvette de plâtre [10].

I.4.4. Comportement thermique et au feu

Le plâtre est un mauvais conducteur thermique. Sa structure poreuse lui confère une conductivité thermique comprise entre $0,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (plâtre allégé, $\rho = 600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et $0,80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (mortier plâtre + sable, $\rho = 1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Le comportement au feu du plâtre est particulièrement bénéfique. Sous l'action de la chaleur, l'eau de cristallisation chimiquement liée ($\approx 20 \%$ en masse) se libère selon une réaction endothermique, consommant de l'ordre de 700 à 1300 kJ par kg de plâtre [11]. Tant que cette eau n'est pas totalement évaporée, la température du matériau reste plafonnée à environ 140°C . Le plâtre ne dégage aucun gaz toxique lors de sa décomposition thermique. Le **Tableau I.3** récapitule les caractéristiques thermiques typiques des plâtres et mortiers de plâtre.

Tableau I-3. Caractéristiques thermiques du plâtre et de produits dérivés [11].

Matériau / application	ρ sèche ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	C_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	μ sec	μ humide

Plâtre	600	0,18	1000	10	4
Plâtre	900	0,30	1000	10	4
Plâtre	1200	0,43	1000	10	4
Plâtre	1500	0,56	1000	10	4
Plaque de plâtre	900	0,25	1000	10	4
Enduit isolant au plâtre	600	0,18	1000	10	6
Enduit plâtre	1000	0,40	1000	10	6
Enduit plâtre	1300	0,57	1000	10	6
Mortier plâtre + sable	1600	0,80	1000	10	6

I.5. Le mortier de plâtre

I.5.1. Définition et constituants

Le mortier de plâtre résulte du mélange homogène de plâtre, de sable et d'eau dans des proportions appropriées. Le sable joue le rôle de charge granulaire principalement inerte : il réduit le retrait de prise du liant pur, modifie la masse volumique et la conductivité thermique du composite, et améliore la stabilité dimensionnelle à long terme. Sa qualité (granulométrie, propreté, taux d'absorption) conditionne directement les performances finales du mortier.

Des prescriptions ont été formulées par le CNERIB [12] sur les caractéristiques granulométriques et de propreté du sable destiné aux mortiers de plâtre.

I.5.2. Méthode de composition

Le dosage du mortier de plâtre repose sur deux paramètres massiques :

- le rapport **S/P** (sable/plâtre) : fixe le squelette granulaire et conditionne la masse volumique, le retrait et les propriétés mécaniques.
- le rapport **E/P** (eau/plâtre) : fixe la maniabilité, la porosité finale et donc les résistances mécaniques.

La quantité d'eau totale de gâchage intègre deux contributions : l'eau nécessaire à la cristallisation de l'hémi-hydrate et l'eau absorbée par les granulats

I.5.3. Comportement mécanique du mortier de plâtre

L'effet du rapport E/P sur les résistances mécaniques d'un mortier de plâtre durci, mesurées après séchage à masse constante, est illustré sur la **Figure I.6** [12]. Les résistances en flexion comme en compression décroissent de façon monotone avec E/P : un passage de E/P = 0,40 à E/P = 0,70 entraîne une chute de la résistance en flexion de 6,8 MPa à 2,2 MPa environ, et de la résistance en compression de 11,5 MPa à 4,5 MPa environ.

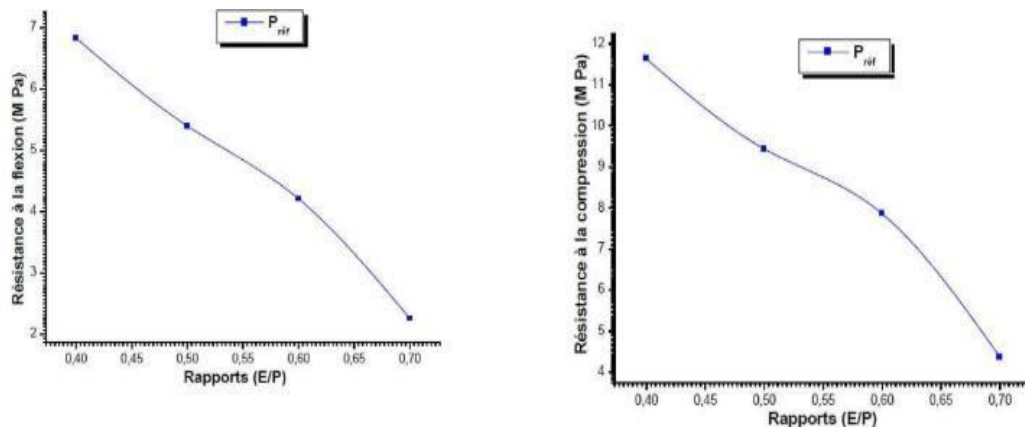


Figure I-6. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier de plâtre à S/P = 0,5 : (a) flexion ; (b) compression [12].

L'effet du rapport S/P présente en revanche un optimum (**Figure I.7**) [13]. Au-delà d'un seuil situé typiquement entre S/P = 0,45 et 0,50, l'ajout supplémentaire de sable affaiblit le matériau : la fraction de liant devient insuffisante pour assurer la continuité de la matrice cohésive autour des grains.

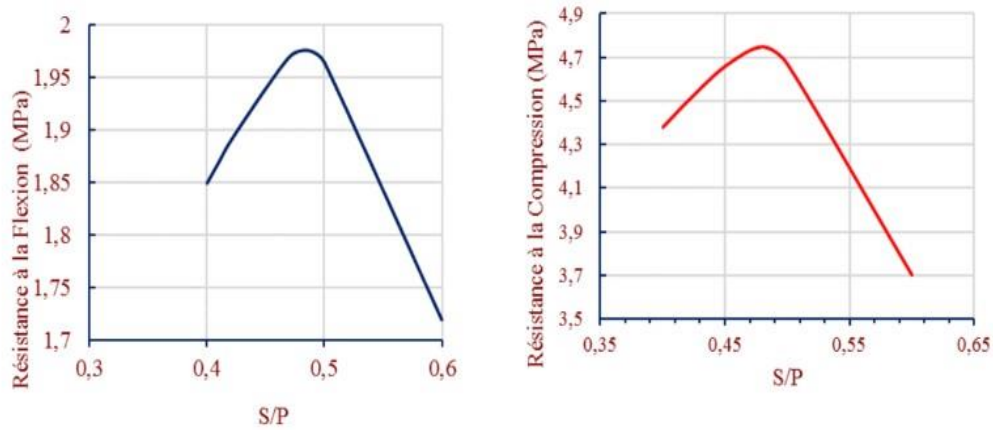


Figure I-7. Influence du rapport S/P sur les résistances mécaniques du mortier de plâtre : (a) flexion ; (b) compression [13].

Dorbani et al. [14] ont étudié l'effet du compactage sur le comportement thermo-mécanique des mortiers de plâtre. Un compactage de 1 à 5 minutes augmente la résistance en flexion de 28 % à 31 %, atteignant plus de 7 MPa, et la résistance en compression de 62 % à 68 %, dépassant 21 MPa, par réduction de la porosité capillaire.

I.5.4. Comportement thermique du mortier de plâtre

La conductivité thermique λ du mortier de plâtre augmente avec le dosage en sable [15] : le sable, plus dense et plus conducteur que la matrice de plâtre, déplace l'équilibre vers une conductivité globale plus élevée. Le compactage [14] amplifie significativement la conductivité du mortier, ce qui met en évidence un compromis entre performances mécaniques et isolation thermique (**Figure I.8**).

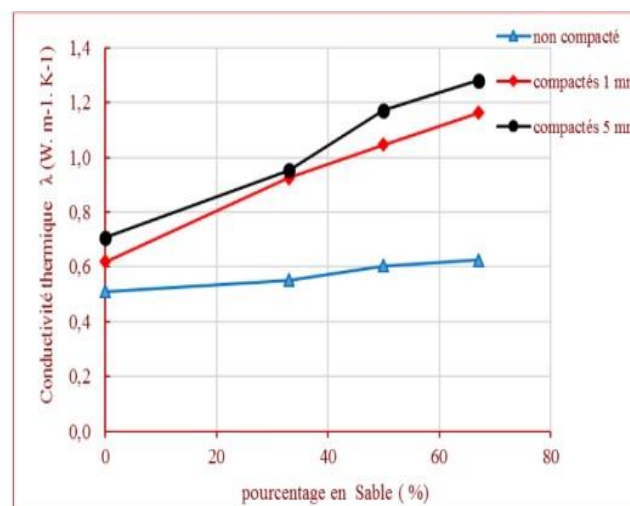


Figure I-8. Conductivité thermique des mortiers de plâtre selon le dosage en sable et le temps de compactage [14].

I.5.5. Domaines d'application

Les éléments à base de plâtre couvrent un large éventail d'applications dans le bâtiment, principalement en intérieur : enduits de finition murale et plafond (couches de 8 à 15 mm), carreaux de plâtre pleins, alvéolés, hydrofuges ou coupe-feu (**Figure I.9**), et cloisons préfabriquées pouvant intégrer des isolants thermiques ou acoustiques (**Figure I.10**).



Figure I-9. Carreaux de plâtre pleins et alvéolés [16].

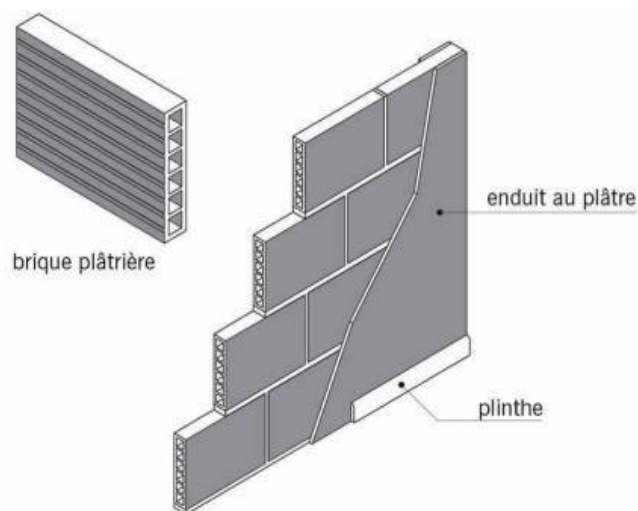


Figure I-10. Cloison intérieure en briques plâtrières avec enduit en plâtre [16].

I.6. Constituants secondaires de modification

I.6.1. La perlite expansée

La perlite expansée est un granulat minéral léger d'origine volcanique, obtenu par expansion thermique d'une roche vitreuse hydratée. Sa très faible masse volumique apparente, sa structure cellulaire à dominante de pores fermés et son inertie chimique en font un constituant utilisé

dans la formulation de matériaux de construction allégés à performance thermique améliorée. Son incorporation dans les matrices à base de plâtre s'inscrit dans une stratégie de substitution partielle du sable visant à abaisser simultanément la masse volumique et la conductivité thermique du composite final.



Figure I-11. Granulats de perlite [17].

a) Origine géologique et composition chimique

La perlite est une roche volcanique vitreuse appartenant à la famille des rhyolites, formée par refroidissement rapide de laves siliceuses. L'eau de constitution (2 à 5 % en masse), piégée dans la matrice vitreuse, est l'agent moteur de l'expansion thermique. Sa composition est dominée par la silice et l'alumine (**Tableau I.4**), ce qui lui confère une inertie chimique et une compatibilité satisfaisante avec les liants minéraux.

Tableau I-4. Composition chimique typique de la perlite brute [17, 18].

Oxyde	Symbole	Teneur (% en masse)
Silice	SiO ₂	70 – 75
Alumine	Al ₂ O ₃	12 – 15
Oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	6 – 10
Oxyde de calcium	CaO	0,5 – 2

Oxyde de magnésium	MgO	0,1 – 0,5
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0,5 – 2
Eau de constitution	H ₂ O	2 – 5

b) Procédé d'expansion et propriétés

La perlite brute est transformée par traitement thermique rapide à 900–1100 °C. La matrice vitreuse atteint un état plastique pendant que l'eau de constitution se vaporise brutalement, faisant foisonner le grain d'un facteur 4 à 20 en volume. La structure cellulaire obtenue confère à la perlite expansée ses propriétés caractéristiques (**Tableau I.5**). La distinction fondamentale entre masse volumique apparente en vrac (60–150 kg/m³) et masse volumique absolue des grains (2,2–2,4 g/cm³) est essentielle pour tout calcul de gâchée et application de la règle des mélanges.

Tableau I-5. Propriétés physiques et thermiques typiques de la perlite expansée [19, 20, 21].

Propriété	Valeur typique	Unité
Masse volumique apparente en vrac (ρ_{app})	60 – 150	kg/m ³
Masse volumique absolue des grains (ρ_{abs})	2,2 – 2,4	g/cm ³
Porosité totale du grain	90 – 95	%
Conductivité thermique (λ)	0,040 – 0,060	W/m·K
Capacité thermique massique (c_p)	≈ 850	J/kg·K
Absorption d'eau (24 h)	200 – 400	% masse sèche
Granulométrie commerciale	0 – 6	mm

Stabilité thermique	jusqu'à ≈ 870	°C
Comportement au feu	incombustible (classe A1)	—
pH (suspension aqueuse)	6,5 – 8	—
Réfractarité (température de fusion)	1260 – 1340	°C

Sa conductivité thermique exceptionnellement faible (0,040–0,060 W/m·K) résulte de la conjugaison de trois mécanismes : la fraction volumique de gaz emprisonné (90–95 % du grain), la dimension des cellules qui limite la convection interne, et l'absence de chemin thermique continu à travers le squelette vitreux.

Sur le plan mécanique, la fragilité intrinsèque des parois cellulaires constitue la principale limitation à des taux d'incorporation élevés : chaque grain se comporte comme une inclusion de faible module ($\approx 1\text{--}4$ GPa) dans une matrice plus rigide ($\approx 5\text{--}10$ GPa pour le plâtre durci), induisant des concentrations de contraintes à l'interface. La résistance en compression du composite chute typiquement de 40 à 70 % pour des taux de substitution volumique en perlite supérieurs à 40 %.

Tableau I-6. Classification commerciale des variétés courantes de perlite expansée.

Catégorie	Granulométrie (mm)	ρ_{app} (kg/m ³)	Applications
Perlite fine	0 – 1	90 – 150	Plâtres, mortiers, enduits
Perlite moyenne	1 – 3	80 – 120	Bétons légers, blocs
Perlite grosse	3 – 6	60 – 100	Isolation en vrac, horticulture
Perlite hydrofugée	0 – 6	90 – 150	Mortiers en milieu humide

I.6.2. Les déchets de pneumatiques : fibres courtes de caoutchouc recyclé

a) Contexte et gisement

À l'échelle mondiale, les pneumatiques en fin de vie représentent l'un des flux de déchets solides les plus problématiques, avec un gisement annuel qui dépasse le milliard d'unités. En Algérie, ce volume est estimé à environ 1 440 000 unités par an, soit près de 26 000 tonnes [22]. Afin d'imposer leur valorisation écologiquement rationnelle, la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 et le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 classent ces pneus hors d'usage dans la catégorie des déchets spéciaux (classe S).

b) Constitution et composition

Un pneumatique de structure radiale associe du caoutchouc (naturel et synthétique), des armatures métalliques et des fibres textiles, rendus solidaires par vulcanisation. Cette réticulation chimique est à l'origine de la remarquable stabilité du matériau en milieu humide. À ce titre, des travaux menés sur des échantillons immergés pendant 42 ans dans de l'eau de mer ont confirmé l'intégrité quasi totale de leurs caractéristiques mécaniques [23]. Le Tableau I.7 présente la composition pondérale typique de ces formulations.

Tableau I-7. Composition pondérale de pneus usagés selon l'usage [24].

Matériaux	Voitures (% en masse)	Camions en (% masse)	Observations
Caoutchouc émietté	70	70	Naturel + synthétique
Acier	17	27	Tringles, ceintures
Fibres et déchets textiles	13	3	Polyamide, polyester

c) Valorisation matière et fractions de broyage

La valorisation matière consiste à broyer les pneus en fractions granulométriques distinctes (**Tableau I.8**). Dans le cadre de cette étude, ce sont les fibres courtes issues du déchiquetage différentiel des bandes de roulement qui sont retenues. Leurs dimensions (longueur 5–30 mm, diamètre 0,1–1 mm) permettent d'introduire un mécanisme de pontage de fissure absent des

constituants granulaires inertes. Le broyage mécanique à température ambiante est privilégié pour cette fraction, en raison de la rugosité de surface qu'il confère aux fibres, favorable à l'adhérence interfaciale avec la matrice de plâtre.

Tableau I-8. Variétés de fractions caoutchoutiques issues du broyage des pneus usagés.

Fraction	Granulométrie	Applications principales
Pneus entiers ou découpés	> 300 mm	Génie civil, ouvrages de soutènement
Granulats grossiers (TDA)	50 – 300 mm	Sous-couches routières, remblais légers
Granulats moyens et fins	1 – 20 mm	Surfaces sportives, bétons et mortiers de caoutchouc
Poudrette	< 2 mm	Enrobés bitumineux, charges de moulage
Fibres courtes	L : 5–30 mm ; $\varnothing$: 0,1–1 mm	Renforcement de matrices cimentaires et plâtreuses

En Algérie, l'incorporation de fractions broyées dans des matrices liées reste peu développée à l'échelle locale, ce qui ouvre un espace de recherche pertinent pour les matériaux de construction allégés.

I.7. Modification du mortier de plâtre par le latex

I.7.1. Généralités sur les polymères

Les polymères sont des macromolécules formées par la répétition d'unités structurales élémentaires (monomères) reliées par des liaisons covalentes. Leur comportement mécanique

est gouverné par leur architecture moléculaire : les thermoplastiques, à chaînes linéaires ou ramifiées, présentent un ramollissement réversible sous l'effet de la chaleur, tandis que les thermodurcissables, réticulés en réseau tridimensionnel, sont irréversiblement rigides après polymérisation [25]. Dans le contexte de la modification des liants minéraux, ce sont les thermoplastiques sous forme de latex qui constituent le modificateur le plus couramment utilisé.

I.7.2. Concept de mortier modifié au polymère (PMM)

Le mortier modifié au polymère (Polymer Modified Mortar, PMM) est obtenu par incorporation d'un polymère organique, à des teneurs allant jusqu'à 25 % en masse du liant, dans un mélange minéral frais [26]. Selon la nature de la matrice et le procédé de fabrication, les composites mortier-polymère se répartissent en trois catégories [27] :

- **Mortier modifié au polymère (PMM)** : incorporation de latex, poudres redispersables ou polymères solubles dans la matrice fraîche.
- **Mortier-polymère (PM)** : matrice polymérique seule, sans liant minéral.
- **Mortier imprégné au polymère (PIM)** : imprégnation du mortier durci par des monomères polymérisés in situ.

Pour les applications de génie civil courantes, le PMM s'impose comme la solution la plus accessible, en raison de sa compatibilité avec les procédés de gâchage classiques et de son coût maîtrisé [28].

I.7.3. Le latex comme adjuvant polymérique

Le latex est une dispersion colloïdale de fines particules de polymère (diamètre 0,05–5 μm) dans un milieu aqueux continu, stabilisée par des tensioactifs ou des colloïdes protecteurs [29]. Sa teneur en matières solides est généralement comprise entre 35 et 55 %. Son action modificatrice repose sur la formation d'un film polymérique continu au sein de la matrice liante lors du séchage : les particules colloïdales coalescent progressivement, comblant les pores capillaires et améliorant la cohésion à l'interface liant-granulat.

Les latex commerciaux les plus utilisés dans les matériaux de construction sont le caoutchouc styrène-butadiène (SBR), le copolymère éthylène-acétate de vinyle (EVA) et l'ester polyacrylique (PAE) [30]. Pour être compatible avec un liant minéral, un latex doit satisfaire plusieurs exigences : stabilité chimique vis-à-vis des ions libérés lors de l'hydratation, température minimale de formation de film (MFFT) inférieure à la température d'application, faible entraînement d'air, et résistance à l'eau et aux alcalis [31].

I.8. Réglementation algérienne sur les plâtres

L'Algérie dispose d'un corpus normatif spécifique pour la caractérisation des plâtres, publié par l'IANOR (Institut Algérien de Normalisation). Ces normes encadrent les essais de réception et de contrôle qualité utilisés en laboratoire universitaire et industriel (**Tableau I.9**) [32].

Tableau I-9. Normes algériennes (NA) applicables aux plâtres [4].

Référence	Intitulé
NA 524	Plâtre — conditions générales des essais.
NA 525	Plâtre — détermination de la masse volumique en poudre.
NA 526	Plâtre — détermination des caractéristiques mécaniques.
NA 527	Plâtre — détermination de la finesse de mouture du produit en poudre.
NA 528	Plâtre — détermination de la teneur en eau de cristallisation.

Pour la présente étude expérimentale, les essais de caractérisation mécanique relèvent de la norme NA 526 (résistance en flexion 3 points et en compression sur éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$), les essais de finesse de la norme NA 527, et la détermination de la teneur en eau de cristallisation de la norme NA 528.

I.9. Conclusion

Ce chapitre a posé le cadre bibliographique de l'étude. Le plâtre, liant aérien obtenu par calcination contrôlée du gypse, présente un compromis caractéristique : bonne tenue au feu et pouvoir isolant thermique d'une part, fragilité intrinsèque et sensibilité marquée à l'eau d'autre part, avec une chute de résistance pouvant atteindre 50 % entre l'état sec et l'état saturé. Le mortier de plâtre, gouverné par les rapports E/P et S/P, laisse une marge d'amélioration substantielle, pour peu que les constituants secondaires soient associés judicieusement.

La perlite expandée apporte légèreté et isolation thermique, au prix d'une fragilité mécanique à gérer par l'optimisation du taux de substitution. Les fibres courtes de caoutchouc recyclé, déchet

local abondant, introduisent de la ductilité dans une matrice intrinsèquement fragile. Le latex, enfin, agit par formation d'un film polymérique au sein des pores capillaires, améliorant la cohésion interfaciale et la résistance à l'eau du composite. Ces trois constituants tracent une voie complémentaire pour étendre le domaine d'emploi du mortier de plâtre vers des applications plus performantes et plus durables.

Chapitre II

Matériaux et méthodes

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés et des méthodes expérimentales employées. La première partie décrit les caractéristiques physiques et chimiques des différentes matières premières constituant le mortier de plâtre composite : le plâtre, le sable de dune, la perlite expansée, les fibres de caoutchouc recyclé et le latex. La seconde partie présente le plan expérimental retenu ainsi que les techniques de mesure utilisées pour évaluer les propriétés mécaniques, thermiques et hydriques des composites.

II.2. Matières premières

II.2.1. Plâtre

Le plâtre utilisé est produit à partir du gypse extrait des gisements d'El Adjiba (wilaya de Bouira), par la société COLPA (Cosider Lafarge Plâtre Algérie). Il s'agit d'un plâtre de construction à prise rapide, commercialisé sous la marque Manhargyps, conforme aux prescriptions des normes NA 524 à NA 528, destiné notamment à la fabrication d'éléments de second œuvre (enduits, carreaux, cloisons).



Figure II-1. Plâtre COLPA – Manhargyps utilisé dans l'étude.

II.2.1.1. Composition chimique

Les résultats de l'analyse chimique du plâtre utilisé sont présentés dans le tableau II.1. Les deux espèces prédominantes sont le SO_3 et le CaO , ce qui confirme que le sulfate de calcium constitue le composant principal du plâtre. La teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dépasse 90 % en masse, ce qui le classe en classe I selon les critères de classification de la pierre à plâtre [1].

Tableau II-1. Analyse chimique du plâtre utilisé.

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

II.2.1.2. Propriétés physiques

La masse volumique absolue du plâtre est déterminée par pycnométrie à l'essence, conformément à la norme NF P 18-555. Le principe consiste à mesurer le volume absolu occupé par une masse connue de plâtre, en faisant appel à un liquide non réactif (essence) pour déterminer le volume réel des grains. La relation utilisée est :

$$\rho_{\text{aos}} = (M_1 - M_0) / [(M_3 - M_0) - (M_2 - M_1)]$$

avec : M_0 = masse du pycnomètre vide ; M_1 = masse du pycnomètre avec l'échantillon sec ; M_2 = masse du pycnomètre avec l'échantillon et l'essence ; M_3 = masse du pycnomètre complètement rempli d'essence.



Figure II-2. Essai de masse volumique absolue du plâtre par pycnométrie à l'essence.

La fiche technique du plâtre COLPA est résumée dans le tableau II.2.

Tableau II-2. Caractéristiques techniques du plâtre COLPA – Manhargyps.

Paramètre	Valeur
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2500

Début de prise	1–2 min
Fin de prise	3–4 min
Masse volumique apparente (vrac)	650–750 kg·m ⁻³
Dureté superficielle Shore C	80
Refus tamis 100 µm	≤ 20 %

II.2.2. Sable de dune

Les régions du sud algérien recèlent d'importants gisements de sable de dune. Dans une optique de valorisation des ressources locales, le sable utilisé dans cette étude provient de la région d'Oued Souf.

La courbe granulométrique (Figure II.3) montre que la majorité des grains est concentrée dans les classes 0,16 – 0,315 mm, ce qui caractérise un sable fin à distribution continue. Un module de finesse de 2,80 est obtenu, conforme aux exigences des mortiers de plâtre (M^f compris entre 1,8 et 3,2 selon le CNERIB [1]).

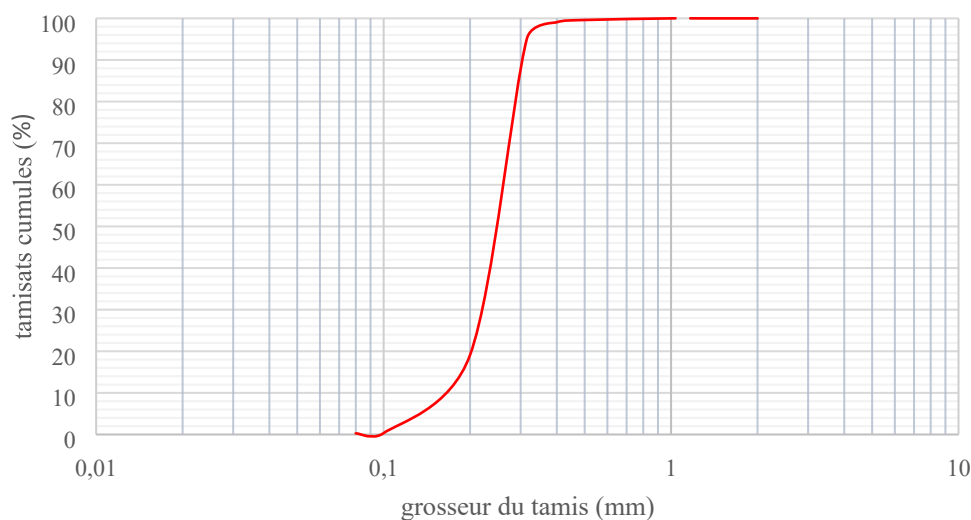


Figure II-3. Courbe granulométrique du sable de dune d'Oued Souf.

II.2.2.1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est déterminée par remplissage d'un récipient de volume connu avec le sable en état foisonné (déversé librement), sans vibration ni tassement. La relation utilisée est :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V$$

avec : M_1 = masse du récipient vide ; M_2 = masse du récipient rempli de sable ; V = volume intérieur du récipient.



Figure II-4. Dispositif de mesure de la masse volumique apparente du sable.

II.2.2.2. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est déterminée par pycnométrie à l'eau selon la relation :

$$\rho_{aos} = (M_1 - M_0) / [(M_3 - M_0) - (M_2 - M_1)]$$

avec : M_0 = masse du pycnomètre vide ; M_1 = masse du pycnomètre avec le sable ; M_2 = masse du pycnomètre avec le sable et l'eau ; M_3 = masse du pycnomètre avec l'eau.

Les caractéristiques physiques du sable de dune sont rassemblées dans le tableau II.3.

Tableau II-3. Caractéristiques physiques du sable de dune d'Oued Souf.

Paramètre	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1 478
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2 552
Compacité (%)	64
Porosité (%)	36
Module de finesse	2,80
Équivalent de sable Esv (%)	64.69

Équivalent de sable E_{SP} (%)	62.64
----------------------------------	-------

II.2.3. Perlite expansée

La perlite expansée utilisée se présente sous forme de granulats blancs à très faible densité, avec une excellente capacité d'isolation thermique. Elle est incorporée dans le mortier de plâtre en substitution partielle du sable, à raison de 0 à 100 % en substitution volumique du sable selon le plan expérimental.



Figure II-5. Perlite expansée utilisée dans l'étude.

Les principales propriétés physiques de la perlite expansée sont données dans le tableau II.4.

Tableau II-4. Caractéristiques physiques de la perlite expansée.

Paramètre	Valeur typique
Masse volumique apparente en vrac (kg/m^3)	60 – 150
Masse volumique absolue des grains (kg/m^3)	100
Porosité du grain (%)	90 – 95
Conductivité thermique λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0,040 – 0,060
Granulométrie commerciale (mm)	0 – 6
Comportement au feu	Incombustible (Classe A1)

II.2.4. Fibres de caoutchouc recyclé (FPRP)

Les fibres textiles de pneumatiques (FTP) sont issues des étapes de broyage et de séparation densimétrique des pneumatiques hors d'usage. Elles se présentent sous forme de filaments fins

de couleur généralement grisâtre, caractérisés par une texture floconneuse et une surface irrégulière, souvent enrobée de microparticules de caoutchouc résiduelles. Leur incorporation dans le mortier de plâtre vise à améliorer la ductilité du composite et à atténuer sa fragilité intrinsèque grâce à un mécanisme de pontage des fissures, tout en renforçant sa résistance à la traction.



Figure II-6. *Fibres de caoutchouc recyclé utilisées dans l'étude.*

Les caractéristiques géométriques et physiques des fibres sont présentées dans le tableau II.5.

Tableau II-5. *Caractéristiques des fibres de caoutchouc recyclé.*

Paramètre	Valeur / Description
Nature	Fibres polymères (principalement Polyamide/Nylon ou Polyester)
Origine	Décoiffage et séparation densimétrique lors du broyage des pneumatiques
Longueur des fibres (mm)	5 – 10
Diamètre moyen (mm)	0,1 – 1,0
Masse volumique absolue (g/cm ³)	≈ 1,15

Module d'élasticité (MPa)	2 – 10
Absorption d'eau (%)	très faible (< 2)

II.2.5. Latex

Le latex utilisé est le SikaLatex® Pro, un adjuvant liquide à base de résine synthétique (latex SBR), employé pour améliorer l'adhérence et réduire la perméabilité du mortier de plâtre. Son action repose sur la formation d'un film polymérique continu au sein du réseau poreux lors du séchage, contribuant à la réduction de l'absorption capillaire et à l'amélioration de la cohésion interfaciale entre le liant et les granulats. Il est incorporé en substitution partielle de l'eau de gâchage à raison de 0 à 2 % en masse de plâtre selon le plan expérimental.



Figure II-7. Latex SikaLatex® Pro utilisé dans l'étude.

Tableau II-6. Caractéristiques techniques du latex SikaLatex® Pro.

Paramètre	Valeur / Description
Nom commercial	SikaLatex® Pro
Aspect	Liquide blanc laiteux
Nature chimique	Résine synthétique (latex SBR)

Densité (g/cm ³)	≈ 1,02
Ph	8 – 10
Solubilité dans l'eau	Miscible
Teneur en matières solides (%)	35 – 55
Fonction principale	Adjuvant modificateur de mortier et béton

II.3. Plan expérimental

II.3.1. Principe et choix du plan

L'optimisation d'un mortier de plâtre impliquant la variation simultanée de trois additifs nécessite le recours aux plans d'expériences, une approche bien plus efficace qu'une stratégie univariable. Pour cette étude, un plan de Box-Behnken à trois facteurs a été retenu ; soit 15 formulations, incluant 3 répliques au point central.

II.3.2. Variables du plan

Les trois variables indépendantes (facteurs) sont :

- **x₁ : teneur en perlite expansée (PE)**, variant de 0 à 100 % en substitution volumique du sable.
- **x₂ : teneur en fibres de caoutchouc recyclé (FPRP)**, variant de 0 à 2 % en volume de plâtre.
- **x₃ : teneur en latex (LAT)**, variant de 0 à 2 % en masse de plâtre.

Les cinq caractéristiques mesurées sont : la masse volumique apparente, la résistance à la compression à 28 et 60 jours, la résistance à la flexion à 28 et 60 jours, et l'absorption d'eau par capillarité (sorptivité).

II.3.3. Formulation de base

En l'absence d'une méthode universelle pour la formulation des mortiers de plâtre, les recommandations du CNERIB ont été suivies [1]. Le rapport eau/plâtre a été fixé à E/P = 0,60, correspondant à la consistance normale du plâtre utilisé, déterminée conformément à la norme NA 524. Le rapport sable/plâtre a été fixé à S/P = 0,50 en masse, conformément aux prescriptions du CNERIB selon lesquelles un excès de sable entraîne une diminution des propriétés mécaniques des matériaux à base de plâtre [1].

II.3.4. Matrice expérimentale

Le plan expérimental comporte 15 formulations (M1 à M15), La formulation témoin M0, sans additif, s'y ajoute comme référence pour quantifier l'effet des additifs. La matrice du plan est présentée dans le tableau II.7.

Tableau II-7. Formulations du plâtre modifié étudiée.

		EP	F	POLYM	Plâtre (g)	Eau (g)	Sable (g)	Perlite Expanse (g)	Latex (g)	Fibres (g)
M0	0	0	0	0	1000	600	500	0	0	0
M1	1	50	1	5	990	569,25	250	10	49,5	4,64
M2	1	0	0	5	1000	575	500	0	50	0
M3	1	50	1	5	990	569,25	250	10	49,5	4,64
M4	0	100	1	0	990	594	0	20	0	4,64
M5	2	100	1	10	990	544,5	0	20	99	4,64
M6	2	50	0	10	1000	550	250	10	100	0
M7	1	50	1	5	990	569,25	250	10	49,5	4,64
M8	0	50	0	0	1000	600	250	10	0	0
M9	0	0	1	0	990	594	500	0	0	4,64
M10	1	100	0	5	1000	575	0	20	50	0
M11	1	0	2	5	980	563,5	500	0	49	9,28
M12	2	50	2	10	980	539	250	10	98	9,28
M13	2	0	1	10	990	544,5	500	0	99	4,64
M14	0	50	2	0	980	588	250	10	0	9,28
M15	1	100	2	5	980	563,5	0	20	49	9,28

II.3.5. Mode opératoire de confection des éprouvettes

Pour éviter tout phénomène de ségrégation lié à la légèreté des granulats de perlite, l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur a été établi comme suit :

- Introduction de la moitié de l'eau de gâchage (ou du mélange eau + latex pour les formulations contenant du latex).
- Introduction du plâtre, de la perlite expansée, du sable dunaire et des fibres de caoutchouc pendant 30 secondes.
- Ajout de l'eau restante.

- Malaxage à vitesse rapide pendant 30 secondes.
- Arrêt du malaxeur, raclage des parois et du fond du récipient.
- Reprise du malaxage jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène, sans dépasser 2 minutes.

Les éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont mises en moule sans vibration, en trois couches piquées à la truelle. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans les conditions du laboratoire jusqu'aux échéances d'essai (28 et 60 jours) :

- **Température** : $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.
- **Humidité relative** : $45 \% \pm 5 \%$.



Figure II-8. Confection et mise en moule des éprouvettes.

II.4. Techniques de mesure expérimentales

Afin d'évaluer le comportement global des composites étudiés, les propriétés suivantes ont été mesurées : masse volumique apparente, résistance à la flexion, résistance à la compression, conductivité thermique, chaleur spécifique et absorption d'eau par capillarité.

II.4.1. Masse volumique apparente

Les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont pesées après séchage à masse constante ($45 \text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à variation $< 0,1 \%$ entre deux pesées espacées de 24 h), à l'aide d'une balance de précision 0,1 g. La masse volumique apparente est calculée par le rapport de la masse au volume géométrique de l'éprouvette.

II.4.2. Résistance à la flexion

L'essai est réalisé à l'aide d'une machine automatique de type Controls, conformément à la norme algérienne NA 526 et aux dispositions de la norme NF EN 13279-2. Le dispositif de

flexion trois points sollicite l'éprouvette en son centre, avec une vitesse de chargement de 10

N/s jusqu'à rupture. La charge maximale enregistrée permet de calculer la résistance en flexion. L'essai est réalisé sur trois éprouvettes par formulation.

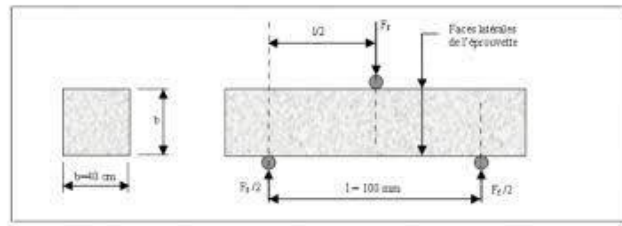


Figure II-9. Dispositif de l'essai de flexion 3 points (a) schéma ; (b) photo.

II.4.3. Résistance à la compression

L'essai de compression est réalisé sur les demi-prismes issus de l'essai de flexion, à l'aide d'une presse universelle Controls, conformément à la norme algérienne NA 526 et aux dispositions de la norme NF EN 13279-2. Les éprouvettes sont placées entre les plateaux de la presse sur des sections de $40 \times 40 \text{ mm}^2$. La charge est appliquée à une vitesse de 1 kN/s jusqu'à rupture.

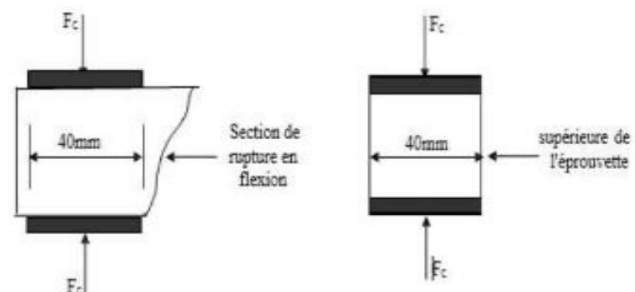


Figure II-10. Dispositif de l'essai de compression (a) schéma ; (b) photo.

II.4.4. Absorption d'eau par capillarité (sorptivité)

L'essai d'absorption capillaire permet d'évaluer la capacité d'un matériau poreux à absorber l'eau sous l'effet des forces de succion capillaire. Des éprouvettes sèches sont mises en contact avec de l'eau libre par leur face inférieure, et la masse absorbée est mesurée en fonction du temps. La quantité d'eau absorbée par unité de surface est calculée selon :

$$C = (M_t - M_0) / S$$

avec : C = absorption capillaire (kg/m^2) ; M_t = masse à l'instant t (kg) ; M_0 = masse initiale sèche (kg) ; S = surface de contact avec l'eau (m^2).

La représentation de C en fonction de $\sqrt{t}$ fournit, dans le domaine linéaire, le coefficient de sorptivité k_s (pente de la droite, exprimé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$ lorsque $\sqrt{t}$ est en $\text{min}^{1/2}$), qui caractérise la cinétique d'absorption capillaire du matériau. Ce coefficient constitue l'indicateur principal de la durabilité hydrique des formulations étudiées.

II.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble des matériaux et des méthodes expérimentales employés dans cette étude. Les analyses physiques et chimiques réalisées sur les matières premières confirment leur conformité aux prescriptions normatives et leur compatibilité avec la matrice de plâtre.

Le plan de Box-Behnken à trois facteurs (perlite expansée, fibres de caoutchouc recyclé, latex) permet d'explorer de manière systématique et économique l'espace expérimental, en 15 formulations. Les résultats de la caractérisation expérimentale sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats et Discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre présente, analyse et discute les résultats expérimentaux obtenus à 28 et 60 jours pour les quinze formulations du plan d'expériences de Box-Behnken. Il évalue l'influence des trois facteurs étudiés : le taux de perlite expansée (PE), le dosage en fibres de caoutchouc recyclées issues de déchets pneumatiques (FCR) et la teneur en latex (LAT) sur la masse volumique apparente, les résistances mécaniques en compression et en flexion aux deux échéances, et l'absorption d'eau par capillarité. Pour chaque caractéristique, les deux âges sont traités conjointement afin de mettre en évidence l'évolution temporelle, dont l'interprétation est rassemblée au section III.5.

III.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente a été déterminée par méthode géométrique sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ séchées à 40°C jusqu'à masse constante. Les valeurs s'échelonnent de $1\,151 \text{ kg/m}^3$ (M4) à $1\,500 \text{ kg/m}^3$ (M5), soit un écart de 349 kg/m^3 . La moyenne des quinze formulations s'établit à $1\,319 \text{ kg/m}^3$, avec un coefficient de variation de 8,1 %. La répétabilité, évaluée sur les trois points centraux M13 à M15, donne $1\,321 \text{ kg/m}^3$ avec un écart-type de 6 kg/m^3 (coefficient de variation de 0,45 %), ce qui confirme la maîtrise du protocole de gâchage.

1600

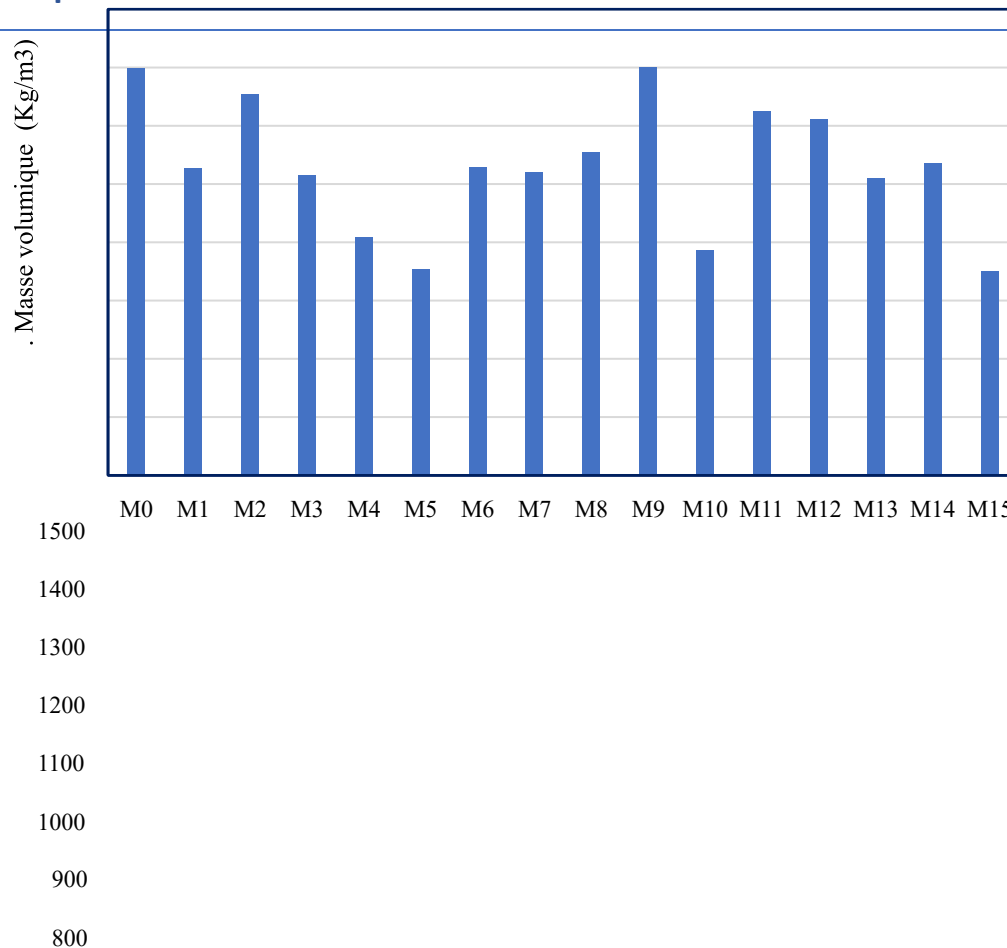


Figure III-1. Masse volumique apparente des seize formulations. Type de mélange

III.2.1. Effet des facteurs

La masse volumique apparente est gouvernée au premier ordre par le taux de perlite expansée. La valeur moyenne décroît de 1 422 kg/m³ à PE = 0 % à 1 342 kg/m³ à PE = 50 %, puis à 1 175 kg/m³ à PE = 100 %, soit une réduction de 17,4 % imputable au seul effet de la perlite. Ce comportement résulte du contraste de masse volumique absolue entre la perlite expansée ($\rho \approx 80$ à 150 kg/m³) et le sable de rivière qu'elle remplace ($\rho \approx 1\,500$ à 1 650 kg/m³) : à dosage massique égal, la perlite occupe un volume dix à vingt fois supérieur à celui du sable déplacé, sa structure alvéolaire à parois vitreuses renfermant une porosité interne occluse de 60 à 90 %. Les fibres de caoutchouc recyclé n'exercent pas d'effet net sur la masse volumique (moyennes comprises entre 1 308 et 1 342 kg/m³), leur masse volumique propre ($\rho \approx 1\,100$ à 1 200 kg/m³) étant voisine de celle de la matrice de plâtre durcie. Le latex induit enfin une décroissance régulière mais modérée (de 1 350 à 1 321 puis 1 303 kg/m³, soit -3,5 %), attribuable à l'air entraîné par les tensioactifs de l'émulsion lors du gâchage et à l'occupation des pores les plus fins par les particules polymères.

III.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été déterminée à 28 et 60 jours sur éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. À 28 jours, elle varie de 3,86 MPa (M8) à 12,28 MPa (M3), pour une moyenne de 9,21 MPa et un coefficient de variation de 25,1 %. À 60 jours, elle s'échelonne de 10,11 MPa (M8) à 14,98 MPa (M5), avec une moyenne de 11,93 MPa et un coefficient de variation ramené à 11,1 %. Le mortier témoin M0 atteint 13,77 MPa à 28 jours et 14,05 MPa à 60 jours. Toutes les formulations satisfont, aux deux échéances, à l'exigence minimale relative aux éléments non porteurs en plâtre ($R_c \geq 2 \text{ MPa}$, NA 526 et NF EN 13279-2).

La progression moyenne entre 28 et 60 jours atteint 29 %, mais demeure très hétérogène : les mélanges M8 et M4 gagnent respectivement 162 % et 102 %, tandis que les mélanges dépourvus de latex évoluent peu (M6 : +20 % ; M10 : +9 %). Le témoin M0 ne progresse que de 2 %, ce qui établit que la maturation de la matrice de plâtre pure est pratiquement achevée à 28 jours et que les gains observés sur les formulations additivées relèvent d'un effet différé des polymères, analysé au § III.5.

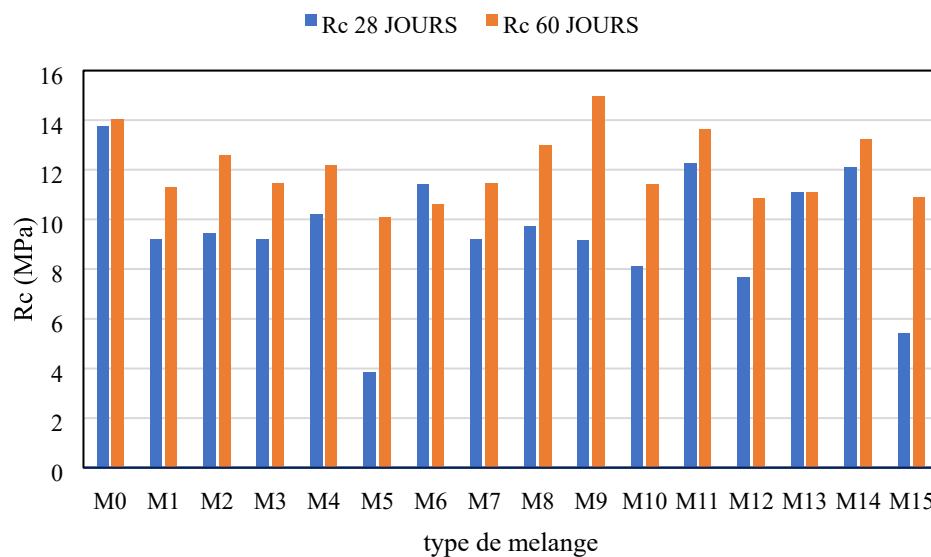


Figure III-2. Résistance à la compression à 28 et 60 jours.

III.3.1. Effet des facteurs

À 28 jours, la résistance à la compression est principalement contrôlée par la perlite, qui la fait chuter de façon monotone de 10,50 MPa (PE = 0 %) à 9,79 MPa (PE = 50 %) puis 6,89 MPa (PE = 100 %), soit une diminution de 34 %. Ce recul provient de deux mécanismes conjugués : la dilution de la matrice liante de gypse, dont dépend directement la résistance en compression, et la multiplication des interfaces plâtre–perlite, lieux préférentiels d'amorçage des microfissures sous chargement uniaxial. Les fibres de caoutchouc recyclé présentent un effet

non monotone, avec un minimum à FCR = 1 % (8,83 MPa) : à faible dosage, le fort contraste de rigidité entre le caoutchouc ($E \approx 4$ à 10 MPa) et le plâtre durci ($E \approx 5\,000$ à 8 000 MPa) fragilise l'interface fibre–matrice, alors qu'à FCR = 2 % la densité de fibres devient suffisante pour dévier les fissures et dissiper une part de l'énergie de rupture. Le latex abaisse la résistance à cette échéance (de 10,30 à 9,19 puis 8,66 MPa, soit -16 %), son film polymère n'ayant pas encore coalescé en un réseau continu et créant des contrastes de rigidité aux interfaces avec les cristaux de gypse. À 60 jours, la hiérarchie se réorganise : la pénalité due à la perlite s'atténue nettement (-15 % seulement, par amélioration progressive de l'ancrage des grains dans la matrice), tandis que le latex inverse son influence puisque les formulations les plus dosées enregistrent les gains de résistance les plus élevés (+48 % en moyenne à LAT = 2 %, contre +31 % pour les formulations sans latex), évolution dont le mécanisme est développé au § III.5.

III.4. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion a été mesurée en flexion à trois points aux deux mêmes échéances. À 28 jours, elle varie de 5,17 MPa (M4) à 7,90 MPa (M10), pour une moyenne de 6,40 MPa et un coefficient de variation de 14,0 %. À 60 jours, elle se resserre entre 7,12 MPa (M6) et 8,45 MPa (M3), avec une moyenne de 7,86 MPa et un coefficient de variation réduit à 4,2 %. Le témoin M0 atteint 7,64 MPa à 28 jours et 7,81 MPa à 60 jours.

Le resserrement marqué du coefficient de variation entre les deux échéances constitue l'observation la plus significative en flexion : la dispersion initiale, liée à la sensibilité de la résistance en traction à l'état de durcissement de la matrice et des polymères, s'efface à 60 jours lorsque le réseau cristallin et le film latexique sont suffisamment consolidés dans l'ensemble des formulations. La valeur maximale relevée à 60 jours (M3 : 8,45 MPa) dépasse celle du témoin, ce qui établit que l'association d'un fort dosage en fibres et en latex confère, à PE nul, une ténacité supérieure à celle du plâtre pur.

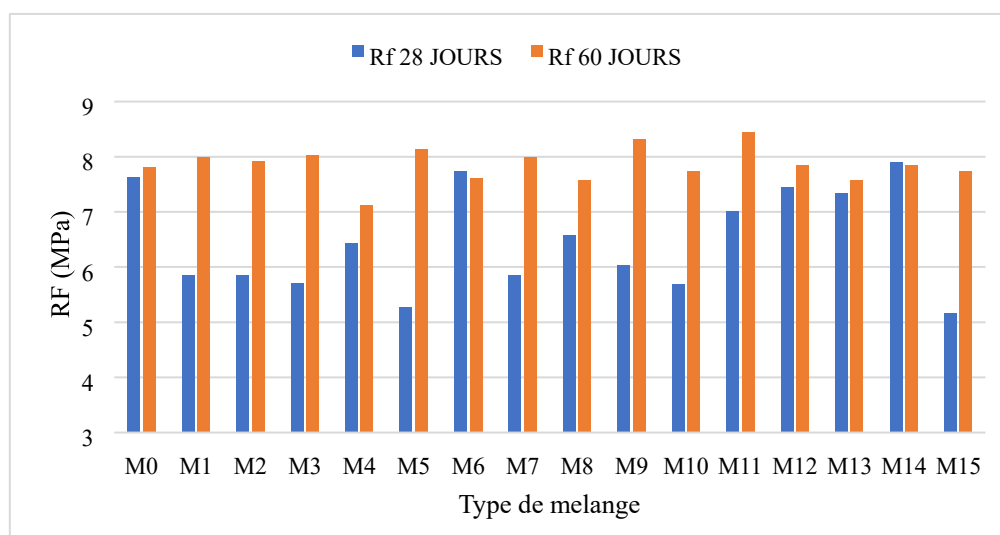


Figure III-3. Résistance à la flexion à 28 et 60 jours.

III.4.1. Effet des facteurs

En flexion à 28 jours, la perlite présente un comportement non monotone : la résistance est maximale au niveau intermédiaire (6,73 MPa à PE = 50 %) et minimale à PE = 100 % (5,65 MPa). À dosage modéré, les grains dispersés dévient le trajet de fissuration en zone tendue et dissipent de l'énergie, alors qu'à fort dosage la densité élevée d'interfaces plâtre–perlite facilite la propagation de la fissure. Les fibres de caoutchouc n'influencent que faiblement la résistance moyenne à cette échéance, qui passe par un minimum à FCR = 1 % ; leur apport, lié au pontage des microfissures par un matériau de faible module et de grande déformabilité (déformation à rupture supérieure à 200 %), se traduit avant tout par un gain de ductilité plutôt que par une élévation de la contrainte maximale, comme l'illustre le mélange M3 (FCR = 2 %), qui présente la résistance en flexion la plus élevée à 60 jours. Le latex abaisse légèrement la résistance en flexion à 28 jours (6,74 MPa à LAT = 0 % contre 6,44 MPa à LAT = 2 %), mais cette pénalité de 4,5 % reste bien inférieure à celle de 16 % observée en compression : la flexion ne sollicitant que la fibre tendue extrême, l'effet de la porosité introduite par le film non coalescé y est nettement atténué. À 60 jours, ces effets s'estompent et les résistances convergent vers une valeur homogène voisine de 7,9 MPa, traduisant la maturation de la matrice et la consolidation du film polymère.

III.5. Évolution temporelle et coalescence du latex

Les paragraphes précédents ont relevé un comportement différé commun aux deux résistances : les formulations les plus riches en latex, pénalisées à 28 jours, enregistrent les gains les plus importants entre 28 et 60 jours. Cette section rassemble ces observations sous un mécanisme unique afin d'en proposer une lecture cinétique cohérente.

Le constat est convergent en compression et en flexion. En compression, les formulations dosées à LAT = 2 % gagnent en moyenne 48 % entre 28 et 60 jours, contre 31 % pour celles dépourvues de latex ; en flexion, le gain moyen passe de 16 % à LAT = 0 % à 25 % à LAT = 2 %. Les deux mélanges qui combinent une teneur élevée en perlite et en latex, M8 et M4 (PE = 100 %, LAT = 2 %) illustrent ce comportement de façon extrême : classés parmi les plus faibles à 28 jours, ils se redressent fortement à 60 jours (+162 % et +102 % en compression). Le témoin M0, dépourvu d'additif, ne gagne que 2 % sur la même période ; ce redressement ne peut donc être attribué à la maturation ordinaire du liant, mais à un effet propre au polymère.

Ce comportement s'explique par la coalescence progressive du film latexique, décrite en trois phases. Durant la première phase (0 à 28 jours), la prise du plâtre domine : la recristallisation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) établit le réseau cristallin principal, tandis

que les particules de latex (0,1 à 0,5 μm), simplement rapprochées par l'évaporation de l'eau de

gâchage, ne forment pas encore de film continu et créent des contrastes de rigidité qui pénalisent surtout la compression. Durant la deuxième phase (28 à 60 jours), la coalescence progresse : les chaînes macromoléculaires diffusent à travers les interfaces entre particules et constituent un réseau tridimensionnel qui interpénètre la matrice de gypse. Ce réseau remplit alors trois fonctions : il crée des ponts flexibles entre cristaux, ce qui élève la ténacité et donc les deux résistances ; il enveloppe partiellement les fibres de caoutchouc, améliorant leur liaison avec la matrice ; et il comble une partie des pores fins. Au-delà de 60 jours, hors du domaine de cette étude, le film pleinement consolidé assure une liaison renforcée entre les constituants.

III.6. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité a été déterminée sur éprouvettes séchées à masse constante puis mises en contact avec une lame d'eau par leur face inférieure de 16 cm² (§ II.3.4). Deux grandeurs en sont extraites : la sorptivité S , pente de la droite reliant la masse absorbée par unité de surface à la racine carrée du temps sur le régime capillaire initial, qui caractérise la vitesse de pénétration de l'eau ; et l'absorption massique à saturation W_{abs} , qui mesure la capacité totale du réseau poreux ouvert. Le régime linéaire est observé jusqu'à environ deux heures (coefficients de détermination supérieurs à 0,99), la sorptivité étant calculée sur cet intervalle. La sorptivité varie de 0,243 g·cm⁻²·min^{-1/2} (M11) à 0,481 g·cm⁻²·min^{-1/2} (M8). Le résultat le plus notable concerne le témoin M0, dont la sorptivité (0,429) figure parmi les plus élevées : le plâtre pur absorbe l'eau plus vite que la quasi-totalité des mortiers additivés, ce qui justifie directement l'incorporation d'additifs sur le critère de tenue à l'eau. La capacité totale suit toutefois un classement distinct, M0 présentant l'une des plus faibles absorptions à saturation (22,3 %), signe d'une porosité ouverte de gros diamètre, rapidement saturée mais de volume modéré.

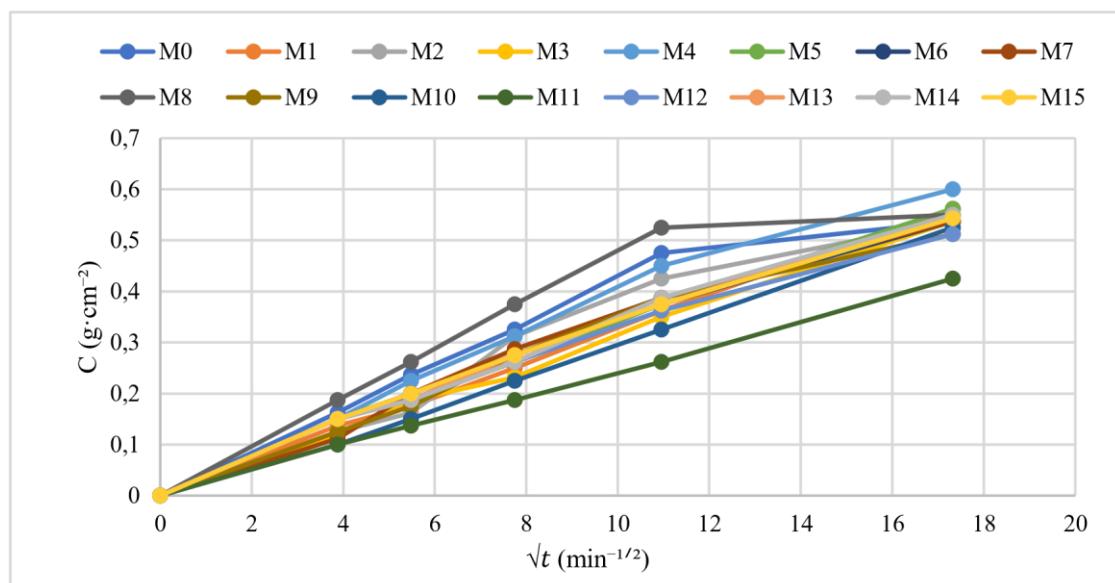


Figure III-4. Cinétique d'absorption capillaire des seize formulations.

III.6.1. Effet des facteurs

La sorptivité est dominée par le taux de perlite, dont l'effet est non monotone : elle reste pratiquement stable entre PE = 0 % (0,339 g·cm⁻²·min^{-1/2}) et PE = 50 % (0,324), puis augmente fortement à PE = 100 % (0,404). À dosage modéré, les grains de perlite, dispersés dans une matrice continue, conservent une porosité interne occluse ; à fort dosage, ils se rejoignent et connectent leur porosité ouverte à la matrice, établissant un réseau capillaire continu qui accélère l'imbibition. Les fibres de caoutchouc accroissent l'absorption, d'autant plus nettement sur la capacité totale à saturation (W_{abs} : 23,0 % à FCR = 0 % contre 28,4 % à FCR = 2 %) que leur interface hydrophobe avec la matrice constitue un chemin d'eau préférentiel. Le latex, enfin, présente un comportement contraire à l'effet hydrofuge attendu : sa sorptivité croît légèrement avec le dosage (de 0,333 à 0,357 g·cm⁻²·min^{-1/2}), bien qu'il réduise la capacité totale à fort dosage (W_{abs} de 28,2 % à 26,1 %). Cette dissociation s'explique par le seuil de percolation : dans le domaine étudié ($LAT \leq 2$ %), la fraction de polymère reste insuffisante pour former un réseau continu obturant les capillaires ; le latex comble une partie du volume poreux fin sans constituer de barrière à l'avancée du front capillaire, et la microporosité d'air entraînée par l'émulsion tend même à accélérer marginalement l'imbibition initiale. Cohérente avec le calendrier de coalescence du § III.5, l'absence d'effet hydrofuge mesurable n'en marque que la limite de dosage et de durée, un tel effet n'étant attendu qu'au-delà du seuil de percolation ou après coalescence complète du film.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté et discuté les résultats de la masse volumique apparente, des résistances mécaniques en compression et en flexion à 28 et 60 jours, et de l'absorption d'eau par capillarité pour les seize formulations du plan d'expériences. Trois enseignements principaux se dégagent.

La perlite expansée constitue le facteur déterminant. Elle gouverne la masse volumique (-17,4 % entre PE = 0 % et PE = 100 %) ainsi que la résistance en compression (-34 % à 28 jours), par dilution de la matrice liante et multiplication des interfaces ; au-delà de 50 %, elle dégrade en outre fortement la résistance à la pénétration capillaire en connectant la porosité des grains. La pénalité mécanique s'atténue toutefois à 60 jours et reste favorable au regard de l'allègement obtenu pour des usages non porteurs.

Les fibres de caoutchouc recyclé, neutres sur le plan de la masse volumique et chimiquement inertes, améliorent la ductilité en flexion par pontage des microfissures, au prix d'une augmentation modérée de l'absorption d'eau liée à leur interface hydrophobe. Le latex, enfin,

est le constituant au comportement le plus riche : pénalisant à 28 jours, surtout en compression, il voit son rôle s'inverser entre 28 et 60 jours sous l'effet de la coalescence progressive de son film, qui accroît les résistances et homogénéise la flexion. Dans le domaine de dosage étudié, son effet hydrofuge demeure en deçà du seuil de percolation. Observé pour la première fois sur un tel système, ce mécanisme de coalescence différée ouvre des perspectives pour la conception de mortiers de plâtre légers et durables valorisant des matériaux recyclés.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail avait pour objectif d'évaluer l'effet de trois additifs (la perlite expansée (PE), les fibres de caoutchouc recyclé (FCR) et le latex (LAT)) sur les propriétés d'un mortier de plâtre formulé à partir de matériaux locaux. Les seize formulations issues du programme expérimental ont été caractérisées en termes de masse volumique apparente, de résistances mécaniques en compression et en flexion à 28 et 60 jours, et d'absorption d'eau par capillarité.

La perlite expansée s'est imposée comme le facteur dominant. Son incorporation réduit la masse volumique apparente de 17,4 % entre $PE = 0 \%$ et $PE = 100 \%$, ce qui positionne les formulations allégées dans une plage favorable aux applications non porteuses à exigences thermiques. Cette réduction s'accompagne d'une pénalité mécanique en compression de l'ordre de 34 % à 28 jours, par dilution de la matrice liante et multiplication des interfaces plâtre-perlite. À 60 jours, cette pénalité s'atténue sensiblement, traduisant une consolidation progressive de l'ancrage interfacial. En absorption capillaire, un effet de seuil est observé : au-delà de $PE = 50 \%$, la connexion de la porosité ouverte des grains établit un réseau capillaire continu qui accélère l'imbibition.

Les fibres de caoutchouc recyclé n'affectent pas la masse volumique, leur densité propre étant voisine de celle de la matrice durcie. Leur contribution principale réside dans l'amélioration de la ductilité en flexion par pontage des microfissures, mécanisme qui se manifeste pleinement à fort dosage et à 60 jours. En contrepartie, leur interface hydrophobe avec la matrice constitue un chemin d'eau préférentiel qui élève modérément l'absorption à saturation.

Le latex présente le comportement le plus complexe. À 28 jours, il pénalise la résistance en compression (-16 %) plus sévèrement que la résistance en flexion (-4,5 %), son film polymère n'étant pas encore coalescé en réseau continu. Entre 28 et 60 jours, cette tendance s'inverse : les formulations les plus dosées en latex enregistrent les gains de résistance les plus élevés (+48 % en compression à $LAT = 2 \%$, contre +31 % pour les formulations sans latex), signe de la coalescence progressive des chaînes macromoléculaires au sein de la matrice de gypse. Dans le domaine de dosage étudié (LAT inférieur ou égal à 2 %), cet effet différé ne s'accompagne pas d'une réduction mesurable de la sorptivité, le taux de polymère restant en deçà du seuil de percolation nécessaire à l'obturation des capillaires.

Sur le plan de la durabilité hydrique, la formulation M11 (PE = 0 %, FCR = 2 %, LAT = 1 %) présente la sorptivité la plus faible de l'ensemble des seize formulations, y compris le témoin M0. Ce résultat établit que l'incorporation d'additifs, loin de dégrader systématiquement la tenue

Conclusion Générale

à l'eau, peut conduire à des mortiers plus résistants à la pénétration capillaire que le plâtre pur, justifiant leur intérêt même en dehors de toute considération d'allègement.

En perspective, l'extension de la plage de dosage en latex au-delà du seuil de percolation, l'acquisition d'images MEB à 28 jours pour confirmer l'état de coalescence à cette échéance, et la caractérisation de la conductivité thermique des formulations allégées constitueraient les suites naturelles de ce travail pour en consolider la portée applicative.

Références bibliographiques

- [1] Daligand D. Plâtre. Techniques de l'Ingénieur, Traité Construction, C 910, Paris, 2002.
- [2] Norme NF EN 13279-1. Liants à base de plâtre et enduits à base de plâtre — Partie 1 : Définitions et exigences. AFNOR, 2008.
- [3] Jaffel H. Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, France, 2006, 159 p.
- [4] Coquard P., Boistelle R. Étude du cycle gypse-plâtre. Cahiers du CSTB, Paris, 1994.
- [5] Murat M., Karmazsin E. Caractéristiques physico-chimiques des semi-hydrates α et β du sulfate de calcium. Cement and Concrete Research, vol. 14, 1984, p. 379–389.
- [6] Colak A. Density and strength characteristics of foamed gypsum. Cement and Concrete Composites, vol. 22, 2000, p. 193–200.
- [7] Eve S. Comportement à la prise et caractérisation mécanique de matériaux composites à base de plâtre. Thèse de doctorat, Université de Caen, France, 2003.
- [8] Jaffel H. Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, France, 2006, 159 p.
- [9] Saâdaoui M., Meille S., Reynaud P., Fantozzi G. Internal friction study of the influence of humidity on set plaster. Journal of the European Ceramic Society, vol. 25, 2005, p. 3281–3285.
- [10] Boustingorry P. Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté. Thèse de doctorat, ENSM Saint-Étienne et INP Grenoble, 2002.
- [11] CSTB. Le plâtre dans la construction : caractéristiques thermiques et tenue au feu. Cahiers techniques du CSTB, Paris.
- [12] CNERIB. Recommandations pour la construction en plâtre. Centre National d'Études et de Recherches Intégrées au Bâtiment, Ministère de l'Habitat, Alger, 1993
- [13] Eve S. Comportement à la prise et caractérisation mécanique de matériaux composites à base de plâtre. Thèse de doctorat, Université de Caen, France, 2003.
- [14] Dorbani S., Kharchi F., Salem F., Arroudj K., Chioukh N. Influence of the addition of sand and compaction on the mechanical and thermal performances of plaster mortars. Algérie, 2018.
- [15] Jaffel H. Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, France, 2006, 159 p.

- [16] Long N.T. Le Pneusol : recherches – réalisation – perspective. Thèse de doctorat, LCPC – INSA Lyon, France, 1993.
- [17] Maxim L.D., Niebo R., McConnell E.E. Perlite toxicology and epidemiology – a review. *Inhalation Toxicology*, vol. 26, n° 5, 2014, p. 259–270.
- [18] Singh M., Garg M. Perlite-based building materials – a review of current applications. *Construction and Building Materials*, vol. 5, n° 2, 1991, p. 75–81.
- [19] Sengul O. et al. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, vol. 43, 2011, p. 671–676.
- [20] Demirboğa R., Gül R. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. *Energy and Buildings*, vol. 35, n° 11, 2003, p. 1155–1159.
- [21] Vimmrová A. et al. Calcined gypsum–lime–metakaolin binders: design of optimal composition. *Cement and Concrete Composites*, vol. 52, 2014, p. 91–96.
- [22] Trouzine H. et al. Problématique des pneumatiques usagés en Algérie. *Revue Nature & Technologie*, n° 5, 2011, p. 28–35.
- [23] Ab-Malek K., Stevenson A. The effect of 42 years immersion in sea water on natural rubber. *Journal of Materials Science*, vol. 21, 1986, p. 147–154.
- [24] Evans A., Evans R. The Composition of a Tyre: Typical Components. WRAP, RoyaumeUni, 2006.
- [25] Ohama Y. Handbook of polymer-modified concrete and mortars. William Andrew, 1995.
- [26] Frigione M. Concrete with polymers. In: *Eco-Efficient Concrete*. Woodhead Publishing, 2013, p. 386–436.
- [27] Ohama Y. Recent progress in concrete-polymer composites. *Advanced Cement Based Materials*, vol. 5, n° 2, 1997, p. 31–40.
- [28] Fowler D.W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement and Concrete Composites*, vol. 21, n° 5-6, 1999, p. 449–452.
- [29] Schirmer U., Osburg A. In: *Polymer Modified Mortars*. Fraunhofer IRB, 2015.
- [30] Ramakrishnan V. Latex-modified concretes and mortars. NCHRP, 1992.
- [31] Ohama Y. Polymer-based admixtures. *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, n° 2-3, 1998, p. 189–212.
- Cherai Y., Nafa Z. Éléments de matériaux de construction et essais. Direction de Publication Universitaire de Guelma, Algérie, 2006.

ملخص

الكلمات المفتاحية:

Résumé

Mots clés :

Abstract

Keywords: