

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A



قسم الهندسة المدنية

Département de génie civil

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **Master Filière** Génie
Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

THEME

**Développement et caractérisation d'un mortier de plâtre
renforcé**

Encadré par :

Dr. Hamza LAOUBI

Dr. Abd Elmalik GOUFI

Présenté par :

Saadi Abdenour

Cherif Mohamed el amine

Soutenu le :

04/06/2026

Les jurées

Président

Tabet souad

Examineur 1

Guelmine layachi

Examineur 2

Deboucha sadek

Année universitaire : 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Avant toute chose, nous remercions **Allah** qui nous a insufflé le courage et l'optimisme nécessaires à l'accomplissement de cette œuvre.

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم {من لا يشكر الناس لا يشكر الله}

Nous exprimons notre gratitude envers notre superviseur et guide, le Dr **Hamza LAOUBI**, pour ses recommandations, son accompagnement et sa présence continue durant l'élaboration de ce travail.

Qu'Allah te fasse partie de ceux dont Il a mentionné.

{يرفع الله الذين ءامنو منكم و الذين اوتو العلم درجات}

Nous remercions également les docteurs **Ghoufi Abdelmalek** et **Merniz Mohamed** pour leur contribution à la réalisation de cette recherche

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers tous les professeurs du département de génie civil ainsi que tous les membres de l'équipe du laboratoire de génie civil, en particulier **M.Reem**, pour leur dévouement et leurs efforts qui ont assuré le succès de notre formation et de notre projet final.

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet d'étude, depuis ses débuts jusqu'à aujourd'hui.

Saadi abdenour

Cherif Mohamed el amine



Dédicaces

الحمد لله رب العلمين

Je dédie cette étape :

À mon père défunt, dont l'amour et les valeurs m'accompagnent toujours, que Allah lui accorde Sa miséricorde.

À ma chère mère, source de tout amour et soutien, que Allah la protège et la garde en bonne santé

À mon moi ambitieux

À mes frères et à toute ma famille

À Mohamed Amine Cherif, mon partenaire de travail, pour sa précieuse collaboration et son appui tout au long de cette tâche.

À mes chers amis Abdelmoumen Saadi et Largeut Abdenour, et à tous mes amis

À tous mes enseignants et professeurs

Saadi abdenour



Dédicaces

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.
Louange à Allah pour nous avoir permis d'atteindre cette étape. Je tiens tout d'abord à remercier ma famille pour son soutien indéfectible qui a mené à bien ce projet. Un immense merci également à mon collègue, Saadi Abd enour, pour son accompagnement et sa collaboration tout au long de ce parcours, ainsi que pour sa grande humanité. Merci aussi à notre professeur et mentor, Hamza Laoubi ; nous pouvons lui dire que nous avons fait un excellent choix en le guidant sur cette voie. Merci également à tous ceux qui ont travaillé avec nous au laboratoire et qui ont facilité ce cheminement, et enfin, à mes amis et à mes proches. Je leur exprime ma plus profonde gratitude pour leur soutien, leurs encouragements et leur présence.
Merci à tous.

Cherif Mohamed el amine

Résumé

Ce travail porte sur la formulation et la caractérisation d'un mortier de plâtre allégé incorporant de la perlite expansée (en substitution volumique du sable), de la ouate de cellulose recyclée et un adjuvant hydrofuge silicone. Seize formulations, organisées selon un plan d'expériences à trois facteurs, ont été caractérisées à 28 jours : masse volumique apparente, résistances à la flexion et à la compression, sorptivité capillaire et durabilité aux cycles d'humidification-séchage. La perlite réduit la masse volumique d'environ 19,5 % sans pénaliser fortement la résistance ; la ouate de cellulose influe surtout sur les résistances mécaniques, tandis que l'hydrofuge, optimal à 1 %, gouverne l'absorption d'eau. La formulation optimale (substitution totale du sable par la perlite, environ 0,5 % de ouate et 1 % d'hydrofuge) atteint une masse volumique voisine de 1 200 kg/m³ en conservant des résistances satisfaisantes, la durabilité aux cycles demeurant le principal point de vigilance.

Mots-clés : mortier de plâtre, perlite expansée, ouate de cellulose recyclée, hydrofuge silicone, résistances mécaniques, sorptivité capillaire, durabilité, plan d'expériences.

Abstract

This work investigates the formulation and characterization of a lightweight plaster mortar incorporating expanded perlite (as a volumetric sand substitute), recycled cellulose wadding, and a silicone water repellent. Sixteen formulations, structured according to a three-factor experimental design, were characterized at 28 days in terms of bulk density, flexural and compressive strengths, capillary sorptivity, and durability under wetting-drying cycles. Perlite reduces bulk density by approximately 19.5% without significantly compromising strength; cellulose wadding mainly affects mechanical properties, while the water repellent, optimal at 1%, and governs water absorption. The optimal formulation (full sand substitution with perlite, about 0.5% wadding, and 1% water repellent) achieves a bulk density close to 1,200 kg/m³ while maintaining satisfactory strength, with cyclic durability remaining the main concern.

Keywords: plaster mortar, expanded perlite, recycled cellulose wadding, silicone water repellent, mechanical strength, capillary sorptivity, durability, design of experiments

المخلص

يتناول هذا العمل خلط وتوصيف ملاط جبسي خفيف الوزن يضم البيرلايت الموسّع (كبديل حجمي للرمل) واللياف السليلوز المُعاد تدويرها ومادة سيليكونية طاردة للماء. جرى توصيف ست عشرة تركيبة، مُنظمة وفق تصميم تجريبي بثلاثة عوامل، عند عمر 28 يومًا: الكتلة الحجمية الظاهرية، ومقاومتا الانحناء والانضغاط، والامتصاص الشعري، والمتانة تحت دورات الترطيب والتجفيف. يخفض البيرلايت الكتلة الحجمية بنحو 19.5% دون إضعاف يُذكر للمقاومة؛ وتؤثر اللياف السليلوز أساسًا في المقاومات الميكانيكية، بينما تتحكم المادة الطاردة للماء، المثلى عند 1%، في امتصاص الماء. تبلغ التركيبة المثلى (استبدال كامل للرمل بالبيرلايت، نحو 0.5% اللياف سليلوز و1% مادة طاردة للماء) كتلة حجمية قريبة من 1200 كغ/م³ مع الحفاظ على مقاومات مُرضية، وتبقى المتانة تحت الدورات نقطة الحذر الرئيسية.

الكلمات المفتاحية: ملاط جبسي، بيرلايت موسّع، اللياف سليلوز مُعاد تدويرها، مادة سيليكونية طاردة للماء، المقاومات الميكانيكية، الامتصاص الشعري، المتانة، تصميم التجارب.

Remerciements	2
Dédicaces	3
Résumé.....	5
Abstract	5
الملخص.....	6
Introduction général.....	15
Chapitre I.....	17
I.1. Introduction	17
I.2. Le gypse	17
I.2.1. La pierre à plâtre.....	17
I.2.2. Formation et gisements de gypse.....	19
I.3. Le plâtre	20
I.3.1. Définition et procédé de cuisson	20
I.3.2. Caractéristiques des semi-hydrates α et β	21
I.3.3. Structure cristalline du semi-hydrate	22
I.3.4. Microstructure du plâtre durci	23
I.3.5. Comportement du plâtre.....	24
I.3.5.1. Comportement mécanique.....	24
I.3.5.2. Comportement hygrométrique	24
I.3.5.3. Comportement thermique et au feu.....	25
I.4. Le mortier de plâtre	26

I.4.1. Définition et constituants	26
I.4.2. Méthode de composition du mortier de plâtre.....	27
I.4.3. Comportement mécanique du mortier de plâtre	28
I.4.4. Comportement thermique du mortier de plâtre	30
I.4.5. Domaines d'utilisation des éléments à base de plâtre	30
I.5. Conclusion	31
Chapitre II	33
II.1. Introduction.....	33
II.2. Études sur l'incorporation des additions dans les composites de plâtre	33
II.2.1. Panorama des stratégies	33
II.2.2. Renforcement mécanique par fibres	34
II.2.2.1. Fibres végétales et naturelles.....	34
II.2.2.2. Fibres synthétiques et minérales.....	34
II.2.3. Réduction de la masse volumique apparente	34
II.2.3.1. Vides ou alvéoles structurels	35
II.2.3.2. Occlusion d'air et agents moussants	35
II.2.3.3. Granulats légers	36
II.2.3.4. Synthèse comparative ; effet des granulats légers sur les composites de plâtre..	38
II.3. La perlite expansée	40
II.3.1. Origine et procédé d'expansion	40
II.3.2. Caractéristiques physico-chimiques	40
II.3.3. Granulométries commerciales et applications	43
II.3.4. Comportement de la perlite dans les composites de plâtre	43
II.4. La ouate de cellulose	44
II.4.1. Origine et procédé de fabrication	44
II.4.2. Caractéristiques physico-chimiques	45
II.4.3. Traitement ignifuge au borate	46

II.4.4. Applications dans les composites plâtre et mortiers	47
II.5. Adjuvants utilisés dans les mortiers de plâtre.....	47
II.5.1. Classification générale.....	47
II.5.2. Modificateurs de prise	48
II.5.3. Plastifiants et modificateurs rhéologiques	48
II.5.4. Hydrofuges silicones	49
II.5.4.1. Vulnérabilité du plâtre à l'eau et nécessité d'hydrofuger	49
II.5.4.2. Familles de silicones hydrofuges.....	50
II.5.4.3. Mécanisme d'action en trois étapes.....	50
II.5.4.4. Hydrofugation de masse vs hydrofugation de surface	51
II.5.4.5. Spécificité de l'interaction avec une matrice plâtre	51
II.5.4.6. Indicateurs de performance et dosages	52
II.6. Synthèse et positionnement de l'étude.....	52
II.7. Conclusion	53
Chapitre III.....	55
III.1. Introduction	55
III.2. Matériaux utilisés.....	55
III.2.1. Plâtre.....	55
III.2.1.1. Origine et procédé	55
III.2.1.2. Caractéristiques chimiques	56
III.2.1.3. Caractéristiques physiques.....	57
III.2.1.4. Caractéristiques techniques.....	57
III.2.2. Sable de dune	58
III.2.2.1. Analyse granulométrique	58
III.2.2.2. Propriétés physiques	59
III.2.3. Perlite expansée.....	59
III.2.3.1. Caractéristiques techniques.....	60

III.2.4. Ouate de cellulose	60
III.2.5. Hydrofuge	61
III.2.6. Eau de gâchage	62
III.3. Techniques de mesure expérimentale	62
III.3.1. Masse volumique apparente	63
III.3.2. Résistance à la flexion 3 points.....	63
III.3.3. Résistance à la compression	64
III.3.4. Sorptivité capillaire	64
III.3.5. Durabilité : cycles d'humidification et de séchage.....	65
III.4. Formulation et confection des éprouvettes.....	66
III.4.1. Constituants fixes	66
III.4.2. Constituants variables.....	67
III.4.4. Séquence de gâchage	67
III.4.5. Confection et conservation des éprouvettes	68
III.4.6. Plan expérimental.....	68
III.5. Conclusion.....	70
Chapitre IV.....	71
IV.1. Introduction	71
IV.2. Masse volumique apparente	71
IV.2.1. Résultats par formulation	71
IV.2.2. Effet des facteurs et discussion.....	73
IV.3. Résistance à la flexion	74
IV.3.1. Résultats par formulation	74
IV.3.2. Effet des facteurs.....	75
IV.4. Résistance à la compression.....	77
IV.4.1. Résultats par formulation	77
IV.4.2. Effet des facteurs.....	77

IV.5. Cinétique d'absorption capillaire.....	79
IV.6. Validation et fiabilité des modèles mathématiques (Prédit vs. Réel)	Error!
Bookmark not defined.	
IV.7. Durabilité aux cycles humidification–séchage.....	81
IV.7.1. Variation de masse.....	81
IV.7.2. Évolution des résistances mécaniques après cycles.....	82
IV.8. Synthèse et identification de la formulation optimale	84
IV.8.1. Formulation optimale recommandée	84
IV.8.2. Domaines d'application.....	85
IV.9. Conclusion.....	85
Conclusion générale	88
REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES:.....	90
Annexes.....	96
Annexe A : résultats détaillés des essais	97
Annexe B : photographies des essais	98
Annexe C : fiches techniques des matériaux.....	101

Liste Des Figures

Chapitre I : Généralités sur les mortiers de plâtre

FIGURE I.1: MORPHOLOGIE DU CRISTAL DE GYPSE [4].....	19
FIGURE I.2 :STRUCTURE CRISTALLINE DU GYPSE : EMPILEMENT DES COUCHES Ca^{2+}/SO_4^{2-} ET H_2O SELON LE PLAN (010) [5].....	19
FIGURE I.3 : MODES DE FORMATION ET DE GISEMENT DU GYPSE EN BASSIN EVAPORITIQUE [8]	20
FIGURE I.4 : STRUCTURE ATOMIQUE DU SEMI-HYDRATE SUR LE PLAN (001) [15].....	23
FIGURE I.5 :IMAGES MEB DES PLATRES : (A) SEMI-HYDRATE A CRISTAUX DENSES ; (B) SEMI-HYDRATE B CRISTAUX FISSURES ET POREUX [13]	23
FIGURE I.6:ENCHEVETREMENT DES CRISTAUX DE GYPSE DANS LE PLATRE DURCI (IMAGE MEB, ECHELLE 20 μ M) [5].....	24
FIGURE I.7 : DONNEES EXPERIMENTALES DE REPRISE D'HUMIDITE D'UNE POUTRE DE PLATRE [19]	25
FIGURE I.8: INFLUENCE DU RAPPORT E/P SUR LES RESISTANCES MECANQUES A 28 JOURS, A $S/P = 0,5$	29
FIGURE I.9: INFLUENCE DU RAPPORT S/P SUR LA RESISTANCE MECANIQUE : (A) EN FLEXION ; (B) EN COMPRESSION [25]	29

Chapitre II : Études sur l'incorporation des additions dans les composites de plâtre

FIGURE II.1: ASPECT DE LA PERLITE EXPANSEE COMMERCIALE (GRANULOMETRIE HORTICOLE).....	40
FIGURE II.2: ASPECT MACROSCOPIQUE DE LA OUATE DE CELLULOSE : (A) COMPACTEE EN SAC ; (B) EMIETTEE APRES DEFIBRAGE ;	45

Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales

FIGURE III.1 : PLATRE COLPA UTILISE DANS CETTE ETUDE	56
FIGURE III.2: COURBE GRANULOMETRIQUE DU SABLE DE DUNE D'OUED SOUF	59
FIGURE III.3: PERLITE EXPANSEE TOUAB : (A) ASPECT EN VRAC.....	60
FIGURE III.5 : OUATE DE CELLULOSE UTILISEE.....	61
FIGURE III.6 : HYDROFUGE SIKA LIQUIDE EN BIDON COMMERCIAL.....	62
FIGURE III.7 : DISPOSITIF D'ESSAI DE FLEXION 3 POINTS SUR EPROUVETTE $4 \times 4 \times 16 \text{ CM}^3$	63
FIGURE III.8 : DISPOSITIF D'ESSAI DE COMPRESSION SUR DEMI-PRISME $40 \times 40 \text{ MM}^2$	64
FIGURE III.9 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'ABSORPTION CAPILLAIRE SELON EN 1015-18.....	65
FIGURE III.10: CHAMBRE HUMIDE A $HR > 95 \%$ UTILISEE.....	66
FIGURE III.11: ÉTUVE DE SECHAGE A 105°	66
FIGURE III.12: ÉPROUVETTES EN CHAMBRE HUMIDE PENDANT LA PHASE D'HUMIDIFICATION	66

FIGURE III.13: ÉPROUVETTES EN ETUVE PENDANT LA PHASE DE SECHAGE	66
FIGURE III.14: CONFECTION DES EPROUVETTES 4 × 4 × 16 CM.....	68

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

FIGURE IV.1: MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES SEIZE FORMULATIONS A 28 JOURS.	72
FIGURE IV.2: RESISTANCE A LA FLEXION RF DES SEIZE FORMULATIONS A 28 JOURS.	75
FIGURE IV.3: RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DES SEIZE FORMULATIONS A 28 JOURS.	77
FIGURE IV.4: CINETIQUE D'ABSORPTION CAPILLAIRE DES SEIZE FORMULATIONS A 28 JOURS.	80
FIGURE IV.5: COMPARAISON DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION AVANT (28 JOURS) ET APRES (30 JOURS DE CYCLES H/S) POUR LES SEIZE FORMULATIONS.	83

Annexes

FIGURE B.1: PREPARATION DES EPROUVETTES	98
FIGURE B.2: ECRASSEMENT FLEXION	99
FIGURE B.3: ECRASSEMENT COMPRESSION	99
FIGURE B.4: LA MASSE VOLUMIQUE DU PLATRE.....	99
FIGURE B.5: ESSAI EQUIVALENT DU SABLE.....	100
FIGURE B.6: LA MASSE VOLUMIQUE DE SABLE	100
FIGURE C.1: FICHE TECHNIQUE D'HYDROFUGE SIKA	101
FIGURE C.2: FICHE TECHNIQUE D'HYDROFUGE SIKA	102

Liste De Tableaux

TABEAU I -1: CLASSIFICATION DE LA PIERRE A PLATRE SELON LE C.N.E.R.I.B [3].	18
TABEAU II -1: SYNTHESE COMPARATIVE DES EFFETS DES PRINCIPALES ADDITIONS ALLEGEANTES SUR LES COMPOSITES DE PLATRE.	38
TABEAU III-1: COMPOSITION CHIMIQUE DU PLATRE COLPA (ANALYSE PAR FX, % MASSIQUE).	56
TABEAU III-2: FICHE TECHNIQUE DU PLATRE COLPA.....	57
TABEAU III-3: PROPRIETES PHYSIQUES DU SABLE DE DUNE D'OUED SOUF.	59
TABEAU III-4: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA PERLITE EXPANSEE TOUAB.	60
TABEAU III-5: CARACTERISTIQUES DE LA OUATE DE CELLULOSE UTILISEE.	61
TABEAU III-6: CARACTERISTIQUES DE L'HYDROFUGE SIKA LIQUIDE.	62
TABEAU IV-1: RESULTATS EXPERIMENTAUX A 28 JOURS : MASSE VOLUMIQUE APPARENTE, RESISTANCE A LA FLEXION RF ET RESISTANCE A LA COMPRESSION RC DES SEIZE FORMULATIONS.	71
TABEAU A-1: RESULTATS ESSAIS ABSORPTION CAPILLAIRE.....	97
TABEAU A-2: RESULTATS ESSAIS DURABILITE	97

Introduction générale

Le plâtre compte parmi les plus anciens liants minéraux employés dans la construction. Obtenu par cuisson du gypse à basse température, de l'ordre de 150 °C, il se distingue du ciment par une énergie de fabrication très faible, une matière première abondante et une recyclabilité élevée. Ces atouts environnementaux, conjugués à sa prise rapide, à sa bonne régulation hygrométrique et à sa qualité de finition, expliquent son usage répandu pour les enduits intérieurs, les cloisons et les éléments décoratifs. En Algérie, l'abondance des gisements de gypse et les enjeux croissants d'efficacité énergétique du bâtiment renforcent l'intérêt porté à ce matériau.

Le plâtre durci présente toutefois des limites bien connues : une masse volumique relativement élevée, un comportement fragile, une sensibilité marquée à l'eau et un pouvoir isolant modeste. L'amélioration simultanée de ces propriétés, à savoir alléger le matériau, accroître son pouvoir isolant et limiter son absorption d'eau sans dégrader ses performances mécaniques, constitue un axe de recherche actif. Cette démarche rejoint la tendance actuelle à la valorisation de matériaux locaux, naturels et recyclés au sein de composites légers et isolants.

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective. Il porte sur le développement et la caractérisation d'un mortier de plâtre allégé, élaboré par incorporation simultanée de trois additions complémentaires : la perlite expansée, granulats minéraux ultralégers introduits en substitution volumique du sable ; la ouate de cellulose recyclée, isolant fibreux issu du papier journal ; et un hydrofuge silicone destiné à réduire l'absorption d'eau. L'effet couplé de ces trois constituants est étudié au moyen d'un plan d'expériences réunissant seize formulations.

Les objectifs sont de quantifier l'influence de chaque facteur sur la masse volumique apparente, les résistances à la flexion et à la compression, la sorptivité capillaire et la durabilité aux cycles d'humidification-séchage, puis d'identifier une formulation optimale réalisant le meilleur compromis entre allègement, résistance et durabilité. Les tendances observées sont interprétées à la lumière des mécanismes microstructuraux propres à la matrice gypseuse et à ses interfaces avec les granulats et les fibres.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier présente des généralités sur le gypse, le plâtre et les mortiers de plâtre. Le deuxième propose une revue de la littérature consacrée à l'incorporation d'additions dans les composites de plâtre, en particulier la perlite expansée, la ouate de cellulose et les adjuvants hydrofuges. Le troisième décrit les matériaux,

les formulations et les protocoles expérimentaux. Le quatrième présente, analyse et discute les résultats, puis dégage la formulation optimale. Une conclusion générale synthétise enfin les apports du travail et ouvre sur les perspectives.

Chapitre I

Généralités sur les mortiers de plâtre

I.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur la matière première (gypse), le procédé de fabrication du plâtre, les caractéristiques cristallographiques et microstructurales des semi-hydrates, ainsi que les comportements mécanique, hygrométrique et thermique du plâtre durci et des mortiers de plâtre. Il sert de référentiel théorique aux choix de formulation et aux essais de caractérisation présentés dans les chapitres suivants.

I.2. Le gypse

I.2.1. La pierre à plâtre

Le gypse, également désigné sous le nom de « *pierre à plâtre* », est un sulfate de calcium dihydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Il appartient à la famille des évaporites. Il se présente sous forme d'une roche tendre (rayable à l'ongle, dureté Mohs ≈ 2), à l'éclat mat et légèrement cristallin, généralement de couleur blanche à grisâtre. Cette formule désigne aussi bien le gypse naturel que les gypses synthétiques (gypses chimiques ou résiduaux) issus de procédés industriels : phosphogypse (production d'acide phosphorique), fluorogypse (acide fluorhydrique), borogypse (acide borique), titanogypse, sodogypse, organogypse et désulfogypse (désulfuration des fumées de centrales thermiques) [1, 2].

La cuisson contrôlée du gypse à une température comprise entre 120 °C et 180 °C produit le plâtre, ou semi-hydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), qui constitue le liant pulvérulent commercialisé. Selon les conditions de cuisson (atmosphère, pression, température), on obtient deux variétés morphologiquement et énergétiquement distinctes, notées α et β [2, 5].

Le gypse est principalement composé de sulfate de calcium associé à deux molécules d'eau de cristallisation. Le calcul stœchiométrique à partir des masses molaires donne :

$$M(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = 40,08 + 32,06 + 4 \times 16,00 + 2 \times 18,02 = 172,17 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

D'où une composition théorique de **79,07 % de CaSO_4 et 20,93 % d'eau de cristallisation**. Le gypse commercial s'écarte généralement de cette composition idéale en

raison de la présence d'impuretés (calcaire, argile, silice, dolomie, magnésie, oxydes de fer) et de variations de la teneur en eau effective.

La classification de la pierre à plâtre s'appuie à la fois sur sa composition minéralogique (teneur en gypse T_g) et sur sa composition chimique (teneur en eau de cristallisation T_c). Quatre classes sont distinguées (Tableau I.1).

Tableau I-0-1: Classification de la pierre à plâtre selon le C.N.E.R.I.B [3].

Classe	Composition minéralogique T_g (% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	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	$50 \leq T_g < 70$	$11,51 \leq T_c < 14,65$

Pour la fabrication du plâtre de construction, on recommande l'emploi de pierres des classes I, II et III, c'est-à-dire présentant une teneur en gypse supérieure à 70 %. Les pierres de classe IV (gypses fortement impurs) sont réservées à la fabrication de liants à usage agricole ou aux applications non structurelles.

Le sulfate de calcium dihydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ cristallise dans le système monoclinique (groupe d'espace C2/c). Sa structure résulte de l'empilement, parallèlement au plan (010), de doubles couches d'ions Ca^{2+} et de tétraèdres SO_4^{2-} séparées par des couches de molécules d'eau. Les liaisons sont de deux natures : (i) liaisons ioniques fortes au sein des couches ($\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$), (ii) liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des groupes sulfate. Cette anisotropie structurale explique le clivage marqué selon (010) et la facilité de séparation des cristaux de gypse [4, 5].

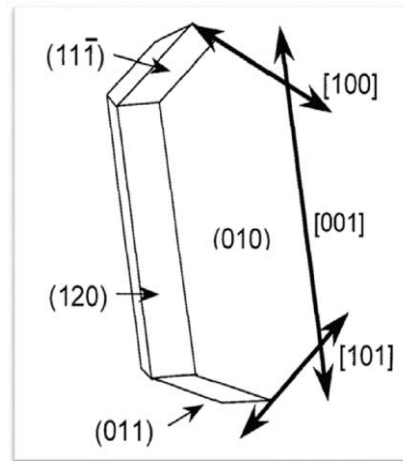


Figure 0I.1: Morphologie du cristal de gypse [4]

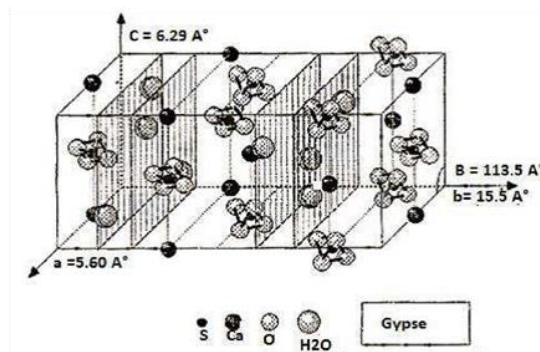


Figure I.2 : Structure cristalline du gypse : empilement des couches $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ et H_2O selon le plan (010) [5]

I.2.2. Formation et gisements de gypse

Les gisements de gypse exploités à l'échelle mondiale sont associés à des dépôts sédimentaires de type évaporitique. Ces dépôts se forment dans des environnements de faible profondeur (mers épicontinentales, lagunes, lacs salés) où l'évaporation intense provoque une concentration progressive des sels dissous. Lorsque la salinité atteint le seuil de précipitation, les ions calcium et sulfate cristallisent sous forme hydratée (gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou anhydre (anhydrite, CaSO_4), selon la température et la salinité résiduelle [6].

À la suite d'un dépôt chimique très lent (parfois étalé sur plusieurs millions d'années), les cristaux de gypse forment des strates sédimentaires d'épaisseur variable, fréquemment intercalées avec des marnes ou des calcaires témoignant des fluctuations du milieu de dépôt. Lorsque les couches géologiques n'ont pas subi de déformations tectoniques importantes,

comme dans le Bassin parisien, les dépôts de gypse se présentent en strates horizontales ou peu inclinées. Le gypse étant soluble dans l'eau, sa préservation suppose la présence de couvertures imperméables (argiles, marnes) protégeant les bancs de la dissolution météorique [7].

À l'inverse, dans les chaînes plissées (Alpes, Pyrénées, Atlas tellien en Algérie), les déformations tectoniques rendent les gisements plus complexes, avec inclusion fréquente de lentilles de roches stériles (schistes, dolomies, anhydrite). En Algérie, les principaux gisements exploités se situent dans les bassins néogènes du Nord (région d'Oran, Sétif, Mila, Constantine) ainsi que dans les évaporites sahariennes (région de Béchar, Hassi Messaoud). Ces ressources couvrent l'essentiel des besoins industriels nationaux en plâtre de construction et en plaques de plâtre [10].

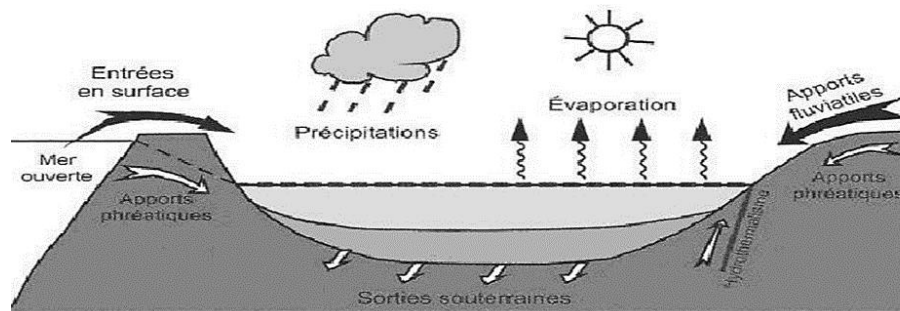


Figure I.3 : Modes de formation et de gisement du gypse en bassin évaporitique [8]

I.3. Le plâtre

I.3.1. Définition et procédé de cuisson

Le terme « *plâtre* » désigne, selon le contexte : **(i)** le liant pulvérulent constitué majoritairement de semi-hydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), obtenu par cuisson contrôlée du gypse, et **(ii)** le matériau durci obtenu après gâchage et hydratation de cette poudre. La transformation industrielle consiste à éliminer partiellement, par cuisson, l'eau de cristallisation contenue dans le gypse [9, 11].

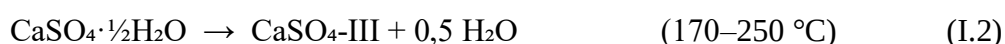
Selon les conditions thermodynamiques de cuisson, on obtient deux variétés de semi-hydrate aux microstructures et performances très différentes [5, 12] :

- Le **semi-hydrate β** est produit par cuisson du gypse à l'air libre, sous pression atmosphérique, dans un four ouvert (marmite, four rotatif), à une température comprise entre 120 °C et 180 °C. Les cristaux résultants sont petits, mal formés, fortement fissurés et

poreux. Cette morphologie engendre une demande en eau élevée (E/P typiquement 0,5–1,2) et des résistances mécaniques modérées. C'est la variété employée comme liant de construction (enduits, mortiers, carreaux, blocs).

- **Le semi-hydrate α** est obtenu en autoclave, sous pression de vapeur saturante ($P > 1 \text{ atm}$) à environ 120–140 °C, ou par voie humide en solution saline. Les cristaux sont denses, bien formés, peu poreux et présentent une demande en eau réduite (E/P typiquement 0,3–0,5). Les résistances mécaniques sont nettement supérieures à celles du semi-hydrate β . Ses applications principales relèvent de la prothèse dentaire, de la céramique technique et des plâtres de moulage à hautes performances [1].

La séquence complète de déshydratation du gypse, sous chauffage progressif, fait apparaître plusieurs phases cristallines successives décrites par les équations suivantes [5, 11] :



$\text{CaSO}_4\text{-III}$ (anhydrite soluble, ou $\gamma\text{-CaSO}_4$) conserve la structure en tunnels du semi-hydrate (système trigonal/hexagonal), ce qui explique sa réhydratation quasi-instantanée en présence de vapeur d'eau et son instabilité à l'air ambiant. $\text{CaSO}_4\text{-II}$ (anhydrite insoluble, ou $\beta\text{-CaSO}_4$) présente une structure orthorhombique stable, peu réactive vis-à-vis de l'eau. $\text{CaSO}_4\text{-I}$ ($\alpha\text{-CaSO}_4$) adopte une structure cubique désordonnée à haute température. Au-delà d'environ 1 250 °C intervient la décomposition $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3(\text{g})$ [11].

I.3.2. Caractéristiques des semi-hydrates α et β

Les principales propriétés physico-mécaniques des deux variétés usuelles de semi-hydrate sont rassemblées dans le Tableau I.2.

Tableau I-2: Caractéristiques comparées des deux variétés usuelles de semi-hydrate [10, 12].

Propriété	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β
Masse volumique absolue ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$2,76 \times 10^3$	$2,63 \times 10^3$

Propriété	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β
Temps de prise (min)	15–20	25–35
Expansion à la prise ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)	2,8	1,6
Résistance à la traction à l'état sec (MPa)	6,5	1,3
Résistance à la compression à l'état sec (MPa)	$\approx 40\text{--}56$	$\approx 5\text{--}15$
Solubilité dans l'eau à 20 °C (g CaSO_4 / 100 g H_2O)	0,63	0,74

L'écart marqué de résistance à la compression entre α ($\approx 40\text{--}56$ MPa) et β ($\approx 5\text{--}15$ MPa) reflète directement la différence de porosité capillaire issue des E/P de gâchage très différents (0,3–0,5 vs 0,5–1,2). Pour un même rapport E/P, les performances mécaniques se rapprochent ; c'est donc essentiellement la *demande en eau*, imposée par la morphologie cristalline, qui distingue les deux variétés.

I.3.3. Structure cristalline du semi-hydrate

Plusieurs auteurs, notamment Bezou [11] et Eve [12], ont caractérisé la structure cristallographique des semi-hydrates α et β . Elle est généralement décrite comme *trigonale* (parfois rapportée comme *rhomboédrique* ou *hexagonale*), avec une structure en tunnels parallèles à l'axe c, les molécules d'eau étant logées dans ces canaux. Cette architecture explique la réhydratation rapide en présence d'humidité.

La distinction majeure entre les deux variétés réside dans la microstructure des cristaux : le semi-hydrate α se présente sous forme de cristaux denses, bien cristallisés et peu poreux, tandis que le semi-hydrate β apparaît comme un assemblage de petits cristaux fissurés et fortement poreux, observable au microscope électronique à balayage (MEB) [13].

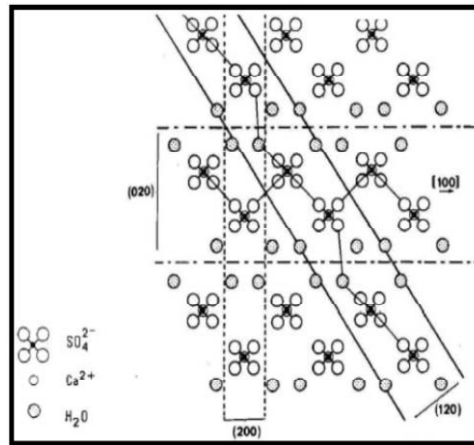


Figure I.4 : Structure atomique du semi-hydrate sur le plan (001) [15]

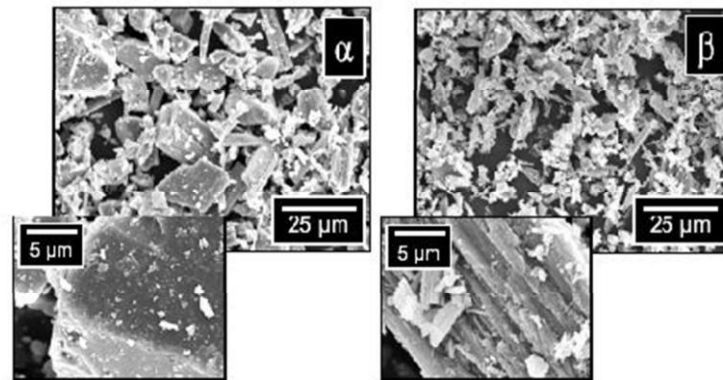


Figure I.5 : Images MEB des plâtres : (a) semi-hydrate α cristaux denses ; (b) semi-hydrate β cristaux fissurés et poreux [13]

I.3.4. Microstructure du plâtre durci

La microstructure du plâtre durci a été étudiée en détail par Meille [14], Eve [12] et Jaffel [4]. Le plâtre pris est un matériau très poreux : à un rapport de gâchage E/P = 0,8, la porosité totale atteint typiquement 55 %. La microstructure est constituée d'un enchevêtrement de cristaux d'aiguilles ou de plaquettes de gypse formés lors de l'hydratation du semi-hydrate. Les cristaux s'interpénètrent selon deux types de jonctions : (i) des assemblages *feuilletés* (interpénétration plane), et (ii) des assemblages *tenon-mortaise* (interpénétration mécanique tridimensionnelle). Cette microstructure confère au plâtre durci sa cohésion mais aussi sa fragilité (Figure I.6) [5, 14].

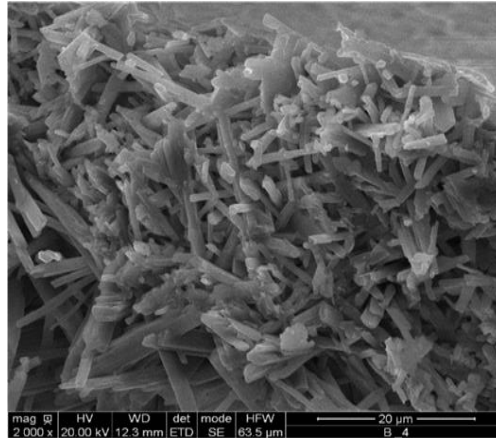


Figure I.6 : Enchevêtrement des cristaux de gypse dans le plâtre durci (image MEB, échelle 20 µm) [5]

I.3.5. Comportement du plâtre

I.3.5.1. Comportement mécanique

Le plâtre durci est un matériau dur et fragile. Ses propriétés mécaniques dépendent principalement de :

- la variété de semi-hydrate utilisée (α ou β) ;
- le rapport de gâchage E/P, qui contrôle la porosité capillaire après évaporation de l'eau excédentaire ;
- le mode de mise en œuvre (gâchage manuel ou mécanique, vibration, compactage) ;
- la teneur en eau au moment de l'essai (humidité relative ambiante).

L'étude expérimentale du plâtre est généralement conduite en flexion 3 ou 4 points et en compression sur éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Le comportement observé est élastique linéaire jusqu'à la rupture, qui survient de manière brutale et fragile, indépendamment de la vitesse de chargement [5, 14].

I.3.5.2. Comportement hygrométrique

Le plâtre présente une grande sensibilité à l'humidité. Sattler [15, 16] a montré qu'un plâtre humide voit ses propriétés mécaniques chuter sensiblement par rapport à l'état sec. Coquard [17] a vérifié expérimentalement ce comportement par essais de flexion comparée sur poutres sèches et humides : la résistance à la flexion peut être divisée par un facteur 2 à 3 lorsque la teneur en eau passe de l'état sec à la saturation. Coquard attribue cette plasticité

apparente à des glissements aux interfaces intercristallines, et non à une plasticité intrinsèque des cristaux de gypse.

Saadaoui et al. [18] confirment, par essais de frottement interne, que l'augmentation de l'humidité relative intensifie le glissement aux joints de grains, donnant au matériau humide un comportement viscoélastique. Meille [14] a observé un comportement similaire et l'a corrélé à la microstructure poreuse du plâtre durci.

Boustingorry [19] a déterminé l'isotherme de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre de dimensions $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ en relation avec l'isotherme de Nelson du gypse (Figure I.7). Il en ressort que la reprise d'eau du plâtre croît fortement à humidité relative élevée ($> 80 \%$), avec un comportement hystérétique entre adsorption et désorption. En conditions de laboratoire et de service, le plâtre joue ainsi un rôle de régulateur hygroscopique en atténuant les fluctuations d'humidité ambiante [10].

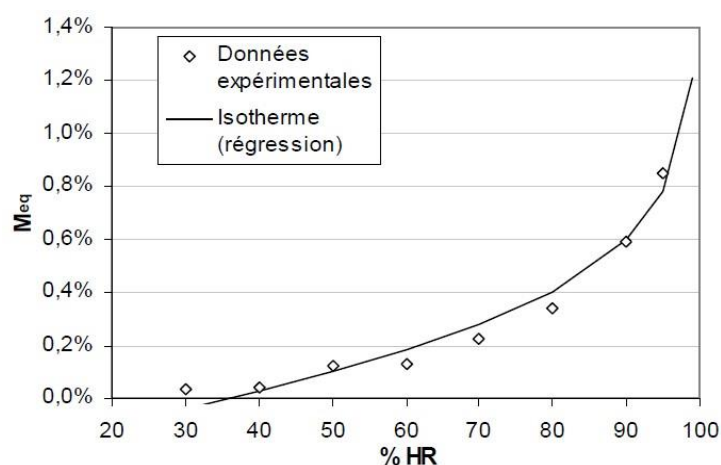


Figure I.7 : Données expérimentales de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre [19]

I.3.5.3. Comportement thermique et au feu

D'après les données rassemblées par Daligand [22] et les Industries du Plâtre [20], la libération des 20 % d'eau de cristallisation du plâtre nécessite environ $711 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ d'énergie calorifique. La vaporisation subséquente de cette eau requiert un apport supplémentaire d'environ $1\,255 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Tant que la totalité de l'eau n'est pas évaporée, la température de la matrice de plâtre reste maintenue en dessous d'environ $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$: le plâtre fonctionne ainsi comme un véritable bouclier thermique passif.

L'exposition au feu d'un élément en plâtre ne génère ni gaz toxique, ni fumée, ni produit corrosif ou asphyxiant. Le plâtre est classé en tant que matériau coupe-feu vis-à-vis du critère d'isolation I (NF EN 13501-2). Cette propriété explique son emploi massif en cloisons coupe-feu, plafonds techniques et protections passives en construction.

La structure poreuse du plâtre durci, héritée de l'évaporation de l'eau excédentaire de gâchage, lui confère une faible conductivité thermique. Les caractéristiques thermiques usuelles sont rassemblées dans le Tableau I.3 [22].

Tableau I-3: Caractéristiques thermiques du plâtre en fonction de sa masse volumique sèche [22].

Masse volumique sèche ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Capacité thermique massique c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	μ sec	μ humide
600	0,18	1 000	10	4
900	0,30	1 000	10	4
1 200	0,43	1 000	10	4
1 500	0,56	1 000	10	4

où μ est le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (sans dimension).

À titre de comparaison, la conductivité thermique du plâtre ($\lambda \approx 0,18\text{--}0,56 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) est **3 à 4 fois plus faible** que celle d'un béton ordinaire ($\lambda \approx 1,4\text{--}2,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et **2 à 3 fois plus faible** que celle de la terre cuite ($\lambda \approx 0,8\text{--}1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ce qui justifie son emploi en isolation thermique des bâtiments [5, 22].

I.4. Le mortier de plâtre

I.4.1. Définition et constituants

Le mortier de plâtre est un mélange homogène de plâtre, de sable, d'eau de gâchage et, éventuellement, d'adjuvants (retardateurs de prise, plastifiants, hydrofuges). Contrairement aux mortiers cimentaires, le sable y joue un double rôle :

- (i) **charge fine** modulant la rhéologie, la masse volumique et le coût ;
- (ii) **agent réducteur de retrait** et de fissuration de prise par dilution du liant.

La nature et la granulométrie du sable conditionnent fortement les performances finales [23]. Selon les recommandations du C.N.E.R.I.B [3], les sables aptes au mortier de plâtre doivent satisfaire les critères suivants :

- exempts de matières gypseuses et de matières organiques ;
- **siliceux de préférence au calcaire** (capacité d'absorption d'eau plus faible, meilleure stabilité chimique vis-à-vis du sulfate de calcium) ;
- granulométrie continue dans le fuseau recommandé (NF P 18-804) ;
- taux de fines minimal pour limiter la demande en eau additionnelle.

Le rapport optimal recommandé est $S/P = 0,5$ en masse, qui correspond à un rapport volumique apparent calculé selon :

$$(S/P)_{vol} = (S/P)_m \times \rho_{P, app} / \rho_{S, app}$$

Avec $\rho_{app}(\text{plâtre}) \approx 700\text{--}900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et $\rho_{app}(\text{sable}) \approx 1\,500\text{--}1\,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, on obtient $(S/P)_{vol} \approx 0,25$, valeur sensiblement inférieure à 0,4 mentionnée dans certaines sources. Cette correction met en évidence l'importance de distinguer explicitement masse volumique apparente et absolue dans les conversions massique $\leftrightarrow$ volumique.

I.4.2. Méthode de composition du mortier de plâtre

Le C.N.E.R.I.B [3] préconise la procédure de gâchage suivante :

1. Mélanger à sec le plâtre et le sable jusqu'à homogénéité visuelle ;
2. Si de la chaux aérienne est utilisée comme adjuvant, l'éteindre totalement dans l'eau de gâchage ;
3. Incorporer progressivement l'eau de gâchage au mélange sec, sous malaxage continu ;
4. Ajuster la quantité d'eau pour obtenir une consistance ouvrable, en tenant compte du taux d'absorption du sable.

La quantité totale d'eau de gâchage est la somme du rapport E/P stœchiométrique-corrigé du plâtre (pour assurer l'ouvrabilité) et du taux de mouillage du sable (lié à la porosité ouverte des grains).

Pour valider la formulation, des essais mécaniques ont été réalisés par le C.N.E.R.I.B [3] sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, à différentes échéances et selon deux modes de conservation. Les résultats sont rassemblés dans le Tableau I.4.

Tableau I-4: Résistances mécaniques d'éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de mortier de plâtre selon l'échéance et le mode de conservation [3].

Échéance	2 h Mode 2	3 j	7 j	28 j
Mode	M2	M1 / M2	M1 / M2	M1 / M2
R_c (MPa)	4,80	11,53 / 10,56	12,45 / 10,85	13,21 / 11,89
R_f (MPa)	1,39	3,67 / 3,26	4,07 / 3,53	4,31 / 3,79

Mode 1 (M1) : conservation à l'air ambiant puis 24 h en étuve avant écrasement (élimination de l'eau libre). **Mode 2 (M2)** : conservation à l'air ambiant uniquement (état partiellement humide). R_c : résistance à la compression ; R_f : résistance à la flexion. Valeurs converties depuis les bars d'origine (1 bar = 0,1 MPa).

Les performances mesurées en mode (1) dépassent systématiquement celles obtenues en mode (2), ce qui met en évidence l'effet majeur de l'eau résiduelle sur la résistance mécanique : un séchage en étuve à 40–50 °C avant essai conduit à une augmentation de R_c et R_f de l'ordre de 10–15 %. Cet effet est cohérent avec les observations de Coquard [17] et Saadaoui [18] sur la sensibilité hygrométrique du plâtre durci.

I.4.3. Comportement mécanique du mortier de plâtre

Plusieurs études ont quantifié l'influence des paramètres de formulation sur les performances mécaniques du mortier de plâtre, notamment le rapport E/P et le rapport S/P. Le C.N.E.R.I.B [3] a établi la corrélation entre la résistance à 28 jours et le rapport E/P à S/P fixé à 0,5 (Figure I.9). On observe une décroissance monotone de R_c avec l'augmentation de E/P, conformément à la loi générale liant porosité et résistance des matériaux à matrice hydraulique.

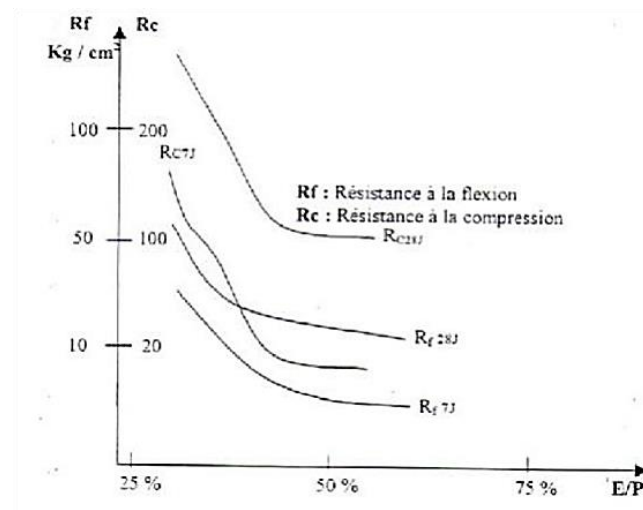


Figure I.9: Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques à 28 jours, à S/P = 0,5

Ghoulam Allah [25] a étudié l'effet du rapport S/P à E/P fixé. Les résultats indiquent une augmentation initiale de la résistance mécanique avec l'incorporation de sable, suivie d'une diminution au-delà d'un optimum (Figure I.10). Cette tendance s'explique par deux effets antagonistes : (i) le sable joue un rôle de squelette granulaire améliorant la cohésion à faible dosage, mais (ii) au-delà d'un seuil, la dilution du liant et la perte d'adhérence pâte/granulat dominant et font chuter les résistances. [24]

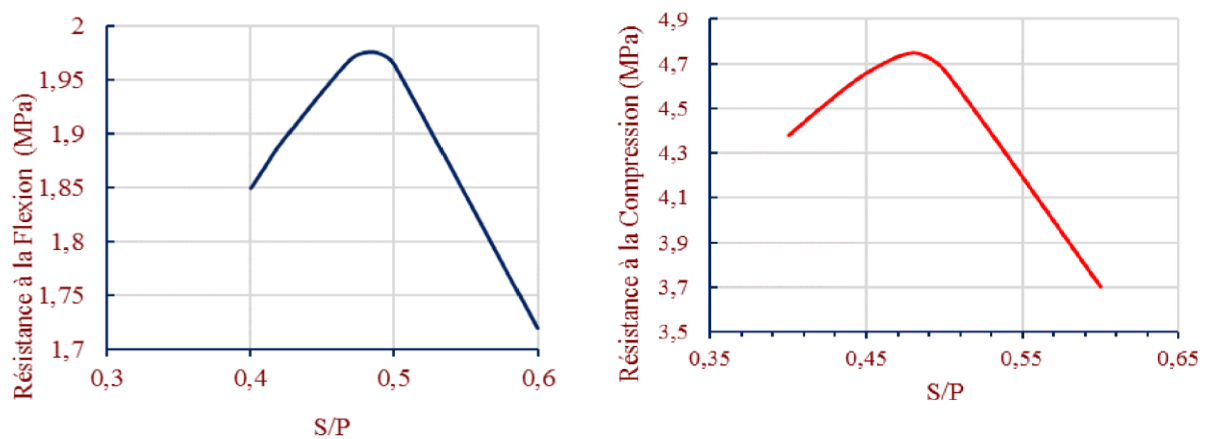


Figure I.9: Influence du rapport S/P sur la résistance mécanique : (a) en flexion ; (b) en compression [25]

thermomécanique des mortiers de plâtre. Ils ont montré que le compactage améliore significativement les performances mécaniques :

- résistance à la flexion : **> 7 MPa**, soit une amélioration de 28–31 % par rapport au mortier simplement coulé, pour des durées de compactage respectives de 1 et 5 minutes ;

- résistance à la compression : **> 21 MPa**, soit une amélioration de 62–68 % pour les mêmes durées de compactage [5].

Cette amélioration provient principalement de la réduction du volume des pores capillaires et de l'amélioration de la liaison interfaciale pâte/sable.

I.4.4. Comportement thermique du mortier de plâtre

Selon Abdelmoumen [27], la conductivité thermique λ du mortier de plâtre croît avec la teneur en sable. L'incorporation de sable augmente la masse volumique apparente du mélange « *plâtre–sable* », ce qui se traduit, via la loi du mélange, par une augmentation simultanée de λ et de la capacité calorifique massique c_p . La diffusivité thermique $a = \lambda / (\rho \cdot c_p)$ connaît une augmentation initiale puis une décroissance lorsque le rapport S/P devient significatif, en raison de la croissance plus rapide de $\rho \cdot c_p$ comparée à λ au-delà d'un certain seuil de granulats.

Dorbani et al. [26] ont par ailleurs montré que le compactage entraîne une augmentation significative de la conductivité thermique aux différents dosages de sable. Les valeurs mesurées sur mortiers compactés sont presque le double de celles des mortiers simplement coulés. Cette augmentation provient directement de la diminution du volume des pores capillaires lors du compactage, qui élimine progressivement la phase gazeuse à très faible λ ($\approx 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour l'air).

Ce résultat met en évidence un compromis fondamental dans l'optimisation des mortiers de plâtre destinés au bâtiment : le compactage améliore la résistance mécanique au prix d'une dégradation de la performance d'isolation thermique. La formulation optimale dépend donc de l'usage visé (cloisons porteuses vs panneaux isolants).

I.4.5. Domaines d'utilisation des éléments à base de plâtre

Le plâtre offre une large palette d'applications dans le secteur du bâtiment et du génie civil. On peut distinguer les utilisations contemporaines suivantes :

- **Éléments porteurs ou de remplissage** : blocs pleins ou creux destinés aux murs porteurs ou de cloisonnement ; hourdis et poutrelles intégrés aux planchers ;
- **Enduits intérieurs** : enduits monocouches et bicouches sur murs et plafonds ;
- **Éléments préfabriqués** : plaques de plâtre cartonées (BA13, BA15), carreaux de plâtre, dalles de plafond ;

- **Doublages thermiques et acoustiques** : panneaux composites plâtre–polystyrène, plâtre–laine de verre.

Plusieurs prototypes et opérations expérimentales ont été menés en zones méditerranéennes et arides, où l'usage du plâtre est particulièrement adapté au climat (forte amplitude thermique, humidité modérée) :

Soltane [27] présente un prototype de quatre logements à Biskra (Algérie) intégrant : (i) des blocs de béton à base de plâtre ; (ii) des planchers et terrasses réalisés à partir de poutrelles semi-préfabriquées en béton armé associées à une dalle légèrement armée sur voûtes en plâtre.

Sonebi [28] présente un prototype de logement construit à Rabat (Maroc) comprenant : un mur en mortier de plâtre banché ; un dallage en plâtre renforcé pour le revêtement de voûtes ; des cloisons non porteuses en carreaux de plâtre.

Zuber [29] propose, pour la construction en région tropicale sèche, les éléments standardisés suivants en mortier de plâtre : un bloc creux $20 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ pour les murs ; une dalle $60 \times 52 \times 8 \text{ cm}^3$ pour les planchers ; un élément en U $20 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ servant de coffrage à linteaux ou de marche (à recouvrir d'un revêtement anti-abrasion) ; une poutrelle en plâtre renforcé de section $12 \times 14 \text{ cm}^2$.

Aldebert [30] a opté, pour la rénovation des salles d'exposition du Grand Louvre, pour un usage du plâtre sous diverses formes : cloisons supports de cimaises, doublages acoustiques et thermiques à base de plâtre. Le plâtre est apprécié en restauration patrimoniale pour sa réversibilité, sa compatibilité chimique avec les supports anciens et son comportement hygroscopique régulateur.

I.5. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a présenté les caractéristiques fondamentales du gypse, du plâtre et des mortiers de plâtre, depuis la matière première jusqu'aux propriétés thermomécaniques du matériau durci. Les points clés à retenir pour la suite de ce travail sont :

- (i) **le rapport de gâchage E/P** est le paramètre dominant contrôlant la porosité capillaire, donc la masse volumique sèche, la conductivité thermique et les résistances mécaniques. Le rapport stœchiométrique d'hydratation est de 0,186 ; les valeurs pratiques s'étalent de 0,5 à 1,2 pour le semi-hydrate β ;

(ii) **le rapport S/P** influence les performances mécaniques de manière non monotone : un optimum existe, au-delà duquel la dilution du liant et la perte d'adhérence pâte/granulat font chuter R_c et R_f ;

(iii) **la sensibilité hygrométrique** du plâtre durci impose une attention particulière à la conservation des éprouvettes et à l'environnement de service ; un séchage en étuve avant essai mécanique est nécessaire pour obtenir des valeurs reproductibles ;

(iv) **le compromis isolation/résistance** est central : le compactage et l'augmentation de la teneur en sable améliorent les performances mécaniques au prix d'une dégradation de la conductivité thermique. C'est précisément ce compromis que vise à dépasser l'incorporation de granulats légers (perlite expansée) et de fibres végétales (ouate de cellulose), abordée au Chapitre II.

Chapitre II

Études sur l'incorporation des additions dans les composites de plâtre

II.1. Introduction

Le plâtre, considéré comme un matériau composite à matrice cristalline poreuse, fait depuis plusieurs décennies l'objet de travaux visant à modifier ses caractéristiques par l'introduction d'additions. Ces additions répondent à trois objectifs principaux : (i) améliorer la résistance mécanique et la ductilité par renforcement fibreux, (ii) réduire la masse volumique apparente et la conductivité thermique par incorporation de granulats légers ou par occlusion d'air, et (iii) améliorer la durabilité, notamment vis-à-vis de l'eau, par l'usage d'adjuvants hydrofuges et de stabilisants chimiques.

Ce chapitre présente une revue critique des principaux travaux publiés sur l'incorporation d'additions dans les composites de plâtre, classés selon la nature et l'objectif de l'addition.

II.2. Études sur l'incorporation des additions dans les composites de plâtre

II.2.1. Panorama des stratégies

La plupart des travaux portant sur le plâtre composite cherchent à modifier ses propriétés par l'introduction d'additifs spécifiques. À titre d'exemples représentatifs : Jiang et Luan [31] ajoutent de la poudre de sépiolite pour améliorer la régulation hygrothermique des composites de plâtre ; Huang et al. [32] intègrent du carbonate de calcium pour renforcer la résistance au feu d'un composite plâtre-liège ; Ramezani et al. [33] utilisent de la sciure de bois pour améliorer les propriétés acoustiques ; Hummel et al. [34] intègrent de la zéolite dans le plâtre afin d'améliorer ses caractéristiques physico-mécaniques et hygroscopiques.

Au-delà de ces additions ciblées, la majorité des recherches se structurent autour de deux objectifs dominants : l'accroissement des performances mécaniques (renforcement fibreux) et la réduction de la masse volumique apparente (granulats légers, agents d'entraînement d'air, géométries alvéolaires).

II.2.2. Renforcement mécanique par fibres

Les additions destinées au renforcement mécanique sont principalement des fibres, naturelles, minérales ou synthétiques, dispersées de manière aléatoire dans la matrice. Les principales contributions recensées sont :

II.2.2.1. Fibres végétales et naturelles

- **Djoudi et al. [35]** ont étudié l'incorporation de fibres de palmier dattier dans le plâtre pour valoriser un déchet agricole abondant en Algérie. Les résultats montrent une transformation du comportement rhéologique, une augmentation significative des résistances en flexion et en compression, ainsi qu'une amélioration de la ductilité et un relèvement du seuil de fissuration.
- **Dalmay et al. [38]** ont analysé l'effet de fibres de chanvre et de lin sur les propriétés du plâtre durci. Ces fibres lignocellulosiques améliorent la résistance à la flexion et la tenue à la fissuration mais nécessitent un dosage optimal pour éviter l'effet inverse à fort taux d'incorporation.
- **Zhang et al. [39]** ont étudié le renforcement de composites à matrice plâtre par fibres de coton ; Lima et Faria [40] ont travaillé sur l'addition de fibres d'avoine et de laine ; Iucolano et al. [42] ont caractérisé le comportement mécanique de plâtres renforcés par fibres d'abaca.
- **Leiva et al. [41]** ont évalué l'apport de cendres de coque de riz comme charge réactive ; les résultats sont prometteurs en termes de résistance à la compression et de dureté de surface.

II.2.2.2. Fibres synthétiques et minérales

- **Del Río Merino et Comino [36]** ont quantifié l'influence du degré d'ensimage des fibres de verre E sur les propriétés mécaniques, l'ouvrabilité et la moulabilité du composite plâtre– fibre de verre.
- **Mohandesi et al. [37]** ont caractérisé la résistance de composites plâtre renforcés par fibres de polypropylène (PP) et de poly-paraphénylène téréphtalamide (Kevlar) dispersées aléatoirement.

II.2.3. Réduction de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente du composite plâtre conditionne directement la conductivité thermique, conformément à la loi de mélange $\lambda = f(\rho_{app})$, ainsi que la masse propre des éléments en œuvre. Trois techniques principales sont employées pour la réduire :

- (i) introduction de vides ou d'alvéoles dans la géométrie du matériau ;
- (ii) occlusion d'air dans la matrice (agents moussants, entraîneurs d'air) ;
- (iii) ajout de granulats légers (minéraux naturels, organiques végétaux ou artificiels).

II.2.3.1. Vides ou alvéoles structurels

Cette technique ne nécessite aucun additif ni granulats, ce qui en fait l'une des méthodes les plus utilisées dans la fabrication d'éléments préfabriqués (céramique, béton, plâtre) sous forme de briques creuses, voûtes alvéolaires, blocs perforés, panneaux de cloisons percés. La réduction de masse est obtenue purement par géométrie, sans altération de la matrice, mais au prix d'une perte de résistance mécanique fonction du taux de vide géométrique.

II.2.3.2. Occlusion d'air et agents moussants

La méthode la plus simple consiste à augmenter le rapport E/P de gâchage. L'eau excédentaire, au-delà de la fraction stœchiométrique (0,186), s'évapore lors du séchage et laisse une porosité capillaire d'autant plus importante que l'excès d'eau est élevé. Cette voie est toutefois limitée par la perte de résistance mécanique associée.

Pour augmenter la microporosité de manière contrôlée, divers auteurs ont employé des agents d'entraînement d'air et des agents moussants :

- **Del Río Merino et Hernández Olivares [43]** ont étudié l'effet d'agents d'entraînement d'air et d'agents moussants empruntés aux mortiers cimentaires. Si la formation de microbulles est observée dans les deux cas, les entraîneurs d'air seuls ne réduisent pas significativement la masse volumique. L'utilisation d'un agent moussant permet d'abaisser la densité d'environ 7 %, mais cette réduction modeste s'accompagne d'une perte de 17 % en flexion et 52 % en compression.
- **Vimmrová et al. [44]** ont caractérisé le comportement thermique de composites plâtre allégés par sulfate d'aluminium associé à différents agents. Avec un mélange $Al_2(SO_4)_3$ / $CaCO_3$, ils obtiennent une réduction de la masse volumique de 70 %, mais au prix d'une chute drastique des résistances (≈ 93 % en flexion, ≈ 97 % en compression ; valeurs limites

correspondant à un matériau quasi mousse). Avec $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ / acide citrique, la réduction de densité est de 30 % pour des pertes de 66 % en flexion et 77 % en compression.

- **Huang et al. [45]** ont utilisé du dioxyde de manganèse (MnO_2) comme catalyseur de décomposition du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), ce dernier servant d'agent moussant in situ dans les composites de plâtre.

II.2.3.3. Granulats légers

Les granulats légers sont employés depuis l'Antiquité pour réduire la masse propre des matériaux de construction. Selon leur origine, on distingue trois familles :

(a) *Minéraux naturels expansés*

Issus du traitement thermique de roches volcaniques ou sédimentaires : perlite expansée, vermiculite exfoliée, argile expansée, pouzzolane, tuf volcanique, ponce. La structure cellulaire interne, obtenue par expansion sous chauffage rapide, leur confère une faible masse volumique apparente (typiquement $50\text{--}500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et une faible conductivité thermique ($\lambda \approx 0,04\text{--}0,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

- **Del Río Merino et al. [46]** ont comparé l'effet de plusieurs granulats légers dans des composites plâtre destinés au préfabriqué. Avec la perlite expansée, ils observent une réduction de masse volumique de 23 % associée à une perte de 38 % en flexion et 14 % en compression. Avec la vermiculite exfoliée : –13 % en densité, –25 % en flexion, –34 % en compression. Avec l'argile expansée : –20 % en densité, –45 % en résistance mécanique.
- **Gmouh et al. [47]** et Vimmrová et al. [45] ont étudié des composites plâtre allégés à la perlite : la réduction de densité atteint 42 %, mais s'accompagne d'une chute de 64 % en flexion et 83 % en compression à fort taux de substitution.
- **Yong et al. [48]** ont caractérisé des panneaux de plâtre allégés à la vermiculite expansée pour application en isolation thermique.

(b) *Granulats organiques végétaux*

Liège, balle de céréales, copeaux et sciure de bois, fibres lignocellulosiques diverses : il s'agit le plus souvent de coproduits agro-industriels. Leur incorporation permet une réduction de masse mais s'accompagne fréquemment de problèmes de durabilité (sensibilité à l'humidité, biodégradabilité) et de compatibilité chimique avec la matrice (libération de sucres ralentissant la prise du plâtre).

- **Leiva et al. [49]** ont étudié l'effet de la balle de riz sur les composites plâtre : réduction de masse d'environ 4 %, mais perte de 37 % en flexion et 60 % en compression.
- **Hernández-Olivares et al. [50]** ont développé une plaque de plâtre allégée par granulés de liège : réduction de masse de 43 %, baisse de résistance de 57 % en flexion et 76 % en compression.
- **Zhou et al. [51]** ont caractérisé des composites légers à base de sciure de bois renforcés au latex (modificateur d'adhérence pâte/granulat).

(c) Granulats artificiels et déchets industriels

Cette catégorie regroupe des sous-produits industriels (laitiers, cendres volantes), des coproduits réaménagés (laitiers expansés) et des déchets polymères recyclés (polystyrène, PET, polyuréthane, caoutchouc de pneus). L'enjeu est double : réduire la masse volumique du composite et valoriser des flux de déchets.

- **Karaman et al. [52]** ont étudié l'incorporation de fragments de bouteilles PET dans le plâtre : réduction de la masse volumique et amélioration de la performance thermique, mais dégradation des résistances mécaniques.
- **García Santos [53]** a caractérisé des composites plâtre allégés par billes de polystyrène expansé (EPS) : réduction de densité de 39 %, perte de 45 % en flexion et 76 % en compression.
- **González Madariaga [54]** a élaboré une plaque de plâtre stratifiée allégée intégrant des résidus d'EPS recyclé : -56 % en densité, jusqu'à -83 % en résistances mécaniques.
- **Gutiérrez-González et al. [55]** ont étudié la compatibilité plâtre/poudre de polyamide pour obtenir un matériau léger à propriétés thermiques améliorées : réduction de densité de 13 %, baisse de 59 % en flexion et 61 % en compression.
- **Jiménez Rivero et al. [56]** ont valorisé des résidus de caoutchouc issus de gaines d'isolation de tuyaux : -24 % en densité, -54 % en flexion, -67 % en compression.
- **Herrero et al. [57]** ont quantifié l'effet de la teneur et de la granulométrie de granulats de pneus usagés dans les mortiers plâtre-caoutchouc : -37 % en densité, -86 % en flexion et -96 % en compression.
- **Gutiérrez-González et al. [58]** ont incorporé des résidus de mousse de polyuréthane : -46 % en masse, -81 % en flexion, -77 % en compression.

- **Khalil et al. [59]** ont caractérisé l'effet de la fumée de silice et du gel de silice dans le composite plâtre : amélioration de la compacité de la matrice et réduction de poids modérée.
- **Meddah, [70]** ont étudié un composite plâtre–sable de dune–granulats de caoutchouc broyé en substitution volumique du sable : la masse volumique, l'absorption capillaire et la conductivité thermique diminuent simultanément, au prix d'une baisse régulière des résistances mécaniques avec le taux de caoutchouc.

II.2.3.4. Synthèse comparative ; effet des granulats légers sur les composites de plâtre

Le Tableau II.1 résume les variations de masse volumique apparente et de résistances mécaniques observées dans la littérature pour différents granulats légers ou agents d'allègement. Cette synthèse permet de positionner les approches existantes selon le compromis densité / performances mécaniques.

Tableau II-0-1: Synthèse comparative des effets des principales additions allégeantes sur les composites de plâtre.

Type d'addition	Référence	$\Delta\rho$ (%)	ΔR_f (%)	ΔR_c (%)
Agent moussant (entraîneur d'air)	[43]	-7	-17	-52
$Al_2(SO_4)_3$ + acide citrique	[44]	-30	-66	-77
$Al_2(SO_4)_3$ + $CaCO_3$	[44]	-70	-93	-97
Perlite expansée	[46]	-23	-38	-14
Perlite expansée (taux élevé)	[44, 47]	-42	-64	-83
Vermiculite exfoliée	[46]	-13	-25	-34
Argile expansée	[46]	-20	-45	-45
Liège (granulés)	[50]	-43	-57	-76

Type d'addition	Référence	$\Delta\rho$ (%)	ΔR_f (%)	ΔR_c (%)
Balle de riz	[49]	-4	-37	-60
Polystyrène expansé (EPS, billes)	[53]	-39	-45	-76
EPS recyclé (résidus)	[54]	-56	-83	-83
Poudre de polyamide	[55]	-13	-59	-61
Caoutchouc (gainés)	[56]	-24	-54	-67
Caoutchouc (pneus usagés)	[57]	-37	-86	-96
Mousse polyuréthane (déchets)	[58]	-46	-81	-77

$\Delta\rho$: variation relative de la masse volumique apparente. ΔR_f et ΔR_c : variations relatives des résistances à la flexion et à la compression à 28 jours, par rapport au plâtre témoin sans addition. Valeurs reportées par les auteurs aux taux d'incorporation jugés optimaux.

Lecture critique du Tableau II.1. La quasi-totalité des additions allégeantes engendre une dégradation des performances mécaniques disproportionnée par rapport au gain de masse, particulièrement pour les granulats organiques et synthétiques recyclés. Les rares exceptions concernent la perlite à faible taux de substitution ([46] : -23 % de densité pour seulement -14 % en compression). Ce constat justifie l'intérêt d'une formulation combinant un granulats minéral léger maîtrisé (perlite) et une fibre végétale recyclée à dosage modéré (ouate de cellulose), couplée à un hydrofuge pour préserver la durabilité ; démarche développée dans le présent travail.

II.3. La perlite expansée

II.3.1. Origine et procédé d'expansion

La perlite est une roche volcanique vitreuse d'origine naturelle, appartenant au groupe des silicates amorphes hydratés. Elle se forme par hydratation rapide d'une obsidienne (verre rhyolitique) lors d'un refroidissement brutal de coulées de lave. Sa composition chimique typique est dominée par la silice ($\text{SiO}_2 \approx 70\text{--}75\%$) et l'alumine ($\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 12\text{--}15\%$), avec une teneur en eau de constitution de 2–6 % piégée dans le réseau vitreux [60, 61].

Le procédé d'expansion industriel consiste à chauffer rapidement la perlite brute (broyée et calibrée) à une température comprise entre 900 °C et 1 100 °C dans un four vertical à passage rapide. À cette température, le verre se ramollit ; simultanément, l'eau de constitution se vaporise et provoque une expansion brutale par formation de bulles internes. Le volume des grains augmente ainsi de 4 à 20 fois, et la masse volumique apparente chute typiquement de 1 100 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (perlite brute) à 30–150 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (perlite expansée) [61, 62].

Cette structure alvéolaire, à porosité majoritairement ouverte en surface mais partiellement close en cœur de grain, confère à la perlite expansée un ensemble de propriétés remarquables : très faible masse volumique apparente, faible conductivité thermique, neutralité chimique ($\text{pH} \approx 7$), incombustibilité, stabilité thermique jusqu'à environ 870 °C, et inertie biologique. Elle est inodore, non toxique et non polluante. Sa porosité ouverte explique sa forte capacité d'absorption d'eau (200–450 % en masse) ainsi que sa propriété de support filtrant largement exploitée dans l'industrie agroalimentaire et pharmaceutique.



Figure II.1: Aspect de la perlite expansée commerciale (granulométrie horticole)

II.3.2. Caractéristiques physico-chimiques

La composition chimique typique d'une perlite expansée commerciale est rapportée dans le Tableau II.2.

Tableau II-2: Composition chimique typique de la perlite expansée [60, 61].

Oxyde	Teneur (% massique)
SiO ₂	73,20
Al ₂ O ₃	13,50
Fe ₂ O ₃	1,20
CaO	0,65
MgO	0,30
K ₂ O	3,90
Na ₂ O	3,35
TiO ₂	0,06
H ₂ O (constitution)	2,50
Perte au feu	≈ 1,21

Les propriétés physiques moyennes de la perlite expansée commerciale (granulométrie fine) sont rassemblées dans le Tableau II.3.

Tableau II-3: Propriétés physiques typiques de la perlite expansée commerciale [61, 62].

Propriété	Valeur typique	Unité
Couleur	blanche à gris clair	—

Propriété	Valeur typique	Unité
Indice de blancheur	78	%
Indice de réfraction	1,484	—
Masse volumique absolue ρ_{abs}	$\approx 2\,300$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Masse volumique apparente d'un grain $\rho_{\text{app, grain}}$	100–250	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Masse volumique en vrac ρ_{vrac} (foisonnée)	65–150	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Conductivité thermique λ (à 20 °C, sec)	0,040–0,060	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Capacité d'absorption d'eau	200–450	% en masse
Capacité d'absorption d'huile	≈ 275	% en masse
Humidité résiduelle	< 1	%
pH (ASTM D-1208)	6,5–8,5	—
Limite supérieure de service en température	≈ 870	°C
Dureté Mohs	5,5	—

Note importante. Trois échelles de masse volumique doivent être distinguées : (i) la masse volumique absolue ρ_{abs} ($\approx 2\,300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) qui correspond au verre dense constitutif des parois cellulaires et n'intervient que dans les calculs de porosité interne et de loi des mélanges au niveau microscopique ; (ii) la masse volumique apparente d'un grain $\rho_{\text{app, grain}}$ ($\approx 100\text{--}250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) qui inclut la porosité intra-granulaire et caractérise le grain individuel ; (iii) la masse volumique en vrac ρ_{vrac} ($\approx 65\text{--}150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) qui inclut

en outre la porosité inter-granulaire et qui est la grandeur effectivement mesurée à la pesée d'un sac. Pour un dimensionnement volumétrique de formulation, c'est ρ_{vrac} qui doit être utilisée. Cette distinction est essentielle pour éviter des erreurs de formulation d'un facteur 15 à 25 dans la conversion masse $\leftrightarrow$ volume.

II.3.3. Granulométries commerciales et applications

La perlite expansée est commercialisée selon plusieurs classes granulométriques adaptées aux différents usages :

- **perlite fine** (0–2 mm) : granulat léger pour mortiers et bétons d'isolation, charge de plaques de plâtre, charges absorbantes ;
- **perlite médium** (1–3 mm) : isolation thermique de toitures, remplissage de cavités, applications industrielles diverses ;
- **perlite horticole** (2–5 mm) : substrat de culture, amendement pour sols, drainage horticole.

Les principaux domaines d'utilisation industrielle de la perlite expansée sont :

- granulat léger en construction (mortiers, bétons, plâtres allégés, plaques techniques) ;
- isolation thermique et acoustique de bâtiments ;
- filtration industrielle (boissons, huiles, produits pharmaceutiques) ;
- agent de remplissage et support catalytique ;
- traitement de puits de pétrole (cimentation thermique) ;
- horticulture, agronomie et litière animale.

II.3.4. Comportement de la perlite dans les composites de plâtre

L'incorporation de perlite expansée dans une matrice plâtre génère trois effets principaux : (i) réduction de la masse volumique apparente du composite ; (ii) diminution de la conductivité thermique, par dilution de la matrice par un granulat très peu conducteur ($\lambda_{\text{perlite}} \approx 0,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ; (iii) modification du comportement rhéologique à l'état frais et des résistances mécaniques.

L'enjeu critique est l'absorption d'eau de la perlite : sa structure cellulaire ouverte (en surface) absorbe entre 200 % et 450 % de sa masse en eau, ce qui modifie significativement le rapport E/P effectif accessible à l'hydratation de la matrice plâtre. Sans pré-saturation des

grains de perlite avant gâchage, une partie de l'eau de gâchage est captée par les granulats, ce qui (a) augmente la consistance apparente du mélange, (b) réduit l'eau disponible pour l'hydratation, (c) peut générer une hétérogénéité d'hydratation entre la pâte de cœur et l'interface pâte/granulat (zone de transition interfaciale, ITZ).

La compatibilité chimique perlite/plâtre est en revanche excellente : la perlite est inerte vis-à-vis du sulfate de calcium et ne perturbe pas la cinétique d'hydratation. C'est ce couplage faible λ + inertie chimique + stabilité thermique qui justifie son emploi prioritaire dans les composites plâtre destinés à l'isolation.

II.4. La ouate de cellulose

II.4.1. Origine et procédé de fabrication

La ouate de cellulose (OC), parfois désignée par son équivalent anglais cellulose insulation ou cellulose wadding, est un isolant thermique et acoustique d'origine renouvelable, obtenu par broyage et défibrage de papier journal recyclé. Le procédé industriel comporte typiquement les étapes suivantes : (i) tri et nettoyage de la matière première (papier journal post-consommation), (ii) déchiquetage en fragments grossiers, (iii) broyage et défibrage mécanique successifs jusqu'à l'obtention d'une fibre courte, légère et duveteuse, (iv) imprégnation par des sels minéraux ignifuges (typiquement borate et acide borique, parfois sulfate d'ammonium) à hauteur de 8–20 % en masse, (v) conditionnement en sacs ou balles compactées [64, 65].

Le bilan environnemental de la ouate de cellulose est favorable : énergie grise faible ($\approx 6\text{--}25 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ contre $250\text{--}500 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ pour la laine de verre), bilan carbone négatif sur le cycle de vie en raison du carbone biogénique stocké dans la cellulose, et valorisation d'un flux de déchet (papier journal) sans concurrence avec les usages alimentaires.

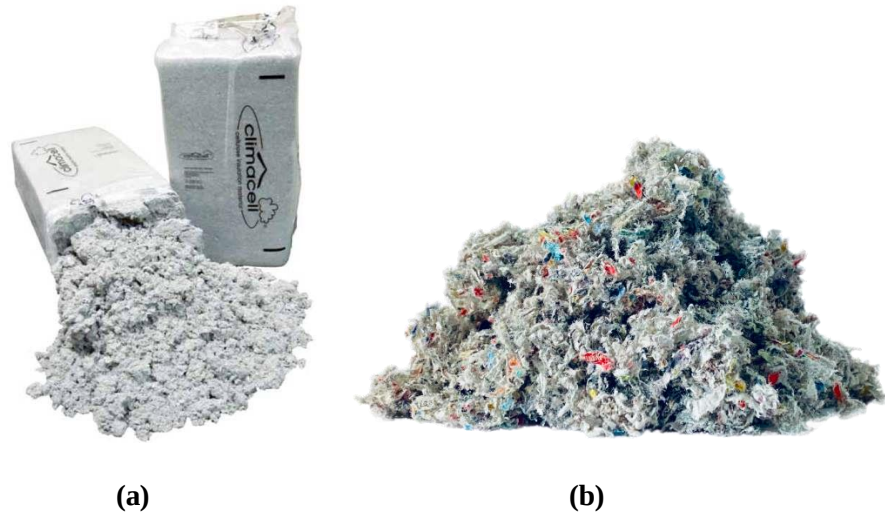


Figure II.2: Aspect macroscopique de la ouate de cellulose : (a) compactée en sac ; (b) émiettée après défibrage ;

II.4.2. Caractéristiques physico-chimiques

La ouate de cellulose se présente sous forme d'un enchevêtrement lâche de fibres aplaties dont le diamètre, observable au microscope électronique à balayage (MEB), est compris entre 15 et 45 μm , pour des longueurs typiquement de 1 à 5 mm après défibrage industriel. Les principales caractéristiques physiques sont rassemblées dans le Tableau II.4.

Tableau II-4: Propriétés physiques typiques de la ouate de cellulose [64, 65, 66].

Propriété	Valeur typique	Unité
Composition principale	fibres cellulosiques (cellulose, lignine, hémicelluloses) issues de papier journal recyclé, avec résidus d'encre et charges minérales (kaolin, CaCO_3)	—
Adjuvants ignifuges (borate de sodium, acide borique, sulfate d'ammonium)	8–20	% massique
Diamètre moyen des fibres	15–45	μm
Longueur des fibres	1–5	Mm
Masse volumique absolue ρ_{abs} (matière cellulosique)	$\approx 1\,200\text{--}1\,500$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Masse volumique apparente ρ_{app} (vrac, soufflé)	30–60	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Propriété	Valeur typique	Unité
Masse volumique apparente ρ_{app} (insufflé / compacté)	60–80	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Conductivité thermique λ	0,038–0,042	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Capacité thermique massique c_p	1 800–2 100	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Capacité d'absorption d'eau (saturation)	400–700	% en masse
Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur μ	1,5–3	—
pH	7,5–9,5	—
Réaction au feu (avec traitement borate)	classe B–C (EN 13501-1)	—

II.4.3. Traitement ignifuge au borate

La cellulose étant un polymère naturel combustible, son emploi en isolation thermique impose un traitement ignifuge. Le système borate (mélange typique de borate de sodium $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ et d'acide borique H_3BO_3 , parfois associé à du sulfate d'ammonium) est largement utilisé en raison de :

- son efficacité ignifugeante, qui résulte de trois mécanismes complémentaires : (a) endothermicité de la déshydratation du borate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ perd ≈ 47 % de sa masse en eau entre 60 et 200 °C, ce qui consomme l'énergie d'inflammation et abaisse la température locale) ; (b) dilution des gaz de pyrolyse combustibles par la vapeur d'eau libérée ; (c) formation, à plus haute température ($T > 350$ °C), d'une couche vitreuse fondue qui isole la fibre de l'oxygène et bloque la propagation de la flamme ;
- son action biocide (résistance aux moisissures et aux insectes lignivores) ;
- sa répulsivité vis-à-vis des rongeurs ;
- sa stabilité chimique sur le long terme (sels minéraux non volatils, contrairement à certains retardateurs organohalogénés).

Le dosage typique en sels de bore représente 8–20 % de la masse de cellulose. À ces taux, le matériau atteint généralement la classe de réaction au feu B–C, s1–s2, d0 selon EN

13501-1 (combustibilité limitée, faible production de fumée, absence de gouttelettes enflammées) ; les ouates certifiées ACERMI sont typiquement classées B-s2,d0. Une attention doit cependant être portée à l'éventuelle migration des sels de bore en présence d'humidité élevée prolongée [65].

II.4.4. Applications dans les composites plâtre et mortiers

Bien que principalement utilisée en isolation par soufflage en combles ou en injection en murs creux, la ouate de cellulose est de plus en plus étudiée comme renfort fibreux et charge légère dans les matrices minérales (ciment, plâtre, chaux). Les principaux effets attendus sont :

- **(i) renforcement mécanique partiel** par effet de pontage des fissures (fiber bridging) à faible taux d'incorporation ;
- **(ii) réduction de la masse volumique** par effet de dilution avec un constituant à très faible ρ_{app} ;
- **(iii) amélioration du comportement hygrothermique** par augmentation de la capacité tampon hygroscopique du composite (cellulose : matériau fortement hygroscopique, capable d'amortir les variations d'humidité ambiante) [67] ;
- **(iv) réduction de la conductivité thermique** du composite, la cellulose ayant $\lambda \approx 0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ contre 0,18–0,56 pour le plâtre seul.

Les contreparties à maîtriser sont : (a) la forte demande en eau de gâchage, due à l'absorption élevée des fibres (400–700 % en masse), qui impose soit une pré-saturation soit un ajustement du E/P ; (b) la sensibilité résiduelle à l'humidité prolongée (gonflement, migration éventuelle des sels de bore) ; (c) le risque de défibrage incomplet conduisant à des amas de fibres et à des défauts de mise en œuvre ; (d) la compatibilité chimique borate/plâtre, généralement bonne, mais à confirmer pour les hauts dosages.

II.5. Adjuvants utilisés dans les mortiers de plâtre

II.5.1. Classification générale

Les adjuvants employés dans les mortiers de plâtre se classent selon leur fonction principale en quatre familles : (i) modificateurs de prise (retardateurs et accélérateurs) ; (ii) plastifiants et superplastifiants (modificateurs rhéologiques) ; (iii) hydrofuges et

imperméabilisants (réduction de l'absorption capillaire) ; (iv) agents d'entraînement d'air et agents moussants (réduction de masse volumique). Les dosages typiques sont compris entre 0,1 % et 3 % de la masse de plâtre.

II.5.2. Modificateurs de prise

La prise du plâtre étant rapide (15–35 min selon la variété de semi-hydrate), elle est souvent ajustée pour les besoins de mise en œuvre. Les retardateurs usuels comprennent les protéines hydrolysées (kératine, gélatine), les acides organiques (citrique, tartrique), les phosphates et les sels d'acide borique. Les accélérateurs sont principalement le sulfate de potassium K_2SO_4 et l'alun $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, qui agissent comme germes de cristallisation du dihydrate.

II.5.3. Plastifiants et modificateurs rhéologiques

Les plastifiants ont pour fonction principale de modifier les caractéristiques rhéologiques de la pâte fraîche. On leur reconnaît trois actions complémentaires : (i) réduire la demande en eau à ouvrabilité constante, ce qui se traduit, à teneur en plâtre fixée, par une augmentation des résistances mécaniques selon la relation générale liant porosité capillaire et performances ; (ii) augmenter l'ouvrabilité à E/P constant, ce qui facilite la mise en œuvre par projection ou coulage ; (iii) stabiliser la rhéologie sur la durée d'ouvrabilité, par contrôle du ressuage, de la viscosité et de la thixotropie.

Trois familles principales d'adjuvants rhéologiques sont employées dans le composite plâtre :

(a) Éthers cellulose : méthyl cellulose (MC), hydroxyéthylcellulose (HEC), hydroxypropylméthylcellulose (HPMC), méthyl hydroxyéthylcellulose (MHEC). Plus rigoureusement classés comme rétenteurs d'eau et épaississants que comme plastifiants stricto sensu, ils agissent par formation d'un réseau hydro colloïdal qui retient l'eau de gâchage et empêche le ressuage. Leur dosage typique est compris entre 0,1 % et 0,5 % de la masse de liant. Ils sont particulièrement utiles pour les enduits projetés, les colles à carrelage et les mortiers minces à matrice plâtrée.

(b) Amidons modifiés et polysaccharides associatifs : utilisés comme épaississants thixotropes et stabilisants. Effet plastifiant marginal, mais stabilisation rhéologique notable aux faibles vitesses de cisaillement, utile pour limiter l'affaissement après projection.

(c) Super plastifiants poly carboxylates (PCE) : copolymères peigne à chaîne principale anionique (acide acrylique ou méthacrylique) et chaînes latérales polyéthylène glycol (PEG). Le mécanisme d'action combine adsorption électrostatique de la chaîne principale sur les particules de plâtre et répulsion stérique par les chaînes latérales hydrophiles. Dans les matrices cimentaires, la réduction d'eau accessible atteint typiquement 20–35 %, contre 8–15 % pour les réducteurs d'eau classiques (lignosulfonates, polynaphtalène-sulfonate). Toutefois, l'efficacité des PCE dans les matrices sulfato-calciques reste sensiblement inférieure (réduction d'eau effective de 10–20 % seulement), en raison de la chimie ionique différente ($\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ vs $\text{Ca}^{2+}/\text{OH}^-$) et du caractère neutre du milieu ($\text{pH} \approx 6,5$ – $7,5$ vs $\approx 12,5$ pour le ciment) qui modifie l'équilibre d'adsorption.

L'emploi de plastifiants impose deux précautions spécifiques au plâtre. D'une part, ces adjuvants peuvent allonger significativement le temps de prise par retardement de la nucléation du dihydrate, effet désirable pour la mise en œuvre mais à compenser éventuellement par un accélérateur (K_2SO_4) lorsque la cinétique de durcissement devient pénalisante en série. D'autre part, certains PCE entraînent involontairement de l'air, ce qui peut générer une porosité fermée additionnelle néfaste aux résistances ; un agent anti-moussant est alors associé.

À E/P réduit de 0,1 à 0,2 grâce à un plastifiant, les résistances mécaniques peuvent augmenter de 30 à 60 % par rapport à un mortier non adjuvanté à E/P initial, conformément aux relations établies entre porosité capillaire et résistance dans les matériaux à matrice hydraulique [14, 17].

II.5.4. Hydrofuges silicones

II.5.4.1. Vulnérabilité du plâtre à l'eau et nécessité d'hydrofuger

Le plâtre durci présente une vulnérabilité intrinsèque à l'eau, due à deux phénomènes couplés. D'une part, sa porosité capillaire élevée (40–60 % à E/P usuel) constitue un réseau d'aspiration capillaire actif. D'autre part, le gypse présente une solubilité non négligeable dans l'eau ($\approx 2,1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ à 20°C , soit 0,21 % en masse), à comparer aux $\approx 0,02 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou aux solubilités sub-ppm des C-S-H. L'exposition prolongée à l'humidité entraîne donc à la fois une absorption capillaire massive (jusqu'à 30–50 % en masse pour un plâtre courant) et une dissolution lente du dihydrate, accompagnée d'une migration des sels solubles vers les surfaces évaporantes (efflorescences). La perte de résistance mécanique entre l'état sec et l'état saturé peut atteindre un facteur 2 à 3 [17, 18].

Dans le contexte algérien, où l'humidité relative annuelle moyenne atteint 65–80 % sur le littoral et présente une forte amplitude saisonnière à l'intérieur (alternance hiver humide / été sec), l'emploi d'un agent hydrofuge devient un levier essentiel pour étendre le domaine d'application des composites plâtre, notamment sur les parois exposées.

II.5.4.2. Familles de silicones hydrofuges

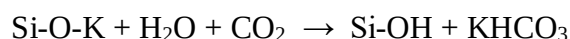
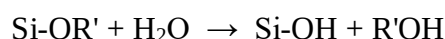
Les agents silicones utilisés en hydrofugation des matériaux minéraux se classent en quatre familles principales selon le degré de polymérisation et la chimie des groupements actifs :

- **Silanes monomères** $R-Si(OR')_3$, où R est un groupement alkyle hydrophobe (méthyle, octyle, isobutyle) et OR' un groupement hydrolysable (méthoxy, éthoxy). Leur faible masse moléculaire favorise une pénétration profonde dans les substrats poreux et un greffage covalent intime sur la paroi des pores.
- **Siloxanes oligomères** : produits de pré-condensation partielle des silanes, de masse moléculaire intermédiaire, offrant un compromis pénétration / efficacité de surface.
- **Siliconates alcalins** $R-Si(OH)_2-OM$ ($M = Na, K$) : forme soluble en milieu aqueux, économique, largement utilisée comme adjuvant intégral. Le méthylsiliconate de potassium $CH_3-Si(OH)_2-OK$ est le produit phare de cette famille pour l'hydrofugation de masse des plâtres et mortiers.
- **Résines silicones et polysiloxanes** : typiquement le polyméthylhydrogénosiloxane (PMHS) et les méthylsilicones MQ, souvent commercialisés sous forme de poudres redispersibles obtenues par séchage par atomisation de microémulsions sur support minéral. Cette forme est privilégiée pour les mortiers prédosés en sec.

II.5.4.3. Mécanisme d'action en trois étapes

L'hydrophobisation par silicones procède selon trois réactions consécutives [69] :

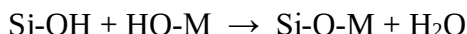
(1) **Hydrolyse** des groupements hydrolysables (alcoxy ou siliconates) en silanols $Si-OH$ par réaction avec l'eau de gâchage ou l'humidité résiduelle :



(2) **Condensation** des silanols entre eux pour former le réseau Si-O-Si du film hydrophobe :



(3) **Greffage covalent** sur les sites hydroxylés du substrat (groupements M-OH des cristaux de gypse, de la silice du sable, des oxydes de la perlite) :



Le film final est une mono- ou multicouche de polysiloxanes orientée : les liaisons Si-O-Si forment l'ossature ancrée au substrat, et les groupements alkyles hydrophobes (typiquement -CH₃) sont orientés vers la lumière du pore. Cette orientation confère à la paroi de pore un caractère hydrophobe sans en obstruer la section : la porosité totale et la perméabilité à la vapeur d'eau restent inchangées, seul l'angle de contact eau/paroi est modifié.

II.5.4.4. Hydrofugation de masse vs hydrofugation de surface

Deux modes d'application sont possibles pour les hydrofuges silicones :

- **Hydrofugation de surface** : application post-durcissement par badigeonnage, pulvérisation ou trempage. L'agent silicone pénètre sur 1 à 10 mm de profondeur selon la porosité du substrat et la viscosité du produit. Avantage : compatibilité avec tout substrat existant (rénovation, restauration patrimoniale). Inconvénient : durabilité limitée (5–15 ans), pénétration partielle, ré-applications nécessaires, et inefficacité dès qu'une fissuration ultérieure expose une surface non traitée.
- **Hydrofugation de masse (ou intégrale)** : incorporation de l'agent silicone, le plus souvent en poudre redispersible ou en siliconate liquide, directement dans le mélange de gâchage. L'agent est ainsi distribué dans tout le volume du composite, et la capacité hydrofuge est maintenue sur la totalité de la durée de vie du matériau, y compris après fissuration. C'est l'approche adoptée dans le présent travail.

II.5.4.5. Spécificité de l'interaction avec une matrice plâtre

Le pH d'une pâte de plâtre fraîche est proche de la neutralité ($\approx 6,5-7,5$), à comparer au $\text{pH} \approx 12,5$ d'une pâte de ciment Portland. Cette différence est globalement favorable aux silicones. D'une part, les liaisons Si-O-C des silanes alcoxy sont stables en milieu neutre alors qu'elles s'hydrolysent rapidement en milieu fortement alcalin. D'autre part, les siliconates ne

précipitent pas instantanément comme dans les milieux à $\text{pH} > 11$: la cinétique de dépôt est mieux contrôlée et la distribution finale de la silicone dans la microstructure plus homogène.

Toutefois, la présence d'ions Ca^{2+} en solution (issus de la dissolution partielle du dihydrate en cours d'hydratation, concentration $\approx 15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) entraîne une réaction parallèle de formation de méthylsiliconates de calcium peu solubles, qui précipitent et se fixent à la paroi des pores. Cette précipitation in situ est globalement bénéfique : elle « *fige* » l'agent hydrofuge dans la microstructure dès la prise et garantit l'ancrage du film. Elle impose cependant un dosage suffisant pour compenser la fraction immobilisée par cette voie avant qu'elle n'ait pu se déposer en monocouche orientée sur la paroi du pore.

II.5.4.6. Indicateurs de performance et dosages

L'efficacité d'une hydrofuge silicone dans un mortier de plâtre se quantifie par trois indicateurs principaux :

- le **coefficient d'absorption d'eau capillaire** W (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$), mesuré selon EN 1015-18 sur mortier durci ou EN ISO 15148 sur élément massif : un mortier non hydrofugé présente typiquement $W \approx 1\text{--}4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$, alors qu'un mortier hydrofugé efficace doit atteindre $W < 0,5$, voire $W < 0,1$;
- le **taux d'absorption d'eau par immersion** (NF EN 13755), qui doit être réduit d'un facteur 5 à 10 par l'hydrofuge ;
- l'**angle de contact apparent** mesuré par goutte sessile, qui doit dépasser 100° pour qu'un effet « *perlant* » macroscopique soit observable.

Les dosages typiques d'hydrofuge silicone dans les mortiers de plâtre sont de 0,5 % à 2 % en masse de plâtre pour les poudres PMHS, et de 0,3 % à 1,5 % de matière active pour les siliconates liquides. Lanzón et García-Ruiz [69] ont montré que l'incorporation de silicones en poudre dans les enduits permet de réduire l'absorption capillaire d'un facteur 5 à 10 sans dégradation significative des résistances mécaniques, à condition que le dosage reste inférieur à 2 %. Au-delà de ce seuil, on observe en revanche une chute des résistances par effet plastifiant excessif et entraînement d'air parasite.

II.6. Synthèse et positionnement de l'étude

L'analyse bibliographique conduite dans ce chapitre permet de tirer les conclusions suivantes pour le positionnement du présent travail :

- **(i) Le compromis isolation thermique / résistance mécanique est l'enjeu central des composites plâtre allégés.** La quasi-totalité des additions allégeantes recensées dans le Tableau II.1 entraînent une dégradation des résistances disproportionnée par rapport au gain de masse, à l'exception notable de la perlite à taux modéré ([46] : -23 % de densité pour -14 % en compression) ;
- **(ii) La perlite expansée est le granulât léger minéral le plus prometteur** pour le plâtre, en raison de sa très faible conductivité thermique ($\lambda \approx 0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), de son inertie chimique vis-à-vis du sulfate de calcium, et de sa stabilité thermique élevée. Son point critique reste sa capacité d'absorption d'eau (200–450 %), qui exige soit une pré-saturation, soit une compensation par ajustement du E/P ;
- **(iii) La ouate de cellulose recyclée constitue un complément intéressant** comme fibre lignocellulosique courte : effet de pontage à la fissuration, amélioration de la régulation hygroscopique, valorisation d'un déchet (papier journal post-consommation) et bilan carbone favorable. Son comportement dans les matrices plâtre reste insuffisamment caractérisé, particulièrement à dosage modéré (< 2 % massique) ;
- **(iv) Un agent hydrofuge est indispensable** pour préserver la durabilité du composite face à l'humidité, particulièrement dans le contexte algérien (variations hygrothermiques saisonnières marquées). L'hydrofugation de masse par silicones, par modification de l'angle de contact aux parois des pores sans obstruction du réseau capillaire, offre le meilleur compromis hydrophobicité/perméabilité à la vapeur tout en garantissant une protection durable y compris après fissuration éventuelle.

Sur cette base, la formulation étudiée dans le présent mémoire combine donc plâtre + sable + perlite expansée + ouate de cellulose + hydrofuge silicone, optimisée par plan d'expériences de type Box–Behnken (BBD) à trois facteurs. Les chapitres suivants présentent successivement les matériaux et méthodes expérimentales (Chapitre III), les résultats de caractérisation physique et mécanique (Chapitre IV), et l'analyse statistique multivariée des réponses (Chapitre V).

II.7. Conclusion

La revue bibliographique conduite dans ce chapitre a permis d'identifier les principales voies d'amélioration des composites de plâtre par incorporation d'additions, et de positionner les trois constituants retenus pour le présent travail. La perlite expansée se distingue comme le granulat léger minéral offrant le meilleur compromis isolation thermique / résistance mécanique, grâce à sa très faible conductivité ($\lambda \approx 0,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et à son inertie chimique vis-à-vis du sulfate de calcium. La ouate de cellulose recyclée apporte simultanément un effet de pontage à la fissuration, un complément d'allègement et une régulation hygroscopique du composite, tout en valorisant un déchet (papier journal post-consommation). L'incorporation d'un hydrofuge silicone en hydrofugation de masse répond enfin à la vulnérabilité intrinsèque du plâtre à l'humidité, particulièrement critique dans le climat algérien.

Chapitre III

Matériaux et méthodes expérimentales

III.1. Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des matériaux retenus pour la confection des composites de plâtre étudiés dans ce mémoire, leurs caractéristiques physiques et chimiques mesurées en laboratoire, ainsi que les méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation physico-mécanique. Il décrit ensuite la procédure de formulation.

III.2. Matériaux utilisés

La formulation étudiée fait intervenir six constituants : un liant (plâtre), une charge granulaire de référence (sable de dune), un granulat léger de substitution (perlite expansée), une fibre lignocellulosique (ouate de cellulose), une hydrofuge silicone (Sika Liquide) et de l'eau de gâchage. Chaque constituant fait l'objet d'une description détaillée dans les sous-sections suivantes.

III.2.1. Plâtre

III.2.1.1. Origine et procédé

Le plâtre utilisé provient des gisements de gypse d'El-Adjiba (wilaya de Bouira, Algérie) et est commercialisé par la société S.P.A COLPA ; Manhar Gypse sous la dénomination de plâtre à séchage rapide. Conforme aux normes européennes applicables aux plâtres de moulage, il est principalement destiné à la fabrication d'éléments en staff (corniches, rosaces, moulures décoratives) et au gâchage manuel.



Figure III.1 : Plâtre COLPA utilisé dans cette étude

III.2.1.2. Caractéristiques chimiques

L'analyse chimique du plâtre, effectuée par fluorescence X, est rapportée dans le Tableau III.1. La somme des oxydes majeurs ($\text{CaO} + \text{SO}_3 = 71,85\%$) traduit la prédominance du sulfate de calcium dans la composition. La perte au feu ($23,22\%$) correspond essentiellement à la déshydratation résiduelle et à la décarbonatation des impuretés calcaires.

Tableau III-0-1: Composition chimique du plâtre COLPA (analyse par FX, % massique).

Oxyde	Teneur (% massique)
SiO_2	0,80
Al_2O_3	0,29
Fe_2O_3	0,16
CaO	34,05
MgO	2,56
SO_3	37,80
Na_2O	0,09
K_2O	0,05

Oxyde	Teneur (% massique)
P ₂ O ₅	0,01
TiO ₂	0,01
Perte au feu (PF)	23,22

III.2.1.3. Caractéristiques physiques

Masse volumique absolue : déterminée selon la norme NF P 18-555 à l'aide d'un densimètre de Le Chatelier de 100 cm³, par mesure du déplacement de niveau d'éthanol après introduction d'une masse connue de plâtre sec. Elle est définie par :

$$\rho_{abs} = (M_2 - M_1) / (V_2 - V_1)$$

Où M₁ est la masse du densimètre rempli d'éthanol jusqu'au trait V₁ ; M₂ la masse après ajout du plâtre, le niveau d'éthanol étant remonté à V₂. Trois mesures ont été effectuées et moyennées.

Valeur retenue : $\rho_{abs} \approx 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, cohérente avec les valeurs typiquement rapportées dans la littérature pour le semi-hydrate β ($2,63 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, cf. Chapitre I, Tab. I.2). Le léger déficit s'explique par la présence d'impuretés carbonatées identifiées en analyse chimique.

III.2.1.4. Caractéristiques techniques

Les caractéristiques figurant sur la fiche technique du fournisseur sont rapportées dans le Tableau III.2.

Tableau III-0-2: Fiche technique du plâtre COLPA.

Paramètre	Valeur
Rapport de gâchage E/P (consistance saturée)	$\approx 1,33$
Début de prise	1–2 min
Fin de prise	3–4 min

Paramètre	Valeur
Masse volumique apparente (vrac)	650–750 kg·m ⁻³
Dureté superficielle Shore C	80
Refus tamis 100 µm	≤ 20 %
Refus tamis 200 µm	≤ 10 %

III.2.2. Sable de dune

Les zones méridionales de l'Algérie disposent de réserves importantes de sable de dune, ressource largement sous-exploitée dans la construction. La valorisation de ce gisement local s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et de réduction de l'empreinte carbone des matériaux de construction. Le sable utilisé dans cette étude est extrait de la partie méridionale de la wilaya d'El Oued (Oued Souf).

III.2.2.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique réalisée par tamisage sec selon NF EN 933-1 (Figure III.2) montre que le sable d'Oued Souf appartient à la classe granulaire 0/0,63 mm, avec une distribution continue et resserrée caractéristique des sables éoliens. La valeur d'équivalent de sable, acceptable, atteste de l'absence de fines argileuses ou de matières organiques. Selon les recommandations du C.N.E.R.I.B [3], ce sable convient à la confection de mortiers et bétons de plâtre.

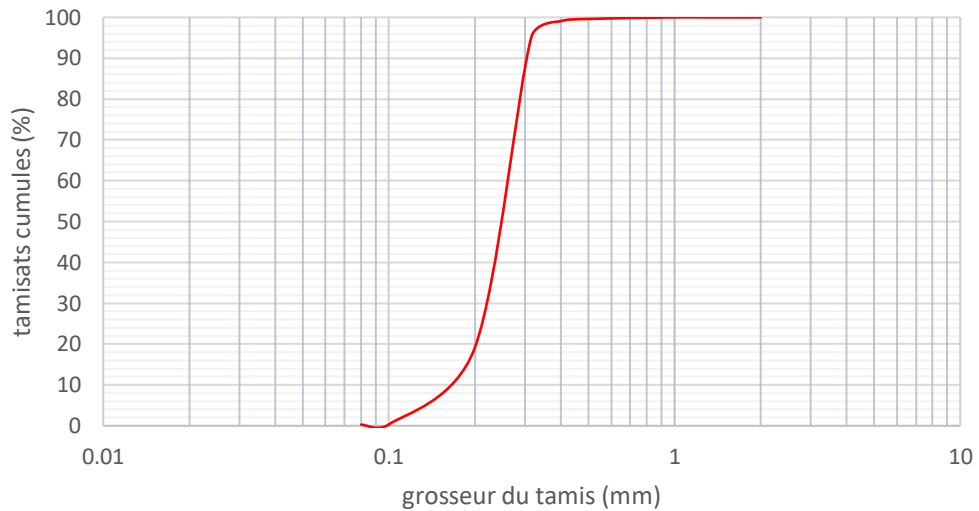


Figure III.2: Courbe granulométrique du sable de dune d'Oued Souf

III.2.2.2. Propriétés physiques

Tableau III-0-3: Propriétés physiques du sable de dune d'Oued Souf.

La masse volumique apparente (kg/m ³)	La masse volumique absolue (kg/m ³)	Compacité (%)	Porosité (%)	Module de finesse	Équivalent de sable $E_{SV}(\%)$	Équivalent de sable $E_{SP}(\%)$
1463.3	2448.5	64,1	35,9	1,35	64.69	62.64

III.2.3. Perlite expansée

La perlite expansée utilisée est fabriquée par l'établissement TOUAB (Algérie). Elle se présente sous forme d'une poudre blanche très légère, à granulométrie fine, dont les principales caractéristiques (origine, structure, mécanisme d'expansion) ont été détaillées au Chapitre II (II.3). Ses excellentes propriétés d'isolation thermique ($\lambda \approx 0,04\text{--}0,06 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et son inertie chimique vis-à-vis du sulfate de calcium en font un granulat de substitution adapté au mortier de plâtre.



Figure III.3: Perlite expansée TOUAB : (a) aspect en vrac

III.2.3.1. Caractéristiques techniques

Tableau III-0-4: Caractéristiques techniques de la perlite expansée TOUAB.

La masse volumique apparente (kg/m^3)	La masse volumique absolue (kg/m^3)	Couleur	pH	SiO_2 (%)
50–80	≈ 100	blanc / gris-blanc	7–9	60–80

III.2.4. Ouate de cellulose

La ouate de cellulose (OC) utilisée est obtenue par défibrage et broyage mécanique de papier journal recyclé post-consommation, suivie d'une imprégnation par des sels minéraux ignifuges à base de borate de sodium et d'acide borique ($\approx 8\text{--}15\%$ en masse). Ce traitement confère au matériau une bonne tenue au feu et une protection contre les champignons et les rongeurs. Les caractéristiques générales de la OC ont été détaillées au Chapitre II (§ II.4) ; les principales valeurs retenues pour la formulation sont rappelées dans le Tableau III.5.



Figure III.5 : Ouate de cellulose utilisée

Tableau III-0-5: Caractéristiques de la ouate de cellulose utilisée.

Caractéristique	Valeur typique	Unité
Origine	papier journal recyclé	—
Adjuvant ignifuge (borate, acide borique)	8–15	% massique
Diamètre moyen des fibres	15–45	μm
Longueur des fibres après défibrage	1–5	mm
Masse volumique apparente ρ_{app} (vrac)	30–60	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Conductivité thermique λ	0,038–0,042	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Capacité d'absorption d'eau (saturation)	400–700	% en masse
Réaction au feu (avec borate)	B–C, s1–s2, d0	EN 13501-1

III.2.5. Hydrofuge

L'hydrofuge utilisé est le Sika Liquide Hydrofuge, adjuvant liquide commercial de couleur blanche laiteuse, conçu pour l'incorporation directe dans le mélange de gâchage des bétons et mortiers (hydrofugation de masse). Conformément au mécanisme exposé au Chapitre II (§ II.5.4), cet hydrofuge agit par modification de l'angle de contact aux parois des pores du

composite, sans obstruction du réseau capillaire, ce qui préserve la perméabilité à la vapeur d'eau tout en limitant l'absorption d'eau liquide.

Le produit est certifié sans chlore et n'altère pas significativement la prise du mortier de plâtre dans la plage de dosage retenue (1–2 % en masse de plâtre). Les caractéristiques du produit fournies par le fabricant sont reportées dans le Tableau III.6.



Figure III.6 : Hydrofuge Sika Liquide en bidon commercial

Tableau III-0-6: Caractéristiques de l'hydrofuge Sika Liquide.

Aspect / Couleur	Densité	Teneur en ions Cl ⁻	Équivalent Na ₂ O
liquide blanc laiteux	1,02 ± 0,01	≤ 0,1 %	≤ 2,0 %

III.2.6. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage est l'eau du robinet du réseau de distribution alimentant le laboratoire, utilisée sans traitement particulier. Elle satisfait les prescriptions de la norme NF EN 1008 relative à l'aptitude des eaux de gâchage pour bétons et mortiers (absence de matières organiques, de chlorures et de sulfates en concentrations préjudiciables).

III.3. Techniques de mesure expérimentale

Pour caractériser le comportement physique, mécanique et de durabilité des composites de plâtre étudiés, cinq grandeurs principales ont été mesurées : la masse volumique apparente,

la résistance à la flexion 3 points, la résistance à la compression, la sorptivité capillaire et la stabilité aux cycles d'humidification-séchage. Toutes les mesures ont été réalisées sur éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, au moins en triplicata pour chaque formulation.

III.3.1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est déterminée par la méthode géométrique sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ après séchage à 40°C en étuve jusqu'à masse constante (variation $< 0,1 \%$ entre deux pesées espacées de 24 h). Les dimensions sont mesurées au pied à coulisse au $1/100 \text{ mm}$, et la masse à la balance électronique au $1/100 \text{ g}$. La masse volumique apparente se déduit selon :

$$\rho_{app} = M / (L \times l \times h)$$

Où M est la masse sèche de l'éprouvette, L, l et h ses trois dimensions.

III.3.2. Résistance à la flexion 3 points

L'essai de résistance à la traction par flexion est réalisé conformément à NF EN 196-1 sur une presse automatique Control. Le dispositif de flexion 3 points présente un entre-axe d'appuis de 100 mm . La charge est appliquée à mi-portée à vitesse constante de $50 \pm 10 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ jusqu'à rupture. Trois éprouvettes sont testées par formulation. La résistance à la flexion se calcule selon :

$$R_f = 1,5 \times F_{max} \times l / b^3$$

Où F_{max} est la charge maximale (N), $l = 100 \text{ mm}$ la portée, et $b = 40 \text{ mm}$ le côté de la section carrée. La valeur retenue est la moyenne arithmétique des trois mesures, R_f étant exprimée en MPa.

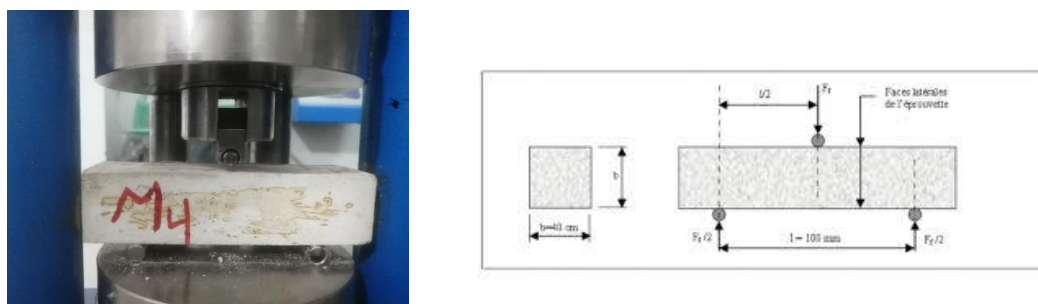


Figure III.7 : Dispositif d'essai de flexion 3 points sur éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

III.3.3. Résistance à la compression

L'essai de compression est réalisé sur les deux demi-prismes issus de l'essai de flexion, conformément à NF EN 196-1, sur la même presse automatique Controls. Chaque demi-prisme est positionné entre deux mors d'écrasement de section $40 \times 40 \text{ mm}^2$. La charge est appliquée à vitesse constante de $2\,400 \pm 200 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ jusqu'à rupture. Six valeurs sont obtenues par formulation (deux demi-prismes par éprouvette $\times$ trois éprouvettes). La résistance à la compression est calculée par :

$$R_c = F_{\max} / S$$

avec $S = 40 \times 40 = 1\,600 \text{ mm}^2$ la section d'écrasement. R_c est exprimée en MPa.

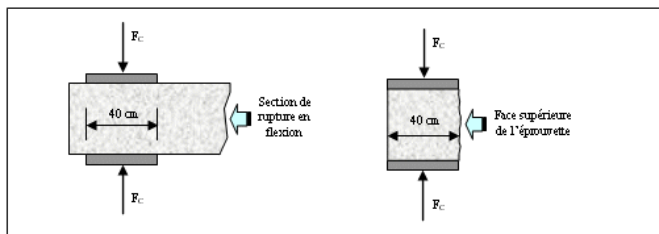


Figure III.8 : Dispositif d'essai de compression sur demi-prisme $40 \times 40 \text{ mm}^2$

III.3.4. Sorptivité capillaire

L'absorption d'eau par capillarité (sorptivité) traduit l'aptitude du composite à pomper l'eau liquide par son réseau capillaire ; elle est un indicateur de la porosité ouverte connectée et un proxy fiable de la durabilité hydrique. La mesure est conduite selon NF EN 1015-18 sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ à 28 jours.

Les éprouvettes sont préalablement séchées à 40°C jusqu'à masse constante (M_0). Les quatre faces latérales sont scellées par un film polymère imperméable, ne laissant accessible que la face inférieure ($4 \times 4 \text{ cm}^2$). L'éprouvette est ensuite placée verticalement, face inférieure en contact avec une lame d'eau de $5 \pm 1 \text{ mm}$ maintenue constante par dispositif à niveau réglé. La masse M_t de l'éprouvette est mesurée à intervalles réguliers (5, 10, 20, 30, 60, 90, 180, 240, 360 min). Le coefficient de sorptivité C s'obtient par régression linéaire :

$$(M_t - M_0) / A = C \times \sqrt{t}$$

où $A = 16 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ est la surface en contact avec l'eau, t le temps cumulé en minutes (ou s), et C le coefficient de sorptivité exprimé en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \square^2$ (ou $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \square^2$). C est déterminé comme la pente de la droite $(M_t - M_0)/A$ vs $\sqrt{t}$.

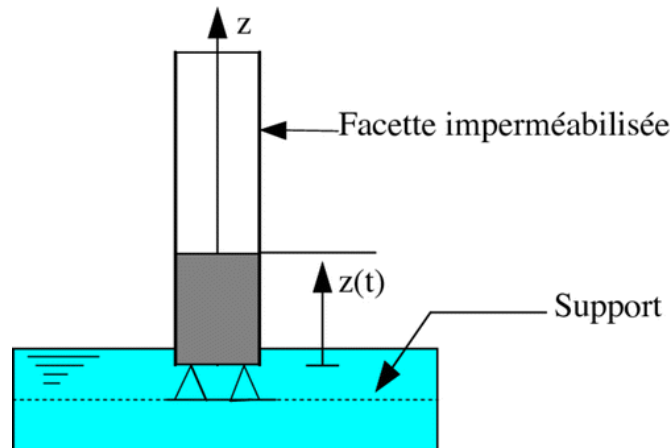


Figure III.9 : Dispositif expérimental d'absorption capillaire selon EN 1015-18

III.3.5. Durabilité : cycles d'humidification et de séchage

L'essai de durabilité aux cycles humidification–séchage (H/S) vise à reproduire en laboratoire les sollicitations thermo-hygriques saisonnières auxquelles sont soumis les enduits et éléments en plâtre exposés en conditions algériennes (alternance hiver humide / été sec). L'objectif est de quantifier l'évolution de la masse et des résistances mécaniques au cours de cycles répétés.

Le protocole appliqué est le suivant :

- préparation des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ et conservation 28 jours en conditions de laboratoire ;
- détermination de la masse de référence M_0 après séchage en étuve à $40 \text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante ;
- application de cycles successifs de 48 h chacun :
 - 24 h en étuve à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (phase de séchage) ;
 - 24 h en chambre humide à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\text{HR} > 95 \%$ (phase d'humidification) ;
- durée totale : 30 jours (≈ 15 cycles) ;
- mesure périodique de la masse $M(t)$;

- essais de résistance à la flexion et à la compression à l'issue de la dernière phase, selon les protocoles décrits aux § III.3.2 et III.3.3.



Figure III.10: Étuve de séchage à 60 °



Figure III.11: Chambre humide à HR > 95 % utilisée



Figure III.12: Éprouvettes en chambre humide pendant la phase d'humidification



Figure III.13: Éprouvettes en étuve pendant la phase de séchage

III.4. Formulation et confection des éprouvettes

la procédure adoptée s'appuie sur les recommandations du C.N.E.R.I.B [3] pour la construction en plâtre, complétées par les pratiques décrites dans la littérature pour le composite plâtre allégé (cf. Chapitre II).

III.4.1. Constituants fixes

Deux paramètres sont maintenus constants dans toutes les formulations :

- **Rapport eau / plâtre** : $E/P = 0,60$ en masse, correspondant à la consistance d'ouvrabilité retenue, supérieure à la valeur stœchiométrique (0,186) pour assurer une mise en œuvre homogène et compenser l'absorption des granulats poreux ;
- **Rapport sable / plâtre de référence** : $S/P = 0,50$ en masse pour la formulation témoin (M0), conforme aux recommandations du C.N.E.R.I.B [3]. Au-delà de $S/P = 0,50$, les recherches antérieures montrent une dégradation des résistances mécaniques.

III.4.2. Constituants variables

Trois constituants varient d'une formulation à l'autre :

- **(i) Perlite expansée** : substitution volumique du sable de dune par de la perlite expansée, à trois niveaux : 0 %, 50 % et 100 % du volume initial de sable .
- **(ii) Ouate de cellulose (OC)** : trois niveaux d'incorporation, en volume de plâtre : 0 , 1% et 2%. soit des taux faibles compatibles avec un effet de pontage à la fissuration sans dégradation excessive de l'ouvrabilité.
- **(iii) Hydrofuge Sika** : trois niveaux d'incorporation, en masse de plâtre : 0 %, 1 % et 2 %. L'hydrofuge est introduit liquide ; la masse de plâtre est ajustée pour préserver la masse totale liant + hydrofuge.

III.4.4. Séquence de gâchage

Pour prévenir la ségrégation due au contraste de masses volumiques entre constituants, la séquence d'introduction dans le malaxeur est la suivante :

- (1) introduire l'eau de gâchage dans la cuve, ainsi que l'hydrofuge liquide pré-mélangé à cette eau ;
- (2) ajouter simultanément le plâtre, le sable, la perlite expansée et la ouate de cellulose , en homogénéisant à la raclette pour limiter l'évaporation et l'envol des fines de perlite ;
- (3) Malaxé 15 s à vitesse moyenne ;
- (4) arrêter le malaxeur, racler les parois et le fond pour ramener au centre toute fraction non incorporée ;
- (5) reprendre le malaxage à vitesse rapide pendant 45 s à 1 min jusqu'à obtention d'une pâte homogène.

III.4.5. Confection et conservation des éprouvettes

La pâte fraîche est immédiatement coulée dans des moules métalliques tri-prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ préalablement huilés. Le coulage s'effectue en trois couches successives, chaque couche étant tassée par 25 coups de truelle puis par chocs latéraux du moule sur la table pour éliminer les bulles d'air piégées et garantir l'homogénéité.

Les moules sont conservés en conditions de laboratoire ($T = 20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 45 \pm 5 \%$) durant les premières 24 heures. Le démoulage est effectué à 24 h, suivi d'une conservation des éprouvettes en conditions de laboratoire jusqu'à 28 jours, échéance retenue pour l'ensemble des essais de caractérisation.



Figure III.14: Confection des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$

III.4.6. Plan expérimental

Afin d'étudier l'influence des paramètres et d'optimiser les propriétés du matériau, un plan d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs a été adopté. Au total, seize (16) formulations ont été préparées : une formulation témoin externe, notée M0 (mortier de plâtre de référence avec sable, sans aucun ajout), et quinze (15) formulations principales (M1 à M15) dictées par la matrice du plan. Ces dernières couvrent l'ensemble des combinaisons des trois facteurs variables étudiés : le taux de substitution de la perlite, le dosage en ouate de cellulose (OC) et la teneur en hydrofuge silicone. Au sein de cette matrice, les formulations M1, M3 et M7 constituent les points centraux répliqués (50 % perlite ; 1 % OC ; 1 % hydrofuge), permettant

ainsi d'estimer la variabilité et l'erreur expérimentale. Le détail des compositions massiques de l'ensemble de ces mélanges est reporté dans le Tableau III.7.

Tableau III-7: Matrice de formulation des seize composites étudiés (M0 à M15).

Mél.	Perlite (% vol. sable)	OC(%)	Hyd. (%)	Plâtre (g)	Eau (g)	Sable (g)	Perlite (g)	OC (g)	Hydro- fuge (g)
M0	0	0	0	1000	600	500	0	0	0
M1	50	1	1	990	600	250	10	4,82	9,9
M2	0	0	1	1000	600	500	0	0	10
M3	50	1	1	990	600	250	10	4,82	9,9
M4	100	1	0	1000	600	0	20	4,82	0
M5	100	1	2	990	600	0	20	4,82	19,8
M6	50	0	2	1000	600	250	10	0	20
M7	50	1	1	990	600	250	10	4,82	9,9
M8	50	0	0	1000	600	250	10	0	0
M9	0	1	0	990	600	500	0	4,82	0
M10	100	0	1	1000	600	0	20	0	10
M11	0	2	1	980	600	500	0	9,64	9,8
M12	50	2	2	980	600	250	10	9,64	19,6
M13	0	1	2	990	600	500	0	4,82	19,8
M14	50	2	0	980	600	250	10	9,64	0
M15	100	2	1	980	600	0	20	9,64	9,8

III.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble des matériaux retenus pour la confection des composites de plâtre étudiés (plâtre COLPA de classe II issu du gisement d'El-Adjiba, sable de dune d'Oued Souf, perlite expansée TOUAB, ouate de cellulose recyclée, hydrofuge Sika Liquide, eau de gâchage du réseau), accompagnés de leurs caractéristiques physico-chimiques. Les techniques expérimentales adoptées pour la caractérisation des éprouvettes durcies à 28 jours ont ensuite été décrites : masse volumique apparente, résistance à la flexion 3 points (NF EN 196-1), résistance à la compression (NF EN 196-1), sorptivité capillaire (NF EN 1015-18) et stabilité aux cycles humidification–séchage. Enfin, la procédure de gâchage et la matrice complète des seize formulations (M0 à M15) ont été présentées en détail.

Les analyses physico-chimiques effectuées sur les matières premières n'ont révélé aucun risque incompatible avec les performances attendues du composite. Le chapitre suivant présente les résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation.

Chapitre IV

Résultats expérimentaux et discussion

IV.1. Introduction

Ce quatrième chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion approfondie des résultats expérimentaux obtenus à 28 jours sur les seize formulations issues de notre plan d'expériences de Box-Behnken. L'objectif principal est d'évaluer l'influence individuelle et combinée de nos trois facteurs (le taux de perlite expansée, le dosage en ouate de cellulose et la teneur en hydrofuge silicone) sur la masse volumique apparente, les résistances mécaniques (flexion et compression), la sorptivité capillaire et la durabilité face aux cycles d'humidification-séchage du mortier de plâtre. Enfin, l'exploitation mathématique de ce modèle de Box-Behnken permettra d'établir les surfaces de réponse et d'identifier la formulation optimale offrant le meilleur compromis entre légèreté, performance mécanique et tenue à l'eau.

IV.2. Masse volumique apparente

IV.2.1. Résultats par formulation

La masse volumique apparente ρ_{app} a été mesurée selon le protocole du § III.3.1, par méthode géométrique sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ séchées à 40°C jusqu'à masse constante. Trois éprouvettes par formulation ont été testées. Les valeurs moyennes à 28 jours de ρ_{app} et des résistances mécaniques sont données dans le Tableau IV.1 et illustrées sur la Figure IV.1

Tableau IV-0-1: Résultats expérimentaux à 28 jours : masse volumique apparente, résistance à la flexion R_f et résistance à la compression R_c des seize formulations.

Mél.	La masse volumique apparente (kg/m^3)	R_f (MPa)	R_c (MPa)
M0	1544	8,09	13,63
M1	1338	7,92	11,64
M2	1493	8,31	13,38
M3	1366	8,01	11,64
M4	1207	8,02	11,96

M5	1165	7,94	10,91
M6	1322	8,58	12,84
M7	1365	7,82	12,64
M8	1395	8,24	12,36
M9	1523	7,92	13,03
M10	1213	8,35	10,56
M11	1452	7,98	9,09
M12	1335	7,94	9,45
M13	1464	8,37	11,70
M14	1358	7,86	10,81
M15	1188	7,45	9,97

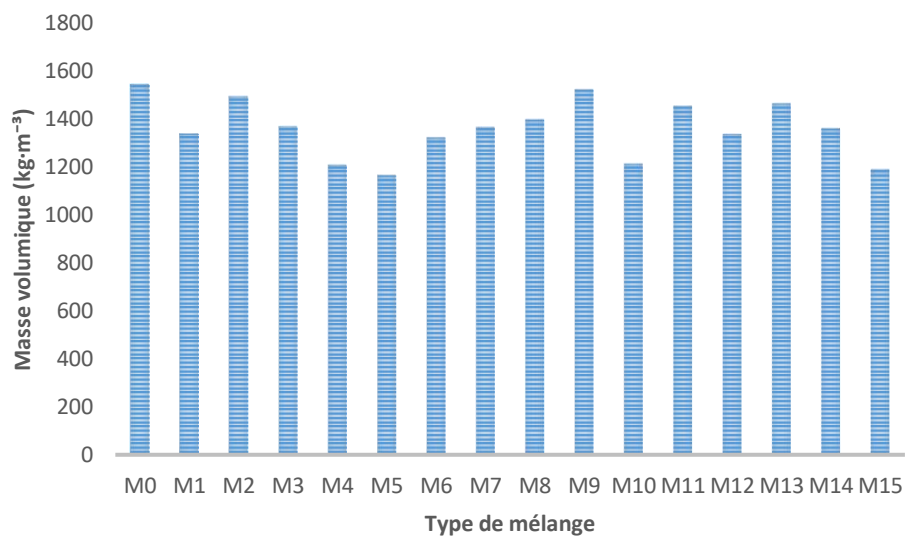


Figure IV.1: Masse volumique apparente des seize formulations à 28 jours.

Les valeurs varient de $1\,165\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (M5, mortier le plus allégé) à $1\,544\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (M0, témoin). L'écart maximal est de $379\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, soit une réduction de 24,5 % par rapport au témoin. La moyenne globale est de $1\,358\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ avec un coefficient de variation de 8,8 %. Cette dispersion s'explique surtout par le taux de perlite expansée incorporé, comme le montre l'analyse par facteur ci-dessous.

La répétabilité expérimentale est estimée à partir des trois formulations centrales identiques (M1, M3, M7). La masse volumique moyenne sur ces trois points est de $1\,356\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, avec un écart-type de $16\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\text{CV} \approx 1,2\%$). Cette faible dispersion montre que le protocole de gâchage et de mise en œuvre est bien maîtrisé.

IV.2.2. Effet des facteurs et discussion

L'analyse par niveau de facteur permet de séparer la contribution de chaque constituant. Le facteur le plus influent est le taux de substitution volumique du sable par la perlite expansée. La masse volumique moyenne passe de $1\,483\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à $\text{PE} = 0\%$ à $1\,193\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à $\text{PE} = 100\%$, soit une réduction de $19,5\%$ attribuable au seul effet de la perlite. Ce comportement s'explique par la grande différence de masse volumique entre la perlite expansée (granulat à structure alvéolaire et à très faible densité) et le sable qu'elle remplace. Le rapport entre les masses volumiques absolues des deux granulats est proche de 25. Chaque pourcent de substitution volumique entraîne donc une réduction quasi proportionnelle de la masse du mortier.

L'incorporation de ouate de cellulose, entre 0 et 9,64 g pour 1 000 g de plâtre, n'a pas d'effet significatif sur la densité durcie. La courbe associée du diagramme de perturbation reste presque horizontale. La proportion volumique des fibres est faible et leur densité propre est voisine de celle du plâtre. L'effet sur la masse volumique globale est donc négligeable.

L'hydrofuge silicone a une influence modérée et décroissante. Lorsque sa teneur augmente de 0 à 2 %, la densité diminue légèrement. Cet effet provient de l'entraînement d'air parasite pendant l'incorporation de l'émulsion siloxane. La porosité occluse ajoutée s'ajoute à la porosité ouverte de la matrice durcie.

À volume constant, la diminution de densité s'accompagne d'une augmentation de la porosité totale. Cette porosité supplémentaire se répartit en deux populations. La première est la porosité intra-granulaire de la perlite, formée d'alvéoles vitreuses scellées dans les parois cellulaires. Elle contribue à la performance thermique sans interaction directe avec le réseau capillaire. La deuxième est la porosité inter-granulaire, générée par le faible empilement des grains de perlite. Elle pénalise la résistance mécanique et facilite le transfert hygrométrique. L'équilibre entre ces deux populations contrôle le compromis isolation, mécanique et durabilité, qui est analysé dans les sections suivantes.

Les valeurs mesurées sont cohérentes avec celles rapportées dans la littérature. Vimmrová et al. [45] obtiennent environ $1\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour des composites plâtre–perlite à 50 % en masse. Del Río Merino [47] mesure $1\,247\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour un composite plâtre–perlite optimisé. La valeur de $1\,213\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ obtenue ici sur M10 (100 % de substitution volumique du sable) se situe dans la même gamme. Cela confirme la cohérence du protocole de formulation et l'efficacité de la perlite comme agent allégeant.

Le modèle quadratique ajusté sur les quinze formulations du plan rend très bien compte de la masse volumique ($R^2 = 0,99$; R^2 ajusté = $0,98$; manque d'ajustement non significatif). L'analyse de la variance désigne le taux de perlite (A) comme facteur dominant et hautement significatif ($p < 0,0001$), très loin devant l'hydrofuge (C, $p = 0,009$), seul autre terme significatif, tandis que la ouate (B) ainsi que l'ensemble des interactions et des termes quadratiques ne ressortent pas ($p > 0,10$). L'équation codée traduit cette hiérarchie par des coefficients de $-144,8$ pour A, $-24,4$ pour C et $-11,1$ pour B : la masse volumique est gouvernée par un effet linéaire d'allègement par substitution volumétrique directe du sable, sans courbure ni interaction notable sur le domaine étudié.

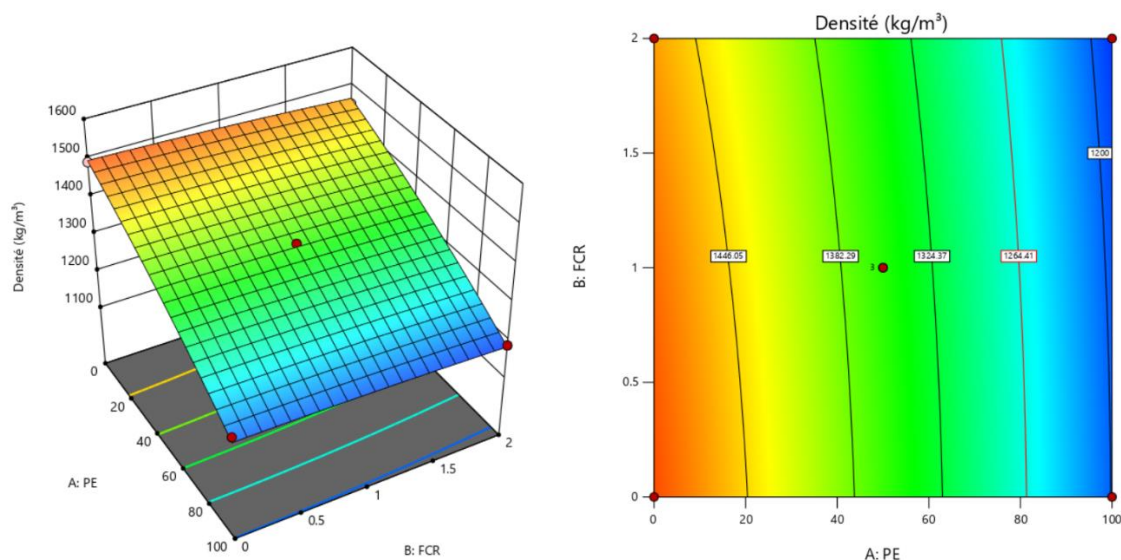


Figure IV.2 contours et surfaces de réponse tridimensionnelles illustrant la variation de la densité du composite (kg/m^3) en fonction des interactions entre PE FCR(OC)

IV.3. Résistance à la flexion

IV.3.1. Résultats par formulation

La résistance à la flexion trois points (R_f) à 28 jours est donnée dans le Tableau IV.1 et illustrée par la Figure IV.3. Les valeurs varient de 7,45 MPa (M15) à 8,58 MPa (M6), autour d'une moyenne globale de 8,05 MPa. Le coefficient de variation est de 3,4 % seulement. Cette faible dispersion montre que la matrice de plâtre joue un rôle dominant dans le mécanisme de rupture en flexion.

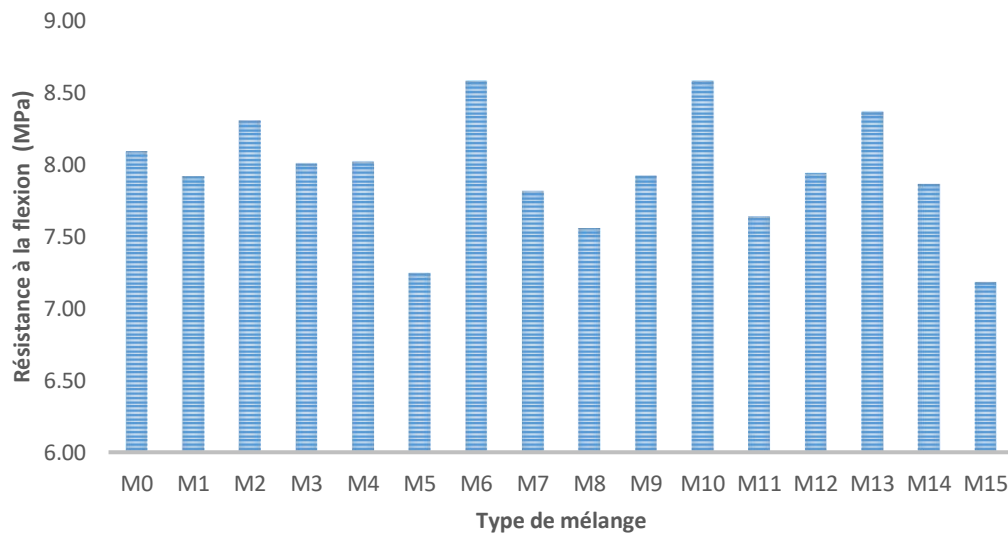


Figure IV.3: Résistance à la flexion R_f des seize formulations à 28 jours.

IV.3.2. Effet des facteurs

L'analyse par niveau de facteur, conduite avec la même méthode que pour la masse volumique, donne les observations suivantes.

L'effet de la perlite expansée est faible mais significatif. Malgré la chute de masse volumique de 19,5 % entre PE = 0 et PE = 100 %, la résistance à la flexion ne diminue que faiblement, de 8,15 à 7,94 MPa (baisse de 2,5 %). Cet effet, de faible amplitude, est néanmoins détecté par le modèle (coefficient codé -0,10). Ce résultat ne suit pas la corrélation classique entre R_f et masse volumique. Il s'explique par le mécanisme de rupture en flexion : la rupture débute dans la fibre tendue inférieure de l'éprouvette. La qualité de cette zone dépend surtout de la matrice de plâtre, c'est-à-dire de la taille des cristaux de gypse et de la densité des liaisons inter-cristallines, plus que de la nature des granulats.

L'effet de la ouate de cellulose est le plus marqué des trois facteurs et tend à diminuer la résistance (coefficient codé -0,28). La R_f décroît lorsque le dosage augmente, avec une légère courbure ; aux dosages élevés, les fibres ont tendance à s'agréger et à créer des interfaces défectueuses (fibres groupées, vides résiduels), ce qui pénalise le pontage à la fissuration. Ce

comportement est cohérent avec les observations de Lanzón et García-Ruiz [70] sur des composites plâtre–fibres végétales, où un optimum apparaît autour de 0,5 % en masse.

L'effet de l'hydrofuge sur R_f est faible mais statistiquement significatif, assorti d'une légère courbure (terme C^2). Son amplitude reste toutefois limitée sur tout le domaine étudié. Les silicones sont chimiquement compatibles avec la matrice sulfato-calcique. Contrairement à certains adjuvants à base d'acide stéarique ou de corps gras polaires, qui peuvent ralentir l'hydratation, les groupements siloxanes se fixent sur les parois des pores sans gêner la prise du semi-hydrate.

Le plan met en évidence une réponse R_f nettement structurée, et non plate ($R^2 = 0,97$; manque d'ajustement non significatif). À la différence de la masse volumique, c'est ici la ouate (B) qui domine très largement ($p = 0,0001$; coefficient codé $-0,28$), devant l'hydrofuge (C) et la perlite (A), tous deux significatifs ($p \approx 0,01$). Le modèle fait en outre apparaître deux interactions significatives, $A \times B$ et $A \times C$, ainsi qu'une courbure significative selon C (terme C^2) : l'effet d'un facteur dépend du niveau des autres. La résistance à la flexion est ainsi pilotée par la formulation, au premier chef par le dosage de ouate qui la diminue, et non par la seule qualité intrinsèque de la matrice.

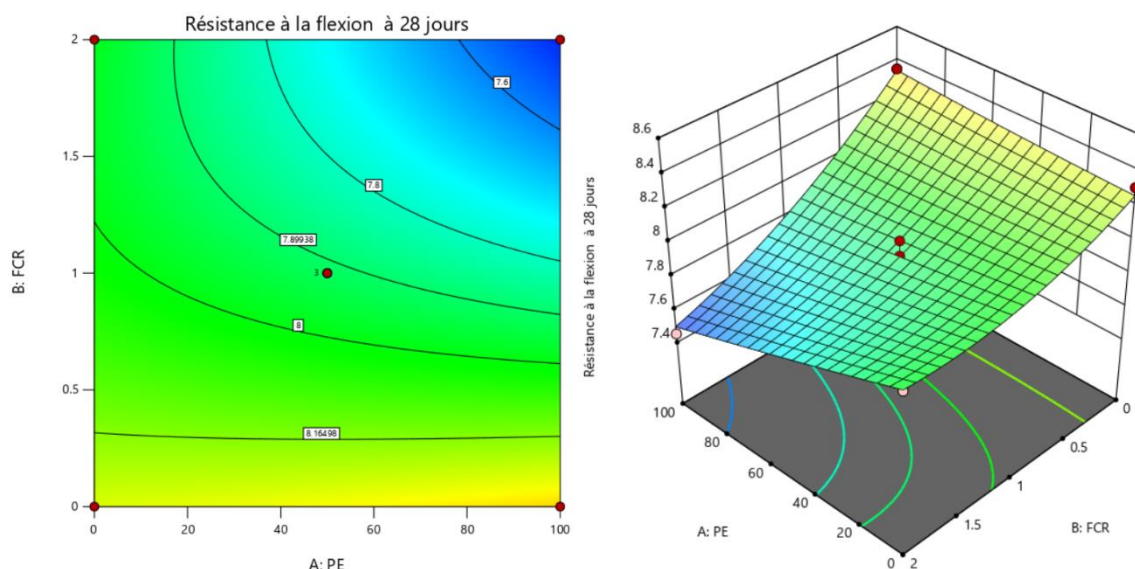


Figure IV.4 contours et surfaces de réponse tridimensionnelles illustrant la variation de la résistance à la flexion du composite en fonction des interactions entre PE FCR(OC)

IV.4. Résistance à la compression

IV.4.1. Résultats par formulation

La résistance à la compression R_c à 28 jours est donnée dans le Tableau IV.1 et représentée sur la Figure IV.5. Les valeurs varient de 9,09 MPa (M11) à 13,63 MPa (M0, témoin), autour d'une moyenne globale de 11,60 MPa ($CV \approx 12\%$). Parmi les mortiers additivés (M1 à M15), la valeur la plus élevée est obtenue pour M2 ($R_c = 13,38$ MPa), et la plus faible pour M11 ($R_c = 9,09$ MPa). Toutes les valeurs restent largement au-dessus des exigences réglementaires pour les éléments non porteurs (R_c minimale de 2 à 4 MPa selon les normes algériennes pour cloisons et enduits).

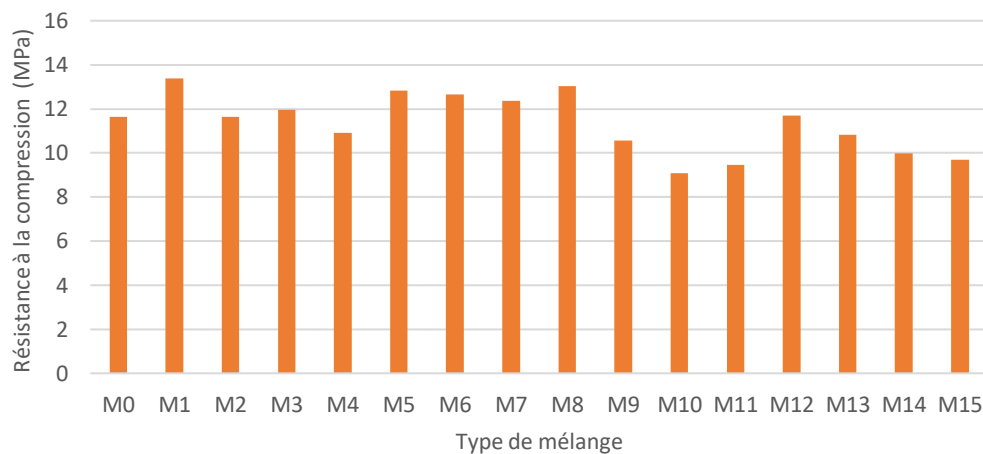


Figure IV.5 : Résistance à la compression R_c des seize formulations à 28 jours.

IV.4.2. Effet des facteurs

L'analyse par niveau de facteur donne trois comportements différents.

L'effet de la perlite est modéré et monotone décroissant. La résistance moyenne passe de 11,80 MPa (PE = 0 %) à 11,63 MPa (PE = 50 %), puis à 10,85 MPa (PE = 100 %). La baisse globale est de 0,95 MPa, soit 8 %. Cette dégradation reste modérée par rapport à la chute simultanée de la masse volumique (19,5 %). Le rapport entre l'allègement et la perte de résistance est favorable : chaque pourcent d'allègement coûte environ 0,4 % de R_c seulement. Ce comportement est très différent de celui rapporté par Vimmrová et al. [45], qui ont mesuré une réduction de 83 % de R_c sur des composites plâtre-perlite à 50 %. La différence s'explique par trois facteurs : la granulométrie plus fine et mieux empilée de la perlite TOUAB, la stabilité chimique de l'interface plâtre-perlite (pH neutre), et le fait que ici c'est le sable qui est substitué, et non le plâtre. La fraction massique de liant est donc préservée.

L'effet de la ouate de cellulose est le plus important sur la compression et tend à réduire la résistance, avec une courbure marquée (terme B^2) qui accentue la chute aux dosages élevés. Le mécanisme dominant est la dilution de la matrice liante par les fibres organiques moins résistantes et la formation d'interfaces fibre–matrice plus faibles. Cette interprétation rejoint celle proposée par Lanzón et García-Ruiz [70] sur des composites plâtre–fibres lignocellulosiques.

L'effet de l'hydrofuge est monotone et significatif. Quand son taux augmente de 0 à 2 %, la R_c moyenne chute d'environ 9 %. Cette dégradation reste modérée mais suffit à retenir 1 % comme dosage optimal, qui est un compromis entre efficacité hydrophobique et résistance mécanique. Au-delà de 1 %, la baisse de R_c s'accélère et le gain d'imperméabilité (cf. § IV.5) ne compense plus la perte mécanique. Deux mécanismes sont en jeu : l'entraînement d'air parasite déjà observé sur ρ_{app} au § IV.2, et la perturbation locale de la nucléation des cristaux de gypse aux interfaces hydrofugées.

La perlite expansée présente un rapport bénéfice–coût mécanique très favorable. Le passage de $PE = 0\%$ à $PE = 100\%$ allège le composite de 19,5 % pour seulement 8 % de perte de R_c et 2,5 % de perte de R_f . Ce résultat, peu courant pour un granulat ultra-léger, s'explique par plusieurs facteurs : la finesse et la régularité granulométrique de la perlite TOUAB, qui assurent un bon empilement ; la neutralité chimique de l'interface plâtre–perlite ; et le fait que la substitution se fait sur le sable. La fraction massique de plâtre est ainsi préservée, et la cohésion du liant durci reste intacte.

L'hydrofuge réduit significativement la résistance en compression, mais ce n'est pas le facteur dominant : c'est la ouate de cellulose qui pèse le plus lourd (coefficient codé $-1,23$), devant la perlite puis l'hydrofuge. La différence de sensibilité entre R_f et R_c face à l'hydrofuge vient des mécanismes de rupture. La flexion mobilise une zone tendue très localisée. La compression, au contraire, mobilise tout le volume de l'éprouvette, où l'entraînement d'air parasite distribué se répercute directement sur la contrainte maximale supportée. Le choix d'un dosage à 1 % d'hydrofuge est donc un compromis mécanique justifié. Il sera réexaminé au § IV.5 sous l'angle de la performance anti-capillaire.

L'ajustement quadratique est satisfaisant ($R^2 = 0,96$; manque d'ajustement non significatif). Les trois facteurs sont significatifs sur la résistance à la compression : la ouate (B) au premier rang et de loin ($p = 0,0005$; coefficient codé $-1,23$), puis la perlite (A, $p = 0,027$) et l'hydrofuge (C, $p = 0,045$), tous trois à effet moyen négatif. S'y ajoutent une

interaction A×B significative et une forte courbure selon B (terme B^2 négatif, $p = 0,011$), signature d'un comportement non monotone où la chute de R_c s'accroît surtout aux dosages élevés de ouate. La substitution par la perlite exerce donc un effet propre, contrairement à ce que suggérerait une lecture en moyennes simples, mais demeure secondaire devant celui de la ouate.

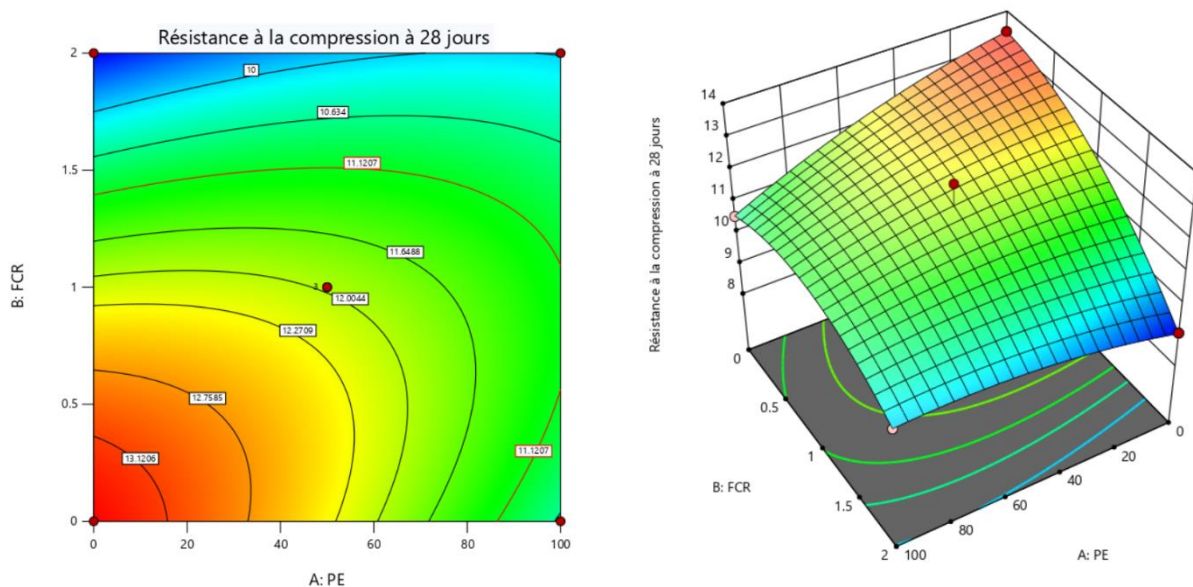


Figure IV.6 contours et surfaces de réponse tridimensionnelles illustrant la variation de la résistance à la compression du composite en fonction des interactions entre PE FCR(OC)

IV.5. Cinétique d'absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé selon la norme NF EN 1015-18 sur les seize formulations à 28 jours. Les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, scellées sur leurs quatre faces latérales, ont été placées en contact avec une lame d'eau de 5 mm sur leur face inférieure. La surface utile est de $A = 16 \text{ cm}^2 = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. La masse cumulée par unité de surface $(M_t - M_0)/A$ a été mesurée à neuf instants (15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 5 h, 1 j, 2 j, 3 j, 4 j). Elle est tracée en fonction de $\sqrt{t}$ sur la Figure IV.7.

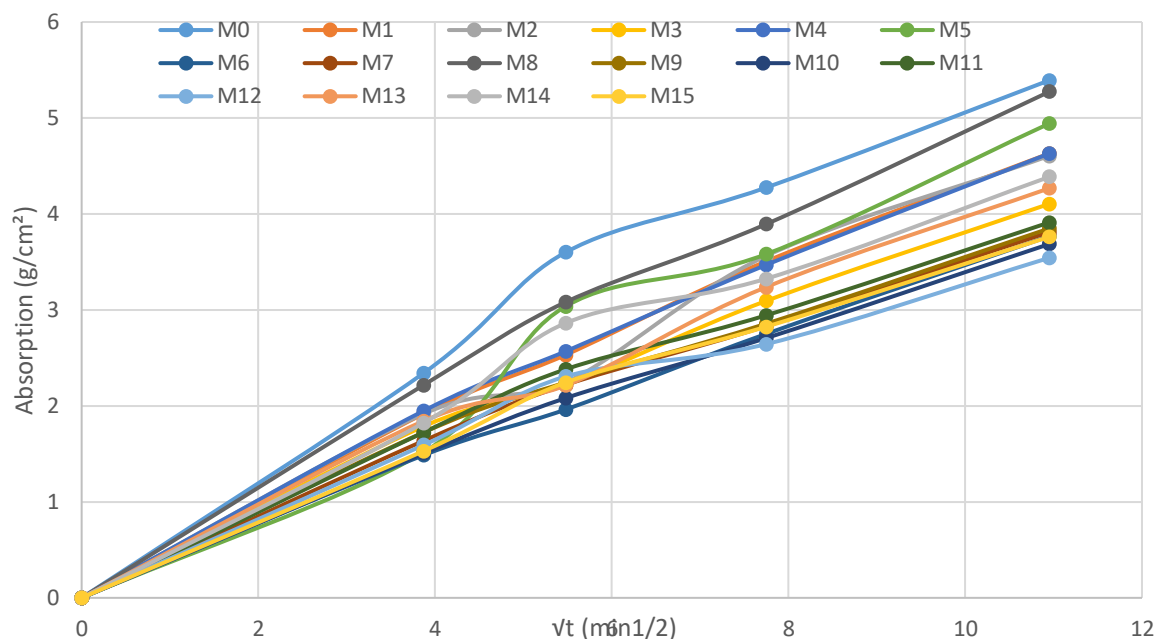


Figure IV.7: Cinétique d'absorption capillaire des seize formulations à 28 jours.

Les courbes présentent toutes une allure en deux phases, typique du transfert capillaire en milieu poreux non saturé. La première phase, comprise entre 0 et 2 h (soit $\sqrt{t}$ entre 0 et 11 min^{0.5}), est linéaire en $\sqrt{t}$. C'est le régime capillaire pur, pendant lequel les pores connectés se remplissent par succion. La deuxième phase, entre 2 h et 24 h, marque l'approche d'un plateau de saturation. Au-delà de 24 h, l'absorption supplémentaire devient marginale. Elle provient surtout de la diffusion vapeur dans les pores fins ou peu connectés.

Le mortier témoin M0 a la pente initiale la plus forte. Il atteint 36 kg·m⁻² dès 30 min et 54 kg·m⁻² à 2 h. Sa saturation est donc effective avant celle des autres formulations. Toutes les formulations qui contiennent de l'hydrofuge silicone présentent une pente initiale nettement réduite. À 30 min, M0 a déjà absorbé 36 kg·m⁻² quand les mortiers hydrofugés se situent entre 19 et 31 kg·m⁻². L'écart se maintient sur toute la phase capillaire et diminue progressivement à l'approche du plateau.

En revanche, les valeurs maximales atteintes en 4 jours restent relativement homogènes, entre 57 et 65 kg·m⁻² pour toutes les formulations. Cette quasi-invariance du plateau montre que l'hydrofuge agit sur la cinétique de pénétration de l'eau, en réduisant la pression capillaire motrice par modification de l'angle de contact. Il ne modifie pas la capacité totale d'absorption, qui reste contrôlée par le volume poreux accessible. Les formulations à PE = 100 % (M4, M5, M10, M15) présentent d'ailleurs les plateaux les plus élevés (61 à 65 kg·m⁻²). Cela traduit l'apport volumétrique de la porosité intra-granulaire de la perlite expansée.

La formulation M8 (50 % perlite, 0 OC, 0 hydrofuge) garde une cinétique très proche de celle du témoin M0. Ce constat est important : la perlite seule, malgré sa porosité, n'apporte aucun bénéfice sur la résistance à l'imprégnation capillaire. Sa porosité ajoutée compense la perte de continuité du réseau capillaire de la matrice. L'effet anti-capillaire observé sur les autres mortiers vient donc de l'hydrofuge silicone, avec une contribution complémentaire de la ouate de cellulose. Les fibres absorbent de l'eau dans leur volume interne et perturbent la connectivité des pores, ce qui ralentit la propagation de l'eau dans la matrice.

IV.7. Durabilité aux cycles humidification–séchage

IV.7.1. Variation de masse

L'essai de durabilité aux cycles humidification–séchage (H/S) a été réalisé selon le protocole décrit au § III.3.5 sur les seize formulations à 28 jours. Quinze cycles de 48 h ont été appliqués : 24 h en étuve à 70 °C, suivies de 24 h en chambre humide à HR > 95 %. La durée totale est donc de 30 jours. Deux éprouvettes par formulation ont été suivies. La variation relative de masse $\Delta m = (m_{30j} - m_0)/m_0$ et les résistances résiduelles sont données dans le Tableau IV.8 et illustrées sur la Figure IV.11.

Tableau IV-2: Variation de masse Δm (%) après 30 jours de cycles H/S, résistances résiduelles R_f et R_c , et pertes relatives par rapport aux valeurs à 28 jours du Tableau IV.1.

Mél.	Δm (%)	R_f 28 j (MPa)	R_f après H/S (MPa)	Perte R_f (%)	R_c 28 j (MPa)	R_c après H/S (MPa)	Perte R_c (%)
M0	1,06	8,09	5,65	30,2	13,63	6,38	53,2
M1	0,92	7,92	6,09	23,1	11,64	6,26	46,2
M2	1,57	8,31	5,29	36,3	13,38	5,17	61,4
M3	1,15	8,01	5,76	28,1	11,64	5,83	49,9
M4	1,99	8,02	5,95	25,8	11,96	6,78	43,3
M5	1,32	7,94	5,58	29,7	10,91	5,49	49,7
M6	2,21	8,58	5,37	37,4	12,84	5,35	58,3
M7	0,34	7,82	6,06	22,5	12,64	6,10	51,7

M8	1,36	8,24	5,45	33,9	12,36	6,67	46,0
M9	1,26	7,92	5,65	28,7	13,03	5,95	54,3
M10	1,34	8,35	5,54	33,7	10,56	5,34	49,4
M11	0,53	7,98	6,42	19,5	9,09	6,40	29,6
M12	5,58	7,94	5,71	28,1	9,45	4,32	54,3
M13	0,84	8,37	5,22	37,6	11,70	5,18	55,7
M14	1,05	7,86	5,61	28,6	10,81	5,27	51,2
M15	0,34	7,45	5,41	27,4	9,97	6,17	38,1

Pour la majorité des formulations, la variation de masse reste comprise entre 0,3 et 2,2 %. Cela correspond à une absorption résiduelle modérée. Les éprouvettes terminent généralement les cycles avec une légère prise de masse, due à la rétention d'humidité dans le réseau poral. La formulation M12 (50 % perlite, 9,64 g OC, 2 % hydrofuge) fait exception. Elle présente un gonflement de 5,58 %, soit plus du double de la deuxième valeur la plus élevée (M6 à 2,21 %).

Le comportement anormal de M12 résulte de la combinaison de trois facteurs défavorables. D'abord, le dosage maximal en ouate de cellulose (9,64 g) apporte un volume important de fibres organiques très hygroscopiques. Ensuite, le dosage maximal en hydrofuge (2 %) fragilise mécaniquement la matrice (cf. § IV.4). Enfin, le taux de perlite intermédiaire (50 %) ne procure pas la stabilité dimensionnelle maximale offerte par les fortes substitutions. Cette combinaison produit un mortier qui absorbe massivement l'eau dans les fibres et la libère progressivement. Sa matrice affaiblie ne supporte pas les contraintes hygriques cycliques.

IV.7.2. Évolution des résistances mécaniques après cycles

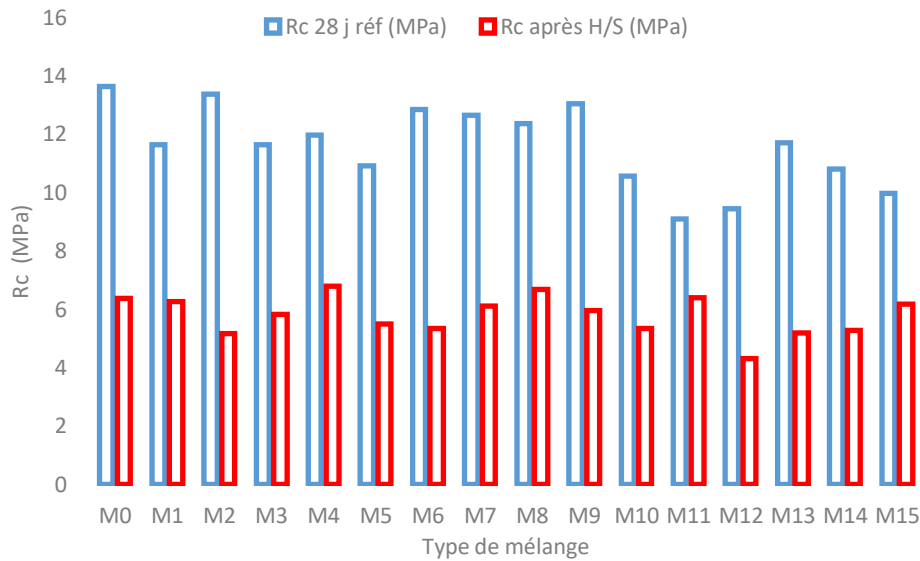


Figure IV.8: Comparaison de la résistance à la compression avant (28 jours) et après (30 jours de cycles H/S) pour les seize formulations.

La comparaison de Rc avant et après cycles H/S montre une dégradation systématique pour toutes les formulations. Les pertes relatives s'échelonnent de 29,6 % (M11) à 61,4 % (M2), avec une moyenne de 49,5 % sur les seize formulations. La résistance résiduelle moyenne après 30 jours de cycles est d'environ 5,8 MPa. Cette valeur reste globalement au-dessus des exigences minimales des parois non porteuses, mais reste très inférieure aux performances initiales.

Cette perte importante traduit la sensibilité de la matrice plâtrière aux variations hygriques. Le mécanisme dominant est la dissolution partielle du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en phase aqueuse à chaque cycle d'humidification. La solubilité du gypse dans l'eau est d'environ $2,4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ à 20°C , ce qui n'est pas négligeable. Cette dissolution est suivie d'une recristallisation lors du séchage. La recristallisation se fait à des emplacements légèrement différents des cristaux d'origine. Cela détruit progressivement les ponts cristallins inter-grains et désagrège la microstructure. Le phénomène est amplifié par les contraintes de retrait et de gonflement liées à la perte et à la reprise d'eau. Ces contraintes engendrent des microfissures dans la matrice et aux interfaces matrice–granulats.

La formulation M11 présente la plus faible perte de Rc (29,6 %). Au contraire, les formulations à dosages élevés (M2, M6, M12, M13) présentent les pertes les plus fortes (54 à 61 %). Ces résultats montrent qu'un dosage modéré et équilibré des trois additions donne le meilleur compromis pour la durabilité.

Pour la résistance à la flexion, les valeurs résiduelles après cycles se situent entre 5,2 et 6,4 MPa. La perte moyenne est d'environ 30 %, donc nettement inférieure à la perte en compression. La meilleure résistance résiduelle en flexion est obtenue pour M11 ($R_f = 6,42$ MPa, perte de 19 % seulement). La moins bonne correspond à M13 ($R_f = 5,22$ MPa, perte de 38 %). Cette différence entre flexion et compression est attendue. La flexion mobilise une zone tendue très localisée et reste peu sensible à la microfissuration distribuée. La compression, au contraire, mobilise tout le volume de l'éprouvette et accumule les défauts internes.

IV.8. Synthèse et identification de la formulation optimale

La perlite expansée est l'agent allégeant principal. Elle réduit ρ_{app} de 19,5 % pour un coût mécanique modéré (8 % sur R_c , très faible sur R_f) et ne modifie pas la cinétique d'absorption. Elle peut donc être poussée jusqu'à 100 % de substitution volumique du sable sans pénalité importante.

La ouate de cellulose contribue à ralentir l'absorption capillaire, mais constitue le facteur le plus pénalisant pour les résistances mécaniques, qu'elle réduit au-delà d'un dosage modéré. Elle doit donc rester à un dosage modéré (environ 4,82 g pour 1 000 g de plâtre, soit environ 0,5 % en masse). Au-delà, la durabilité aux cycles H/S se dégrade fortement, comme le montre le cas extrême de M12.

L'hydrofuge silicone est le facteur dominant pour la maîtrise de l'absorption capillaire. Mais son effet sur la résistance en compression à 2 % impose de le limiter à 1 %. Ce dosage assure le meilleur compromis entre efficacité hydrophobique et préservation des performances mécaniques initiales.

IV.8.1. Formulation optimale recommandée

La formulation optimale recommandée pour le composite plâtre allégé étudié est :

- perlite expansée : 100 % en substitution volumique du sable (apport maximal d'allègement) ;
- ouate de cellulose : 1 % en volume ;
- hydrofuge silicone Sika : 1 % en masse de plâtre ;
- rapports de gâchage : $E/P = 0,60$; S/P (sable d'origine) = 0,50.

Cette formulation correspond approximativement à M10 (100 % perlite, 1 % OC, 1 % hyd) si l'on privilégie le critère de cinétique d'absorption minimale. Elle se situe entre M10 et la formulation centrale (M1, M3, M7) si l'on intègre le compromis entre durabilité, absorption et résistance.

Les performances attendues du mortier optimisé sont les suivantes :

- masse volumique apparente : environ $1\,213\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, soit une réduction de 22 % par rapport au témoin ;
- résistance à la compression à 28 jours : environ 10,56 MPa ;
- résistance à la flexion à 28 jours : environ 8,35 MPa ;
- cinétique d'absorption capillaire ralentie d'environ 30 % par rapport au témoin sur la phase initiale (0 à 2 h) ;

IV.8.2. Domaines d'application

Le mortier optimisé convient aux usages suivants en construction :

- enduits intérieurs sur murs de maçonnerie en zones tempérées et semi-arides (climat algérien intérieur, plateaux et hauts plateaux) ;
- mortiers de pose pour cloisons légères en plaques de plâtre ou en blocs alvéolaires ;
- éléments préfabriqués non porteurs (corniches, faux-plafonds, voussures décoratives) ;
- couches d'isolation thermique intérieure complémentaire en rénovation de bâtiments anciens.

Pour des applications en zones côtières humides ou en contact direct avec des éléments humides (sols, soubassements), une protection complémentaire de surface (peinture hydrofuge ou enduit final) reste recommandée. Elle compense la sensibilité résiduelle aux cycles humidification-séchage prolongés.

IV.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'analyse complète des résultats expérimentaux obtenus sur les seize formulations de mortier de plâtre composite étudiées. Cinq propriétés ont été mesurées et discutées : la masse volumique apparente, la résistance à la flexion, la résistance à la

compression à 28 jours, la cinétique d'absorption capillaire et la durabilité aux cycles humidification–séchage. Pour chaque propriété, l'effet des trois facteurs variables (perlite expansée, ouate de cellulose, hydrofuge silicone) a été isolé par analyse en moyennes par niveau. Chaque effet a été discuté à la lumière des mécanismes microstructuraux décrits au Chapitre II.

Les principaux résultats se résument en cinq points.

(1) La perlite expansée est un agent allégeant très efficace. Elle réduit la masse volumique moyenne de près de 20 % en substitution volumique totale du sable, pour une perte de résistance à la compression limitée à environ 8 % et une résistance à la flexion presque inchangée. Ce rapport entre allègement et perte de résistance est le résultat principal de l'étude.

(2) La ouate de cellulose recyclée, à dosage modéré (1 %), ralentit l'absorption capillaire ; au-delà d'un dosage modéré, elle pénalise les résistances mécaniques et la durabilité aux cycles humidification–séchage se dégrade.

L'hydrofuge silicone Sika, à 1 % en masse de plâtre, ralentit fortement la cinétique d'absorption capillaire avec une perte mécanique modérée et acceptable. Le passage à 2 % n'apporte pas de bénéfice supplémentaire significatif et dégrade davantage la résistance à la compression.

La durabilité aux cycles humidification–séchage reste le point faible des composites étudiés. La perte moyenne de R_c atteint 49,5 % après 30 jours de cycles (plage de 29,6 à 61,4 %). Ce comportement est lié à la nature soluble du gypse. C'est une limitation à prendre en compte pour le choix des applications. Un dosage modéré et équilibré des trois additions permet de la maîtriser en partie.

La formulation optimale identifiée (100 % perlite, environ 0,5 % ouate de cellulose, 1 % hydrofuge) offre un bon compromis entre allègement ($\rho_{app} \approx 1\,200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), résistance mécanique ($R_c \approx 10,5 \text{ MPa}$, $R_f \approx 8,0 \text{ MPa}$) et résistance à l'absorption d'eau. Elle convient aux applications en enduits intérieurs et éléments décoratifs en climat tempéré algérien.

Ces résultats montrent l'intérêt du couplage des trois additions (perlite, ouate de cellulose, hydrofuge silicone) dans une matrice de plâtre. Ils montrent qu'il est possible d'obtenir des composites significativement allégés sans perte de performance mécanique notable. Les perspectives d'optimisation supplémentaire et les limites identifiées, notamment la durabilité

aux cycles humidification–séchage et la sensibilité à l’humidité prolongée, sont discutées dans la conclusion générale du mémoire.

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif de développer et de caractériser un mortier de plâtre allégé incorporant simultanément de la perlite expansée, de la ouate de cellulose recyclée et un hydrofuge silicone. Seize formulations, structurées selon un plan d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs et trois niveaux, ont été évaluées à 28 jours sur la base de cinq grandeurs : la masse volumique apparente, les résistances à la flexion et à la compression, la sorptivité capillaire ainsi que la durabilité aux cycles d'humidification-séchage. L'exploitation des résultats par des modèles de régression et une analyse de la variance (ANOVA) a permis de hiérarchiser rigoureusement les effets de ces trois constituants.

La perlite expansée s'est révélée être le principal agent d'allègement. En substitution volumique totale du sable, elle abaisse la masse volumique apparente d'environ 19,5 %, tout en induisant une baisse mécanique modérée, de l'ordre de 8 % sur la résistance en compression et quasi nulle en flexion. Ce compromis légèreté/résistance particulièrement favorable s'explique par la finesse et le bon empilement granulaire, la neutralité chimique de l'interface plâtre-perlite, ainsi que par le fait que la substitution affecte le sable et non le liant, préservant ainsi la fraction massique du plâtre.

La ouate de cellulose s'est avérée être le facteur le plus influent sur les résistances mécaniques, qu'elle réduit au-delà d'un dosage modéré, tout en contribuant à diminuer la sorptivité capillaire ; son incorporation doit donc rester limitée à environ 1 % en volume de plâtre. L'hydrofuge silicone constitue, quant à lui, le paramètre déterminant de la résistance à l'absorption d'eau ; son dosage optimal se situe à 1 % de la masse de plâtre, une augmentation à 2 % n'apportant aucun gain supplémentaire significatif tout en dégradant la résistance en compression.

La formulation optimale retenue associe une substitution volumique totale du sable par la perlite, environ 0,5 % de ouate de cellulose et 1 % d'hydrofuge silicone. Ce composite atteint une masse volumique voisine de 1 200 kg/m³, soit une réduction d'environ 22 % par rapport au mortier témoin, tout en conservant des performances mécaniques satisfaisantes (résistance en compression proche de 10,5 MPa et résistance en flexion d'environ 8 MPa) et une absorption capillaire considérablement réduite. Un tel matériau s'avère particulièrement adapté pour des applications telles que les enduits intérieurs, les cloisons légères ou les éléments non porteurs sous un climat tempéré algérien.

La principale limite identifiée réside dans le comportement face aux cycles d'humidification-séchage : toutes les formulations subissent une perte de résistance, accentuée pour les forts dosages en additions, le cas le plus critique correspondant au mélange cumulant les teneurs maximales en ouate et en hydrofuge. Cette sensibilité à une humidité prolongée nécessite par conséquent des investigations complémentaires. Les perspectives de ce travail s'orienteront ainsi vers la mesure directe de la conductivité thermique, la caractérisation microstructurale approfondie (microscopie électronique à balayage (MEB), diffraction des rayons X (DRX), porosimétrie au mercure, analyses thermiques), l'affinement de l'optimisation multi-critère par surfaces de réponse, l'étude de la pré-saturation des granulats poreux, ainsi que la validation du comportement à plus grande échelle et sur le long terme.

REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] Teraoka F, Takahashi J. Dimensional changes and pressure of dental stones set in silicone rubber impressions. *Dental Materials*. 2000;16(2):145–149.
- [2] Marteau P. Mémento roches et minéraux industriels : Gypse et anhydrite. Rapport BRGM R37772, Orléans, France, 1993.
- [3] 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, Alger, 1993.
- [4] Jaffel H. Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, France, 2006, 159 p.
- [5] Laoubi H. Étude 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, Algérie, 2021.
- [6] Alonzo-Azcárate JJ, Mas JM, Rodríguez-Aranda JP, Calvo JP. Vegetation and soils on gypsiferous outcrops in the Madrid Basin (Spain). In: *Proceedings of the International Symposium on Soil with Gypsum*, Lleida, Catalonia, Spain, 1996.
- [7] Aardt JHP van. Thaumasite formation: a cause of deterioration of Portland cement and related substances in the presence of sulphates. *Cement and Concrete Research*. 1975;5(3):225–232.
- [8] Chapellier D. L'origine et la formation du gypse. Mémoire hors-série n°6 du Bulletin, Société Géologique.
- [9] Daligand D. Plâtre. *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction*, C910, 2002.
- [10] Ministère de l'Énergie et des Mines, Algérie. Site officiel : www.mem-algeria.org (consulté en 2025).
- [11] Bezou C. Étude des caractéristiques cristallographiques, thermodynamiques et microstructurales des produits de déshydratation du gypse. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France, 1991.
- [12] Eve S. Comportement à la prise et caractérisation mécanique de matériaux composites à base de plâtre. Thèse de doctorat, Université de Caen, France, 2003.
- [13] Sanahuja J, Dormieux L, Chanvillard G, Meille S. Modélisation micromécanique des matériaux poreux (pâte de ciment, plâtre). *Centre des Matériaux MINES ParisTech*, 2008.

- [14] Meille S. Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure. Thèse de doctorat, INSA Lyon, France, 2001, 219 p.
- [15] Sattler H. The importance of porosity for the properties of hardened gypsum plaster products. *ZKG International*. 1997;50:54–62.
- [16] Sattler H, Brückner HP. Changes in volume and density during the hydration of gypsum binder as a function of the quantity of water available. *ZKG International*. 2001;54(9):522–531.
- [17] Coquard P. Résistance mécanique du plâtre sec et humide. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, France, 1992, 93 p.
- [18] Saadaoui M, Meille S, Reynaud P, Fantozzi G. Internal friction study of the influence of humidity on set plaster. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005;25(13):3281–3285.
- [19] Boustingorry P. Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté : Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne / INPG, France, 2002.
- [20] Les Industries du Plâtre. La plaque de plâtre au cœur de la construction durable. <http://www.lesindustriesduplatre.org> (consulté en 2025).
- [21] Vignes JL, Essaddam H, Daligand 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*. 1997;(790):145–164.
- [22] Daligand D. Le plâtre. *Techniques de l'Ingénieur*, 2001.
- [23] Rachedi M. Caractérisation des mortiers de plâtre. Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2013.
- [24] Ghoulam Allah S. Étude des caractéristiques des matériaux de construction de la zaouïa Tidjania de Guemar (Oued Souf) : Préparation d'un mortier de plâtre pour restauration. Mémoire, Institut d'archéologie, Université d'Alger 2, 2011, 143 p. (en arabe).
- [25] 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. *Construction and Building Materials*, 2018.

- [26] Abdelmoumen A. Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud algérien. Thèse de doctorat, Université de Constantine, Algérie, 1999.
- [27] Soltane ML. Contrôle technique d'un prototype de quatre logements en plâtre à Biskra. C.N.E.R.I.B, MATLOC 91, p. 101–104, 1991.
- [28] Sonebi M. Opération expérimentale d'un logement construit en mortier de plâtre banché à Rabat. Centre Expérimental du Bâtiment, 1989.
- [29] Zuber F. Pour une construction en plâtre. Communication, Lafarge, 1989.
- [30] Aldebert R. Rénovation du Grand Louvre à la gloire du plâtre. Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, n° 41615, p. 56–68, 1992.
- [31] Jiang H, Luan C. Preparation and absorption/desorption performance of gypsum-based humidity controlling materials. Journal of Wuhan University of Technology ; Mater. Sci. Ed. 2011;26(4):775–780.
- [32] Huang K, Liang H, Hung M. Improvement in fire prevention performance of cork-gypsum decorative materials by applying porous waste. International Journal of Physical Sciences. 2010;5(13):2038–2044.
- [33] Ramezani H, Shandab S, Nouri A. Study on effects of wood fiber content on physical, mechanical and acoustical properties of wood-fiber-filled gypsum composites. Materials Research. 2012;15(2):236–241.
- [34] Hummel H, et al. Examination of the exposure- and odour-reducing characteristics of gypsum-based building materials containing zeolite. Bauphysik. 2007;29(6):430–435.
- [35] Djoudi A, Khenfer MM, Bali A, Kadri EH, Debicki G. Performance of date palm fibers reinforced plaster concrete. International Journal of Physical Sciences. 2012;7(21):2845–2853.
- [36] Del Río Merino M, Comino P. Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola. Materiales de Construcción. 2001;51(261):33–44.
- [37] Mohandesi JA, Sangghaleh A, Nazari A, Pourjavad N. Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites. Computational Materials Science. 2011;50(5):1619–1624.

- [38] Dalmay P, Smith A, Chotard T, Sahay-Turner P, Gloaguen V, Krausz P. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. *Journal of Materials Science*. 2010;45(3):793–803.
- [39] Zhang WH, Li GZ, Liu MR. Properties research of cotton fiber reinforced gypsum-based composites. *Advanced Materials Research*. 2011;194:1759–1762.
- [40] Lima J, Faria P. Eco-efficient earthen plasters: the influence of the addition of natural fibers. In: *Natural Fibers: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. Springer; 2016:315–327.
- [41] Leiva Aguilera MJ, Del Río Merino M, Villoria Sáez P. Feasibility of plaster composites with rice husk waste. *ZKG Dry Mix Special*. 2016:30–40.
- [42] Iucolano F, Caputo D, Leboffe F, Liguori B. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. *Construction and Building Materials*. 2015;99:184–191.
- [43] Del Río Merino M, Hernández Olivares F. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solids addition. *Materiales de Construcción*. 2004;54(275):65–76.
- [44] Vimmrová A, Keppert M, Svoboda L, Černý R. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*. 2011;33(1):84–89.
- [45] Huang B, Zhang Y, Li DX. Study on the influences of foaming gypsum's performance. *Materials Science Forum*. 2013;743–744:222–227.
- [46] Del Río Merino M, Domínguez JD, Hernández Olivares F. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la Construcción*. 1998;50(458):43–60.
- [47] Gmouh A, Samdi A, Moussa R, Gomina M. Lightened plaster-based composite materials: elaboration and mechanical properties. *Silicates Industriels*. 2001;56(5–6):61–66.
- [48] Yong GX, Tong JP, Hai FL, Ji M. Preparation and properties of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation boards. *Advanced Materials Research*. 2010;178:220–225.
- [49] Leiva Aguilera M, Del Río Merino M. Escayola aditivada con residuos agrícolas: cáscara de arroz y cáscara triturada. In: Llinares-Millán C et al., editors. *Construction and Building Research*. Springer; 2014:463–470.
- [50] Hernández-Olivares F, Bollati MR, Del Río Merino M, Parga-Landa B. Development of cork–gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*. 1999;13(4):179–186.

- [51] Zhou S, et al. The preparation and performance of gypsum-based composites. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;310:46–50.
- [52] Karaman S, Şahin S, Günel H, Örun İ. Stabilization of waste PET bottles with gypsum. *Journal of Applied Sciences*. 2006;6(5):1119–1122.
- [53] García Santos A. PPP-reinforced, EPS-lightened gypsum plaster. *Materiales de Construcción*. 2009;59(293):105–124.
- [54] González Madariaga FJ, Lloveras Macia J. EPS (expanded polystyrene) recycled beads mixed with plaster or stucco ; some applications in building industry. *Informes de la Construcción*. 2008;60(509):35–43.
- [55] Gutiérrez-González S, et al. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*. 2013;38:407–412.
- [56] Jiménez Rivero A, de Guzmán Báez A, García Navarro J. New composite gypsum plaster ; ground waste rubber from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*. 2014;55:146–152.
- [57] Herrero S, Mayor P, Hernández Olivares F. 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*. 2013;47:633–642.
- [58] Gutiérrez-González S, et al. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*. 2012;28(1):653–658.
- [59] Khalil A, Tawfik A, Hegazy A, El-Shahat M. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. *Materiales de Construcción*. 2013;63(312):529–537.
- [60] Maxim LD, Niebo R, McConnell EE. Perlite toxicology and epidemiology – a review. *Inhalation Toxicology*. 2014;26(5):259–270.
- [61] Kotwica Ł, Pichór W, Kapeluszna E, Różycka A. Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*. 2017;140:1344–1352.
- [62] Çelik AG, Kılıç AM, Çakal GÖ. Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2013;49(2):689–700.

- [63] Sengul O, Azizi S, Karaosmanoglu F, Tasdemir MA. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*. 2011;43(2–3):671–676.
- [64] Lopez de Armentia S, Fernández-Villamarín S, Ballesteros Y, del Real JC, Dunne N, Paz E. Cellulose-reinforced epoxy adhesives: a systematic review on biocomposite materials. *Polymers*. 2022;14(9):1832.
- [65] Hurtado PL, Rouilly A, Vandenbossche V, Raynaud C. A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment*. 2016;96:170–177.
- [66] Korjenic A, Petránek V, Zach J, Hroudová J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*. 2011;43(9):2518–2523.
- [67] Cerolini S, D'Orazio M, Di Perna C, Stazi A. Moisture buffering capacity of highly absorbing materials. *Energy and Buildings*. 2009;41(2):164–168.
- [68] Falliano D, De Domenico D, Ricciardi G, Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Construction and Building Materials*. 2018;165:735–749.
- [69] Lanzón M, García-Ruiz PA. Effectiveness and durability evaluation of rendering mortars made with metallic soaps and powdered silicone. *Construction and Building Materials*. 2008;22(12):2308–2315.
- [70] Meddah A, Laoubi H, Bederina M. Effectiveness of using rubber waste as aggregates for improving thermal performance of plaster-based composites. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2020;5(2):61. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00311-0>.

Annexes

Annexe A : résultats détaillés des essais

Tableau A-1: résultats essais absorption capillaire

Le coefficient d'absorption capillaire C kg/m2																
Temps	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
00 min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 min	23,4375	19,188	19,19	17,88	19,5	15,188	14,875	16,38	22,2	17,25	15,06	17,25	15,938	18,438	18,25	15,313
30 min	36	25,313	22,44	22,19	25,69	30,375	19,625	22,19	30,8	22,44	20,81	23,813	23,063	22,125	28,625	22,438
1 h	42,75	35,063	35,63	30,94	34,69	35,813	27,5	28,31	38,9	28,56	27,06	29,438	26,438	32,375	33,25	28,25
2 h	53,9375	46,313	46,06	41,06	46,31	49,438	37,688	38,13	52,8	38,5	36,88	39,125	35,438	42,688	43,875	37,625
5 h	54,5625	57,563	54,81	58,44	60,69	61,313	57,688	56,88	57,1	56,63	57,5	56,625	54,813	57,688	58,25	57,813
1 j	55,1875	58,813	56,19	60,31	61,94	63,25	58,938	59,38	58,3	57,94	61,25	57,875	60,438	59,063	60,125	62
2 j	55,8125	59,438	56,81	61,56	63,19	63,813	60,188	60	59,1	59,31	61,88	57,875	61,063	59,688	60,75	62,813
3 j	56,5625	60,688	57,31	61,81	63,56	64,438	60,375	60,75	59,9	59,38	63,19	59,75	61,125	60,188	61,375	63,25
4 j	57,0625	61,5	57,94	62,19	63,81	65,063	60,5	61,25	60,2	59,75	63,31	60,375	61,688	60,813	62	63,875

Tableau A- 2: résultats essai durabilité

	la masse initiale (g)	la masse après 30j H/S (g)	Flexion	Compression
M0	396,3	400,5	5,65	6,38
M1	346,5	349,7	6,08	6,26
M2	380,05	386	5,29	5,17
M3	352,65	356,7	5,76	5,82
M4	306,1	312,15	5,95	6,77
M5	298,25	302,2	5,58	5,48
M6	341	348,55	5,3	5,35
M7	343,5	344,65	6,06	6,10
M8	354,55	359,35	5,45	6,67
M9	385,6	390,45	5,65	5,95
M10	309	313,15	5,53	5,34
M11	388,05	390,1	6,42	6,4
M12	340,75	359,8	5,70	4,32
M13	374,5	377,65	5,22	5,17
M14	347,15	350,8	5,61	5,27
M15	305,25	306,3	5,40	6,16

Annexe B : photographies des essais



Figure B.1: préparation des éprouvettes

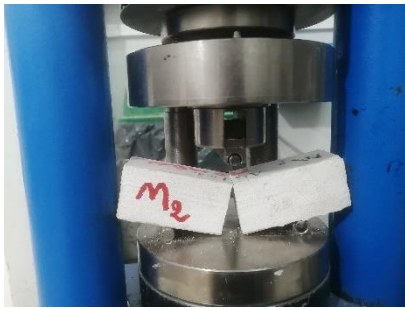


Figure B.2: écrasement flexion



Figure B.3: ecrasement compression



Figure B.4: la masse volumique du plâtre



Figure B.6: essai équivalent du sable



Figure B.7: la masse volumique de sable

Annexe C : fiches techniques des matériaux



NOTICE PRODUIT

Hydrofuge Sika® Liquide

Hydrofuge de masse liquide pour bétons

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Hydrofuge Sika® Liquide est un hydrofuge de masse liquide blanc pour bétons.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons étanches dans la masse : fondations, radiers et réservoirs.
- Bétons résistant à l'attaque des eaux séléniteuses, des eaux de mer, des eaux industrielles ou des eaux pures.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Hydrofuge Sika® Liquide se combine à la chaux du ciment pour former des cristallisations complémentaires qui obstruent les capillaires du mortier, le rendant étanche à l'eau. Hydrofuge Sika® Liquide est garanti sans chlore. Il est sans effet appréciable sur la prise et les résistances mécaniques des bétons.

AGRÉMENTS / NORMES

Conforme à la norme NF EN 934-2
PV CNERIB: DTEM: 213/2016.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	Bidon de 2 litres Bidon de 5 litres Bidon de 10 litres Fût de 210 kg Cubi de 1000 kg
Aspect / Couleur	Liquide blanc laiteux
Durée de Conservation	1 an dans son emballage d'origine intact
Conditions de Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Densité	1,02 ± 0,01
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 2,0 %

Notice produit
Hydrofuge Sika® Liquide
Novembre 2020. Version 01.02
021403011000000006

Figure C.1: fiche technique d'hydrofuge sika

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	Plage d'utilisation recommandée 0,7 à 2 % du poids du ciment (soit 0,68 à 1,96 L pour 100 kg de ciment)
Distribution	Hydrofuge Sika® Liquide s'ajoute dans le malaxeur en même temps que l'eau de gâchage.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre

responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Sika El Djazair SPA
08 route de Larbaa
16111 Les Eucalyptus
ALGERIE
Tél.: 0 21 50 16 92 à 95
Fax: 0 21 50 22 08
dza.sika.com

Notice produit
Hydrofuge Sika® Liquide
Novembre 2020, Version 01.02
021403011000000006

HydrofugeSikaLiquide-fr-DZ-(11-2020)-1-2.pdf



Figure C.2: fiche technique d'hydrofuge sika

