

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 عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université Ain Témouchent Belhadj Bouchaib
Faculté des sciences et de la technologie
Département de génie civil et travaux public



Projet de fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de master en génie civil
Filière : génie civil
Spécialité : matériaux en génie civil

Thème

Influence du traitement des granulats biosourcés sur les caractéristiques
générales d'un mortier écologique

Réalisé par :

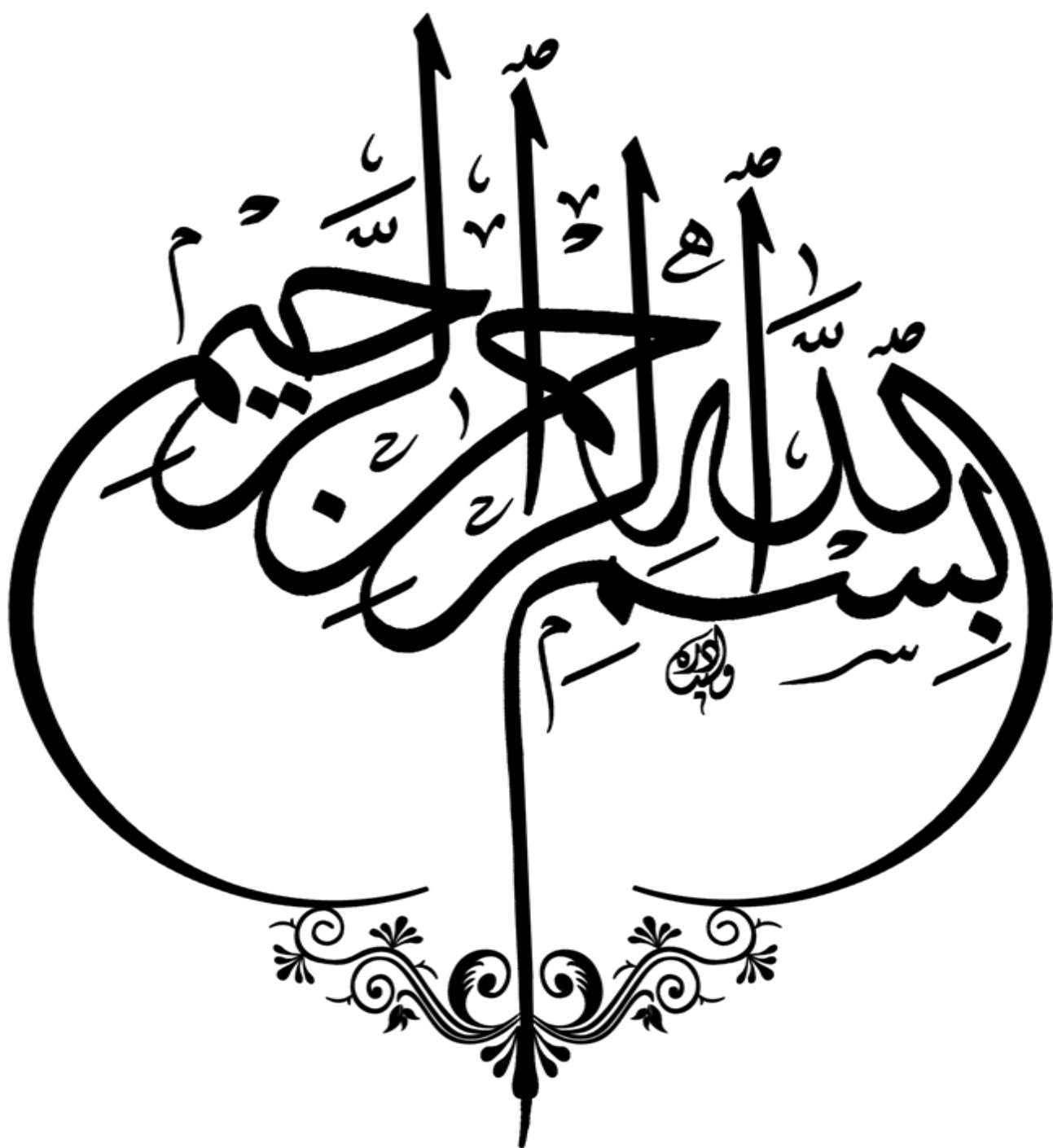
Boudissa samah nihed

Attou Wafaa

Soutenu publiquement le Juin 2026 devant le jury composé de :

Mme MENNA	MCA	Président	Université Ain Témouchent
Mme DERBAL Ahlem	MCA	Examinatrice	Université Ain Témouchent
Mr ABDELHADI Houari	MAA	Encadrent	Université Ain Témouchent

Année universitaire : 2025/2026



Graduation



Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail à nos très chers parents,
Pour leur amour infini, leur patience et leurs sacrifices.*

*À nos familles,
Pour leur soutien constant et leurs encouragements précieux.*

*À nos enseignants,
Pour leur savoir, leur accompagnement et leur bienveillance.*

*À nos amis,
Pour les moments partagés et leur présence à nos côtés.
À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin,
À la réalisation de ce travail.*



WAFAA & SAMAH





Remerciements

Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute la gratitude que je ressens aujourd'hui. Ce travail est l'aboutissement d'un parcours jalonné de doutes, d'efforts, mais surtout de belles rencontres et de soutiens inestimables.

À mes parents, vous qui avez toujours cru en moi, même lorsque la fatigue prenait le dessus. Merci pour votre amour inconditionnel, vos encouragements silencieux et vos sacrifices que je mesure un peu plus chaque jour. Votre présence a été ma plus grande force.

À Abdelhadi Houari, je tiens à exprimer ma reconnaissance pour votre patience, votre écoute et vos conseils avisés. Votre accompagnement bienveillant a été essentiel dans la réalisation de ce travail et m'a permis de grandir autant sur le plan académique que personnel.

Je remercie également ma famille et mes proches, pour leurs mots rassurants, leurs gestes réconfortants et leur indéfectible soutien dans les moments de doute. Vous avez su rendre ce parcours plus doux.

Enfin, une pensée sincère à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont croisé mon chemin durant cette aventure. Chacun de vous a contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'accomplissement de ce projet.

Ce mémoire n'est pas seulement le fruit d'un travail personnel, mais aussi le reflet de tout l'amour, la confiance et l'accompagnement que j'ai reçus.

Merci, du fond du cœur

Sommaire :

Résumé :	I
----------------	---

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 : Synthèse bibliographiques

Introduction :	6
----------------------	---

1.1 Généralités sur les matériaux biosourcés :	6
--	---

1.2 Contexte environnemental et développement durable dans la construction :	8
--	---

1.3 Avantages écologiques : réduction des émissions de CO ₂ , recyclage des déchets agricoles :	9
--	---

1.4 Caractéristiques physico-chimiques des matériaux biosourcés :	10
---	----

1. 4.1 Structure morphologique et composition (cellulose, hémicellulose, lignine) : .	10
---	----

1.4.2 Propriétés physiques : porosité, densité apparente, absorption d'eau :	11
--	----

1.4.3 Granulométrie et distribution des tailles de particules :	12
---	----

1.4.4 Conductivité thermique et propriétés hygrothermiques :	13
--	----

1.5 Le liège :	14
----------------------	----

1.5.1 Provenance :	14
--------------------------	----

1.5.2. Les différents types de liège :	15
--	----

1.5.3 Propriétés du liège :	16
-----------------------------------	----

1.5.4 Applications du liège :	17
-------------------------------------	----

1.6 Les mortiers écologiques :	18
--------------------------------------	----

1.6.1 Composition et formulation des mortiers biosourcés :	18
--	----

1.6.2 Liants hydrauliques et aériens compatibles :	19
--	----

1.7 Généralités sur le plâtre :	20
---------------------------------------	----

1.7.1 Définition du plâtre :	20
------------------------------------	----

1.7.2. Origine du plâtre :	20
----------------------------------	----

1.7.3. Le Gypse :	21
-------------------------	----

1.7.3.1 Le gypse naturel :	21
----------------------------------	----

1.7.3.2 Le gypse de synthèse :	22
1.7.4. Fabrication du plâtre :	22
1.7.5. Propriétés de plâtre :	25
1.7.6 Propriétés mécaniques et mise en œuvre du plâtre :	26
1.7.7. Avantages et inconvénients du plâtre :	27
1.7.8 Utilisation de plâtre :	28
1.8 Normes et prénormes pour les granulats biosourcés (projet NG2B) :	29
1.9 Méthodes de traitement des granulats biosourcés.....	30
1.9.1 Traitements alcalins : NaOH, Ca(OH) ₂ à différentes concentrations (3 %, 6 %, 9 %):	30
1.9.2 Traitements thermiques : températures et durées d'exposition :	31
1.9.3 Traitements physico-chimiques : ultrason, enrobage minéral, carbonatation : ..	32
1.9.4 Traitements hydrophobes : silanes, HDTMS :	33
1.9.5 Effets des traitements sur la microstructure, cristallinité et compatibilité avec la matrice cimentaire :	34
Conclusion :	35

Chapitre2 : influence des granulats biosourcés sur les propriétés des mortiers

Introduction :	38
2.1 Propriétés à l'état frais.....	38
2.1.1 Maniabilité et consistance :	38
2.1.2 Teneur en air occlus et densité fraîche :	39
2.2 Propriétés à l'état durci :	40
2.2.1 Résistances mécaniques (compression, flexion, traction) :	41
2.2.2 Relation entre le pourcentage de substitution et les performances mécaniques :	42
2.2.3Module d'élasticité et comportement en déformation :	43
2.3 Paramètres de transfert :	44
2.3.1Absorption d'eau et porosité accessible :	44

2.3.2 Absorption capillaire :	45
Conclusion :	46

Chapitre 3 : matériaux utilisés et méthodes d'essais

Introduction :	48
3.1 Les matériaux :	48
3.1.1 Le plâtre :	48
3.1.2 Le sable :	49
3.1.3 Le liège :	49
3.1.4 L'eau de gâchage :	50
3.2 Les propriétés physiques des matériaux :	50
3.2.1 La masse volumique apparente et absolue :	50
3.2.2 Analyse granulométrique :	52
3.3 Préparation des échantillons :	56
3.4 Formulation et préparation du mortier :	58
3.4.1 Matériels utilisés :	58
3.4.2 Mode opératoire :(EN196-1) (European Committee for Standardization, 2016) :	59
3.5 Les essais réalisés :	60
3.5.1 Essais réalisés à l'état frais :	60
3.5.1.1 Essai de maniabilité : étalement à la table à secousses.....	60
3.5.1.2 Détermination de la masse volumique :	60
3.5.2 Essais réalisés à l'état durci :	61
3.5.2.1 La densité :	61
3.5.2.2 Dureté superficielle (Shore C) :	61
3.5.2.3 Contrôle par ultrasons :	62
3.5.2.4 Essai de traction par flexion :	62
3.5.2.5 Essai de compression :	63

3.5.2.6 Conductivité thermique :	64
3.5.2.7 Absorption d'eau par capillarité :	64
3.5.2.8 Absorption par immersion totale :	65
3.5.2.9 Porosité accessible à l'eau :	66
3.5.2.10 Essai séchage–mouillage :	66
3.5.2.11 Isolation phonique :	67
Conclusion :	68

Chapitre 4 : résultats et discussion

Introduction :	70
4.1. Mortier à l'état frais :	70
4.1.1 La maniabilité :	70
4.1.2 La masse volumique :	72
4.2. Mortiers à l'état durci :	73
4.2. 1. La densité :	73
4.2.2. Dureté superficielle (Shore C) :	75
4.2.2. Essai ultrasonique (UPV) :	76
4.2.3. Résistance à la traction par flexion :	77
4.2.4. Résistance à la compression :	80
4.2.5. Conductivité thermique :	82
4.2.6. Indicateurs de durabilité :	84
4.2.6.1 Absorption capillaire	84
4.2.6.2. Absorption par immersion totale :	86
4.2.6.2 Porosité accessible à l'eau :	87
4.2.7. Essai séchage–mouillage :	88
4.2.7.1. Essai ultrasonique (UPV) :	88
4.2.7.2. Essai de résistance à la compression :	89
4.2.8. Isolation phonique :	91

Conclusion :	96
Conclusion générale et perspective	99
Bibliographies	101

Listes des figures

Figure 1 : granulats biosourcés à base de chanvre (abbas, 2021) (page & all, 2016)	7
Figure 2 : processus de transformation du liège en granulats (Jnyanendra & al, 2016).....	7
Figure 3 : exemples de granulats biosourcés utilisés dans les matériaux de construction (Mathilde, 2021)	8
Figure4 : répartition des surfaces forestières dans les pays méditerranéens (BESACIER & al, 2012).....	9
Figure 5 : structure morphologie et composition chimique des granulats biosourcés.....	11
Figure 6: évaluation du taux de séchage et de l'absorption d'eau des granulats poreux en fonction du temps (Nael-redolfi, 2016)	12
Figure 7: Courbes de distribution granulométrique des granulats biosourcés selon différentes méthodes d'analyse (Sandrine & al, 2016)	13
Figure 8 : effet de la température moyenne sur la conductivité thermique des matériaux d'isolation : (a) matériaux inorganique ; (b) matériaux organique (Anh, 2021).....	14
Figure 9 : Distribution du liège dans les bassins méditerranéens occidental (BESACIER & al, 2012).....	15
Figure 10 : Différents types de liège (Kamel, 2021)	16
Figure 11 : Bouchons en liège utilisés dans l'industrie des bouteilles (Natural Cork Council, s.d.)	17
Figure 12 : Application du liège dans l'isolation des bâtiments (Council, s.d.).....	17
Figure 13: Phase du plâtre (Sarah, 2023)	20
Figure 14: différents système de cristallisation du gypse (Céline, 2011).....	22
Figure 15: l'extraction du gypse à ciel ouvert et souterraine	23
Figure16: concassage du gypse (Fethallah A. H., 2023)	23
Figure 17: four de cuisson du gypse (Fethallah A. H., 2023)	24
Figure 18: Comment le gypse retarde la transmission de la chaleur (Fethallah A. H., 2023)	26
Figure 19: Influence du rapport E/P sur la densité (Fethallah A. H., 2023).....	26
Figure20: Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques (Fethallah A. H., 2023)	27
Figure 21: Effet du traitement alcalin des granulats de paille de blé à différentes concentrations (3 %, 6 % et 9 %) sur l'absorption capillaire de l'eau. (Hamraoui & al, 2025)	31

Figure 22: Spectres FTIR des granulats biosourcés traités à différentes températures (Faria & all, 2026).....	32
Figure 23: Schéma du traitement par ultrasons et du phénomène de cavitation (Higuchi & all, 2019).....	33
Figure 24: Schéma de la silanisation : formation d'une couche hydrophobe sur des granulats biosourcés	34
Figure 25: Influence du taux de substitution biosourcés sur l'étalement	39
Figure 26: Relation entre Air occlus et densité fraîche des mortiers.....	40
Figure 27: Évaluation des résistances mécaniques (28 j) des mortiers vs taux de biosourcés.	42
Figure 28: Courbe contrainte-déformation illustrant le comportement mécanique et le module d'élasticité des mortiers biosourcés.....	44
Figure 29: Absorption d'eau des mortiers contenant des granulats biosourcés	45
Figure 30: Cinétique d'absorption capillaire des mortiers biosourcés	46
Figure 31 : plâtre Knauf.....	48
Figure 32 : sable concassé	49
Figure 33 : traitement du liège.....	50
Figure 34 : liège.....	50
Figure 35: la masse volumique absolue.....	51
Figure 36 : la masse volumique apparente	52
Figure 37 : tamis granulométrie.....	53
Figure 38: courbe granulométriques du liège	54
Figure 39: courbe granulométriques du sable.....	55
Figure 40 : les matériaux utilisés.....	57
Figure 41: moule 4*4*16.....	58
Figure 42: Eprouvettes réalisées Ø (80mm) épaisseur de 1 cm	58
Figure 43: malaxeur.....	59
Figure 44: essai de maniabilité	60
Figure 45 : Duromètre Shore C.	61
Figure 46 : appareil d'ultrasons.....	62
Figure 47 : appareil de flexion.....	63
Figure 48 : appareil de compression.....	63
Figure 49: appareil de conductivité thermique	64
Figure 50: le dessiccateur	64

Figure 51 : Absorption d'eau par capillarité.....	65
Figure 52: les échantillons dans l'eau.....	65
Figure 53: appareille porosité accessible à l'eau	66
Figure 54: l'étuve	66
Figure 55: les échantillons dans l'eau.....	67
Figure 56: appareil pour l'essai de l'acoustique	67
Figure 57 : Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements.	71
Figure 58: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements	72
<i>Figure 59 : Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours</i>	<i>74</i>
Figure 60: Variation de la dureté superficielle en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours	75
Figure 61: Variation d'ultrason en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.....	76
Figure 62 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours.....	78
Figure 63: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.....	78
Figure 64 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours.....	81
Figure 65: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.....	81
Figure 66: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours.....	83
Figure 67: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28jours.....	83
Figure 68 : Cinétique d'absorption capillaire au cours du temps en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.	85
Figure 69 : Variation du coefficient l'absorption par immersion totale en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.....	86
Figure 70: Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.....	87

Figure 71: Variation d'ultrason de l'essai séchage–mouillage en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours	88
Figure 72: Variation de la résistance à la compression de l'essai séchage–mouillage en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.	90
Figure 73: Indice d'affaiblissement acoustique R (dB) des mortiers de plâtre-liège T1 (traitement eau chaude) en fonction de la fréquence (Hz) pour différents taux de substitution.	91
Figure 74 : Indice d'affaiblissement acoustique R (dB) des mortiers de plâtre-liège T2 (hornification) en fonction de la fréquence (Hz) pour différents taux de substitution.	91
Figure 75: Indice d'affaiblissement acoustique R (dB) des mortiers de plâtre-liège T3 (traitement à la chaux 1 %) en fonction de la fréquence (Hz) pour différents taux de substitution.	92

Liste des tableaux

Tableau1 : Avantages écologiques des matériaux biosourcés.....	10
Tableau 2 : effets des traitements sur la microstructure, la cristallinité et la compatibilité avec la matrice cimentaire	35
Tableau 3: Types de traitements appliqués au liège et leurs conditions opératoires	49
Tableau 4: les résultats de l'essai de la masse volumique absolue.....	51
Tableau 5: les résultats de l'essai de la masse volumiques apparente.....	52
Tableau 6: les résultats Analyse granulométriques de liège.....	54
Tableau 7: Résultats Analyse granulométrique du sable.....	55
Tableau 8: les différents échantillons et leurs composants.....	56
Tableau 9: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.....	73
Tableau 10: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours et 28 jours.....	77
Tableau 11: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours et 28 jours.....	80
Tableau 12: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours et 28 jours.....	82

Résumé :

Dans le contexte actuel de la construction durable et de la valorisation des matériaux biosourcés, cette étude s'intéresse à l'utilisation des déchets de liège comme granulats légers dans les mortiers à base de plâtre. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'influence du prétraitement des granulats de liège naturel sur les propriétés physiques, mécaniques, thermiques et acoustiques des mortiers de plâtre, afin de développer un matériau plus performant et respectueux de l'environnement.

Trois types de prétraitement ont été étudiés : le traitement à l'eau chaude (T1), l'hornification (T2) et le traitement à la chaux (T3). Les granulats de liège ont été incorporés en substitution du sable à différents taux (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %). Plusieurs essais ont été réalisés à l'état frais et à l'état durci, notamment la maniabilité, la masse volumique, la dureté superficielle, la vitesse ultrasonique, les résistances à la flexion et à la compression, la conductivité thermique, l'absorption d'eau, la porosité, la durabilité par cycles de séchage–mouillage ainsi que l'isolation acoustique.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation du liège entraîne une diminution progressive de la masse volumique des mortiers, permettant d'obtenir des matériaux plus légers. Elle améliore également de manière significative les performances d'isolation thermique grâce à la faible conductivité thermique du liège. En revanche, l'augmentation du taux de liège provoque une hausse de l'absorption d'eau et de la porosité, ainsi qu'une diminution des résistances mécaniques. L'analyse comparative des traitements révèle que le traitement par hornification (T2) offre le meilleur compromis entre propriétés mécaniques, durabilité et comportement à l'état frais, tandis que le traitement à la chaux (T3) procure les meilleures performances thermiques. Les essais acoustiques ont également mis en évidence l'intérêt du liège pour l'amélioration de l'isolation sonore à certaines fréquences.

Cette étude confirme que les mortiers plâtre–liège constituent une solution écologique prometteuse pour le secteur du bâtiment. Le choix du traitement appliqué au liège permet d'orienter les performances du matériau selon les exigences de l'application recherchée.

Mots-clés : Mortier de plâtre, liège naturel, granulats biosourcés, prétraitement, propriétés mécaniques, isolation thermique, isolation acoustique, durabilité.

Abstract:

In the context of sustainable construction and the valorization of bio-based materials, this study investigates the use of cork waste as lightweight aggregates in plaster mortars. The main objective is to evaluate the influence of different pre-treatments applied to natural cork aggregates on the physical, mechanical, thermal, and acoustic properties of plaster mortars, with the aim of developing a more efficient and environmentally friendly building material.

Three pre-treatment methods were studied: hot-water treatment (T1), hornification treatment (T2), and lime treatment (T3). Cork aggregates were used as a partial replacement for sand at different substitution rates (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%). Several tests were carried out in both fresh and hardened states, including workability, bulk density, surface hardness, ultrasonic pulse velocity, flexural and compressive strength, thermal conductivity, water absorption, porosity, durability under wetting–drying cycles, and acoustic insulation.

The results showed that the incorporation of cork leads to a progressive decrease in mortar density, producing lighter materials. It also significantly improves thermal insulation due to the low thermal conductivity of cork. However, increasing the cork content results in higher water absorption and porosity, accompanied by a reduction in mechanical strength. The comparative analysis revealed that the hornification treatment (T2) provides the best compromise between mechanical performance, durability, and fresh-state behavior, whereas the lime treatment (T3) offers the best thermal insulation performance. Acoustic tests also highlighted the potential of cork to improve sound insulation at specific frequencies.

This study confirms that plaster–cork mortars represent a promising eco-friendly solution for the construction sector. The choice of cork pre-treatment makes it possible to tailor the material properties according to the requirements of the intended application.

Keywords: Plaster mortar, natural cork, bio-based aggregates, pre-treatment, mechanical properties, thermal insulation, acoustic insulation, durability.

الملخص :

في إطار التوجه نحو البناء المستدام وتأمين المواد الحيوية الصديقة للبيئة، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام نفايات الفلين كركام خفيف داخل مونة الجبس. ويتمثل الهدف الرئيسي في دراسة تأثير المعالجات المسبقة المختلفة المطبقة على حبيبات الفلين الطبيعي على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية والصوتية لمونة الجبس، بهدف تطوير مادة بناء أكثر كفاءة واستدامة

، ومعالجة الهورنيفكاسيون أو (T1) تمت دراسة ثلاثة أنواع من المعالجة المسبقة للفلين، وهي: المعالجة بالماء الساخن واستُخدمت حبيبات الفلين كبديل جزئي للرمل بنسب تعويض (T3)، والمعالجة بالجير (T2) التجفيف الرطب-الجاف مختلفة بلغت 0% و 25% و 50% و 75% و 100%. كما أُجريت مجموعة من الاختبارات على المونة في الحالة الطرية والمتصلبة، شملت قابلية التشغيل، والكتلة الحجمية، والصلادة السطحية، وسرعة الموجات فوق الصوتية، ومقاومتي الانحناء والضغط، والموصلية الحرارية، وامتصاص الماء، والمسامية، ومقاومة دورات التجفيف والترطيب، إضافة إلى العزل الصوتي.

أظهرت النتائج أن إضافة الفلين تؤدي إلى انخفاض تدريجي في الكتلة الحجمية للمونة، مما يسمح بالحصول على مواد أخف وزناً. كما ساهمت بشكل ملحوظ في تحسين العزل الحراري بفضل انخفاض الموصلية الحرارية للفلين. في المقابل، أدى ارتفاع نسبة الفلين إلى زيادة امتصاص الماء والمسامية وانخفاض الخصائص الميكانيكية. كما بينت الدراسة المقارنة حققت أفضل توازن بين الأداء الميكانيكي والمتانة وخصائص الحالة الطرية، في حين (T2) أن معالجة الهورنيفكاسيون أفضل أداء من ناحية العزل الحراري. وأظهرت اختبارات العزل الصوتي كذلك فعالية (T3) قدمت المعالجة بالجير الفلين في تحسين الأداء الصوتي عند بعض الترددات.

تؤكد هذه الدراسة أن مونة الجبس المدعمة بالفلين تمثل حلاً بيئياً واعداً في مجال البناء، وأن اختيار نوع المعالجة المسبقة للفلين يسمح بتوجيه خصائص المادة وفق متطلبات الاستعمال المختلفة.

الكلمات المفتاحية: مونة الجبس، الفلين الطبيعي، الركام الحيوي، المعالجة المسبقة، الخصائص الميكانيكية، العزل الحراري، العزل الصوتي، المتانة

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur du bâtiment et des travaux publics occupe une place essentielle dans le développement économique et social, mais il est également responsable d'une consommation importante de ressources naturelles et d'émissions significatives de gaz à effet de serre. Parmi les matériaux les plus utilisés dans ce secteur, le ciment Portland est largement dominant en raison de ses bonnes performances mécaniques et de sa polyvalence. Cependant, sa fabrication nécessite des températures élevées et engendre des émissions importantes de dioxyde de carbone, ce qui pose aujourd'hui de sérieux problèmes environnementaux. Dans ce contexte, la recherche de matériaux alternatifs plus respectueux de l'environnement constitue un enjeu majeur, notamment dans le domaine du génie civil et des matériaux de construction.

Face à ces préoccupations, l'utilisation de liants alternatifs au ciment Portland suscite un intérêt croissant. Parmi ces liants, le plâtre apparaît comme une solution particulièrement intéressante. Issu de la transformation du gypse à des températures relativement faibles, le plâtre présente une énergie grise nettement inférieure à celle du ciment Portland. Cette caractéristique permet de réduire la consommation énergétique et l'impact environnemental liés à sa production. De plus, le plâtre se distingue par une prise rapide, une facilité de mise en œuvre et une bonne qualité de finition, ce qui explique son utilisation traditionnelle dans de nombreuses applications du bâtiment, principalement non structurales.

Ces dernières années, le champ d'application du plâtre tend à s'élargir grâce aux travaux de recherche visant à améliorer ses performances et à développer de nouveaux matériaux composites. L'association du plâtre avec des granulats alternatifs constitue notamment une piste prometteuse pour la formulation de mortiers plus légers et aux propriétés fonctionnelles améliorées. Dans cette optique, l'intégration de granulats biosourcés s'inscrit pleinement dans une démarche de construction durable.

Les granulats biosourcés, issus de ressources renouvelables, permettent de limiter l'exploitation des ressources minérales naturelles tout en apportant des avantages spécifiques aux matériaux de construction. Parmi eux, le liège naturel se distingue par sa faible densité, sa structure cellulaire fermée et sa faible conductivité thermique. Provenant de l'écorce du chêne-liège, le liège est un matériau renouvelable et respectueux de l'environnement, dont l'exploitation ne nécessite pas l'abattage de l'arbre. Ces propriétés font du liège un candidat

intéressant pour la formulation de mortiers légers à base de plâtre, destinés notamment à des applications d'allègement et d'isolation thermique.

Toutefois, l'incorporation du liège naturel dans une matrice plâtreuse présente certaines limites. En raison de sa forte porosité et de sa capacité élevée d'absorption d'eau, le liège peut perturber la prise du plâtre et affecter les performances mécaniques du matériau composite. De plus, la qualité de l'adhérence entre le liège et la matrice minérale joue un rôle déterminant dans le comportement global du mortier. Ces aspects soulignent l'importance de la compatibilité entre les granulats biosourcés et le liant utilisé.

Afin de pallier ces difficultés, le prétraitement des granulats de liège apparaît comme une solution pertinente. Ce prétraitement vise principalement à réduire l'absorption d'eau du liège, à améliorer son interaction avec la matrice plâtreuse et à limiter les risques de dégradation du matériau composite. Plusieurs techniques peuvent être envisagées, telles que les traitements de surface ou l'imprégnation par des solutions adaptées, permettant d'optimiser le comportement du liège au sein du mortier.

Dans ce contexte, ce travail de Master s'inscrit dans une démarche visant à valoriser le plâtre comme liant alternatif au ciment Portland pour le développement de matériaux de construction plus durables. L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence du prétraitement des granulats de liège naturel sur les propriétés des mortiers à base de plâtre, notamment en termes de comportement à l'état frais, de performances mécaniques et de durabilité.

Cette étude vise à améliorer la compréhension du comportement des mortiers à base de plâtre et de liège, tout en contribuant au développement de solutions constructives innovantes répondant aux exigences actuelles du génie civil en matière de performance et de durabilité environnementale.

Afin d'atteindre ces objectifs, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Après une **introduction générale** présentant le contexte de l'étude, la problématique de recherche ainsi que les objectifs poursuivis, le **premier chapitre** est consacré à une synthèse bibliographique portant sur les matériaux biosourcés et leur intégration dans le domaine de la construction. Le **deuxième chapitre** traite de l'influence des granulats biosourcés sur les propriétés des mortiers, en mettant l'accent sur les principaux résultats rapportés dans la littérature scientifique. Le **troisième chapitre** décrit les matériaux utilisés ainsi que les différentes méthodes expérimentales adoptées pour la

réalisation de cette étude. Le **quatrième chapitre** présente les résultats obtenus et leur discussion à travers une analyse approfondie des performances des mortiers élaborés.

Enfin, le mémoire s'achève par une **conclusion générale** résumant les principaux résultats de l'étude, les conclusions tirées ainsi que les **perspectives** de recherche envisagées.

Problématique et objectifs du mémoire :

- Problématique :

Dans un contexte de transition vers des matériaux de construction plus durables, le plâtre apparaît comme un liant alternatif pertinent au ciment Portland, notamment pour des applications non structurelles. Son faible impact environnemental, sa facilité de mise en œuvre et sa disponibilité en font un matériau attractif pour le développement de mortiers innovants. Par ailleurs, l'intégration de granulats biosourcés, tels que le liège naturel, permet d'envisager des matériaux plus légers et présentant de meilleures performances thermiques.

Cependant, l'association du plâtre avec des granulats de liège naturel soulève plusieurs difficultés d'ordre technologique. La forte porosité et la capacité élevée d'absorption d'eau du liège peuvent perturber la prise du plâtre, modifier le rapport eau/liant effectif et entraîner une dégradation des propriétés mécaniques du mortier. De plus, une mauvaise adhérence entre le granulat biosourcé et la matrice plâtreuse peut compromettre la cohésion du matériau composite et sa durabilité.

Dès lors, la problématique centrale de ce mémoire peut être formulée comme suit :

- Comment le prétraitement des granulats de liège naturel influence-t-il le comportement à l'état frais, les performances mécaniques et la durabilité des mortiers à base de plâtre, en vue d'optimiser leur formulation pour des applications en génie civil ?

Objectifs du mémoire :

- Objectif général :

Étudier l'influence du prétraitement des granulats de liège naturel sur les propriétés des mortiers à base de plâtre, dans une optique de développement de matériaux plus durables et performants pour le génie civil.

- **Objectifs spécifiques :**

- Analyser l'effet du prétraitement du liège sur son absorption d'eau et son comportement dans le mélange plâtre-eau.
- Étudier l'influence de l'incorporation de liège prétraité sur les propriétés à l'état frais des mortiers à base de plâtre.
- Évaluer les performances mécaniques des mortiers plâtre-liège à l'état durci.

Chapitre 1 :
Synthèse bibliographiques

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique portant sur les granulats biosourcés et leur intégration dans les mortiers écologiques. Le secteur du bâtiment est aujourd'hui confronté à des enjeux environnementaux majeurs, notamment liés à la forte consommation énergétique et aux émissions de CO₂, ce qui soulève la question de sa compatibilité avec le développement durable.

Dans ce contexte, un intérêt croissant est accordé aux matériaux biosourcés tels que le chanvre, le liège et les déchets agricoles. Ces matériaux présentent des caractéristiques intéressantes, tant sur le plan environnemental que sur le plan technique, ce qui justifie leur utilisation dans des formulations de mortiers écologiques.

Plusieurs solutions peuvent être envisagées afin d'améliorer leurs performances ; cependant, nous nous sommes particulièrement intéressés aux différentes méthodes de traitement appliquées aux granulats biosourcés.

À la fin de ce chapitre, nous mettrons en évidence l'influence de ces traitements sur les propriétés générales du mortier écologique, notamment en termes de comportement et de compatibilité avec la matrice cimentaire.

1.1 Généralités sur les matériaux biosourcés :

Les matériaux biosourcés correspondent à des matériaux de construction issus de ressources naturelles renouvelables, principalement d'origine végétale, et utilisés dans le domaine du génie civil. Ils proviennent de matières premières biologiques telles que les fibres végétales ou les produits issus de filières agricoles et forestières, ce qui les distingue des matériaux classiques basés sur des ressources non renouvelables. Le recours à ces matériaux s'inscrit dans une démarche de développement durable visant à réduire l'impact environnemental du secteur de la construction, tout en maintenant des performances techniques adaptées aux exigences du génie civil. Parmi ces matériaux, les granulats biosourcés occupent une place importante. Il s'agit de particules d'origine végétale intégrées dans la formulation des mortiers et des bétons écologiques. Contrairement aux granulats minéraux traditionnels, ils sont issus de la biomasse et présentent une composition riche en cellulose, hémicellulose et lignine, ce qui influence leur comportement au sein des matériaux composites. Sur le plan physique, ces granulats se caractérisent généralement par une faible densité, une porosité élevée ainsi qu'une capacité importante d'absorption d'eau, des

propriétés qui impactent directement les performances des mortiers dans lesquels ils sont incorporés (AMZIANE, 2020) (NG2B, 2024). Les granulats biosourcés peuvent être classés selon leur origine et leur nature. Parmi les principales catégories, on distingue :

- **Les granulats à base de chanvre :** Ils sont obtenus à partir de la partie ligneuse de la tige de chanvre, appelée chènevotte. Ce type de granulat est largement utilisé dans les mortiers et bétons biosourcés en raison de sa légèreté et de sa forte porosité. Il contribue à alléger les matériaux et à améliorer certaines de leurs propriétés fonctionnelles. Toutefois, sa forte capacité d'absorption d'eau impose des ajustements dans la formulation des mélanges (AMZIANE, 2020) (NG2B, 2024).



Figure 1 : granulats biosourcés à base de chanvre (abbas, 2021) (page & all, 2016)

- **Les granulats à base de liège :** Issus de l'écorce du chêne-liège, ces granulats présentent une structure cellulaire fermée, une très faible densité et une bonne stabilité dimensionnelle. Leur incorporation dans les mortiers permet d'obtenir des matériaux légers avec des caractéristiques spécifiques, notamment en termes de comportement mécanique et de compatibilité avec les liants (NG2B, 2024) (AMZIANE, 2020).



Figure 2 : processus de transformation du liège en granulats (Jnyanendra & al, 2016)

➤ **Les granulats issus de déchets agricoles (ex. : sciure, coques) :**

Cette catégorie regroupe différents sous-produits issus des activités agricoles ou forestières, tels que la sciure de bois ou les coques végétales. Leur valorisation dans les matériaux de construction présente un intérêt environnemental notable en réduisant les déchets et en optimisant l'utilisation des ressources. Néanmoins, la variabilité de leur origine entraîne une dispersion de leurs propriétés physiques, ce qui nécessite une caractérisation préalable avant leur utilisation dans les mortiers écologiques (NG2B, 2024).



*Figure 3 : exemples de granulats biosourcés utilisés dans les matériaux de construction
(Mathilde, 2021)*

1.2 Contexte environnemental et développement durable dans la construction :

Le secteur de la construction est considéré comme l'un des plus impactant pour l'environnement, en raison de la forte consommation de ressources naturelles, de la demande énergétique élevée et de la production importante de déchets qu'il génère. L'ensemble des étapes liées au cycle de vie des matériaux, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la réalisation des ouvrages, contribue de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'à la dégradation des écosystèmes. Face à ces enjeux, une prise de conscience progressive s'est développée, mettant en évidence la nécessité de repenser les pratiques constructives traditionnelles et d'adopter des approches plus respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, la notion de développement durable s'est progressivement imposée comme une référence dans le domaine de la construction. Elle repose sur trois piliers fondamentaux : la protection de l'environnement, la viabilité économique et l'équité sociale. Appliqué au génie civil, ce concept vise à concevoir des ouvrages capables de répondre aux besoins actuels tout en limitant leurs impacts environnementaux et en préservant les ressources pour les générations futures. La construction durable cherche ainsi à réduire la consommation d'énergie, à limiter les émissions polluantes et à promouvoir une gestion plus responsable des matériaux. Dans cette

perspective, le choix des matériaux constitue un élément déterminant. En effet, les matériaux conventionnels, bien qu'ils présentent de bonnes performances mécaniques, sont souvent associés à une empreinte environnementale importante liée à leur mode de production et à l'utilisation de ressources non renouvelables. Pour cette raison, le recours à des matériaux alternatifs et écoresponsables apparaît comme une solution pertinente pour réduire les impacts environnementaux du secteur. L'utilisation de matériaux issus de ressources renouvelables permet notamment de limiter la consommation de matières premières non renouvelables et de valoriser les ressources naturelles disponibles. Ainsi, le développement de matériaux durables s'inscrit dans une démarche de transition écologique du secteur du bâtiment. Cette orientation favorise l'émergence de solutions innovantes, telles que les matériaux et granulats biosourcés, qui représentent une alternative prometteuse aux matériaux traditionnels dans une optique de construction plus respectueuse de l'environnement (Nitu, 2025).

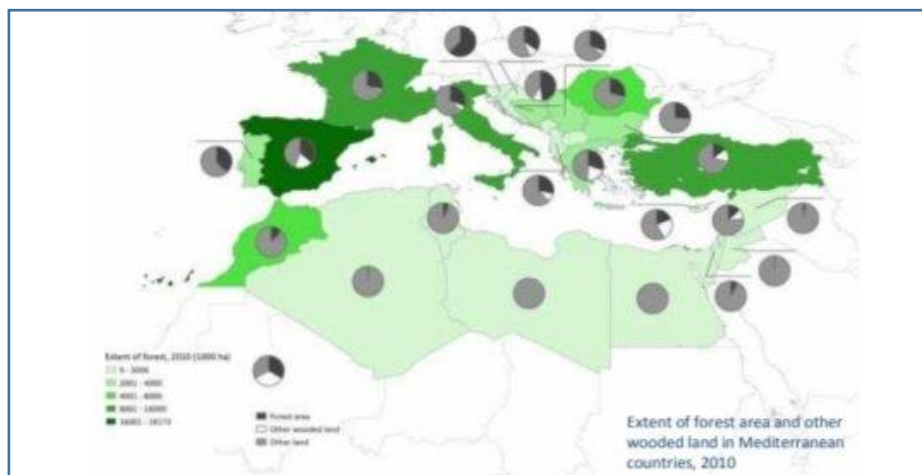


Figure4 : répartition des surfaces forestières dans les pays méditerranéens (BESACIER & al, 2012)

1.3 Avantages écologiques : réduction des émissions de CO₂, recyclage des déchets agricoles :

L'utilisation des déchets agricoles dans les matériaux de construction présente des avantages environnementaux significatifs, notamment en termes de réduction des émissions de dioxyde de carbone et d'amélioration de la gestion des déchets. En effet, les matériaux conventionnels du bâtiment sont généralement associés à une forte consommation de ressources naturelles et d'énergie, ce qui engendre d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Dans cette perspective, le remplacement partiel des granulats traditionnels par des

résidus agricoles permet de limiter l'exploitation des ressources naturelles ainsi que l'énergie nécessaire à la production des matériaux. Cette approche contribue indirectement à la réduction des émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux, depuis leur fabrication jusqu'à leur utilisation, et participe ainsi à la diminution de l'empreinte carbone du secteur. Par ailleurs, la valorisation des déchets agricoles constitue une solution pertinente pour réduire leur accumulation et les impacts environnementaux liés à leur élimination. Ces résidus peuvent être recyclés et réutilisés comme matières premières dans la fabrication de matériaux de construction, ce qui s'inscrit dans une logique d'économie circulaire. Ainsi, l'intégration des déchets agricoles dans les matériaux de construction permet non seulement d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles, mais également de promouvoir des pratiques plus durables dans le secteur du bâtiment (G. & al, 2024) (Jnyanendra & al, 2016).

Tableau1 : Avantages écologiques des matériaux biosourcés

Avantage écologique	Description
Réduction des émissions de CO2	Diminution de l'empreinte carbone grâce à l'utilisation de matériaux durables
Recyclage des déchets	Intégration de matériaux recyclés dans le domaine de la construction
Utilisation de ressources renouvelables	emploi de matières premières naturelles et renouvelables
Réduction de l'impact environnemental	Contribution au développement durable

1.4 Caractéristiques physico-chimiques des matériaux biosourcés :

1. 4.1 Structure morphologique et composition (cellulose, hémicellulose, lignine) :

Les matériaux biosourcés d'origine végétale présentent des propriétés physico-chimiques particulières, directement liées à leur structure interne ainsi qu'à leur composition chimique. Ils sont généralement issus de biomasses lignocellulosiques, dont l'organisation influence fortement leur comportement lorsqu'ils sont intégrés dans des matériaux de construction. Sur le plan morphologique, ces matériaux se distinguent par une structure hétérogène et poreuse, résultant de l'organisation cellulaire des fibres végétales. Cette structure est formée de cellules allongées associées à des cavités internes, constituant un réseau poreux dont les caractéristiques varient selon l'origine végétale et les procédés de transformation. Cette organisation interne joue un rôle important dans la détermination des

propriétés physiques, notamment la porosité, la capacité d'absorption d'eau et la masse volumique apparente, qui sont des paramètres essentiels pour leur utilisation dans les mortiers et bétons biosourcés. La composition chimique des matériaux biosourcés repose principalement sur trois constituants majeurs : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine (M'hamed & al, 2021) (Ratsimbazafy & al, 2022).

- La cellulose : constitue l'élément structural principal des fibres végétales. Elle assure en grande partie la résistance mécanique de la paroi cellulaire.
- L'hémicellulose : associée à la cellulose, elle participe à la cohésion de la structure végétale et influence la sensibilité du matériau à l'humidité.
- La lignine : agit comme un liant naturel entre les fibres, apportant rigidité et stabilité à l'ensemble de la structure.

L'interaction entre ces trois composants confère aux matériaux biosourcés des propriétés spécifiques, notamment en ce qui concerne leur comportement vis-à-vis des liants minéraux (Ratsimbazafy & al, 2022). Ainsi, la compréhension de leur structure morphologique et de leur composition chimique est essentielle pour analyser leurs performances et adapter les formulations des mortiers et bétons biosourcés (M'hamed & al, 2021).

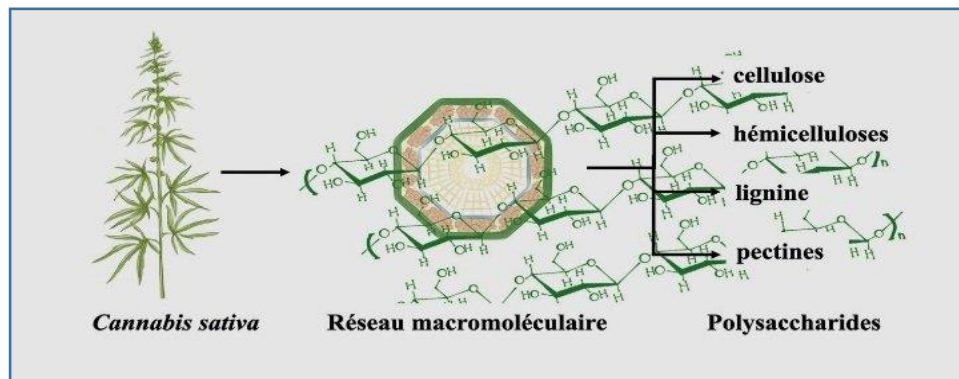


Figure 5 : structure morphologie et composition chimique des granulats biosourcés

1.4.2 Propriétés physiques : porosité, densité apparente, absorption d'eau :

Les granulats biosourcés présentent des propriétés physiques particulières liées à leur origine végétale et à leur structure interne, ce qui influence directement leur comportement dans les mortiers écologiques (NG2B, 2024). Parmi ces propriétés :

- La porosité : Elle constitue une caractéristique essentielle des granulats biosourcés. Elle provient de leur structure interne composée de cavités et de pores de tailles variées, ce qui favorise les échanges avec l'eau et l'air (NG2B, 2024).
- La densité apparente : Les granulats biosourcés présentent généralement une faible densité apparente comparativement aux granulats minéraux, en raison de la présence importante de vides internes. Cette propriété contribue à l'allègement des mortiers, mais nécessite une adaptation des formulations (NG2B, 2024).
- L'absorption d'eau : En lien direct avec leur porosité, ces granulats possèdent une forte capacité d'absorption d'eau. Cette propriété influence le rapport eau/liant du mortier ainsi que son comportement à l'état frais et durci (NG2B, 2024).

Ainsi, ces propriétés sont étroitement liées et doivent être prises en compte pour assurer une formulation adaptée et des performances satisfaisantes.

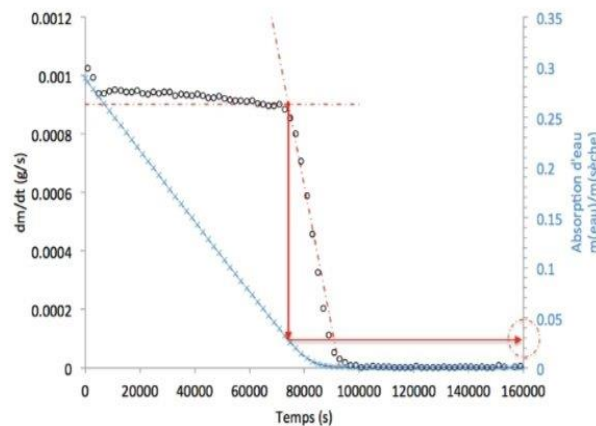


Figure 6: évaluation du taux de séchage et de l'absorption d'eau des granulats poreux en fonction du temps (Nael-redolfi, 2016)

1.4.3 Granulométrie et distribution des tailles de particules :

La granulométrie des granulats biosourcés correspond à la répartition des tailles des particules et constitue un paramètre clé dans la formulation des mortiers biosourcés (Sandrine & al, 2016) (Zengfeng & al, 2015). Les principaux aspects sont :

- Distribution granulométrique : Les granulats biosourcés présentent généralement une distribution hétérogène en raison de leur origine végétale et des procédés mécaniques comme le broyage ou le tamisage.

- Influence sur la compacité : La répartition des tailles des particules conditionne l'agencement des grains et la compacité du squelette granulaire, ce qui impacte directement la structure du mortier.
- Effet sur la maniabilité : Une proportion importante de particules fines augmente la surface spécifique et peut entraîner une demande en eau plus élevée. À l'inverse, des particules plus grossières peuvent influencer la cohésion du mélange
- Méthodes de caractérisation : Le tamisage est la méthode la plus utilisée, mais il peut être complété par des techniques comme l'analyse d'images afin de mieux représenter la distribution réelle des particules.

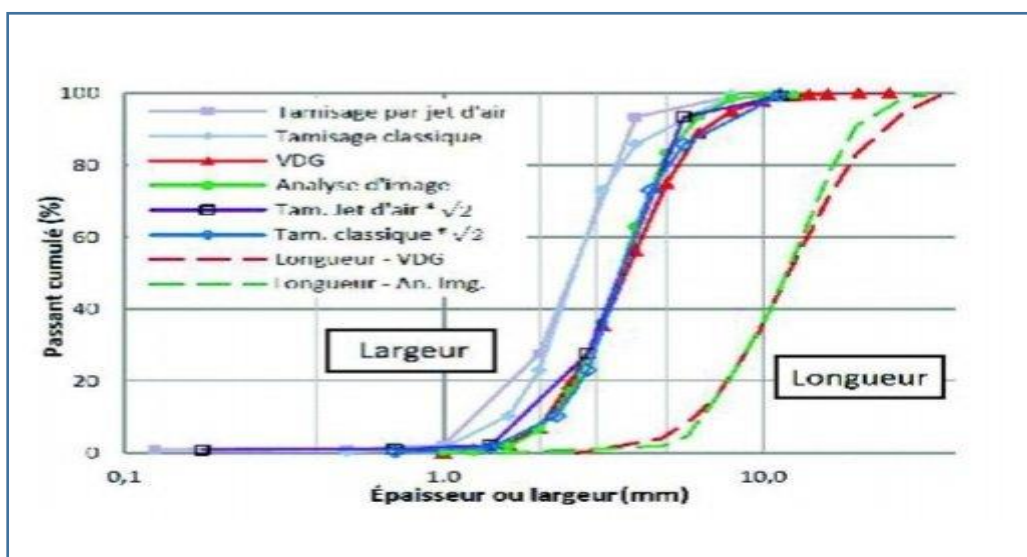


Figure 7: Courbes de distribution granulométrique des granulats biosourcés selon différentes méthodes d'analyse (Sandrine & al, 2016)

1.4.4 Conductivité thermique et propriétés hygrothermiques :

Les propriétés thermiques et hygrothermiques des matériaux biosourcés jouent un rôle important dans leur utilisation en construction, notamment pour les performances énergétiques des bâtiments (Ntimugura & al, 2020) (Hussain & al). Parmi ces propriétés :

- La conductivité thermique : Elle représente la capacité du matériau à transmettre la chaleur. Les matériaux biosourcés présentent généralement une faible conductivité thermique grâce à leur structure poreuse contenant de l'air, ce qui leur confère un bon pouvoir isolant.
- Le comportement hygroscopique : Ces matériaux ont la capacité d'absorber, de stocker et de restituer l'humidité en fonction des conditions ambiantes, en raison de leur composition végétale.

- Interaction chaleur-humidité : Les transferts de chaleur et d'humidité sont liés. Une augmentation de la teneur en eau peut entraîner une hausse de la conductivité thermique et influencer les performances du matériau.
- Impact sur le confort : La capacité de régulation de l'humidité permet d'améliorer le confort hygrothermique à l'intérieur des bâtiments.

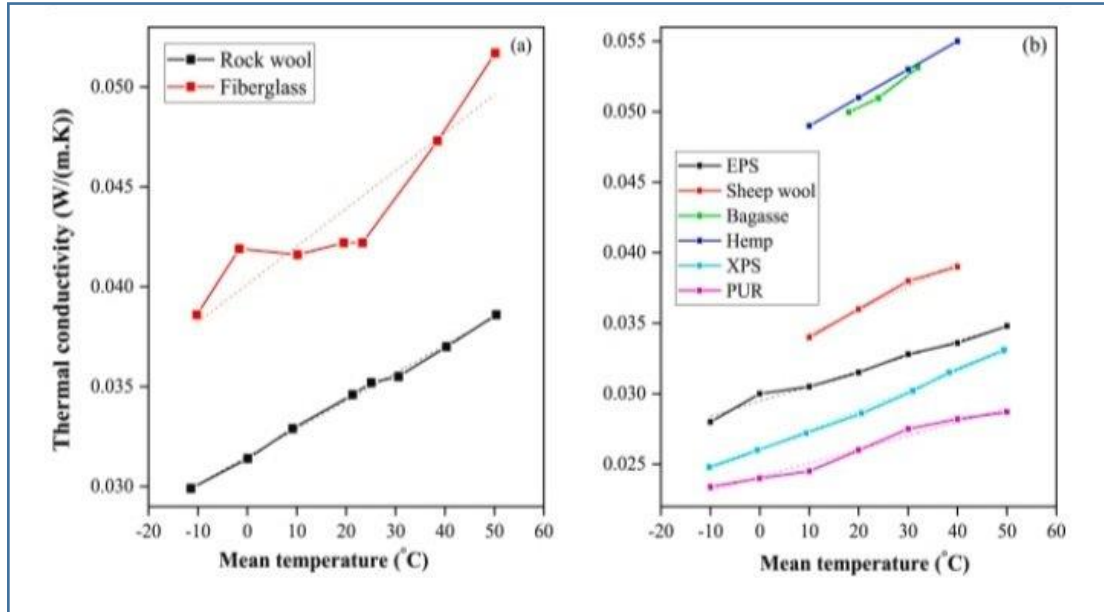


Figure 8 : effet de la température moyenne sur la conductivité thermique des matériaux d'isolation : (a) matériaux inorganique ; (b) matériaux organique (Anh, 2021)

1.5 Le liège :

1.5.1 Provenance :

Le liège est extrait de l'écorce du chêne-liège (*Quercus suber*), que l'on trouve principalement au Portugal, en Espagne et en Algérie, où les conditions climatiques sont favorables, caractérisées par des étés secs et des hivers humides. On le trouve également, dans une moindre mesure, dans d'autres pays comme le Maroc, la Tunisie, l'Italie et la France (Panesar & all, 2012).

Statistiquement, l'Algérie se classe troisième au niveau mondial après le Portugal et l'Espagne en termes de production de matière première, avec environ 18 %. Malgré cela, l'exploitation de cette ressource reste limitée, ce qui place l'Algérie en bas du classement dans ce domaine.

Les forêts de chêne-liège en Algérie sont principalement concentrées dans les régions semi-humides au nord du bassin méditerranéen (BESACIER & al, 2012).

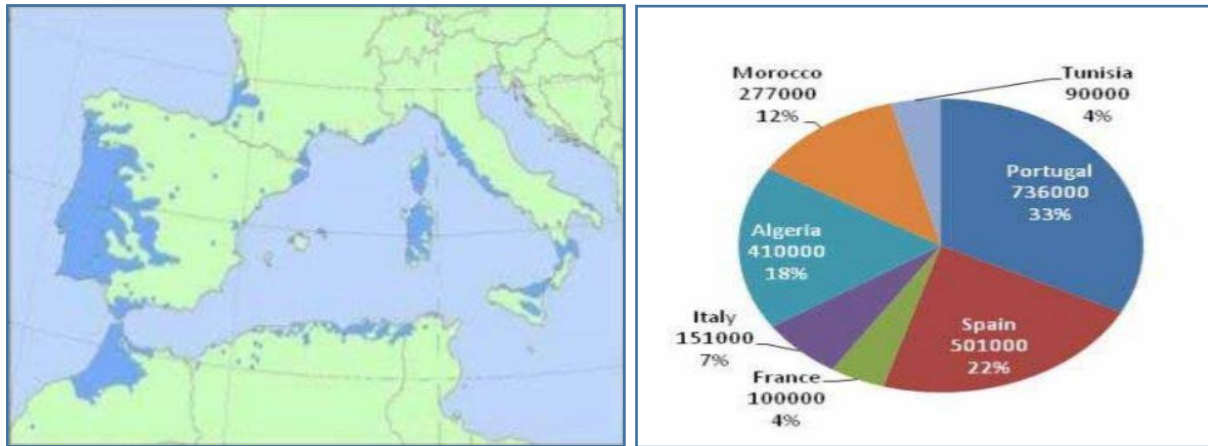


Figure 9 : Distribution du liège dans les bassins méditerranéens occidentaux (BESACIER & al, 2012)

1.5.2. Les différents types de liège :

Les chênes lièges se caractérisent par leur longue durée de vie, généralement comprise entre 250 et 350 ans. Avec l'âge, l'activité du tissu responsable de la formation du liège (la phlogène) diminue, entraînant une réduction progressive de l'épaisseur du liège produit. C'est pourquoi la période de vie la plus rentable pour la récolte du liège se situe entre 150 et 200 ans.

La récolte du liège commence lorsque le tronc atteint un diamètre d'environ 25 cm et se répète périodiquement tous les 9 à 12 ans. Tout au long de son cycle de vie, l'arbre produit différents types de liège, dont les caractéristiques varient selon le nombre de récoltes.

Le liège se divise en trois grandes catégories. Le liège mâle, issu de la première récolte, se caractérise par une structure irrégulière, une texture rugueuse et dure, et une grande fragilité avec des fissures visibles. Il convient donc à des usages spécifiques tels que la fabrication de panneaux, de matériaux isolants et, après transformation, de semelles de chaussures. Le liège de la deuxième récolte, dit liège de seconde génération, présente une meilleure uniformité que le liège de première génération, mais sa qualité reste insuffisante pour certaines applications de précision, comme la fabrication de bouchons de bouteille.

Le liège de la troisième récolte et des suivantes, dit liège de propagation, est considéré comme étant de la plus haute qualité. Il se caractérise par une uniformité accrue et des propriétés parfaitement adaptées à la fabrication de bouchons de bouteille, l'une des applications les plus rentables du marché du liège. Il est à noter que tous les types de liège, quelle que soit leur qualité, peuvent être transformés en granulés utilisés dans diverses applications industrielles (Silva & al, 2005).

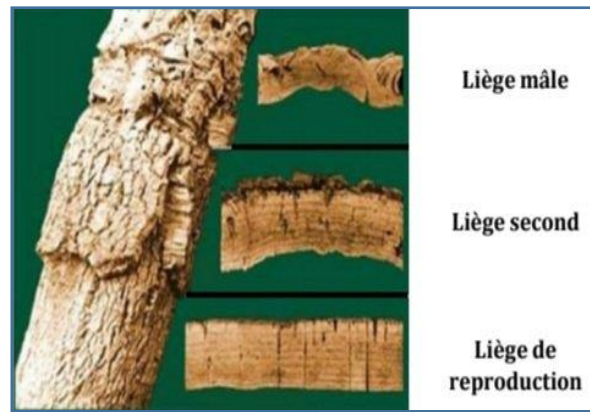


Figure 10 : Différents types de liège (Kamel, 2021)

1.5.3 Propriétés du liège :

Le liège est un matériau naturel remarquable par ses caractéristiques physiques et mécaniques. Ses principales propriétés sont les suivantes (Ziregue & al, 2016) (Karade, 2015) (Panesar & all, 2012) :

- **Légèreté** : Le liège a une faible densité grâce à l'air emprisonné dans ses cellules, ce qui le rend léger.
- **Matériau renouvelable et écologique** : C'est une ressource naturelle qui se renouvelle et respecte l'environnement, réduisant ainsi l'impact écologique.
- **Faible combustibilité** : Le liège a besoin de beaucoup d'oxygène pour brûler et forme une couche carbonisée qui limite la propagation du feu.
- **Réduction des émissions de CO₂** : Son utilisation contribue à diminuer les émissions de dioxyde de carbone.
- **Recyclable** : Il peut être recyclé et réutilisé dans diverses applications.
- **Imperméabilité** : Il résiste bien au passage des liquides et des gaz grâce à sa structure riche en subérine et lignine.
- **Durabilité** : Sa faible perméabilité le protège contre les agressions extérieures et lui permet de garder ses propriétés longtemps.
- **Élasticité et flexibilité** : Le liège peut se comprimer facilement et retrouver en grande partie son volume initial après déformation.
- **Résistance à la biodégradation** : Il est peu affecté par la dégradation biologique.
- **Absorption des chocs** : Sa structure lui permet d'amortir efficacement les chocs
- **Isolation thermique et phonique** : Grâce à l'air dans ses cellules, il possède une faible conductivité thermique et acoustique.

- **Composition chimique :** Le liège est principalement constitué de subérine, lignine et polysaccharides, responsables de ses propriétés physiques et mécaniques.

1.5.4 Applications du liège :

- **Industrie des bouchons et matériaux traditionnels :**
 - Le liège est utilisé pour fabriquer des bouchons de bouteilles et des produits composites.
 - Propriétés exploitées : légèreté, compressibilité, résistance thermique et acoustique (Silva & al, 2005).



Figure 11 : Bouchons en liège utilisés dans l'industrie des bouteilles (Natural Cork Council, s.d.)

- **Isolation thermique et acoustique dans le bâtiment :**
 - L'ajout de liège dans les mortiers et bétons améliore l'isolation sans augmenter significativement le poids.
 - Idéal pour les constructions légères et durables (Panesar & all, 2012).



Figure 12 : Application du liège dans l'isolation des bâtiments (Council, s.d.)

➤ **Applications innovantes et matériaux composites avancés :**

- Développement de nouvelles solutions utilisant les propriétés mécaniques et écologiques du liège.
- Intégration dans des matériaux composites pour le design et la construction. (Gil, 2015)

➤ **Bétons légers et performance thermique :**

- Incorporation de granulés de liège dans les bétons légers pour améliorer l'isolation thermique.
- Maintien de l'intégrité structurelle tout en réduisant la densité (Ziregue & al, 2016).

➤ **Compatibilité liège-ciment :**

- La taille et la concentration des granulés de liège influencent la qualité et l'efficacité dans les matériaux de construction.
- Important pour optimiser les propriétés mécaniques et thermiques (Karade, 2015).

1.6 Les mortiers écologiques :

1.6.1 Composition et formulation des mortiers biosourcés :

Les mortiers biosourcés s'inscrivent dans une approche de construction durable visant à limiter les impacts environnementaux des matériaux tout en conservant des performances adaptées aux exigences du bâtiment. Ils reposent sur des principes similaires à ceux des mortiers traditionnels, mais se distinguent par l'intégration de constituants d'origine renouvelable. La composition des mortiers biosourcés comprend généralement un liant minéral, des granulats biosourcés, de l'eau et, dans certains cas, des adjuvants. Le liant, tel que le ciment ou la chaux, joue un rôle essentiel dans la cohésion du mélange et le développement des performances mécaniques. Son choix doit être adapté afin d'assurer une bonne compatibilité avec les granulats d'origine végétale et garantir la stabilité du matériau dans le temps. Les granulats biosourcés représentent l'élément principal de différenciation par rapport aux mortiers classiques. Issus de ressources végétales, ils permettent de remplacer partiellement les granulats minéraux, ce qui conduit à des matériaux plus légers et présentant des propriétés intéressantes, notamment sur le plan thermique. Cependant, leur structure poreuse et leur capacité élevée d'absorption d'eau nécessitent une adaptation de la formulation, en particulier du rapport eau/liant, afin d'assurer une bonne maniabilité et une homogénéité satisfaisante à l'état frais. Ainsi, la formulation des mortiers biosourcés repose sur un équilibre entre les différents constituants, dont les proportions influencent directement les propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci. L'objectif est d'obtenir un matériau cohérent, stable et adapté aux applications visées, tout en valorisant l'utilisation de

ressources renouvelables, ce qui répond aux enjeux actuels de durabilité dans le secteur de la construction (Khelifa & al, 2015) (infociments, 2019).

1.6.2 Liants hydrauliques et aériens compatibles :

Les liants jouent un rôle fondamental dans la formulation des mortiers biosourcés, puisqu'ils assurent la cohésion du mélange et contribuent au développement des propriétés mécaniques après durcissement. Dans le cas des mortiers écologiques, leur choix doit tenir compte de la compatibilité avec les matériaux biosourcés, dont la nature organique et la porosité peuvent influencer les mécanismes de prise.

- Les liants hydrauliques : Ils se caractérisent par leur capacité à faire prise et à durcir en présence d'eau grâce à des réactions d'hydratation (United States Patent and Trademark Office Brevet n° US 6,913,644 B2, 2005). Ces liants sont généralement utilisés pour des applications nécessitant des résistances mécaniques relativement élevées. Cependant, dans les mortiers biosourcés, leur utilisation demande une adaptation de la formulation afin d'assurer une bonne interaction avec les granulats végétaux, notamment en tenant compte de leur capacité d'absorption d'eau et des effets possibles sur la prise (Brevet n° WO 2017/069643 A1, 2017).
- Les liants aériens : Contrairement aux liants hydrauliques, ils durcissent principalement par réaction avec le dioxyde de carbone présent dans l'air. Ils présentent une prise plus lente et des résistances mécaniques généralement plus faibles, mais offrent une meilleure compatibilité avec les matériaux biosourcés. Leur structure plus ouverte favorise les échanges d'humidité, ce qui peut être avantageux pour certaines applications non structurelles. La compatibilité entre les liants et les granulats biosourcés repose sur un équilibre entre les mécanismes de prise, la cinétique de durcissement et les conditions de mise en œuvre. Des formulations adaptées permettent d'améliorer l'adhérence, la stabilité du mélange ainsi que la durabilité des mortiers intégrant des matériaux d'origine végétale. Ainsi, le choix du type de liant constitue un paramètre déterminant pour obtenir des mortiers biosourcés performants et adaptés aux exigences de la construction durable (Brevet n° WO 2017/069643 A1, 2017) (United States Patent and Trademark Office Brevet n° US 6,913,644 B2, 2005).

1.7 Généralités sur le plâtre :

1.7.1 Définition du plâtre :

Le plâtre est un matériau de construction obtenu à partir du gypse, un minéral naturel constitué principalement de sulfate de calcium dihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). On le retrouve sous différentes formes dans la nature, notamment sous forme de cristaux translucides de sélénite ou d'albâtre, qui sont appréciés pour leur blancheur et leur pureté (daniel, 2002).

Ce matériau est largement utilisé dans le secteur du bâtiment en raison de sa capacité à être transformé en une poudre fine, facilement modelable lorsqu'il est mélangé à de l'eau. Cette propriété lui permet de servir pour la réalisation de revêtements muraux, moulures décoratives et autres ouvrages architecturaux (Placoplatre, 2023) (Ouest-France, s.d.).

Le plâtre possède également des caractéristiques chimiques et physiques qui le rendent pratique pour la construction : il durcit rapidement après mélange avec l'eau et offre une surface lisse, résistante aux fissures dans des conditions normales d'utilisation (daniel, 2002).

En résumé, le plâtre est un matériau polyvalent, dérivé du gypse, dont les propriétés naturelles et chimiques le rendent indispensable pour diverses applications dans la construction et la décoration intérieure (Placoplatre, 2023) (Ouest-France, s.d.) (daniel, 2002).



Figure 13: Phase du plâtre (Sarah, 2023)

1.7.2. Origine du plâtre :

Le plâtre est issu du gypse, un minéral présent naturellement dans la croûte terrestre et composé principalement de sulfate de calcium dihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (daniel, 2002). Ce minéral se forme généralement par la précipitation du sulfate de calcium dans des lagunes

marines ou des plans d'eaux saturées en sels, un processus qui donne naissance à des dépôts successifs pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur (Bounoua, 2015).

On distingue principalement deux formes naturelles de gypse : le gypse cristallin, reconnaissable à ses cristaux souvent translucides et faciles à cliver, et l'anhydrite, plus rare et dépourvue d'eau cristalline, généralement associée à des dépôts salins ou marneux (daniel, 2002) (Lewry & al, 1994).

Le gypse est apprécié pour sa pureté, sa couleur claire et l'homogénéité de sa teneur en eau, ce qui facilite sa transformation ultérieure en plâtre. Ses propriétés chimiques et mécaniques naturelles influencent également le comportement du matériau lorsqu'il est utilisé dans la construction, notamment sa capacité à durcir rapidement et à conserver une bonne cohésion (Sylain,M, 2001) (G. Morgado, et al., 2019).

Ainsi, l'origine du plâtre se rattache directement aux caractéristiques géologiques et chimiques du gypse, ce qui explique en partie les qualités physiques et la polyvalence du plâtre dans les applications de construction et de décoration (daniel, 2002) (Bounoua, 2015).

1.7.3. Le Gypse :

1.7.3.1 Le gypse naturel :

Le gypse est une roche sédimentaire appartenant à la famille des évaporites et se caractérise par sa solubilité dans l'eau (daniel, 2002). Son origine naturelle est généralement liée à l'évaporation des eaux de lagunes marines sursaturées en sels, processus qui a permis la formation de dépôts importants, souvent datés des ères secondaire et tertiaire (Bounoua, 2015). On trouve des gisements significatifs de gypse dans de nombreuses régions du monde, notamment en France, au Mexique et en Espagne (Lewry & al, 1994).

Au niveau structural, le gypse cristallise dans le système monoclinique et présente une organisation feuilletée où une couche d'eau alterne avec deux couches de sulfate de calcium (daniel, 2002). Les variétés naturelles se distinguent selon leur taille et leur morphologie :

- Macro-cristallisées : gypse lamellaire, fer de lance, gypse lenticulaire, rose des sables.
- Micro-cristallisées : albâtre, gypse fibreux, gypse saccharoïde et gypse éolien (daniel, 2002).

Dans l'industrie plâtrière, le gypse exploité est généralement de type micro-cristallisé à grains fins (comme le gypse saccharoïde). Il est rarement pur et peut contenir des impuretés variables selon les carrières, telles qu'argile, calcaire, silice, dolomie ou anhydrite (Sarah, 2023).



Figure 14: différents système de cristallisation du gypse (Céline, 2011)

1.7.3.2 Le gypse de synthèse :

Le gypse de synthèse est produit par des réactions chimiques industrielles, à partir de diverses sources comme la production d'acide phosphorique ou d'autres acides minéraux et organiques, ainsi que la désulfuration des gaz et fumées (Sarah, 2023). Cependant, sa production reste limitée à cause des contraintes techniques et économiques, notamment la nécessité d'éliminer chimiquement les impuretés générées lors de ces procédés (Sarah, 2023).

1.7.4. Fabrication du plâtre :

La fabrication du plâtre à partir du gypse naturel suit plusieurs étapes successives, permettant de transformer le minerai brut en un produit industriel prêt à l'emploi (Ratsimbazafiarison & al, 2021) (Placoplatre, 2023) (Sarah, 2023).

1.7.4.1 L'extraction :

L'extraction du gypse peut se faire en carrières à ciel ouvert ou par galeries souterraines. Le choix de la méthode dépend de la profondeur du gisement et des caractéristiques du terrain. Cette étape consiste à séparer le gypse des couches environnantes, tout en minimisant les impuretés (Sarah, 2023).



Figure 15: l'extraction du gypse à ciel ouvert et souterraine

1.7.4.2 Concassage primaire :

Après l'extraction, le gypse est soumis à un concassage primaire afin de réduire la taille des blocs et de faciliter les opérations suivantes. Ce concassage permet également d'homogénéiser le matériau avant la cuisson (Ratsimbazafiarison & al, 2021).



Figure16: concassage du gypse (Fethallah A. H., 2023)

1.7.4.3 La cuisson :

La cuisson du gypse est une étape clé qui transforme le sulfate de calcium dihydraté en semi-hydrate, pouvant être de type α ou β selon les conditions thermiques (G. Morgado, et al., 2019).



Figure 17: four de cuisson du gypse (Fethallah A. H., 2023)

1.7.4.3.1 La cuisson du plâtre β :

Le gypse est chauffé à une température modérée, généralement autour de 110–150 °C. Ce processus entraîne une déshydratation partielle, produisant un plâtre semi-hydraté β , adapté à la plupart des applications courantes (G. Morgado, et al., 2019) (Placoplatre, 2023).

1.7.4.3.2 La cuisson du plâtre α :

Lorsque la cuisson s'effectue sous des conditions de pression contrôlée, le plâtre semi-hydraté α se forme. Ce type de plâtre possède une prise plus rapide et une résistance mécanique supérieure, ce qui le rend particulièrement utilisé pour les moulures décoratives et les applications techniques (G. Morgado, et al., 2019) (Ratsimbazafiarison & al, 2021).

1.7.4.4 Le broyage :

Après cuisson, le gypse est broyé pour obtenir une poudre fine.

a) Le broyage standard : consiste à réduire le matériau à une granulométrie uniforme.

b) Le broyage / sélection : permet de séparer les particules selon leur taille et d'éliminer les résidus indésirables (Ratsimbazafiarison & al, 2021) (Sarah, 2023).

1.7.4.5 L'homogénéisation et l'adjuvantation :

La poudre obtenue est ensuite homogénéisée pour garantir une composition uniforme. Selon les besoins, des adjuvants peuvent être ajoutés afin d'améliorer certaines propriétés du plâtre, comme le temps de prise ou la maniabilité (Ratsimbazafiarison & al, 2021) (Placoplatre, 2023).

1.7.4.6 Le contrôle et la validation des produits :

Enfin, des tests de contrôle sont réalisés pour s'assurer que le plâtre respecte les standards de qualité. Ces vérifications concernent la granulométrie, l'humidité résiduelle, la pureté et la performance mécanique du produit fini (Ratsimbazafiarison & al, 2021) (Sarah, 2023).

1.7.5. Propriétés de plâtre :

Le plâtre présente un ensemble de propriétés qui expliquent son large usage dans la construction et la décoration intérieure. Ces caractéristiques peuvent être classées en propriétés thermiques, hygrométriques, acoustiques, mécaniques et de résistance au feu (daniel, 2002) (G. Morgado, et al., 2019) (Lewry & al, 1994) (Martias & al, 2013).

1.7.5.1 Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie :

Le plâtre possède une bonne capacité à réduire les pertes thermiques grâce à sa faible conductivité. Cette propriété contribue à maintenir une température stable dans les locaux. De plus, le plâtre est capable de réguler l'humidité relative en absorbant et en restituant l'eau, ce qui aide à limiter les variations de l'hygrométrie à l'intérieur des bâtiments (daniel, 2002) (Martias & al, 2013).

1.7.5.2 Humidité des locaux :

Grâce à sa structure cristalline et à sa porosité, le plâtre absorbe l'excès d'humidité dans l'air ambiant et le restitue lorsque l'air devient plus sec. Cette capacité permet d'éviter la condensation et de contribuer à un climat intérieur sain et confortable (daniel, 2002) (G. Morgado, et al., 2019).

1.7.5.3 Isolation et correction acoustique :

Le plâtre offre également des performances acoustiques intéressantes, en partie grâce à sa densité et sa structure cristalline. Il contribue à limiter la propagation des sons entre les pièces et peut être utilisé dans des systèmes de doublage mural ou de plafonds suspendus pour améliorer le confort sonore (Martias & al, 2013).

1.7.5.4 Résistance au feu :

Le plâtre est naturellement incombustible et peut résister à des températures élevées sans libérer de substances toxiques. Cette propriété en fait un matériau de choix pour la

réalisation de cloisons, plafonds et protections contre les incendies dans les bâtiments (daniel, 2002) (Lewry & al, 1994).

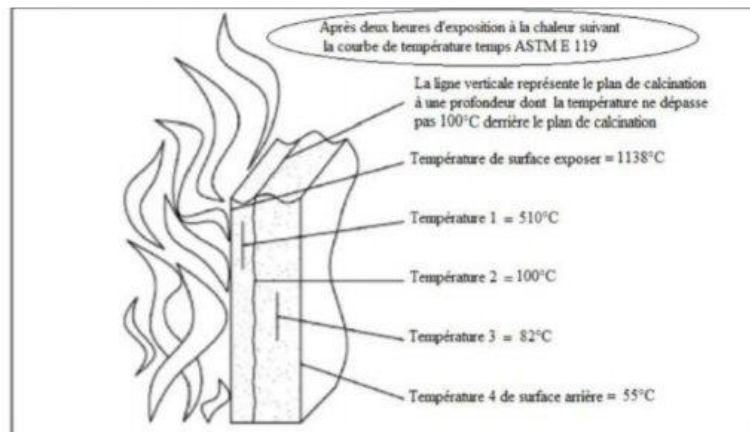


Figure 18: Comment le gypse retarde la transmission de la chaleur (Fethallah A. H., 2023)

1.7.6 Propriétés mécaniques et mise en œuvre du plâtre :

1.7.6.1 Pâte pure de plâtre :

La pâte obtenue après mélange du plâtre avec de l'eau possède des caractéristiques spécifiques qui influencent son comportement lors de la mise en œuvre (G. Morgado, et al., 2019) (Lewry & al, 1994).

1.7.6.2 Propriétés de la pâte pure :

A. La densité :

La densité du plâtre varie selon sa granulométrie et la quantité d'eau utilisée pour la préparation. Une densité adaptée permet d'assurer une bonne maniabilité tout en maintenant une cohésion suffisante lors du durcissement (G. Morgado, et al., 2019) (Lewry & al, 1994).

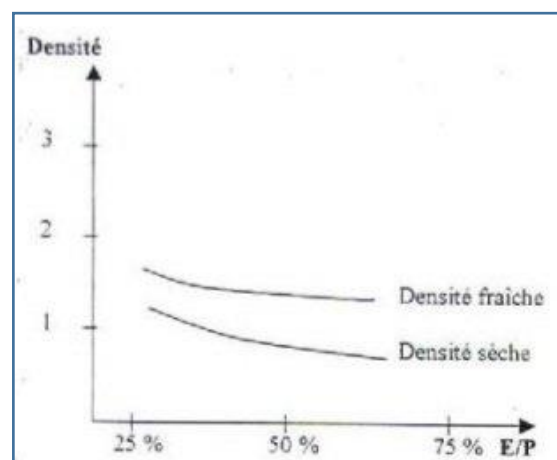


Figure 19: Influence du rapport E/P sur la densité (Fethallah A. H., 2023)

B. Les résistances mécaniques :

- Résistance à la compression : Le plâtre présente une résistance modérée, adaptée aux cloisons et revêtements, mais insuffisante pour des éléments porteurs (G. Morgado, et al., 2019) (Lewry & al, 1994).
- Résistance à la traction et à la flexion : Ces valeurs sont relativement faibles, ce qui rend le plâtre fragile aux chocs ou aux contraintes importantes. Cependant, l'ajout de fibres ou de composites peut améliorer légèrement ces propriétés (Martias & al, 2013).

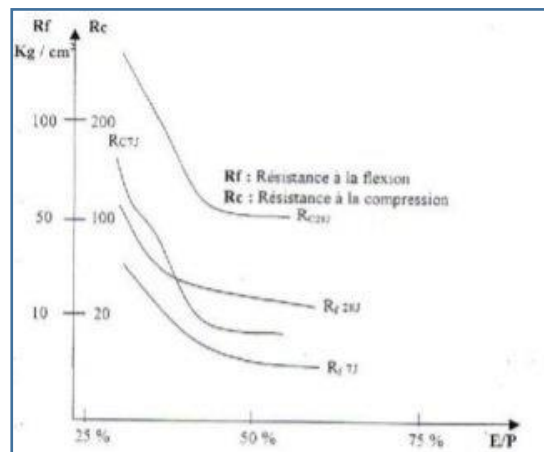


Figure20: Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques (Fethallah A. H., 2023)

1.7.7. Avantages et inconvénients du plâtre :

Le plâtre est un matériau largement utilisé dans la construction en raison de ses nombreuses qualités, mais il présente également certaines limites (Ouest-France, s.d.) (Gypsum Association, 2009) (fabrication du plâtre orthopédique, s.d.).

1.7.7.1 Avantages :

Facilité de mise en œuvre : Le plâtre est facile à mélanger et à appliquer, ce qui permet de réaliser rapidement des cloisons, des enduits ou des moulures décoratives (Ouest-France, s.d.) (Gypsum Association, 2009).

- Esthétique et finition : Une fois durci, il offre une surface lisse et blanche, idéale pour la peinture ou la décoration intérieure (Ouest-France, s.d.).
- Régulation de l'humidité : Sa capacité à absorber et à restituer l'eau contribue à maintenir un climat intérieur agréable et à limiter la condensation (Gypsum Association, 2009).
- Résistance au feu : Le plâtre est naturellement incombustible, ce qui en fait un matériau sûr pour la protection des bâtiments (fabrication du plâtre orthopédique, s.d.).

- Propriétés acoustiques et thermiques : Il contribue à l'isolation thermique et à l'atténuation des bruits dans les locaux (fabrication du plâtre orthopédique, s.d.) (Gypsum Association, 2009).
- Matériau recyclable et écologique : Le plâtre peut être réutilisé et intégré dans des procédés de recyclage, réduisant ainsi l'impact environnemental (Ouest-France, s.d.).

1.7.7.2 Inconvénients :

- Fragilité mécanique : Le plâtre pur est relativement fragile et ne supporte pas de fortes contraintes mécaniques ou des chocs directs (fabrication du plâtre orthopédique, s.d.) (Gypsum Association, 2009).
- Sensibilité à l'humidité excessive : Une exposition prolongée à l'eau peut altérer ses propriétés et provoquer des fissures ou la dissolution partielle de la surface (Ouest-France, s.d.) (Gypsum Association, 2009).
- Durabilité limitée en extérieur : Sans protection, le plâtre n'est pas adapté aux conditions extérieures où il serait exposé à la pluie ou aux variations climatiques importantes (fabrication du plâtre orthopédique, s.d.).
- Travail délicat pour certaines finitions : Certaines applications décoratives complexes nécessitent un savoir-faire précis pour éviter les défauts de surface (Gypsum Association, 2009).

1.7.8 Utilisation de plâtre :

Le plâtre est un matériau polyvalent qui trouve de nombreuses applications dans le bâtiment, l'industrie et la décoration (Placoplatre, 2023) (Ouest-France, s.d.) (Martias & al, 2013) (Ratsimbazafiarison & al, 2021).

Utilisation en bâtiment :

Le plâtre est largement employé pour la réalisation de cloisons, de plafonds suspendus et de revêtements muraux. Sa facilité d'application et sa capacité à fournir une surface lisse et uniforme le rendent idéal pour les finitions intérieures (Placoplatre, 2023) (Ouest-France, s.d.). Il est également utilisé dans la fabrication de moulures décoratives, corniches et rosaces, permettant de personnaliser les espaces tout en conservant des propriétés mécaniques suffisantes pour des usages non porteurs (Placoplatre, 2023) (Ouest-France, s.d.).

Utilisation domestique et décorative :

Dans les habitations, le plâtre sert à protéger et embellir les murs et plafonds, à améliorer le confort acoustique et thermique des locaux, ainsi qu'à réguler l'humidité intérieure grâce à sa capacité d'absorption et de restitution de l'eau (Ouest-France, s.d.) (Martias & al, 2013). Sa couleur blanche naturelle facilite également les finitions peintes ou décoratives (Ouest-France, s.d.).

Applications industrielles et techniques :

Le plâtre est également exploité dans des applications techniques et professionnelles, notamment dans la fabrication de composites ou de matériaux spécialisés pour l'isolation acoustique et thermique (Ratsimbazafiarison & al, 2021) (Martias & al, 2013). Il peut être incorporé dans des systèmes composites pour améliorer la résistance mécanique ou la performance fonctionnelle de certains produits industriels (Martias & al, 2013) (Ratsimbazafiarison & al, 2021).

Usage spécifique dans le génie civil :

En plus des applications classiques, le plâtre est utilisé pour le calage, le coffrage temporaire et la réalisation de modèles ou prototypes dans le domaine du génie civil et de l'ingénierie (Ratsimbazafiarison & al, 2021). Sa rapidité de prise et sa malléabilité en font un matériau pratique pour les travaux nécessitant des ajustements précis ou des formes complexes.

1.8 Normes et prénormes pour les granulats biosourcés (projet NG2B) :

L'absence d'un cadre normatif spécifique a longtemps constitué un frein au développement et à la généralisation de l'utilisation des granulats biosourcés dans le secteur de la construction. Afin de répondre à ce besoin, le projet NG2B (Normalisation des Granulats Biosourcés) a été mis en place dans l'objectif d'élaborer une prénorme dédiée aux granulats d'origine végétale utilisés dans les mortiers et les bétons biosourcés. Cette initiative s'inscrit dans une démarche visant à structurer les pratiques et à sécuriser l'emploi de ces matériaux dans un contexte de transition écologique du bâtiment. La prénorme NG2B propose une définition claire des granulats biosourcés, fondée sur leur origine végétale et les procédés de transformation auxquels ils sont soumis. Elle met en évidence la nécessité de distinguer ces granulats des granulats minéraux conventionnels, en raison de leurs caractéristiques physiques spécifiques et de leur comportement particulier au sein des

formulations. L'objectif n'est pas d'imposer des exigences identiques à celles appliquées aux matériaux traditionnels, mais de fournir un cadre adapté à la nature des ressources biosourcés. Le projet NG2B s'attache également à identifier les principales caractéristiques à prendre en compte pour la caractérisation des granulats végétaux. Il propose des méthodes d'essais adaptées permettant d'évaluer notamment les propriétés granulométriques, la masse volumique apparente et la capacité d'absorption d'eau. Ces éléments visent à améliorer la connaissance des matériaux biosourcés et à favoriser une meilleure maîtrise de leur qualité et de leur mise en œuvre. Cette prénorme constitue une étape intermédiaire vers une normalisation future des granulats biosourcés. La phase de pré normalisation permet de recueillir des retours d'expérience issus des applications réelles et d'ajuster les recommandations en fonction des pratiques du terrain. Ainsi, le projet NG2B contribue à renforcer la crédibilité et la fiabilité des mortiers et bétons biosourcés, tout en accompagnant leur intégration progressive dans les systèmes constructifs durables (NG2B, 2024) (Cerema, 2021) (Raynaud, 2024).

1.9 Méthodes de traitement des granulats biosourcés :

1.9.1 Traitements alcalins : NaOH, Ca(OH)₂ à différentes concentrations (3 %, 6 %, 9 %) :

Le traitement alcalin est largement utilisé pour améliorer les propriétés des granulats biosourcés avant leur incorporation dans les mortiers écologiques (Hamraoui & al, 2025) (Holanda & al, 2024). Il consiste à immerger les granulats dans des solutions alcalines, généralement à base d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂), avec des concentrations variant souvent entre 3 % et 9 % (Addis & al, 2025). L'action de ces solutions entraîne une modification de la surface des granulats. Elle permet notamment d'éliminer partiellement certains composants organiques comme la lignine et l'hémicellulose, ainsi que des impuretés superficielles (Litaif & al, 2025). Cette transformation améliore la rugosité des particules et favorise une meilleure adhérence avec la matrice cimentaire (Holanda & al, 2024). La concentration utilisée joue un rôle important dans l'efficacité du traitement. Une faible concentration (environ 3 %) entraîne une modification limitée, tandis qu'une concentration intermédiaire (autour de 6 %) permet généralement d'obtenir un bon compromis entre amélioration des propriétés de surface et conservation de la structure interne (Addis & al, 2025). En revanche, des concentrations plus élevées, comme 9 %, peuvent provoquer une dégradation excessive de la structure cellulosique (Hamraoui & al, 2025). Le traitement au Ca(OH)₂ présente des effets

comparables, tout en apportant des ions calcium susceptibles d'interagir avec les liants minéraux, ce qui peut améliorer la compatibilité avec la matrice cimentaire (Holanda & al, 2024). Toutefois, comme pour le NaOH, une maîtrise des conditions de traitement reste nécessaire afin d'éviter les effets négatifs liés à une alcalinité trop élevée (Addis & al, 2025).

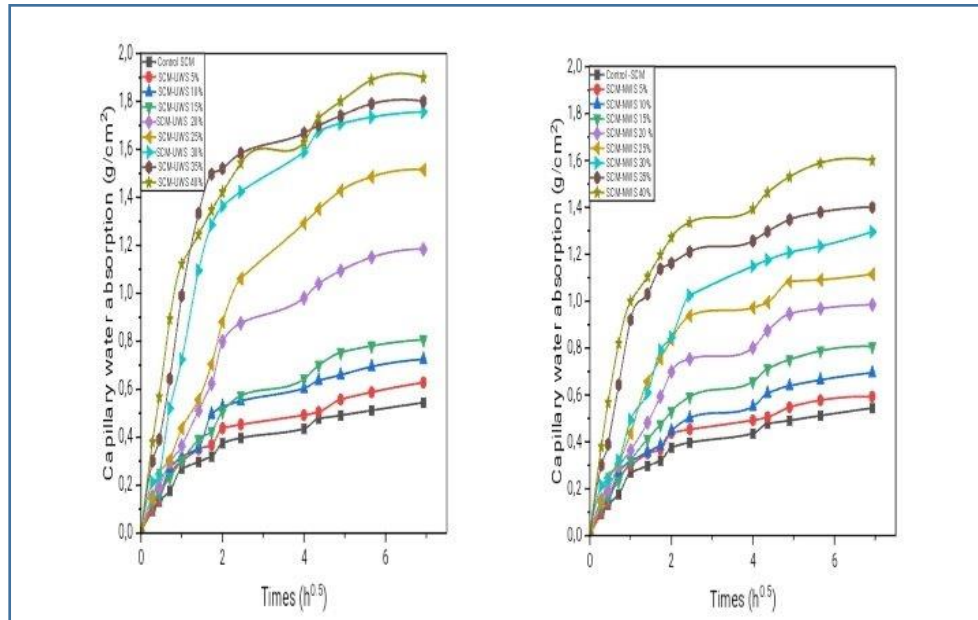


Figure 21: Effet du traitement alcalin des granules de paille de blé à différentes concentrations (3 %, 6 % et 9 %) sur l'absorption capillaire de l'eau. (Hamraoui & al, 2025)

1.9.2 Traitements thermiques : températures et durées d'exposition :

Le traitement thermique constitue une méthode simple permettant de modifier les propriétés des granules biosourcés par l'effet de la chaleur. Contrairement aux traitements chimiques, il agit principalement sur la structure interne et la composition des matériaux végétaux. Différentes températures et durées d'exposition sont utilisées selon les objectifs recherchés. Des températures modérées permettent de réduire l'hygroscopicité et d'améliorer la stabilité dimensionnelle sans altérer fortement la structure du matériau (Ming Kun Yew, et al., 2022). À l'inverse, des températures plus élevées peuvent entraîner l'élimination partielle de certains composants sensibles à la chaleur, contribuant ainsi à diminuer l'absorption d'eau. Un brevet décrit également un procédé consistant à chauffer les granules dans des conditions contrôlées afin d'obtenir une modification thermique adaptée sans provoquer une dégradation excessive du matériau (Brevet n° WO 2015/076665 A1, 2015). En effet, une température trop élevée peut entraîner une fragilisation du granulat, tandis qu'une température insuffisante ne permet pas d'améliorer significativement ses propriétés. Ainsi, le choix des paramètres thermiques doit être optimisé afin de trouver un

équilibre entre la réduction de l'absorption d'eau et le maintien des propriétés mécaniques (Ming Kun Yew, et al., 2022).

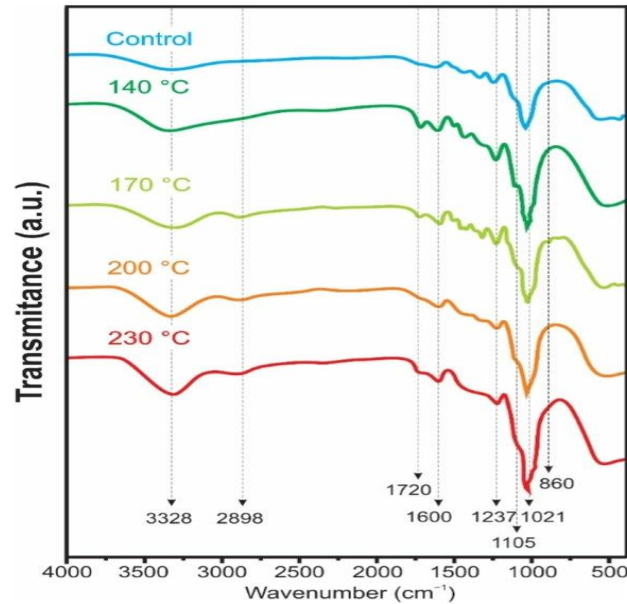


Figure 22: Spectres FTIR des granulats biosourcés traités à différentes températures (Faria & all, 2026)

1.9.3 Traitements physico-chimiques : ultrason, enrobage minéral, carbonatation :

Les traitements physico-chimiques représentent une alternative intéressante pour améliorer les propriétés des granulats biosourcés en combinant des actions physiques et chimiques (Ahmad – Muhammad Arslan, et al., 2023) (Stevulova & al, 2021).

- **Traitement par ultrasons :** Ce procédé consiste à appliquer des ondes ultrasonores dans un milieu liquide contenant les granulats, ce qui génère des phénomènes de cavitation permettant de nettoyer la surface et d'éliminer certaines impuretés.
- **Enrobage minéral :** Il s'agit de recouvrir les granulats d'une fine couche minérale afin de réduire leur porosité et limiter l'absorption d'eau. Cette couche améliore également l'adhérence avec la pâte cimentaire.
- **Carbonatation :** Ce traitement repose sur la réaction avec le dioxyde de carbone, conduisant à la formation de composés stables qui densifient la surface des granulats et réduisent leur réactivité à l'eau. Ces méthodes permettent d'améliorer la compatibilité des granulats biosourcés avec les liants et d'adapter leurs propriétés aux exigences des mortiers écologiques.

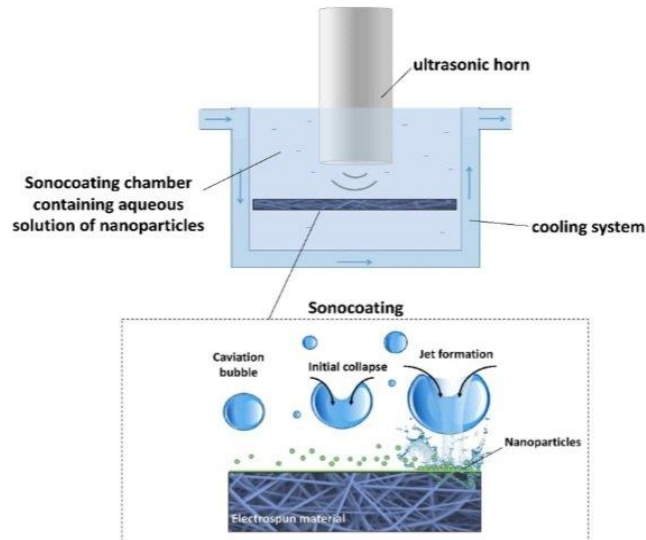


Figure 23: Schéma du traitement par ultrasons et du phénomène de cavitation (Higuchi & all, 2019)

1.9.4 Traitements hydrophobes : silanes, HDTMS :

Les traitements hydrophobes visent à réduire l'absorption d'eau des granulats biosourcés et à améliorer leur comportement dans les mortiers. En raison de leur structure poreuse, ces granulats présentent naturellement une forte affinité avec l'eau. Les silanes, notamment l'hexadécyltriméthoxysilane (HDTMS), sont souvent utilisés pour modifier les propriétés de surface. Ils réagissent avec les groupements hydroxyles présents à la surface des matériaux végétaux, formant une couche hydrophobe qui limite la pénétration de l'eau. Ce traitement permet de diminuer l'absorption d'eau sans altérer significativement la structure interne du matériau, ce qui améliore la stabilité du mortier et la maîtrise du rapport eau/liant (Mounir & al, 2014). Cependant, l'efficacité dépend de plusieurs paramètres tels que la concentration, le temps de traitement et les conditions de séchage. Un traitement excessif peut réduire l'adhérence avec la matrice cimentaire, d'où la nécessité d'optimiser les conditions d'application (Hussain & al).

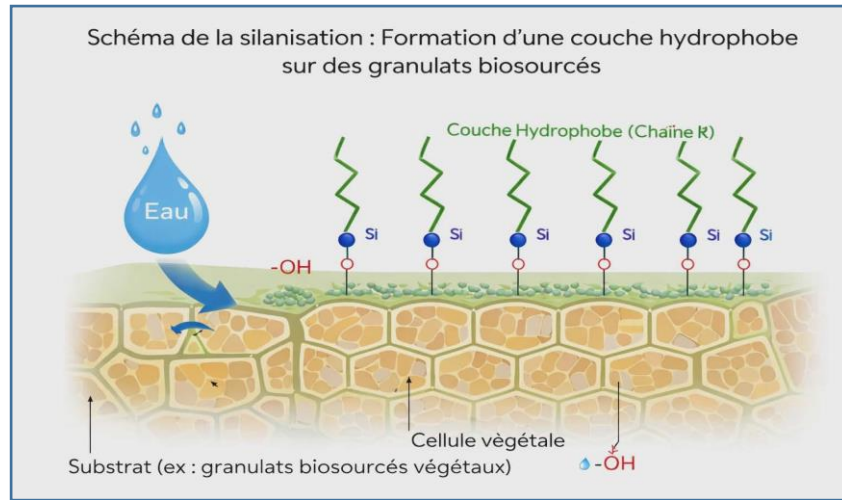


Figure 24: Schéma de la silanisation : formation d'une couche hydrophobe sur des granulats biosourcés

1.9.5 Effets des traitements sur la microstructure, cristallinité et compatibilité avec la matrice cimentaire :

Les traitements appliqués aux granulats biosourcés ne se limitent pas à une simple modification des propriétés physiques, mais influencent également leur microstructure, leur degré de cristallinité ainsi que leur compatibilité avec la matrice cimentaire (Holanda & al, 2024). L'étude de ces effets permet de mieux comprendre l'amélioration du comportement de ces matériaux une fois incorporés dans un mortier écologique. Les traitements alcalins, notamment à base de NaOH, provoquent une modification de la microstructure de surface des granulats, caractérisée par une augmentation de la rugosité et de la surface spécifique, ce qui favorise une meilleure interaction avec la pâte cimentaire (Addis & al, 2025). Cette évolution améliore l'adhérence entre les granulats biosourcés et la matrice cimentaire. Ces modifications peuvent également avoir un impact sur la cristallinité des composants présents à la surface des granulats, en modifiant la répartition entre phases amorphes et cristallines, ce qui influence les zones de contact interfaciales (Holanda & al, 2024). Certaines études montrent également que l'augmentation de la rugosité de surface permet une meilleure distribution des contraintes au sein du matériau composite et réduit les zones de faiblesse interfaciale (Stevulova & al, 2021). Ces évolutions structurales peuvent être observées grâce à des techniques d'analyse telles que la microscopie électronique à balayage ou la diffraction des rayons X, qui mettent en évidence une interface plus homogène et plus compacte entre le granulat et la matrice cimentaire (Addis & al, 2025). Enfin, l'amélioration de la compatibilité avec la matrice cimentaire se traduit par une diminution des vides interfaciaux

et une meilleure intégration des granulats dans la phase hydratée, ce qui contribue à l'amélioration des performances mécaniques globales du mortier (Stevulova & al, 2021).

Tableau 2 : effets des traitements sur la microstructure, la cristallinité et la compatibilité avec la matrice cimentaire

Référence	Effet sur la microstructure	Effet sur la cristallinité	Compatibilité avec la matrice cimentaire
ACS Omega (2024)	Élimination partielle de la lignine et de l'hémicellulose, amélioration de la rugosité de surface	Augmentation de l'indice de cristallinité (analyses XRD/FTIR)	Amélioration de l'adhérence fibre–matrice et des performances mécaniques
Nature (2025)	Réduction des défauts internes et amélioration de l'organisation microstructurale	Augmentation du degré de cristallinité après traitement	Meilleure interaction avec la matrice cimentaire
JONUNS (2023)	Nettoyage de surface et meilleure dispersion des granulats dans la matrice	Amélioration de l'interface granulat–matrice et diminution de l'absorption d'eau	Amélioration de l'interface granulat–matrice et diminution de l'absorption d'eau

Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques des granulats biosourcés ainsi que leur intérêt dans le domaine des matériaux de construction écologiques. Ces matériaux, issus de ressources renouvelables, présentent des propriétés physiques, thermiques et environnementales intéressantes, ce qui favorise leur utilisation dans les mortiers écologiques. Nous avons également présenté les différents constituants des mortiers biosourcés ainsi que certains matériaux tels que le liège et le plâtre, en mettant en avant leurs propriétés et leur rôle dans l'amélioration des performances globales. Par ailleurs, une attention particulière a été portée aux méthodes de traitement des granulats biosourcés, en soulignant leurs effets sur la microstructure et la compatibilité avec la matrice cimentaire. À la fin, nous pouvons conclure que l'intégration et le traitement des granulats biosourcés constituent des paramètres essentiels influençant le comportement des mortiers écologiques. Dans le chapitre qui suit, nous nous intéressons à l'influence des granulats biosourcés sur les

propriétés des mortiers, notamment à l'état frais et à l'état durci, ainsi qu'aux paramètres de transfert tels que l'absorption d'eau et la porosité.

***Chapitre2 : influence des granulats
biosourcés sur les propriétés des
mortiers***

Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude de l'influence des granulats biosourcés sur les propriétés des mortiers. L'incorporation de ces granulats d'origine végétale modifie le comportement du matériau, que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

Dans un premier temps, nous analysons les propriétés des mortiers à l'état frais, notamment la maniabilité, la consistance, ainsi que la teneur en air occlus et la densité fraîche. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer la facilité de mise en œuvre et la qualité du mélange.

Ensuite, nous abordons les propriétés à l'état durci, en mettant l'accent sur les résistances mécaniques, le module d'élasticité et le comportement en déformation. Ces caractéristiques permettent d'apprécier les performances mécaniques du mortier après durcissement.

Enfin, nous étudions les paramètres de transfert, tels que l'absorption d'eau, la porosité accessible et l'absorption capillaire, qui influencent la durabilité et le comportement du matériau face aux conditions environnementales.

2.1 Propriétés à l'état frais

Les propriétés à l'état frais des mortiers constituent un aspect essentiel dans l'évaluation de leur comportement lors de la mise en œuvre (M'hamed & al, 2021). Elles permettent d'apprécier la facilité d'application, la cohésion du mélange ainsi que son aptitude à être manipulé sur chantier (Abdelouahed & al, 2023).

2.1.1 Maniabilité et consistance :

La maniabilité, également appelée ouvrabilité, désigne la facilité avec laquelle un mortier peut être mélangé, transporté et appliqué sans ségrégation. Elle dépend de plusieurs paramètres tels que la teneur en eau, la nature des granulats et les interactions entre les constituants.

L'incorporation de granulats biosourcés influence directement la maniabilité du mortier en raison de leur structure poreuse et de leur forte capacité d'absorption d'eau. Cette absorption réduit la quantité d'eau disponible dans le mélange, ce qui peut entraîner une diminution de la fluidité et rendre le mortier plus difficile à travailler.

Par ailleurs, la consistance du mortier correspond à son degré de fluidité ou de rigidité à l'état frais. Elle est généralement évaluée à l'aide d'essais spécifiques permettant de caractériser le comportement du matériau avant durcissement.

L'utilisation de granulats biosourcés peut modifier la consistance en fonction de leur nature et de leur proportion dans le mélange. Une absorption élevée d'eau peut conduire à un mortier plus sec et moins fluide, tandis qu'un ajustement du rapport eau/liant permet de compenser cet effet et d'améliorer la mise en œuvre.

Ainsi, la maniabilité et la consistance des mortiers biosourcés sont fortement influencées par les propriétés physiques des granulats utilisés, ce qui nécessite une adaptation de la formulation afin d'obtenir un matériau facile à appliquer et homogène (Abdelouahed & al, 2023) (M'hamed & al, 2021).

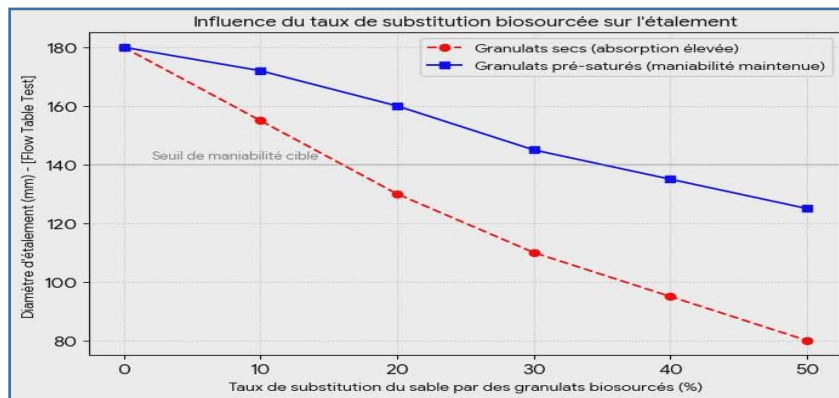


Figure 25: Influence du taux de substitution biosourcés sur l'étalement

2.1.2 Teneur en air occlus et densité fraîche :

La teneur en air occlus dans un mortier correspond au volume d'air emprisonné à l'intérieur du mélange à l'état frais (M'hamed & al, 2021). Cet air est généralement présent sous forme de petites bulles réparties dans la matrice et peut influencer le comportement global du mortier (Dębska & al, 2019) .

La présence d'air occlus joue un rôle important sur les propriétés du mortier frais, notamment en améliorant sa maniabilité et sa capacité de mise en œuvre (Dębska & al, 2019). Cependant, une teneur excessive en air peut entraîner une diminution de la cohésion du mélange et affecter certaines performances du matériau (M'hamed & al, 2021).

L'introduction de granulats biosourcés peut modifier la teneur en air occlus en raison de leur structure poreuse et irrégulière (M'hamed & al, 2021). Ces caractéristiques favorisent la rétention d'air dans le mélange, ce qui peut conduire à une augmentation du volume d'air incorporé (Dębska & al, 2019).

La densité fraîche, quant à elle, correspond à la masse volumique du mortier à l'état frais, incluant l'ensemble de ses constituants ainsi que l'air occlus (M'hamed & al, 2021). Elle constitue un indicateur important permettant d'évaluer la compacité du mélange (Dębska & al, 2019).

L'utilisation de granulats biosourcés entraîne généralement une diminution de la densité fraîche du mortier, en raison de leur faible densité apparente et de leur porosité élevée (M'hamed & al, 2021). Cette réduction de densité est souvent associée à une augmentation de la teneur en air et à la présence de vides internes dans le matériau (Dębska & al, 2019).

Ainsi, la teneur en air occlus et la densité fraîche sont deux paramètres étroitement liés, fortement influencés par la nature des granulats biosourcés, et doivent être pris en compte lors de la formulation des mortiers afin d'assurer un équilibre entre légèreté et performance (M'hamed & al, 2021).

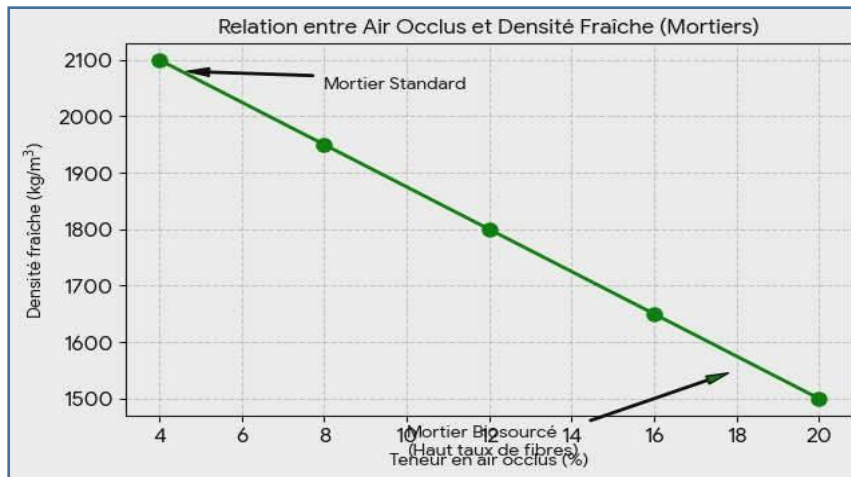


Figure 26: Relation entre Air occlus et densité fraîche des mortiers

2.2 Propriétés à l'état durci :

Les propriétés à l'état durci des mortiers permettent d'évaluer leur comportement après prise et durcissement, notamment en termes de résistance et de durabilité (M'hamed & al,

2021). Elles sont essentielles pour déterminer les performances du matériau dans les conditions réelles d'utilisation (Zengfeng & al, 2015).

2.2.1 Résistances mécaniques (compression, flexion, traction) :

La résistance à la compression constitue l'une des propriétés mécaniques les plus importantes des mortiers durcis (Khelifa & al, 2015). Elle traduit la capacité du matériau à supporter des charges sans rupture et dépend directement de la composition du mélange et de la qualité de la matrice cimentaire (M'hamed & al, 2021).

L'incorporation de granulats biosourcés entraîne généralement une diminution de la résistance à la compression en raison de leur faible rigidité et de leur forte porosité (Zengfeng & al, 2015). En effet, la présence de vides et la nature organique de ces granulats influencent la compacité du matériau et limitent la transmission des efforts mécaniques (M'hamed & al, 2021).

La résistance à la flexion permet d'évaluer le comportement du mortier soumis à des efforts de traction indirecte (Khelifa & al, 2015). Elle est influencée par l'adhérence entre les granulats et la pâte cimentaire ainsi que par la répartition des contraintes dans le matériau (Zengfeng & al, 2015).

L'utilisation de granulats biosourcés peut modifier cette propriété en raison de leur structure interne et de leur interaction avec le liant (M'hamed & al, 2021). Une adhérence moins importante peut entraîner une diminution de la résistance, tandis qu'une bonne compatibilité peut améliorer le comportement global du matériau (Khelifa & al, 2015).

La résistance à la traction, bien que généralement faible dans les mortiers, reste un paramètre important pour caractériser leur comportement mécanique (Zengfeng & al, 2015). Elle dépend en grande partie de la qualité de l'interface entre les granulats et la matrice cimentaire (M'hamed & al, 2021).

Dans les mortiers biosourcés, cette résistance peut être affectée par la porosité élevée des granulats et par leur capacité d'absorption d'eau, ce qui influence la formation des liaisons internes (Khelifa & al, 2015). Toutefois, une formulation adaptée permet d'optimiser ces propriétés et d'améliorer les performances mécaniques globales du matériau (M'hamed & al, 2021).

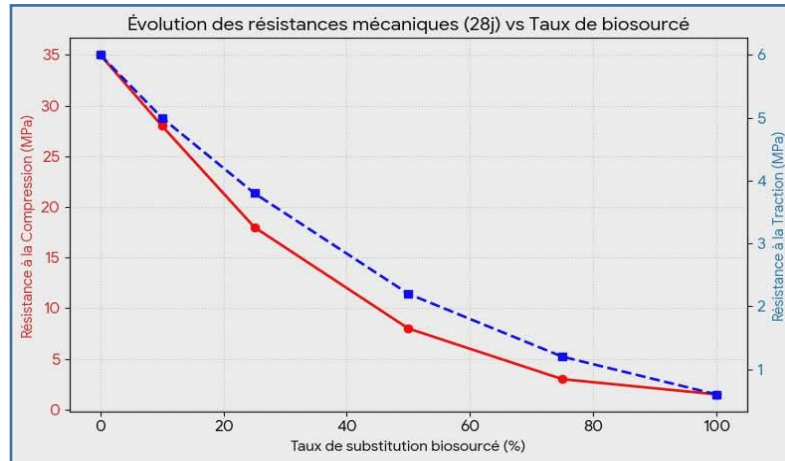


Figure 27: Évaluation des résistances mécaniques (28 j) des mortiers vs taux de biosourcés.

2.2.2 Relation entre le pourcentage de substitution et les performances mécaniques :

Le pourcentage de substitution des granulats minéraux par des granulats biosourcés constitue un paramètre déterminant dans le comportement mécanique des mortiers (Zengfeng & al, 2015). Il influence directement la structure interne du matériau ainsi que ses performances après durcissement (Jnyanendra & al, 2016).

Les études montrent que l'augmentation du taux de substitution entraîne généralement une diminution des résistances mécaniques, notamment en compression, en raison de la faible rigidité et de la porosité élevée des granulats biosourcés (Hamraoui & al, 2025). Cette réduction est liée à la présence accrue de vides et à une moindre compacité du mortier (Zengfeng & al, 2015).

Pour des faibles taux de substitution, les propriétés mécaniques restent relativement proches de celles des mortiers conventionnels, ce qui permet de conserver des performances acceptables (Jnyanendra & al, 2016). Dans ce cas, l'influence des granulats biosourcés sur la structure globale du matériau demeure limitée (Zengfeng & al, 2015).

En revanche, des taux de substitution élevés modifient significativement la microstructure du mortier, ce qui peut entraîner une baisse importante des résistances mécaniques (Hamraoui & al, 2025). Cette évolution est due à une augmentation de la porosité et à une diminution de la qualité des liaisons entre les constituants (Zengfeng & al, 2015).

Cependant, certaines études indiquent que l'optimisation du pourcentage de substitution permet d'obtenir un compromis entre performances mécaniques et allègement

du matériau (Jnyanendra & al, 2016). Le choix du taux de substitution doit donc être adapté en fonction des exigences d'utilisation du mortier (Hamraoui & al, 2025).

2.2.3 Module d'élasticité et comportement en déformation :

Le module d'élasticité est un paramètre fondamental permettant de caractériser la rigidité des mortiers à l'état durci (Khelifa & al, 2015). Il traduit la capacité du matériau à se déformer sous l'effet d'une contrainte tout en revenant à son état initial après déchargement (Avudaiappan & al, 2023).

Dans les mortiers contenant des granulats biosourcés, le module d'élasticité est généralement plus faible que celui des mortiers conventionnels, en raison de la nature plus souple et de la porosité élevée de ces granulats (Avudaiappan & al, 2023). Cette diminution de rigidité influence directement le comportement global du matériau sous chargement (Khelifa & al, 2015).

Le comportement en déformation des mortiers biosourcés se distingue également par une plus grande capacité de déformation avant rupture (Avudaiappan & al, 2023). Cette caractéristique est liée à la structure interne des granulats biosourcés, qui permet une meilleure dissipation des contraintes (Khelifa & al, 2015).

Par ailleurs, l'introduction de granulats biosourcés modifie la distribution des contraintes au sein de la matrice cimentaire, ce qui peut réduire la fragilité du matériau et améliorer son comportement en déformation (Avudaiappan & al, 2023). Cette évolution se traduit par un matériau moins rigide mais potentiellement plus ductile (Khelifa & al, 2015).

Ainsi, le module d'élasticité et le comportement en déformation des mortiers biosourcés dépendent fortement de la nature et de la proportion des granulats utilisés, et doivent être pris en compte lors de la formulation pour adapter le matériau aux exigences mécaniques souhaitées (Avudaiappan & al, 2023).

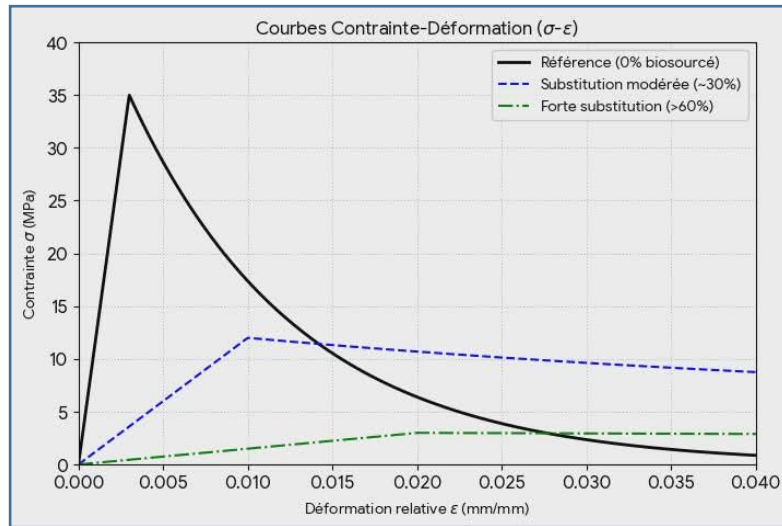


Figure 28: Courbe contrainte-déformation illustrant le comportement mécanique et le module d'élasticité des mortiers biosourcés.

2.3 Paramètres de transfert :

2.3.1 Absorption d'eau et porosité accessible :

L'absorption d'eau et la porosité accessible constituent des paramètres essentiels pour évaluer les propriétés de transfert des mortiers, notamment leur interaction avec l'eau et leur durabilité (Tedditi, A. K., et al., 2022). Ces propriétés sont directement liées à la structure interne du matériau et à la distribution des pores (Rosales & al, 2021).

Dans les mortiers contenant des granulats biosourcés, l'absorption d'eau est généralement plus élevée en raison de la nature hydrophile et de la forte porosité de ces granulats (Rosales & al, 2021). Cette capacité d'absorption dépend de la taille, de la connectivité et de la distribution des pores au sein du matériau (Tedditi, A. K., et al., 2022).

La porosité accessible correspond à la fraction des pores ouverts permettant la circulation de l'eau à travers le matériau (Tedditi, A. K., et al., 2022). Elle joue un rôle déterminant dans les phénomènes de transfert hydrique et dans la pénétration des agents extérieurs (Rosales & al, 2021).

L'augmentation de la porosité accessible entraîne généralement une augmentation de l'absorption d'eau, ce qui peut affecter les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers (Tedditi, A. K., et al., 2022). En effet, une porosité élevée facilite les échanges d'eau et peut favoriser certains phénomènes de dégradation (Rosales & al, 2021).

Cependant, ces propriétés peuvent être ajustées par une optimisation de la formulation et par le traitement des granulats biosourcés, permettant ainsi de mieux contrôler les transferts d'eau dans le matériau (Tedditi, A. K., et al., 2022).

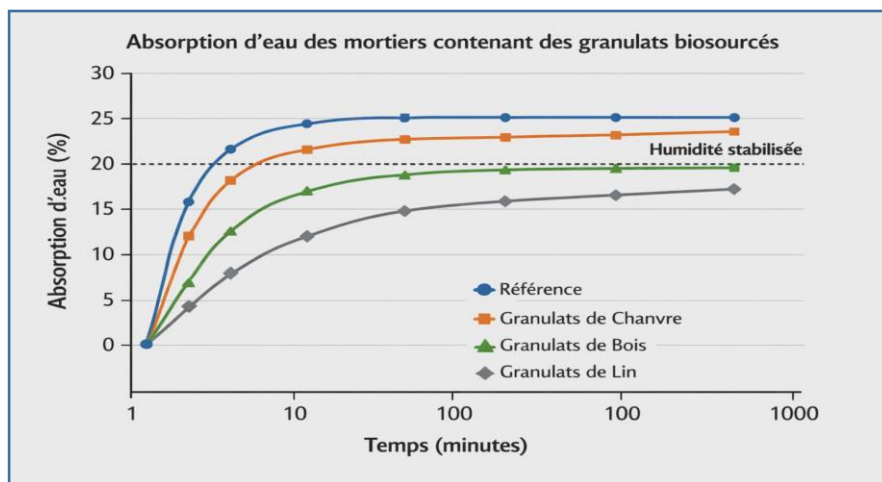


Figure 29: Absorption d'eau des mortiers contenant des granulats biosourcés

2.3.2 Absorption capillaire :

L'absorption capillaire est un paramètre important pour caractériser le comportement des mortiers vis-à-vis de la pénétration de l'eau par capillarité. Elle correspond à la capacité du matériau à absorber l'eau à travers son réseau de pores lorsqu'il est en contact avec un liquide.

Ce phénomène dépend principalement de la structure poreuse du matériau, notamment de la taille, de la distribution et de la connectivité des pores. Une porosité ouverte et bien connectée favorise une montée capillaire plus rapide de l'eau.

Dans les mortiers contenant des granulats biosourcés, l'absorption capillaire peut être plus élevée en raison de la nature poreuse et hydrophile de ces matériaux. Cette caractéristique influence directement les propriétés de transfert d'eau et le comportement du matériau en environnement humide.

La cinétique d'absorption capillaire est généralement évaluée en fonction du temps, permettant d'analyser la vitesse de pénétration de l'eau dans le matériau. Cette analyse est essentielle pour apprécier la durabilité des mortiers et leur résistance aux agents extérieurs.

Ainsi, l'absorption capillaire constitue un indicateur clé pour comprendre les mécanismes de transport de l'eau dans les mortiers et pour adapter leur formulation aux conditions d'exposition (Munzer, 2016).

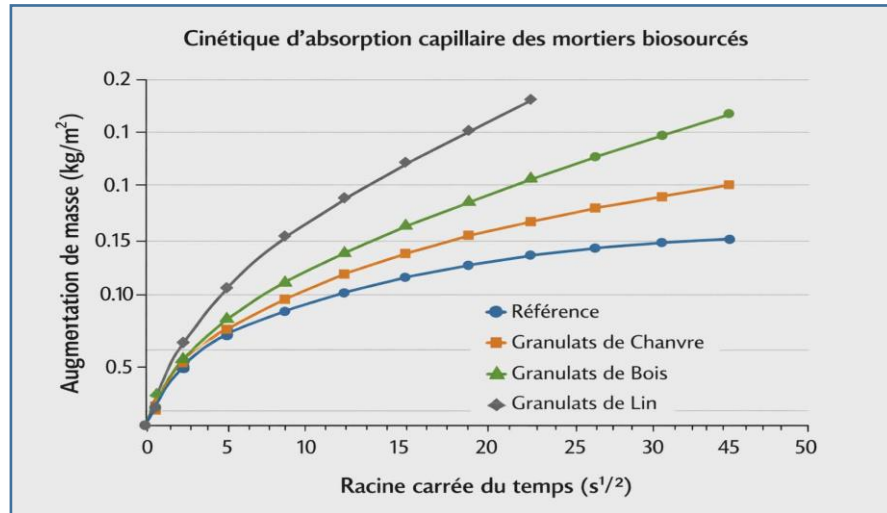


Figure 30: Cinétique d'absorption capillaire des mortiers biosourcés

Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser l'influence des granulats biosourcés sur les différentes propriétés des mortiers, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Les résultats montrent que l'incorporation de ces granulats modifie la maniabilité, la densité et la teneur en air du mortier à l'état frais, ce qui nécessite une adaptation de la formulation pour garantir une bonne mise en œuvre.

À l'état durci, l'utilisation de granulats biosourcés entraîne généralement une diminution des résistances mécaniques et du module d'élasticité, tout en améliorant, dans certains cas, le comportement en déformation du matériau.

Par ailleurs, les paramètres de transfert, tels que l'absorption d'eau et la porosité, sont fortement influencés par la nature poreuse des granulats biosourcés, ce qui impacte la durabilité des mortiers.

Ainsi, l'intégration des granulats biosourcés nécessite un compromis entre performances mécaniques, propriétés de transfert et avantages environnementaux.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à l'étude expérimentale, afin d'évaluer concrètement l'effet des traitements appliqués aux granulats biosourcés sur les performances des mortiers écologiques.

Chapitre 3 : matériaux utilisés et méthodes d'essais

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les étapes suivies pour formuler un mortier écologique à base de liège, après lui avoir appliqué certains traitements afin d'améliorer ses propriétés. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs essais dans le but de mieux connaître les caractéristiques des matériaux utilisés. Les matériaux employés sont le liège, le plâtre, le sable ainsi que l'eau de gâchage. Nous nous sommes également intéressés à la détermination des bonnes proportions de chaque composant afin d'obtenir une formulation adéquate. Ensuite, nous avons préparé un mortier à base de plâtre, puis nous avons effectué plusieurs essais, notamment les essais de flexion et de compression, la conductivité thermique ainsi que l'essai de dureté Shore.

3.1 Les matériaux :

3.1.1 Le plâtre :

Le plâtre utilisé dans cette étude est un produit commercialisé par l'entreprise KNAUF, de type MP75. Il est conditionné en sacs de 30 kg et provient de la wilaya d'Oran. Il s'agit d'un plâtre de construction destiné aux travaux d'aménagement intérieur, aussi bien pour les constructions neuves que pour les travaux de rénovation. Ce matériau est apprécié pour sa bonne ouvrabilité et sa facilité d'application. Il est principalement utilisé pour les enduits intérieurs, à l'exception des zones humides et des parois extérieures.



Figure 31 : plâtre Knauf

3.1.2 Le sable :

Le sable utilisé dans notre étude est un sable fin (0/4) de granulat concassé prélevé de carrière d'Wilaya de Tlemcen.



Figure 32 : sable concassé

3.1.3 Le liège :

Le liège utilisé dans cette étude provient de la wilaya de Jijel. Il se présente sous forme de particules obtenues à partir de l'écorce du chêne-liège. Ce matériau naturel est caractérisé par sa légèreté et sa structure poreuse, ce qui lui confère de bonnes propriétés isolantes. Il est utilisé dans cette étude pour son incorporation dans le mortier.

Avant leur utilisation, le liège a fait l'objet de certains traitements visant à améliorer ses propriétés ainsi que son comportement dans le mortier.

Tableau 3: Types de traitements appliqués au liège et leurs conditions opératoires

	Type de traitement	Duré d'immersion	Duré de séchage
1	Traitement à l'eau chaude (HW)	Immersion dans l'eau puis portés à ébullition pendant 2 h	Refroidies à température ambiante pendant 30 min, puis séchées en étuve à 60 °C pendant 24 h
2	Hornification (HR) 5 cycles immersion/séchage	16 h d'immersion dans l'eau	8 h de séchage en étuve à 60 °C
3	Trempage dans une solution aqueuse contenant 1 % de chaux	Immersion rapide des granulats de liège dans une solution d'eau additionnée de 1 % de chaux	Égouttage, puis séchage doux à 60 °C pendant 24 h



Figure 33 : traitement du liège



Figure 34 : liège

3.1.4 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la préparation des mortiers est de l'eau du robinet, considérée comme potable et exempte de toute impureté susceptible d'altérer les propriétés du mortier. Elle est conforme à la norme NF EN 1008 (AFNOR, 2003). Sa température est comprise entre 18 et 20 °C.

3.2 Les propriétés physiques des matériaux :

3.2.1 La masse volumique apparente et absolue :

La masse volumique a été déterminée en distinguant la masse volumique absolue et la masse volumique apparente, conformément aux normes (NF EN 1097-6) (Association Française de Normalisation, 2014) et (NF EN 1097-3) (Association Française de Normalisation, 1998).

- **Masse volumique absolue** : La masse volumique absolue correspond à la masse du matériau rapportée à son volume réel, sans prendre en considération les vides présents entre les grains.
- **Procédure de l'essai** : Une quantité d'eau est d'abord introduite dans une éprouvette graduée, puis une masse est ajoutée afin de relever le volume initial V_1 . Cette masse est ensuite retirée, et une quantité de matériau est introduite. Enfin, la masse est remplacée dans l'éprouvette et le volume final V_2 est mesuré.

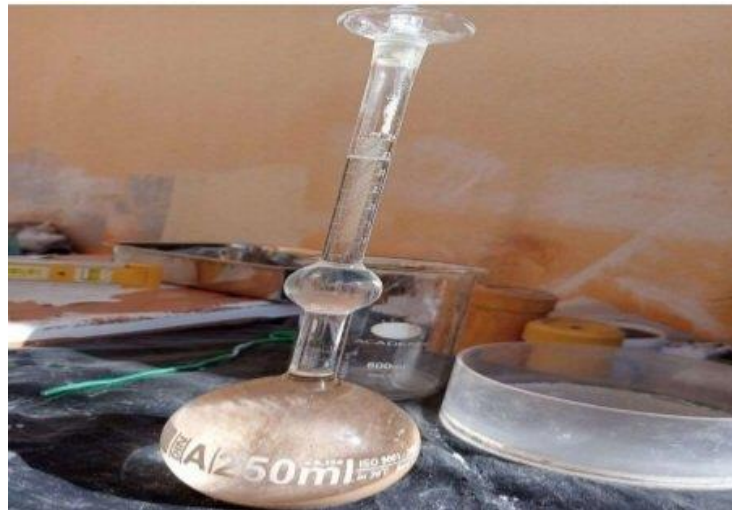


Figure 35: la masse volumique absolue

❖ **Les résultats :**

Tableau 4: les résultats de l'essai de la masse volumique absolue

Les granulats	La masse volumique absolue Mabs (kg/m ³)
Plâtre	2780
Sable	1520
Liège	1479.28

- **Masse volumique apparente** : La masse volumique apparente représente la masse du matériau par unité de volume apparent, en tenant compte des vides et des pores capillaires.
- **Procédure de l'essai** : Un récipient vide de volume connu est pesé dans un premier temps. Il est ensuite rempli de matériau jusqu'au débordement, puis nivelé à l'aide d'une règle. Enfin, le récipient rempli est pesé afin de déterminer la masse correspondante.



Figure 36 : la masse volumique apparente

❖ Les résultats :

Tableau 5: les résultats de l'essai de la masse volumiques apparente

Agrégats	Récipient vide m1(g)	Récipient+ Sable m2(g)	Masse (kg)	Volume (m3)	Masse volumique apparente (kg/m3)
Plâtre	1399.5	2312.38	0.91283	0.001	912.83
Sable	1395.79	2960.31	1.56452	0.001	1564.52
Liège	1395.79	1474.14	0.07835	0.001	78.35

3.2.2 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la distribution des tailles des particules constituant les granulats, ainsi que le module de finesse, conformément à la norme (NF P 18-540) (Association Française de Normalisation, 1997).

- **Matériel utilisé** : L'analyse granulométrique a été réalisée à l'aide d'une série de tamis normalisés, dont les ouvertures sont choisies en fonction de la nature du matériau et de la précision recherchée. Selon la norme (EN 933-2) (European Committee for Standardization, 2020), les tamis utilisés présentent des mailles de 0,08 ; 0,16 ; 0,315 ;

0,63 ; 1,25 ; 2 et 3,15 mm. L'essai a été effectué à l'aide d'une tamiseuse électrique ainsi que d'une balance de précision ($\pm 0,1$ g).

- **Procédure de l'essai :** Une masse de 1 kg de matériau a été prélevée pour l'essai. Les tamis ont été empilés dans l'ordre décroissant des ouvertures, en plaçant le tamis de plus grande maille en haut et le fond en bas. Le matériau sec est ensuite versé dans la colonne de tamis, puis soumis à une agitation mécanique à l'aide de la tamiseuse. Après tamisage, chaque tamis est récupéré successivement, et le refus retenu est pesé. L'opération est poursuivie jusqu'à ce que la variation de masse du refus soit inférieure à 1 % par minute de tamisage. Les masses de refus obtenues permettent de tracer la courbe granulométrique et de déterminer les paramètres caractéristiques du matériau.

Module de finesse (Mf) : Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur une série de tamis (0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.50 – 5)

On utilise la norme (NF P18-540) (Association Française de Normalisation, 1997) pour calculer le module de finesse



Figure 37 : tamis granulométrie

❖ Les résultats :

Tableau 6: les résultats Analyse granulométriques de liège

Masse de l'échantillon (M1) = 69.1 g				
Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	% Refus cumulés	% Passant
5	0	0	0	100
3.15	6.10	6.10	8.82	91.18
2.5	10.7	16.8	24.31	75.69
1.25	38.68	55.48	80.28	19.72
0.63	10.79	66.27	95.9	4.1
0.315	1.15	67.42	97.56	2.44
0.16	0.8	68.22	98.72	1.28
0.08	0.09	68.31	98.85	1.15
Fond	0.11	68.42	99.01	0.99
Module de finesse du liège (Mf) : 3.96				

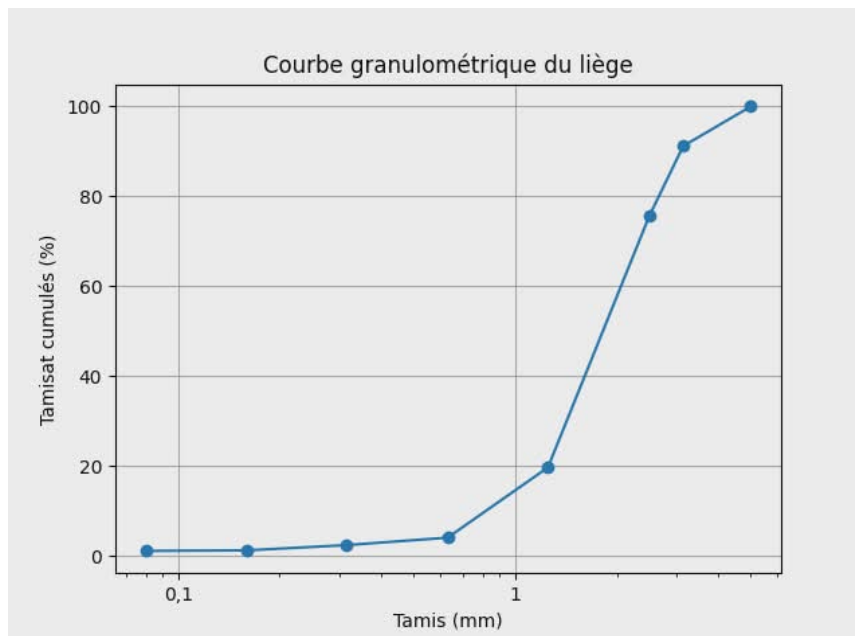


Figure 38: courbe granulométriques du liège

Tableau 7: Résultats Analyse granulométrique du sable

Masse de l'échantillon (M1)= 1000 g				
Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	% Refus cumulés	% Passant
5	1	1	0.1	99.9
3.15	31.30	32.30	3.23	96.77
2.5	71.2	103.5	10.35	89.65
1.25	397.3	500.8	50.08	49.92
0.63	263.48	764.28	76.43	23.57
0.315	145.30	909.58	90.96	9.04
0.16	45.60	955.18	95.52	4.48
0.08	22.70	977.88	97.78	2.22
Fond	22.50	1000.38	100	0

Module de finesse du sable(Mf)= 3.23

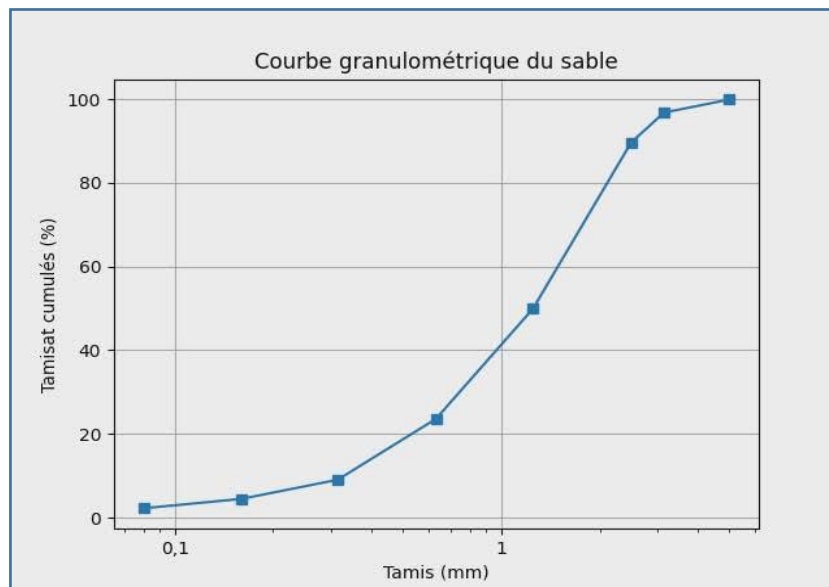


Figure 39: courbe granulométriques du sable

3.3 Préparation des échantillons :

Dans cette étude, des mortiers à base de plâtre ont été réalisés en utilisant le sable comme granulat de référence. Afin d'étudier l'influence du liège sur les propriétés du mortier, une partie du sable a été remplacée par des granulats de liège selon différents taux : 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %.

Avant leur utilisation, les granulats de liège ont subi trois types de traitements dans le but d'améliorer leur comportement dans le mortier. Il s'agit d'un traitement à l'eau chaude pour nettoyer les particules, d'un traitement de Hornification basé sur des cycles d'immersion et de séchage, ainsi que d'un pré-enrobage minéral visant à améliorer l'adhérence entre le liège et la matrice de plâtre.

La préparation des mélanges a été effectuée en mélangeant d'abord le plâtre avec le sable, puis en ajoutant les granulats de liège selon les proportions choisies. Ensuite, l'eau de gâchage a été ajoutée progressivement, et le mélange a été malaxé jusqu'à obtenir une pâte homogène.

Le mortier frais a été coulé dans des moules prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16$ cm³) pour les essais mécaniques. D'autres éprouvettes ont également été réalisées à l'aide de moules en PVC de diamètre 80 mm, avec des épaisseurs de 1 cm.

Après le coulage, les éprouvettes ont été légèrement vibrées pour éliminer l'air emprisonné, puis laissées au repos pendant 24 heures. Elles ont ensuite été démoulées et conservées jusqu'à 7 et 28 jours avant les essais.

Tableau 8: les différents échantillons et leurs composants

Matériaux(g)	B0 100% sable 0 % liège	B25 75% sable 25 % liège	B50 50% sable 50 % liège	B75 25% sable 75 % liège	B100 0% sable 100 % liège
Plâtre	840	840	840	840	840
Sable	420	315	210	105.1	0
Liège	0	9	17.43	26.4	34.86
Eau	504	504	504	504	504

❖ **Les compositions :**

B0 : 0 % liège et 100 % sable

B25 : 25 % liège et 75 % sable

B50 : 50 % liège et 50 % sable

B75 : 75 % liège et 25 % sable

B100 : 100 % liège et 0 % sable



Figure 40 : les matériaux utilisés

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

- La densité
- Dureté superficielle (Shore C)
- Résistance à la compression
- Résistance de traction par flexion
- Détermination de la densité
- Vitesse de propagation ultrasonique (UPV)
- Absorption capillaire
- Etuve immersion



Figure 41: moule 4*4*16

- ❖ D'autres éprouvettes ont été faites pour l'essai de l'isolation phonique sur des sectionnes PVC de diamètre Ø (80mm) et une épaisseur de 1cm.



Figure 42: Epreuves réalisées Ø (80mm) épaisseur de 1 cm

3.4 Formulation et préparation du mortier :

3.4.1 Matériels utilisés :

- Balance électrique : Il s'agit d'une balance électronique présentant une précision de mesure de 0,001 et une capacité minimale de 10 kg, permettant de peser avec exactitude les différentes quantités nécessaires.
- Malaxeur : Le malaxeur utilisé est muni d'une cuve d'une capacité de cinq litres, équipée d'une pale pouvant fonctionner à deux vitesses (lente et rapide).



Figure 43: malaxeur

3.4.2 Mode opératoire :(EN196-1) (European Committee for Standardization, 2016) :

Le malaxage est réalisé selon les étapes suivantes :

- Dans un premier temps, l'eau et le plâtre sont introduits dans la cuve du malaxeur et mélangés à vitesse lente pendant 30 secondes.
- Ensuite, le sable et les granulats de liège sont ajoutés, puis le mélange est poursuivi à vitesse lente pendant 30 secondes.
- Le malaxage est ensuite effectué à vitesse rapide pendant 30 secondes.
- Après cela, le mélange est repris manuellement à l'aide d'une spatule pendant 15 secondes afin d'assurer une meilleure homogénéité.
- Enfin, le mélange est remis dans le malaxeur et malaxé à vitesse rapide pendant 60 secondes.
- À la fin du malaxage, le mortier obtenu est coulé dans les moules en trois couches successives, puis soumis à une vibration à l'aide d'un vibreur afin d'assurer une bonne compacité.
- Après remplissage des moules, les éprouvettes sont laissées à l'air libre pour le séchage.
- Enfin, les éprouvettes sont démoulées puis conservées à l'air libre jusqu'au moment des essais.

3.5 Les essais réalisés :

3.5.1 Essais réalisés à l'état frais :

3.5.1.1 Essai de maniabilité : étalement à la table à secousses

La maniabilité du mortier a été évaluée à l'aide de la table à secousses. Selon la norme EN 12350-5 (European Committee for Standardization, 2019), cet essai d'étalement permet d'apprécier l'aptitude du mortier à s'écouler et à s'étaler.

L'essai est réalisé à l'aide d'une table capable de produire des secousses verticales au moyen d'une manivelle.

Le cône est rempli en deux couches successives. Après la mise en place de chaque couche, 10 coups sont appliqués à l'aide d'une tige de piquage.

Le cône est ensuite retiré, puis le mortier est soumis à une série de 15 secousses. Le diamètre d'étalement « d » est alors mesuré.



Figure 44: essai de maniabilité

3.5.1.2 Détermination de la masse volumique :

Cette mesure permet de déterminer le rendement volumique du mortier à l'état frais et de vérifier la validité de la formulation adoptée.

Pour réaliser cet essai, un récipient de volume et de masse connus est utilisé. Il est entièrement rempli de mortier, puis sa surface est arasée. Le récipient plein est ensuite pesé. La masse volumique du mortier frais est obtenue en faisant le rapport entre la masse du mortier (différence entre la masse du récipient plein et celle du récipient vide) et le volume du récipient. Elle est exprimée en kg/m^3 .

Dans notre cas, un récipient d'une capacité de 1 litre a été utilisé.

3.5.2 Essais réalisés à l'état durci :

3.5.2.1 La densité :

La détermination de la densité a été réalisée pour l'ensemble des mortiers préparés. La masse de chaque éprouvette a d'abord été mesurée. Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$.

La masse volumique est ensuite déterminée en rapportant la masse de l'éprouvette à son volume correspondant. Elle est calculée selon la relation suivante :

$$\rho = \frac{M}{V}$$

ρ : masse volumique du mortier durci (kg/m^3)

M : masse de l'éprouvette (kg)

V : volume de l'éprouvette (m^3)

3.5.2.2 Dureté superficielle (Shore C) :

La dureté Shore C représente une mesure permettant d'évaluer la dureté superficielle d'un matériau. Elle est principalement utilisée pour les matériaux élastomères et les plastiques durs. Conformément à la procédure définie par la norme EN 13279-2 (European Committee for Standardization, 2014), un duromètre a été utilisé pour mesurer la dureté Shore C sur les deux faces longitudinales de chaque éprouvette prismatique de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}$. Une force perpendiculaire a été appliquée en cinq points différents. Cette propriété a été évaluée sur trois éprouvettes pour chaque niveau de remplacement. La dureté superficielle des compositions a été exprimée par la valeur moyenne des mesures obtenues.



Figure 45 : Duromètre Shore C.

3.5.2.3 Contrôle par ultrasons :

La mesure de la vitesse de propagation des ondes dans le béton est une technique couramment utilisée, aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages. Cette méthode est normalisée par les normes françaises [NF EN 12504-4] (AFNOR, 2005) et américaines [ASTM-C597-02] (ASTM International, 2002). Il existe également des appareils commerciaux permettant de réaliser ce type de mesure.



Figure 46 : appareil d'ultrasons

3.5.2.4 Essai de traction par flexion :

Selon la norme EN 13279-2 (European Committee for Standardization, 2014), l'essai de traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) constitue une méthode mécanique permettant d'évaluer la résistance à la flexion.

L'essai est réalisé en appliquant une flexion en trois points, avec une vitesse de chargement de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$, comme illustré à la Figure 3.17.

La résistance à la rupture par flexion est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$R_f = \frac{3 * F_f * L}{2 * B^3}$$

Où :

L : distance entre les axes des rouleaux d'appui de l'éprouvette ($L = 10 \text{ cm}$)

R_f : résistance à la flexion (MPa)

F_f : charge à la rupture

B : largeur de la section carrée du prisme ($b = 40 \text{ mm}$)



Figure 47 : appareil de flexion

3.5.2.5 Essai de compression :

L'essai de compression consiste à appliquer une charge de compression sur l'éprouvette jusqu'à sa rupture, conformément à la norme NFP 18-406 (Association Française de Normalisation, 1981). La procédure de cet essai est illustrée à la Figure 3.18.

La résistance à la compression est déterminée à l'aide de la relation suivante :

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

Avec :

R_c : résistance à la compression (MPa)

F_c : charge à la rupture

a : largeur de la section carrée de l'éprouvette ($a = 40 \text{ mm}$)

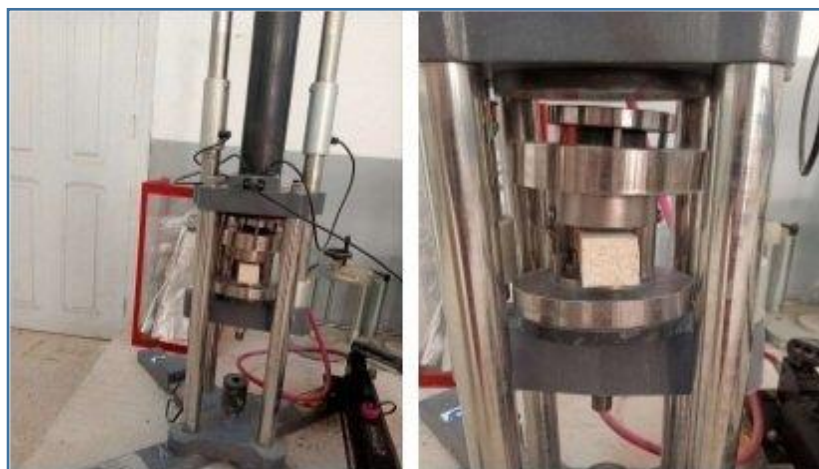


Figure 48 : appareil de compression

3.5.2.6 Conductivité thermique :

La mesure de la conductivité thermique est réalisée à l'aide d'un appareil appelé CT-mètre. Cette méthode consiste à placer une sonde entre deux éprouvettes de même nature, afin de générer un flux thermique à travers le matériau. La figure suivante illustre le principe de cet essai.



Figure 49: appareil de conductivité thermique

3.5.2.7 Absorption d'eau par capillarité :

Conformément à la norme NF EN 1015-18 (Association Française de Normalisation, 2003), cet essai consiste à déterminer la capacité d'absorption d'eau du mortier par capillarité.

Un échantillon de mortier est d'abord séché, puis pesé afin de déterminer sa masse initiale (m_0). Il est ensuite placé dans un bac contenant une faible hauteur d'eau (environ 5 mm).

À des intervalles de temps réguliers (1 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 24 h), l'échantillon est retiré du bac puis pesé (m_1).

La différence entre m_1 et m_0 correspond à la masse d'eau absorbée par capillarité.



Figure 50: le dessiccateur



Figure 51 : Absorption d'eau par capillarité

3.5.2.8 Absorption par immersion totale :

Cet essai a pour objectif d'évaluer la capacité maximale d'absorption d'eau des éprouvettes après une immersion complète dans l'eau pendant une durée de 24 heures.

Dans un premier temps, les éprouvettes sèches sont pesées. Par la suite, elles sont totalement immergées dans l'eau durant 24 heures. Après immersion, les éprouvettes sont retirées, essuyées légèrement afin d'éliminer l'eau superficielle, puis pesées à nouveau.

Le pourcentage d'absorption d'eau est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$Ab (\%) = \left(\frac{B - A}{A} \right) * 100$$

Où :

A : représente la masse de l'éprouvette à l'état sec ;

B : représente la masse de l'éprouvette après immersion totale.



Figure 52: les échantillons dans l'eau

3.5.2.9 Porosité accessible à l'eau :

L'essai de porosité accessible à l'eau est réalisé conformément à la norme AFC-AFREM (AFC-AFREM, 1997). Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques normalisées.

Cet essai permet d'évaluer la quantité de vides accessibles à l'eau dans le matériau, en déterminant la capacité des éprouvettes à absorber l'eau après immersion.

L'appareillage utilisé pour cet essai est présenté dans la figure suivante.



Figure 53: appareille porosité accessible à l'eau

3.5.2.10 Essai séchage–mouillage :

Cet essai a pour objectif d'évaluer la capacité des matériaux à sécher après une immersion complète.

Il est réalisé selon une procédure non normalisée, inspirée de celle utilisée dans la référence (del Río Merino, 1999). Les échantillons sont d'abord immergés dans l'eau pendant 48 heures, puis placés dans une étuve à 40 °C durant deux jours. Cette opération est répétée deux fois, correspondant à deux cycles de séchage–mouillage.

Après ces cycles, la dureté Shore C ainsi que les résistances à la compression et à la traction est mesurées, puis comparées à celles des échantillons non soumis à cet essai.



Figure 54: l'étuve



Figure 55: les échantillons dans l'eau

3.5.2.11 Isolation phonique :

L'essai d'absorption acoustique permet de tester l'affaiblissement acoustique, exprimé en décibel (dB), à l'aide d'un décibel mètre pour différents matériaux.

L'échantillon à tester, en PVC de diamètre Ø (80 mm) et d'une épaisseur de 1 cm, est placé à une extrémité du tube d'impédance. Un bruit blanc est généré dans le tube afin de produire des ondes planes, et les pressions sonores sont mesurées à l'entrée et à la sortie de l'échantillon.

Les fréquences utilisées dans ce test sont 125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 (Hz) dites niveau du bruit d'environnement extérieur par bande d'octave. Ces niveaux de bruit sont définis dans les articles 2.6.1 et 2.6.2 correspondent aux valeurs du DTR C3.1



Figure 56: appareil pour l'essai de l'acoustique

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux utilisés ainsi que leurs principales propriétés physiques. Des essais expérimentaux ont été réalisés afin de caractériser ces matériaux et de vérifier leur conformité aux exigences.

Par la suite, une formulation des mortiers à base de plâtre et de granulats de liège a été effectuée. Les essais réalisés ont permis d'étudier l'effet du liège sur les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et thermiques des composites, ainsi que l'influence de l'eau et des conditions d'essai.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des résultats obtenus ainsi qu'à leur interprétation et discussion.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus à partir du programme expérimental réalisé sur des mortiers écologiques à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence des différents traitements appliqués au liège naturel sur le comportement général des mortiers élaborés.

Cette partie présente les résultats issus des différents essais réalisés à l'état durci sur les mortiers formulés à partir de granulats de liège ayant subi trois traitements différents. Par la suite, une analyse comparative sera effectuée afin d'étudier l'effet des traitements sur la densité, la vitesse de propagation ultrasonique (UPV), les résistances mécaniques ainsi que la conductivité thermique des mortiers à base de plâtre.

Dans la suite de ce chapitre, les indicateurs de durabilité des mortiers étudiés seront également évalués à travers les essais d'absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et d'absorption par immersion totale. De plus, des essais de cycles mouillage-séchage seront réalisés afin d'analyser le comportement et la stabilité des mortiers à long terme.

Enfin, un essai d'isolation acoustique sera effectué sur les différentes formulations élaborées dans le but d'évaluer l'influence des traitements du liège naturel sur les performances acoustiques des mortiers écologiques.

4.1. Mortier à l'état frais :

4.1.1 La maniabilité :

Les résultats de l'essai de maniabilité à l'état frais des mortiers de plâtre à base de liège naturel traité sont présentés dans la figure 57.



Figure 57 : Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements.

- D'après les résultats présentés dans la figure 57, on observe que l'incorporation du déchet de liège influence différemment la maniabilité des mortiers de plâtre selon le traitement appliqué. Pour le traitement 1, la maniabilité diminue progressivement avec l'augmentation du taux de substitution. L'étalement passe de 19,5 cm pour l'échantillon témoin B0 à 17,2 cm pour B100, soit une diminution d'environ 11,8 %. Cette baisse peut être attribuée à la structure poreuse du liège qui absorbe une partie de l'eau de gâchage, réduisant ainsi la fluidité du mélange. Concernant le traitement 2, les résultats montrent une amélioration de la maniabilité pour les faibles taux d'incorporation. La valeur maximale est enregistrée pour l'échantillon B25 avec 20,5 cm, contre 19,5 cm pour le témoin B0. Par la suite, l'étalement diminue progressivement pour atteindre 18,75 cm à B100. Malgré cette diminution, les valeurs restent supérieures à celles obtenues avec les deux autres traitements, ce qui indique que ce traitement favorise une meilleure ouvrabilité du mortier. Pour le traitement 3, la maniabilité diminue également avec l'augmentation du pourcentage de liège. Les valeurs passent de 19,5 cm pour B0 à 17,75 cm pour B100. Cette diminution s'explique par la capacité d'absorption du liège et par l'augmentation de la rugosité interne du mélange qui limite son écoulement. En comparant les trois traitements, il apparaît que le traitement 2 présente les meilleures performances en termes de maniabilité pour l'ensemble des formulations, tandis que le traitement 1 enregistre les valeurs les plus faibles aux taux élevés de substitution. Le traitement 3 occupe une position intermédiaire. Ces résultats montrent

que le traitement appliqué aux granulats de liège joue un rôle important dans le comportement à l'état frais du mortier de plâtre.

4.1.2 La masse volumique :

Les résultats de la masse volumique à l'état frais des mortiers de plâtre à base de liège naturel traité sont présentés dans la figure 58.

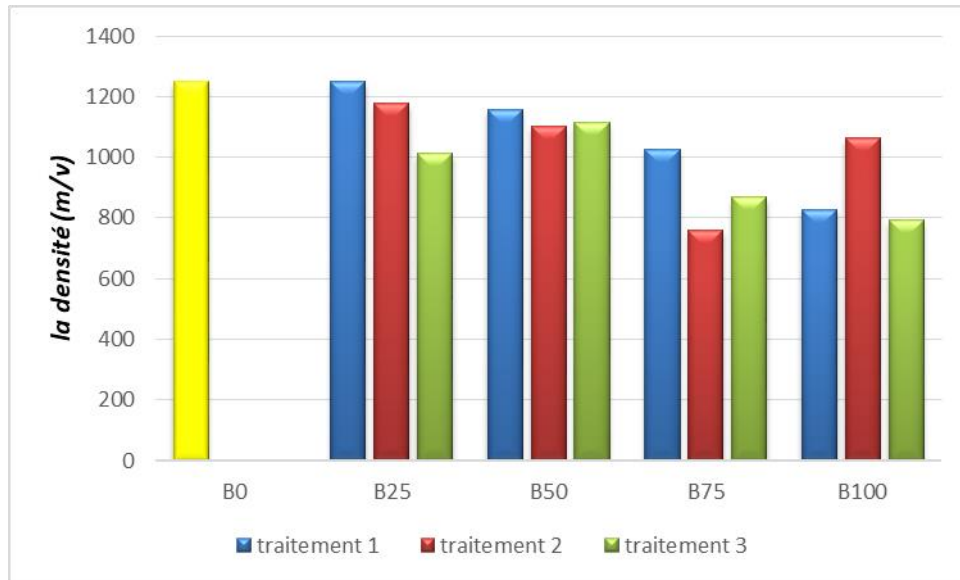


Figure 58: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements

- D'après les résultats présentés dans la figure 58, on observe que la masse volumique à l'état frais des mortiers de plâtre varie en fonction du taux d'incorporation du déchet de liège et du traitement appliqué. De manière générale, l'augmentation de la teneur en liège entraîne une diminution de la masse volumique, en raison de la faible densité de ce matériau comparativement au plâtre. Pour le traitement 1, la masse volumique reste pratiquement stable entre B0 (1248,1 kg/m³) et B25 (1250 kg/m³), puis diminue progressivement pour atteindre 828,9 kg/m³ pour l'échantillon B100. Cette réduction est d'environ 33,6 % par rapport au témoin. Concernant le traitement 2, la masse volumique passe de 1248,1 kg/m³ pour B0 à 1062,1 kg/m³ pour B100. Une baisse importante est observée jusqu'à B75 (760,5 kg/m³), avant une légère augmentation pour B100. Ce comportement peut être attribué à une meilleure répartition des granulats de liège dans le mélange à forte teneur. Pour le traitement 3, la masse volumique diminue de 1306,4 kg/m³ pour B0 à 791,9 kg/m³ pour B100, soit une réduction d'environ 39,4 %. La diminution devient particulièrement marquée à partir de B75 (869,2 kg/m³), traduisant l'effet important du liège sur l'allègement du matériau. Cette diminution de la masse volumique s'explique par la structure alvéolaire du liège, caractérisée

par une forte porosité et une faible densité. L'incorporation progressive du liège remplace une partie de la matrice plus dense, ce qui réduit naturellement la masse volumique du mortier à l'état frais. En comparant les trois traitements, on constate que le traitement 3 présente la masse volumique la plus élevée pour le mélange témoin B0, tandis que le traitement 2 conserve les valeurs les plus élevées aux fortes teneurs en liège, notamment pour B100. Le traitement 1 montre une diminution plus régulière avec l'augmentation du taux de substitution. Ces résultats sont en accord avec plusieurs travaux de la littérature qui ont montré que l'incorporation de granulats légers, tels que le liège ou les grignons d'olive, provoque une diminution progressive de la masse volumique des composites à base de plâtre en raison de leur faible poids volumique.

4.2. Mortiers à l'état durci :

4.2. 1. La densité :

La variation de la densité des mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités à 7 et 28 jours est présentée dans le tableau 9. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'influence des différents traitements appliqués au liège naturel sur la densité des mortiers élaborés.

La figure.59 illustre la variation de la masse volumique des mortiers à base de plâtre contenant des granulats de liège naturel traités, à l'âge de 28 jours

Tableau 9: Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.

Les échantillons	Traitement1	Traitement 2	Traitement 3
	M/V (28j) (kg/m³)	M/V (28j) (kg/m³)	M/V (28j) (kg/m³)
B0	860.5	1011.7	859.3
B25	852.7	862.1	839.45
B50	774	827.7	665.2
B75	603.9	667.1	625
B100	562.5	623.8	524.2

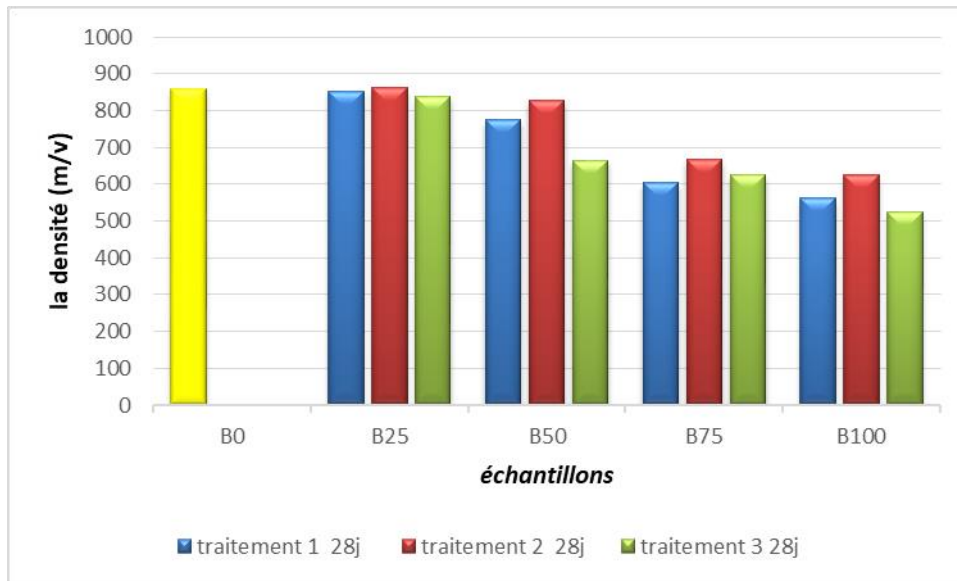


Figure 59 : Variation de la densité en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours

- D'après les résultats obtenus, on constate une diminution progressive de la masse volumique avec l'augmentation du taux de remplacement du sable par les granulats de liège, et ce pour les trois traitements étudiés. Cette diminution est principalement liée à la faible densité du liège par rapport au sable, ce qui contribue à l'allègement du mortier. Pour le traitement 1, la masse volumique passe de 860,5 kg/m³ pour l'échantillon de référence B0 à 562,5 kg/m³ pour l'échantillon B100, soit une réduction d'environ 34,63 %. Le même comportement est observé pour les traitements 2 et 3, avec des diminutions respectives de 38,34 % et 39 %. Par ailleurs, le traitement 2 présente les valeurs de masse volumique les plus élevées, tandis que le traitement 3 enregistre les valeurs les plus faibles. Cette différence peut être attribuée à l'influence du traitement appliqué aux granulats de liège sur les caractéristiques finales du mortier. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature. En effet, une diminution de la densité a également été observée dans des mortiers à base de déchets de grignons d'olive (Fethallah & all, 2023) ainsi que dans des mortiers de plâtre incorporant des déchets de liège (Chahrazed & all, 2025). Dans les deux cas, les auteurs ont attribué cette évolution à la faible masse volumique des matériaux biosourcés utilisés en substitution du sable. Ces observations confirment que l'incorporation du liège permet d'obtenir un mortier plus léger, ce qui constitue un avantage pour les applications nécessitant une réduction du poids des matériaux et une amélioration des performances d'isolation.

4.2.2. Dureté superficielle (Shore C) :

Les résultats de la dureté superficielle Shore C des mortiers de plâtre à base de liège naturel traité sont présentés dans la figure 60.

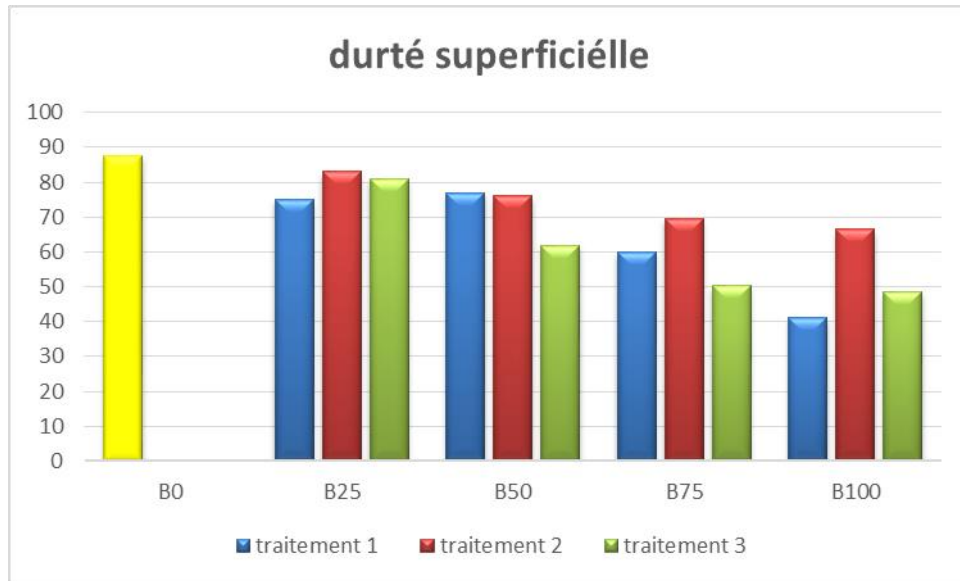


Figure 60: Variation de la dureté superficielle en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours

- Les résultats de la dureté superficielle Shore C montrent une diminution progressive de la dureté des mortiers de plâtre avec l'augmentation du taux d'incorporation des déchets de liège pour les trois traitements étudiés. Pour le traitement 1, la dureté passe de 87,60 pour l'échantillon témoin B0 à 75,20 pour B25, reste relativement stable à 76,90 pour B50, puis diminue fortement à 60,03 pour B75 et atteint sa valeur minimale de 41,28 pour B100. Cette baisse est liée à la nature plus légère, poreuse et déformable du liège qui réduit la résistance superficielle du matériau. Concernant le traitement 2, les résultats présentent globalement les meilleures performances parmi les trois traitements. La dureté diminue progressivement de 89,64 pour B0 à 83,06 pour B25, 76,01 pour B50, 69,56 pour B75 et 66,56 pour B100, tout en conservant des valeurs relativement élevées même aux forts taux de substitution. Cela traduit une meilleure compatibilité entre le liège traité et la matrice de plâtre ainsi qu'une structure plus compacte limitant la dégradation de la surface. Pour le traitement 3, la diminution est également importante puisque la dureté passe de 84,83 pour B0 à 81,00 pour B25, puis chute à 61,83 pour B50, 50,24 pour B75 et 48,59 pour B100. Cette réduction importante indique une structure plus poreuse qui fragilise la surface du composite. Globalement, l'analyse comparative montre que le traitement 2 offre les meilleures performances de dureté superficielle à tous les dosages, tandis que le traitement 3 présente

les valeurs les plus faibles. Le traitement 1 occupe une position intermédiaire avec une chute importante aux forts taux de liège. En conclusion, l'ajout des déchets de liège diminue la dureté superficielle des mortiers de plâtre à cause de la faible rigidité et de la forte porosité du liège, mais cette perte peut être mieux maîtrisée grâce au traitement 2 qui améliore l'adhérence et la cohésion interne du composite.

4.2.2. Essai ultrasonique (UPV) :

Les résultats de l'essai ultrasonique (UPV) réalisés sur les mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités, à 28 jours, sont présentés dans la figure 61.

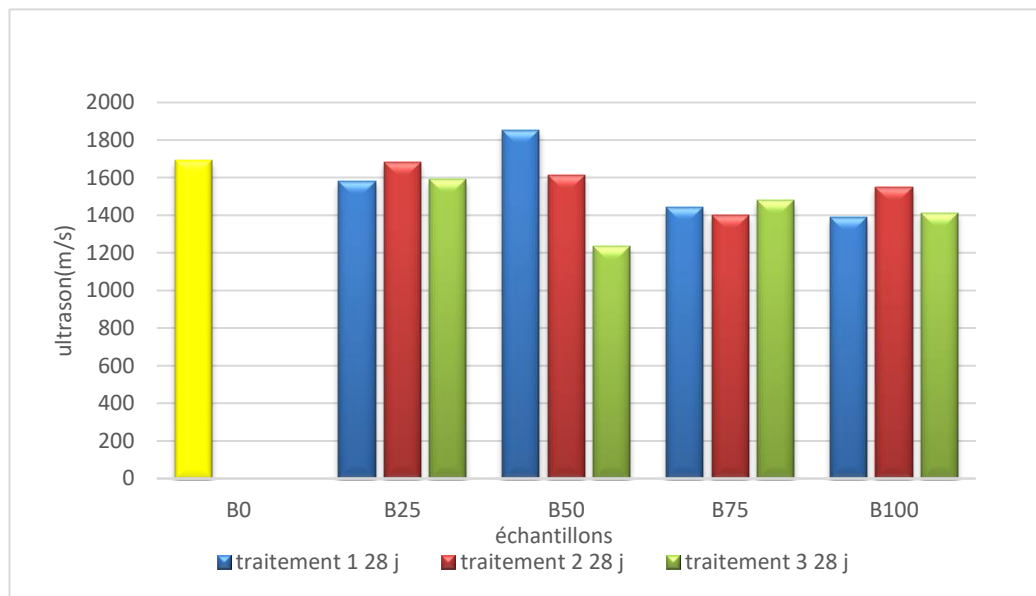


Figure 61: Variation d'ultrason en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours

- Les essais ultrasoniques ont été réalisés sur les différents mortiers de plâtre incorporant des taux croissants de granulats de liège traités afin d'évaluer l'influence de cette incorporation sur la structure interne du matériau à l'âge de 28 jours. Les résultats obtenus montrent que la vitesse de propagation des ultrasons diminue globalement avec l'augmentation du taux de liège dans le mélange. Pour le traitement 1, la vitesse passe de 1691 m/s pour le mortier de référence B0 à 1389 m/s pour le mortier B100, soit une diminution d'environ 17,86 %. Cette évolution peut être attribuée à la nature légère et poreuse du liège, qui favorise la présence de vides au sein du matériau et réduit ainsi la continuité du réseau solide responsable de la transmission des ondes ultrasonores.

Concernant le traitement 2, les valeurs enregistrées demeurent généralement les plus élevées parmi les trois traitements. La vitesse atteint 1852 m/s pour l'échantillon B0 puis diminue progressivement avec l'augmentation du taux de liège jusqu'à 1399 m/s pour B75. Une

légère augmentation est ensuite observée pour l'échantillon B100, qui présente une vitesse de 1550 m/s. Malgré cette variation, la tendance générale reste marquée par une diminution de la vitesse ultrasonique lorsque la teneur en liège augmente.

Pour le traitement 3, une baisse plus importante est observée. La vitesse passe de 1826 m/s pour le mortier témoin à 1235 m/s pour l'échantillon B50, avant d'augmenter légèrement pour les formulations B75 et B100 atteignant respectivement 1480 m/s et 1413 m/s. Cette diminution importante traduit une modification de la structure interne du mortier sous l'effet de l'incorporation du liège. La présence d'un volume plus important de pores et de discontinuités internes ralentit la propagation des ondes ultrasonores à travers le matériau.

La comparaison des trois traitements montre que le traitement 2 présente globalement les vitesses ultrasoniques les plus élevées, alors que le traitement 3 enregistre les valeurs les plus faibles pour certaines formulations. Ces résultats indiquent que le mode de traitement appliqué aux granulats de liège influence le comportement ultrasonique du mortier et sa structure interne. Les valeurs plus élevées obtenues avec le traitement 2 suggèrent une meilleure transmission des ondes au sein du matériau, tandis que les valeurs plus faibles observées pour le traitement 3 traduisent une structure plus poreuse.

En conclusion, l'augmentation du taux de liège entraîne une diminution de la vitesse de propagation des ultrasons pour l'ensemble des formulations étudiées. Cette évolution est principalement liée à la faible densité et à la porosité élevée du liège. L'essai ultrasonique met ainsi en évidence l'influence significative des granulats biosourcés et de leur traitement sur la structure interne des mortiers de plâtre.

4.2.3. Résistance à la traction par flexion :

Les résultats de la résistance à la flexion des mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités, à 7 et 28 jours, sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours et 28 jours.

Les échantillons	Traitement 1		Traitement2		Traitement 3	
	7jours	28 jours	7jours	28 jours	7jours	28 jours
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
B0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

B25	0.8	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4
B50	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4
B75	0.7	0.7	0.5	0.7	0.5	0.5
B100	0.5	0.5	0.4	0.7	0.5	0.4

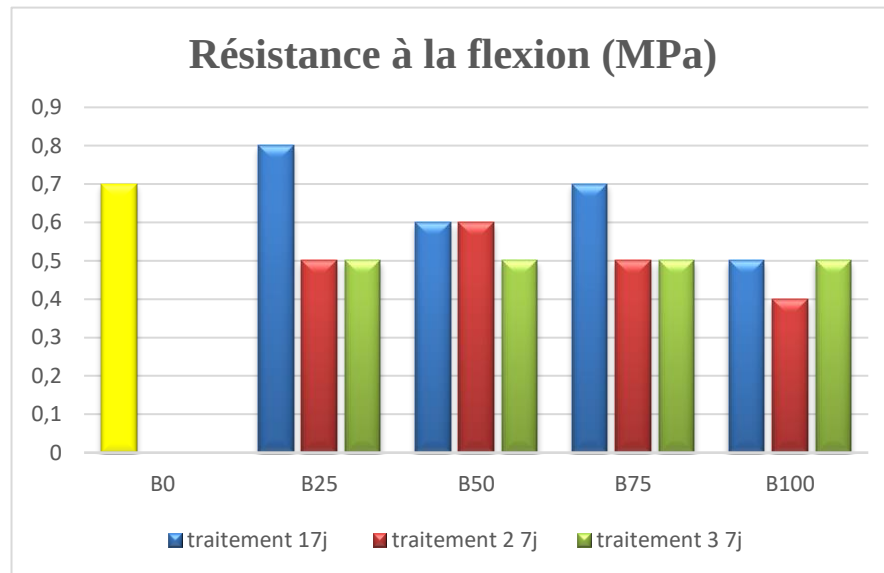


Figure 62 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours.

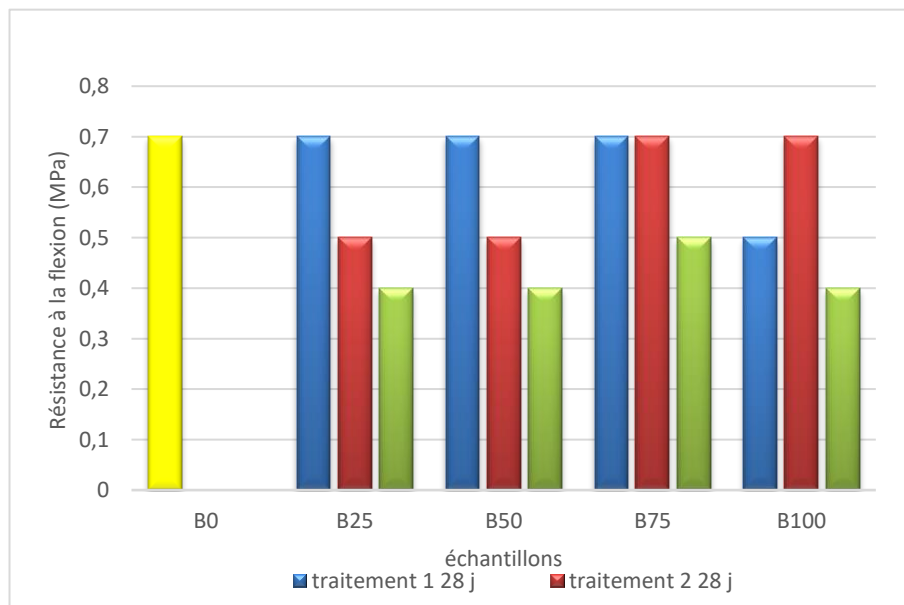


Figure 63: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.

- D'après les résultats obtenus à 7 et 28 jours, l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel varie selon le traitement appliqué. Pour le traitement 1, une légère amélioration de la résistance est observée à 7 jours pour le taux de substitution de 25 %, avec une valeur de 0,8 MPa contre 0,7 MPa pour le mortier témoin, soit une augmentation d'environ 14,28 %. Cette amélioration peut être liée à une meilleure interaction entre les granulats de liège traités et la matrice de plâtre. Cependant, lorsque le taux d'incorporation du liège augmente, la résistance diminue progressivement pour atteindre 0,5 MPa dans le cas de l'échantillon B100. À 28 jours, les résultats montrent une bonne stabilité de la résistance mécanique pour les formulations B25, B50 et B75, qui conservent la même valeur que le mortier témoin (0,7 MPa), tandis qu'une légère diminution est observée pour B100. Concernant le traitement 2, les résultats montrent une diminution de la résistance à la flexion à 7 jours avec l'augmentation du taux de liège. Les valeurs passent de 0,7 MPa pour le mortier témoin à 0,5 MPa pour les formulations B25 et B75, puis à 0,4 MPa pour B100. Toutefois, à 28 jours, une amélioration importante est observée pour les fortes teneurs en liège. Les formulations B75 et B100 atteignent une résistance de 0,7 MPa, équivalente à celle du mortier de référence. Ce comportement peut être expliqué par l'amélioration progressive de l'adhérence entre le liège traité et la matrice de plâtre au cours du temps, favorisant une meilleure cohésion du composite (Guermiti & all, 2026). Pour le traitement 3, les résultats révèlent une diminution importante de la résistance à la flexion dès l'incorporation des premiers pourcentages de liège. À 7 jours comme à 28 jours, les valeurs restent inférieures à celles du mortier témoin. La résistance diminue jusqu'à 0,4 MPa pour plusieurs formulations, correspondant à une réduction d'environ 42,85 % par rapport à l'échantillon B0. Cette baisse peut être attribuée à une faible compatibilité entre les granulats traités et la matrice de plâtre, entraînant une structure plus poreuse et une propagation plus rapide des fissures sous chargement. La comparaison des trois traitements montre que le traitement 1 présente les meilleures performances à court terme ainsi qu'une bonne stabilité de la résistance pour les faibles et moyens taux de substitution. Le traitement 2 apparaît comme le plus efficace à 28 jours pour les fortes teneurs en liège, notamment pour les formulations B75 et B100. En revanche, le traitement 3 reste le moins performant en raison de la diminution importante de la résistance mécanique observée pour l'ensemble des formulations étudiées. Ces résultats sont en accord avec plusieurs études de la littérature. En effet, certaines recherches ont montré que l'amélioration de l'adhérence interfaciale entre la matrice et les éléments incorporés contribue à maintenir de bonnes performances mécaniques des composites (Guermiti & all, 2026). D'autres

travaux ont également indiqué qu'une augmentation importante de matériaux légers entraîne généralement une diminution de la résistance mécanique en raison de la réduction de la densité et de la compacité du matériau (Laouibi & all, 2018). Ces observations confirment les résultats obtenus dans cette étude concernant l'influence du traitement et du taux d'incorporation du liège sur le comportement mécanique des mortiers de plâtre. En conclusion, les résultats obtenus montrent que le traitement appliqué au liège naturel joue un rôle important dans l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers de plâtre. Le traitement 1 permet de maintenir une bonne stabilité mécanique pour les faibles et moyens taux d'incorporation, tandis que le traitement 2 offre les meilleures performances pour les formulations à forte teneur en liège à long terme.

4.2.4. Résistance à la compression :

Les résultats de la variation de la résistance à la compression des mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités, à 7 et 28 jours, sont présentés dans le tableau 11 et la figure 64 et 65.

Tableau 11: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours et 28 jours.

Les échantillons	Traitement 1		Traitement2		Traitement 3	
	7jours (MPa)	28 jours (MPa)	7jours (MPa)	28 jours (MPa)	7jours (MPa)	28 jours (MPa)
B0	0.56	1.8	0.56	1.8	0.56	1.8
B25	0.2	0.56	0.4	0.75	0.3	1.3
B50	0.4	1.37	0.4	0.56	0.4	0.68
B75	0.4	0.62	0.4	0.5	0.4	1.3
B100	0.1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.62

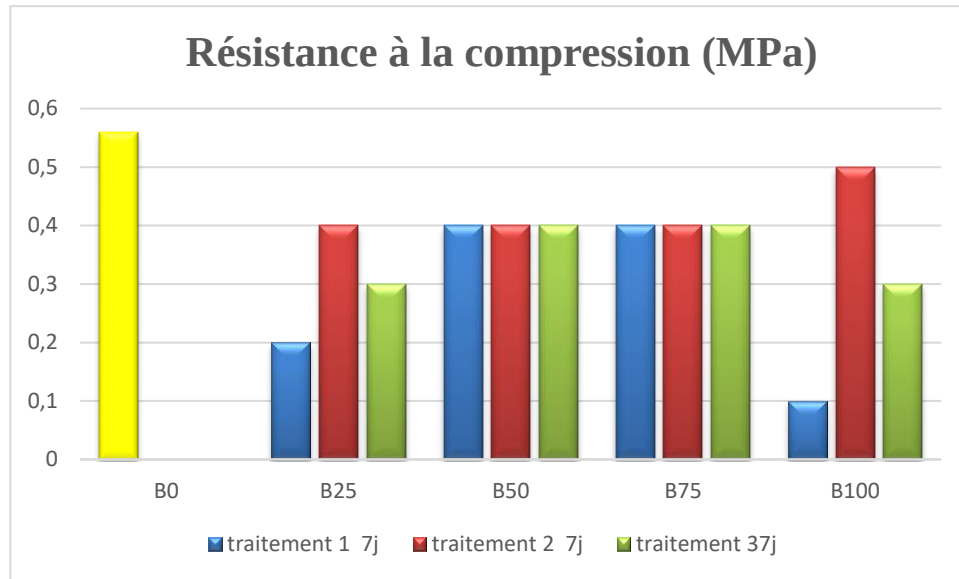


Figure 64 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours

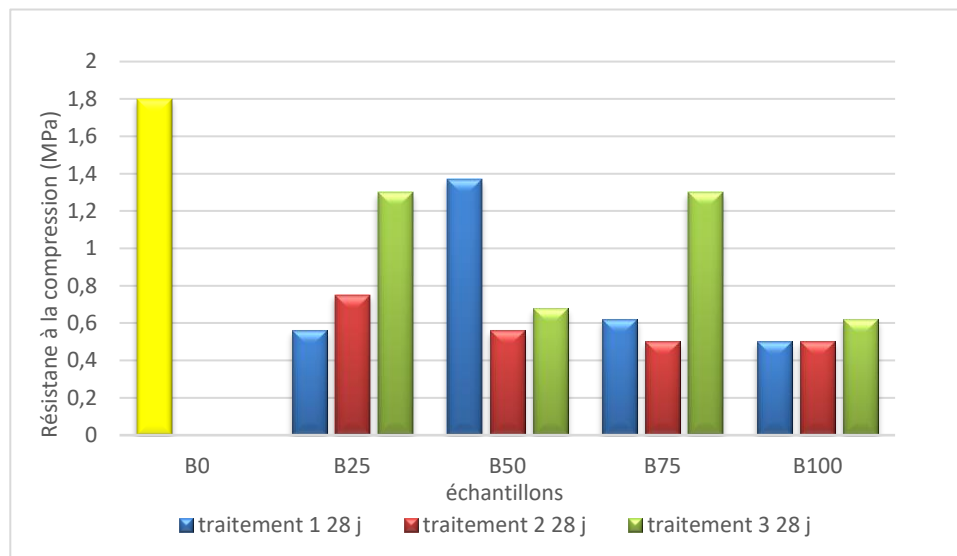


Figure 65: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.

- D'après les résultats obtenus, on observe globalement une diminution de la résistance à la compression des mortiers de plâtre avec l'augmentation du taux d'incorporation des déchets de liège pour les trois traitements étudiés. Cette diminution est principalement liée à la faible rigidité, à la forte porosité et à la faible densité du liège, qui réduisent la compacité de la matrice et favorisent l'apparition de zones de faiblesse dans le composite. Pour le traitement 1, la résistance à 7 jours chute de 0,56 MPa pour le témoin B0 à 0,10 MPa pour B100, tandis qu'à 28 jours elle passe de 1,80 MPa à 0,50 MPa, soit une diminution de 72,22 %. Une amélioration intermédiaire est toutefois observée pour l'échantillon B50, qui atteint 1,37

MPa à 28 jours, probablement grâce à une meilleure répartition des granulats de liège dans la matrice. Concernant le traitement 2, les résistances restent relativement faibles et stables à 7 jours, variant entre 0,40 et 0,50 MPa. À 28 jours, les valeurs diminuent également avec l'augmentation du taux de liège, passant de 1,80 MPa pour le témoin B0 à 0,75 MPa pour B25 puis à 0,50 MPa pour B50, B75 et B100. Cette diminution peut être expliquée par la présence du liège, matériau léger et poreux, qui réduit la capacité du composite à supporter les charges de compression malgré le traitement appliqué. Toutefois, la stabilité des valeurs à fort taux de substitution suggère que le traitement 2 améliore partiellement l'adhérence entre les granulats de liège et la matrice de plâtre, limitant ainsi la dégradation mécanique. Pour le traitement 3, les résistances restent faibles et irrégulières, variant entre 0,30 et 0,40 MPa à 7 jours, puis entre 0,62 et 1,30 MPa à 28 jours, avec une diminution de 65,55 % pour B100 par rapport au témoin. Ce comportement traduit probablement une mauvaise compatibilité entre le liège traité et la matrice de plâtre, générant une interface poreuse et fragile. Ces résultats sont en accord avec plusieurs études de la littérature, qui ont montré que l'incorporation du liège dans les matériaux cimentaires réduit généralement les résistances mécaniques en raison de sa faible densité et de sa porosité élevée (Guermiti & all, 2026). De même, l'étude réalisée sur les composites à base d'EPS a confirmé que la diminution de la densité des matériaux légers entraîne directement une baisse des résistances mécaniques, notamment en compression (Laouibi & all, 2018). Globalement, les trois traitements montrent que l'augmentation du taux de liège diminue la résistance à la compression, même si le traitement 2 semble offrir une meilleure stabilité des performances à long terme par rapport aux autres traitements.

4.2.5. Conductivité thermique :

L'essai de conductivité thermique a été réalisé après les essais de flexion sur les demi-éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Ces éprouvettes ayant déjà subi des sollicitations mécaniques susceptibles de provoquer des fissures ou des endommagements partiels, leur comportement thermique peut être influencé par ces modifications structurales.

Tableau 12: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours et 28 jours.

	Traitement 1		Traitement 2		Traitement 3	
Les échantillons	7jours	28 jours	7jours	28 jours	7jours	28 jours
	(W/m.K)	(W/m.K)	(W/m.K)	(W/m.K)	(W/m.K)	(W/m.K)

B0	0.652	0.562	0.614	0.562	0.634	0.562
B25	0.442	0.371	0.505	0.483	0.406	0.264
B50	0.447	0.367	0.455	0.310	0.411	0.197
B75	0.483	0.229	0.271	0.243	0.392	0.170
B100	0.344	0.190	0.407	0.271	0.251	0.184

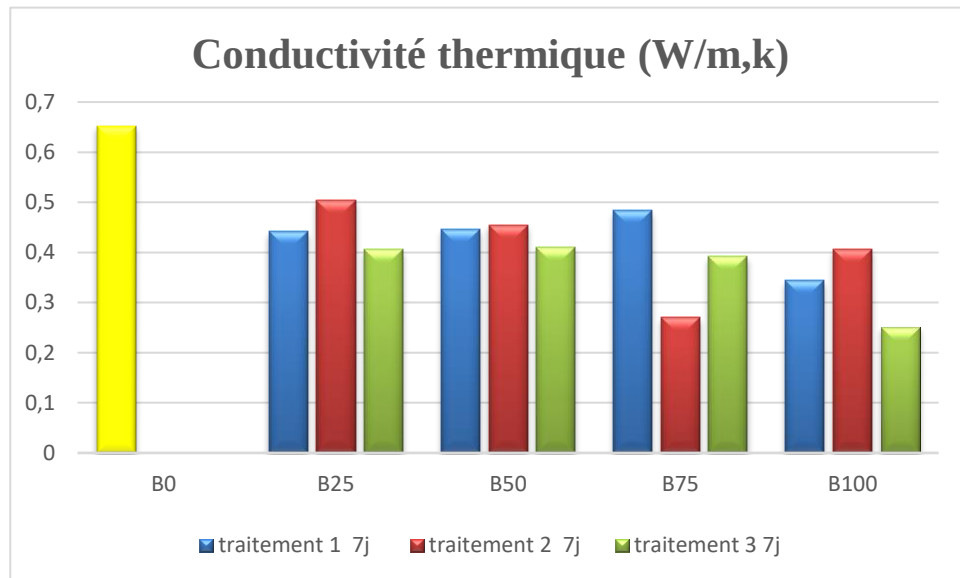


Figure 66: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 7 jours

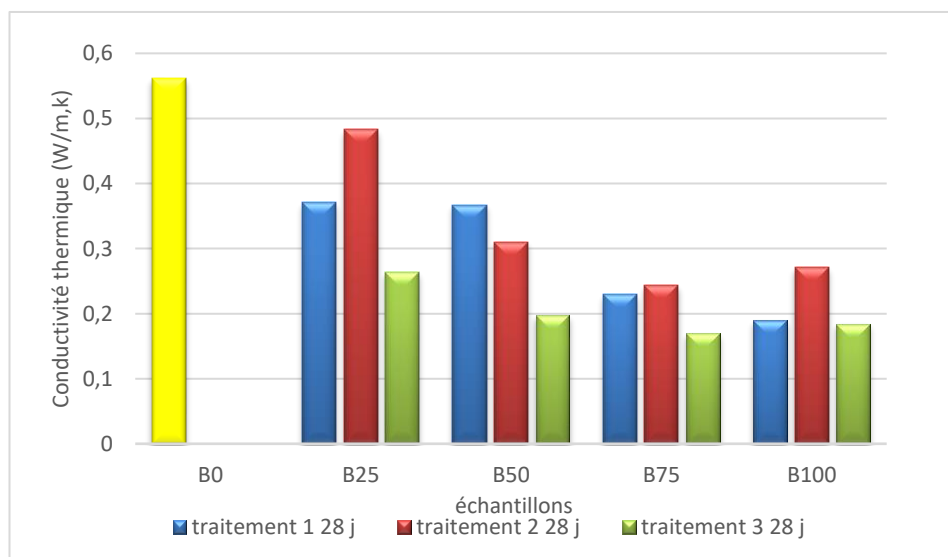


Figure 67: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours

- D'après les résultats obtenus, on observe une diminution progressive de la conductivité thermique des mortiers de plâtre avec l'augmentation du taux d'incorporation des déchets de liège pour les trois traitements étudiés, aussi bien à 7 jours qu'à 28 jours. Cette diminution traduit une amélioration importante des propriétés d'isolation thermique des composites élaborés. Pour le traitement 1, la conductivité thermique passe à 7 jours de 0,652 W/m.K pour l'échantillon témoin B0 à 0,344 W/m.K pour B100. À 28 jours, elle diminue davantage de 0,562 W/m.K à 0,190 W/m.K, soit une réduction de 66,19 % par rapport au témoin. Cette baisse s'explique principalement par la très faible conductivité thermique du liège, liée à sa structure cellulaire poreuse riche en air emprisonné, qui limite fortement le transfert de chaleur. Concernant le traitement 2, les résultats montrent également une diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation du taux de liège, passant de 0,614 W/m.K à 0,407 W/m.K à 7 jours, puis de 0,562 W/m.K à 0,271 W/m.K à 28 jours. Toutefois, ce traitement présente globalement les valeurs de conductivité thermique les plus élevées parmi les trois traitements, ce qui peut être lié à une structure plus compacte et moins poreuse favorisant davantage la transmission thermique. Pour le traitement 3, la baisse de la conductivité thermique est la plus marquée de l'étude. À 7 jours, la valeur chute de 0,634 W/m.K pour B0 à 0,251 W/m.K pour B100. À 28 jours, la conductivité atteint sa valeur minimale de 0,170 W/m.K pour B75 avant de légèrement remonter à 0,184 W/m.K pour B100, correspondant à une réduction de 67,25 % par rapport au témoin. Cette forte diminution peut être attribuée à l'augmentation importante de la porosité et des micros vides au sein de la matrice, ce qui limite fortement la propagation du flux thermique. Globalement, le traitement 3 apparaît comme le plus performant pour améliorer l'isolation thermique, suivi du traitement 1, tandis que le traitement 2 offre un compromis intéressant entre propriétés thermiques et performances mécaniques.

4.2.6. Indicateurs de durabilité :

4.2.6.1 Absorption capillaire :

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé afin d'évaluer la capacité d'absorption d'eau des mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités. Cette absorption, qui se produit sans pression externe et uniquement par contact direct avec l'eau, a été mesurée après 28 jours. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 68.

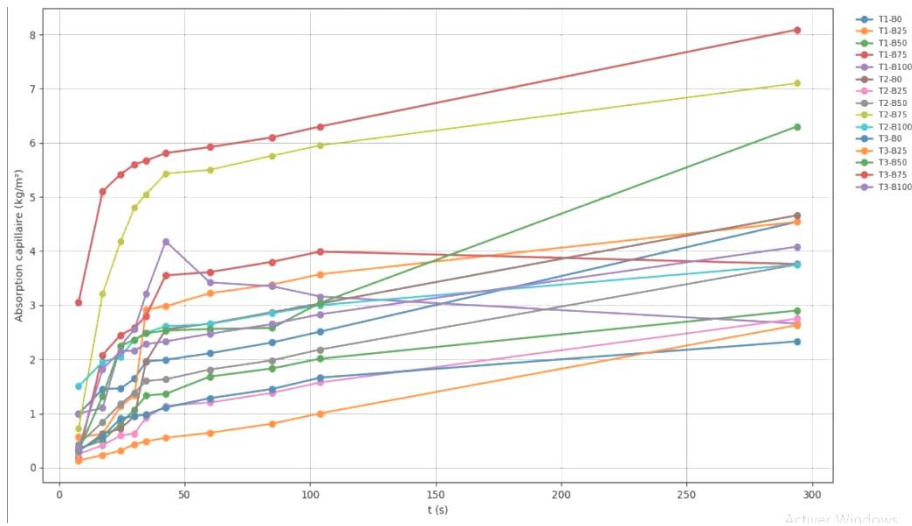


Figure 68 : Cinétique d'absorption capillaire au cours du temps en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.

- D'après les résultats obtenus, on constate que l'absorption capillaire augmente globalement avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de liège. Cette évolution est principalement liée à la structure poreuse et alvéolaire du liège, qui favorise la pénétration et la circulation de l'eau à travers le réseau poreux du mortier. Pour le traitement 1, les valeurs d'absorption restent relativement modérées et atteignent environ 4,54 % pour les échantillons B0 et B25, tandis que l'échantillon B100 présente une valeur proche de 2,66 %. Concernant le traitement 2, les valeurs d'absorption sont généralement plus élevées, notamment pour l'échantillon B75 qui atteint environ 7,10 % à la fin de l'essai. Pour le traitement 3, une augmentation progressive est également observée, avec une valeur maximale d'environ 8,09 % enregistrée pour l'échantillon B75. La comparaison entre les trois traitements montre que les traitements 2 et 3 favorisent davantage l'absorption de l'eau par capillarité, alors que le traitement 1 présente globalement les valeurs les plus faibles. Cette différence peut être attribuée à l'effet du traitement appliqué aux granulats de liège sur la porosité et la connectivité des pores au sein du composite. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans une étude portant sur l'incorporation des déchets de grignon d'olive dans les mortiers, où les auteurs ont montré que la masse d'eau absorbée augmente progressivement avec le temps et que le remplacement partiel du sable par ce type de déchet entraîne une augmentation significative de l'absorption capillaire (Fethallah & all, 2023). Ils concordent également avec les travaux réalisés sur des composites contenant des granulats de caoutchouc recyclé, pour lesquels une augmentation du taux d'absorption capillaire a été observée avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Ces observations confirment que l'incorporation de matériaux légers et poreux favorise le transfert de l'eau à travers la

structure interne du composite et augmente sa sensibilité à l'absorption par capillarité (Meddah & all, 2020).

4.2.6.2. Absorption par immersion totale :

L'essai d'absorption par immersion totale a été réalisé afin d'évaluer la capacité d'absorption d'eau des mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités. Les éprouvettes ont été totalement immergées dans l'eau après 28 jours de conservation, puis pesées à différents intervalles de temps afin de suivre l'évolution de l'absorption.

L'absorption d'eau a été déterminée à partir de la variation de masse des éprouvettes avant et après immersion. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbe et dans la figure suivante.

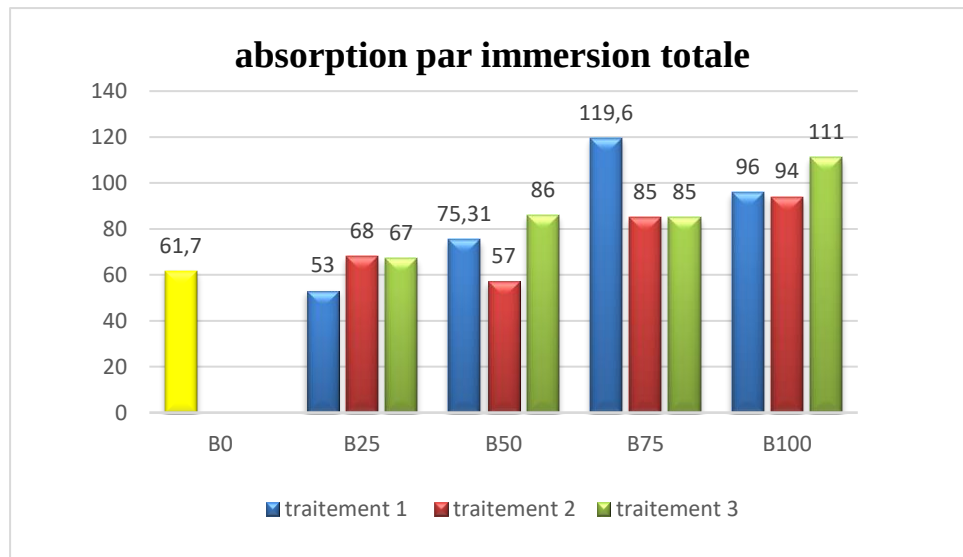


Figure 69 : Variation du coefficient l'absorption par immersion totale en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.

- D'après les résultats obtenus, on constate que l'absorption par immersion totale augmente globalement avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de liège pour les trois traitements étudiés. Cette évolution est principalement liée à la structure poreuse du liège et à sa forte capacité à retenir l'eau. Pour le traitement 1, l'absorption passe de 61,7 % pour l'échantillon témoin B0 à 96 % pour l'échantillon B100, avec une valeur maximale de 119,6 % enregistrée pour B75. Concernant le traitement 2, les valeurs évoluent de 42 % pour B0 à 94 % pour B100, tandis que l'échantillon B75 atteint 85 %. Pour le traitement 3, l'absorption augmente de 42 % pour B0 à 111 % pour B100, avec une valeur intermédiaire de 86 % pour B50. La comparaison des trois traitements montre que le traitement 1 présente les valeurs d'absorption les plus élevées, alors que le traitement 2 enregistre généralement

les valeurs les plus faibles. Cette différence peut être attribuée à l'influence du traitement appliqué aux granulats de liège sur leur porosité et sur la quantité de vides présents dans le matériau. Globalement, l'incorporation du liège augmente la capacité d'absorption d'eau des mortiers de plâtre en raison de sa nature légère et poreuse, ce qui favorise le stockage de l'eau à l'intérieur de la structure du composite.

4.2.6.2 Porosité accessible à l'eau :

Les résultats de l'essai de la porosité accessible à l'eau des mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités sont présentés dans la figure 70.

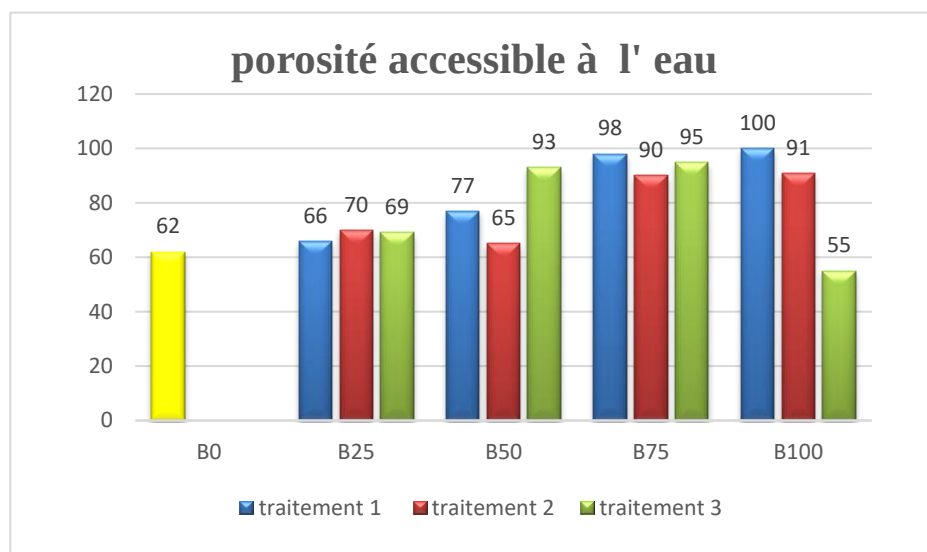


Figure 70: Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.

- D'après les résultats obtenus, on constate une augmentation globale de la porosité accessible à l'eau avec l'augmentation du taux de remplacement du sable par les granulats de liège pour la plupart des formulations étudiées. Cette évolution est directement liée à la structure alvéolaire et poreuse du liège, qui favorise la formation de vides au sein du mortier et augmente ainsi le volume des pores accessibles à l'eau. Pour le traitement 1, la porosité passe de 62 % pour l'échantillon de référence B0 à 100 % pour l'échantillon B100, soit une augmentation d'environ 61,3 %. L'évolution est progressive avec des valeurs de 66 %, 77 % et 98 % respectivement pour les compositions B25, B50 et B75. Concernant le traitement 2, la porosité augmente également de 51 % pour B0 à 91 % pour B100, soit une hausse d'environ 78,4 %. Malgré quelques variations intermédiaires, les valeurs restent élevées pour

les taux importants de substitution, atteignant 90 % pour B75. Pour le traitement 3, le comportement est différent. La porosité augmente d'abord de 68 % pour B0 à 95 % pour B75, puis diminue à 55 % pour B100. Cette baisse peut être liée à une modification de la structure interne du matériau à forte teneur en liège, conduisant à une répartition différente des pores accessibles à l'eau. Par ailleurs, la comparaison entre les trois traitements montre que le traitement 1 présente la porosité la plus élevée à fort taux de substitution, notamment pour B100, tandis que le traitement 2 conserve des valeurs légèrement inférieures. Le traitement 3 se distingue par un comportement moins régulier, marqué par une diminution notable de la porosité pour la formulation B100. En conclusion, l'incorporation des granulats de liège augmente généralement la porosité accessible à l'eau des mortiers de plâtre en raison de la nature poreuse du liège et de l'augmentation des vides dans la matrice. Cette évolution influence directement les propriétés de transfert d'eau du matériau et doit être prise en compte dans le choix de la formulation selon l'application visée.

4.2.7. Essai séchage–mouillage :

Afin d'évaluer l'endommagement des différents mortiers étudiés après les cycles de séchage–mouillage, des essais ultrasoniques (UPV) ainsi que des essais de résistance à la compression ont été réalisés.

4.2.7.1. Essai ultrasonique (UPV) :

Les résultats obtenus de l'essai ultrasonique sur les mortiers à base de plâtre incorporant des granulats de liège naturel traités, soumis aux cycles de séchage–mouillage, sont présentés dans la figure.71.

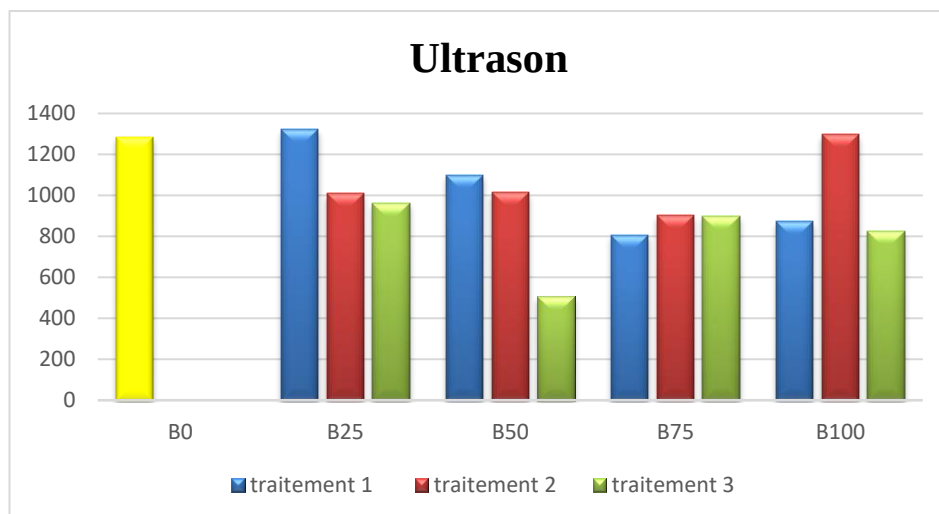


Figure 71: Variation d'ultrason de l'essai séchage–mouillage en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours

- D'après les résultats obtenus après les cycles de séchage–mouillage, on observe que la vitesse ultrasonique varie en fonction du taux d'incorporation du liège et du traitement appliqué. Cette propriété est directement liée à la compacité interne du matériau ainsi qu'à la présence de fissures, de vides et de défauts générés par les cycles d'humidification et de séchage. Pour le traitement 1, la vitesse ultrasonique est de 1286 m/s pour l'échantillon de référence B0 et augmente légèrement à 1323 m/s pour B25. Au-delà de ce taux, elle diminue progressivement pour atteindre 806 m/s à B75 avant de remonter légèrement à 874 m/s pour B100. Cette diminution traduit une augmentation de la porosité et une dégradation progressive de la continuité interne du matériau. Concernant le traitement 2, les valeurs restent relativement élevées et stables. La vitesse passe de 1286 m/s pour B0 à 1009 m/s pour B25 puis 1013 m/s pour B50. Elle atteint 902 m/s pour B75 avant d'augmenter fortement à 1299 m/s pour B100. Ces résultats indiquent que ce traitement permet de préserver la cohésion interne du composite malgré les cycles de séchage–mouillage. Pour le traitement 3, les vitesses enregistrées sont généralement les plus faibles. Elles passent de 881 m/s pour B0 à 964 m/s pour B25 puis chutent fortement à 505 m/s pour B50, ce qui représente la valeur minimale de l'ensemble des formulations. Les valeurs remontent ensuite à 899 m/s pour B75 et 826 m/s pour B100. Cette baisse importante peut être associée à la présence de défauts internes plus nombreux et à une plus forte sensibilité aux cycles de vieillissement hydrique. Globalement, la comparaison des trois traitements montre que le traitement 2 présente les meilleures performances ultrasoniques après les cycles séchage–mouillage, tandis que le traitement 3 apparaît comme le plus affecté. Les variations observées confirment que l'incorporation du liège et la nature du traitement influencent fortement la structure interne des mortiers de plâtre ainsi que leur durabilité face aux sollicitations hydriques.

4.2.7.2. Essai de résistance à la compression :

Les résultats de la résistance à la compression de l'essai séchage–mouillage obtenus sur les mortiers de plâtre à base de liège naturel traité sont illustrés dans la figure 72.

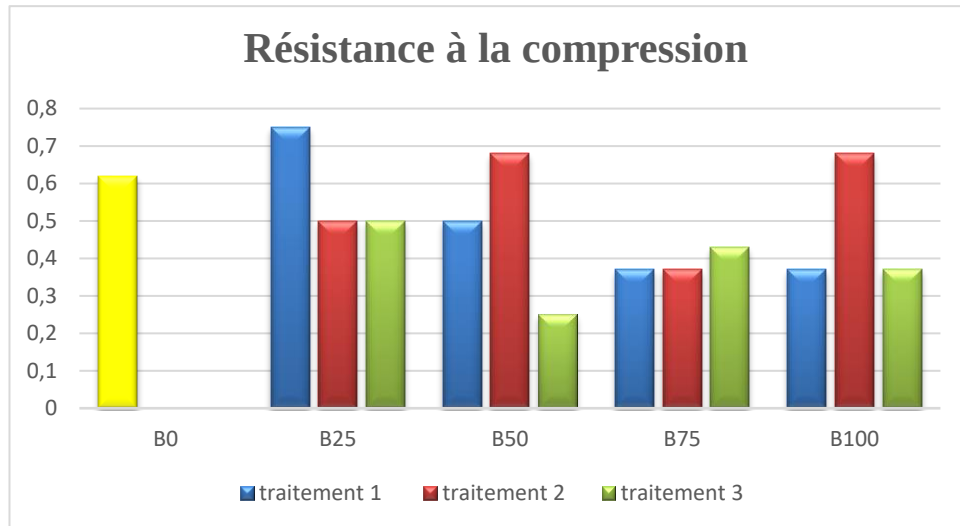


Figure 72: Variation de la résistance à la compression de l'essai séchage-mouillage en fonction du pourcentage du déchet de liège et des trois traitements à 28 jours.

- La figure représentant l'essai de séchage-mouillage met en évidence l'évolution de la résistance à la compression des mortiers de plâtre incorporant différents pourcentages de déchets de liège après les cycles successifs d'humidification et de séchage. D'une manière générale, les résultats montrent que la résistance à la compression dépend à la fois du taux d'incorporation du liège et du traitement appliqué aux granulats. Pour le traitement 1, une diminution progressive de la résistance est observée avec l'augmentation du taux de liège. La résistance passe ainsi d'environ 0,62 MPa pour l'échantillon témoin B0 à 0,37 MPa pour les échantillons B75 et B100, ce qui traduit une dégradation de la cohésion interne du matériau sous l'effet des cycles hydriques. Concernant le traitement 2, les valeurs obtenues sont globalement les plus élevées. La résistance maximale est enregistrée pour l'échantillon B0 avec 1,37 MPa. Bien qu'une baisse soit observée pour certains taux de substitution, les résistances atteignent de nouveau 0,68 MPa pour les formulations B50 et B100, ce qui indique une meilleure stabilité du matériau face aux cycles de séchage-mouillage. Cette amélioration peut être attribuée à une meilleure adhérence entre les granulats de liège et la matrice de plâtre, limitant ainsi les effets néfastes de l'eau sur la structure du composite. En revanche, le traitement 3 présente les valeurs les plus faibles et les plus irrégulières, comprises entre 0,25 MPa et 0,62 MPa. Ce comportement révèle une plus grande sensibilité aux alternances d'humidification et de séchage ainsi qu'une structure interne plus fragile. Globalement, l'incorporation du liège influence fortement le comportement des mortiers vis-à-vis des cycles hydriques en raison de la nature poreuse et absorbante de ce matériau, qui favorise la pénétration de l'eau et le développement de microfissures au sein de la matrice. Néanmoins, les résultats obtenus montrent que le traitement 2 permet de mieux préserver les

performances mécaniques après l'essai de durabilité comparativement aux traitements 1 et 3.

4.2.8. Isolation phonique :

Les résultats de l'indice d'affaiblissement acoustique des mortiers de plâtre à base de liège naturel traité, pour l'épaisseur étudiée, sont présentés dans les figures suivantes.

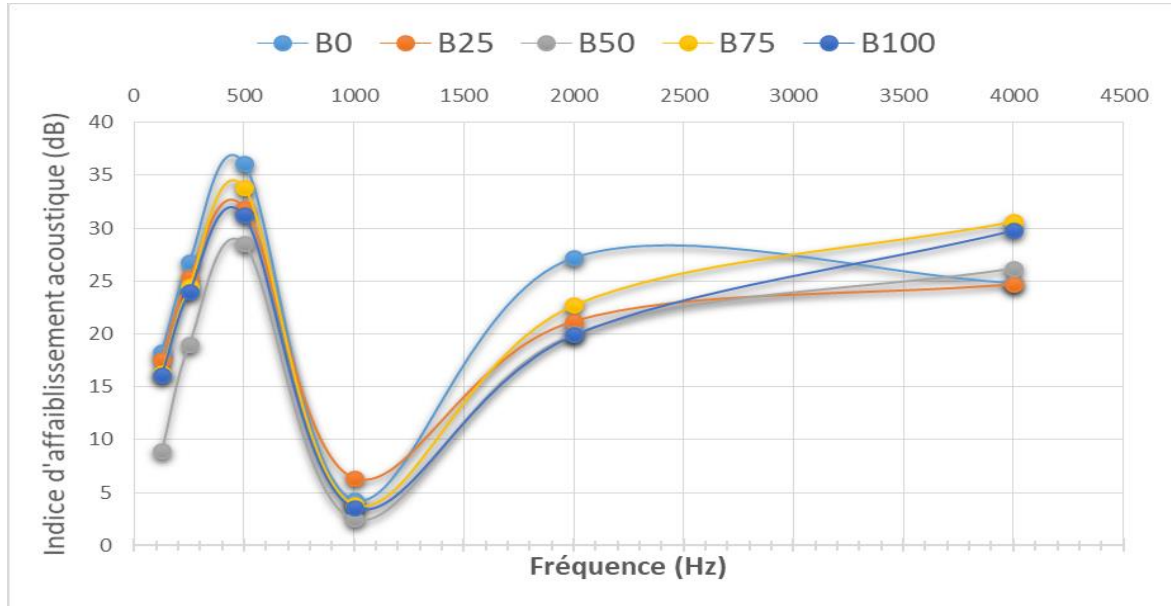


Figure 73: Indice d'affaiblissement acoustique R (dB) des mortiers de plâtre-liège T1 (traitement eau chaude) en fonction de la fréquence (Hz) pour différents taux de substitution.

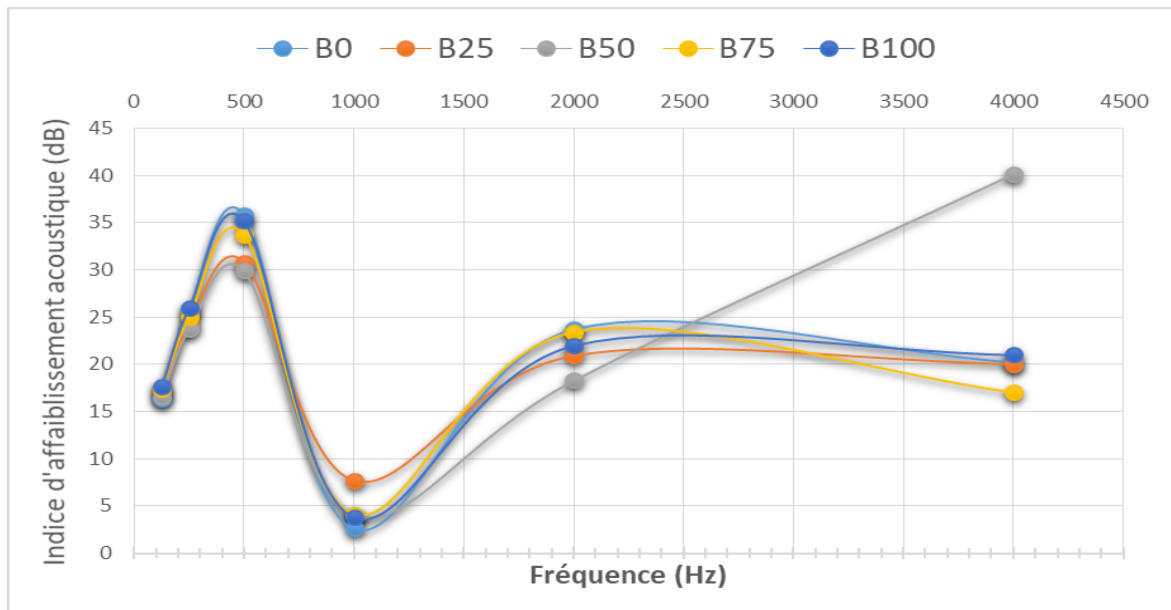


Figure 74 : Indice d'affaiblissement acoustique R (dB) des mortiers de plâtre-liège T2 (hornification) en fonction de la fréquence (Hz) pour différents taux de substitution.

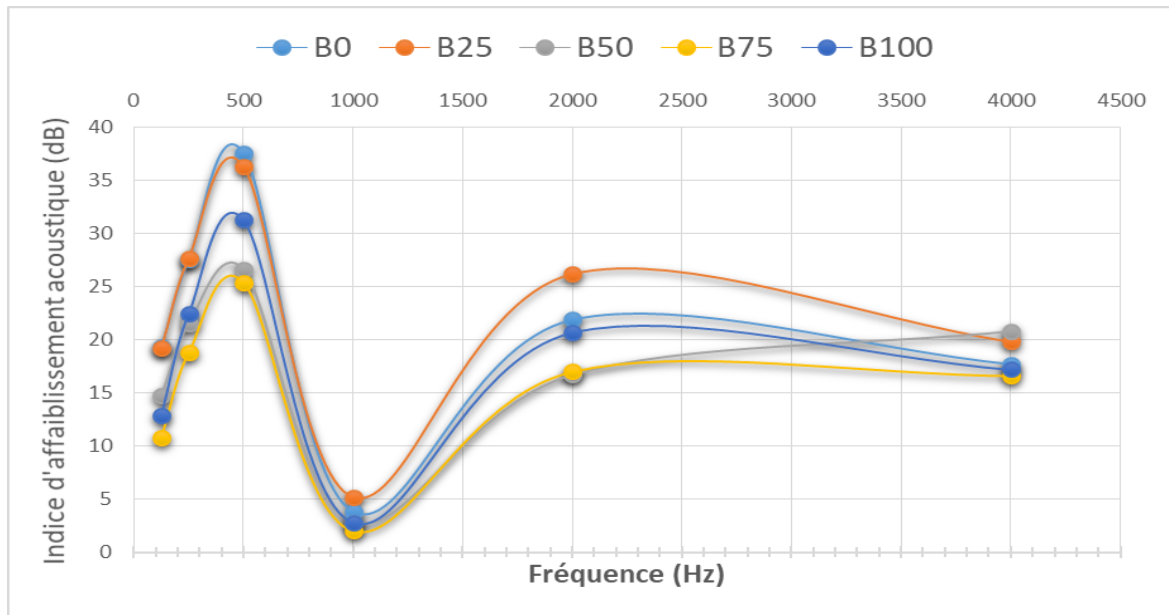


Figure 75: Indice d'affaiblissement acoustique R (dB) des mortiers de plâtre-liège T3 (traitement à la chaux 1 %) en fonction de la fréquence (Hz) pour différents taux de substitution.

- Les résultats obtenus pour les mortiers incorporant des granulats de liège traités à l'eau chaude (T1) sont présentés dans la Figure 4.17. L'examen de cette figure révèle une évolution caractéristique des matériaux poreux légers.

À basse fréquence (125 Hz), les valeurs de R restent relativement modérées pour l'ensemble des formulations T1, oscillant entre 8,9 dB (B50) et 18,3 dB (B0). Cette limitation aux basses fréquences est inhérente aux matériaux minces et peu massifs, (Beranek & all, 2012). La formulation B50 enregistre ici la valeur la plus faible (8,9 dB), suggérant que ce taux intermédiaire de substitution introduit une discontinuité structurelle défavorable à la réflexion des ondes de basse fréquence.

La montée en fréquence jusqu'à 500 Hz s'accompagne d'une amélioration générale et significative de l'affaiblissement acoustique pour toutes les formulations. Le mortier témoin B0 atteint 36,1 dB à 500 Hz, valeur la plus élevée de la série T1 à cette fréquence. Cette tendance croissante dans la gamme 125–500 Hz est classiquement attribuée à l'augmentation du coefficient de dissipation visqueuse au sein des pores du matériau, phénomène bien documenté pour les composites ciment-liège (Ferraz & al, 2020).

Un phénomène remarquable et systématique est observé à 1000 Hz : l'ensemble des cinq formulations T1 accuse une chute brutale de l'indice R , les valeurs tombant entre 2,5 dB (B50) et 6,4 dB (B25). Cette anomalie, répétée de façon cohérente pour tous les taux de substitution, traduit l'existence d'une fréquence de coïncidence ou d'un phénomène de

résonance structurelle propre à l'épaisseur des éprouvettes (10 mm) (Hopkins, 2007). En effet, à cette fréquence critique, la longueur d'onde des ondes dans le matériau coïncide avec celle du son incident, ce qui engendre une transmission maximale et donc un affaiblissement minimal (Beranek & all, 2012). Ce résultat, cohérent avec les travaux de Branco et al. (Branco, 2013) sur les bétons légers de liège, souligne la nécessité d'adapter l'épaisseur des parois pour décaler cette fréquence critique hors de la plage audible critique.

Au-delà de 1000 Hz, les valeurs de R se redressent dans la gamme 2000–4000 Hz. À 4000 Hz, les formulations B75 (30,6 dB) et B100 (29,8 dB) présentent les performances les plus élevées parmi les mélanges contenant du liège T1, surpassant même le mortier témoin B0 (24,8 dB). Cette inversion de tendance aux hautes fréquences confirme l'intérêt acoustique du liège pour l'isolation dans le domaine des fréquences moyennes et élevées, en accord avec les résultats de Gil et al. (Gil & al, 2020) Qui rapportent une amélioration de l'absorption acoustique des panneaux à base de liège pour les fréquences supérieures à 2000 Hz.

- Les résultats des mortiers formulés avec le liège traité par hornification (T2), illustrés dans la Figure 4.18, présentent un profil fréquentiel similaire à celui de la série T1, avec cependant des nuances quantitatives significatives. Le traitement par hornification, basé sur cinq cycles successifs d'immersion (16 h) et de séchage (8 h à 60 °C), est connu pour densifier la paroi cellulaire du liège par déshydratation progressive, réduisant ainsi son taux d'absorption d'eau et modifiant ses propriétés mécaniques de surface (Tonoli & al, 2009).

À basse fréquence (125 Hz), les formulations T2 affichent des valeurs plus homogènes que celles de T1, comprises entre 16,3 dB (B0) et 17,6 dB (B100), sans variation significative entre les taux de substitution. Cette stabilité suggère que le traitement par hornification confère une interface liège/plâtre plus uniforme, limitant les hétérogénéités microstructurales susceptibles de perturber la transmission acoustique aux basses fréquences (Pacheco-Torgal, 2011).

La plage 250–500 Hz confirme la tendance ascendante attendue. Le mortier témoin B0-T2 enregistre 35,8 dB à 500 Hz, valeur légèrement inférieure à celle de B0-T1 (36,1 dB), ce qui peut indiquer que le traitement par hornification du liège, bien qu'il améliore l'interface granulat/matrice, modifie également le comportement global du composite de manière légèrement défavorable à l'amortissement à cette fréquence. Néanmoins, l'écart reste marginal (< 1 dB) et ne constitue pas une différence pratiquement significative.

La chute à 1000 Hz se reproduit pour l'ensemble des formulations T2, avec des valeurs allant de 2,6 dB (B0) à 7,7 dB (B25). La formulation B25-T2 présente ici la valeur la plus élevée (7,7 dB), ce qui la positionne comme la moins défavorable à cette fréquence critique parmi toutes les combinaisons testées dans les trois séries. Ce résultat peut être interprété par la capacité d'une faible proportion de liège hornifié à amortir partiellement la résonance structurelle sans dégrader les propriétés mécaniques globales de la matrice de plâtre (Branco, 2013).

Un résultat particulièrement notable est observé pour la formulation B50-T2 à 4000 Hz, qui affiche une valeur exceptionnelle de 40,2 dB, de loin la plus élevée enregistrée dans l'ensemble de l'étude sur toutes les formulations et tous les traitements confondus. Ce pic isolé mérite attention : il pourrait s'expliquer par une distribution granulométrique favorable du liège T2 dans la matrice à ce taux de substitution spécifique (50 %), créant un réseau de diffuseurs acoustiques optimalement espacés pour la longueur d'onde correspondant à 4000 Hz (environ 8,5 cm dans l'air). Des travaux similaires sur des matériaux composites poreux ont rapporté des maxima locaux d'isolation à des fréquences précises en lien avec la périodicité des inclusions dans la matrice (Zhao & al, 2021). À l'exception de ce résultat, les performances hautes fréquences de T2 restent comparables à celles de T1.

- La Figure 4.19 présente les résultats des mortiers incorporant des granulats de liège imprégnés dans une solution de chaux à 1 % (T3). Ce type de traitement alcalin vise à neutraliser les substances tanniques et les extractibles organiques présents à la surface du liège, connus pour perturber la prise du liant et affaiblir la zone de transition interfaciale (ZTI) (Fernandez-Carrasco & al, 2012). L'imprégnation alcaline favorise également la formation de liaisons chimiques entre les hydroxyles de surface du liège et les ions calcium de la matrice liante (Sedan & al, 2008).

À 125 Hz, les formulations T3 présentent une plage de variation plus large que celle des séries précédentes, allant de 10,8 dB (B75) à 19,3 dB (B0). De manière intéressante, les formulations B0-T3 (19,3 dB) et B25-T3 (19,2 dB) affichent les valeurs les plus élevées parmi tous les mortiers à 125 Hz, toutes séries confondues. Cette performance à basse fréquence des formulations peu substituées T3 pourrait être attribuée à l'amélioration de la compacité de la matrice (Beranek & al, 2012).

À 500 Hz, le mortier B0-T3 atteint 37,6 dB, valeur la plus élevée de cette fréquence parmi les trois séries de traitements, ce qui confirme que le mortier témoin, quelle que soit la série

considérée, offre les meilleures performances à 500 Hz. Pour les formulations substituées, B25-T3 obtient 36,3 dB, résultat particulièrement favorable qui place le traitement à la chaux à faible taux de substitution comme la combinaison optimale à 500 Hz.

La chute à 1000 Hz est également présente dans la série T3, avec les valeurs les plus faibles de l'étude à cette fréquence : B75-T3 enregistre seulement 2,0 dB, valeur minimale absolue de toute l'expérimentation. Ce résultat, couplé à la valeur de 2,8 dB pour B50-T3 et B100-T3, indique que le traitement à la chaux ne parvient pas à atténuer la résonance structurelle à 1000 Hz, et que les formulations fortement substituées (B75 et B100) sont particulièrement vulnérables à ce phénomène dans cette série (Hopkins, 2007).

Pour les fréquences supérieures (2000–4000 Hz), les mortiers T3 affichent des valeurs généralement inférieures à celles des séries T1 et T2, notamment à 4000 Hz où les valeurs ne dépassent pas 20,8 dB. Cette tendance suggère que le traitement à la chaux, tout en améliorant la liaison interfaciale et les performances à basses et moyennes fréquences, ne constitue pas un avantage aux hautes fréquences, probablement en raison d'une réduction de la porosité ouverte du liège par le dépôt de Ca(OH)_2 , limitant ainsi le mécanisme d'absorption par dissipation à hautes fréquences (Asdrubali & al, 2015).

- **Synthèse des performances et recommandations :**

Les résultats de l'ensemble des essais d'affaiblissement acoustique permettent de formuler les recommandations suivantes pour l'utilisation des mortiers de plâtre-liège écologiques :

(i) Pour l'isolation acoustique aux fréquences médiales (250–500 Hz), qui correspondent aux fréquences les plus pénalisantes pour le confort phonique des locaux (voix humaine, musique), le traitement T3 à la chaux associé à un taux de substitution de 25 % (B25-T3, 36,3 dB à 500 Hz) ou T1 avec B0 (36,1 dB) offrent les meilleures performances. Ces formulations sont donc recommandées pour les cloisons de séparation intérieure soumises à des nuisances phoniques conversationnelles.

(ii) Pour l'isolation aux hautes fréquences (2000–4000 Hz), le traitement T2 par hornification, et notamment la formulation B50-T2 (40,2 dB à 4000 Hz), présente un potentiel remarquable. Il convient toutefois de confirmer la répétabilité de ce résultat exceptionnel par une campagne d'essais supplémentaire sur un nombre accru d'éprouvettes, afin d'éliminer l'hypothèse d'une valeur atypique.

(iii) Pour un compromis large spectre, les formulations T1 et T2 avec des taux de substitution de 25 % (B25) présentent la meilleure régularité des performances sur l'ensemble du spectre fréquentiel, avec des valeurs correctes de 125 à 4000 Hz, tout en limitant le creux à 1000 Hz. Ces formulations constituent le meilleur compromis pour des applications nécessitant une isolation large bande.

(iv) Concernant le taux de substitution maximal (B100), les mortiers 100 % liège ne se révèlent pas les plus performants acoustiquement dans cette étude, bien qu'ils soient les plus légers et les plus écologiques. Ce résultat souligne qu'au-delà de leurs avantages environnementaux, ces formulations nécessitent une optimisation complémentaire — notamment par l'ajout d'additifs pouzzolaniques ou de fibres — pour atteindre un niveau d'isolation acoustique compétitif (Mounanga & al, 2019).

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, plusieurs essais ont été réalisés sur des mortiers de plâtre incorporant des déchets de liège traités selon trois méthodes différentes : traitement à l'eau chaude (T1), hornification (T2) et traitement à la chaux (T3), avec des taux de substitution allant de 0 % à 100 % par pas de 25 %. À partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être retenues :

- L'incorporation des déchets de liège a entraîné une diminution progressive de la masse volumique à l'état frais et à l'état durci pour les trois traitements, en raison de la faible densité et de la structure alvéolaire du liège. Cette diminution a permis l'obtention de mortiers plus légers.
- La maniabilité des mortiers a été influencée par le traitement appliqué au liège. Le traitement par hornification (T2) a présenté les meilleures performances à l'état frais avec un étalement maximal de 20,5 cm pour la formulation B25.
- Les résultats de dureté superficielle et de vitesse ultrasonique ont montré une diminution globale avec l'augmentation du taux de liège. Toutefois, le traitement T2 a conservé les valeurs les plus élevées, traduisant une meilleure cohésion interne et une structure plus compacte.
- Les résistances mécaniques à la flexion et à la compression ont globalement diminué avec l'augmentation de la teneur en liège. Cependant, le traitement T2 a permis de maintenir les meilleures performances mécaniques, notamment pour les fortes teneurs

en liège, grâce à une meilleure compatibilité entre les granulats de liège et la matrice de plâtre.

- La conductivité thermique a diminué pour l'ensemble des formulations, ce qui traduit une amélioration importante des propriétés d'isolation thermique. Le traitement T3 a présenté les meilleures performances thermiques avec les plus faibles valeurs de conductivité.
- Les essais d'absorption capillaire, d'immersion totale et de porosité accessible à l'eau ont montré une augmentation générale de la capacité d'absorption avec l'augmentation du taux de liège, en raison de la nature poreuse du matériau. Le traitement T2 a néanmoins permis de limiter cette augmentation par rapport aux autres traitements.
- Après les cycles de séchage–mouillage, une diminution des performances mécaniques et ultrasoniques a été observée pour l'ensemble des formulations. Toutefois, les mortiers élaborés avec le traitement T2 ont montré la meilleure résistance au vieillissement hydrique et ont conservé les propriétés les plus élevées.
- Les essais d'isolation phonique ont mis en évidence une amélioration des performances acoustiques aux fréquences moyennes et élevées. La meilleure performance a été obtenue avec la formulation B50-T2, qui a atteint un affaiblissement acoustique de 40,2 dB à 4000 Hz.
- Globalement, le traitement par hornification (T2) apparaît comme le traitement le plus performant puisqu'il offre le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques, physiques, acoustiques et la durabilité. Le traitement à la chaux (T3) reste le plus avantageux pour les applications nécessitant une isolation thermique maximale.
- Les mortiers de plâtre incorporant des déchets de liège traités constituent ainsi une solution écologique et légère pouvant être envisagée pour des applications de construction non structurelles, notamment dans les cloisons intérieures et les éléments nécessitant de bonnes performances thermo-acoustiques.

Conclusion générale et perspective

Conclusion générale et perspective

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'influence du traitement des granulats biosourcés de liège naturel sur les caractéristiques générales des mortiers de plâtre, dans une perspective de valorisation des déchets et de développement de matériaux de construction écologiques. Trois traitements ont été étudiés : le traitement à l'eau chaude (T1), l'hornification (T2) et le traitement à la chaux (T3), avec des taux de substitution allant de 0 % à 100 %.

À partir des résultats expérimentaux obtenus, les conclusions suivantes peuvent être retenues :

- L'incorporation des granulats de liège a entraîné une diminution progressive de la masse volumique à l'état frais et à l'état durci, permettant l'obtention de mortiers plus légers que le mortier témoin.
- Les propriétés à l'état frais ont été influencées par le traitement appliqué au liège. Le traitement par hornification (T2) a présenté la meilleure maniabilité, traduisant une meilleure compatibilité entre les granulats de liège et la matrice de plâtre.
- Les essais mécaniques ont montré une diminution globale des résistances à la flexion et à la compression avec l'augmentation du taux de liège, en raison de la faible densité et de la nature poreuse de ce matériau biosourcé. Toutefois, le traitement T2 a permis de conserver les performances mécaniques les plus satisfaisantes comparativement aux autres traitements.
- Les résultats de dureté superficielle et de vitesse ultrasonique ont confirmé l'influence du traitement des granulats sur la qualité interne du matériau. Le traitement T2 a enregistré les valeurs les plus élevées, indiquant une meilleure cohésion et une structure interne plus homogène.
- L'incorporation du liège a amélioré les performances thermiques des mortiers grâce à la diminution significative de la conductivité thermique. Le traitement à la chaux (T3) a présenté les meilleures performances d'isolation thermique.
- Les essais d'absorption capillaire, d'immersion totale et de porosité accessible à l'eau ont montré une augmentation de la capacité d'absorption avec l'augmentation du taux de liège, en raison de sa structure alvéolaire riche en pores.
- Les essais de durabilité par cycles de séchage–mouillage ont révélé une diminution des performances mécaniques après vieillissement hydrique. Néanmoins, les formulations

élaborées avec le traitement T2 ont présenté la meilleure résistance aux dégradations induites par ces cycles.

- Les essais acoustiques ont mis en évidence l'intérêt du liège comme matériau d'isolation phonique. La meilleure performance a été obtenue avec la formulation B50-T2, qui a enregistré l'indice d'affaiblissement acoustique le plus élevé de l'étude.

De manière générale, les résultats obtenus montrent que le traitement appliqué aux granulats de liège joue un rôle déterminant dans le comportement des mortiers de plâtre. Parmi les traitements étudiés, le traitement par hornification (T2) a présenté le meilleur compromis entre les propriétés à l'état frais, les performances mécaniques, la durabilité et les propriétés acoustiques, tandis que le traitement à la chaux (T3) s'est distingué par ses excellentes performances thermiques.

En perspective, il serait intéressant d'étudier l'effet d'autres traitements de surface du liège ainsi que l'incorporation de fibres végétales afin d'améliorer davantage les performances mécaniques des mortiers. Il serait également pertinent d'évaluer leur comportement au feu, leur durabilité à long terme ainsi que leur impact environnemental et économique dans le cadre d'une utilisation à grande échelle dans le secteur de la construction durable.

Bibliographies

- European Committee for Standardization. (2016). *EN 196-1: Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*. CEN.
- abbas, m. (2021). *Caractérisations multi-physiques des mortiers biosourcés isolants et modélisation de leurs impacts sur les transferts hygrothermiques à l'échelle des parois. Application aux bétons de moelles végétales*. Lyon: université Lyon.
- Abdelouahed, A., & al, e. (2023). Enhancing the Performance and Durability of Eco-Friendly Mortar with Diss Fibers (Ampelodesmos mauritanicus). *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 219-226.
- Addis, L. B., & al, e. (2025). The role of fiber alkalization in enhancing the physical and mechanical performance of false banana fiber and its composites in geopolymer matrices. *Scientific Reports*, 35102.
- AFC-AFREM. (1997). *Recommandations pour la détermination de la porosité et de l'absorption d'eau des matériaux cimentaires*. Association Française de Recherche et d'Essais sur les Matériaux et les Structures.
- AFNOR. (2003). *NF EN 1008 : Eau de gâchage pour béton — Spécification d'échantillonnage, essais et évaluation de l'aptitude à l'emploi*. AFNOR.
- AFNOR. (2005). *NF EN 12504-4 : Essais pour béton dans les structures – Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son*. AFNOR.
- Ahmad – Muhammad Arslan, Liu – Bing, Li – Qiuwei, Adeel – Muhammad, Zhang – Jinlong, Zhou – Yingwu, & Deng – Xu. (2023). Bio-deposition approaches for sustainable execution of recycled aggregates in concretes. *Frontiers in Materials*.
- AMZIANE, S. (2020, 04 09). *Caractéristiques multi-physiques des granulats végétaux utilisés pour la confection des bétons et mortiers biosourcés*. Retrieved from construction21: <https://www.construction21.org/france/articles/h/dossier-biosources-36-caracteristiques-multi-physiques-des-granulats-vegetaux-utilises-pour-la-confection-des-betons-et-mortiers-biosources.html>

- Ang, Bee Chin, Hamid, Azman, Yew, Ming Kun, & Yew, Ming Chian. (2015, mai 28). *Patent No. WO 2015/076665 A1*.
- Anh, L. D. (2021, decembre). *An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221004629>:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221004629>
- Asdrubali, F., & al, e. (2015). *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17.
- Association Française de Normalisation. (1981). *NF P 18-406 : Bétons – Essai de compression*. AFNOR.
- Association Française de Normalisation. (1997). *XP P 18-540 : Granulats – Définitions, conformité, spécifications*. AFNOR.
- Association Française de Normalisation. (1998). *NF EN 1097-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 3 : Détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire*. AFNOR.
- Association Française de Normalisation. (2003). *NF EN 1015-18 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – Partie 18 : Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci*. AFNOR.
- Association Française de Normalisation. (2014). *NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau*. AFNOR.
- ASTM International. (2002). *ASTM C597-02: Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM.
- Avudaiappan, S., & al, e. (2023). Experimental investigation on the physical, microstructural, and mechanical properties of hemp limecrete. *Scientific Reports*, 22650.
- Beranek, L. L., & all, e. (2012). *Acoustics: Sound Fields and Transducers*.
- BESACIER, C., & al, e. (2012). *STATE OF MEDITERRANEAN FORESTS. fête de liège*, (pp. 14-15). italie.

- Bounoua, F. (2015). *Technologie de fabrication et contrôle de la qualité du plâtre*. Université Badji Mokhtar – Annaba, Annaba.
- Branco, F. G. (2013). *Construction and Building Materials*, 40, 1021-1029.
- Céline, M. (2011). *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*. toulon.
- Cerema. (2021, juin 16). *Vers une carte d'identité des bétons végétaux*. Retrieved from Cerema: <https://www.cerema.fr/fr/actualites/carte-identite-betons-vegetaux>
- Chahrazed, B. B., & all, e. (2025). *Élaboration d'un mortier écologique à base de liège*. Université: Université Aïn Témouchent Belhadj Bouchaib.
- Council, N. C. (n.d.). *Cork Is The Unexpected Comeback Trend: How To Use It In Your Home*. Retrieved from Natural Cork Council: <https://naturalcorkcouncil.org/blog-all-things-cork/cork-is-the-unexpected-comeback-trend-how-to-use-it-in-your-home>
- daniel, D. (2002, mai 10). *Fabrication platre* . Récupéré sur techniques de l'ingénieur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/platre-c910/fabrication-c910niv10004.html>
- Dębska, B., & al, e. (2019). Designing Cement Mortars Modified with Cork and Rubber Waste Using Theory of the Experiment. *Journal of Ecological Engineering*, 121-130.
- del Río Merino, M. (1999). *Elaboration et applications constructives de panneaux préfabriqués en plâtre allégé renforcé de fibres de verre E et autres additifs*. Universidad Politécnica de Madrid.
- European Committee for Standardization. (2014). *EN 13279-2: Gypsum binders and gypsum plasters – Part 2: Test methods*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2019). *EN 12350-5: Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2020). *EN 933-2: Tests for geometrical properties of aggregates – Part 2: Determination of particle size distribution – Test sieves, nominal size of apertures*. CEN.

- fabrication du plâtre orthopédique. (n.d.). Retrieved from <https://www.tunisieindustrie.nat.tn/fr/download/idees/ID/37>.
- Faria, D. L., & all, e. (2026). Recycled lignocellulosic resources for circular bioeconomy applications: Heat-treated eucalyptus fibers in polyester composites. *Recycling*.
- Fernandez-Carrasco, L., & al, e. (2012). *Infrared Spectroscopy — Année: 2012 — Éditeu*.
- Ferraz, E., & al, e. (2020). *Journal of Building Engineering*, 29, 101156.
- Ferreira, Luís Filipe, & Mariz de Matos. (2017). *Patent No. WO 2017/069643 A1*.
- Fethallah, A. H. (2023). *Contribution à l'étude des matériaux composites biosourcés à base de plâtre*. Tlemcen: Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen.
- Fethallah, A. –H., & all, e. (2023). *Contribution à l'étude des matériaux composites biosourcés à base de plâtre*. Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen.
- G. Morgado, L. Masurel, Z. Rhodes, , R. Lespiat, H. Rétot, & Annie Lemarchand. (2019). Kinetics of plaster hydration and structure of gypsum: Experiments and kinetic Monte Carlo simulations with added gypsum seeds. *Journal of Crystal Growth*, 124-133.
- G., N., & al, e. (2024, octobre 14). *Mechanical properties optimization and cost analysis of agricultural waste as an alternative in brick production*. Retrieved from scientific reports: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-74970-9>
- Gil, L., & al, e. (2020). *Applied Acoustics*, 168, 107410.
- Guermiti, L., & all, e. (2026). Potential of Producing Lightweight Cork-Based Mortars Reinforced with Polyethylene Fibers for Building Applications. *Buildings*. doi:10.3390/buildings16010102
- Gypsum Association. (2009). *Fire resistance design manual (GA-600)*.
- Hamraoui, S., & al, e. (2025). Reinforcing the properties of self-compacting mortar based on agro-waste (walnut shell) aggregates by alkaline treatment. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 6(1), 1-17. doi:10.54021/seesv6n1-022
- Higuchi, J., & all, e. (2019). Polymer membranes sonocoated and electrosprayed with nano-hydroxyapatite for periodontal tissues regeneration. *Nanomaterials*, 1625.

- Holanda, F. S., & al, e. (2024). Influence of Sodium Hydroxide Treatment on Typha domingensis Fibers for Geotextile Manufacturing. *ACS Omega*, 51040-51051.
- Hopkins, C. (2007). *Sound Insulation*.
- Hussain, A., & al, e. (n.d.). *Physico-Chemical Characterization and Development of Hemp Aggregates for Highly Insulating Construction Building Materials*.
- infociments. (2019, juillet). *Bétons biosourcés : composants, formulations et usages*. Retrieved from infociments: <https://www.infociments.fr/betons/betons-biosources-composants-formulations-et-usages>
- Jnyanendra, K. P., & al, e. (2016, decembre). *Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review*. Retrieved from sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221260901530011X?via%3Dihub>
- Kamel, T. A. (2021). *Le béton de liège : Optimisation de la formulation et des performances thermiques*. Tlemcen: Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen.
- Karade, S. R. (2015). Potential of Cork Cement Composite as a Thermal Insulation Material. *Key Engineering Materials*, 17-29.
- Khelifa, H., & al, e. (2015). *Étude expérimentale sur les mortiers à base de granulats de caoutchouc, de déchets de brique et d'adjuvant résineux*. Université de Guelma.
- Laouibi, H., & all, e. (2018). Study of a new plaster composite based on dune sand and expanded polystyrene as aggregates. *The Open Civil Engineering Journal*.
- Lewry, A., & al, e. (1994). The setting of gypsum plaster. *Journal of Materials Science*, 6085-6090.
- Litaiif, H. A., & al, e. (2025). Influence of alkali treatment on physical-mechanical properties of mallow fiber/BOPP composites. *Polímeros*.
- M'hamed, Y. R., & al, e. (2021, 02). *A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites*. Retrieved from .sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710220320222>
- Martias, C., & al, e. (2013). A new composite based on gypsum matrix and mineral additives: Hydration process of the matrix and thermal properties at room temperature. *Thermochimica Acta*, 15-26.

- Mathilde, F. (2021, avril 2). *Les matériaux biosourcés dans le bâtiment : Définition*. Retrieved from Obat Blog: https://www.obat.fr/blog/materiaux-biosources/?utm_source=chatgpt.com
- Meddah, A., & al, e. (2020). Effectiveness of using rubber waste as aggregates for improving thermal performance of plaster-based composites. *Innovative Infrastructure Solutions*.
- Ming Kun Yew, Jing Han Beh, Ming Chian Yew, Foo Wei Lee, Liphuat Saw, & Siong Kang Lim. (2022, juin 16). *Performance of surface modification on bio-based aggregate for high strength lightweight concrete*. Retrieved from scienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522000420>
- Mounanga, P., & al, e. (2019). *RILEM Technical Letters*, 4, 88-96.
- Mounir, S., & al, e. (2014, novembre 15). *Thermal properties of the composite material clay/granular cork*. Retrieved from sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814008708>
- Munzer, C. (2016). *Étude de l'action d'un bioadjuvant aux substances extracellulaires sur la microstructure et les caractéristiques de surface de pâtes cimentaires pour des bétons plus éco-respectueux*. Université de Strasbourg.
- Nael-redolfi, j. (2016). *Absorption d'eau des granulats poreux : mesure et conséquences sur la formulation des mortiers et des bétons*.
- Natural Cork Council. (n.d.). *Natural Cork Council*. Retrieved from Popping corks!: <https://naturalcorkcouncil.org/blog-all-things-cork/popping-corks>
- NG2B. (2024). *Prénorme Granulat Biosourcé*. FRANCE: NG2B.
- Nitu, M. e. (2025, 05). Bio-Based Materials in Sustainable Concrete: A Review on Mechanical. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 12(5), 1586-1587-1588-1589-1590-1591-1592-1593-1594-1595-1595-1596-1597.
- Ntimugura, F., & al, e. (2020, decembre). *Mechanical, thermal, hygroscopic and acoustic properties of bio-aggregates – lime and alkali - activated insulating composite materials: A review of current status and prospects for miscanthus as an innovative resource in the South West of England*. Retrieved from sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214993720300786>

- Ouest-France. (n.d.). *Le plâtre : définition, utilisation, avantages et inconvénients*. Retrieved from Bricoleur Pro: <https://bricoleurpro.ouest-france.fr/dossier-159-platre-definition-utilisation-avantages-inconvenients.html>
- Pacheco-Torgal, F. (2011). *Construction and Building Materials*, 25(2), 575-581.
- page, j., & all, e. (2016). Étude expérimentale des propriétés d'un béton de chanvre incorporant un adjuvant viscosant. *Revue des composites et des matériaux avancés*, 349-366.
- Panesar, D. K., & all, e. (2012). The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. 982-992.
- Placoplatre. (2023, aout 1). *Du gypse au plâtre* . Retrieved from Placoplatre: <https://www.placo.fr/du-gypse-au-platre>
- Ratsimbazafiarison, & al, e. (2021). *Fabrication des plaques multimatériaux à base de plâtre fibré et des mousses en polyéthylène non réticulées*. École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- Ratsimbazafy, H. H., & al, e. (2022, janvier). *Comprehensive Characterization of Agricultural By-Products for Bio-Aggregate Based Concrete*. Retrieved from scientific.net: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.77>
- Raynaud, C. (2024, mars 21). *Bétons biosourcés : une prénorme pour granulats végétaux*. Retrieved from ConstructionBTP: <https://www.constructionbtp.com/batiment/article/2024/03/21/148224/betons-biosources-une-prenorme-pour-les-granulats-vegetaux>
- Rizza, M. (2005). *United States Patent and Trademark Office Patent No. US 6,913,644 B2*.
- Rosales, J., & al, e. (2021). Alkali-activated stainless steel slag as a cementitious material in the manufacture of self-compacting concrete. *Materials*, 3945.
- Sandrine, M., & al, e. (2016). *Synthèse de l'opération de recherche stratégique et incitative Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable*.
- Sarah, A. T. (2023). *ESSAI DE FABRICATION D'UNE PLAQUE DE PLATRE ISOLANTE ET ECOLOGIQUE*. École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Retrieved from <https://fr.scribd.com/document/878080659/Essai-de-Fabrication-d-Une-Plaque-de-Platre>

- Sedan, D., & al, e. (2008). *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 183-192.
- Silva, S. P., & al, e. (2005). Cork properties, capabilities, and applications. *International Materials Reviews*, 345-365.
- Stevulova, N., & al, e. (2021). Comparative FTIR study of treated hemp hurds before and after their application in bio-aggregate-based composites. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*.
- Sylain, M. (2001). *Étude du comportement mécanique du plâtre en relation avec sa microstructure*. Lyon, France.
- Tedjditi, A. K., Ghomari, F., Belarbi, R., Cherif, R., Boukhelf, F., & Bouhraoua, R. T. (2022, janvier 24). *Towards understanding cork concrete behaviour: Impact of considering cork absorption during mixing process*. Retrieved from sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821036382>
- Tonoli, G. H., & al, e. (2009). *Composites Part A*, 40(12), 2046-2053.
- Zengfeng, Z., & al, e. (2015). Une nouvelle méthode de caractérisation des granulats recyclés industriels: application aux mortiers et bétons. *Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015*. Douai, France.
- Zhao, H., & al, e. (2021). *Journal of Sound and Vibration*, 499, 116006.
- Ziregue, A., & al, e. (2016). Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(9), 934-946.