RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA



Faculté de Technologie

Département de Génie mécanique

Spécialité : Génie climatique

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

Conception et caractérisation de nouveaux isolants thermiques à base d'éco-matériaux pour les enveloppes de bâtiments

---

Par :

Benhadj Tahar Dhouha

Composition du jury:

Mr. BENTCHIKOU Mohamed	Professeur	Université de Médéa	Président
Mr.SI-AHMED Mohammed	MCA	Université de Blida1	Examinateur
Mr.CHIBA Younes	Professeur	Université de Médéa	Examinateur
Mr. TRIKI Zakaria	Professeur	Université de Médéa	Directeur de thèse
Mr. GUENDOUZ Mohamed	MCA	Université de Médéa	Co-directeur de thèse

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté de Technologie

Département de Génie mécanique

Spécialité : Génie climatique

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

Conception et caractérisation de nouveaux isolants thermiques à base d'éco-matériaux pour les enveloppes de bâtiments

---

Par :

Benhadj Tahar Dhouha

Composition du jury:

Mr. BENTCHIKOU Mohamed	Professeur	Université de Médéa	Président
Mr.SI-AHMED Mohammed	MCA	Université de Blida1	Examinateur
Mr.CHIBA Younes	Professeur	Université de Médéa	Examinateur
Mr. TRIKI Zakaria	Professeur	Université de Médéa	Directeur de thèse
Mr. GUENDOUZ Mohamed	MCA	Université de Médéa	Co-directeur de thèse

Résumé

Cette étude met en lumière une approche innovante dans le développement de matériaux isolants durables, en utilisant des déchets de plantes marines comme la (PO). Par ailleurs, en réutilisant ce matériau de déchet et en le combinant avec un adhésif à base de fécule de maïs, les chercheurs ont créé un matériau isolant d'origine biologique présentant des caractéristiques thermiques prometteuses. En outre, la méthodologie de recherche, qui impliquait la préparation et le test de quatre compositions différents avec des fractions adhésives variables. De même, des propriétés clés telles que la densité, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et l'absorption capillaire ont été analysées pour évaluer la pertinence du matériau pour les applications d'isolation. Les valeurs de conductivité thermique rapportées, variant entre 0,052 et 0,067 $W.m^{-1}.K^{-1}$, sont assez impressionnantes, suggérant de bonnes propriétés isolantes comparables à celles des matériaux existants. De plus, la similitude des valeurs de diffusivité thermique et de chaleur spécifique à celles de la littérature scientifique valide davantage le potentiel du matériau. Quant à l'absorption capillaire légèrement inférieure, elle indique que le matériau développé pourrait offrir des avantages en termes de résistance à l'humidité, ce qui est crucial pour maintenir les performances d'isolation dans le temps. Dans l'ensemble, les résultats suggèrent que ce matériau isolant d'origine écologique pourrait être une option viable et respectueuse de l'environnement pour l'isolation des bâtiments. Toutefois, pour analyser l'application du matériau dans les habitations et son comportement thermique, nous avons réalisé une simulation dynamique. De ce fait, les résultats sont très encourageants, notamment lorsqu'on applique l'isolant à la fois dans la toiture et les murs. De même, cette approche permet de réduire la consommation énergétique de jusqu'à 50%.

Mots clés : Isolation écologique – Déchets de Posidonie de Méditerranée (Posidonia oceanica) – Matériau de construction durable – Isolation de bâtiment – Durabilité environnementale.

Abstract

This study highlights an innovative approach in the development of sustainable insulating materials, using marine plant waste such as Posidonia Oceanica (PO) By reusing this waste material and combining it with a cornstarch-based adhesive, researchers have created a biobased insulating material with promising thermal characteristics. The research methodology involved the preparation and testing of four different compositions with varying adhesive fractions. Key properties such as density, thermal conductivity, specific heat, and capillary absorption were analyzed to assess the material's suitability for insulation applications. The reported thermal conductivity values, ranging between 0.052 and 0.067 $W.m^{-1}.K^{-1}$, are quite impressive, suggesting good insulating properties comparable to existing materials. Furthermore, the similarity of the thermal diffusivity and specific heat values to those found in the scientific literature further validates the material's potential. The slightly lower capillary absorption indicates that the developed material could offer advantages in terms of moisture resistance, which is crucial for maintaining insulation performance over time. Overall, the results suggest that this ecologically sourced insulating material could be a viable and environment friendly option for building insulation. To analyze the materials application in dwellings and its thermal behavior, we have conducted a dynamic simulation. The results are very promising, particularly when the insulation is applied to both roofing and walls, allowing for a reduction in energy consumption of up to 50%.

Keywords : Ecological insulation - Posidonia Oceanica waste - Sustainable building material - Building insulation - Environmental sustainability.

مـلـخـص

تسلط هذه الدراسة الضوء على مقاربة مبتكرة في تطوير مواد عازلة مستدامة، وذلك من خلال استخدام نفايات النباتات البحرية مثل الـ*" بوسيدونيا أوسينيكا"* (*Posidonia oceanica*)، وبإعادة استعمال هذه المادة المكونة من نفايات ودمجها مع مادة لاصقة مستخلصة من نشاء الذرة، استطاع الباحثون إنشاء مادة عازلة ذات أصل بيولوجي تتميز بخصائص حرارية واعدة. وقد شملت منهجية البحث إعداد واختبار أربع تركيبيات مختلفة بنسب لاصق مخلفة. وتم تحليل خصائص مفتاحية مثل الكثافة، التوصيلية الحرارية، الحرارة النوعية والامتصاص الشعري لتقييم مدى ملاءمة المادة لتطبيقات العزل. وقد كانت قيم التوصيلية الحرارية المسجلة مبهرة، حيث تراوحت ما بين 0.052 و 0.067 واط.م$^{-1}$.ك$^{-1}$ ـ مما يشير إلى خصائص عزل جيدة مماثلة لخصائص المواد الحالية. وبالإضافة إلى ذلك، فإن تشابه قيم التشتت الحراري والحرارة النوعية مع تلك المذكورة في الأدبيات العلمية يؤكد بشكل أكبر إمكانيات هذه المادة. ويشير الامتصاص الشعري المنخفض نسبيًا إلى أن المادة المطورة قد تقدم مزايا في مقاومة الرطوبة، وهو أمر جوهري للحفاظ على أداء العزل بمرور الوقت. وبشكل عام، تشير النتائج إلى أن هذه المادة العازلة ذات المصدر البيئي قد تكون خيارًا قابلًا للتطبيق وصديقًا للبيئة لعزل المباني. ومن أجل تحليل تطبيق هذه المادة في المساكن وسلوكها الحراري، قمنا بإجراء محاكاة ديناميكية. وقد كانت النتائج مشجعة للغاية، خاصة عند تطبيق العازل في كل من الأسقف والجدران، حيث تسمح هذه المقاربة بتقليل استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 50%.

الـكـلـمـات الـمـفـتـاحـيـة: العزل البيئي - نفايات الـ*" بوسيدونيا أوسينيكا"*- مادة بناء مستدامة - عزل المباني - الاستدامة البيئية.

Remerciement

Ce travail de recherche a été mené au sein du laboratoire LBPT (Laboratoire de Biomatériaux et Phénomènes de Transport), Faculté de Technologie, Département de Mécanique de l'Université Yahia Farès de Médéa, Algérie. Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur TRIKI Zakaria, pour son aide précieuse, ses orientations éclairées, ses conseils avisés, ses encouragements constants, sa disponibilité sans faille et surtout sa patience tout au long de ma formation doctorale.

Je tiens également à remercier sincèrement mon co-directeur de thèse, le Docteur GUENDOUZ Mohamed, pour sa disponibilité, le temps qu'il m'a consacré, ses encouragements et ses conseils pertinents.

Je suis reconnaissante envers tous les membres du jury qui ont examiné attentivement mon travail : le Professeur BENTCHIKOU Mohamed de l'Université de Médéa en qualité de président du jury, le Professeur CHIBA Younes, et le Docteur SI-AHMED Mohammed.

De même, je souhaite exprimer ma reconnaissance à plusieurs autres personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse : les Docteurs AMARI Malika et BOUKHELKHAL Djamila, les dames SETTARI Chafika et FERGANI Zineb pour leur assistance précieuse dans la partie expérimentale.

Un immense merci à ma mère, Fatiha MAKKAR, mon père, Mohamed, et mon cher époux, Mouloud, pour leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel à la fois moral et financier, qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Enfin, je remercie mes chères sœurs, Nada et Ghada, mes frères, Brahim et Mohamed, ainsi que mon petit-fils, Aymen. Un grand merci également aux membres de ma belle-famille : Karima, Mohamed, Imen, Khadidja et Mohamed.

Table des matières

INTRODUCTION **17**

I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE **19**

I.1 Introduction 19

I.2 Consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment 19

I.2.1 A l'échelle mondiale 19

I.2.2 Consommation énergétique en Algérie 20

I.2.3 Programme national d'efficacité énergétique 22

I.2.4 Programme Eco-bat 23

I.2.5 Les modes de construction en Algérie 23

I.3 L'impact de la standardisation du logement sur sa performance énergétique en Algérie 24

I.4 Généralité sur les fibres et leur utilisation dans les matériaux de construction . . 25

I.5 Structure des fibres naturelles 26

I.5.1 La Cellulose 27

I.5.2 L'hémicellulose 28

I.5.3 La lignine 29

a) Les avantages des fibres naturelles 29

b) Les inconvénients des fibres naturelles 30

I.6 Propriétés et performances d'un matériau isolant 30

I.6.1 Propriétés physiques 31

I.6.2 Les propriétés environnementales 31

I.6.3 Les propriétés de l'hygiène et de la santé 31

I.7 Quelques propriétés thermo-physiques des matériaux d'isolation thermique courants 31

I.8 Propriété thermo-physiques des matériaux à base de fibre de posidonie 34

I.8.1 Matériau à base des fibres et matrice cimentaire 34

I.8.2 Effet de la fraction volumique des fibres sur la masse volumique et sur la conductivité thermique des matériaux 34

I.8.3 Effet du traitement chimique des fibres sur la masse volumique et sur la conductivité thermique des matériaux 37
I.8.4 L'effet de l'ajout des fibres de bois et de posidonie au ciment sur la résistance à l'eau et au feu 38
I.9 Matériau à base des fibres et matrice d'adobe 39
I.9.1 L'influence des fibres sur l'absorption d'eau 39
I.9.2 L'influence de longueur de fibres sur la conductivité thermique 40
I.10 Matériau à base des fibres et matrice de chaux 41
I.10.1 L'influence de traitement des fibres sur l'adhérence de la matrice 41
I.11 Matériau à base des fibres et matrice de plâtre 42
I.11.1 Effet de l'ajout de fibres de posidonie sur la matrice de plâtre 42
I.12 Matériau à base des fibres et matrice géo-polymères 43
I.12.1 Effet de l'ajout de fibres de posidonie sur la résistance au feu et à l'eau . 43
I.13 Caractéristique thermique de la plante de posidonie 44
I.13.1 L'influence de traitement chimique à la soude sur la masse volumique et la conductivité thermique 44
I.13.2 Conductivité thermique en fonction de la masse volumique de Posidonia Oceanica et des matériaux d'isolation thermique courants 45
I.13.3 Diffusivité thermique des fibres de posidonie 46
I.13.4 Chaleur spécifique des fibres de posidonie 47
I.14 L'utilisation des liants naturels avec des fibres pour les matériaux de construction 47
I.14.1 L'effet de quantité de liant sur la conductivité thermique des matériaux à base de fibres naturel 47
I.14.2 Influence du taux d'amidon sur les propriétés physiques, mécaniques et hygrothermiques 48
I.14.3 L'influence de liant d'amidon sur les propriétés hygroscopiques des matériaux à base de chanvre et d'amidon 49
I.14.4 Conductivité thermique de matériau composé de fibre de surface des palmiers dattiers et liant de fécule de maïs 50
I.14.5 Conductivité thermique de matériau composé de sous-produits du raisin/amidon 50
I.15 Conclusion 51

II MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPERIMENTALE 53
II.1 Introduction 53
II.2 Répartition géographique de l'herbier de posidonie Oceania 53

II.3 Lamorphologie 54
II.3.1 Feuilles 54
II.3.2 Rhizome 54
II.3.3 Fleurs 55
II.3.4 Fruits 55
II.4 Composition chimique de posidonie 55
II.4.1 Pourcentage des fibres et des liants pour une conductivité thermique optimale 56
II.4.2 La composition chimique d'amidon 57
II.5 Extraction des fibres 58
II.6 Microscopie électronique à balayage 59
II.7 Microstructure de matériaux 59
II.8 Préparation des échantillons de fibre 60
II.9 Préparation de liant 61
II.10 Principe de mesure de conductivité thermique méthode de fil chaud (CT mètre) 63
II.11 L'absorption capillaire 64
II.12 Résistance à la chaleur 65
II.13 Conclusion 66

III RESULTATS ET DISCUTIONS 67
III.1 Introduction 67
III.2 Propriété de matériau isolant à base de fibre et de posidonie 67
III.2.1 La masse volumique 67
III.2.2 Conductivité thermique 68
III.2.3 Chaleur spécifique 69
III.2.4 Diffusivité thermique 70
III.2.5 Effusivité thermique 72
III.2.6 Absorption Capillaire 77
III.2.7 Résistance à la chaleur 78
III.3 Conclusion 78

IV MODELISATION ET SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE 80
IV.1 Introduction 80
IV.2 La modélisation thermique dynamique 80
IV.3 Modèle pour chaque zone thermique 81
IV.4 Différentes interfaces du logiciel 82
IV.4.1 Pléiades bibliothèque 82

IV.4.2 Pléiades Modeleur 83
IV.4.3 Modélisation et simulation thermique dynamique 71 83
IV.4.4 "Éditeur" [99] L'Éditeur 83
IV.4.5 Résultats 83
IV.5 Réponses du logiciel 84
IV.6 Processus d'application du logiciel 84
IV.7 Présentation de projet 86
IV.8 Scenarios de fonctionnement 87
IV.8.1 Les apports internes 87
IV.8.2 Les variantes étudiées 88
IV.9 Résultats et discussion 88
IV.9.1 Calcul des besoins en chauffages 88
IV.9.2 Comparaison entre les 05 variantes 93
IV.9.3 Conclusion 93
IV.9.4 Calcul des besoins en climatisation 94
IV.9.5 Comparaison entre les 05 variantes 96
IV.9.6 Conclusion 97

V ANALYSE ECONOMIQUE **98**
V.1 Introduction 98
V.2 Analyse simplifiée de coût de l'isolant à base de posidonie selon la littérature . 98
V.3 Comparaison des prix de l'isolant à base de posidonie avec ceux d'autres isolants 99
V.3.1 Prix de l'isolant à base de posidonie avec le prix des isolants thermiques en Algérie 100
V.4 Empreinte écologique d'un isolant commercial à base de posidonie (NeptuTherm) comparée aux isolants commerciaux 102
V.5 Conclusion 104

CONCLUSION **105**

Annexe **114**
.1 Annexe 01 114
.2 Annexe 02 118

Table des figures

I.1 Répartition par énergie.[5] 20
I.2 L'utilisation d'énergie en Algérie[6] 21
I.3 Programme Eco-bât (apure) 23
I.4 Mode de la construction en Algérie [9] 24
I.5 Schéma de la structure en paroi de fibre végétale [19] 27
I.6 Molécule de la cellulose [22] 28
I.7 Structure d'un type de xyloglucane [23] 28
I.8 Représentation schématique de la lignine [22] 29
I.9 Représentation schématique de la lignine [27] 34
I.10 La masse volumique des échantillons en fonction de la fraction volumique des fibres 35
I.11 : Effet des fibres PO sur la masse volumique des mélanges 36
I.12 Effet des fibres PO sur la conductivité thermique des mélanges 37
I.13 Variation de la masse volumique des échantillons en fonction de la fraction volumique des fibres [30] 37
I.14 Variation de la conductivité thermique des échantillons en fonction de la fraction volumique des fibres[30] 38
I.15 Le mécanisme de rupture est corrélé à la contrainte de traction appliquée lors de la flexion de (a) panneaux [31] 39
I.16 Absorption d'eau des fibres naturelles de paille et d'herbes marines (valeurs moyennes de trois répétitions)[32] 40
I.17 Conductivité thermique (et son écart type) et masse volumique des échantillons. Les barres noires indiquent la paille, tandis que les vertes indiquent les herbiers marins[32] 41
I.18 Micrographies SEM de fibres PO montrant les changements de surface après traitement[33] 42
I.19 Micrographies SEM de fibres PO montrant les changements de surface après traitement[34] 43

I.20 Répartition cumulative de la longueur (a) et de l'épaisseur (b) des fibres pour les fibres d'herbiers marins et de bois[19] 44
I.21 Conductivité thermique en fonction de la densité de Posidonia Oceanica et des matériaux d'isolation thermique courants 46
I.22 Evolution de la conductivité thermique du chanvre-amidon brut en fonction de l'humidité [37] 49
I.23 Profils de conductivité thermique pour des échantillons de différentes densités par rapport à la norme ASTM.[39] 50

II.1 Répartition de Posidonia oceanica le long des côtes méditerranéennes .[43] . . . 54
II.2 Un rhizome plagiotrope de Posidonia oceanica[49] 55
II.3 Fibre de posidonie 58
II.4 Microscope électronique à balayage 59
II.5 Micrographies SEM de fibres po montrant les changements de surface après traitement 60
II.6 Préparation des échantillons 61
II.7 Préparation de liant à base d'amidon 62
II.8 Malaxage des fibres avec liant 62
II.9 Matériau isolant à base des fibres de posidonie et liant d'amidon 62
II.10 Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique 64
II.11 Absorption d'eau par succion capillaire 65
II.12 Four électrique pour l'essais de résistance au feu 66

III.1 La masse volumique en fonction de la fraction volumique de liant 68
III.2 La conductivité thermique en fonction de volume de la fraction volumique de liant 69
III.3 Chaleur spécifique du matériau en fonction de la fraction volumique de liant . . 70
III.4 La variation de la diffusivité thermique en fonction de la fraction volumique d'adhésif 71
III.5 Diffusivité thermique des isolants thermiques courant 72
III.6 La variation de l'effusivité thermique en fonction de la fraction volumique d'adhésif 73
III.7 Diffusivité thermique des isolants thermiques courant 74
III.8 La relation entre la concentration d'adhésif et l'absorption d'eau 77
III.9 La perte de masse des échantillons en fonction de la température 78

IV.1 Interfaces du logiciel 83
IV.2 Processus d'application du logiciel 84
IV.3 Caractéristique thermique de l'isolant à base de posidonie 86

IV.4 Plan de la maison étudiée 86
IV.5 3D du Projet 86
IV.6 Variation des températures de la station météo Dar Beida 87
IV.7 Humidité absolue de la station météo Dar Beida 87
IV.8 Besoin énergétique de chauffage pour une maison sans renforcement 88
IV.9 Graphe des besoins énergétiques de chauffage pour une maison sans renforcement 89
IV.10 Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement des murs extérieurs 90
IV.11 Besoin énergétique de chauffage pour variante : remplacement de lame d'air par l'isolant de 5cm 91
IV.12 Graphe besoin énergétique de chauffage pour variante : remplacement de lame d'air par l'isolant de 5cm 91
IV.13 Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement de toiture par l'isolant et 10 et 20 cm 92
IV.14 Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement de 15 cm des murs et 10 cm de toiture par l'isolant 92
IV.15 Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement de 15 cm des murs et 10 cm de toiture par l'isolant 93
IV.16 Besoin énergétique de climatisation pour maison sans renforcement 94
IV.17 Besoin énergétique de climatisation pour variante : renforcement des murs extérieurs 94
IV.18 Besoin énergétique de climatisation pour variante : remplacement de lame d'air par un isolant de 5cm 95
IV.19 Besoin énergétique de climatisation pour variante : renforcement de toiture par un isolant de 10 et 20 cm 95
IV.20 Besoin énergétique de climatisation pour variante : renforcement de toiture par 10 cm d'isolant et les murs par 15cm d'isolant 96
IV.21 Besoin de climatisation en KWh 96

V.1 Une analyse simplifiée des coûts des panneaux isolants à base de feuilles d'herbiers marins et de fibres de bois 99
V.2 Comparaison des prix et de la durée de vie des isolants écologiques commercialisés avec le prix de l'isolant à base de posidonie 100
V.3 Comparaison des prix des isolants en Algérie avec l'isolant à base de posidonie 102
4 choix de site de dar Beida sur logiciel pléiade 114
5 scenario de chauffage sur logiciel pléiade 115
6 scenario de chauffage sur logiciel pléiade 115
7 scenario de chauffage sur logiciel pléiade 116

8 scenario d'occupation dans le séjour et la cuisine sur logiciel pléiade 116
9 scenario d'occupation dans la chambre sur logiciel pléiade 116
10 scenario puissance dissipé dans les chambres sur logiciel pléiade 117
11 scenario puissance dissipé dans le séjour et la cuisine sur logiciel pléiade 117
12 Application de l'isolant NeptuTherm dans les combles 118
13 L'application de l'isolant NeptuTherm dans l'isolation intérieure 119
14 application de l'isolant neptuTherm dans les façades 119
15 application de l'isolant NeptuTherm dans les toitures 120

Liste des tableaux

I.1 Répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2015[6] 21
I.2 Propriétés thermophysiques de quelques matériaux isolants (Réglementation thermique, 2012 32
I.3 Propriétés des matériaux isolants 33
I.4 Coefficients de conductivité thermique en fonction de l'équation de densité (Eq.1) avec leurs incertitudes statistiques[35] 45
I.5 Les valeurs expérimentales de la diffusivité thermique (a) [35] 46
I.6 Chaleur spécifique de fibres de posidonie 47
I.7 Conductivité thermique de matériaux à base des aiguilles de conifère et l'amidon de pomme de terre [36] 48
I.8 Des propriétés de l'échantillon : Densité, capacité thermique spécifique Cp, effusivité thermique b, diffusivité a et conductivité à 23°C [37] 49
I.9 Conductivité thermique des composites avec 20% de liant [27] 51

II.1 Composition chimique des fibres de posidonie [54] 56
II.2 La synthèse de la composition des fibres végétales et des liants dans les matériaux d'isolation [54] 57
II.3 Composition des différentes sources d'amidon. [28] 58

III.1 Tableau comparatif des matériaux isolants 76

IV.1 Eléments constructifs de la variante 01 (maison avec matériaux standard) 85

V.1 Tableau comparatif des prix des isolants thermiques en Algérie et le prix d'isolant à base de posidonie 101
V.2 Consommation d'énergie grise de divers matériaux de construction (en kWh/m^3) 103

Liste des Abréviations

EPS	Polystyrène Expansé
LBC	Lampe Basse Consommation
MEB	Microscope électronique à balayage
PF	Mousse phénolique
PO	Posidonia oceanica
PUR	Polyuréthane
XPS	Polystyrène Extrudé

Nomenclature

α	Diffusivité thermique, en ($m^2.s^{-1}$)
λ	Conductivité thermique, en ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
ρ	Masse volumique, en ($kg.m^{-3}$)
C_p	Capacité thermique massique, en ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
E	Effusivité thermique ($J.k^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)
e	Épaisseur de l'échantillon, en (cm)
T	Température, en (C°)

INTRODUCTION

Les bâtiments sont les principaux consommateurs d'énergie en Algérie, représentant 46% de la consommation énergétique nationale totale et constituant la plus grande source d'émissions de gaz à effet de serre. Les bâtiments résidentiels en particulier occupent 37% de cette consommation. Cette hausse de la demande énergétique est principalement due à l'augmentation substantielle de la population et du nombre de logements. Par conséquent, des prévisions précises de la consommation d'énergie sont essentielles pour permettre une planification efficace, formuler des stratégies à long terme et mettre en œuvre des initiatives visant à réduire les émissions et gérer l'utilisation de l'énergie dans l'industrie de la construction. [1, 2]

L'enveloppe extérieure des bâtiments joue un rôle crucial en tant que première barrière contre les variations climatiques extérieures. Il est donc essentiel d'améliorer sa performance énergétique [1].

Les matériaux d'isolation thermique couramment utilisés dans l'industrie de la construction sont principalement des plastiques traditionnels et des isolants inorganiques. Cependant, ces matériaux sont souvent critiqués pour leurs procédés de fabrication, qui ne sont ni durables ni respectueux de l'environnement. De plus en plus, les chercheurs se tournent vers le développement de nouveaux matériaux isolants à base de fibres naturelles, en raison de leur faible coût et de leur faible impact environnemental. [3, 4]

Dans le cadre de cette recherche, l'attention se porte spécifiquement sur la caractérisation des fibres naturelles extraites de la plante marine Posidonia oceanica, une espèce présente dans diverses mers, notamment en Méditerranée, en vue de leur utilisation dans la fabrication des matériaux utilisés dans la construction. L'objectif principal est d'exploiter les résidus de ces fibres, facilement recouvrables en grande quantité sur les plages et actuellement non valorisés. Avant d'envisager l'utilisation des fibres de Posidonia oceanica, il est impératif de rassembler des données sur leurs propriétés thermiques et de les comparer à celles des matériaux traditionnellement employés dans l'isolation thermique des bâtiments.

De plus, il est nécessaire d'évaluer les propriétés, thermiques et hygroscopiques des matériaux comprenant ces fibres afin de quantifier l'impact de leur présence sur leurs propriétés et leur durabilité.

Le Premier Chapitre abordera le contexte environnemental de cette thèse, en mettant en lumière notamment le rôle prépondérant du secteur du bâtiment dans la consommation d'énergie. La section suivante consistera en un état de l'art sur les propriétés des fibres naturelles. Enfin, une synthèse et une discussion des résultats des études de la littérature concernant l'utilisation de fibres naturelles dans la fabrication des matériaux d'isolation thermique pour le bâtiment, ainsi que l'utilisation des liants naturels dans les matériaux de construction, seront présentées.
Le Deuxième Chapitre sera dédié, dans un premier temps, à la description des matériaux utilisés dans ce travail. Les méthodes d'extraction des fibres de Posidonia oceanica, ainsi que leurs propriétés microstructurales seront exposées. La préparation des échantillons de fibres et de composites sera également détaillée dans ce chapitre. Dans un second temps, les différentes méthodes expérimentales employées pour la caractérisation seront présentées : la microscopie électronique à balayage pour les analyses microstructurales, le CT Mètre pour les mesures thermiques, l'absorption d'eau ainsi que les essais acoustiques. Pour chaque méthode, les hypothèses et les conditions de mesure seront spécifiées.
Le Troisième Chapitre se penchera sur les propriétés thermo physiques de matériau à base fibres extraites de Posidonia oceanica et le liant à base d'amidon, envisagées comme matériau d'isolation thermique pour les bâtiments. Une comparaison sera établie entre ces propriétés et celles des isolants cités dans la littérature.
Le Quatrième Chapitre sera dédié à la simulation thermique comparative d'une maison utilisant des matériaux standards à Alger, et une simulation en intégrant l'isolant à base de Posidonie. L'objectif est d'analyser leurs comportements respectifs et leurs performances énergétiques. Ces simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Pléiades Comfie.
Le Cinquième Chapitre présente une analyse économique et écologique des isolants mentionnés dans la littérature ou déjà commercialisés, afin d'évaluer la possibilité de commercialisation de ces produits sur le marché algérien. En conclusion, ce manuscrit se clôturera par une synthèse des résultats les plus significatifs de cette étude, ainsi que par une discussion sur les perspectives qu'ils ouvrent.

CHAPITRE I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

L'utilisation des fibres naturelles par l'homme dans l'habitat pour se protéger n'est pas récente. Cependant, avec la révolution industrielle, de nouveaux matériaux comme le béton et l'acier sont apparus. Aujourd'hui, avec l'avènement de l'ère verte, il est devenu impératif de revenir aux ressources naturelles afin de réduire la consommation, de se prémunir contre les aléas climatiques et de limiter la pollution engendrée par la fabrication des matériaux industriels. Dans ce chapitre, nous entamons en présentant l'impact significatif du secteur du bâtiment ainsi que la contribution des matériaux de construction à cet impact. La seconde partie de ce chapitre traite des généralités sur les fibres et de leurs applications dans les matériaux de construction. Par la suite, une synthèse bibliographique est proposée sur les matériaux utilisés dans cette étude, à savoir les fibres de Posidonia oceanica associées à un liant naturel à base d'amidon.

I.2 Consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment

I.2.1 A l'échelle mondiale

Les tendances récentes en matière d'énergie et d'émissions de carbone liées aux bâtiments et à la construction dans le monde sont variées, avec une consommation d'énergie croissante et une croissance limitée des émissions liées aux bâtiments. La construction et l'exploitation de bâtiments représentaient 36 % de la consommation d'énergie finale mondiale et 39 % des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) liées à l'énergie. Ainsi, même en excluant l'énergie liée à la construction utilisée pour le transport des matériaux de construction sur les chantiers, le secteur des bâtiments et de la construction représente la plus grande part de la consommation énergétique et des émissions. [3] Par ailleurs, la consommation mondiale d'énergie augmente considérablement. Elle devrait croître de 48% entre 2012 et 2040. La demande énergétique

est générée par la croissance des activités industrielles et une forte demande énergétique d'urbanisation. Cette augmentation exacerbe le risque d'épuisement des ressources énergétiques, qui a un impact sur l'environnement. La majeure partie de cette énergie consommée par le secteur de la construction (résidentiel et tertiaire), notamment la climatisation et chauffage pour répondre aux besoins des occupants.[4, 5]

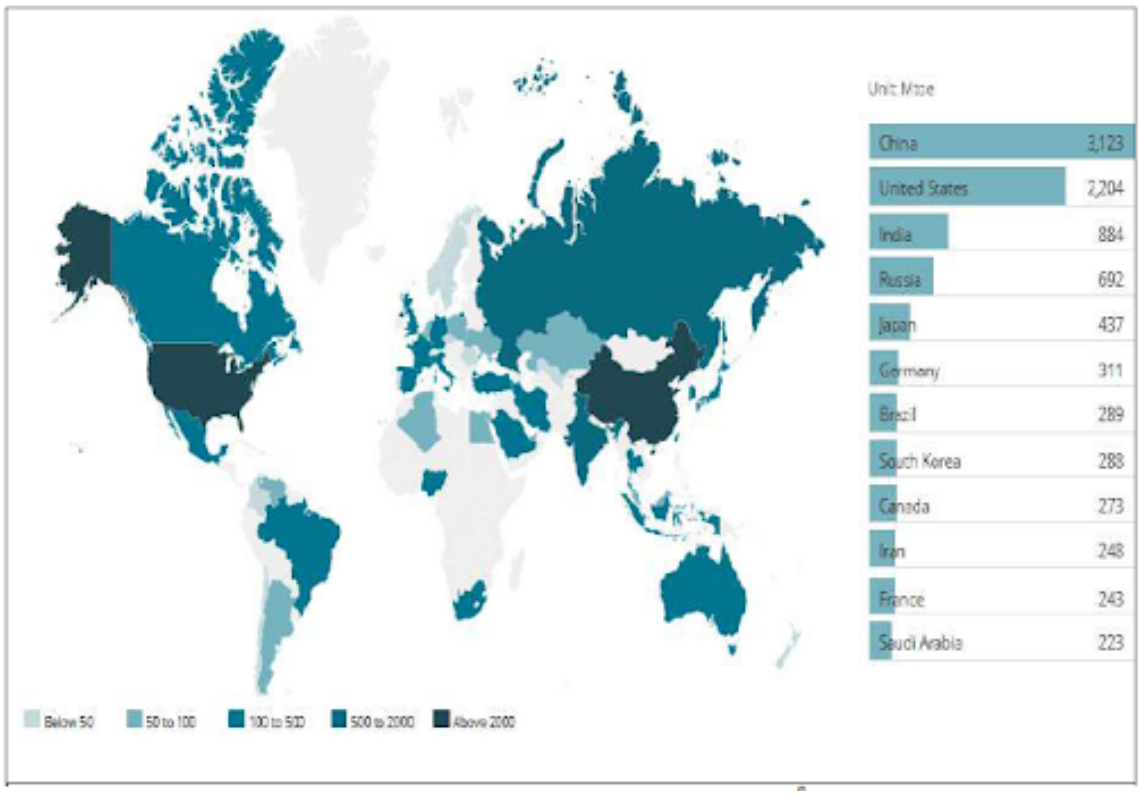


FIGURE I.1 – Répartition par énergie.[5]

I.2.2 Consommation énergétique en Algérie

En Algérie, en 2017 l'utilisation de l'énergie finale se décompose comme le montre la Figure 04, où le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore et qui représente environ la moitié de la consommation d'énergie finale 43% et représente bien plus que le transport (33%) et l'industrie (22%).

TABLE I.1 – Répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2015[6]

Bâtiments	44.9%
Transports	33.1%
Industrie	19%
Agriculture	3%

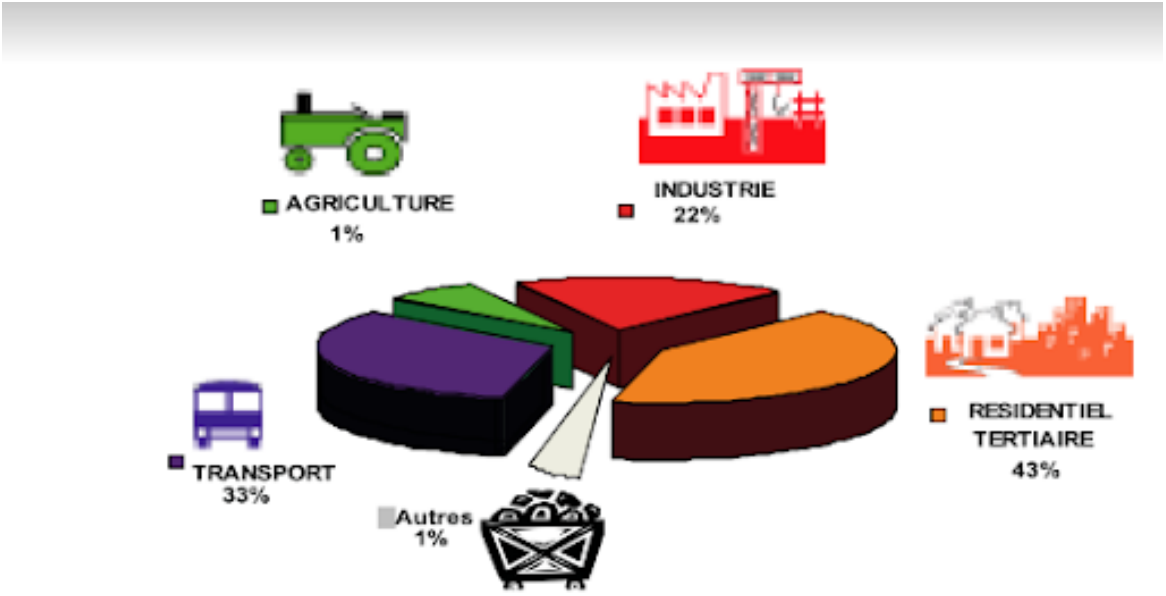


FIGURE I.2 – L'utilisation d'énergie en Algérie[6]

La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel a considérablement augmenté en raison d'une forte urbanisation et de la croissance du parc immobilier algérien. Cela représente près de 36% de la consommation d'énergie du pays. [6]
Actuellement, la consommation d'énergie en Algérie augmente. A ce propos, la consommation d'énergie a doublé entre 2004 et 2014, passant de 31.2 MTep à 52 MTep. De sa part, la production d'électricité a connu une croissance similaire, passant de 30,9 Térawatt-heures à 64,2 Térawatt-heures, avec un taux de croissance annuel de 7%. Selon les prévisions, la production d'énergie primaire ne sera pas suffisante pour répondre aux exigences du marché national d'ici 2030. [7]

I.2.3 Programme national d'efficacité énergétique

Le programme d'efficacité énergétique obéit à la volonté de l'Algérie de favoriser une utilisation plus responsable de l'énergie et d'explorer toutes les voies pour préserver les ressources et systématiser la consommation utile et optimale.
L'objectif de l'efficacité énergétique consiste à produire les mêmes biens ou services, mais en utilisant le moins d'énergie possible. Ce programme comporte des actions qui privilégient le recours aux formes d'énergie les mieux adaptées aux différents usages et nécessitant la modification des comportements et l'amélioration des équipements.
Ce programme prévoit l'introduction des mesures d'efficacité énergétique dans les trois secteurs du bâtiment, de transport et de l'industrie.[7]

— Plan d'Action en Matière d'Efficacité Energétique Pour le secteur du bâtiment :
  Le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements.
  Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eau solaires et les lampes économiques : l'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie.
  La mise en place d'une industrie locale des isolants thermiques et des équipements et appareils performants (chauffe-eau solaires, lampes économiques) constitue l'un des atouts pour le développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur.
  Globalement, c'est plus de 30 millions de TEP qui seront économisées, d'ici 2030 réparties comme suit :

  — Isolation thermique : L'objectif est d'atteindre un gain cumulé évalué à plus de 7 millions de TEP.
  — Chauffe -eau solaire : L'objectif est de réaliser une économie d'énergie à plus de 2 millions de TEP.
  — Lampe basse consommation (LBC) : Les gains en énergie escomptés, à l'horizon 2030, sont estimés à près de 20 millions de TEP.

  Eclairage public : L'objectif est de réaliser une économie d'énergie de près de un (01) million de TEP, à l'horizon 2030, et d'alléger la facture énergétique des collectivités. [7]

— Projets réalisés dans le cadre de la maîtrise d'énergie dans le bâtiment

I.2.4 Programme Eco-bat

Dans ce contexte, des actions de maitrise d'énergie ont été entreprises. L'Etat a opté pour le lancement du programme ECO-BAT dans le cadre du PNME 2007-2011, et qui a eu pour objectif la réalisation de 600 logements à haute performance énergétique à travers le territoire Algérien.
Le programme Eco-Bât vise à réduire la consommation énergétique des bâtiments en fournissant un soutien technique et financier. Son objectif principal est de diminuer les dépenses énergétiques associées au chauffage et à la climatisation. Ceci est accompli par diverses actions, notamment :

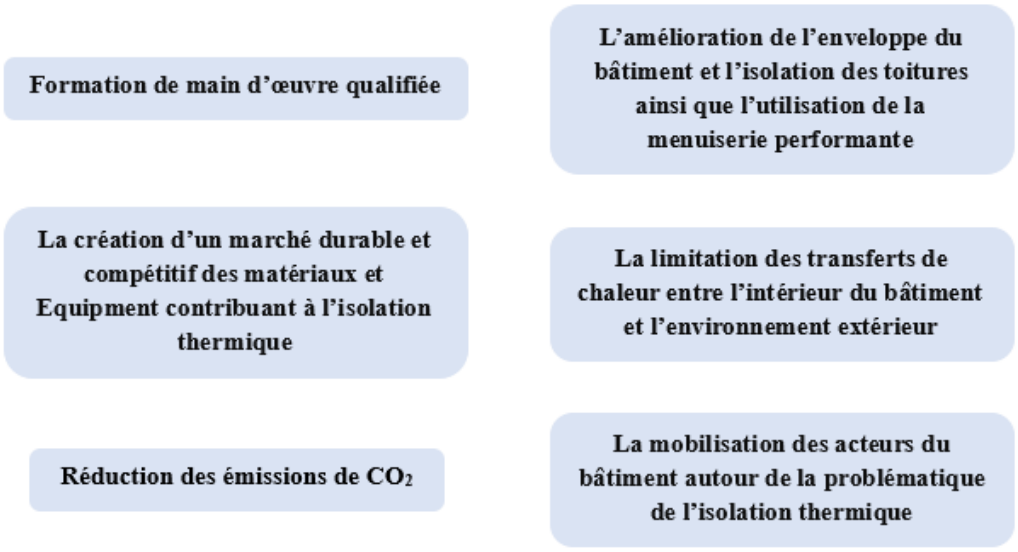


FIGURE I.3 – Programme Eco-bât (apure)

Les objectifs du programme mettent l'accent sur l'importance de l'enveloppe du bâtiment, en particulier sur l'isolation et l'isolation thermique. [6]

I.2.5 Les modes de construction en Algérie

L'habitat courant repose sur une nouvelle approche architecturale, utilisant principalement le béton pour sa construction. Ce matériau est choisi pour ses nombreux avantages, tels que sa malléabilité, sa facilité de mise en place et sa résistance mécanique rapidement acquise. [8]
Cependant, sa faible isolation thermique, sa consommation excessive d'énergie grise et son manque d'adaptabilité à divers climats en font un matériau inadapté au confort des habitants, entraînant ainsi une augmentation de la consommation énergétique pour maintenir les conditions thermiques souhaitées. Cette situation, exacerbée par la pression croissante du logement et la crise du logement, expose de nouvelles contraintes en termes de confort, telles que le manque

ou l'insuffisance d'isolation thermique et le recours à des solutions de climatisation coûteuses et peu esthétiques.[8]



FIGURE I.4 – Mode de la construction en Algérie [9]

I.3 L'impact de la standardisation du logement sur sa performance énergétique en Algérie

Une analyse du potentiel bioclimatique a été réalisée par Samir Semahi et all [10] sur un modèle de bâtiment résidentiel contemporain construit en brique creuse, en utilisant des données récentes (2003-2017). L'approche adoptée reposait sur l'application du modèle du confort adaptatif Ashrae 55-2017 dans 8 lieux représentatifs des zones climatiques algériennes. Les résultats obtenus ont permis de classer les villes algériennes en deux grandes catégories, à savoir : celles dominées par le chauffage et celles dominées par le refroidissement. Le pourcentage moyen d'inconfort, toutes zones confondues, s'élevait à 60%.

Une autre approche de zonage récent, établie par Samir Semahi et all [2], se basait sur les taux d'inconfort et la demande énergétique en chauffage et climatisation. Cette étude a été menée sur un modèle de référence représentatif du logement contemporain en Algérie, construit en brique creuse, dans 74 régions des 48 wilayas algériennes, en utilisant les données climatiques de la période 2004-2017. Les résultats ont révélé un écart entre la consommation minimale et maximale en climatisation et chauffage, estimé respectivement à 141 kWh et 148 kWh. Ce

contraste s'explique par l'application de la même typologie déconstruction et des mêmes procédés constructifs dans les différentes régions algériennes, malgré la diversité climatique du territoire. Dans le sud de l'Algérie, en raison de l'aridité climatique, les bâtiments sont responsables de plus de 70% de la consommation d'électricité pendant la saison estivale. Le développement des villes du Sud a été similaire au développement des villes du Nord, ce qui a marginalisé les caractéristiques climatiques extrêmement difficiles de ces régions. Depuis plusieurs années, à la suite d'une crise causée par une forte demande de logements, l'État est confronté à une technologie qui ne répond pas aux besoins climatiques et économiques de ces régions et qui ne répond pas aux aspirations socioculturelles du citoyen algérien. Les bâtiments sont construits avec des orientations arbitraires et des façades comprenant des baies vitrées n'importe comment, du choix inadapté des matériaux de construction et de l'exposition des bâtiments aux contraintes solaires (non utilisation des brises solaires).

Par conséquent, il est nécessaire d'envisager des alternatives. Dans cette optique, la solution avancée par cette étude pourrait intéresser les ingénieurs et les architectes.

Dans cette optique, l'objectif est de valoriser les ressources marines souvent sous-utilisées dans le secteur de la construction. Ces ressources offrent des propriétés uniques qui sont actuellement peu exploitées mais qui pourraient être avantageuses dans les régions caractérisées par un climat méditerranéen. En exploitant ces matériaux alternatifs, il est possible de répondre de manière plus efficace aux exigences de ces environnements, tout en offrant des solutions durables et adaptées aux défis climatiques et environnementaux particuliers de la région méditerranéenne.

I.4 Généralité sur les fibres et leur utilisation dans les matériaux de construction

Chaque année, environ 35 millions de tonnes de fibres naturelles sont collectées. Ces fibres proviennent d'animaux, ou elles proviennent de végétaux tels que le chanvre, le lin, l'alfa, les tiges de jute, le sisal et le coton. [11]

Suite à la hausse des prix du pétrole et à la prise en considération des contraintes environnementales, ainsi qu'à l'adoption de matériaux locaux, biodégradables et recyclables, les entreprises renouent avec l'emploi des fibres naturelles, notamment végétales, dans les secteurs du textile, du bâtiment, de la plasturgie et de l'automobile. Ils travaillent en faveur de l'amélioration des produits locaux et de l'autonomie économique par rapport aux produits importés, en raison des coûts de revient et du respect de l'environnement. [12]

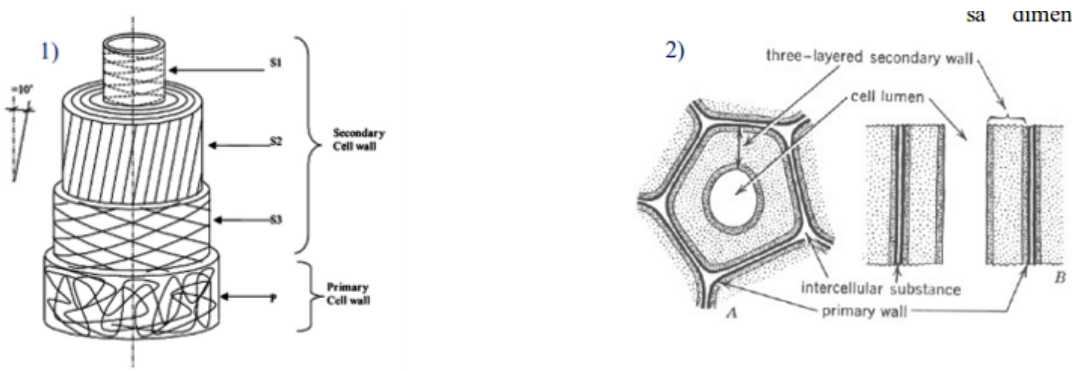
Les fibres naturelles d'origine végétale ont été utilisées dans la construction depuis les années où les briques étaient renforcées par la paille ou les roseaux. Depuis l'année 1970, le plâtre a été

le premier matériau composite utilisé pour lier les fibres végétales.[9, 13]
Dans le domaine de la construction, on ajoute du chanvre au béton afin de fabriquer des dalles isolantes ou de faire des murs. La laine de verre peut être substituée par la chènevotte et la laine de chanvre provenant des tiges de chanvre broyées. Les isolants naturels offrent de multiples bénéfices pour l'environnement : leur capacité à isoler de manière thermo-acoustique, leur capacité à réguler l'humidité et leur faible énergie grise pour leur production, leur recyclabilité et leur capacité à capturer le carbone de l'air pour les fibres végétales. [12]
À l'heure actuelle, il y a eu des avancées récentes dans le domaine du renforcement du ciment et du béton à l'aide de fibres végétales. En raison des problèmes de santé causés par les fibres d'amiante ainsi que la mise en valeur des fibres végétales permettant de diminuer l'empreinte écologique par rapport à l'utilisation des fibres polymères, en raison de leur nature renouvelable, neutre en émissions de CO_2 et économe en énergie de production, de nombreuses études se concentrent sur la substitution de ces dernières par des fibres végétales. [13]
Les fibres végétales, selon leur définition, sont des structures biologiques fibrillaires constituées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les proportions de ces composants varient en fonction de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante. [14]
On extrait des plantes des fibres végétales, que ce soit de la tige telle que le lin et le chanvre, de la feuille comme les fibres de palmier dattier, voire même du fruit lui-même comme la noix de coco. On les retrouve dans la biomasse. Elles se distinguent par leur faible densité, leur capacité d'isolation thermique, leur résistance à la traction élevée et leur capacité à se dégrader, ce qui représente un avantage considérable pour l'environnement. Leur composition est principalement constituée de la cellulose, de l'hémicellulose, de la lignine et des pectines. Leurs proportions influencent toutes les caractéristiques des fibres. [6]

I.5 Structure des fibres naturelles

On peut définir une fibre élémentaire comme un ensemble de micro-fibrilles pluri-couches enrobées dans des matrices naturelles d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Effectivement, les fibres de cellulose se lient de manière parallèle grâce à l'interaction des groupes hydroxyles qui créent les micro-fibrilles. La présence d'hémicellulose assure la connexion entre les micro-fibrilles et la matrice naturelle. Il est fort probable qu'elle soit liée aux micro-fibrilles de cellulose par des liens hydrogènes. [15, 16, 17]
On retrouve généralement de la pectine dans la paroi primaire et de la lignine dans la paroi secondaire dans la matrice naturelle. Les fibrilles de cellulose sont disposées en forme d'hélice en fonction d'un angle relatif à l'axe longitudinal de la fibre appelé angle micro-fibrillaire (Figure I.5). Il diffère principalement en fonction de la structure de la paroi cellulaire et du type de plante.

Il confère aux fibres naturelles certaines caractéristiques mécaniques qui s'accroissent de manière inverse en fonction de leur dimension. [15, 18]



(a) Orientation des fibrilles dans les différentes parois cellulaires.

(b) Coupe transversale (A), Coupe longitudinale (B).

FIGURE I.5 – Schéma de la structure en paroi de fibre végétale [19]

I.5.1 La Cellulose

En 1838, Anselm Payen a fait la découverte de la présence de cellulose comme matériau commun dans les parois cellulaires végétales. La cellulose est la substance biologique la plus présente sur notre planète. D'un point de vue chimique, la cellulose se compose d'une chaîne stéréo-régulière très longue composée de maillons de glucose $C_6H_{12}O_6$.

La structure de la cellulose est fibrillaire et partiellement cristalline. Les micro-fibrilles de cellulose se composent de parties cristallines bien structurées et de parties amorphes complètement désorganisées. [20]

Les chaînes cellulosiques se trouvent dans la zone cristalline en parallèle les unes aux autres, avec des liaisons hydrogènes à l'intérieur et à l'extérieur des molécules. La densité des liaisons hydrogène qui se forment entre les chaînes est étroitement liée à toutes les propriétés de la cellulose. Les interactions entre les molécules sont intenses et garantissent la cohésion essentielle tout en empêchant l'entrée des réactifs. En raison de sa forte résistance, la cellulose ne se dissout pas dans la plupart des solvants. La cellulose présente une grande affinité pour l'eau. [21]

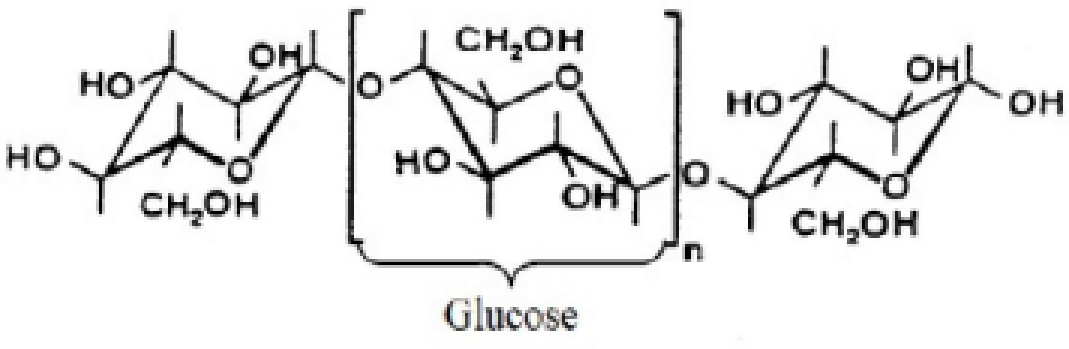


FIGURE I.6 – Molécule de la cellulose [22]

I.5.2 L'hémicellulose

Les hémicelluloses, qui sont des polysaccharides composés de cycles à 5 et 6 carbones, sont également présents dans la plupart des fibres naturelles (Figure I.7). La matrice de support des micro-fibrilles de cellulose est constituée de l'hémicellulose.

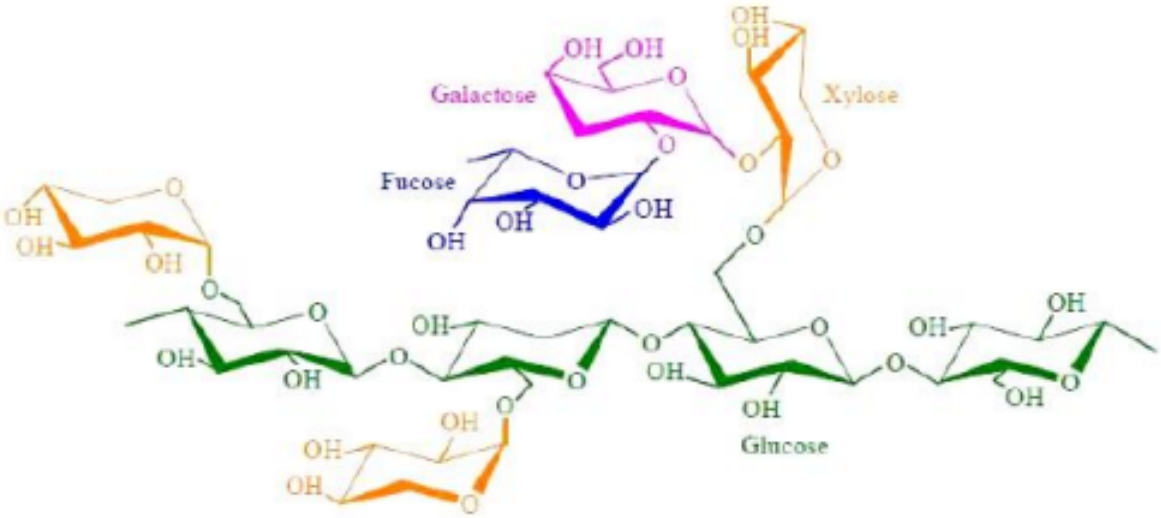


FIGURE I.7 – Structure d'un type de xyloglucane [23]

Trois éléments distinguent l'hémicellulose de la cellulose. En premier lieu, elle est constituée de sucres neutres tels que le xylose, l'arabinose, le galactose, le glucose, le mannose et les acides uroniques. En deuxième lieu, elle possède une grande quantité de connexions avec des groupes latéraux qui expliquent sa nature non-cristalline. Finalement, dans son état naturel, elle présente un taux de polymérisation variant de 50 à 300. L'hémicellulose est extrêmement sensible à l'eau, soluble dans des milieux alcalins et hydrolysable facilement dans les acides. [21, 22]

I.5.3 La lignine

La lignine est une molécule très variée qui est constituée de polymères aromatiques. Après les polysaccharides, elle est le polymère naturel le plus répandu sur notre planète. Elle joue un rôle essentiel dans la solidité structurelle des parois cellulaires et préserve les plantes de l'attaque des organismes pathogènes. La lignine se compose d'unités de phényle propane et est une molécule à trois dimensions (Figure I.8)

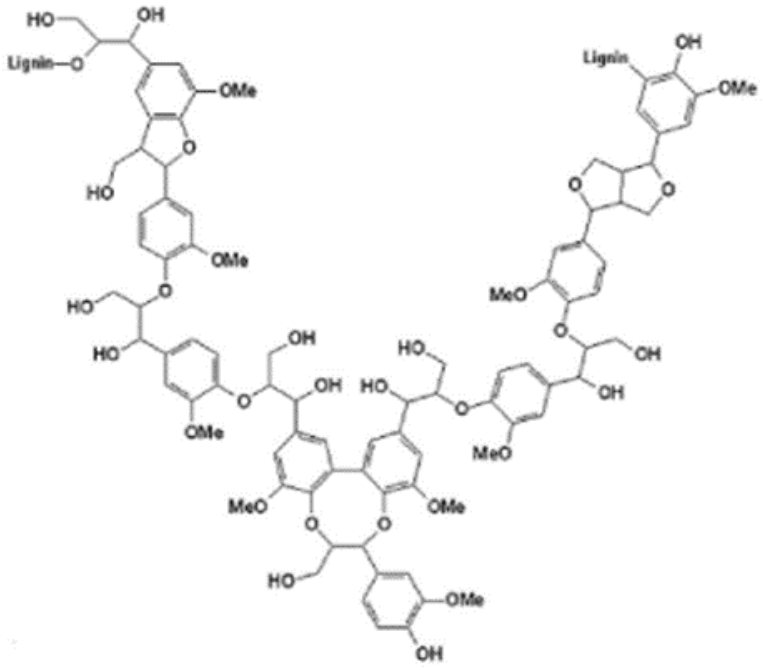


FIGURE I.8 – Représentation schématique de la lignine [22]

La lignine possède une amorphe totale et une hydrophobie. Les acides ne la hydrolysent pas, mais elle est soluble à chaud dans la soude, oxydée facilement et condensable avec du phénol. [22]

a) Les avantages des fibres naturelles

- Coût abordable.
- La biodégradabilité.
- Sans impact sur l'émission de CO_2.
- Une ressource durable.
- Aucun reste après la sépulture.

— Des caractéristiques mécaniques et spécifiques essentielles.

— Ne nécessite que peu d'énergie pour être fabriquée.

— Aucune irritation cutanée n'est observée lors de l'utilisation des fibres.

— Excellent isolant thermique et sonore.

b) Les inconvénients des fibres naturelles

— Absorption d'eau.

— Fibres anisotropes.

— Faible stabilité dimensionnelle.

— Renfort discontinu.

— Faible tenue thermique (200à300°Cmax).

— Variation de la qualité en fonction du lieu de croissance et des conditions météorologiques.

I.6 Propriétés et performances d'un matériau isolant

L'isolation thermique joue un rôle crucial dans la réduction de la consommation énergétique et dans la création d'un environnement de vie sain et confortable au sein des bâtiments. En effet, une isolation thermique efficace permet de choisir des équipements de climatisation moins puissants, donc plus économiques. [24]

Selon la littérature [25], l'isolation thermique est une technique ou un ensemble de matériaux visant à limiter les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment.

Elle retarde le flux de chaleur à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment en raison de sa haute résistance thermique. C'est une mesure essentielle pour atteindre un niveau de confort thermique satisfaisant. En réalité, la notion de bien-être thermique dépasse celle du simple confort thermique. En plus d'englober l'absence de sensations physiques désagréables telles que le froid ou la chaleur, le bien-être thermique prend également en compte des facteurs culturels et psychologiques. [26]

La conductivité thermique n'est pas la seule caractéristique à considérer lorsqu'on sélectionne un isolant. Effectivement, les caractéristiques d'un matériau isolant sont classées en trois catégories principales.

I.6.1 Propriétés physiques

Elles sont définies en fonction de sa densité, de sa résistance mécanique, de sa capacité d'isolation thermique, de son absorption acoustique, de sa résistance à l'humidité et au feu, de sa stabilité dimensionnelle, et bien d'autres encore.

I.6.2 Les propriétés environnementales

Ce deuxième groupe englobe des caractéristiques telles que l'énergie intrinsèque primaire, la quantité d'énergie totale nécessaire pour produire, transporter et à terme recycler le matériau, les émissions de gaz lors de la production de la matière, l'utilisation d'additifs pour lutter contre les effets biologiques, etc.

I.6.3 Les propriétés de l'hygiène et de la santé

Le groupe suivant se concentre sur la santé publique pendant la production, l'utilisation et la disposition finale des matériaux (en ce qui concerne les besoins en oxygène, l'élimination des odeurs, des fumées et des gaz nocifs variés). La santé peut être affectée par différents matériaux, comme le rejet de poussières ou de particules (comme la laine de verre).

I.7 Quelques propriétés thermo-physiques des matériaux d'isolation thermique courants

Une bonne isolation thermique nécessite un choix de matériaux. Les matériaux d'isolation thermique sont des matériaux dont le coefficient thermique est inférieur à $0,1 W.m^{-1}.K^{-1}$.
Ces isolants peuvent être synthétiques, minéraux ou d'origine végétale. Nous présentons dans le Tableau I.3 les propriétés thermo-physiques de quelques matériaux communément employés dans l'isolation thermique de l'habitat dans un but comparatif. Les masses volumiques de ces matériaux sont très variables : elles varient en général de $7 kg.m^{-3}$ à $250 kg.m^{-3}$. Les conductivités thermiques varient entre$0,03 W.m^{-1}.K^{-1}$et $0,06 W.m^{-1}.K^{-1}$. Les diffusivités thermiques sont de l'ordre de $10^{-6} m^2.s^{-1}$. Les capacités thermiques massiques sont comprises entre $1000 J.kg^{-1}.K^{-1}$et $2300 J.kg^{-1}.K^{-1}$. Le Tableau I.6.3 présente les principales caractéristiques déterminantes pour le choix d'un isolant. [26]

TABLE I.2 – Propriétés thermophysiques de quelques matériaux isolants (Réglementation thermique, 2012

	Isolant	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$)	Capacité thermique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
Fibres minérales	Laine de roche	18-80	0.038-0.047	$0.57 \times 10^{-6} - 2.04 \times 10^{-6}$	1030
	Laine de verre	7-130	0.034-0.056	$0.42 \times 10^{-6} - 4.71 \times 10^{-6}$	1030
Matériaux synthétiques	Polystyrène expansé	≥ 7	0.036-0.058	$3.29 \times 10^{-6} - 5.31 \times 10^{-6}$	1450
	Polystyrène extrudé	25-60	0.031-0.05	$0.57 \times 10^{-6} - 0.85 \times 10^{-6}$	1450
Matériaux naturels	Cellulose	40-65	0.038-0.044	$34 \times 10^{-6} - 59 \times 10^{-6}$	1600-2000
	Laine de chanvre	25-60	0.039-0.042	$0.41 \times 10^{-6} - 1.2 \times 10^{-7}$	1300-1700
	Laine de lin	18-35	0.037-0.042	$7.5 \times 10^{-7} - 1.3 \times 10^{-6}$	1600
	Laine de bois	38-45	0.038-0.042	$41 \times 10^{-6} - 62 \times 10^{-6}$	1600-2300
	Liège	100-250	0.049-0.055	$0.14 \times 10^{-6} - 0.31 \times 10^{-6}$	1560
	Paille	80-110	0.056	$3.2 \times 10^{-7} - 4.4 \times 10^{-7}$	1600

TABLE I.3 – Propriétés des matériaux isolants

		Comportement à l'eau	Comportement à la chaleur	Propriétés mécaniques	Environnement
Isolants synthétiques	**Polystyrène Expansé (EPS)**	Faible absorption	T_{pmax} = 70°C	Bonne résistance à la compression	Non recyclable, dégagement de gaz toxique en cas d'incendie
	Polystyrène Extrudé (XPS)	Très faible absorption	T_{pmax} = 75°C	Très bonne résistance à la compression	
	Polyuréthane PUR	Très faible absorption	Faible Résistance	Faible résistance au choc	
	Mousse phénolique PF	Sensible à l'humidité	Faible Résistance	Bonne résistance à la compression	
Isolants minéraux	Laine de roche	Bonne Résistance	Bonne Résistance	Fortement compressible, Faible résistance au délaminage	Origine naturelle, difficilement recyclable
	Laine de verre	Non capillaire non hygroscopique	Bonne Résistance	Compressible	
	Verre cellulaire	Etanche à l'eau	Bonne Résistance	Matériaux fragiles	
Isolants végétaux	Panneau de fibre de bois	Sensible à l'eau	Bonne Résistance	Résiste la compression et le choc	Origine naturelle
	Laine de cellulose	Sensible à l'eau, hygroscopique	Bonne Résistance	Compressible	
	Liège expansé	Sensible à l'eau	Bonne Résistance	Bonne Résistance	
	Chanvre	Sensible à l'eau	Bonne Résistance	Bonne Résistance	

I.8 Propriété thermo-physiques des matériaux à base de fibre de posidonie

I.8.1 Matériau à base des fibres et matrice cimentaire

I.8.2 Effet de la fraction volumique des fibres sur la masse volumique et sur la conductivité thermique des matériaux

Hamdaoui et al [27, 28] ont étudiée les propriétés thermiques d'une pâte de ciment durcie renforcée par des fibres de Posidonia Oceanica. Les fractions volumiques des fibres varient de 0% à 20%. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres de Posidonia Oceanica améliorait les propriétés isolantes du matériau. En fait, une diminution d'environ 22% (de 0,718 $W.m^{-1}.K^{-1}$

à 0, 559 $W.m^{-1}.K^{-1}$) de la conductivité thermique a été constatée avec l'ajout de 20% de fibres Par rapport à la pâte de ciment de contrôle (Figure Par rapport à la pâte de ciment de contrôle (Figure I.9).

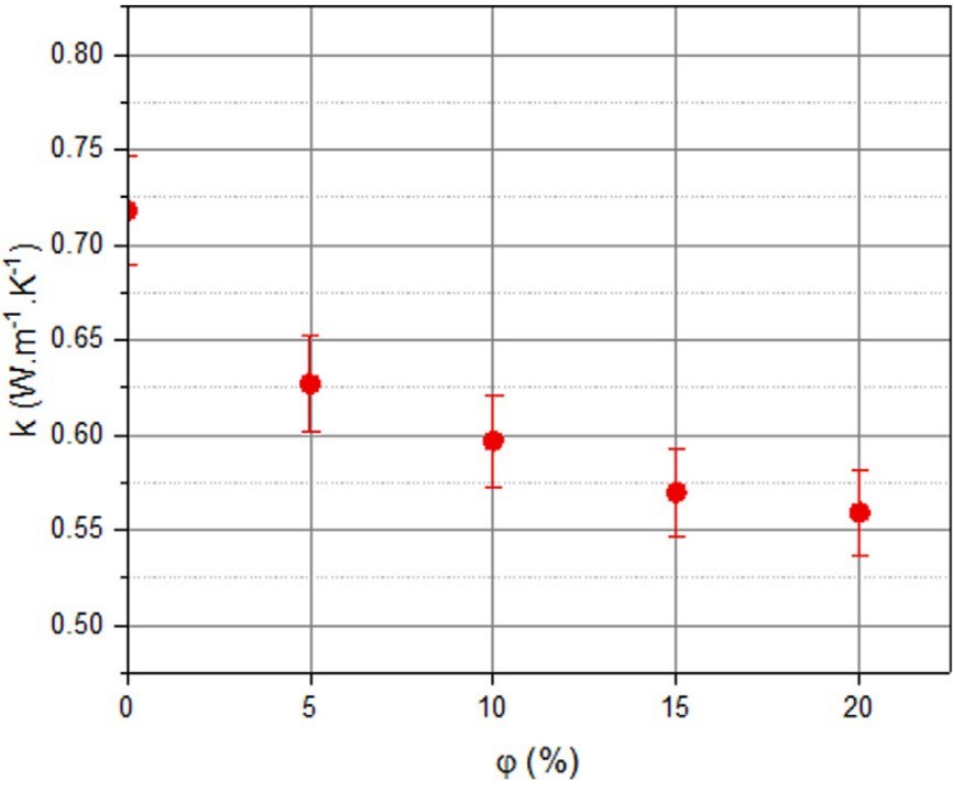


FIGURE I.9 – Représentation schématique de la lignine [27]

Hamdaoui et al [28] ont rapporté que la masse volumique des échantillons a été calculée à partir de la moyenne des mesures de poids et de volume de trois échantillons. La variation de la

pmasse volumique en fonction de la fraction volumique des fibres est présentée dans la figure I.10 Les résultats indiquent que le matériau devient légèrement moins dense avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres. En effet, la masse volumique varie de 1761 $kg.m^{-3}$à 1613 $kg.m^{-3}$: une réduction de 8% par rapport à la pâte de ciment témoin est constatée. Ce résultat est attendu en raison de la structure creuse des fibres montrée dans les images MEB de la Figure qui génère des vides et des pores dans la matrice. Il existe également une porosité supplémentaire provenant de l'interface fibre-matrice et de l'agglomération des fibres.

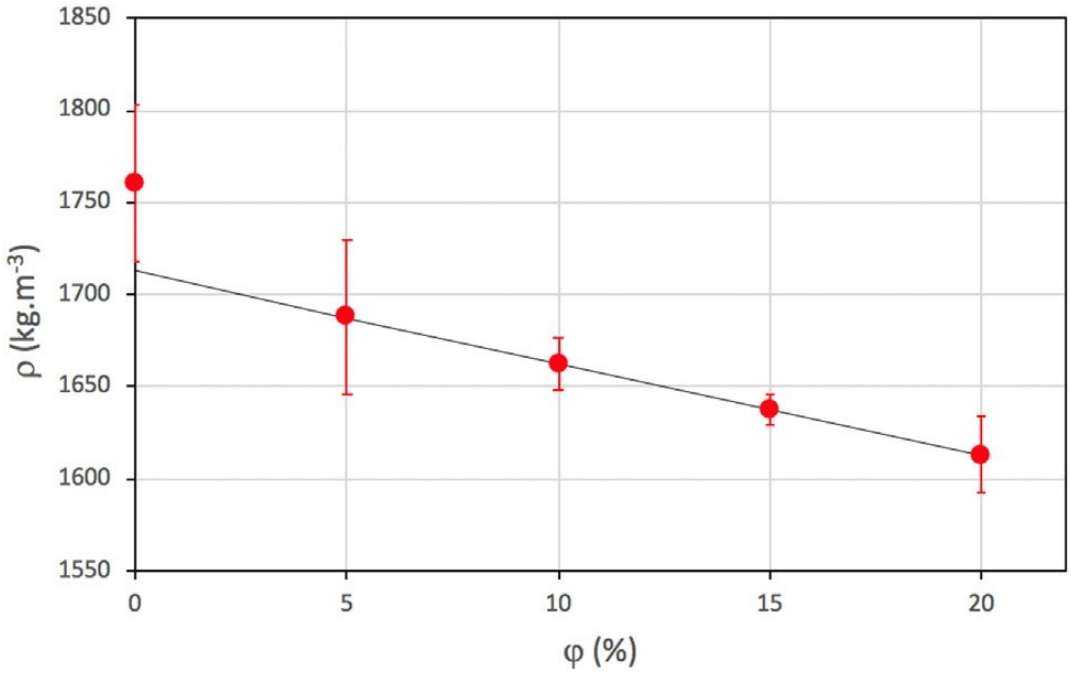


FIGURE I.10 – La masse volumique des échantillons en fonction de la fraction volumique des fibres

Omrane Benjeddou et al [29] ont fait une étude expérimentale de la densité d'un composite de ciment renforcé par des fibres de Posidonia oceanica (PO). La figure I.11 montre la variation de la masse volumique des différents mélanges. L'enquête a révélé que la masse volumique a diminué de $1800kg.m^{-3}$ à $1625kg.m^{-3}$ pour les fractions volumiques de fibres (Vf) allant de 0% à 20%, ce qui correspond à une réduction d'environ 10%. Cette réduction est due à la faible massse volumique des fibres (350 $kg.m^{-3}$) par rapport à celle de la pâte de ciment et à l'apparition de bulles d'air à l'aide des fibres lors du mélange.

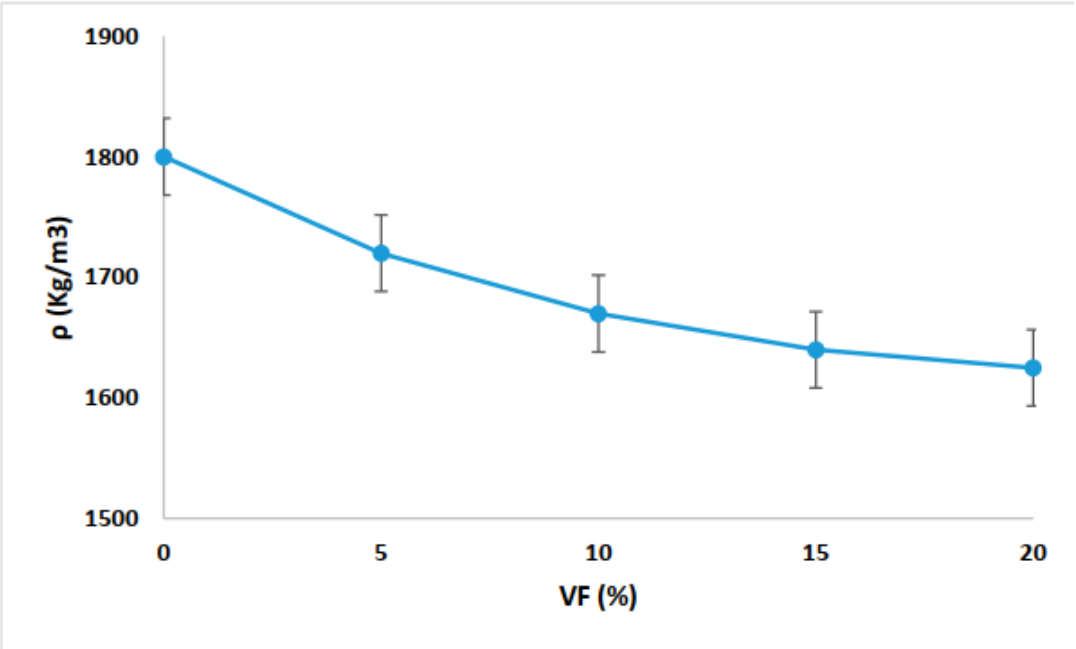


FIGURE I.11 – : Effet des fibres PO sur la masse volumique des mélanges

Omrane Benjeddou et al. ont examiné la variation de la conductivité thermique des composite de ciment renforcé par des fibres de Posidonia oceanica (PO). Les résultats indiquent que l'incorporation de fibres de PO a considérablement réduit la conductivité thermique des différents mélanges (Figure I.12) de $0{,}735 W.m^{-1}.K^{-1}$ à $0{,}572 W.m^{-1}.K^{-1}$. Pour les pourcentages de remplacement de 5%, 10%, 15% et 20%, les réductions de la conductivité thermique étaient de 11%, 15%, 19,7% et 22,17% par rapport aux échantillons de contrôle (0% de fibres).

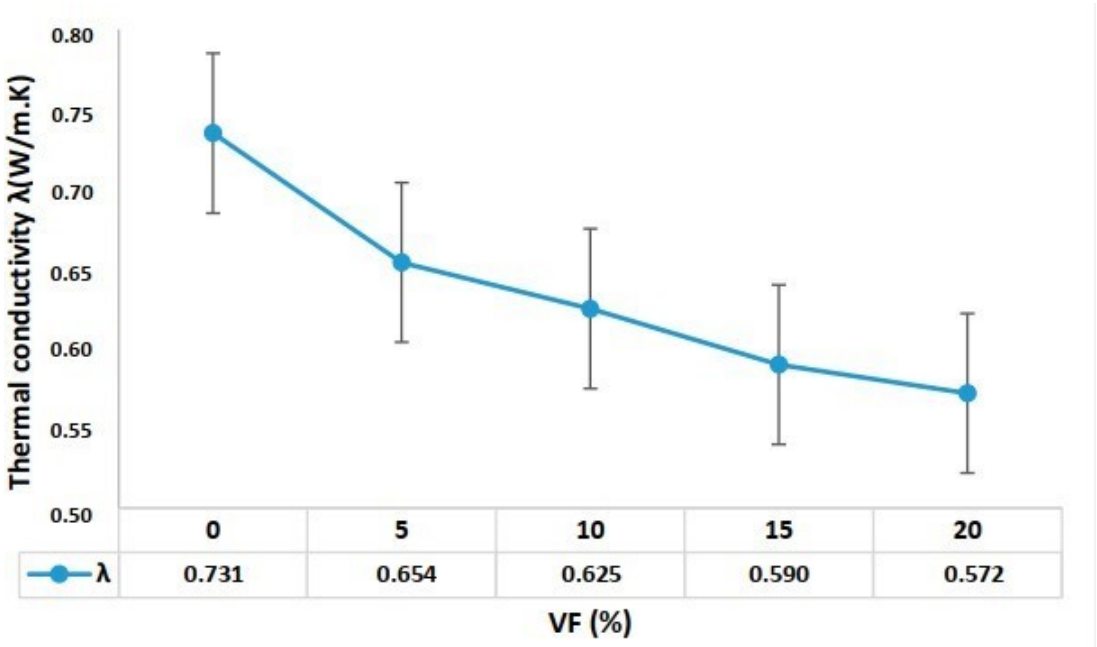


FIGURE I.12 – Effet des fibres PO sur la conductivité thermique des mélanges

I.8.3 Effet du traitement chimique des fibres sur la masse volumique et sur la conductivité thermique des matériaux

Ons hamdaoui et al. [30] ont montré que le traitement chimique avec de l'hydroxyde de sodium n'a pas d'impact significatif sur la masse volumique et la conductivité des composites.

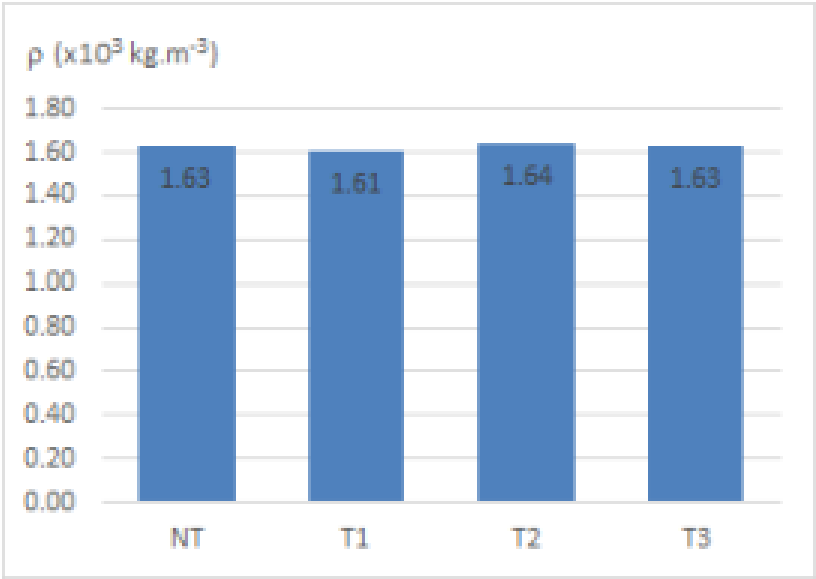


FIGURE I.13 – Variation de la masse volumique des échantillons en fonction de la fraction volumique des fibres [30]

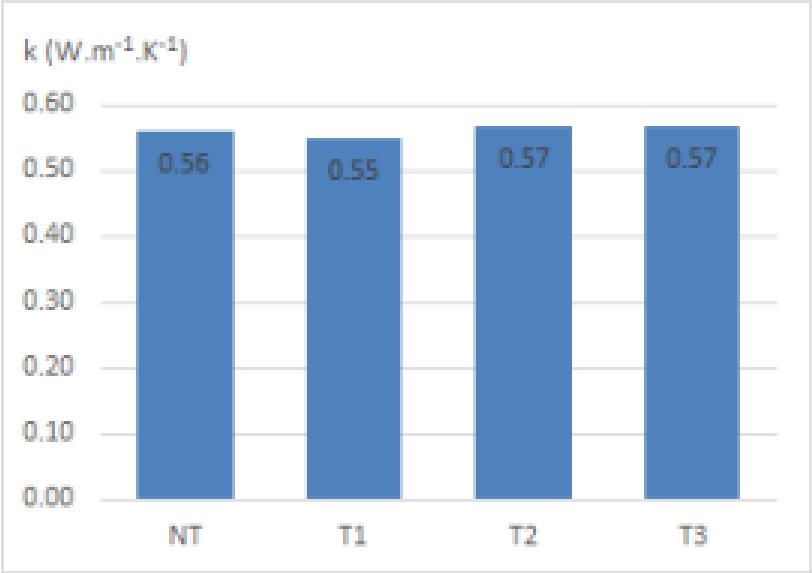


FIGURE I.14 – Variation de la conductivité thermique des échantillons en fonction de la fraction volumique des fibres[30]

I.8.4 L'effet de l'ajout des fibres de bois et de posidonie au ciment sur la résistance à l'eau et au feu

L'objectif de cette étude est d'évaluer et de comparer les performances des panneaux de ciment incorporant des fibres provenant de l'herbier marin Posidonia oceanica et des particules de bois de pin (Pinus).

Les résultats indiquent que les panneaux de ciment intégrant des herbiers marins démontrent des performances supérieures en termes de résistance à l'eau et de résistance aux flammes. Une analyse microstructurale approfondie réalisée à l'aide de la tomodensitométrie à rayons X et de la microscopie à lumière réfléchie 3D a révélé une distribution plus uniforme du ciment et des fibres dans ces panneaux. Les fibres issues d'herbiers marins démontrent une compatibilité chimique et physique supérieure par rapport aux particules de bois. [31]

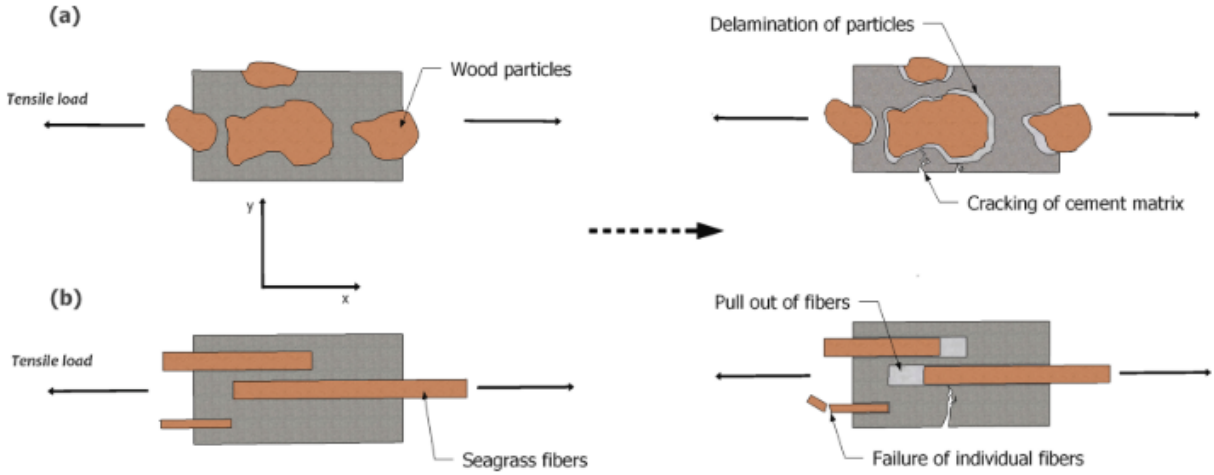


FIGURE I.15 – Le mécanisme de rupture est corrélé à la contrainte de traction appliquée lors de la flexion de (a) panneaux [31]

I.9 Matériau à base des fibres et matrice d'adobe

I.9.1 L'influence des fibres sur l'absorption d'eau

Une étude a été menée sur l'incorporation des fibres de Posidonia oceanica en tant que renfort dans des échantillons d'adobe. Étant donné que les fibres de paille sont fréquemment utilisées comme additif dans la construction en terre, elles ont été choisies comme point de référence pour cette comparaison. Le phénomène de retrait semble être directement lié à la présence de fibres dans les briques ainsi qu'à leur capacité d'absorption d'eau. Les adobes fabriqués à partir de paille ont montré un niveau de rétraction inférieur à ceux fabriqués à partir de joncs de mer, probablement en raison de la capacité des fibres à absorber moins d'eau pendant les premières heures de séchage. [32]

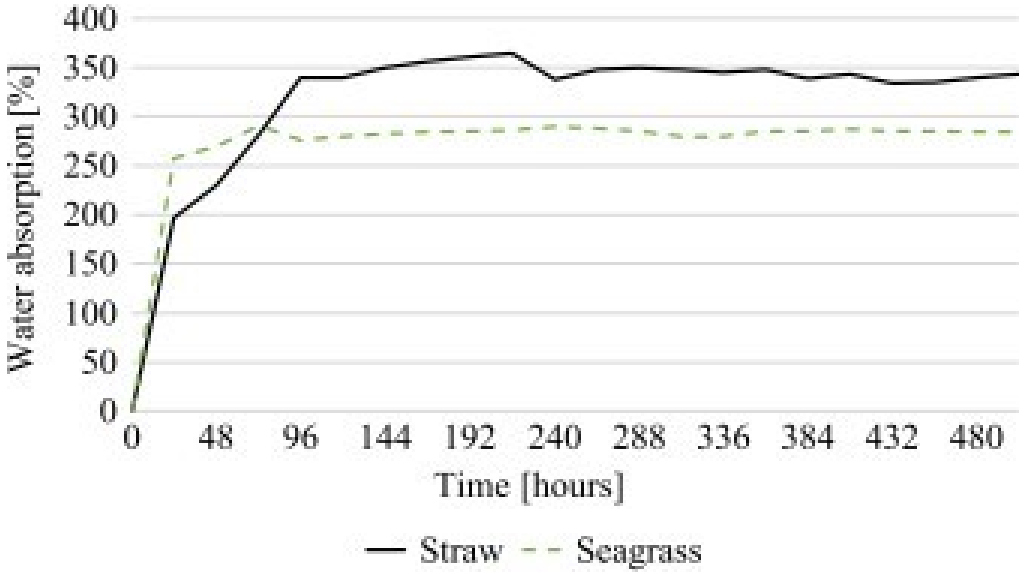


FIGURE I.16 – Absorption d'eau des fibres naturelles de paille et d'herbes marines (valeurs moyennes de trois répétitions)[32]

I.9.2 L'influence de longueur de fibres sur la conductivité thermique

En ce qui concerne les performances thermiques des pièces en terre, l'ajout de fibres supplémentaires, en particulier celles de longueurs plus importantes, entraîne une réduction de la densité et donc une amélioration globale de la conductivité thermique. Du fait que les fibres de paille sont généralement plus légères que celles provenant des joncs de mer, les éléments en terre crue renforcés de fibres de paille présentent de meilleures capacités d'isolation thermique que leurs équivalents renforcés de joncs de mer. [32]

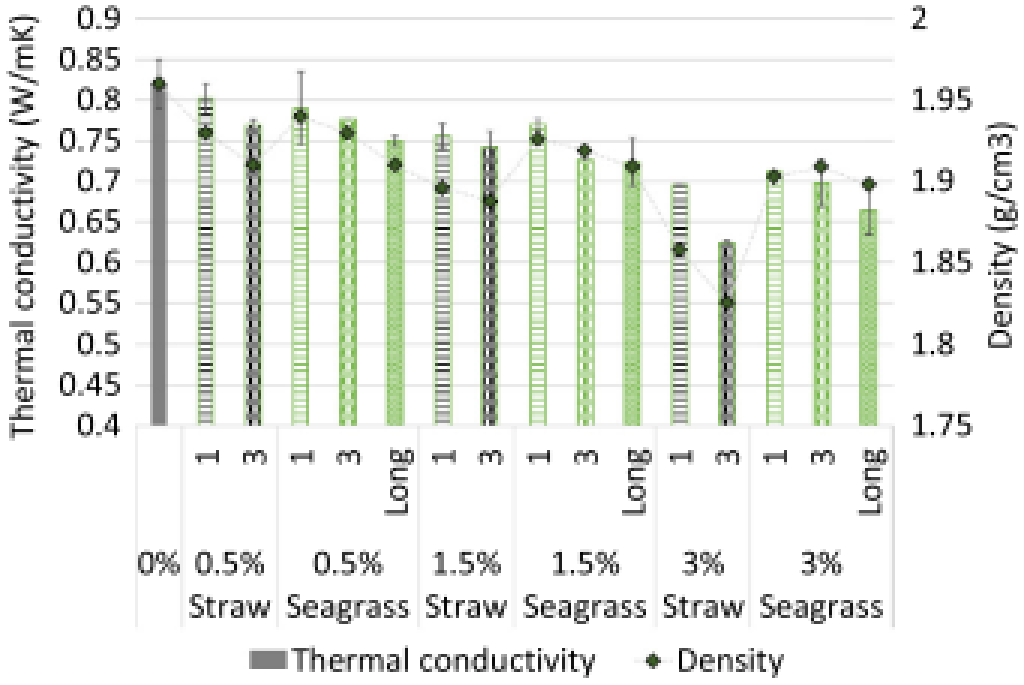


FIGURE I.17 – Conductivité thermique (et son écart type) et masse volumique des échantillons. Les barres noires indiquent la paille, tandis que les vertes indiquent les herbiers marins[32]

I.10 Matériau à base des fibres et matrice de chaux

I.10.1 L'influence de traitement des fibres sur l'adhérence de la matrice

Cette étude vise à améliorer les propriétés des mortiers de chaux traditionnels en intégrant des fibres végétales marines issues de Posidonia Oceanica (PO). Ces fibres sont soumises à des traitements de surface alcalins et hydrothermaux. Pour les compositions de chaux des fibres traitées hydro-thermiquement, on observe une augmentation de l'ouvrabilité, ainsi qu'une amélioration de la plupart des autres propriétés fraîches enregistrées (teneur en air, rétention d'eau, durée d'ouvrabilité) par rapport aux mélanges de référence. L'adhérence de ces fibres à la matrice de chaux a été améliorée, le traitement alcalin s'avère plus agressif pour les fibres de Posidonia oceanica comparativement au traitement hydro-thermique. [33]

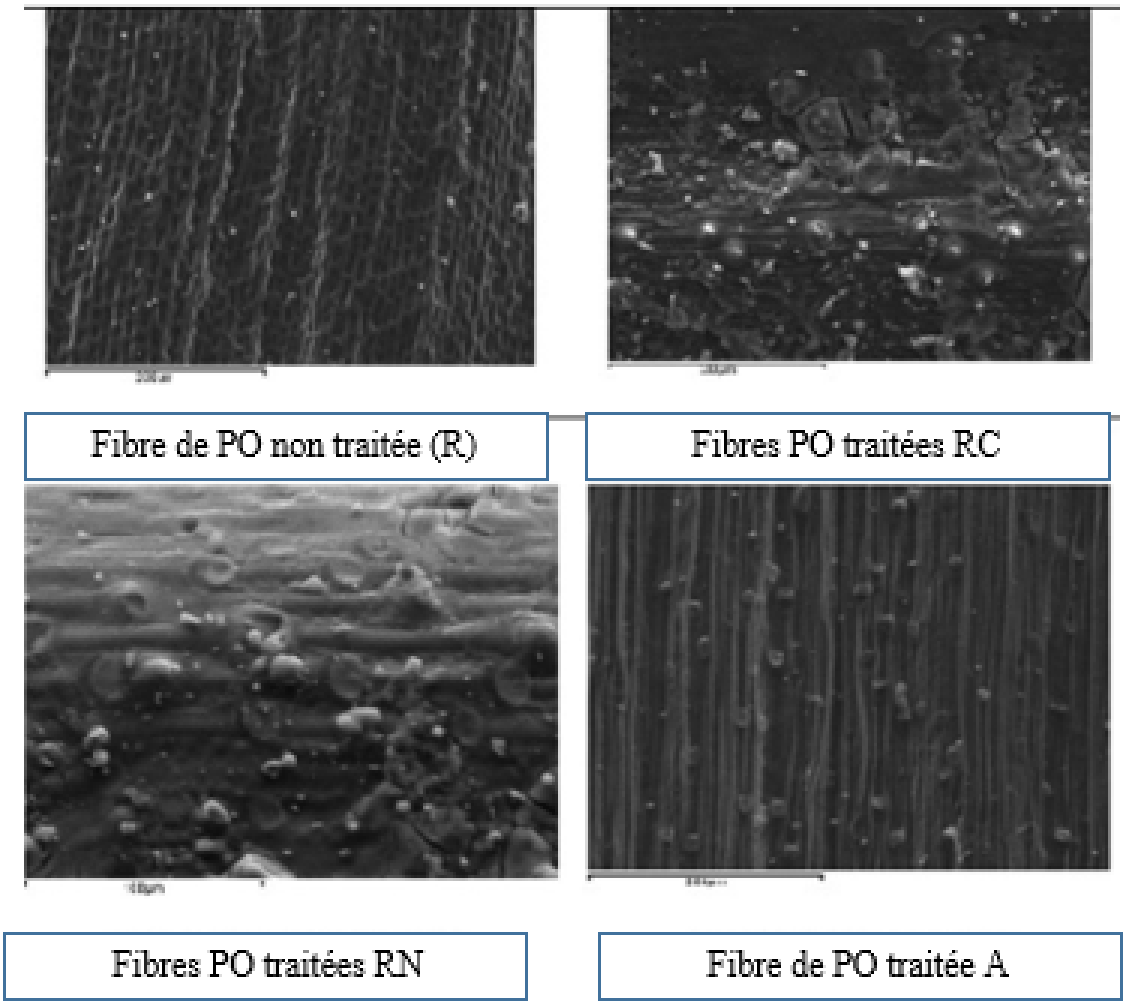


FIGURE I.18 – Micrographies SEM de fibres PO montrant les changements de surface après traitement[33]

I.11 Matériau à base des fibres et matrice de plâtre

I.11.1 Effet de l'ajout de fibres de posidonie sur la matrice de plâtre

Cette étude évalue les propriétés mécaniques, notamment la flexion, la compression et la résistance aux chocs, ainsi que la dureté, des composites de plâtre composés de fibres d'herbier méditerranéen (Posidonia oceanica) et de bois de pin (Pinus Sylvestris).

La résistance aux chocs des composites d'herbiers marins était 57% supérieure à celle du plâtre non renforcé.

L'incorporation de fibres de 1 à 6% en poids dans la matrice de plâtre a entraîné une réduction

de la masse volumique de 5% et a rendu le matériau plus résistant thermiquement. [34]

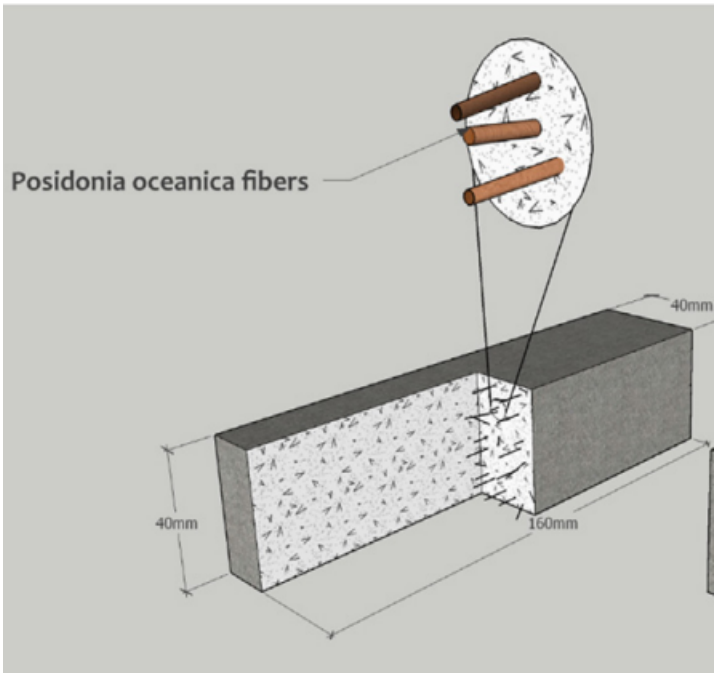


FIGURE I.19 – Micrographies SEM de fibres PO montrant les changements de surface après traitement[34]

I.12 Matériau à base des fibres et matrice géo-polymères

I.12.1 Effet de l'ajout de fibres de posidonie sur la résistance au feu et à l'eau

Des panneaux de fibres liés à des géo-polymères ont été fabriqués en utilisant jusqu'à 50% en poids de fibres d'herbe marine ou de bois.
Les grosses fibres d'herbe marine ont été correctement mélangées avec la matrice de liant minéral pour former des panneaux de fibres solides répondant aux exigences standard pour les panneaux de ciment. Plus spécifiquement, les panneaux de fibres à base d'herbe marine présentent une résistance à la flexion jusqu'à 42% supérieure (jusqu'à 9, 4MPa) par rapport aux panneaux de fibres composés de fibres de bois. De plus, leur faible gonflement en épaisseur et leur faible taux moyen de dégagement de chaleur dans un calorimètre à cône (variant de 21,5 à 26,6 kWm^2) indiquaient une grande résistance à l'eau et au feu. [19]

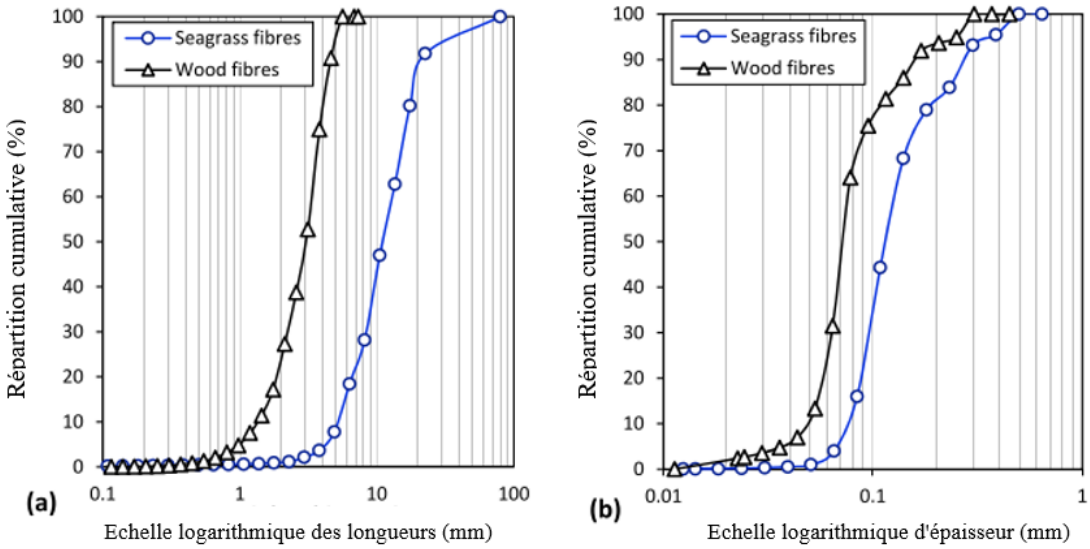


FIGURE I.20 – Répartition cumulative de la longueur (a) et de l'épaisseur (b) des fibres pour les fibres d'herbiers marins et de bois[19]

I.13 Caractéristique thermique de la plante de posidonie

Hamdaoui et al ont examiné les propriétés thermiques des fibres de Posidonia ainsi que l'effet du traitement chimique de ces fibres sur leurs propriétés. L'objectif était de les utiliser comme matériau isolant pour les bâtiments. Les résultats ont été encourageants, montrant des performances comparables voire supérieures aux isolants traditionnels. Voici les résultats obtenus :

I.13.1 L'influence de traitement chimique à la soude sur la masse volumique et la conductivité thermique

L'immersion des fibres dans une solution de soude caustique, n'entraîne pas de changements significatifs dans la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique des échantillons de fibres.[35]

TABLE I.4 – Coefficients de conductivité thermique en fonction de l'équation de densité (Eq.1) avec leurs incertitudes statistiques[35]

Matériel	a (Wm^{-1} K^{-1})	b (W m^2 kg^{-1} K^{-1})	c (W kg m^{-4} K^{-1})
Fibres non traité	0.030 ± 0.021	3.7×10^{-4} ± $1{,}6\times10^{-4}$	0,16 ± 0,44
Fibres traité T_1	0.039 ± 0.014	1.7×10^{-4} ± $1{,}1\times10^{-4}$	0,05 ± 0,29
Fibres traité T_2	0.039 ± 0.014	1.7×10^{-4} ± $1{,}1\times10^{-4}$	0,05 ± 0,29
Fibres traité T_2	0.037 ± 0.021	1.1×10^{-4} ± $1{,}6\times10^{-4}$	0,12 ± 0,43

Le paramètre b est lié au transfert conducteur dans la phase solide. Le paramètre c associé à la partie radiative présente également une variation considérable avec des erreurs d'intervalle considérables. [35]

I.13.2 Conductivité thermique en fonction de la masse volumique de Posidonia Oceanica et des matériaux d'isolation thermique courants

Les propriétés de la Posidonia Oceanica sont similaires à celles de la laine de roche, du polystyrène extrudé (EPS XPS), du polyuréthane avec pentane, du liège expansé, des fibres de polyester et des panneaux de fibres de bois. Les valeurs B sont proches de celles du verre cellulaire, de la fibre de cellulose, du polyester, des panneaux de perlite expansée et des panneaux de copeaux de bois. Les valeurs C sont comparables à celles de la laine de verre et du coton.[35]

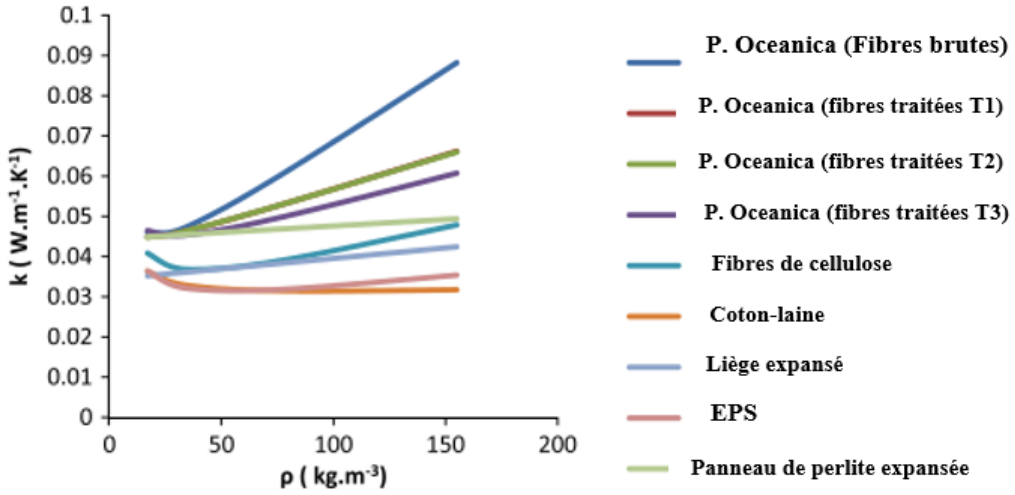


FIGURE I.21 – Conductivité thermique en fonction de la densité de Posidonia Oceanica et des matériaux d'isolation thermique courants

I.13.3 Diffusivité thermique des fibres de posidonie

Les diffusivités thermiques de la Posidonia Oceanica, qu'elle soit traitée ou non, avec des densités variant de $60 kg/m^3$ à $155 kg/m^3$, se situent entre 0,28 $10^{-6} m^2/s$et0, 52 $10^{-6} m^2/s$. [35]

TABLE I.5 – Les valeurs expérimentales de la diffusivité thermique (a) [35]

	NT	T1	T2	T3	
$\rho(kgm^{-3})$					
	155	0.32	0.32	0.30	0.44
	93	0.29	0.42	0.35	0.49
	60	0.54	0.45	0.48	0.65
	38	0.81	0.61	0.64	0.56
	27	0.90	0.88	0.86	0.60
	17	1.02	1.06	1.05	0.85

I.13.4 Chaleur spécifique des fibres de posidonie

Les valeurs expérimentales des capacités thermiques (C_p) des fibres, qu'elles soient traitées ou non, varient de 2169J/kgK à 2533J/kgK. Ces fibres pourraient être considérées comme un matériau isolant intéressant en raison de leurs valeurs C_p relativement élevées. [35]

TABLE I.6 – Chaleur spécifique de fibres de posidonie

	NT	T1	T2	T3
C_p (J kg^{-1} K^{-1})	2174	2169	2188	2533

I.14 L'utilisation des liants naturels avec des fibres pour les matériaux de construction

I.14.1 L'effet de quantité de liant sur la conductivité thermique des matériaux à base de fibres naturel

Une étude est menée pour examiner l'effet de la quantité d'amidon de pomme de terre sur la conductivité thermique des aiguilles de conifères. Deux variables sont considérées : le pourcentage de liant et le type d'espèce de conifère.
L'étude expérimentale démontre qu'une grande quantité d'amidon de pomme de terre ajoutée aux fibres de conifères à un impact négatif sur la conductivité thermique. Cependant, une petite quantité, qui assure une stabilité physique des matériaux, sera meilleure pour garantir une bonne isolation thermique. [36]

TABLE I.7 – Conductivité thermique de matériaux à base des aiguilles de conifère et l'amidon de pomme de terre [36]

Pourcentage liant/ fibres	Conductivité thermique $W.(m.k)^{-1}$	Pourcentage liant aiguilles de pin	Conductivité thermique $W.(m.k)^{-1}$
1/2 (avec aiguilles de pin)	0.0549	1/1 (avec aiguilles de sapin)	0.0478
1/2(avec aiguilles de sapin)	0.0495	1/1 (avec aiguilles de pin)	0.0508
1/1(avec aiguilles de sapin)	0.0513	3/1 (avec aiguilles de pin)	0.0543
1/1(avec aiguilles de pin)	0.0496	3/1(avec aiguilles de sapin)	0.0497
1/1.5 (avec aiguilles de pin et sapin)	0.0551	2/1 (avec aiguilles de pin et sapin)	0.0513

I.14.2 Influence du taux d'amidon sur les propriétés physiques, mécaniques et hygrothermiques

Une étude sur l'influence du taux d'amidon et de la taille du chanvre sur les propriétés physiques, mécaniques et hygrothermiques ait été menée. Les résultats suggèrent que lorsque le rapport chanvre/amidon de blé augmente, les caractéristiques mécaniques et hygro-thermiques diminuent légèrement. En conclusion, l'agro matériau chanvre-amidon avec un rapport chanvre/amidon de blé égal à 8 et 30% d'ananas de chanvre de 0 à 5 mm semble être la composition optimale parmi les échantillons étudiés. [37]

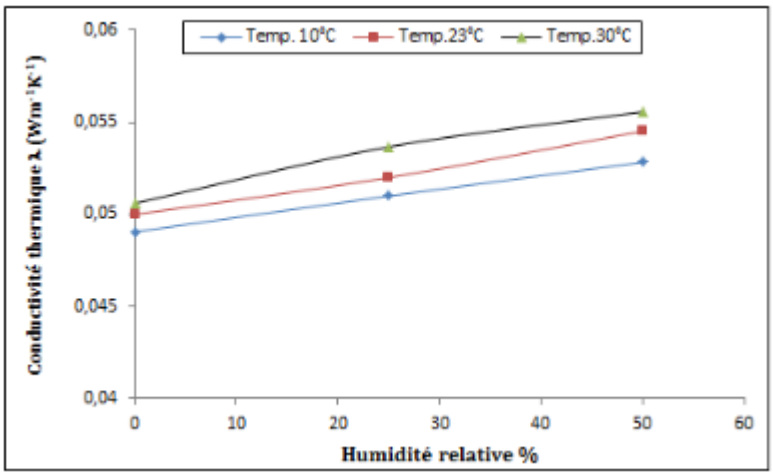


FIGURE I.22 – Evolution de la conductivité thermique du chanvre-amidon brut en fonction de l'humidité [37]

TABLE I.8 – Des propriétés de l'échantillon : Densité, capacité thermique spécifique Cp, effusivité thermique b, diffusivité a et conductivité à 23°C [37]

Échantillons	**Densité**	C_p **(J/kg·K)**	B **(J/m^2·K·s$^{1/2}$)**	**A (10^{-7} m^2/s)**	λ **(W/m·K)**
HS8-1	134	1281	112.6	4.30	0.0738
HS8-2	141	1288	108.9	3.60	0.0653
HS10-1	126	1279	103.7	4.14	0.0667
HS10-2	143	1264	107.0	3.51	0.0634
chanvre 0-5 mm	135	1276	90.9	2.79	0.0480
chanvre 0-20 mm	110	1272	82.2	3.34	0.0480
Gel d'amidon de blé (chips)	922	1381	421.6	1.10	0.1396

I.14.3 L'influence de liant d'amidon sur les propriétés hygroscopiques des matériaux à base de chanvre et d'amidon

Cette étude vise à développer, optimiser et caractériser un matériau agricole à base de chènevotte défibrée, en utilisant de l'amidon de blé comme liant.

Le matériau chanvre-amidon présente une capacité remarquable à réguler l'humidité relative

de l'air ambiant. En effet, l'amidon étant très hydrophile l'amidon est capable d'absorber l'eau provenant de l'atmosphère environnante, ce qui confère au matériau chanvre-amidon une forte hygroscopicité. [38]

I.14.4 Conductivité thermique de matériau composé de fibre de surface des palmiers dattiers et liant de fécule de maïs

Une analyse de la thermique et de la microstructure des fibres de surface dupalmier dattier suggère qu'elles pourraient être exploitées comme un nouveau matériau d'isolation pour les bâtiments. Pour lier ces fibres, on utilise la fécule de maïs comme résine, offrant ainsi un matériau isolant entièrement naturel. La conductivité thermique de ce matériau isolant est mesurée pour quatre densités différentes, montrant des valeurs minimales et maximales respectives de 0, 0475 et 0, 0697 W/mK. [39]

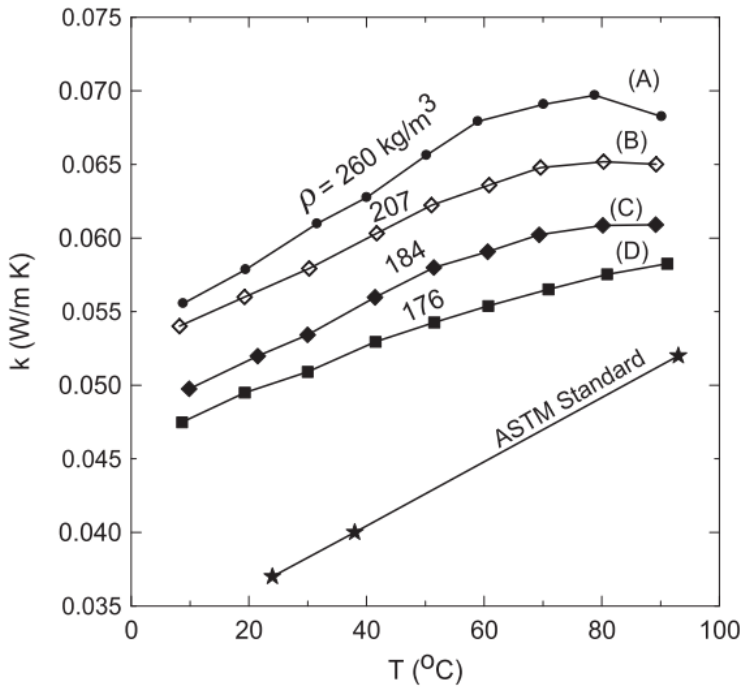


FIGURE I.23 – Profils de conductivité thermique pour des échantillons de différentes densités par rapport à la norme ASTM.[39]

I.14.5 Conductivité thermique de matériau composé de sous-produits du raisin/amidon

Cette recherche se concentre sur le développement de matériaux isolants innovants à partir de sous-produits de l'industrie viticole et de la fécule de pomme de terre. Quatre types de granulats

ont été individuellement employés : les marcs de raisin, les rafles, les pellicules et les rafles broyées. Le ratio massique entre l'amidon et le granulat a été fixé à 20% d'amidon.
Le rapport massique amidon/granulat a été fixé à 20% d'amidon. La conductivité thermique des différents composites s'est avérée être d'environ 0, 075W/(mK). Les composites élaborés à partir de sous-produits du raisin et d'amidon semblent présenter des performances thermiques, mécaniques et acoustiques satisfaisantes, les rendant ainsi adaptés à une utilisation comme matériaux d'isolation dans la construction de bâtiments publics. [27]

TABLE I.9 – Conductivité thermique des composites avec 20% de liant [27]

Composites	λ **(W/m·K)**
A/P	0.0793 ± 0.0033
A/GP	0.0759 ± 0.0067
A/S	0.0692 ± 0.0039
A/CS	0.0776 ± 0.0015

Les granulats utilisés pour la formation des composites étaient : le marc de raisin entier (GP), les rafles (S), les pellicules (P), les rafles broyées (CS) et l'amidon (A). Les formulations utilisées étaient A/GP ; COMME ; A/P et A/CS avec 20% d'amidon.

I.15 Conclusion

L'incorporation de fibres de posidonie dans différentes matrices entraîne une réduction de leur densité, et par conséquent de leur conductivité thermique, rendant ainsi le matériau plus isolant. De plus, les fibres améliorent la résistance à l'eau et au feu du ciment.
Le traitement chimique des fibres n'a pas montré d'améliorations significatives de leurs performances. Les études sur les propriétés thermiques des fibres brutes ont néanmoins donné des résultats remarquables.
Les liants à base d'amidon sont largement utilisés dans les matériaux de construction, notamment pour les isolants thermiques. L'amidon rend le matériau plus léger, réduit sa densité et améliore ses performances thermiques et hygrothermiques lorsqu'il est utilisé en petites quantités. Notre objectif dans cette étude est la conception d'un matériau 100% écologique et non structurel, présentant une faible densité et une meilleure isolation thermique, ainsi que des propriétés hygrothermiques acceptables. Notre réflexion s'est concentrée sur l'utilisation de fibres de

posidonie avec un liant à base d'amidon. Une série d'essais expérimentaux et de simulations dynamiques sera réalisée afin d'évaluer les qualités des matériaux et leur potentiel d'utilisation comme isolants dans les bâtiments.

CHAPITRE II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPERIMENTALE

II.1 Introduction

Dans cette thèse, notre objectif est d'évaluer le potentiel des fibres de Posidonia oceanica en tant que matériau isolant. Ces isolants seraient destinés à être utilisés en tant qu'isolants extérieurs ou intérieurs pour renforcer les parois. Dans cette configuration, leur fonction principale serait de limiter le transfert de chaleur à travers la paroi.
Ce Chapitre aborde initialement les matériaux employés dans notre recherche ainsi que leurs caractéristiques respectives. Ensuite, nous décrivons les procédures de préparation des échantillons de fibres, ainsi que les principales méthodes expérimentales utilisées pour leur caractérisation.

II.2 Répartition géographique de l'herbier de posidonie Oceania

Les herbiers de Posidonia oceanica constituent des formations emblématiques du littoral méditerranéen, étant strictement limités à cette mer et couvrant une superficie estimée entre 25000 et 50000 km2, soit environ 1 à 2% des fonds marins de la Méditerranée. [40]
La distribution géographique de la phanérogame marine Posidonia oceanica est principalement limitée à la mer Méditerranée, où elle est endémique. Elle colonise les côtes européennes, notamment la France, la Corse, la Sardaigne, l'Italie, la Yougoslavie, la Grèce et la Turquie, ainsi que les côtes nord-africaines, comprenant l'Égypte, la Libye, la Tunisie et l'Algérie. [41, 42]
Sa présence est plus marquée dans la partie occidentale de la Méditerranée que dans sa partie orientale, bien qu'elle soit absente de la Mer de Marmara, du Bosphore et de la Mer Noire. Elle est également absente près de Gibraltar et à l'embouchure des grands fleuves tels que le Rhône, le Pô et le Nil, en raison des fortes variations de salinité, de la faible disponibilité en lumière et de la turbidité [43] (voir figure II.1)



FIGURE II.1 – Répartition de Posidonia oceanica le long des côtes méditerranéennes .[43]

En Algérie Selon les informations limitées disponibles, le long de la côte sud de la Méditerranée, la limite orientale des prairies de P. Oceanica était située en Algérie, où elles couvraient 4 072 ha, mais la répartition détaillée reste largement inconnue. [15]

II.3 Lamorphologie

La posidonie est une plante à fleurs sous-marine de la méditerranée [44, 45], elle est constituée par :

II.3.1 Feuilles

Les feuilles sont d'un vert sombre très caractéristique disposées par 4 à 8 en faisceaux, longues normalement de 20 à 80 cm mais pouvant atteindre plus d'un mètre, de nouvelles feuilles se forment toute l'année. Elles vivent entre cinq et huit mois, plus rarement jusqu'à 13 mois [44, 46, 47]. A leur mort, les feuilles ne se détachent pas en totalité, on lui donne alors le nom d'écaille. La chute des feuilles, comme leur formation, se produit tout au long de l'année. Leaf [48]

II.3.2 Rhizome

Le rhizome est une tige rampante ou dressée, généralement enfouie dans le sédiment [49], Il porte des racines qui peuvent descendre jusqu'à 70 cm dans le sédiment [50]. L'enchevêtrement

du rhizome joue un rôle dans la fixation de la plante dans le fond sablonneux. [42]

II.3.3 Fleurs

La floraison de Posidonia oceanica se produit en automne, les fleurs sont hermaphrodites et sont regroupées (4 à 10 fleurs). La floraison ne se produit pas tous les ans, surtout dans les eaux relativement froides du nord de la méditerranée occidentale. [51, 52]

II.3.4 Fruits

La fécondation donne naissance à des fruits (voir Figure II.2) qui se détachent de la plante à la maturité.
Au printemps, ces fruits ont la forme et la dimension d'une olive ; leur couleur est vert foncé puis brun foncé à noir. Ces fruits flottent selon l'orientation des courants. Ils s'échouent sur les plages ou ils s'ouvrent libérant, la graine qui coulera vers le fond, où elle germera si les conditions du substrat sont favorables. [45, 53]

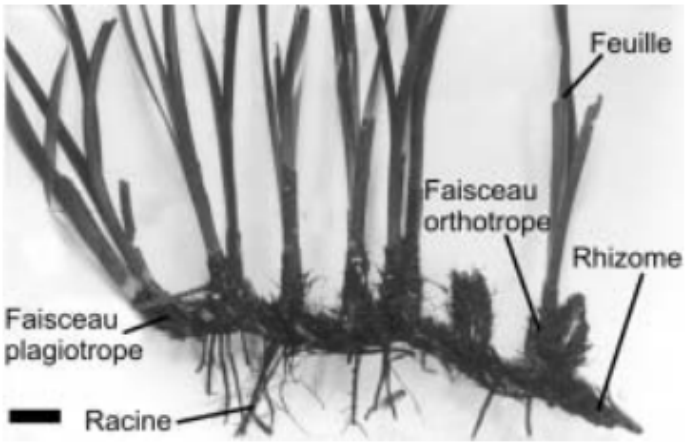


FIGURE II.2 – Un rhizome plagiotrope de Posidonia oceanica[49]

II.4 Composition chimique de posidonie

La composition chimique des principaux composants de la fibre de Posidonie est illustrée dans le Tableau II.1. La fibre est principalement composée d'holocelluloses, qui comprennent la cellulose et les hémicelluloses, constituant ainsi le composant majeur. Le reste de la fibre comprend une faible teneur en graisses et en cires. [54]

TABLE II.1 – Composition chimique des fibres de posidonie [54]

Composant	**Taux (%)**
Cellulose	48.39
Hémicellulose	18.91
Holocellulose	67.3
Lignine	23.12
Pectine	4.78
Graisse et cires	4.8

II.4.1 Pourcentage des fibres et des liants pour une conductivité thermique optimale

Tableau II.2 : fournit un résumé concis de la composition des fibres végétales et des liants utilisés dans les matériaux d'isolation. En se référant à ce tableau, on remarque que la composition fibre-amidon donne des résultats de conductivité thermique plus favorables, même avec des pourcentages faibles, par rapport à d'autres liants.

TABLE II.2 – La synthèse de la composition des fibres végétales et des liants dans les matériaux d'isolation [54]

Fibres	liant	pourcentage	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Références
PO	Ciment	Po = 0–20%	0.0559–0.0778	[33]
PO et paille	Adobe	Adobe Po = 0.5–1.5–3%	0.63–0.83	[32]
aiguilles de conifères	Amidon de pomme de terre		0.0478–0.0524	[36]
Chanvre	Amidon de blé	C/A 0.14–0.16 –0.19–0.21–0.24 –0.27–0.31–0.38	0.05	[38]
Sous-produits de l'industrie vitivinicole	Amidon de Pomme de terre	Amidon / Agrégat 20%	0.075	[27]
po	Plâtre	PO=0-20%	0.35 -0.11	[55]

II.4.2 La composition chimique d'amidon

L'amidon se compose généralement de 26 à 28% d'amylose, de 72 à 74% d'amylopectine, avec des traces de lipides (0.63%) et de protéines (0.3%), et un taux d'humidité compris entre 12% et 13%. [28]

Dans le cadre de nos recherches, nous avons opté pour l'utilisation d'amidon de maïs en raison de sa disponibilité répandue en Algérie et de son coût modéré.

TABLE II.3 – Composition des différentes sources d'amidon. [28]

Source d'Amidon	Amylose (%)	Amylopectine (%)	Lipides (%)	Protéines (%)	Taux d'humidité (%)
Maïs	26-28	72-74	0.63	0.3	12-13
Maïs Cireux	1	99	0.23	0.1	-
Blé	26-27	73-74	0.63	0.3	13
Pomme de terre	20-25	75-80	0.03	0.05	18-19

II.5 Extraction des fibres

Les feuilles de Posidonie ont été ramassées sur la plage de Hadjret El nos dans la wilaya de Tipaza. Après le rinçage des feuilles et l'élimination des particules de sable, les fibres ont été isolées mécaniquement dans le but d'obtenir des fibres légères pour leur utilisation dans la fabrication de matériaux. Ces fibres ont ensuite été séchées et conservées dans le laboratoire à température ambiante figure II.3.



FIGURE II.3 – Fibre de posidonie

II.6 Microscopie électronique à balayage

(MEB) est une technique fondée sur les interactions entre les électrons et la matière, permettant l'acquisition d'images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Lorsque qu'un faisceau d'électrons est dirigé vers la surface de l'échantillon, cela provoque l'émission d'un spectre de particules sous forme de rayonnements, comprenant des électrons secondaires, des électrons rétrodiffusés et des rayons X. L'analyse de ces différents rayonnements fournit des informations détaillées sur la composition et la structure de l'échantillon.
Les échantillons ont été sciés en morceaux pour l'introduire dans le MEB.



FIGURE II.4 – Microscope électronique à balayage

II.7 Microstructure de matériaux

La microscopie électronique à balayage a été utilisée afin de savoir l'homogénéité des fibres avec le liant. Quelques images sont présentées sur la figure.
Les résultats de la microscopie électronique à balayage sont illustrés dans les Figure II.4, où il est possible d'observer que les fibres sont dispersées dans tout le matériau, tandis que l'adhésif garantit leur adhérence. En raison du faible pourcentage d'adhésif utilisé et de l'arrangement des fibres dans le matériau, des pores vides sont présents (Figure II.5), qui sont considérés comme des espaces permettant de piéger la chaleur

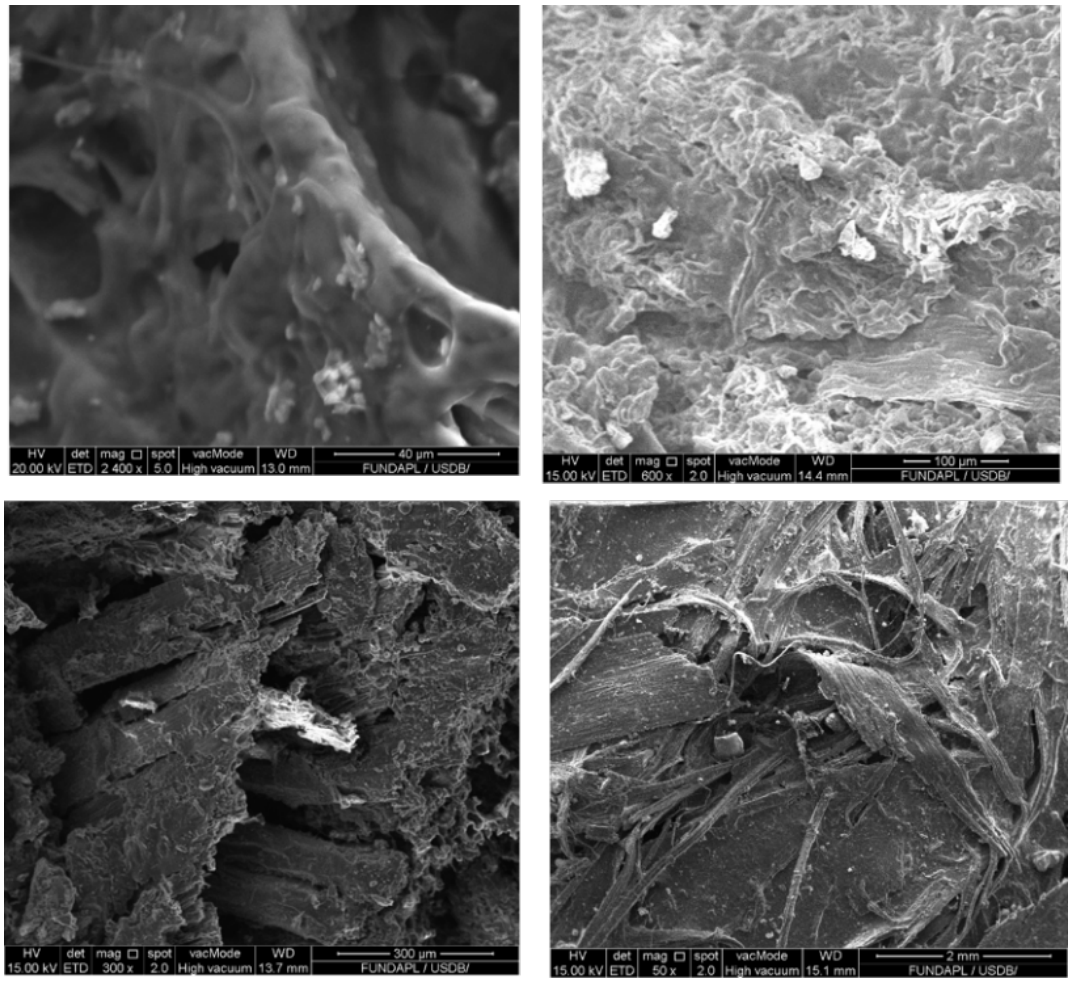


FIGURE II.5 – Micrographies SEM de fibres po montrant les changements de surface après traitement

II.8 Préparation des échantillons de fibre

1. Les fibres ont été collectées sur les plages de Tipaza (Hadjret Nos à Cherchel) et ont subi un processus de préparation méticuleux.
2. Après un rinçage initial, les fibres ont été séchées à l'air libre jusqu'à atteindre un niveau de séchage approprié. Ensuite, elles ont été mécaniquement broyées pour obtenir des fibres d'une longueur comprise entre 2et 5 cm.
3. Le liant nécessaire à la fabrication a été produit en mélangeant de l'amidon et de l'eau, avec un ratio eau/amidon fixé à 0,15. Des différentes fractions volumiques de renforts ont été testées, à savoir 15%, 20%, 25% et 30%.
4. Le mélange final a été coulé dans des moules de dimensions 10*15*4 cm3 (voir Figure II.6) pour les mesures thermiques. Trois échantillons ont été préparés pour chaque série. Après

séchage, les échantillons ont été démoulés et conservés au laboratoire jusqu'à stabilisation de leur masse, en vue des analyses ultérieures.



FIGURE II.6 – Préparation des échantillons

II.9 Préparation de liant

Voici les étapes détaillées pour la préparation du liant à base d'amidon de maïs :

1. Dans un premier temps, pour chaque 150 g d'amidon de maïs, ajoutez 100ml d'eau. Agitez le mélange et laissez reposer pendant 30 minutes.
2. Dans une casserole, versez le reste de l'eau (750 ml) et faites chauffer jusqu'à épaississement.
3. Avant que l'eau ne soit complètement épaissie, remuez à nouveau le mélange eau-amidon.
4. Versez lentement le mélange d'eau et d'amidon épaissi dans la casserole contenant le reste de l'eau chauffée, en continuant de remuer.
5. Laissez cuire le mélange tout en remuant constamment.
6. Retirez la casserole du feu et laissez le mélange refroidir. Une fois refroidi, vous pouvez ajouter quelques gouttes d'extrait d'amande amère pour fumer le liant, selon vos préférences.



FIGURE II.7 – Préparation de liant à base d'amidon



FIGURE II.8 – Malaxage des fibres avec liant



FIGURE II.9 – Matériau isolant à base des fibres de posidonie et liant d'amidon

II.10 Principe de mesure de conductivité thermique méthode de fil chaud (CT mètre)

La conductivité thermique est une caractéristique physique qui décrit la manière dont les matériaux conduisent la chaleur. Elle est définie comme la quantité de chaleur transférée à travers un matériau sous un gradient de température d'un degré par mètre carré et par seconde, laquelle est représentée par le symbole, mesurée en watts par mètre par degré Celsius (W/m°C). Cette valeur permet d'évaluer la capacité isolante de chaque matériau, avec une conductivité plus faible indiquant une meilleure isolation thermique.
Dans notre cas, la conductivité thermique des divers types de béton a été évaluée sur des échantillons mesurant 4x 15x 10 Cm à l'aide d'un CT mètre, selon la norme NF EN 993-15 [52]. Les différentes étapes de l'essai sont représentées dans la figure.
La chaleur spécifique d'un corps représente la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter sa température de 1K par unité de masse. Elle est exprimée en joules par gramme-kelvin (J/gK) ou en joules par kilogramme-kelvin (J/kgK), selon le système de mesure utilisé.
La diffusivité thermique caractérise l'inertie thermique d'un matériau, c'est- à-dire sa capacité à maintenir sa température initiale pendant une période prolongée en cas de perturbation de l'équilibre thermique. Elle mesure la « lenteur » avec laquelle le matériau atteint un nouveau point d'équilibre thermique après une perturbation.
La capacité d'un matériau à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber est défini physiologiquement sous le nom de diffusivité thermique. Ainsi, un matériau avec une faible diffusivité thermique prendra plus de temps à la chaleur pour le traverser.
Dans notre étude, nous avons utilisé l'appareil « CT MÈTRE » pour analyser et évaluer les propriétés thermiques.
Le principe de cette méthode implique la mise en place d'un élément chauffant, généralement sous la forme d'un fil, entre deux surfaces d'échantillons du matériau à caractériser. Ce fil produit un flux de chaleur sous forme d'un échelon, induisant ainsi un chauffage localisé de quelques degrés du matériau. Typiquement, cet échauffement est mesuré en un point précis à l'aide d'un thermocouple. L'analyse mathématique de cette élévation de température permet alors de déterminer la conductivité thermique du matériau. Cette méthode de mesure est considérée comme absolue.
Le CT Mètre se compose de deux éléments :

— L'unité de contrôle, responsable de la génération de la puissance de chauffage et de l'interprétation de la courbe de montée en température induite dans le matériau à tester.

— La sonde, qui transmet la puissance de chauffage et recueille la température induite.

Types de sonde utilisée :

1. Sonde anneau : Circuit imprimé souple (épaisseur 0,2 mm – dimensions 60x90 mm), conçu pour être placé entre deux morceaux plats de l'échantillon à mesurer (dont les surfaces ont été préalablement rectifiées).
2. Type ∅30.R : Diamètre de l'élément chauffant = 30 mm.
3. Type ∅15.R : diamètre de l'élément chauffant = 15 mm. Cette sonde permet de réaliser les mesures suivantes : Conductivité thermique (W/m.K), Chaleur spécifique (kJ/m3K)



FIGURE II.10 – Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique

II.11 L'absorption capillaire

Pour enquêter sur l'absorption capillaire de l'eau des échantillons (figure II.11), des spécimens de dimensions (4x4x16) cm3 ont été sélectionnés. La procédure implique de placer l'échantillon verticalement, avec une face de l'échantillon en contact avec une table d'eau maintenue à une hauteur constante et de mesurer les gains de poids de l'échantillon à des intervalles de temps définis. Les faces latérales de l'échantillon sont rendues imperméables en les revêtant d'une couche d'époxy, permettant à l'eau de suivre un chemin unidirectionnel et empêchant l'évaporation à travers ces mêmes faces selon la norme NF EN 1305758 à l'âge de 28 jours.

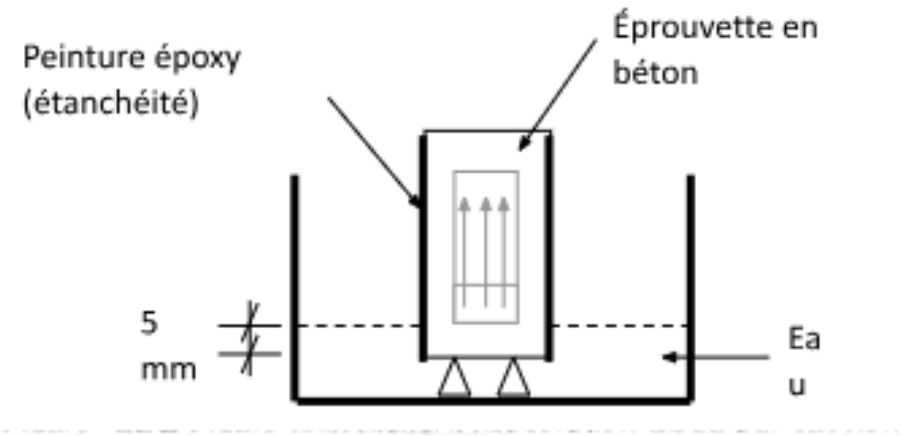


FIGURE II.11 – Absorption d'eau par succion capillaire

II.12 Résistance à la chaleur

Pour tester la résistance au feu, les échantillons ont été transportés vers un four électrique et chauffés à une vitesse constante de 10 °C/min selon trois cycles de température différents (Figure II.12), allant de 150° C à 250, 350C°. Une fois que le four électrique a atteint la cible température, elle a été maintenue constante pour assurer une répartition uniforme dans toute l'éprouvette conformément à la norme ISO 834 (ISO 1999). A la fin de chaque cycle de température de chauffage, les échantillons ont été refroidis à température ambiante.



FIGURE II.12 – Four électrique pour l'essais de résistance au feu

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les processus de préparation des échantillons ainsi que leurs propriétés microstructurales, en plus des différentes méthodes et tests utilisés pour la caractérisation thermique, microstructurale et hygrothermique. Ces méthodes comprennent la microscopie à balayage, le CT mètre, l'absorption capillaire, et la résistance au feu. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUTIONS

III.1 Introduction

Dans ce Chapitre, nous exposerons les résultats des essais expérimentaux visant à caractériser les propriétés thermiques et hygroscopiques de matériau, dans le but d'évaluer son potentiel en tant qu'isolant pour une application dite « isolation rapportée ». Cette dernière consiste à fixer les isolants sur une structure porteuse assurant la résistance mécanique du bâtiment. Leur fonction principale est de restreindre le transfert de chaleur à travers la paroi. Nous discutons les résultats de mesures expérimentales de la conductivité thermique, la densité et de la chaleur spécifique des fibres. Ces mesures sont utilisées pour estimer la diffusivité et l'effusivité thermique, également, les résultats de l'absorption capillaire du matériau sont présentés.

III.2 Propriété de matériau isolant à base de fibre et de posidonie

III.2.1 La masse volumique

La Figure III.1 présente la variation de la masse volumique du matériau en fonction de la fraction volumique de l'adhésif. Comme on peut le voir, le matériau étudié présente une masse volumique comprise entre 265 et $302 kg.m^{-3}$. Cette masse volumique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique de l'adhésif en raison de la réduction de la porosité du matériau. A mesure que la fraction volumique de l'adhésif augmente, une plus grande quantité d'adhésif est disponible pour infiltrer les espaces interstitiels et enrober les fibres individuelles. Cette liaison et cette pénétration renforcées entraînent une structure de fibres plus dense et plus étroitement liée, les fibres étant efficacement liées ensemble et remplissant les vides, réduisant ainsi la porosité globale. Par conséquent, une fraction volumique d'adhésif plus élevée conduit

à un matériau composite plus dense, augmentant ainsi sa masse volumique globale. Une étude menée par Satta Panyakaew et al. a révélé une masse volumique de $350 kg/m^3$ pour un isolant thermique fabriqué à partir de coques de noix de coco et de bagasse [56]. De plus, Aliaksandr Bakatovich et al. Ont trouvé une masse volumique de 200 à 250 kg/m^3 pour un isolant à base de paille (orge, avoine, riz, seigle, blé). [30]

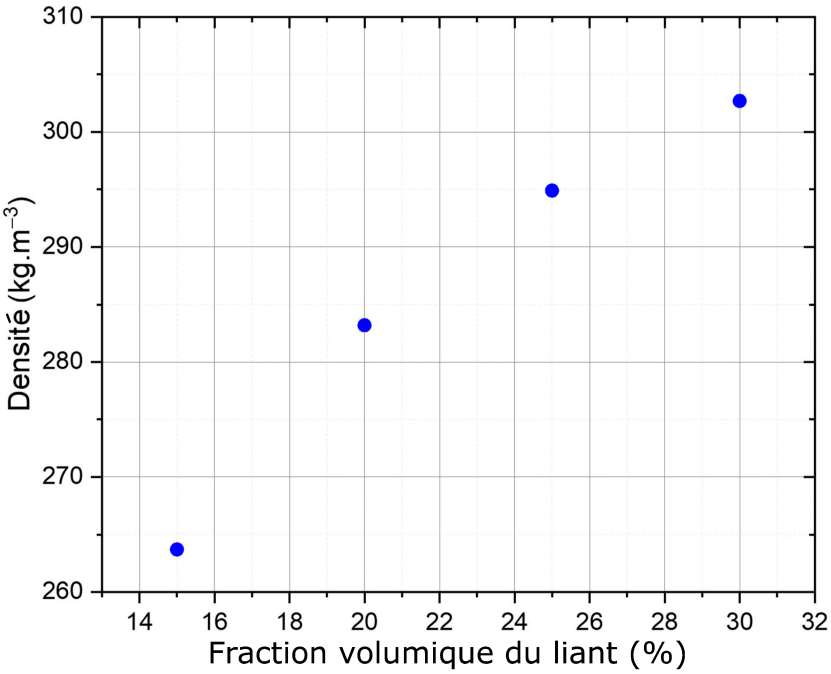


FIGURE III.1 – La masse volumique en fonction de la fraction volumique de liant

III.2.2 Conductivité thermique

Selon la Figure III.2, la conductivité thermique diminue de 0,0674 à $0,0528 W.m^{-1}K^{-1}$ pour une concentration de 15%. Les résultats obtenus indiquent qu'une augmentation de la proportion d'adhésif entraîne une augmentation de la conductivité thermique. De plus, il a été observé qu'une proportion de 15% d'adhésif donne les meilleurs résultats en termes de conductivité. Cette observation peut s'expliquer par le fait qu'une quantité moindre d'adhésif laisse des vides après séchage, ce qui entraîne la formation d'une structure poreuse dans le matériau (Figure III.2). Cette structure aide à ralentir le transfert de chaleur. La conductivité thermique du matériau est considérée comme acceptable par rapport aux panneaux bio-composites fabriqués à partir de chanvre et de fécule de maïs, qui ont une conductivité thermique comprise entre 0,059 et $0,068 W.m^{-1}K^{-1}$. [57]

De plus, pour les composites plâtre + gélatine + paille, Brahim Ismail et al. [58] ont trouvé

une conductivité thermique de 0,057 à 0,058$W.m^{-1}.K^{-1}$. En comparaison avec le lin, le chanvre, le liège et le kenaf, le matériau présente des valeurs de conductivité thermique similaires. [59]

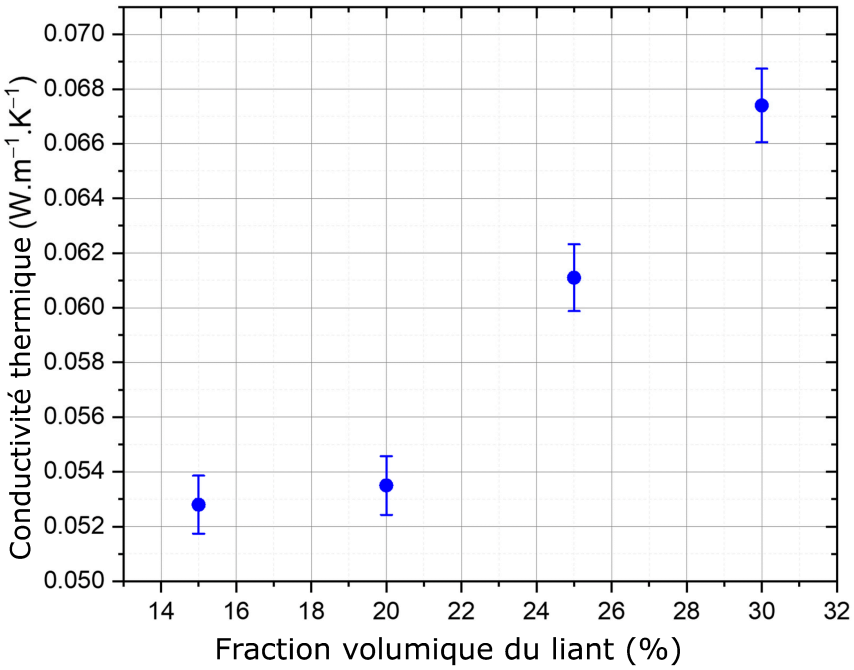


FIGURE III.2 – La conductivité thermique en fonction de volume de la fraction volumique de liant

III.2.3 Chaleur spécifique

La variation de la capacité thermique des fibres de PO en fonction de la fraction volumique de l'adhésif est présentée dans la Figure III.3 Pour des fractions volumiques d'adhésif comprises entre 15 et 30%, on observe une augmentation de la capacité thermique spécifique en raison de la viscosité élevée et de la structure moléculaire de l'adhésif à base de fécule de maïs. La viscosité élevée des adhésifs à base d'amidon suggère un poids moléculaire élevé et une structure moléculaire complexe. Les molécules grandes et complexes peuvent avoir un plus grand nombre de modes de vibration et de degrés de liberté, ce qui contribue à augmenter la capacité thermique. [60, 61]

Les valeurs de capacité thermique des fibres de PO varient entre 1492, $8J.kg^{-1}.K^{-1}$ et 1807, $5J.kg^{-1}.K^{-1}$. En raison de leurs valeurs relativement élevées de C_p, ces fibres pourraient être considérées comme un matériau isolant prometteur.

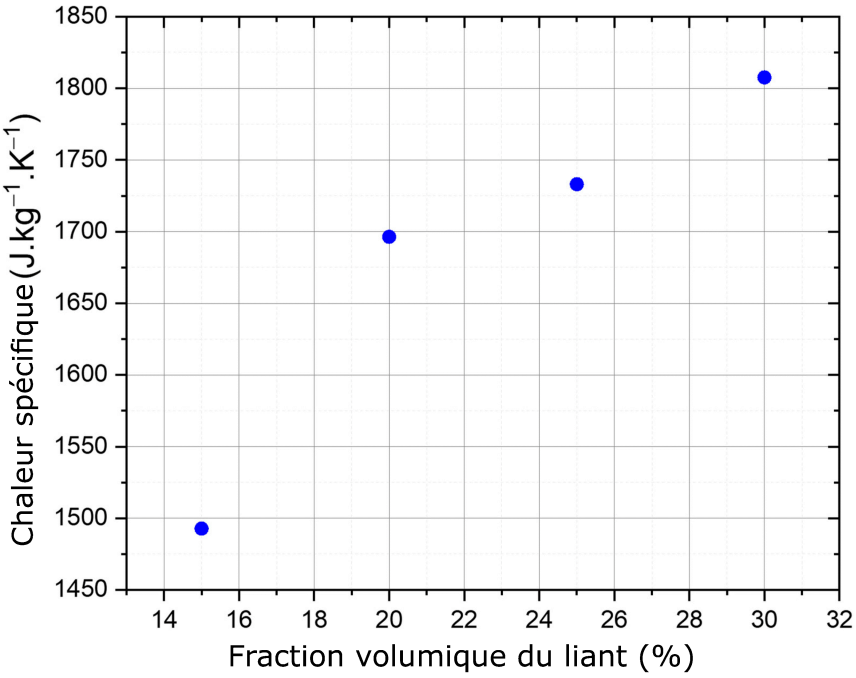


FIGURE III.3 – Chaleur spécifique du matériau en fonction de la fraction volumique de liant

III.2.4 Diffusivité thermique

La Figure III.4 présente la variation de la diffusivité thermique en fonction de la fraction volumique d'adhésif révèle une réduction de celle-ci lorsque ladite fraction atteint 20%, 25% et 30%. Cette baisse est attribuée à la diminution du volume de fibres par rapport à celui de l'adhésif, ce qui entraîne un matériau plus dense.

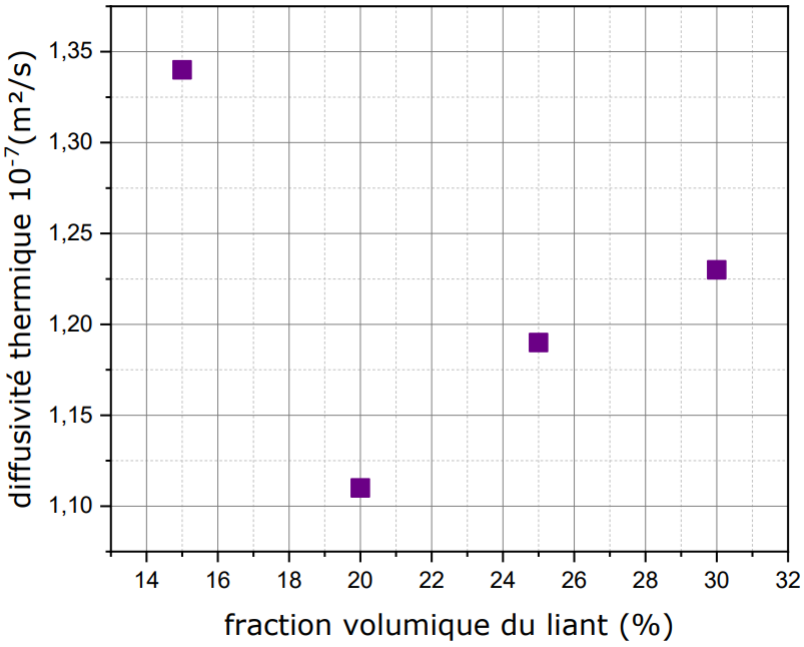


FIGURE III.4 – La variation de la diffusivité thermique en fonction de la fraction volumique d'adhésif

Les résultats de la diffusivité thermique correspondent étroitement aux valeurs trouvées dans les isolants à base de bois [62]. L'incorporation de fibres de chanvre dans de l'argile a réduit la diffusivité thermique jusqu'à 27%. Un matériau isolant efficace doit combiner une faible conductivité thermique avec la capacité de retarder la transmission de chaleur [63]. L'équation III.1 a été utilisée pour calculer la diffusivité thermique :

$$\alpha = \lambda \times p \times C_P \tag{III.1}$$

Où :

— α est la diffusivité thermique.

— λ est la conductivité thermique.

— p est la densité.

— C_P est la capacité thermique.

La Figure III.5 présente les valeurs de diffusivité thermique pour différents matériaux isolants [64]. Lorsqu'on compare les fibres de PO avec les matériaux isolants couramment utilisés dans les applications industrielles, on observe des valeurs acceptables de diffusivité thermique par rapport à leur densité, ce qui en fait une option prometteuse pour les applications où l'efficacité de l'isolation et le poids du matériau sont des considérations importantes.

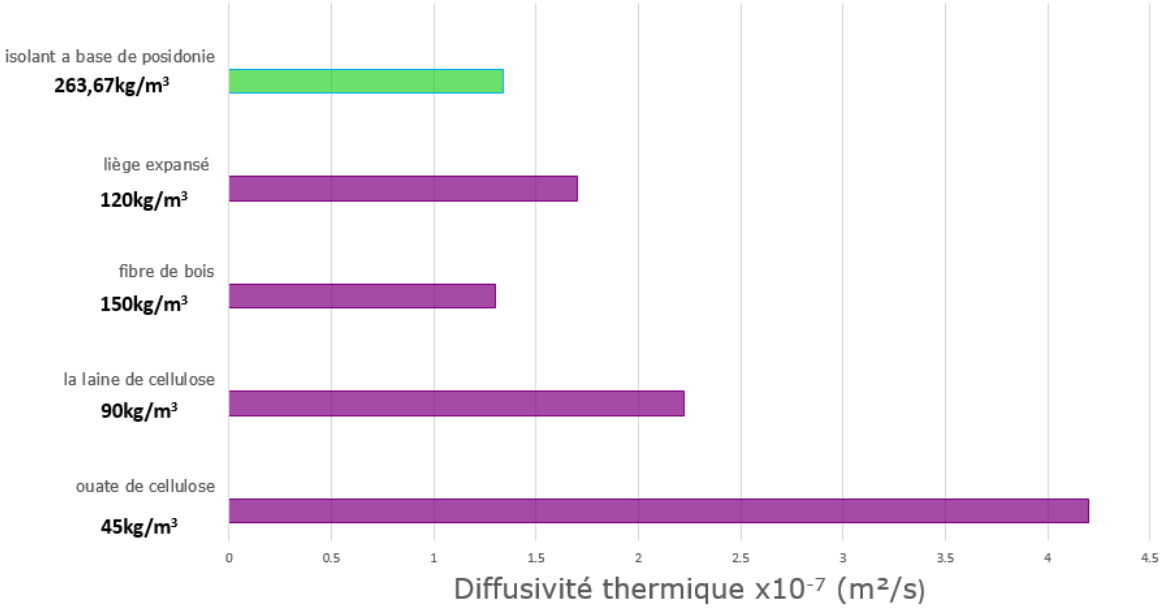


FIGURE III.5 – Diffusivité thermique des isolants thermiques courant

III.2.5 Effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau, caractérise sa capacité à échanger plus ou moins vite de l'énergie thermique avec son environnement. L'équation III.2 a été utilisée pour calculer la diffusivité thermique : L'effusivité :

$$E = \sqrt{\lambda \times p \times c} \quad \left[\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2}}\right] \tag{III.2}$$

Où :

— λ la masse volumique du matériau en [$kg.m^{-3}$]

— p la masse volumique du matériau en [$kg.m^{-3}$]

— c la capacité thermique massique du matériau en [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

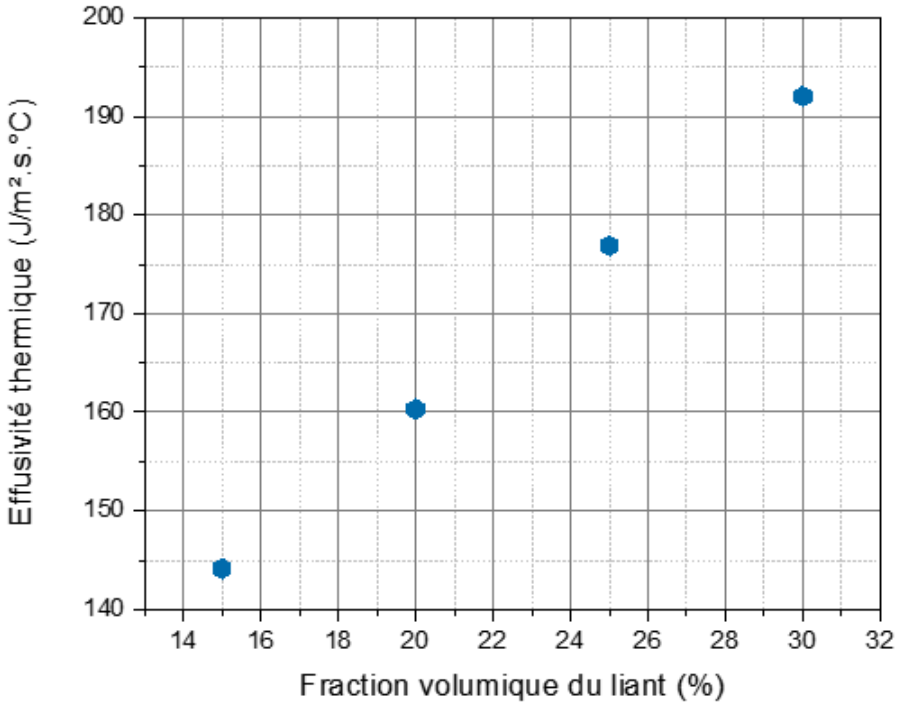


FIGURE III.6 – La variation de l'effusivité thermique en fonction de la fraction volumique d'adhésif

La Figure III.7 illustre la variation de l'effusivité du matériau, qui se situe entre 143 et 192 $J/K.m^2.s$, en comparaison avec celle du béton cellulaire [64], entre 278 et 394 $[J/.m^2.s.C]$. Le matériau présente une bonne capacité à absorber la chaleur.

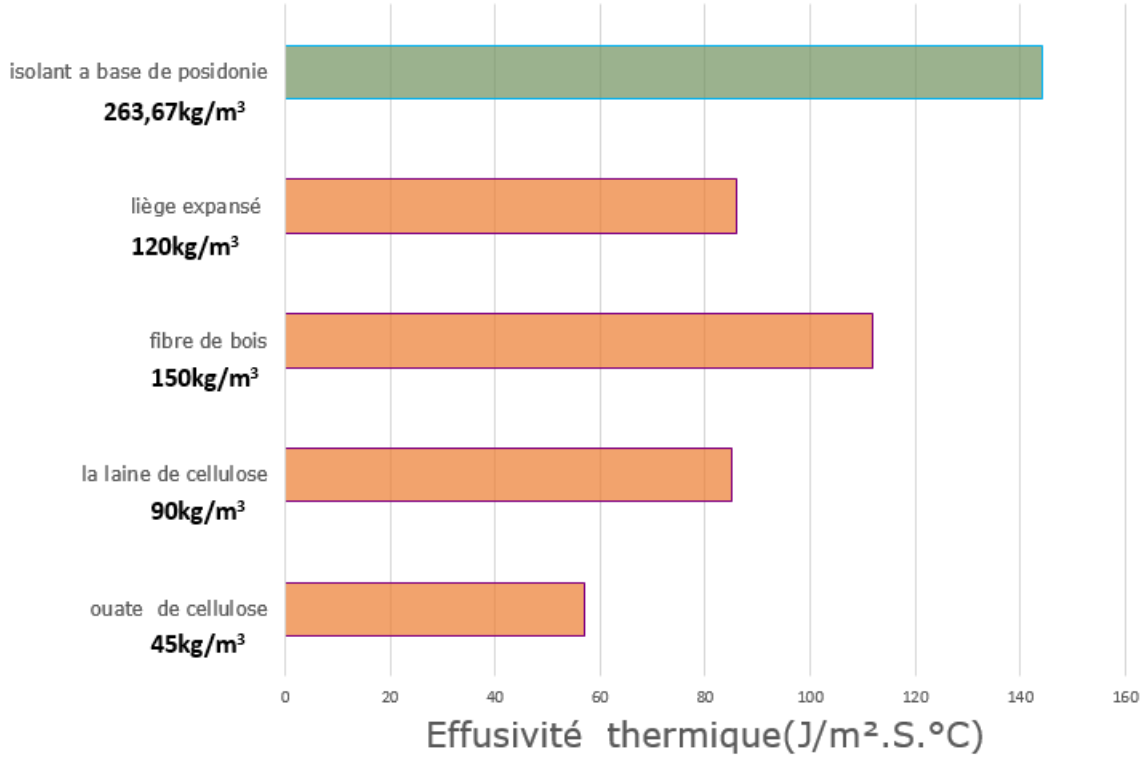


FIGURE III.7 – Diffusivité thermique des isolants thermiques courant

En calculant la diffusivité thermique et l'effusivité thermique du matériau, nous pouvons conclure que celui-ci présente une bonne inertie thermique. Il présente une bonne effusivité thermique comparée aux matériaux isolants courants.

Comparaison des propriétés thermiques de l'isolant à base de posidonie et liant d'amidon avec les isolants de littératures.

Tableau III.1 présente une comparaison entre l'isolation à base de posidonie et d'autres isolants de la littérature. Selon ce tableau, les chercheurs ont choisi des pourcentages de liant allant de 20% à 30% pour les fibres afin d'obtenir des propriétés thermiques remarquables. [65, 66]

Dans cette étude, les pourcentages de liant ont été sélectionnés dans une plage de 15 % à 30 % car en dessous de 15 %, le matériau manque de cohésion, tandis qu'au-delà de 30 %, on note une augmentation considérable de la conductivité thermique. Le matériau présente une densité et des propriétés thermiques similaires à celles des isolants fabriqués à partir de fibres de bagasse et de noix de coco, utilisant des liants contenant de la gomme arabique. De plus, il présente une similitude avec les isolants fabriqués à partir de granulés de liège (développé) et de balles de riz avec un liant de polyuréthane au Toluène Disocyanate (20 %)[66], ainsi qu'avec les fibres de bois/déchets textiles utilisant un liant d'alginate de sodium [67, 68]. Cette similarité contribue à

la faible conductivité thermique observée dans ces matériaux d'isolation. La densité plus élevée observée dans d'autres isolants est principalement attribuée à la nature des fibres ou du liant [66, 68], comme les liants de sable et d'argile, ce qui entraîne une augmentation de la conductivité thermique. En revanche, les valeurs de la chaleur spécifique et de la diffusivité thermique de la paille de riz avec de l'alginate de sodium et de la chitosane ressemblent étroitement à celles observées dans les isolants étudiés par les chercheurs.

TABLE III.1 – Tableau comparatif des matériaux isolants

Matériaux	**Liants**	**Masse volumique (Kg/m^3)**	**Conductivité thermique λ(W/m·K)**	**Chaleur spécifique (J/kg·K)**	**Diffusivité thermique (mm^2/s)**	**Réf**
Isolation à base de posidonie	Liant à base d'amidon de maïs	263-302	0.052 à 0.067	1492-1807	1.23×10^{-7} 1.11×10^{-7}	Notre étude
Granulés de liège (développés) et balles de riz	Basé sur le Polyuréthane de toluène diisocyanate (20%)	199–390	0.045–0.080	1329–1793	-	[65]
Bagasse et noix de coco	Noix de coco granulée, gomme arabique (33%)	245–276	0.015	1141	9.14×10^{-5} 5.15×10^{-5}	[67]
Fibres de surface de palmier-dattier	Polystyrène expansé (EPS)	970-930	0,053	1400	4.5×10^{-8} m^2/s	[69]
Fibre d'olivier	Argile + sable	958.91	0,428	1409	2.95×10^{-6} 3.87×10^{-6}	[70]
Typha	Fécule	670.66-891.54	0.094-0.534	1590-1640	3.77×10^{-7} 9.0×10^{-8}	[71]
Particules de bois (huile de palme), fibre de ramie	Fécule de tapioca (30%)	660–790	0.067–0.148	-	-	[66]
Fibres de bois / fibres de déchets textiles	Alginate de sodium	308–333	0.078–0.089	1320-1402	193×10^{-7} 236×10^{-7}	[68]
Paille de riz	Alginate de sodium et chitosane	104-162	0,038-0,047	1428-1140	-	[72]

III.2.6 Absorption Capillaire

La Figure III.8 illustre la relation entre la concentration d'adhésif et l'absorption d'eau. Il est évident qu'une augmentation de la concentration d'adhésif entraîne une diminution de l'absorption d'eau.
Ce phénomène peut être attribué à la formation par l'adhésif d'une couche plus dense et plus imperméable à la surface du matériau à mesure que sa concentration augmente. Cette couche d'adhésif plus dense agit comme une barrière, réduisant la capacité du matériau à absorber l'eau. Il a été observé que l'incorporation de 30% d'adhésif a conduit aux résultats les plus favorables en termes d'absorption d'eau. Il est intéressant de noter que les fibres ont tendance à absorber l'eau. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Laurent Molez et al. [73], qui ont montré que l'ajout de fibres au mortier entraîne une augmentation plus ou moins prononcée du coefficient cinétique d'absorption capillaire. Ces résultats sont également confirmέw par Boukhalkhal et al. [74] Jemi Merrin Mathews et al. [75] ont expliqué que le phénomène observé est attribué à la nature cellulosique des agrégats de carton. Cette caractéristique, associée à la présence augmentée de vides d'air dans le matériau composite, conduit finalement à une augmentation notable de l'absorption d'eau.

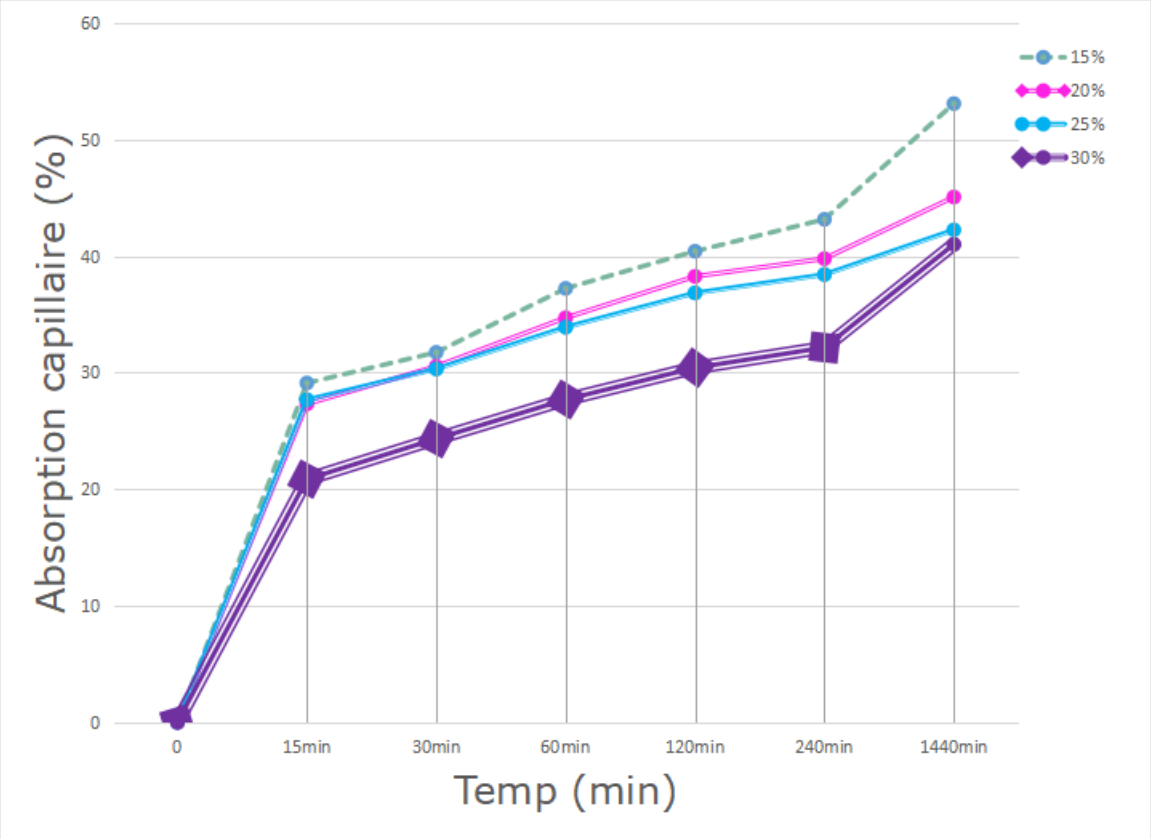


FIGURE III.8 – La relation entre la concentration d'adhésif et l'absorption d'eau

III.2.7 Résistance à la chaleur

La Figure III.9 illustre la perte de masse de l'isolant lorsqu'il est exposé à trois températures différentes. A 150°C, la perte de masse n'est pas significative, et les échantillons présentent des pertes de masse presque équivalentes, même avec la même fraction volumique de colle. A 250°C, le matériau contenant une fraction volumique de colle de 30% perd moins de masse que les autres fractions, qui perdent plus de la moitié de leur masse. Enfin, à 350°C, le matériau perd une quantité significative de sa masse, mais l'échantillon avec une fraction de 30% de colle reste celui qui perd le moins de masse.

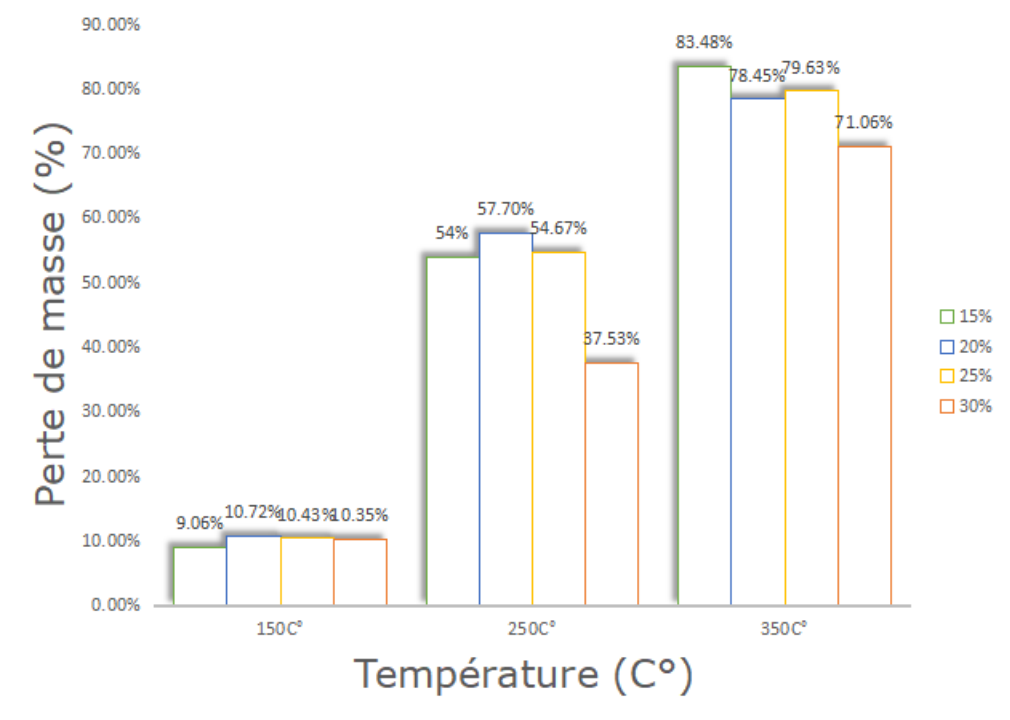


FIGURE III.9 – La perte de masse des échantillons en fonction de la température

Les résultats du test à flamme unique mené par Aldi Kuqo et al. [76] suggèrent que la résistance au feu des panneaux isolants à base d'herbiers marins est classée dans les catégories B, C ou D. Les performances élevées en termes de résistance aux flammes et à la chaleur des panneaux en jonc de mer pourraient être attribuées à leur structure ou à leur composition chimique.

III.3 Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux dans cette section conduit aux conclusions suivantes :

— L'augmentation de la fraction volumique de colle entraîne une influence sur la masse volumique du matériau, le rendant plus dense.

— La conductivité thermique du matériau est corrélée à sa densité, et donc à la quantité de liant ; plus le matériau est léger, la conductivité thermique est meilleur elle varie entre 0,0674 à 0,0528 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

— Le matériau présente des qualités thermiques acceptables comparées à d'autres matériaux dans la littérature, en ce qui concerne la chaleur spécifique qui varient entre 1492,8 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ et 1807,5$J.kg^{-1}.K^{-1}$, et la diffusivité thermique qui varient entre 1.34 et $1.23m^2/s$.

— La capacité du matériau à absorber l'eau est limitée ; l'ajout de liant améliore légèrement cette capacité d'absorption d'eau.

CHAPITRE IV. MODELISATION ET SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

IV.1 Introduction

Pour étudier le comportement thermique de matériau dans l'habitat, nous avons choisi d'utiliser la simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel Pleiades-Comfie. Ce logiciel est conçu pour calculer les flux thermiques en prenant en compte les conditions climatiques. Il permet de diviser le volume habitable en plusieurs zones thermiques d'analyser leur comportement et de déterminer les besoins en chauffage et en rafraîchissement tout au long de l'année.
La modélisation thermique dynamique du bâtiment consiste à diviser celui-ci en une ou plusieurs zones thermiques, chaque zone étant considérée comme ayant une température homogène. Chaque zone est définie par un ensemble de parois, qui sont subdivisées en mailles. Une zone peut englober plusieurs pièces, et dans ce cas, les parois qui séparent deux pièces appartenant à la même zone sont appelées « parois internes ».

IV.2 La modélisation thermique dynamique

Une maille représente le volume d'air contenu dans la zone ainsi que les parois internes légères (avec une capacité thermique surfacique conventionnellement inférieure à 7 $Wh/K/m^2$), supposées être à la même température que l'air ambiant.
La simulation thermique consiste à analyser l'évolution des températures et des besoins énergétiques du bâtiment sur une période donnée (par exemple, une année) avec un intervalle de temps spécifié (par exemple, heure par heure pour le calcul des besoins de chauffage). Un bilan thermique est réalisé pour chaque maille selon le processus suivant : l'énergie stockée pendant l'intervalle de temps, dépendant de la capacité thermique de la maille, est égale à l'énergie reçue (provenant du système de chauffage, du rayonnement solaire, des occupants, etc.) moins l'énergie perdue (sous forme de pertes thermiques).
Dans un premier temps, un modèle thermique est développé pour chaque zone thermique. Ce modèle est ensuite simplifié en considérant un nombre restreint d'équations, correspondant à différentes constantes de temps du système (chaque constante de temps représentant l'inertie

thermique de certains composants, comme un plancher massif, des cloisons légères, des murs, etc.). Les modèles simplifiés de chaque zone sont ensuite interconnectés : la température du côté d'une zone constitue une sortie de cette zone et une entrée pour la zone adjacente à travers une cloison les séparant. Cette étape conduit à un modèle global du bâtiment, permettant de réaliser un calcul à chaque intervalle de temps. (Méthodes de Comfie, cahier d'algorithmes, s.d.)

IV.3 Modèle pour chaque zone thermique

Le modèle thermique du bâtiment est segmenté en zones présentant des températures uniformes. Pour chaque zone, les parois sont subdivisées en mailles suffisamment fines pour assurer une uniformité thermique. De plus, une maille est dédiée à la température de l'air et du mobilier de la zone. Un bilan thermique est ensuite appliqué à chaque maille du bâtiment, défini par l'équation suivante :

$$CmailleTmaille = GainspertesCmailleTmaille = Gainspertes \tag{IV.1}$$

Où :

— CmailleCmaille représente la capacité thermique de la maille.

— TmailleTmaille est la température de la maille.

— Lestermes « Gains » et « pertes » englobent les transferts thermiques résultant de la conduction, du rayonnement, de la convection, ainsi que les gains internes et les équipements thermiques.

Le bâtiment est subdivisé en mailles où un bilan thermique est établi en supposant une température uniforme. Pour maintenir cette hypothèse d'uniformité proche de la réalité, idéalement, chaque élément devrait être découpé en mailles extrêmement fines. Cependant, dans le cadre d'un outil destiné à un usage professionnel, notamment en termes de temps de calcul, des contraintes de taille du modèle doivent être prises en compte. Ainsi, le compromis retenu consiste à placer le nombre restreint de mailles de manière à maximiser l'uniformité de la température.

Dans un premier temps, il est envisagé de ne pas regrouper dans une même maille les couches de matériaux séparées par un isolant. Ensuite, afin de mieux représenter la réalité thermique du bâtiment, le nombre de mailles est proportionnellement plus élevé dans les murs massifs que dans les cloisons légères.

Les températures dans les différentes zones du bâtiment sont principalement influencées par les surfaces internes des parois, lesquelles sont à leur tour impactées par les fluctuations de la puissance de chauffage (régulation des équipements, intermittence), davantage que par les surfaces externes. Afin de mieux prendre en compte cette dynamique, une possibilité a été introduite pour définir des mailles plus fines à la surface interne d'une paroi. Un paramètre géométrique, noté r, est utilisé pour régir l'épaisseur des mailles successives : si e représente l'épaisseur de la maille la plus interne, alors sa voisine a une épaisseur de r.e, la suivante r2.e, et ainsi de suite. Le cas où r = 1 correspondrait à des mailles d'épaisseurs égales. La valeur de r peut être ajustée (actuellement fixée à 3 dans la version actuelle du logiciel, suite à diverses validations), tout comme le nombre n de mailles placées dans les murs massifs (également fixé à 3).

En l'absence d'isolant, une seule maille est utilisée pour une cloison légère (ayant une inertie thermique inférieure à $7Wh/(m^2.K)$), tandis que pour un mur massif, n mailles sont employées. Dans le cas où un isolant est présentée même principe est appliqué pour la partie intérieure de la paroi adjacente à l'isolant. Pour la partie extérieure, une seule maille est toujours placée, quelle que soit la nature de la paroi (légère ou massive). Lorsqu'il y a deux isolants, une seule maille est également disposée entre les deux isolants, indépendamment de la nature de la portion de paroi correspondante (massive ou non).
Les mailles, définies en fonction des paramètres n et r, ne correspondent généralement pas à des couches distinctes de matériaux. Au contraire, les propriétés physiques des divers matériaux présents dans une maille sont combinées : les inerties thermiques et les résistances thermiques sont additionnées.
Pour une paroi interne au sein d'une zone, le découpage en mailles est similaire, avec une légère variation selon qu'il y a un isolant ou si les deux sections séparées par l'isolant sont toutes deux légères ou massives. Dans ces situations, tous les matériaux constituant la paroi sont regroupés en un matériau unique équivalent, puis divisés en deux parties symétriques. Le plan central est considéré comme adiabatique. Dans ce schéma, n mailles sont alors placées dans l'une des deux moitiés, avec une condition de flux nul au niveau du plan médian. Cette approche permet d'améliorer la précision pour un nombre donné de mailles.
Les isolants ne contiennent jamais de mailles, car leur capacité thermique est considérée comme négligeable par rapport à celle des autres matériaux. Par conséquent, leur capacité thermique est ajoutée à celle des mailles adjacentes. Par exemple, s'il y a une maille de chaque côté de l'isolant, la moitié de la capacité thermique de l'isolant est ajoutée de chaque côté.
Les vitrages ne comportent également pas de mailles. Leur grande surface par rapport au volume et le fait que le régime permanent soit rapidement atteint dans ces composants par rapport au pas de temps de la simulation sont supposés. La variation de la résistance thermique due à l'utilisation des occultations (stores, volets, etc.) est prise en compte au niveau de la simulation en introduisant une puissance de chauffe équivalente à la diminution des déperditions.
L'air, le mobilier et, le cas échéant, les cloisons légères présentes dans la zone sont combinées dans une seule maille. Cette approche repose sur l'hypothèse que le volume des meubles est insignifiant par rapport à leur surface d'échange thermique, et qu'ils sont quasiment à la température de l'air ambiant. De plus, elle néglige la stratification de l'air en température ainsi que les transferts d'énergie associés aux variations d'humidité et aux phénomènes de condensation/évaporation d'eau

IV.4 Différentes interfaces du logiciel

IV.4.1 Pléiades bibliothèque

C'est La base de données des éléments constitutifs du bâtiment accessible depuis les autres composants de Pléiades. Matériaux, menuiseries, équipements, elle comporte aussi des éléments pour décrire l'usage (scénarios) et l'environnement proche du bâtiment. L'interface Bibliothèque permet d'intégrer la composition des différents éléments constructifs ainsi que de créer de nouveaux matériaux et éléments grâce à la définition de leurs caractéristiques thermo¬physiques

(Voir Figure IV.1).

IV.4.2 Pléiades Modeleur

C'est conçu pour faciliter la saisie des bâtiments. Il permet de définir l'ensemble des paramètres géométriques du bâtiment, d'attribuer à chacune des parois ses caractéristiques thermiques, de réaliser le zonage et d'attribuer rapidement les scénarios d'utilisation et les paramètres.

IV.4.3 Modélisation et simulation thermique dynamique 71

Propres aux différents calculs proposés par Pléiades. Il permet de visualiser la saisie en trois dimensions et il permet enfin de lancer les calculs de STD. Lors du lancement d'un calcul depuis le modeleur, l'outil effectue 2 phases successives : un export vers Pléiades Éditeur (c'est-à-dire qu'il génère une maquette thermique du bâtiment sous format arborescent), puis le lancement du calcul depuis cette maquette.

IV.4.4 "Éditeur" [99] L'Éditeur

Permet la saisie complète d'un projet sous une forme arborescente et permet de lancer les calculs de STD/SED. STD COMFIE : La simulation thermique et énergétique dynamique avec le moteur COMFIE.

IV.4.5 Résultats

Les résultats des calculs lancés à partir du Modeleur ou l'Éditeur sont visualisés dans le composant Résultats. Interfaces du Logiciel.

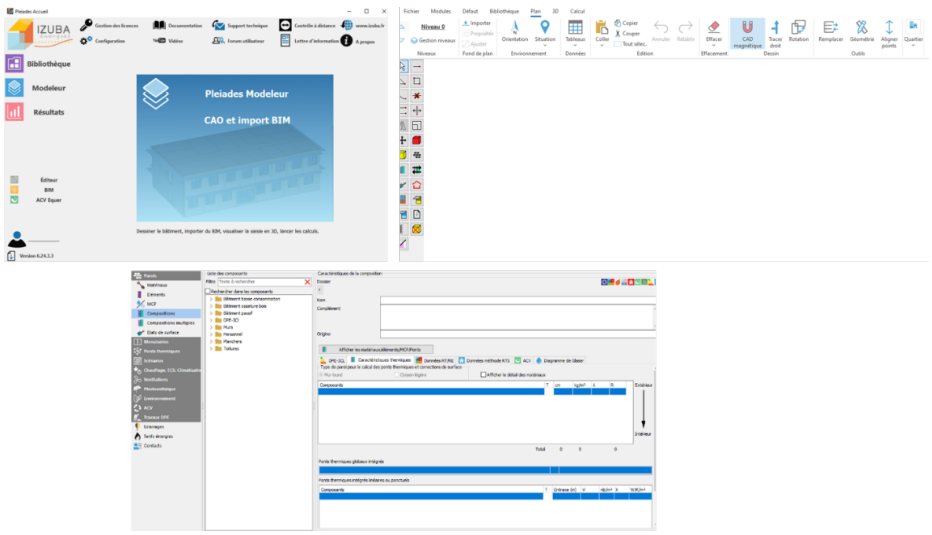


FIGURE IV.1 – Interfaces du logiciel

IV.5 Réponses du logiciel

Pléiades stocke les résultats de chaque simulation dans le dossier « Résultats Comfie » qui se trouve dans le dossier « Mes données Pléiades ». Le logiciel permet d'avoir les réponses suivantes : Températures moyennes, températures minimales et températures maximales dans les différentes zones thermiques étudiées. Be- soins en chauffage et climatisation, puissances de chauffage et climatisation Taux d'inconfort, Moyenne de surchauffe. Visualisation graphique des résultats obtenus durant différentes périodes de l'année. Génération des rapports sous format (*.odt) qui peut être exporté vers d'autres logiciels comme Excel et Word. Pour toutes ces réponses, nous avons utilisé ce logiciel pour effectuer les simulations sur les différents cas étudiés.

IV.6 Processus d'application du logiciel

La Figure IV.2 décrit le processus d'application du logiciel Pléiades (version2022) ainsi que les différentes étapes de simulation qui y sont associées.

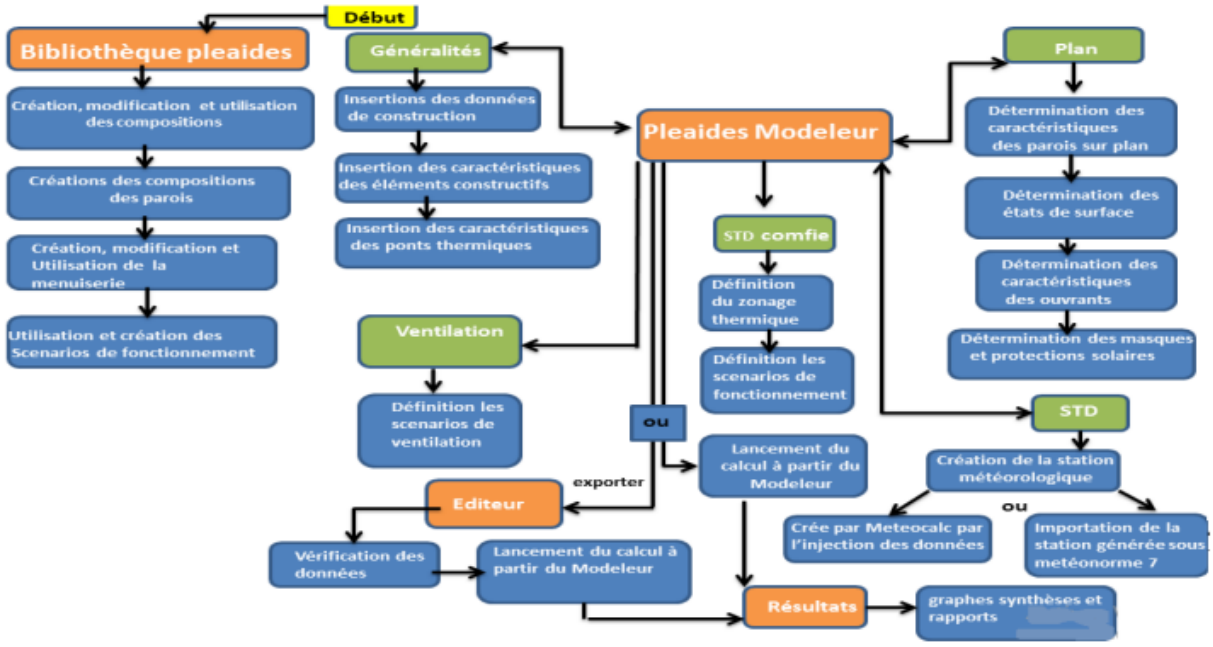


FIGURE IV.2 – Processus d'application du logiciel

1. Caractéristiques thermophysiques des éléments constructifs :

TABLE IV.1 – Eléments constructifs de la variante 01 (maison avec matériaux standard)

Élément constructif	**Composants**	**Épaisseur (m)**	**Conductivité λ (W/m.°C)**	**U (W/m^2.°C)**
Parois extérieur	Mortier extérieur	0.01	1.15	0.008
	Brique creuse	0.15	0.5	0.3
	Lame d'air	0.1	0.025	4
	Brique creuse	0.1	0.476	0.21
	Enduit plâtre	0.01	0.35	0.028
Parois intérieur	Enduit plâtre	0.01	0.35	0.028
	Brique creuse	0.1	0.476	0.21
	Enduit plâtre	0.01	0.35	0.028
Plancher bas	Carrelage	0.02	1.7	0.011
	Mortier	0.02	1.15	0.017
	Béton lourd	0.1	1.75	0.057
Plancher haut	Dalle en béton plein	0.2	1.75	0.11
	La chape	0.05	0.23	0.21
	Étanchéité	0.04	0.4	0.1
	Gravier roulé	0.04	1.2	0.033

2. Caractéristiques thermophysiques de l'isolant à base de posidonie :

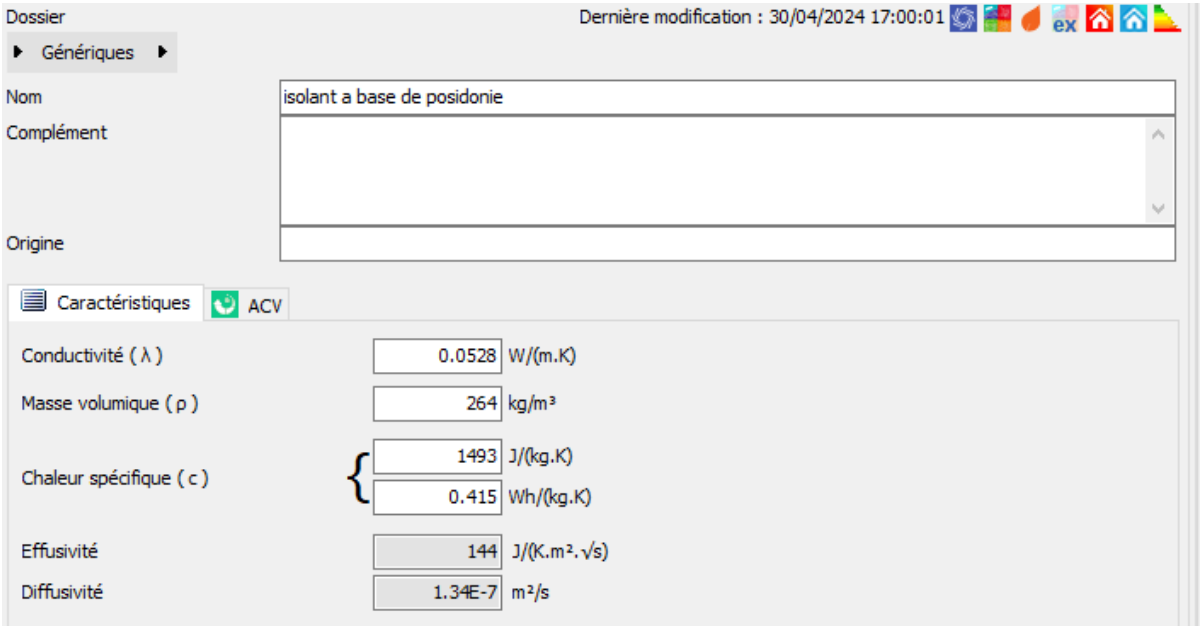


FIGURE IV.3 – Caractéristique thermique de l'isolant à base de posidonie

IV.7 Présentation de projet

Le projet est une maison individuelle composé de RDC on choisit la station métrologique Dar Beida à Alger, la maison est composé d'une : cuisine, SDB et WC et un séjour et 2 chambres (zone de confort).

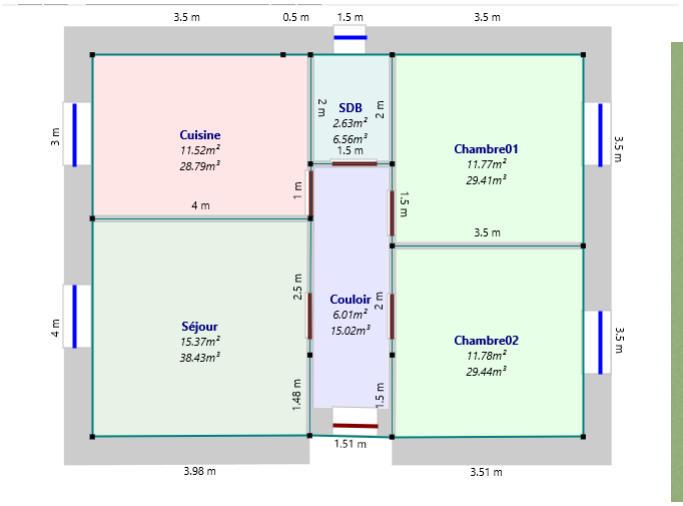


FIGURE IV.4 – Plan de la maison étudiée

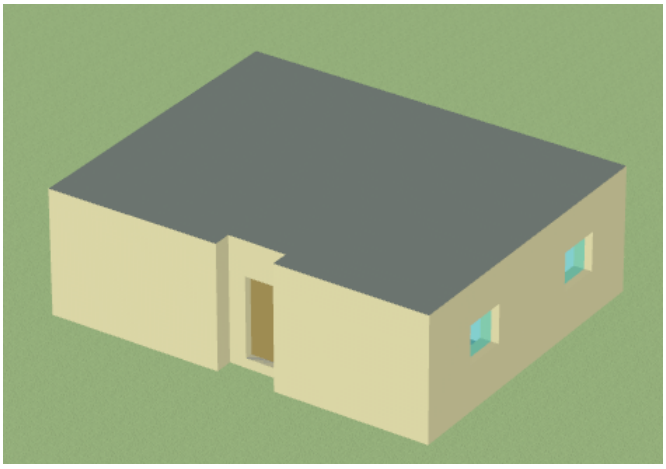


FIGURE IV.5 – 3D du Projet

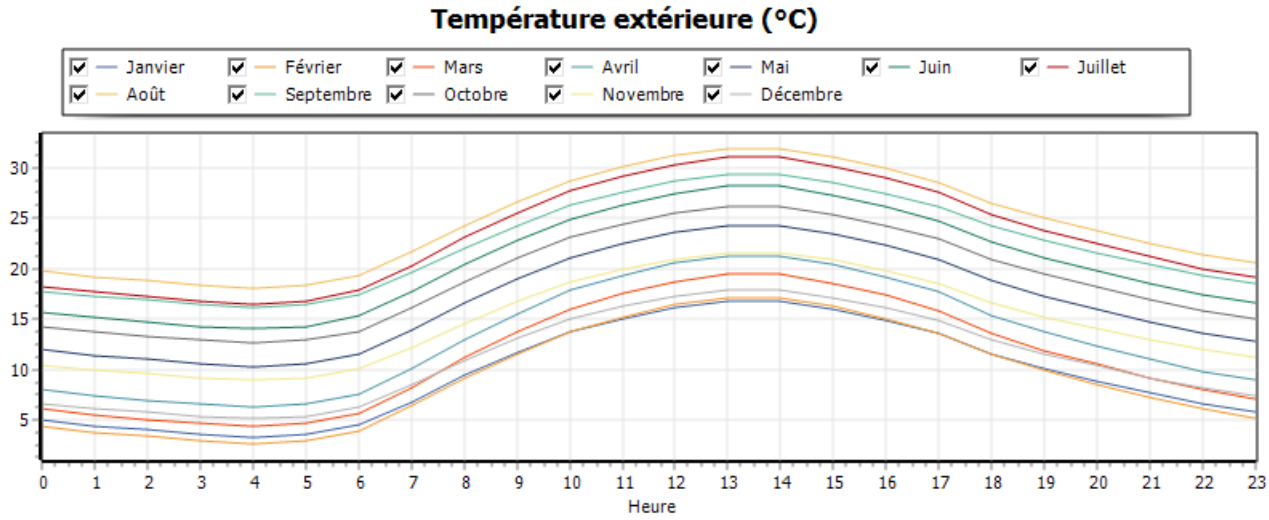


FIGURE IV.6 – Variation des températures de la station météo Dar Beida

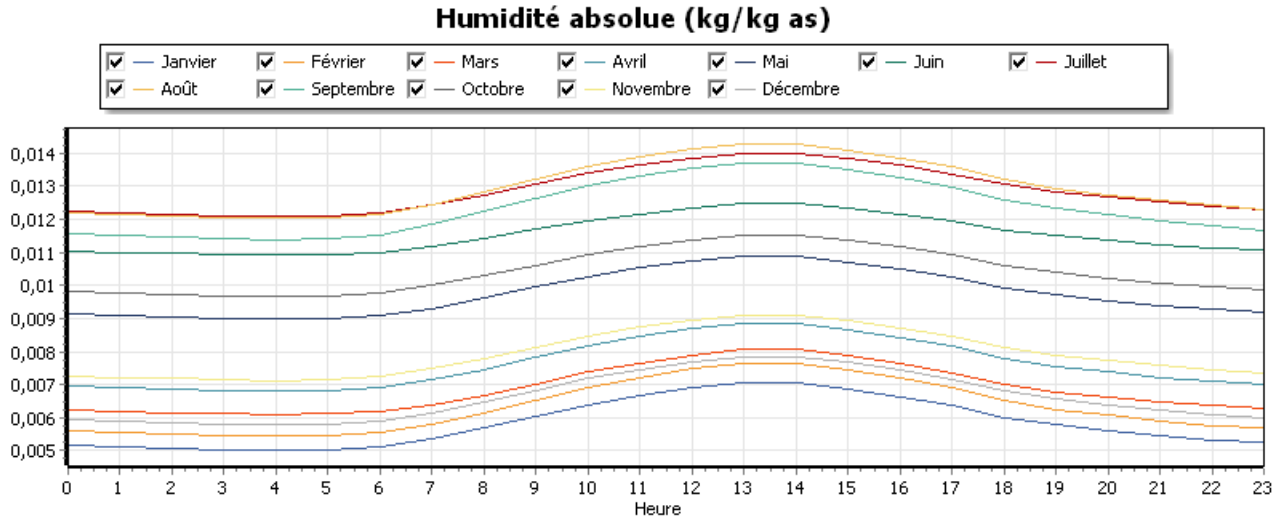


FIGURE IV.7 – Humidité absolue de la station météo Dar Beida

IV.8 Scenarios de fonctionnement

IV.8.1 Les apports internes

Les apports internes émis par le métabolisme des occupants et les apports émis par les appareils électriques ont été intégrés au modèle thermique dynamique du bâtiment. Le nombre d'occupants est de 04 personnes. Chaque personne émette 80W, des scenarios ont été intégrés selon le taux de fréquentation de chaque espace. Le même scenario est reproduit pour toute la semaine et durant les différentes périodes de l'année. De même, nous avons pris en considération la puissance dissipée des appareils utilisés (lampe, ordinateur, réfrigérateur, four.) dans chaque

cas d'étude. Les scenarios ont été intégrés selon le fonctionnement de chaque volume thermique de chaque cas étudié scénario d'occupation, afin de déterminer les apports internes produits par les occupants de notre cas d'étude.

1. Scénario de ventilation : Afin de déterminer le taux de renouvellement d'air par heure.
2. Scénario de puissance dissipée : Afin de déterminer les apports internes produits par les appareils.
3. Consigne de thermostat : La température a été fixée à 27° durant la période estivale et à 20° durant la période hivernale.
4. Les simulations des différents cas étudiés ont été faites avec consigne de thermostat durant la période hivernale et estivale.

IV.8.2 Les variantes étudiées

Plusieurs variantes sont étudiées pour évaluer les besoins en chauffage pour la semaine la plus froide et en climatisation pour la semaine la plus chaude.

— ***Variante 01 :*** Le calcul des besoins énergétique sans renforcement en utilisant les matériaux standard.

— ***Variante 02 :*** Le renforcement des murs par 5, 10, 15 et 20 l'isolant.

— ***Variante 03 :*** Remplacement de lame d'air des murs extérieurs par un isolant de 5cm.

— ***Variante 04 :*** Le Renforcement de toiture par 10 et 20 cm d'isolant.

— ***Variante 05 :*** Renforcement des murs par 15cm d'isolant et toiture par20 cm d'isolant.

IV.9 Résultats et discussion

IV.9.1 Calcul des besoins en chauffages

On fixant la température de chauffage à 20°C et en basant les résultats de simulation sur la semaine la plus froide.

— ***Variante 01 :*** Le calcul des besoins énergétiques de la maison sans renforcement

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
sejour	1 365 kWh	89 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	871 W	0 W	20.00 °C	23.32 °C	31.16 °C
Cuisine	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	15.13 °C	23.34 °C	34.29 °C
chambre	2 253 kWh	96 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	1 271 W	0 W	20.00 °C	23.13 °C	30.33 °C
couloir	369 kWh	59 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	210 W	0 W	20.00 °C	23.15 °C	30.02 °C
salle de bain	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	15.67 °C	21.98 °C	30.13 °C
Total	3 988 kWh	88 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	2 353 W	0 W	18.86 °C	23.17 °C	31.27 °C

FIGURE IV.8 – Besoin énergétique de chauffage pour une maison sans renforcement

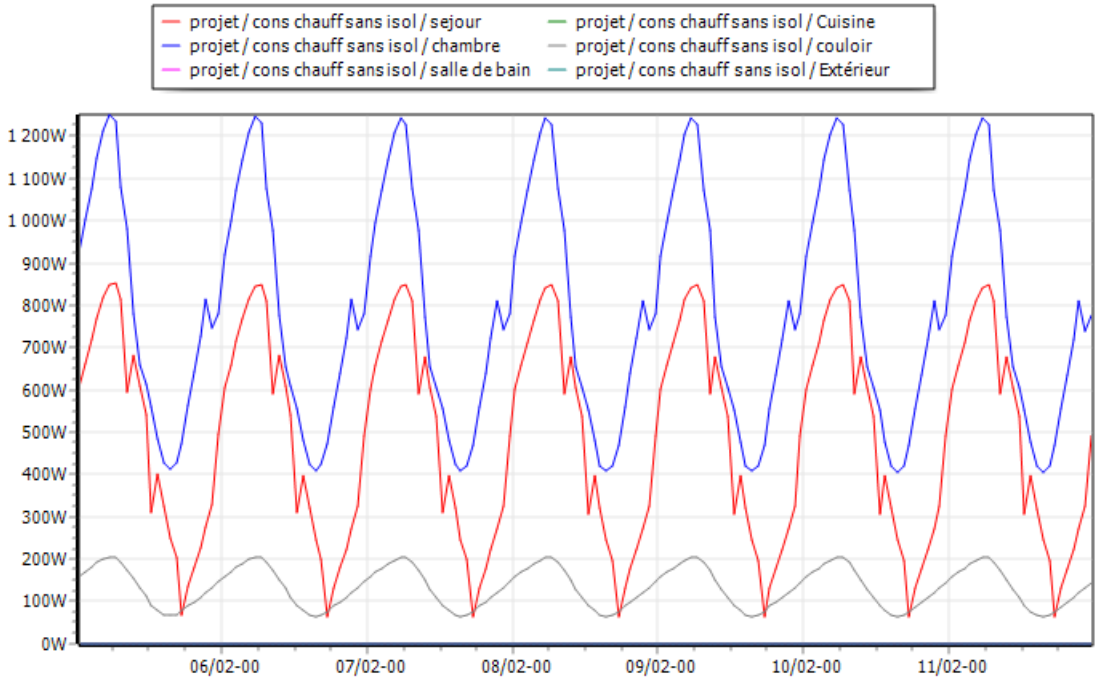


FIGURE IV.9 – Graphe des besoins énergétiques de chauffage pour une maison sans renforcement

Les besoins en énergie pour le chauffage des zones de confort (chambres, séjour) sont estimés à 3988 kWh sans renforcement de l'isolation de la maison. Pour évaluer l'impact d'un renforcement, il est proposé d'ajouter l'isolant à base de posidonie aux murs extérieurs et à la toiture.

— ***Variante 02 :*** Renforcement des murs par l'isolant par les épaisseurs suivantes : 5cm – 10cm – 15cm – 20cm.

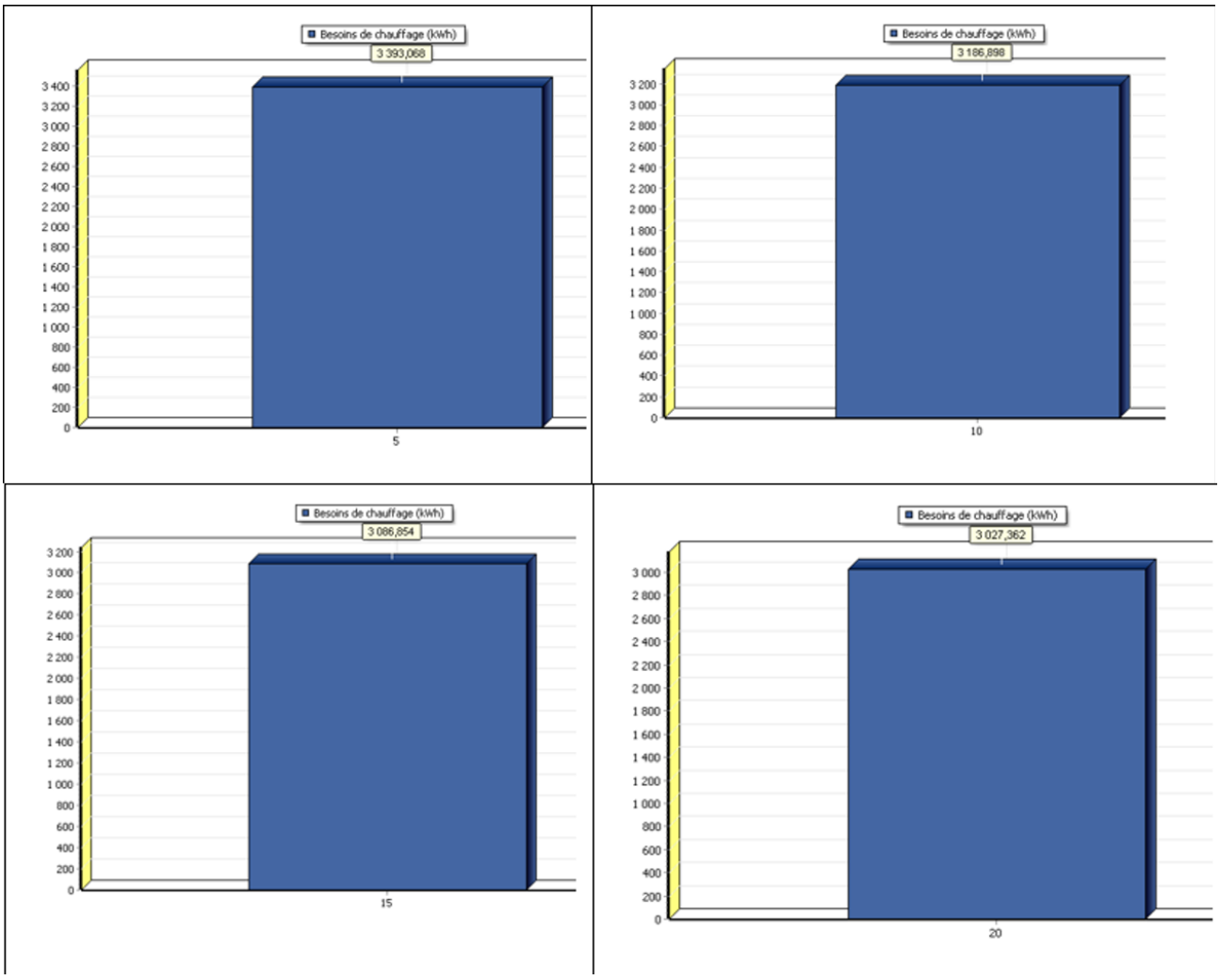


FIGURE IV.10 – Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement des murs extérieurs

Le renforcement des murs extérieurs avec un isolant de 10 cm entraîne une réduction des besoins en chauffage de 6% par rapport à un renforcement avec un isolant de 5 cm. De même, un isolant de 15 cm induit une réduction de 9% par rapport à un isolant de 5cm, et une réduction de 10,78% est observée pour une épaisseur d'isolant de 20cm par rapport à 5cm.

— ***Variante 03 :*** En remplaçant la lame d'air par l'isolant à base de posidonie :

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
sejour	1 161 kWh	76 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	744 W	0 W	20.00 °C	23.41 °C	31.17 °C
Cuisine	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	15.93 °C	23.88 °C	34.58 °C
chambre	1 898 kWh	81 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	1 058 W	0 W	20.00 °C	23.21 °C	30.33 °C
couloir	348 kWh	56 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	196 W	0 W	20.00 °C	23.23 °C	30.13 °C
salle de bain	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	16.19 °C	22.34 °C	30.40 °C
Total	3 407 kWh	75 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	1 997 W	0 W	19.04 °C	23.35 °C	31.36 °C

FIGURE IV.11 – Besoin énergétique de chauffage pour variante : remplacement de lame d'air par l'isolant de 5cm

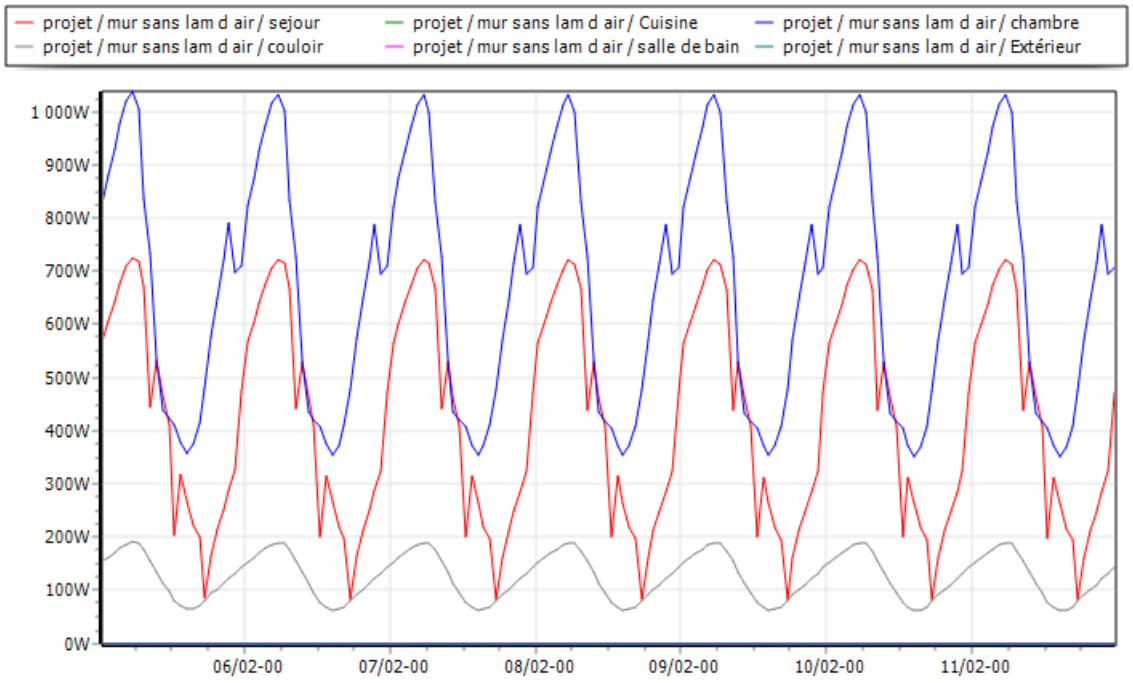


FIGURE IV.12 – Graphe besoin énergétique de chauffage pour variante : remplacement de lame d'air par l'isolant de 5cm

— ***Variante 04 :*** Renforcement de toiture par l'isolant de 10 et 20cm.
Lors du renforcement de la toiture de 20cm par rapport à un renforcement de 10cm, une diminution légère de 3,6% a été constatée.

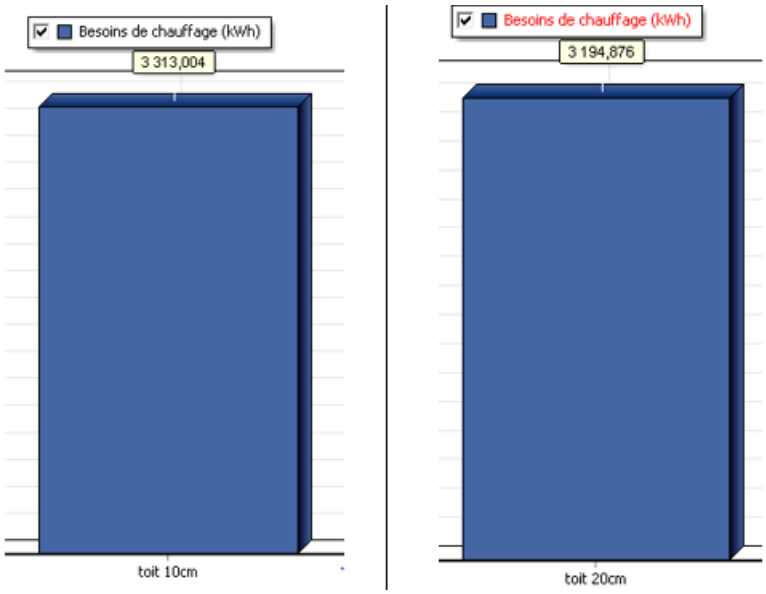


FIGURE IV.13 – Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement de toiture par l'isolant et 10 et 20 cm

— ***Variante 05 :*** Isolation des murs et de toiture : 15 cm pour les murs et 10 cm pour la toiture :

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
sejour	749 kWh	49 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	560 W	0 W	20.00 °C	23.16 °C	30.59 °C
Cuisine	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	17.24 °C	24.43 °C	34.53 °C
chambre	1 305 kWh	55 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	789 W	0 W	20.00 °C	22.85 °C	29.63 °C
couloir	213 kWh	35 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	137 W	0 W	20.00 °C	22.83 °C	29.25 °C
salle de bain	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	17.13 °C	22.42 °C	29.86 °C
Total	2 266 kWh	50 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	1 486 W	0 W	19.33 °C	23.22 °C	30.80 °C

FIGURE IV.14 – Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement de 15 cm des murs et 10 cm de toiture par l'isolant

La réduction de la consommation de chauffage observée lors du renforcement des murs extérieurs et de la toiture est due à la limitation des déperditions thermiques par ces derniers.

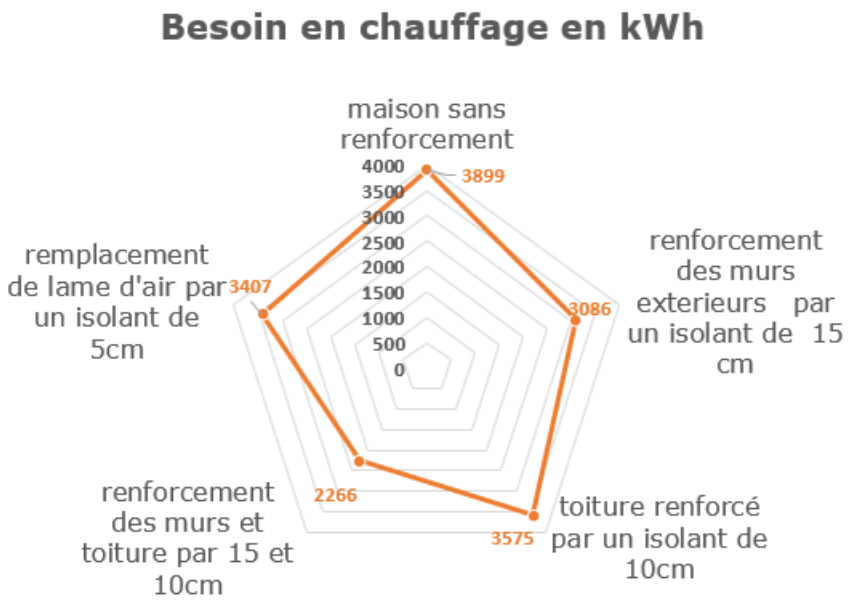


FIGURE IV.15 – Besoin énergétique de chauffage pour variante : renforcement de 15 cm des murs et 10 cm de toiture par l'isolant

IV.9.2 Comparaison entre les 05 variantes

Pour l'isolation des murs on prend 15 cm et 10 cm pour la toiture.
Pour la comparaison entre les différentes variantes, on observe :

- L'application d'un isolant de 15 cm lors du renforcement des murs extérieurs a entraîné une réduction de 27,26 % des besoins en chauffage.
- Le renforcement de la toiture avec un isolant de 10 cm entraîne une diminution de 15,74% des besoins en chauffage.
- Le remplacement de la lame d'air par un isolant de 5cm réduit la consommation énergétique en chauffage de 12,61
- Le renforcement des murs extérieurs avec un isolant de 15 cm et de la toiture avec un isolant de 10 cm entraîne une réduction de 42% des besoins en chauffage.

IV.9.3 Conclusion

- Le renforcement des murs avec un isolant peut réduire significativement les besoins en chauffage jusqu'à 30% pour une épaisseur de 1cm.
- L'application de l'isolant sur les murs et la toiture peut entraîner une réduction des besoins en chauffage allant jusqu'à 42%.

IV.9.4 Calcul des besoins en climatisation

La température de climatisation est fixée à 27°C dans les zones de confort (les chambres et le séjour). Cette simulation est effectuée pendant la semaine la plus chaude de l'été.

— ***Variante 01 :*** Calcul des besoins énergétiques de la maison sans renforcement

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
sejour	0 kWh	0 kWh/m²	378 kWh	25 kWh/m²	0 W	676 W	12.73 °C	21.00 °C	28.35 °C
Cuisine	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	13.47 °C	22.71 °C	33.53 °C
chambre	0 kWh	0 kWh/m²	440 kWh	19 kWh/m²	0 W	691 W	12.49 °C	20.72 °C	27.43 °C
couloir	0 kWh	0 kWh/m²	64 kWh	10 kWh/m²	0 W	109 W	13.07 °C	20.84 °C	27.24 °C
salle de bain	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	12.66 °C	20.89 °C	28.92 °C
Total	0 kWh	0 kWh/m²	882 kWh	20 kWh/m²	0 W	1 477 W	12.81 °C	21.20 °C	28.90 °C

FIGURE IV.16 – Besoin énergétique de climatisation pour maison sans renforcement

Les besoins en climatisation pour la semaine la plus chaude sont estimés à 882 kWh. D'autres variantes ont été simulées pour comparer l'impact de l'isolant pendant la période estivale.

— ***Variante 02 :*** Renforcement des murs par l'isolant par les épaisseurs suivantes : 5cm – 10cm – 15cm – 20cm.

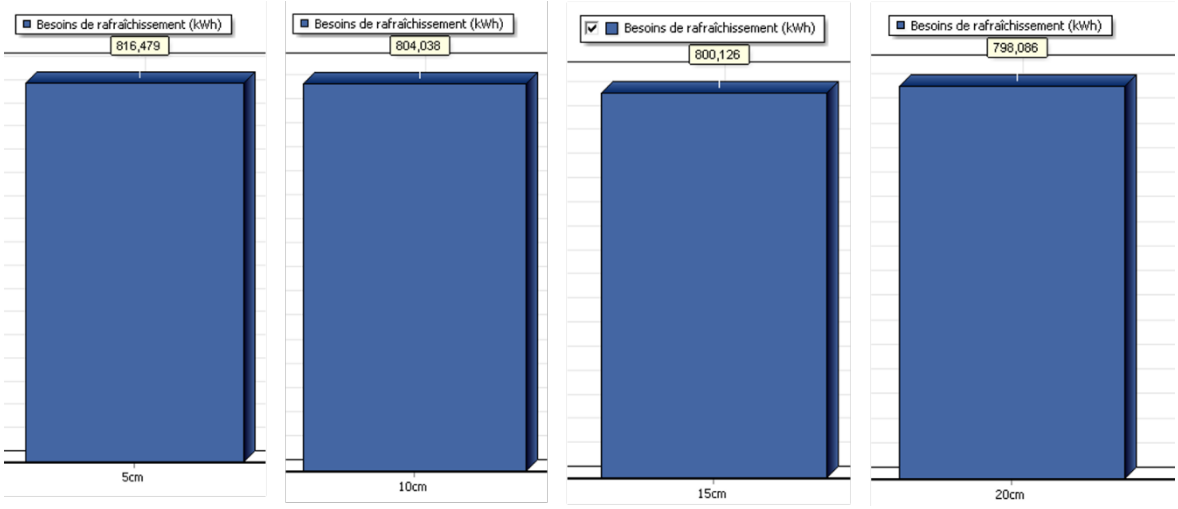


FIGURE IV.17 – Besoin énergétique de climatisation pour variante : renforcement des murs extérieurs

— Le renforcement des murs avec un isolant de 10 cm entraîne une réduction de la consommation de climatisation de 1% par rapport au cas des murs renforcés avec 5 cm d'isolant.
— Une réduction de 2,2% des besoins en climatisation est observée pour le renforcement des murs avec un isolant de 15 cm par rapport aux murs renforcés avec 5 cm d'isolant
— Une réduction de 2,5 % a été observée lors du renforcement des murs avec un isolant de 20 cm par rapport aux murs renforcés avec 5 cm d'isolant.

— ***Variante 03 :*** Remplacement de lame d'air par un isolant de 5 cm :
Après le remplacement de la lame d'air par un isolant de 5 cm, les besoins en climatisation sont réduits à 818 kWh.

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
sejour	0 kWh	0 kWh/m²	355 kWh	23 kWh/m²	0 W	609 W	12.94 °C	21.10 °C	28.23 °C
Cuisine	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	14.06 °C	23.17 °C	33.67 °C
chambre	0 kWh	0 kWh/m²	397 kWh	17 kWh/m²	0 W	603 W	12.68 °C	20.80 °C	27.35 °C
couloir	0 kWh	0 kWh/m²	66 kWh	11 kWh/m²	0 W	106 W	13.12 °C	20.91 °C	27.25 °C
salle de bain	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	12.98 °C	21.17 °C	29.03 °C
Total	0 kWh	0 kWh/m²	818 kWh	18 kWh/m²	0 W	1 317 W	13.08 °C	21.37 °C	28.87 °C

FIGURE IV.18 – Besoin énergétique de climatisation pour variante : remplacement de lame d'air par un isolant de 5cm

— ***Variante 04 :*** Renforcement de toiture par une isolation de 10 et 20cm
Pour le renforcement de la toiture par un isolant de 20 cm, une réduction des besoins en climatisation a été remarquée, estimée à 48%.

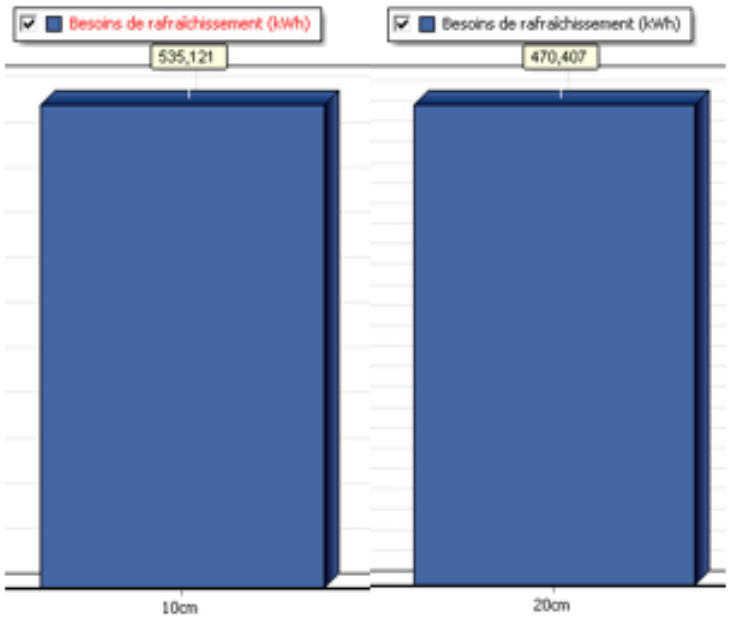


FIGURE IV.19 – Besoin énergétique de climatisation pour variante : renforcement de toiture par un isolant de 10 et 20 cm

— ***Variante 05 :*** Renforcement des murs avec 15 cm d'isolant et la toiture par 10 cm d'isolant.

Pour le renforcement de la toiture avec un isolant de 10 cm et des murs avec15 cm, une réduction de climatisation remarquable a été observée, estimée à 440kWh.

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
sejour	0 kWh	0 kWh/m²	217 kWh	14 kWh/m²	0 W	506 W	24.39 °C	26.53 °C	27.55 °C
Cuisine	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	26.30 °C	29.92 °C	33.73 °C
chambre	0 kWh	0 kWh/m²	204 kWh	9 kWh/m²	0 W	470 W	24.23 °C	26.48 °C	27.00 °C
couloir	0 kWh	0 kWh/m²	20 kWh	3 kWh/m²	0 W	68 W	24.43 °C	26.44 °C	27.00 °C
salle de bain	0 kWh	0 kWh/m²	0 kWh	0 kWh/m²	0 W	0 W	24.88 °C	27.39 °C	28.75 °C
Total	0 kWh	0 kWh/m²	440 kWh	10 kWh/m²	0 W	1 044 W	24.73 °C	27.20 °C	28.53 °C

FIGURE IV.20 – Besoin énergétique de climatisation pour variante : renforcement de toiture par 10 cm d'isolant et les murs par 15cm d'isolant

IV.9.5 Comparaison entre les 05 variantes

Pour l'isolation des murs, on prend 15 cm et 10 cm pour la toiture.

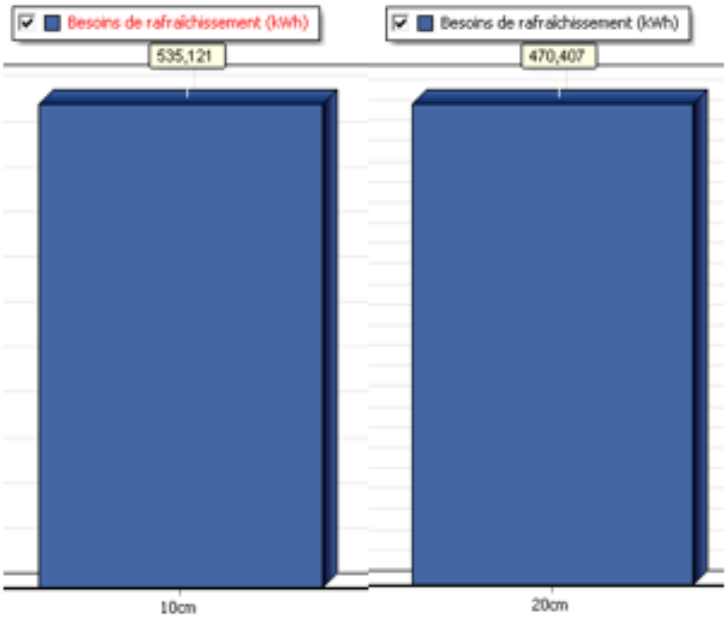


FIGURE IV.21 – Besoin de climatisation en KWh

Pour la comparaison des 5 variantes ; on a remarqué :

— Le renforcement des murs avec un isolant de 15 cm entraine une réduction des besoins en climatisation de 10.77% .

— Le remplacement de la lame d'air des murs extérieurs par un isolant de 5cm entraîne une réduction de la consommation de climatisation estimée à 7,25%.

— Une réduction de 39.3% des besoins en climatisation a été enregistrée lors du renforcement de la toiture avec un isolant de 10 cm.

— Le renforcement des murs avec 15 cm d'isolant et la toiture avec 10 cm entraine une réduction de 50% des besoins en climatisation.

IV.9.6 Conclusion

— Pour réduire les besoins énergétiques en chauffage pendant la période hivernale, le renforcement des murs avec 15 cm d'isolant semble plus efficace que l'isolation de la toiture avec 10 cm d'isolation.

— Pour la période estivale, la réduction des besoins énergétiques en climatisation est plus importante lors du renforcement de la toiture avec un isolant de 10 cm que lors du renforcement des murs avec 15 cm d'isolant.

— La combinaison du renforcement de la toiture avec 10 cm d'isolant et des murs avec 15 cm d'isolant reste la plus efficace pour réduire la consommation en chauffage et en climatisation.

CHAPITRE V. ANALYSE ECONOMIQUE

V.1 Introduction

Dans cette section, nous proposons une analyse économique du prix d'un isolant fabriqué à partir de posidonie, en nous appuyant sur des études antérieures. Egalement, nous incluons une évaluation de l'empreinte écologique d'un isolant commercial. L'objectif de cette analyse est de déterminer le potentiel de commercialisation de ce produit sur le marché, en le comparant avec d'autres isolants disponibles.

V.2 Analyse simplifiée de coût de l'isolant à base de posidonie selon la littérature

Aldi Kuqo et Carsten Mai [77] ont fait une analyse simplifiée des coûts de fabrication d'un isolant à base des herbiers marines et un isolant à base de fibres de bois, l'analyse économique a été réalisée en considérant une densité cible du panneau isolant de 200 kg/m^3. L'étude montre que l'isolation des planches fabriquées à partir de feuilles d'herbiers marins peut être jusqu'à 30 % moins chère que celle fabriquée à partir de bois.

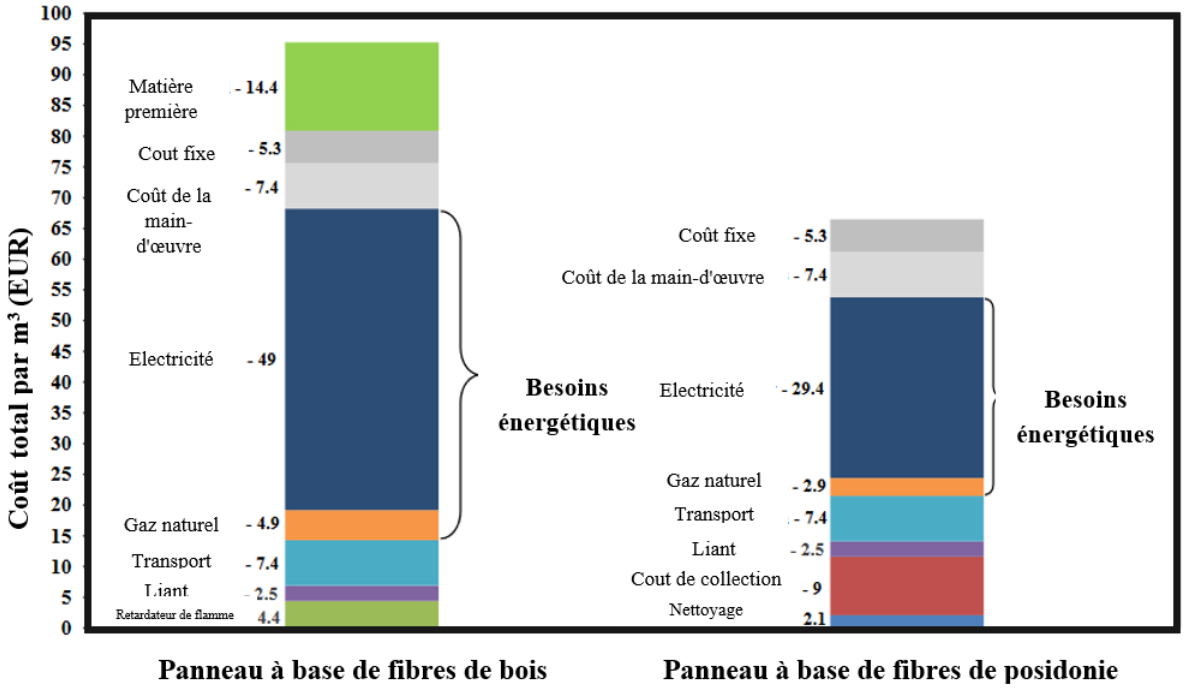


FIGURE V.1 – Une analyse simplifiée des coûts des panneaux isolants à base de feuilles d'herbiers marins et de fibres de bois

Le coût total des panneaux à base d'herbiers marins est estimé à 66,4 euro/m^3 soit 9711,36 DA, tandis que le coût des panneaux à base de fibres de bois atteint 95,1 euro/m^3 soit 13908,88 DA (Figure V.1). Les coûts obtenus se situent dans la fourchette des coûts estimés (37 à 145 euro/m^3), pour les matériaux isolants à base de bois, mentionnés dans des travaux antérieurs. [76] Pour l'estimation du coût de l'isolant à base de posidonie, Aldi Kuqo et al. [77, 75] ont exclu le prix des matières premières, qui sont disponibles en tant que déchets et donc gratuitement, ainsi que le prix des retardateurs de flamme, en raison de la bonne résistance au feu du matériau à base de posidonie.

V.3 Comparaison des prix de l'isolant à base de posidonie avec ceux d'autres isolants

Pour comparer les prix et la durée de vie de l'isolant à base de posidonie, nous avons sélectionné un produit commercialisé sous le nom de Neptutherm (voir annexe) et l'avons comparé avec d'autres isolants écologiques disponibles sur le marché.

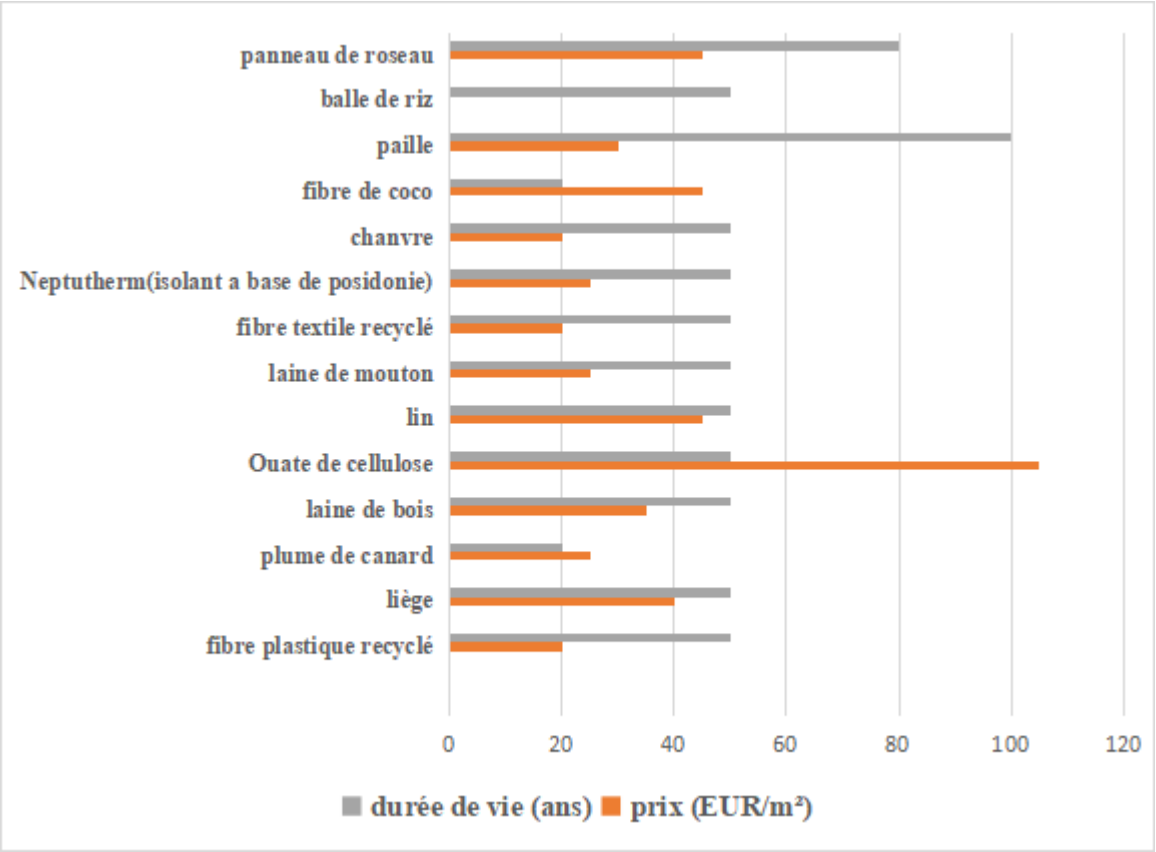


FIGURE V.2 – Comparaison des prix et de la durée de vie des isolants écologiques commercialisés avec le prix de l'isolant à base de posidonie

L'isolant à base de posidonie se vend entre 15 et 25 euros par mètre carré. En comparaison, le liège coûte entre 20 et 40 euros par mètre carré, tandis que le chanvre se situe entre 10 et 20 euros par mètre carré. Ainsi, le prix des panneaux à base de posidonie est comparable à celui des isolants d'origine végétale.

V.3.1 Prix de l'isolant à base de posidonie avec le prix des isolants thermiques en Algérie

Pour comparer les prix des isolants en Algérie avec ceux à base de posidonie, nous prendrons comme référence le prix de l'isolant à base de posidonie commercialisé sous le nom Neptutherm. Le Tableau V.1 présente les prix des isolants thermiques en Algérie.

TABLE V.1 – Tableau comparatif des prix des isolants thermiques en Algérie et le prix d'isolant à base de posidonie

Isolants thermiques	**Prix total** DA/m^2	**Références**
Panneau flexible en laine de verre, selon NF EN 13162, revêtu sur une de ses faces par un complexe de papier kraft avec du polyéthylène qui agit comme un pare-vapeur, de 50 mm d'épaisseur, résistance thermique 1,25 m^2K/W, conductivité thermique 0,04 W/(m.K).	738.74	[78]
Panneau rigide en polystyrène expansé, selon NF EN 13163, à surface lisse et usinage latéral droit, de 30 mm d'épaisseur, résistance thermique 1,05 m^2K/W, conductivité thermique 0,029 W/(m.K).	1098.06	[78]
Complexe multicouche, composé d'une couche de mousse de polyéthylène et un film d'aluminium dans chacune de ses faces, de 4 mm d'épaisseur totale, avec une résistance thermique intrinsèque (sans lame d'air) de 0,16 m^2K/W et une conductivité thermique de 0,025 W/(m.K).	1340.66	[78]
Panneau flexible en laine de verre, selon NF EN 13162, revêtu sur une de ses faces par un complexe de papier kraft avec du polyéthylène qui agit comme un pare-vapeur, de 50 mm d'épaisseur, résistance thermique 1,25 m^2K/W, conductivité thermique 0,04 W/(m.K).	736.74	[78]
Panneau en aggloméré de liège expansé, de 25 mm d'épaisseur, de 1000x500 mm, couleur noire, d'entre 105 et 125 kg/m^3 de densité, résistance thermique 0,65 m^2K/W, conductivité thermique 0,04 W/(m.K).	2137.07	[78]
Panneau rigide en polystyrène expansé, selon NF EN 13163, à surface lisse et usinage latéral droit, de 30 mm d'épaisseur, résistance thermique 1,05 m^2K/W, conductivité thermique 0,029 W/(m.K).	1098.06	[78]
L'isolant à base de posidonie, conductivité thermique 0.039 W/(m.K).	2163.96	[77]

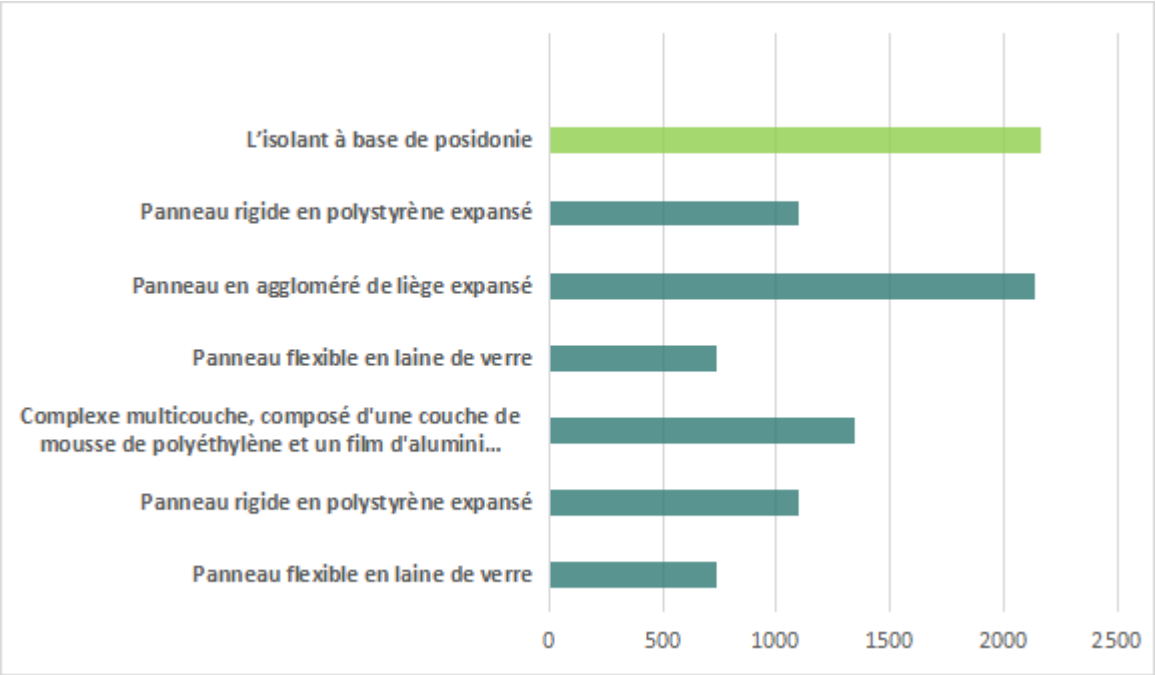


FIGURE V.3 – Comparaison des prix des isolants en Algérie avec l'isolant à base de posidonie

La Figure V.3 montre que les panneaux isolants à base de posidonie ont le coût par mètre carré lequel est comparé avec le prix de panneau en aggloméré de liège expansé.
L'isolant Neptutherm est un produit fabriqué en Allemagne, bien que la matière première, la posidonie, ne soit pas disponible localement.
Le matériau peut constituer un avantage pour le marché algérien des isolants en raison de sa disponibilité le long des côtes algériennes et de la facilité de sa fabrication.

V.4 Empreinte écologique d'un isolant commercial à base de posidonie (NeptuTherm) comparée aux isolants commerciaux

Le Tableau Tableau V.2 montre l'énergie nécessaire pour l'élaboration des matériaux isolants commerciaux, de l'extraction de la matière premières de leur traitement et transformation jusqu'à leur mise en œuvre et les transports successifs nécessaire dans le processus de l'élaboration et les dépenses énergétiques des engins sont également pris en charge. [64]

TABLE V.2 – Consommation d'énergie grise de divers matériaux de construction (en kWh/m^3)

Matériaux	**Conductivité thermique (W/m.K)**	**Consommation d'énergie grise (kWh/m³)**
Laine de verre	0.03-0.04	250
Laine de roche	0.032-0.04	150
Laine de chanvre	0.04	30
Laine de bois	0.04-0.05	13
Laine de mouton	0.04	55
Ouate et laine de cellulose	0.037	6
Cellulose de bois		50
Fibres de lin		30
Fibres de chanvre		40
Plumes	0.033-0.042	50
Argile expansé	0.1-0.16	300
Perlite/vermiculite	0.05-0.06 et 0.06-0.08	230
Liège expansé	0.032-0.045	80
Panneaux de fibre de bois tendre	0.12-0.15	1400
Polystyrène expansé	0.032-0.038	450
Polystyrène extrudé	0.029-0.037	850
Polyuréthane	0.022-0.027	1100
Verre cellulaire		1600
Isolant à base de posidonie (NeptuTherm)	0.039	37-50

Certains des types de fibres naturelles mentionnés offrent une excellente isolation, mais généralement, leur récupération, traitement et transport requièrent une quantité considérable d'énergie. Contrairement à cela, les feuilles d'herbiers marins nécessitent peu de transformations, ce qui pourrait potentiellement entraîner une faible empreinte énergétique [64], la consommation d'énergie primaire est estimé de 37 kWh/m^3 (rembourré ou versé) à 50 kWh/m^3 (soufflé) et donc jusqu'à 30 fois inférieure à celle des autres concurrents. [79, 80]

V.5 Conclusion

En comparant le prix d'un isolant à base de posidonie avec celui d'isolants commerciaux, il apparaît que l'isolant à base de posidonie peut concurrencer certains matériaux isolants tout en ayant une empreinte écologique plus faible.

CONCLUSION

Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de la réduction de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment par le développement de matériaux de construction à faible impact environnemental. Dans cette perspective, nous avons étudié la possibilité de valoriser les fibres naturelles extraites de la plante marine Posidonia oceanica pour la création d'un matériau d'isolation thermique pour les bâtiments. L'analyse bibliographique sur les caractéristiques des fibres naturelles a permis d'identifier les comportements caractéristiques de ces fibres et de sélectionner des méthodes appropriées pour la préparation des échantillons (extraction des fibres, mélanges).
La première partie de cette thèse a été consacrée à l'étude de la possibilité de l'usage des fibres de Posidonia-Oceanica dans l'isolation thermique du bâtiment. Les caractérisations thermiques effectuées avec le CT Mètre ont permis de déterminer l'influence de la quantité de colle. La conductivité thermique mesurée de la fibre de PO varie de 0,0528 à 0,0674$W.m^{-1}.K^{-1}$, avec une diffusivité comprise entre $1,11 \times 10^{-7}$ et $1,23 \times 10^{-7}$ m^2s^{-1}
Les valeurs obtenues font du matériau un candidat prometteur pour concurrencer d'autres isolants industriels.
Les valeurs obtenues de la capacité thermique des fibres de PO varient de 1807 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ à 1492 $J.kg^{-1}.K^{-1}$. Ces fibres pourraient être considérées comme un matériau d'isolation intéressant en raison de leurs valeurs de Cp relativement élevées.
L'augmentation de la fraction volumique de l'adhésif dans les fibres de PO augmente efficacement la masse du matériau sans changer significativement son volume. Cela entraîne un matériau plus dense, ce qui peut présenter des avantages en termes de stabilité structurelle et de performances thermiques, bien que cela puisse légèrement réduire les propriétés d'isolation du matériau.
L'augmentation de la concentration de l'adhésif à la surface d'un matériau réduit efficacement sa capacité d'absorption d'eau en améliorant la liaison, en réduisant la porosité, en augmentant l'hydrophobicité et en améliorant la résistance à l'eau.

De plus, une simulation réalisée à l'aide du logiciel pléiade Comfie pour une maison dans la région d'Alger (Dar Beida) a démontré que le renforcement de l'enveloppe extérieure en utilisant une isolation de 15 cm d'épaisseur a entraîné une réduction de 27.26% des besoins en énergie de chauffage pendant la semaine la plus froide.
En outre, le renforcement de la toiture avec une isolation de 10 cm et des murs extérieurs avec une isolation de 15 cm a permis de réduire les besoins en énergie de chauffage de 42%. Pour la période estivale, le renforcement de la toiture avec 10 cm d'isolant a permis de réduire la consommation de climatisation jusqu'à 39%.
De plus, la combinaison du renforcement des murs avec 15 cm d'isolant et de la toiture avec

10 cm d'isolant a entraîné une réduction de la consommation de climatisation de 50%. Cette amélioration ne représente pas seulement des économies potentielles, mais elle indique également un bâtiment plus économe en énergie et respectueux de l'environnement.
Cependant, il convient de noter que le matériau biosourcé présente des performances limitées en termes d'absorption d'eau en raison de l'utilisation de cette plante marine. Néanmoins, il peut encore être utilisé dans les bâtiments en Algérie en raison de la disponibilité de la matière première, de son faible coût et de son processus de fabrication économe en énergie. En exploitant ce matériau, il est possible de réduire la consommation d'énergie des bâtiments tout en offrant un confort thermique appréciable.
Les travaux effectués dans cette thèse pourront faire l'objet d'études complémentaires :

— Utiliser le matériau dans des parois étanches afin d'éviter l'absorption d'eau.

Sur le plan expérimental et pour compléter les essais menés durant cette thèse, il sera intéressant de :

— Examiner comment le matériau réagit à l'humidité.

— Faire la caractérisation de matériau en associant d'autres liants naturels.

— Etudier la durabilité des matériaux face aux agressions climatiques.

Bibliographie

[1] R. Ghedamsi et al. « Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach ». In : *Energy and Buildings* 121 (2016), p. 309-317. doi : 10.1016/j.enbuild.2015.12.030.

[2] S. Semahi et al. « Development of Spatial Distribution Maps for Energy Demand and Thermal Comfort Estimation in Algeria ». In : *Sustainability* 12.15 (2020), p. 6066. doi : 10.3390/su12156066.

[3] Global Alliance for Buildings T. Low-GHG et Construction. *Global Alliance for Buildings and Construction : Paris, France*. International Energy Agency, UN Environment, 2017.

[4] E.U.U.S. Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2016 with Projections to 2040*. 2016.

[5] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz et Christine Pout. « A review on buildings energy consumption information ». In : *Energy and Buildings* 40 (2008), p. 394-398.

[6] H. ArupFire. *Fire resistance of concrete enclosures, work package 1 : data collection, work package 2 : spalling*. Rapp. tech. 2005.

[7] B Petroleum. *BP Statistical Review of World Energy June 2015*. 2015.

[8] I. Benoudjafer, F. Ghomari et A. Mokhtari. « Etude comparative relative à l'efficacité énergétique de deux appartements situés à Béchar, Algérie ». In : *Journal of Renewable Energies* 15.1 (2023), p. 1-12. doi : 10.54966/jreen.v15i1.296.

[9] M. Khenfer. « Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et plâtres renforcés de fibres de cellulose ». Thèse de doct. 1990.

[10] S. Semahi et al. « Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria ». In : *Building and Environment* 161 (2019), p. 106271. doi : 10.1016/j.buildenv.2019.106271.

[11] C Alonso et Lorenzo Fernandez. « Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments ». In : *Journal of materials science* 39.9 (2004), p. 3015-3024.

[12] J.C. Arnold and S.M. Alston. « Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters ». In : *Journal of Environmental Management* 94 (2012), p. 1-12.

[13] HS Ramaswamy, BM Ahuja, and S Krishnamoorthy. « Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres ». In : *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 5 (1983), p. 3-13.

[14] F. Michaud. « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : aptitude au postformage ». Thèse de doct. 2003.

[15] C. Baley. « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites ». Thèse de doct. 2005.

[16] E. Privas. « Matériaux ligno-cellulosiques « Élaboration et Caractérisation » ». Thèse de doct. 2013.

[17] Libo Yan, Nawawi Chouw, and Krishnan Jayaraman. « Flax fibre and its composites – A review ». In : *Composites Part B : Engineering* 56 (2014), p. 296-317.

[18] Lina Osorio, E Trujillo, Aart Willem Van Vuure, and Ignace Verpoest. « Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites ». In : *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30.5 (2011), p. 396-408.

[19] A. Kuqo, T. Koddenberg et C. Mai. « Use of dry mixing-spraying process for the production of geopolymer-bonded wood and seagrass fibreboards ». In : *Composites Part B : Engineering* 248 (2023), p. 110387. doi : 10.1016/j.compositesb.2022.110387.

[20] JMKJ Biagiotti, Debora Puglia, and Jose M Kenny. « A review on natural fibre-based composites – Part I : Structure, processing and properties of vegetable fibres ». In : *Journal of Natural Fibers* 1 (2004), p. 37-68.

[21] Mohamed Ragoubi. « Contribution à l'amélioration de la compatiblilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne ». Thèse de doct. 2010.

[22] H. Ville. « Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non ». Thèse de doct. Ecole des Mines d'Alès, 2011.

[23] David Sedan. « Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite ». Thèse de doct. Limoges, 2007.

[24] M. Stefanidou et al. « Use of Posidonia oceanica fibres in lime mortars ». In : *Construction and Building Materials* 298 (2021), p. 123881. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.123881.

[25] H. Ezbakhe, D. Taoukil, A. Albouardi, and T. Ajzoul. « Caractérisation mécanique et hydrique d'un béton allégé avec les résidus de bois ». In : *Rev. Int. d'Héliotechnique* 43 (2011), p. 1-7.

[26] Driss Taoukil, Abdelmajid El Bouardi, Taib Ajzoul, and Hassan Ezbakhe. « Effect of the incorporation of wood wool on thermo physical properties of sand mortars ». In : *KSCE Journal of Civil Engineering* 16 (2012), p. 1003-1010.

[27] C. Badouard et al. « Development and characterization of viticulture by-products for building applications ». In : *Construction and Building Materials* 302 (2021), p. 124142. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.124142.

[28] O. Hamdaoui et al. « Thermophysical characterization of Posidonia Oceanica marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings ». In : *Construction and Building Materials* 180 (2018), p. 68-76. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.195.

[29] O. Benjeddou et al. « Effect of Posidonia oceanica Fibers Addition on the Thermal and Acoustic Properties of Cement Paste ». In : *Buildings* 12.7 (2022), p. 909. doi : 10.3390/buildings12070909.

[30] A. Bakatovich, N. Davydenko et F. Gaspar. « Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste ». In : *Energy and Buildings* 180 (2018), p. 72-82. doi : 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.

[31] A. Kilian Mayer et al. « Seagrass- and wood-based cement boards : A comparative study in terms of physico-mechanical and structural properties ». In : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 156 (2022), p. 106864. doi : 10.1016/j.compositesa.2022.106864.

[32] E. Olacia et al. « Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization ». In : *Construction and Building Materials* 239 (2020), p. 117669. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.117669.

[33] M. Stefanidou, V. Kamperidou, A. Konstantinidis, P. Koltsou, and S. Papadopoulos. « Use of Posidonia oceanica fibres in lime mortars ». In : *Construction and Building Materials* 298 (2021), p. 123881.

[34] A. Kuqo et C. Mai. « Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass Posidonia oceanica and pine (Pinus sylvestris) wood fibers ». In : *Construction and Building Materials* 282 (2021), p. 122714. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.122714.

[35] O. Hamdaoui, L. Ibos, A. Mazioud, M. Safi, and O. Limam. « Thermophysical characterization of Posidonia Oceanica marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings ». In : *Construction and Building Materials* 180 (août 2018), p. 68-76. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.195.

[36] I. Muizniece et D. Blumberga. « Thermal Conductivity of Heat Insulation Material Made From Coniferous Needles with Potato Starch Binder ». In : *Energy Procedia* 95 (2016), p. 324-329. doi : 10.1016/j.egypro.2016.09.014.

[37] A. Bourdot et al. « Characterization of a hemp-based agro-material : Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties ». In : *Energy and Buildings* 153 (2017), p. 501-512. doi : 10.1016/j.enbuild.2017.08.022.

[38] B. S. Umurigirwa-Vasseur. « Elaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre-amidon pour le Bâtiment ». Université de Reims, 2014.

[39] M. E. Ali et A. Alabdulkarem. « On thermal characteristics and microstructure of a new insulation material extracted from date palm trees surface fibers ». In : *Construction and Building Materials* 138 (2017), p. 276-284. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.012.

[40] V. Pasqualini, C. Pergent-Martini et G. Pergent. « Use of remote sensing for the characterization of the Mediterranean coastal environment—the case of Posidonia oceanica ». In : *Journal of Coastal Conservation* 4.1 (1998), p. 59-66. doi : 10.1007/BF02806490.

[41] C. Den Harto. *The seagrasses of the world*. T. 1. 1970, p. 273.

[42] R. C. Phillips, E. G. Mehez et D. C. Washington. *Smithsonian Contributions to the Marine Sciences • Number 34 Seagrasses*. Smithsonian Institution Press, 2019.

[43] C. Boudouresque. *Découverte de l'herbier de posidonies*. 2016.

[44] G. Giraud. « Sur une méthode de mesure et de comptage des structures foliaires de Posidonia oceanica (Linnaeus) ». In : (1979), p. 33-39.

[45] G. Caye et A. Meinesz. « Observations sur la floraison et la fructification de Posidonia oceanica dans la baie de Villefranche et en Corse du Sud ». In : *International Workshop on Posidonia oceanica Beds*. Sous la dir. d'Olivier J. Boudouresque C. F. Jeudy de Grissac A. No date available.

[46] J. Ott. « Growth and production in Posidonia oceanica (L.) Delile ». In : *Marine Ecology Progress Series* (1980), p. 47-64.

[47] I. Théllin et C. F. Boudouresque. « Longévité des feuilles de Posidonia oceanica dans un herbier de la baie de Port-Cros (Var, France) ». In : *Rapports et Proceedings de Réunions de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Méditerranée* (1983), p. 115-116.

[48] Gérard Pergent et Christine Pergent-Martini. « Leaf renewal cycle and primary production of Posidonia oceanica in the bay of Lacco Ameno (Ischia, Italy) using lepidochronological analysis ». In : *Aquatic Botany* (1991), p. 49-66.

[49] Charles F. Boudouresque et Alexandre Meinesz. *Découverte de l'herbier de Posidonie*. T. 4. Cahier Parc national Port-Cros. 1982, p. 1-79.

[50] Charles François Boudouresque et al. « Préservation et conservation des herbiers à Posidonia oceanica ». In : (2006).

[51] L. Piazzi, S. Acunto et Francesco Cinelli. « In situ survival and development of posidonia oceanica (l.) delile seedlings ». In : *Aquatic Botany* (1999).

[52] Sylvie Gobert et al. « C, N, P concentrations and requirements of flowering posidonia oceanica shoots ». In : *Hydrobiologia* (2005), p. 253-259.

[53] Francesco Cinelli et al. « Posidonia oceanica : a contribution to the preservation of a major Mediterranean marine ecosystem ». In : *Revista maritime* (1995).

[54] L. Allègue et M. Z. S. Sghaier. « Développement des composites ciments à base de Posidonia Oceanica ». In : *4ième Congrès International Concept - Modélisation des Systèmes Mécaniques*. Mai 2011.

[55] M. Jedidi et A. Abroug. « Valorization of Posidonia oceanica balls for the manufacture of an insulating and ecological material ». In : *Journal of Civil Engineering* (2020), p. 417-430.

[56] S. Panyakaew et S. Fotios. « New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse ». In : *Energy and Buildings* 43.7 (2011), p. 1732-1739. doi : 10.1016/j.enbuild.2011.03.015.

[57] A. Kremensas et al. « Hemp shivs and corn-starch-based biocomposite boards for furniture industry : Improvement of water resistance and reaction to fire ». In : *Industrial Crops and Products* 166 (2021), p. 113477. doi : 10.1016/j.indcrop.2021.113477.

[58] B. Ismail, N. Belayachi et D. Hoxha. « Optimizing performance of insulation materials based on wheat straw, lime and gypsum plaster composites using natural additives ». In : *Construction and Building Materials* 254 (2020), p. 118959. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118959.

[59] T. O. Dénes et D. R. Tămaş-Gavrea. « Natural Fibre Composite Panels for Thermal Insulation of Buildings : A Review ». In : *Scientific Papers* 19 (2019), p. 71-78.

[60] M. Pyda. « Conformational contribution to the heat capacity of the starch and water system ». In : *Journal of Polymer Science Part B : Polymer Physics* 39 (2001), p. 3038-3054.

[61] K. Saito. *Chemical Physics of Molecular Condensed Matter*. Berlin, Germany : Springer Nature Singapore, 2020.

[62] I. Cetiner et A. D. Shea. « Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings ». In : *Energy and Buildings* 168 (2018), p. 374-384. doi : 10.1016/j.enbuild.2018.03.019.

[63] Y. Chihab, N. Laaroussi et M. Garoum. « Thermal performance and energy efficiency of the composite clay and hemp fibers ». In : *Journal of Building Engineering* 73 (2023), p. 106810. doi : 10.1016/j.jobe.2023.106810.

[64] Thierry Gallauziaux et David Fedullo. *Le grand livre de l'isolation*. Eyrolles, 2010.

[65] B. Marques et al. « Mechanical, thermal and acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and expanded cork ». In : *Construction and Building Materials* (2020).

[66] I. Mawardi et al. « Characterization of Thermal Bio-Insulation Materials Based on Oil Palm Wood : The Effect of Hybridization and Particle Size ». In : *Polymers (Basel)* 13.19 (2021), p. 3287. doi : 10.3390/polym13193287.

[67] M. Ndagi et al. « Investigation of the Thermo-Physical and Mechanical Properties of Coir and Sugarcane Bagasse for Low Temperature Insulation ». In : *International Journal of Engineering Materials and Manufacture* 6.4 (2021), p. 340-356. doi : 10.26776/ijemm.06.04.2021.11.

[68] C. Lacoste et al. « Sodium alginate adhesives as binders in wood fibers/textile waste fibers biocomposites for building insulation ». In : *Carbohydrate Polymers* 184 (2018), p. 1-8. doi : 10.1016/j.carbpol.2017.12.019.

[69] M. Raza et al. « Development and characterization of Polystyrene–Date palm surface fibers composites for sustainable heat insulation in construction ». In : *Journal of Building Engineering* 75 (2023), p. 106982. doi : 10.1016/j.jobe.2023.106982.

[70] S. Liuzzi et al. « Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers ». In : *Construction and Building Materials* 158 (2018), p. 24-32. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013.

[71] H. W. Hounkpatin et al. « Thermal characterisation of insulation panels based on vegetable typha domengensis and starch ». In : *Scientific African* 21 (2023), e01786. doi : 10.1016/j.sciaf.2023.e01786.

[72] Y. Zhou, A. Trabelsi et M. El Mankibi. « Hygrothermal properties of insulation materials from rice straw and natural binders for buildings ». In : *Construction and Building Materials* 372 (2023), p. 130770. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2023.130770.

[73] M. Ezziane et al. *Caractérisations non destructive de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température*. HAL Id : hal-01216239. 2015.

[74] D. Boukhelkhal et al. « Elaboration of bio-based building materials made from recycled olive core ». In : *MRS Energy Sustainability* 8.2 (2021), p. 98-109. doi : 10.1557/s43581-021-00006-8.

[75] J. M. Mathews, B. Vivek et M. Charde. « Thermal insulation panels for buildings using recycled cardboard : Experimental characterization and optimum selection ». In : *Energy and Buildings* 281 (2023), p. 112747. doi : 10.1016/j.enbuild.2022.112747.

[76] L. Rocchi et al. « Production of insulating panel from pruning remains : an economic and environmental analysis ». In : *Energy Procedia* 147 (2018), p. 145-153. doi : 10.1016/j.egypro.2018.07.044.

[77] A. Kuqo et C. Mai. « Seagrass Leaves : An Alternative Resource for the Production of Insulation Materials ». In : *Materials* 15.19 (2022), p. 6933. doi : 10.3390/ma15196933.

[78] L. pour l'Architecture et l'Ingénierie de la Construction. *Générateur de prix de la construction. Générateur de Prix. Algérie*.

[79] N. de matières premières renouvelables. *NeptuTherm*. https://www.neptugmbh.de/eigenschaften.html. Accessed : 2024-08-26.

[80] C. M. Sous direction des statistiques de l'énergie. « Bilan énergétique de la France pour 2014 ». In : *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* (2015), 72–100.

Annexe

.1 Annexe 01

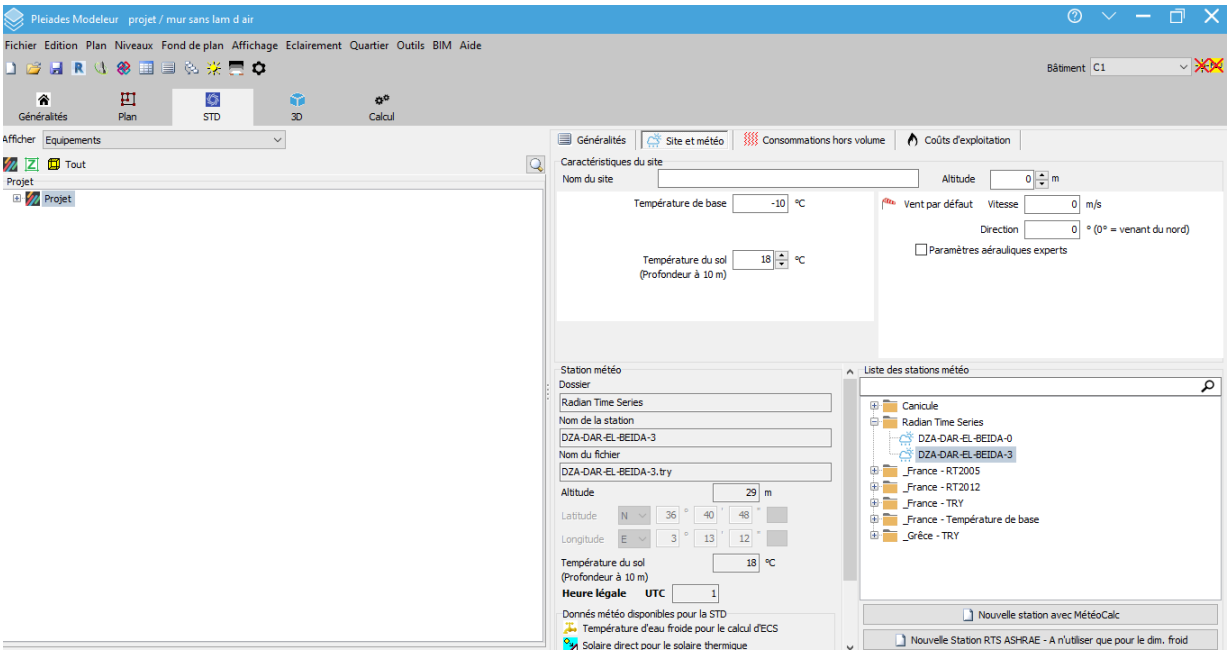


FIGURE 4 – choix de site de dar Beida sur logiciel pléiade

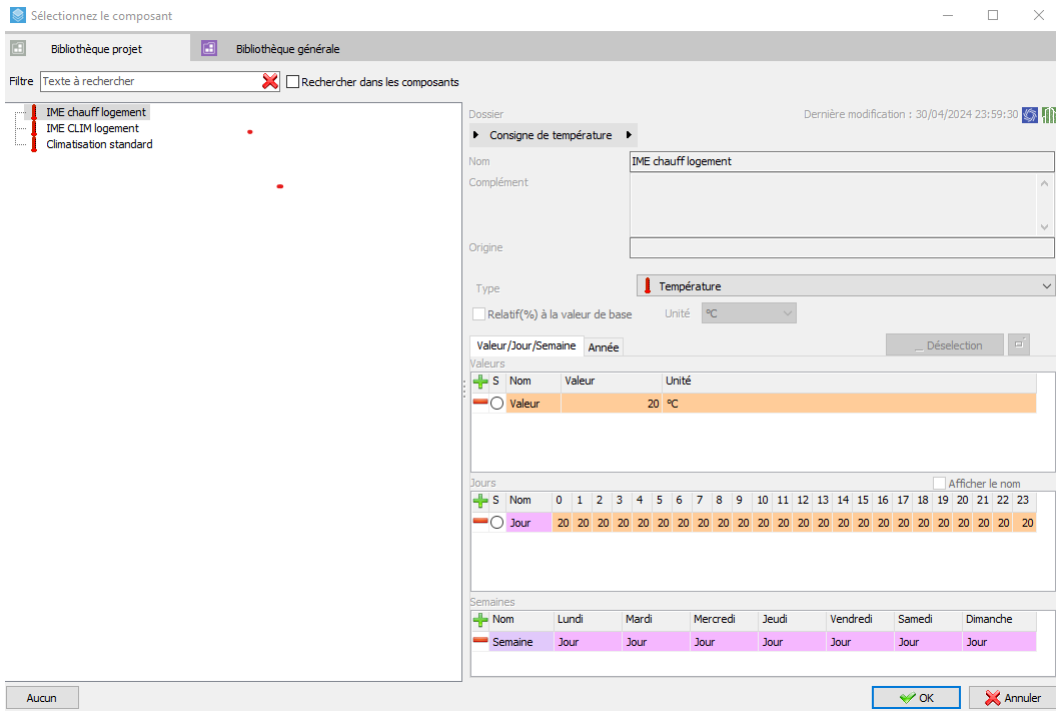


FIGURE 5 – scenario de chauffage sur logiciel pléiade

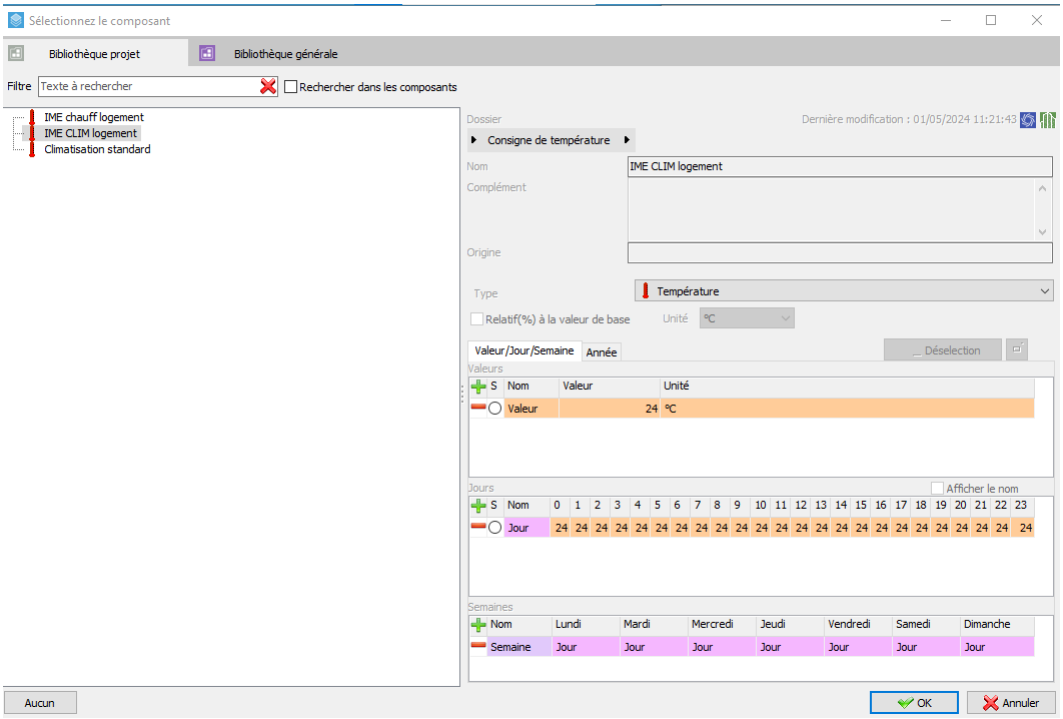


FIGURE 6 – scenario de chauffage sur logiciel pléiade

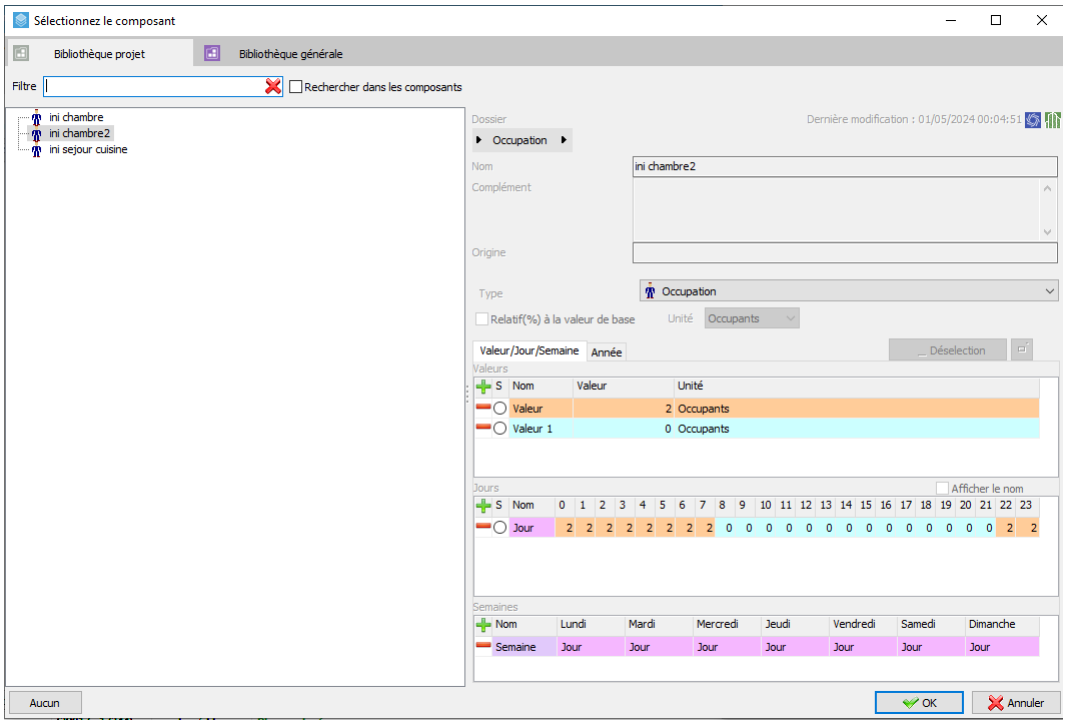


FIGURE 7 – scenario de chauffage sur logiciel pléiade

FIGURE 8 – scenario d'occupation dans le séjour et la cuisine sur logiciel pléiade

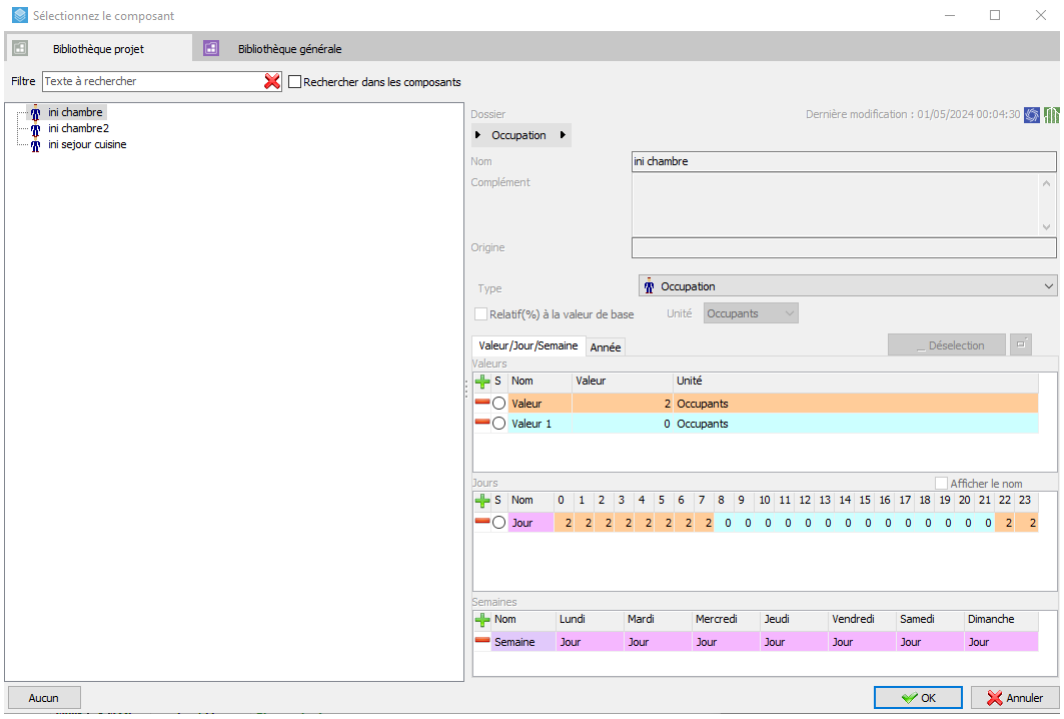


FIGURE 9 – scenario d'occupation dans la chambre sur logiciel pléiade

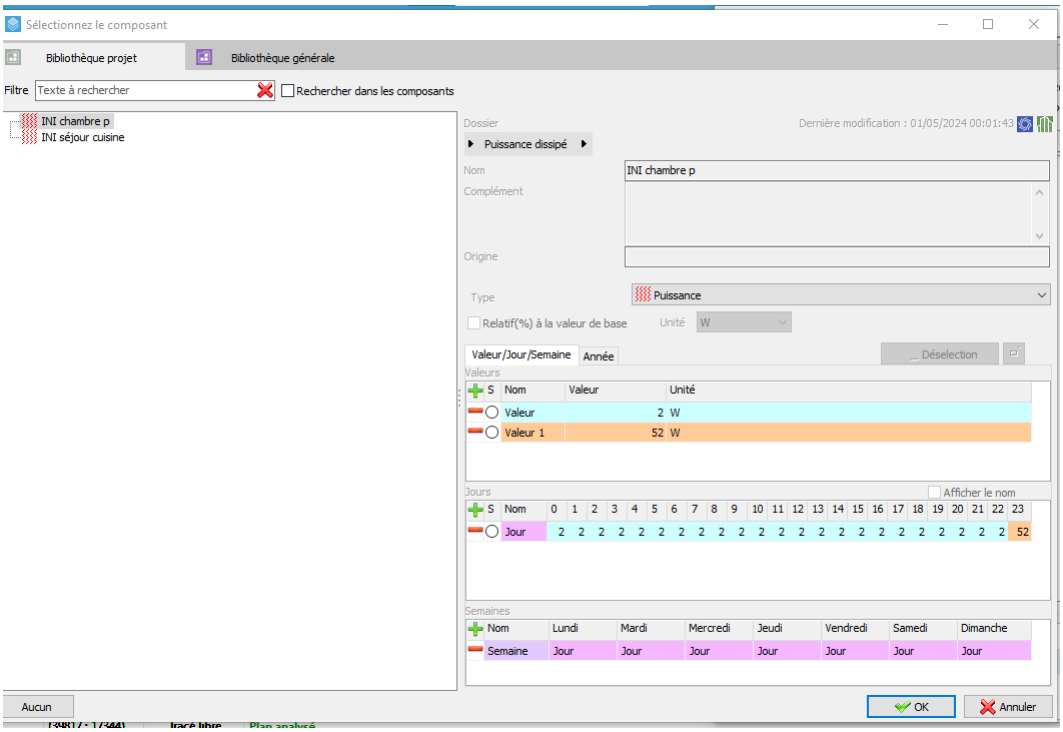


FIGURE 10 – scenario puissance dissipé dans les chambres sur logiciel pléiade

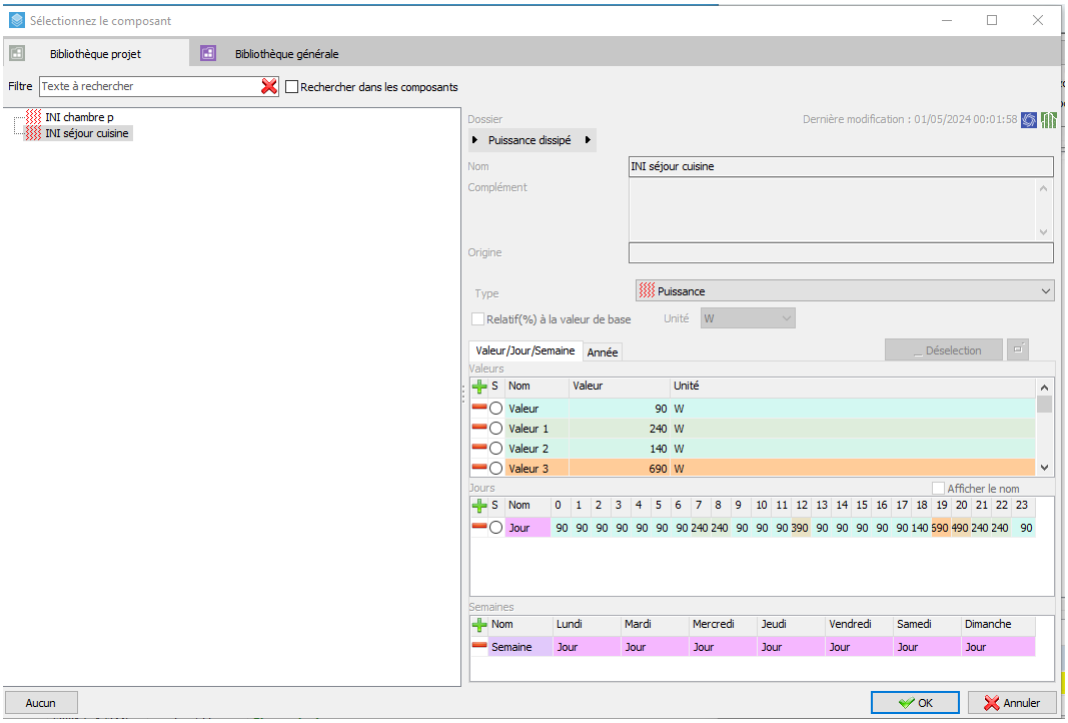


FIGURE 11 – scenario puissance dissipé dans le séjour et la cuisine sur logiciel pléiade

.2 Annexe 02



FIGURE 12 – Application de l'isolant NeptuTherm dans les combles



FIGURE 13 – L'application de l'isolant NeptuTherm dans l'isolation intérieure



FIGURE 14 – application de l'isolant neptuTherm dans les façades



FIGURE 15 – application de l'isolant NeptuTherm dans les toitures