



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Génie mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energetique Mécanique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

DJOUDI Abdennasser, et BEN ZINE Abderrehmane

Le : 25-06-2024

Caractérisation Thermique et physique d'un nouveau bio-composite à structure Sandwich utilisé dans la construction des mobiles-homes écologiques

Jury :

Dr.	AOUES Kamel	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	DJOUDI Tarek	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	DJEMAI Hocine	MCA	Université de Biskra	Examineur
Dr.	ADISSA Chahra	MCA	Université de Biskra	Membre de l'incubateur
Mr	BOUZAHER A. Moutaleb	Directeur	EIFE	Partenaire économique

Année universitaire : 2023 - 2024

المخلص

تتكون الدراسة الحالية من المنهج التجريبي تليها دراسة الحالة عن طريق المحاكاة، بواسطة برنامج التحليل الهندسي ANSYS. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم ألواح عازلة عالية الأداء، مخصصة للعزل الحراري للمباني أو معدات التجفيف المستخدمة لتجفيف المواد الغذائية، مع الحفاظ على درجة الحرارة الداخلية للحاوية. لقد تم تطوير أربعة أنواع متميزة من الألواح العازلة، وتتميز بطبقة القلب. تشمل الطبقات القلبية المختلفة المستخدمة في تصنيع الألواح العازلة الجص، خشب النخيل، مادة مركبة من خشب النخيل مع الغراء، بالإضافة إلى الألواح ذات قلب البوليسترين. الطبقة الخارجية مصنوعة من مادة مركبة تجمع بين الإيبوكسي وألياف النخيل. تم إجراء ثلاث تجارب على الألواح العازلة. التجربة الأولى كشفت ان قياسات الكثافة الفيزيائية لواحالبوليسترين لديها كثافة أقل بنسبة 85% من الألواح العازلة ذات القلب الجبسي. كما أظهرت التجربة الثانية ان التوصيل الحراري يظهر تفوقاً كبيراً للألواح ذات قلب البوليسترين بنسبة 91.1%، مما يشير إلى وجود علاقة محتملة بين التوصيل الحراري وكثافة اللوحة. أما التجربة الثالثة فقد هدفت إلى تقييم الأداء الحراري للهياكل الساندوتشية من خلال إنشاء مكعبات من الألواح الساندوتشية بأبعاد $200 \times 200 \times 200$ مم ثم تعريضها للبيئة الخارجية لقياس الفرق في درجات الحرارة بين الوسط الداخلي والخارجي لها. تم تحديد أوقات التجربة بعشر ساعات، كشفت خلالها التجربة عن اختلاف في درجة الحرارة القصوى بعد خمس ساعات. ولوحظ وجود اختلاف كبير بين العينات التي تحتوي على الجبس والبوليسترين في القلب، في حين لوحظ تقارب النتائج بالنسبة لتلك التي تحتوي على ألواح جذع النخيل والقلب ذو المادة المركبة من نشارة النخيل مع الغراء. أتاحت هذه الملاحظات إجراء عمليات محاكاة رقمية باستخدام برنامج ANSYS من أجل تحليل السلوك الحراري لهذه الألواح وتوزيع الحرارة داخل الصناديق، بهدف تحسينها في المستقبل. ويمكن استخدام هذه النتائج لتصميم مجففات الطعام باستخدام الحرارة الشمسية من هذه الصناديق، أو أن تكون بمثابة أساس للبحث والتطوير في المستقبل. ويمكن أيضاً استخدامها كألواح عازلة مدمجة في هياكل البناء.

الكلمات المفتاحية

الواح الساندوتش، مادة مركبة، الكثافة، الناقلية الحرارية، نخيل التمر.

Résumé

La présente étude consiste en une approche expérimentale suivie d'une étude de cas via simulation, en utilisant le logiciel d'analyse technique ANSYS. L'objectif principal de ces travaux est de concevoir des panneaux isolants performants, destinés à l'isolation thermique des bâtiments ou des équipements de séchage utilisés pour le séchage des denrées alimentaires, tout en maintenant la température interne du conteneur. Quatre types distincts de panneaux isolants ont été développés, se distinguant par la couche centrale. Les différentes couches d'âme utilisées dans la fabrication des panneaux sandwich comprennent le plâtre, le bois de palmier, le matériau composite en bois de palmier avec colle, ainsi que les panneaux avec âme en polystyrène. La couche extérieure est constituée d'un matériau composite combinant des fibres d'époxy et de palme. Trois expériences ont été réalisées sur des panneaux isolants. La première expérience a révélé que les mesures de densité physique des panneaux de polystyrène ont une densité inférieure de 85 % à celle des panneaux isolants à âme de gypse. La deuxième expérience a également montré que la conductivité thermique était nettement supérieure à celle des panneaux avec une âme en polystyrène à 91,1 %, ce qui indique une relation possible entre la conductivité thermique et la densité du panneau. La troisième expérimentation visait à évaluer les performances thermiques des structures sandwich en créant des cubes de panneaux sandwich de dimensions $200 \times 200 \times 200$ mm³ puis en les exposant au milieu extérieur pour mesurer la différence de température entre leurs milieux intérieur et extérieur. La durée des expériences a été fixée à dix heures, au cours desquelles l'expérience a révélé une différence de température maximale après cinq heures. Une différence significative a été observée entre les échantillons contenant du gypse et du polystyrène dans le noyau, tandis que des résultats similaires ont été observés pour ceux contenant des panneaux de tronc de palmier et le noyau avec un matériau composite de copeaux de palmier avec de la colle. Ces observations ont permis de réaliser des simulations numériques à l'aide du logiciel ANSYS afin d'analyser le comportement thermique de ces panneaux et la répartition de la chaleur au sein des caissons, dans le but de les améliorer dans le futur. Ces résultats pourraient être utilisés pour concevoir des séchoirs alimentaires chauffés à l'énergie solaire à partir de ces boîtes, ou servir de base à de futures recherches et développements. Ils peuvent également être utilisés comme panneaux isolants intégrés dans les structures des bâtiments.

Mots des clés:

Panneaux sandwich, Matériau composite, Densité, Conductivité thermique, Palmier dattier.

REMERCIEMENTS

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-Puissant pour sa grâce, qui nous a donné la santé et le courage qui nous ont permis d'atteindre et de terminer cette étape.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master.

Tout d'abord, nous remercions notre Encadreur, **Dr.DJOUDI Tarek**, et même son assistant **PhD.SAHRAOUI Abderrahmane**, pour sa guidance, ses conseils précieux et son soutien tout au long de ce projet. Ses compétences, son expertise et sa disponibilité ont été essentielles à la réussite de ce travail.

Un merci particulier à nos parents, nos frères et nos sœurs, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et financier, et leur croyance en nous. Leur soutien indéfectible nous a permis de surmonter les moments difficiles et de rester concentré sur nos objectifs.

Nous sommes également reconnaissants envers nos **Dr. CHOUKIMahboub**, Et **Dr.DJEMAI Hocine**, **Mr.TRIR Boubakeur**,**Mr. Djoudi Abderrahmane**, pour leur encouragement et leur assistance. Leurs discussions stimulantes et leurs suggestions ont grandement enrichi notre réflexion et ont permis d'améliorer la qualité de cette recherche.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien, sous toutes ses formes, a été inestimable et a largement contribué à l'aboutissement de ce projet.

DJOUDI Abdennasser, et BEN ZINE Abderrehmane

DEDICACE

Dédicace

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, **Dr. DJOUDI Tarek** Et leur assistant **PhD. SAHRAOUI Abderrahmane**. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

À ma mère **ELHADI Fatma**, qui m'a soutenue et encouragée durant ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Je remercie mes sœurs **Ibtissem, Soumia, Souad et Hanane**. Pour leurs encouragements. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours. Et biensur mes frères **Djamal, Abderrahmane, Salim, Mohamed, Hakim, Azza**. Mes soeurs **Samia, Salima, Hayat, Sabrina, Hana**.

Mes oncles **Kamel, Zahro**.

Je remercie quelqu'un qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir

Enfin, je remercie mes chers **Wail, Farhat, Mahieddine, Hako, Nassim, Abdou, Abdenmour, Labrodi, Kadiro, Haithem, Hama, Bilal, Ramzi, Zaki, Haiba, Salamo et Tayeb**, qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

اخيرا اهدي هذا النجاح الى أعلى روح فقدها، والدي رحمة الله عليه
المجاهد الراحل سعيد جودي. متمنيا من الله عز وجل ان أكون واطل رافعا
لاسلك وسببا في ثقل ميزان حسناتك.

DJOUDI Abdennasser

DEDICACE

Dédicace

À mes parents, **Mr. Mohamed Bachir**, et **Mme. Gasmi Anne**.

Pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants. Vous êtes ma source d'inspiration et ma plus grande force. Ce mémoire vous est dédié en signe de reconnaissance et de gratitude pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À ma sœur **Amira** et mes frères **Abdou, Hako et Nounou**.

Pour leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de ce parcours. Votre présence et vos mots réconfortants m'ont donné la motivation nécessaire pour persévérer.

À mes amis, **Fathi, Salim, Alilou, Yassine, Luffi, Ali, Nigro, Aymen, Hareth, Zargo, L'hindi, Flafi, Haithem, Khaled, Raouf, Akram, Hodeifa**.

Pour leur amitié précieuse, leur soutien et les moments de partage qui ont égayé mon chemin. Merci pour votre compréhension et votre aide précieuse.

Et à tous ceux qui ont cru en moi,

Pour votre foi en mes capacités et vos encouragements constants. Ce mémoire est le fruit de votre soutien et de votre confiance.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude. Il y a beaucoup de noms. Si je les ai oubliés, pardonnez-moi.

BEN ZINE Abderrehmane

TABLE DES MATIERES

Table des matières

المخلص	I
Résume	I
Remerciements	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Table des matières	IV
Liste des Tableaux	IX
Liste des Figures	X

INTRODUCTION GENERALE

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

CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS

I.1. Introduction	5
I.2. L'isolation thermique.....	5
I.2.1. Définition de l'isolation thermique	5
I.2.2. L'importance de l'isolation thermique dans la structure moderne.....	6
I.2.3. Fondements théoriques de l'isolation thermique.....	6
I.2.3.1. Principes de transfert de chaleur	6
I.2.3.2. La capacité thermique (pc).....	7
I.2.3.3. Résistance thermique (R-Value).....	9
I.2.3.4. La diffusivité thermique	10
I.2.3.5. L'effusivité thermique.....	10

TABLE DES MATIERES

I.3. Types des matériaux isolants	10
I.3.1. Matériaux isolants traditionnels	10
I.3.1.1. Laine minérale (verre et roche)	10
I.3.1.2. Polystyrène expansé (EPS)	11
I.3.1.3. Polyuréthane	12
I.3.2. Le plâtre	13
I.3.2.1. Définition	13
I.3.2.2. Propriétés de Plâtre	13
I.3.3. Matériaux isolants écologiques et recyclable	14
I.3.3.1. Fibres végétales	14
I.3.3.2. Panneau de fibres de bois (MDF)	15
I.3.4. Caractéristiques de quelques isolants	16
I.4. Matériaux composites	16
I.4.1. Définition	16
I.4.2. Types des matériaux composites	17
I.4.3. Bio-Composites (Composite à base de fibres végétale)	18
I.4.3.1. Définition	18
I.4.3.2. Caractéristiques des matériaux bio-composites	18
I.4.3.3. Avantages et inconvénients des matériaux bio-composites	18
I.4.4. Classification des matériaux composites à base de fibres naturelles	19
I.5. Matériaux composite à structure Sandwich	19
I.5.1. Définition	19
I.5.2. Les constituants du structure sandwich	20
I.5.2.1. Le cœur	20
I.5.2.2. Les peaux	20

TABLE DES MATIERES

I.5.3. Caractéristiques des matériaux composites à structures sandwichs	21
I.5.4. Classification des matériaux composites à structures sandwichs	22
I.6. Conclusion.....	22

CHAPITRE II CARACTÉRISATION DES MATERIAUX

II.1. Introduction	23
II.2. Protocole de préparation des structures Sandwichs.....	23
II.2.1. Les peaux.....	23
II.2.2. Les cœurs	24
II.2.2.1. Plâtre	26
II.2.2.2. Pétiole brute	25
II.2.2.3. Le moulage	25
II.2.2.4. Bio-composite à base de fibre de pétiole.....	26
II.2.2.5. Polystyrène	Error! Bookmark not defined.
II.2.3. Les éprouvettes des tests thermique et physique.....	28
II.3. Montage des éprouvettes pour une étude de cas	Error! Bookmark not defined.
II.4. Les tests thermiques et physiques.....	30
II.4.1. Test Physique (Densité).....	30
II.4.2. Tests thermiques (Conductivité thermique)	31
II.4.3. Performance thermique des matériaux composites à structure Sandwich.....	32
II.5. Conclusion	32

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1. Introduction	35
III.2. Discussion des résultats de test physique et thermique	35
III.2.1. Résultats physiques	35
III.2.2. Résultats thermiques	37
III.2.3. Performance thermique des structures Sandwich	38
III.3. Conclusion	39

CHAPITRE IV

ÉTUDE NUMÉRIQUE

IV.1. Introduction	41
IV.2. Programmes utilisés dans le processus de simulation	41
IV.2.1. Logiciel SolidWorks	41
IV.2.2. Logiciel ANSYS	42
IV.3. Etude de cas d'une boîte de panneaux à structure sandwich	42
IV.3.1. Conception de la boîte en 3D à l'aide du logiciel Solid Works	42
IV.3.2. Analyse thermique à l'aide d'ANSYS Workbench	44
IV.4. Conclusion	49

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale	51
----------------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographes	55
----------------------------	----

ANNEXE

TABLE DES MATIERES

Liste des Tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1. La conductivité thermique de certains matériaux.	8
Tableau I.2. Caractéristiques de quelques isolants	16
Tableau I.3. Types de composite	17

CHAPITRE II

Tableau II.1. Propriétés mécaniques, physiques et thermiques de peau	24
--	----

CHAPITRE III

Tableau III.1. Résultats des essais physique et thermique.	35
Tableau III.2. Les résultats des essais de performance thermique des structures sandwich.	38

CHAPITRE IV

Tableau IV.1. Conductivité thermique des panneaux sandwich.	45
Tableau IV.2. Les variations de température de panneau sandwich.	46
Tableau IV.3. Résultats de l'étude analytique de la conductivité thermique de quatre types différents de panneaux sandwich.	47

Liste des Figures

CHAPITRE I

Fig.I.1. Comment ca marche l'isolation thermique d'une maison	5
Fig.I.2. Les différents modes de transfert de chaleur	7
Fig.I.3. Le laine de roche	11
Fig.I.4. Le laine de verre	11
Fig.I.5. Le polystyrène expansé	12
Fig.I.6. La mousse de polyuréthane	12
Fig.I.7. La poudre de plâtre	13
Fig.I.8. Exemples des fibres végétales	15
Fig.I.9. Panneau isolant de fibres de bois	15
Fig.I.10. Constituant de base d'un composite	16
Fig.I.11. Classification des matériaux composites à base de fibres naturelles	19
Fig.I.12. Schéma d'une structure sandwich	20
Fig.I.13. Classification des structures sandwichs	22

CHAPITRE II

Fig.II.1. Peau matériaux composite.	23
Fig.II.2. Préparation d'une Plaque de plâtre (GP).	27
Fig.II.3. Préparation d'une plaque de pétiole palme (PB).	25
Fig.II.4. Moule en bois.	25
Fig.II.5. Étapes de fabrication du cœur BC.	26
Fig.II.6. Étapes de fabrication du cœur PE.	24
Fig.II.7. Structures composite sandwiches (Peau et cœur).	27

LISTE DES FIGURES

Fig.II.8. Exemple de bio-composite à structure Sandwich.	28
Fig.II.9. peau de la structure Sandwich.	28
Fig.II.10. A: Échantillon de SSCGP; B:Échantillon de SSCPB; C:Échantillon de SSCBC; D:Échantillon de SSCPE.....	Error! Bookmark not defined.
Fig.II.11. Couper des plaques à un angle de 45°.	29
Fig.II.12. Un trou au centre de chaque panneau sandwich.....	30
Fig.II.13. Collé les six panneaux sandwiches à former un cube.	30
Fig.II.14. Mesure de la conductivité thermique.....	31
Fig.II.15. Performance thermique des structures Sandwich.	32

CHAPITRE III

Fig.III.1. Densité des structures Sandwich.	36
Fig.III.2. Conductivité thermique des structures Sandwich.....	37
Fig.III.3. Variation de ΔT_{moy} en fonction de temps.	39

CHAPITRE IV

Fig.IV.1. Interface SolidWorks 2023.	41
Fig.IV.2. Interface ANSYS 2019R3.	42
Fig.IV.3. Dessin détaillé de la boîte en panneaux sandwich.....	43
Fig.IV.4. Extension du fichier d'installation pour la découpe des panneaux sandwich pour former le caisson.	44
Fig.IV.5. Steady-State Thermal.....	44
Fig.IV.6. Données géométriques en état thermique stable.....	45
Fig.IV.7. Étapes pour étudier l'analyse technique pour trouver la conductivité thermique du mur.	46

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

La réduction de la consommation d'énergie est devenue une priorité mondiale en raison de ses implications économiques, environnementales et sociales. À une époque où les ressources naturelles sont de plus en plus limitées et où les préoccupations concernant le changement climatique s'intensifient, il est essentiel de trouver des moyens efficaces pour diminuer notre dépendance énergétique. Réduire la consommation d'énergie ne se limite pas seulement à une diminution des factures d'électricité ou de gaz, mais contribue également à la protection de l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et à la préservation des ressources naturelles pour les générations futures. Cela passe par l'adoption de technologies plus efficaces, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, l'optimisation des processus industriels, et la sensibilisation des consommateurs à des pratiques de consommation plus responsables. En intégrant ces stratégies à tous les niveaux de la société, nous pouvons non seulement atteindre des objectifs économiques plus durables, mais aussi jouer un rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique et la protection de notre planète.

Réduire la consommation d'énergie est un enjeu crucial qui nécessite des actions coordonnées et variées. La réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments est essentielle pour diminuer les coûts énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre. Il est possible de réduire significativement la consommation d'énergie tout en améliorant la qualité de vie et en protégeant l'environnement. La mise en œuvre de ces mesures nécessite la coopération des gouvernements, des entreprises et des citoyens, ainsi qu'un engagement continu envers des pratiques durables et innovantes.

Voici quelques solutions plus tôt proposées pour atteindre cet objectif :

- Panneaux solaires photovoltaïques;
- Chauffe-eau solaires;
- Ventilation mécanique contrôlée (VMC);
- Récupération de chaleur;
- Réducteurs de débit et robinets économes;
- Chauffe-eau instantanés;
- Isolation de l'habitat;

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Isolation des combles;
- Systèmes de Chauffage et de Climatisation Efficaces (Pompes à chaleur, chaudières modernes à condensation);
- Isolation thermique (Isolation des murs et des toits, Fenêtres à double ou triple vitrage).

L'isolation thermique est un aspect crucial de la construction moderne, visant à réduire les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Elle joue un rôle essentiel dans la conservation de l'énergie, le confort des occupants et la réduction des coûts de chauffage et de climatisation. En effet, en minimisant les pertes de chaleur en hiver et en empêchant la pénétration de chaleur excessive en été, une isolation thermique efficace permet de maintenir des conditions intérieures confortables tout en réduisant la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation.

L'isolation thermique peut être mise en œuvre à diverses étapes de la construction, que ce soit lors de la conception initiale d'un bâtiment ou lors de rénovations ultérieures. Les matériaux isolants, tels que la laine de verre, la laine de roche, le polystyrène expansé (EPS), le polyuréthane et bien d'autres, sont utilisés pour créer une barrière thermique entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

En plus des matériaux isolants, d'autres éléments contribuent à l'efficacité de l'isolation thermique, notamment les fenêtres à double vitrage, les portes étanches, les systèmes de ventilation contrôlée et les techniques de construction avancées telles que les murs à ossature isolée et les toits verts.

Les avantages de l'isolation thermique vont au-delà de la simple réduction des coûts énergétiques. Elle contribue également à la durabilité environnementale en réduisant les émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation d'énergie. De plus, une meilleure isolation thermique peut améliorer la qualité de l'air intérieur en réduisant les infiltrations d'humidité et en prévenant la formation de moisissures.

En résumé, l'isolation thermique est un élément fondamental de la construction durable et de la gestion efficace de l'énergie dans les bâtiments. Son importance croissante dans un contexte de préoccupations environnementales et de coûts énergétiques en constante augmentation en fait un

INTRODUCTION GÉNÉRALE

domaine d'intérêt majeur pour les concepteurs, les constructeurs et les propriétaires de bâtiments et les énergéticiens.

L'objectif de ce travail est d'exploiter les déchets des palmiers dattiers pour fabriquer un composé biologique à structure sandwich, puis de l'étudier en termes de propriétés physiques et thermiques. Dans le but de valoriser ce bio-composite en isolation thermique.

Notre travail est constitué de quatre Chapitre :

CHAPITRE I : Généralités.

Dans ce chapitre, nous avons expliqué l'isolation thermique et son importance dans la construction moderne, en détaillant ses bases théoriques. Nous avons mentionné les différents matériaux utilisés, en particulier les matériaux composites et leurs différentes variétés, incluant les bio-composites. Nous avons ensuite discuté des structures sandwich, de leurs caractéristiques et de leurs différentes classifications.

CHAPITRE II : Caractérisation des matériaux.

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les étapes que nous avons adoptées pour réaliser les matériaux composites et les structures sandwich concernées par notre étude. Nous avons également expliqué les tests appliqués sur les matériaux composites à structure sandwich que nous avons élaboré.

CHAPITRE III : Résultats et discussion.

Ce chapitre présente l'interprétation des différentes résultats obtenues par les tests physiques et thermiques; De plus, une discussion sur les résultats d'une étude de cas.

CHAPITRE IV : Étude numérique.

Ce chapitre parle d'une simulation numérique d'une étude de cas et les logiciels utilisés dans celle-ci. Incluant un dessin 3D et les résultats de simulation numérique de cette étude de cas

Notre travail est attaché à **une annexe** du projet **START-UP** (BMC, problème traitée, solution proposée...) sur la construction des mobile-homes écologiques.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

I.1. Introduction

L'isolation thermique des bâtiments représente un enjeu majeur dans la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration du confort thermique des occupants. À une époque où les préoccupations environnementales et économiques sont au cœur des politiques de développement durable, l'optimisation de l'isolation thermique devient une priorité pour les chercheurs, les ingénieurs. L'isolation thermique des bâtiments représente un enjeu majeur dans la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration du confort thermique des occupants. À une époque où les préoccupations environnementales et économiques sont au cœur des politiques de développement durable, l'optimisation de l'isolation thermique devient une priorité pour les chercheurs, les ingénieurs... etc.

Ce chapitre vise à définir l'isolation et montrer son importance, expliquer ses fondements théoriques et d'explorer les avancées récentes et les matériaux innovants dans le domaine de l'isolation thermique.

I.2. L'isolation thermique

I.2.1. Définition de l'isolation thermique

L'isolation thermique est l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les pertes de chaleur et réduire les échanges thermiques entre un milieu chaud et un milieu froid. Elle permet de réduire la consommation énergétique, donc les coûts et les émissions de gaz à effet de serre[1].

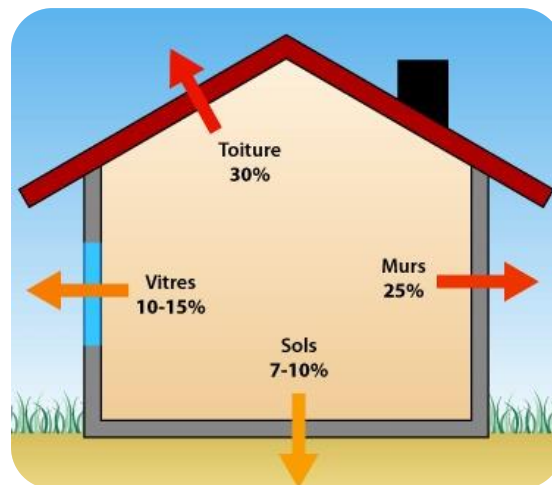


Fig.I.1. Comment ça marche l'isolation thermique d'une maison [2].

I.2.2. L'importance de l'isolation thermique dans la structure moderne

L'isolation thermique présente toujours des avantages : pendant les mois d'hiver, elle retient la chaleur à l'intérieur du logement, réduisant ainsi les pertes vers l'extérieur. À l'inverse, pendant les mois d'été, elle contribue à maintenir une température plus fraîche à l'intérieur en limitant les gains de chaleur. De plus, l'isolation aide à prévenir les condensations désagréables, qui nécessitent souvent une surchauffe de l'air pour maintenir un niveau de confort satisfaisant.

I.2.3. Fondements théoriques de l'isolation thermique

I.2.3.1. Principes de transfert de chaleur :

➤ Conduction

La conduction thermique est un phénomène spécifique aux solides comme le bois et les métaux, et il s'agit d'un transfert direct à travers un milieu matériel en se propageant de manière graduelle. Ce phénomène peut être utilisé pour favoriser la promotion de la chaleur[3].

➤ Convection

La convection thermique concerne les fluides tels que les liquides, les gaz et l'air, ainsi que les matériaux déformables comme les roches sous haute pression dans le manteau terrestre. Ce phénomène est intimement lié au mouvement du fluide, impliquant donc un transport de matière. Les états fluides, à savoir les gaz et les liquides, se caractérisent par leur capacité à se déformer, à prendre la forme du récipient qui les contient et à s'écouler[3] :

- **La convection naturelle** :Egalement appelée convection libre, se produit dans un fluide lorsque des courants se forment simplement en raison des variations de densité résultant des gradients de température.
- **La convection forcée** :Se produit lorsque le déplacement du fluide est déclenché par l'action d'une pompe ou d'un ventilateur.

➤ Rayonnement [3]:

Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chaud. Il a la particularité de pouvoir se propager dans le vide, comme c'est le cas avec le rayonnement solaire. Lorsque le système absorbe cette énergie électromagnétique, elle est convertie en énergie thermique, c'est-à-dire en chaleur :

- Par exemple, même si l'espace traversé par les rayons solaires est plus froid que la Terre, le rayonnement solaire peut encore chauffer notre planète.

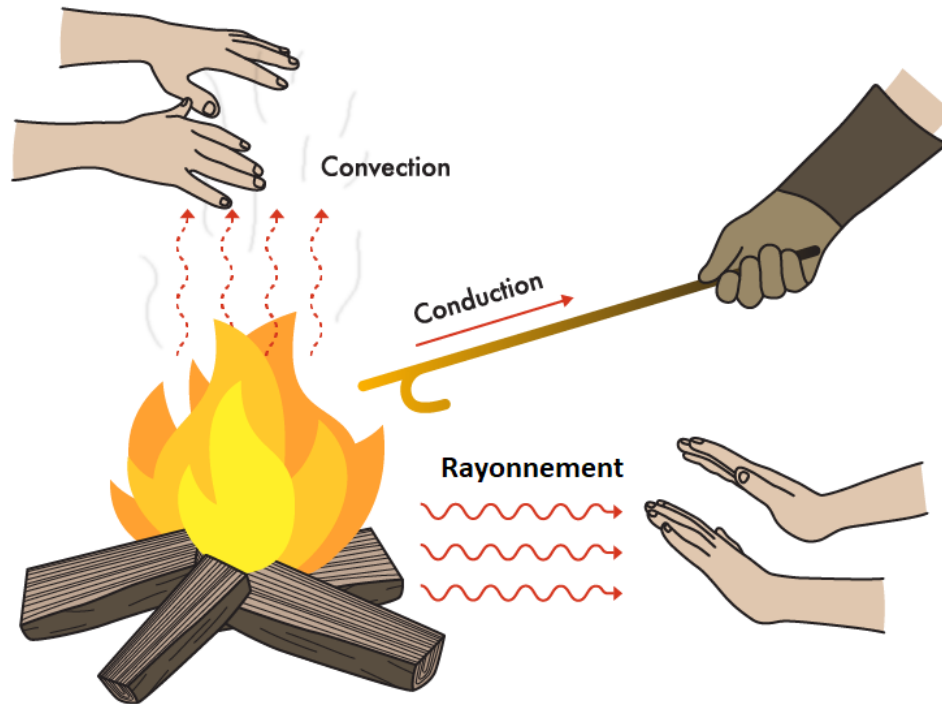


Fig.I.2. Les différents modes de transfert de chaleur [2].

I.2.3.2. La capacité thermique (ρc)

La capacité thermique d'un matériau se réfère à sa capacité à stocker la chaleur par rapport à son volume. Plus cette capacité est élevée, plus le matériau peut absorber d'énergie pour augmenter sa température d'un degré. Les variations de température des parois et de l'air seront moins prononcées si la capacité thermique des matériaux est plus élevée. En règle générale, les matériaux ayant une forte capacité thermique sont également les plus lourds[3].

On peut déduire de la capacité thermique d'un corps de masse m et de quantité de matière n , deux grandeurs associées intensives [4]:

- **La capacité thermique massique** : La capacité thermique rapportée à un kilogramme du corps considéré (Equation I.1).

$$c = \frac{Q}{m \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \quad (\text{I.1})$$

c : La capacité thermique massique du corps en joule par kilogramme celsius [$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]; m : La masse du corps en kilogramme [kg]; θ_2 : La température finale en degré [$^{\circ}C$]; θ_1 : La température initiale en degré [$^{\circ}C$]; Q : La quantité de chaleur en joule [J].

- Conductivité thermique du matériau (λ)** :Le coefficient de conductivité thermique, exprimé en watts par mètre et par degré Celsius (W/m.K), mesure le flux de chaleur traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de un degré entre ses deux faces. Il représente une caractéristique intrinsèque de chaque matériau, définissant exclusivement ses propriétés isolantes. Un coefficient λ (lambda) élevé indique une conductivité thermique élevée, ce qui signifie que le matériau conduit bien la chaleur. En revanche, un coefficient λ plus faible indique une meilleure capacité isolante du matériau (Equation I.2)[3].

$$\lambda = \frac{e}{R} \tag{I.2}$$

λ : Conductivité thermique [w/m.k]; e : Epaisseur de matériaux [m]; R : Résistance thermique [$m^2.k/W$].

Et voici quelques exemples de la conductivité thermique de certains matériaux [5]:

Tableau I.1. La conductivité thermique de certains matériaux.

Matériaux	Conductivité λ W/m.K)	Matériaux	Conductivité λ (W/m.K)
Ciment portland	0,29	Parpaing béton	1,05
Béton	1,7	Mortier Béton	1,50
Air	0,025	Brique creuse	0,45
Bois	0,04 – 0,4	Pierre ,Granit	3,50
Alcool, huile	0,1 – 0,21	Brique à alvéoles	0,149
Sol	1,5	Béton cellulaire	0,13
Caoutchouc	0,16	Béton de fibre de bois	0,10 à 0,15
Eau	0,6	Polystyrène expanse	0,039
Brique plein	1,16	Polystyrène extrude	0,031
Liège	0,046	Laine de verre	0,035
Liège expanse	0.032 à 0.045	Laine de roche	0,040
Verre cellulaire	0.050 à 0.63	Laine de cellulose	0,035 à 0,040
Granulat de verre	0.06 à 0.11	Vermiculite	0,060 à 0,080
Fer	72	Cuivre	380

- **La chaleur spécifique du matériau :** La chaleur spécifique est une mesure intensive qui indique la quantité de chaleur δQ nécessaire pour augmenter la température d'un système d'une quantité infinitésimale dT . Elle est étroitement liée à la capacité thermique, une grandeur extensive qui varie en fonction de la taille du système.

La chaleur spécifique peut être exprimée par unité de volume, de masse ou par nombre de moles du composé [6].

- **La densité :** La densité des matériaux est une caractéristique significative, influencée à la fois par leurs constituants et par leur structure, notamment par leur porosité. Cette dernière peut être évaluée pour révéler le degré de porosité du matériau. Un matériau plus ou moins poreux subira des modifications plus ou moins importantes dans son comportement physico-mécanique, y compris dans sa résistance mécanique à la rupture [7].

La densité d d'un corps liquide ou solide, par rapport à l'eau, est égale au quotient de la masse d'un volume de ce corps par la masse m_0 d'un même volume d'eau (Equation I.3) [8].

$$d = \rho / \rho_0 \quad (\text{I.3})$$

d : La densité s'exprime par un nombre sans unité; ρ : Masse volumique du corps [g.cm^{-3}]; ρ_0 : Masse volumique de l'eau [g.cm^{-3}].

- **La masse volumique :** La masse volumique est le rapport de la masse d'un corps sur le volume de solvant (Equation I.4) [8].

$$\rho = m / V \quad (\text{I.4})$$

ρ : La masse volumique peut s'exprimer en [kg.m^{-3}]; m : masse du corps [kg]; V : volume de solvant [m^3].

I.2.3.3. Résistance thermique (R-Value)

Elle exprime la capacité d'un matériau ou d'une paroi à résister au froid et à la chaleur, Plus l'indice R est élevé, plus le produit est isolant. La résistance thermique d'un matériau est le rapport de son épaisseur et sa conductivité thermique (Equation I.5) [3].

$$R = e/\lambda \quad (I.5)$$

La résistance thermique [$m^2.K/W$]; e : Épaisseur de matériau en mètre [m]; λ : Conductivité thermique en [$W/m.K$].

I.2.3.4. La diffusivité thermique

La diffusivité thermique définit la rapidité avec laquelle la chaleur se propage par conduction à travers un matériau. Si cette valeur est basse, le front de chaleur prendra plus de temps pour traverser l'épaisseur du matériau, ce qui se traduit par un délai plus important entre l'arrivée de la chaleur sur une face d'un mur et son atteinte à l'autre face.

La diffusivité est le rapport de la conductivité d'un corps à sa capacité thermique[3].

I.2.3.5. L'effusivité thermique

L'effusivité caractérise la réactivité des matériaux à un apport de chaleur provenant de l'intérieur du logement ou du rayonnement solaire. Une effusivité élevée indique que le mur absorbera rapidement la chaleur interne de la pièce, limitant ainsi l'augmentation de température dans l'espace. Les matériaux présentant une grande effusivité sont préférés dans ce cas. Il est important de noter que cette caractéristique ne signifie pas que la température du mur augmentera rapidement. Au contraire, une grande effusivité est associée à une capacité thermique élevée, ce qui garantit des variations de température de surface faibles et une importante quantité d'énergie stockée dans le matériau[3].

I.3. Types des matériaux isolants

I.3.1. Matériaux isolants traditionnels

I.3.1.1. Laine minérale (verre et roche)

➤ Laine de roche

Ce produit, dont l'intérêt agronomique a été exploré au Danemark, est commercialisé sous le nom de GRODAN. Il est fabriqué par extrusion d'un mélange fondu à $1600^\circ C$, comprenant des roches basaltiques (Diabase), du calcaire et du coke dans un rapport massique de 4-1-1 (Verdure, 1981). A partir des fibres pontées entre elles par un polymère urée/formol et éventuellement enrobés d'un mouillant [9].



Fig.I.3. Le laine de roche [10].

➤ **Laine de verre**

Issue de produits naturels tels que le sable et le verre recyclé, la laine de verre est un matériau isolant qui se présente généralement sous forme d'un matelas plus ou moins souple, où l'air est piégé de manière immobile par les fibres entremêlées. Elle est utilisée pour l'isolation thermique et phonique des bâtiments résidentiels et non résidentiels. En raison de ses propriétés, elle peut également servir d'absorbant pour la correction acoustique et jouer un rôle dans la protection contre les incendies [11].



Fig.I.4. Le laine de verre [12].

I.3.1.2. Polystyrène expansé (EPS)

Le polystyrène expansé (PSE) est un dérivé de raffinage du pétrole (Naphta). Il est constitué de nombreuses billes liées par compression lors du moulage, emprisonnant ainsi de l'air sec immobile. Ce matériau se distingue par sa légèreté et sa résistance mécanique élevée, mais il

est fragile en cas d'incendie. Sa conductivité thermique est très faible, généralement entre 0.029 et 0.038 W/m·K[3].

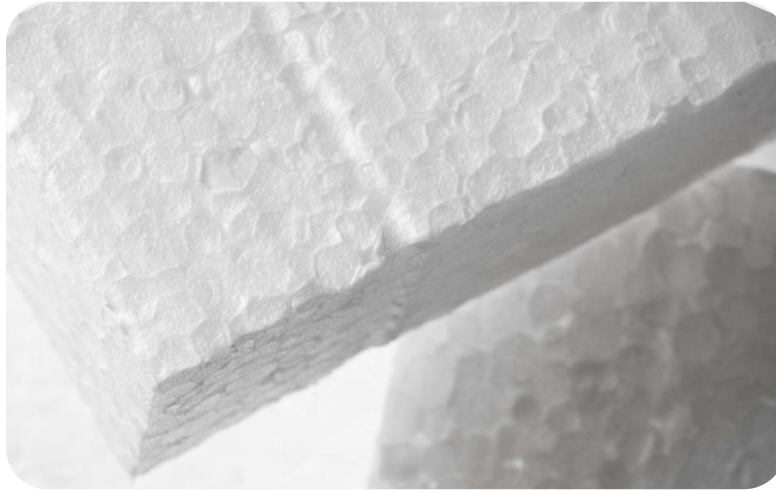


Fig.I.5. Le polystyrène expansé [13].

I.3.1.3. Polyuréthane

Ils sont produits par catalyse et expansion à partir d'un mélange d'isocyanate, de polyol et d'un gaz d'expansion comme le CO₂ par exemple, avec l'ajout de stabilisants et d'ignifugeants [3].



Fig.I.6. La mousse de polyuréthane [14].

I.3.2. Le plâtre**I.3.2.1. Définition**

Le plâtre, constituant principal du plâtre, est une roche courante pouvant adopter diverses formes cristallines. Sa formule chimique étant $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, on le désigne sous le nom de sulfate de calcium dihydraté ou simplement dihydraté. Les gisements sont soit exploités pour leur matériau utile et utilisable, soit pour leur sous-produit (Phosphogypse) [15].



Fig.I.7. La poudre de plâtre[16].

I.3.2.2. Propriétés de Plâtre

Le faible coefficient de conductivité thermique du plâtre signifie que les mélanges utilisés dans le secteur du bâtiment, combinant plâtre et un autre matériau isolant (comme la laine minérale ou le polystyrène), permettent de répondre aux normes thermiques les plus strictes.

- Le plâtre, tout comme les débris de plâtre et de démolition, est recyclable;
- Cette substance ignifuge est ininflammable et incombustible;
- Sécurité : le plâtre peut être utilisé en toute sécurité dans n'importe quelle application, car il est chimiquement stable, non corrosif et non toxique, ce qui en fait un additif minéral prisé dans de nombreuses industries, y compris la transformation des aliments, la céramique, les produits pharmaceutiques, les cosmétiques, les prothèses dentaires et l'agriculture;

- Utilisé comme dessiccant ou pour créer des enduits, la porosité du plâtre lui permet de capter l'humidité ambiante et de la restituer lorsque l'air devient plus sec. Cette propriété en fait un excellent régulateur hygrométrique [15].

I.3.3. Matériaux isolants écologiques et recyclable

Les matériaux composites jouent un rôle de plus en plus important dans l'isolation thermique, en tant qu'isolants écologiques et innovants. Composés généralement de fibres naturelles, et d'une matrice polymère, ces composites offrent des performances thermiques remarquables tout en étant respectueux de l'environnement. De plus, l'utilisation de matériaux renouvelables et recyclables dans leur fabrication contribue à diminuer l'empreinte carbone et à promouvoir des pratiques de construction plus vertes. En intégrant ces matériaux dans les bâtiments, on peut allier performance énergétique et respect de l'environnement, répondant ainsi aux exigences contemporaines de durabilité et d'innovation.

I.3.3.1. Fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres ligno-cellulosiques ont des structures biologiques fibrillaires issues des végétaux, généralement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, avec des quantités plus faibles d'extraits non azotés, de matière protéique brute, de lipides et de matières minérales. La variation de chacun de ces constituants dépend souvent de l'espèce végétale, de son âge et des organes de la plante [17].

Ces fibres végétales proviennent de diverses sources, notamment des déchets de bois, des déchets de palmiers, des résidus agricoles, ainsi que de différentes parties des plantes à fibres telles que les tiges (comme le kénaf, le jute, le lin, la ramie, etc.), les feuilles (comme le sisal, l'abaca, la paille de graminées, etc.), les fruits (comme la noix de coco) et les graines (comme le coton, le kapok, etc.) [18].

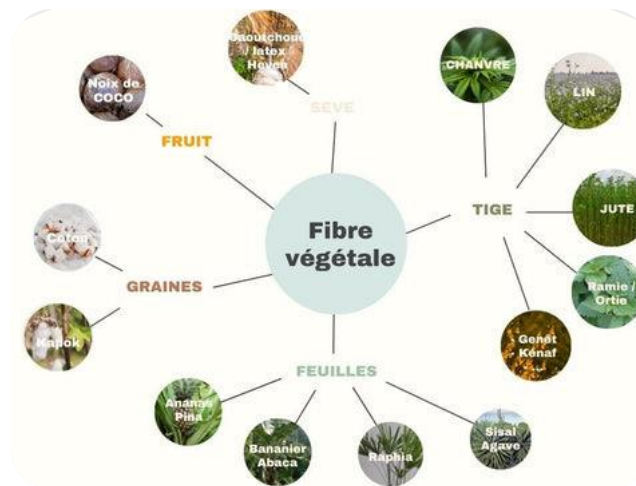


Fig.I.8.Exemples des fibres végétales [19].

I.3.3.2. Panneau de fibres de bois (MDF)

L'abréviation M.D.F. vient de l'expression "Medium DensityFiberboard", qui désigne un panneau de fibres de densité moyenne. Ce matériau est constitué de fibres lignocellulosiques mélangées à un liant organique ou à un autre liant adapté, fabriqué à partir d'un processus à sec. Les panneaux sont comprimés sous l'effet de la chaleur et de la pression jusqu'à une masse volumique de 500 à 800 kg/m³. Les propriétés physiques et mécaniques de ces panneaux varient en fonction de leur épaisseur et du type de produit [20].



Fig.I.9. Panneau isolant de fibres de bois [21].

I.3.4. Caractéristiques de quelques isolants

Tableau I.2. Caractéristiques de quelques isolants [22].

Désignation	Conductivité thermique [W/m. °C]	Masse volumique [kg/m ³]	Température maximale d'utilisation [°C]
Laine de verre	0,050	70	150
Laine de roche	0,050	80-156	150
Polystyrène	0,035	35	85
Polyuréthane	0,027	35-45	110

I.4. Matériaux composites

I.4.1. Définition

Un matériau composite peut être défini de manière générale comme la combinaison de deux ou plusieurs matériaux, dont l'assemblage final présente des propriétés supérieures à celles de chaque matériau constitutif pris individuellement. Le terme "matériaux composites" est couramment utilisé pour désigner des agencements de fibres ou de renforts incorporés dans une matrice ayant une résistance mécanique significativement inférieure [23].

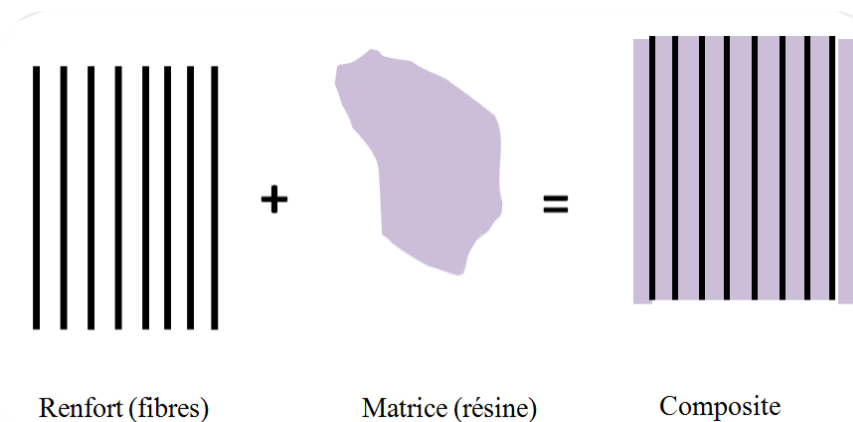


Fig.I.10. Constituant de base d'un composite [17].

Dans un matériau composite, on distingue généralement :

- **Matrice :**La matrice lie les fibres (Renfort), répartit les efforts comme la résistance à la compression ou à la flexion, et assure également une protection chimique. Les matrices sont généralement des résines organiques thermoplastiques ou thermodurcissables;
- **Renfort :**Le renfort agit comme un squelette ou une armature, assurant la tenue mécanique notamment la résistance à la traction et la rigidité. Il prend souvent la forme de filaments (Fibres organiques).

Une interphase se forme entre ces deux constituants et joue un rôle crucial en transmettant les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement, favorisant ainsi une bonne adhérence [24].

I.4.2. Types des matériaux composites

Tableau I.3. Types de composite [25].

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
<p>Composites à matrice organique</p> <p>Papier Carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles en duites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés</p>	<p>Résine/charges/fibrescellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/ fibres de bois Résines souples/ tissus Élastomères/ bitume/ textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/ fibres de verre, de carbone, etc.</p>	<p>Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines Multiples</p>
<p>Composites à matrice minérale</p> <p>Béton Composite carbone carbone Composite céramique</p>	<p>Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibrescéramiques</p>	<p>Génie civil Aviation, espace, sports, biomédecine, etc. Pièces thermomécaniques</p>
<p>Composites à matrice métallique</p>	<p>Aluminium/fibres de bore Aluminium/ fibres de Carbone</p>	<p>Espace</p>

<p style="text-align: center;">Sandwiches</p> <p>Peaux Ames</p>	<p>Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.</p>	<p>Domaines multiples</p>
--	---	---------------------------

I.4.3. Bio-Composites (Composite à base de fibres végétale)

I.4.3.1. Définition

Un biocomposite (Agro-composite) est un matériau composite qui comprend une ou plusieurs phases d'origine biologique. En ce qui concerne le renforcement, cela peut inclure des fibres végétales telles que le coton, le lin, le chanvre et autres, ainsi que des fibres de bois recyclées ou des déchets de papier, voire des sous-produits issus de cultures alimentaires. Les fibres de cellulose régénérées (Comme la viscose ou la rayonne) sont également incluses dans cette catégorie, car elles sont fabriquées à partir de ressources renouvelables[25].

I.4.3.2. Caractéristiques des matériaux bio-composites

Les bio-composites se distinguent des composites traditionnels par leurs caractéristiques uniques. Les fibres naturelles offrent une résistance mécanique adéquate ainsi qu'une bonne absorption des vibrations, tandis que la matrice polymère assure une résistance chimique et une facilité de mise en œuvre. Les propriétés mécaniques des bio-composites dépendent de plusieurs facteurs, notamment le type de fibre, la nature de la matrice polymère et les procédés de fabrication. De nombreuses études ont mis en évidence les propriétés mécaniques et thermiques favorables des bio-composites, ce qui les rend adaptés à diverses applications industrielles.

I.4.3.3. Avantages et inconvénients des matériaux bio-composites

L'utilisation de matériaux composites à fibres végétales dans différentes conditions environnementales est devenue populaire ces dernières années. De nombreuses fibres végétales ont été utilisées comme renfort efficace dans des matrices polymériques. Les composites sont préférés à d'autres matériaux en raison de leurs avantages [26]:

- Légèreté;
- Résistance à la corrosion et à la fatigue;

- Insensibilité aux produits tels que les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants;
- Capacité à prendre diverses formes, à intégrer des accessoires et à réduire le bruit;

Cependant, certains inconvénients limitent leur adoption :

- Coûts élevés des matières premières et des procédés de fabrication;
- Gestion des déchets et réglementations de plus en plus strictes;
- Faible stabilité dimensionnelle;
- Absorption d'eau.

I.4.4. Classification des matériaux composites à base de fibres naturelles

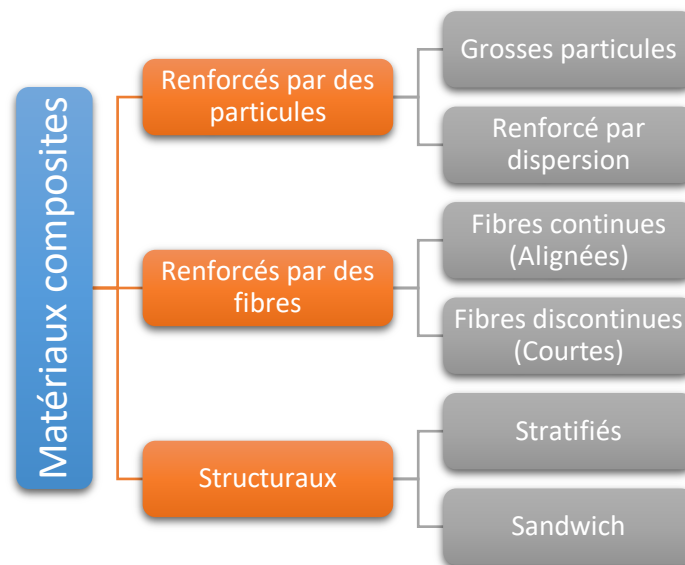


Fig.I.11. Classification des matériaux composites à base de fibres naturelles[27].

I.5. Matériaux composites à structure Sandwich

I.5.1. Définition

Le principe d'une structure sandwich consiste à utiliser une âme constituée d'un matériau léger offrant de bonnes propriétés en compression, sur laquelle sont appliquées deux peaux ayant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif de ce procédé est de créer une structure qui combine légèreté et rigidité. L'épaisseur de l'âme est généralement beaucoup plus importante que celle des peaux.

Le choix des matériaux est principalement guidé par le besoin d'obtenir une masse minimale tout en tenant compte des conditions d'utilisation telles que les contraintes thermiques, la corrosion, le coût, etc[28].

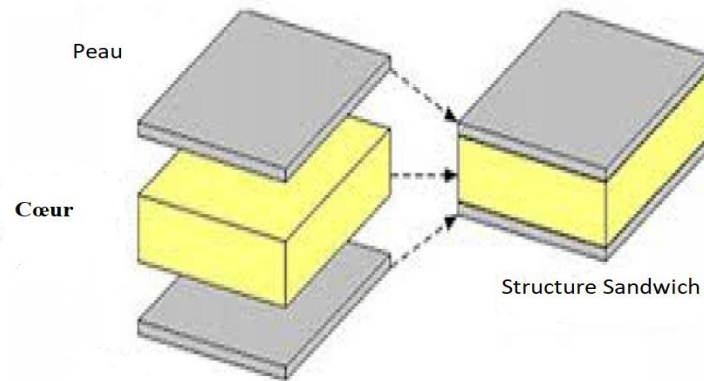


Fig.I.12. Schéma d'une structure sandwich [29].

I.5.2. Les constituants du sandwich[17]:

I.5.2.1. Le cœur

Il existe une variété de matériaux pouvant être utilisés comme noyau, classés en trois catégories :

- Matériaux solides à faible densité (Comme le balsa et d'autres types de bois);
- Matériaux à haute densité en forme cellulaire (Comme les panneaux nid d'abeilles);
- Matériaux à haute densité en forme ondulée (Comme les feuilles ondulées).

I.5.2.2. Les peaux

Une grande diversité de matériaux est utilisée pour former la peau des structures, tels que les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane, etc. Le choix des matériaux pour la peau est crucial en termes d'environnement de travail, car cette partie entre en contact direct avec celui-ci.

- **La résine époxy**

Découvertes en 1909 par Prileschajew, les résines époxy sont des prépolymères de faible poids moléculaire contenant plusieurs groupes époxyde. Elles sont classées comme des

résines thermodurcissables qui durcissent grâce à une variété d'agents de durcissement par réaction.

Les propriétés des résines époxy dépendent de la combinaison spécifique de la résine époxy et des agents de durcissement utilisés. En raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, de leur forte adhérence à de nombreux substrats, ainsi que de leur résistance à la chaleur et aux produits chimiques, les résines époxy sont largement utilisées dans de nombreuses applications [30].

I.5.3. Caractéristiques des matériaux composites à structures sandwichs

L'adhérence entre les peaux et le cœur est un critère essentiel pour le transfert des charges et le bon fonctionnement de la structure sandwich dans son ensemble. Dans une structure sandwich, les peaux supportent les charges de flexion tandis que le cœur supporte les charges de cisaillement.

L'assemblage des peaux et du cœur est réalisé par collage à l'aide d'adhésifs synthétiques tels que l'époxy ou le polyester. La qualité du collage est cruciale pour les performances et la durabilité de la pièce, nécessitant une épaisseur d'adhésif comprise entre 25 et 200 microns.

Les principaux avantages de ces structures sont les suivants [29]:

- Légèreté (économie de poids tout en conservant la résistance);
- Très grande rigidité;
- Grande résistance à la flexion;
- Isolation thermique et acoustique (En fonction de l'application).

I.5.4. Classification des matériaux composite à structures sandwichs

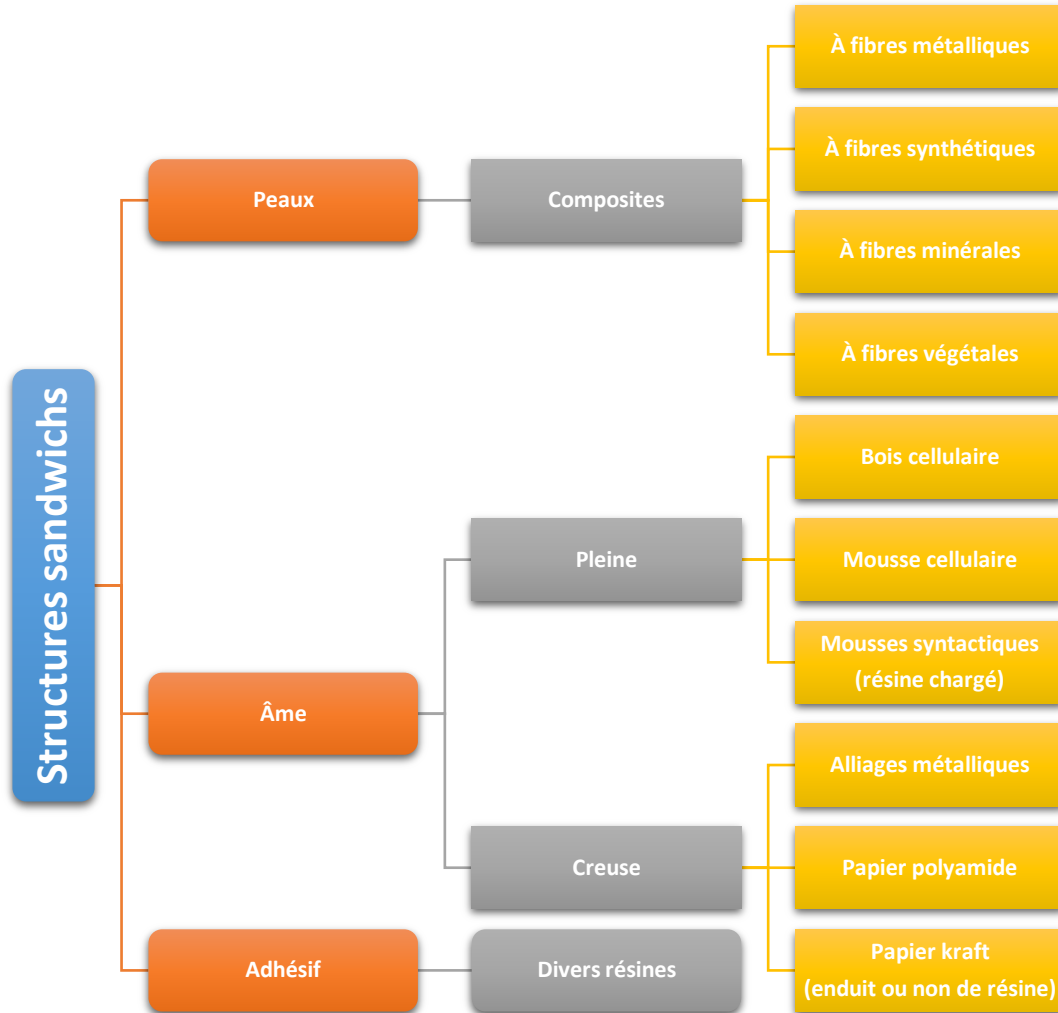


Fig.I.13. Classification des structures sandwichs [29].

I.6. Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble des concepts fondamentaux liées au sujet étudié. En établissant les bases théoriques et contextuelles, ce chapitre a permis de situer l'importance de la thématique dans un cadre plus large. Les notions clés, les définitions essentielles ont été explorés, offrant ainsi un socle de compréhension solide pour les développements ultérieurs.

Ce Chapitre souligne la nécessité de continuer à investir dans la recherche et le développement pour répondre aux défis environnementaux et économiques actuels.

CHAPITRE II
CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX

II.1. Introduction

Les études montrent également l'importance de la mise en œuvre correcte des solutions d'isolation pour maximiser leur efficacité. Donc il est apparu que les avancées technologiques et les matériaux innovants, tels que les isolants biosourcés et les systèmes d'isolation dynamique, jouent un rôle déterminant dans la performance énergétique des constructions.

En intégrant ces innovations et en adoptant des pratiques optimisées, et dans le but de réaliser des bâtiments plus durables et économes en énergie, On a élaboré un bio composite à base des déchets des palmiers dattiers.

II.2. Protocole de préparation des structures Sandwichs

Les matériaux bio-composite à structures Sandwichs a été préparés par des peaux (Fibres des palmiers dattiers/Époxy) et des différentes cœurs.

II.2.1. Les peaux

La préparation des composites à structure sandwich a été basé sur l'utilisation des peaux composées de matériaux composites constitués d'une matrice époxy et de fibres de palmier (Fibres Epoxy/Rachis) avec un pourcentage massique de fibres de 10%. La Fig.II.1 illustre les principales étapes impliquées dans la préparation des plaques en matériau composite. Cette décision découle des recherches intérieures[31, 32], qui démontrent que ce bio-composite possède des propriétés mécaniques, physiques et thermiques exceptionnelles (Tableau II.1).



Fig.II.1. Peau matériaux composite.

Tableau II.1. Propriétés mécaniques, physiques et thermiques de peau [32].

Peau de matériau composite	Physique	Thermique			Mécanique			
		Densité [g/cm ³]	Thermique Conductivité [W/mk]	Thermique Diffusivité [mm ² /s]	Spécifique chaleur [MJ/m ³ K]	E [GPa]	ϵ_{max} [mm]	σ_{max} [MPa]
		980±340	0.232±0.004	0.219±0.007	1.063±0.028	0.52±0.06	0.044±0.002	15.07±1.10

II.2.2. Les cœurs

Nous avons élaboré quatre types de matériaux différentes pour les cœurs du structure Sandwich ; De cela, on a utilisé le Plâtre, Polystyrène, Pétiole brute et bio-composite à base de fibre de pétiole. Les plaques utilisés pour les coueur sont des dimensions (200×200×20) mm³.

II.2.2.1. Polystyrène

Nous symbolisons la couche de cœur en polystyrène par « PE ».

Le polystyrène expansé est un matériau isolant artificiel peu coûteux qui peut être utilisé à de nombreuses fins. En raison de son fort pouvoir isolant, il est principalement utilisé dans les situations où l'espace disponible est limité ou pour fournir une protection contre les intempéries aux murs extérieurs et une résistance à la compression aux sols [33]. Le polystyrène est commercialisé sous forme de feuilles de différentes dimensions et épaisseurs.

On a vendu une plaque d'une épaisseur de 20 mm, et découpé 6 plaques de dimensions (200×200)mm².

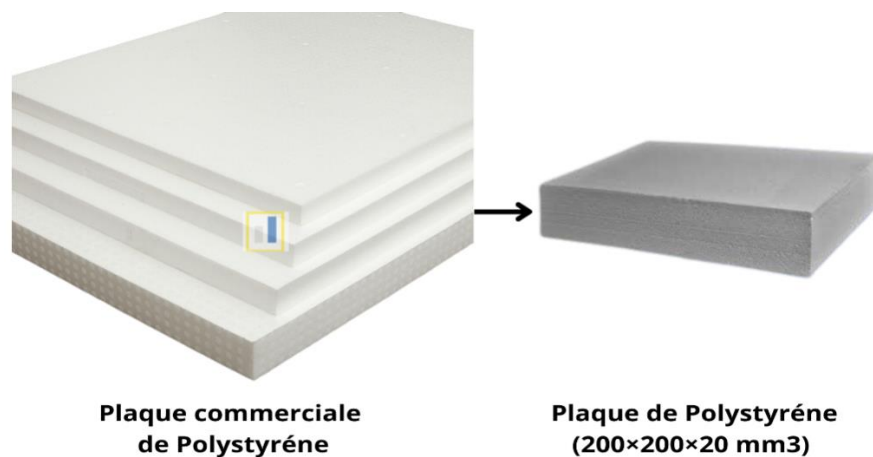


Fig.II.2. Étapes de fabrication du cœur PE.

II.2.2.2. Pétiole brute

La couche de cœur est constitué du pétiole brute, et nous le symbolisons par « PB ».

Après avoir collecté les déchets des palmiers dattiers, nous avons les découpés pour réaliser des plaques de dimensions (200×70×20)mm³.

Ensuite, nous avons collé les plaques avec de la colle naturelle SUPRACOL, et les avons fixés avec des serre joints pendant 12 heures. Pour avoir finalement des plaques de Pétiole brute de dimensions (200×200×20)mm³.

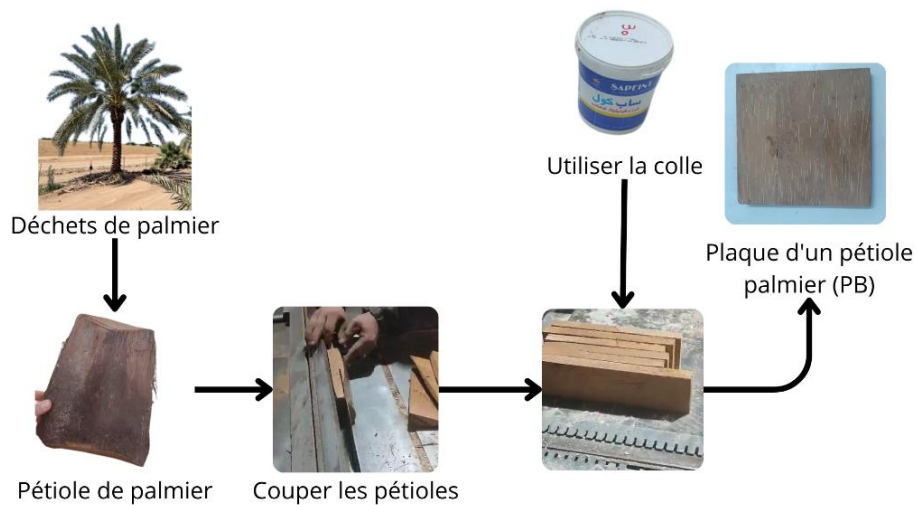


Fig.II.6. Préparation d’une plaque de pétiole palme (PB).

II.2.2.3. Le moulage :

Pour fabriquer les plaques de composite, nous avons utilisé un moule en bois.



Fig.II.7. Moule en bois.

II.2.2.4. Bio-composite à base de fibre de pétiole

La couche de cœur est constituée de pétiole broyé et de colle naturelle. Nous la désignons par « BC ».

Après avoir effectué le processus de polissage, Nous prenons les déchets de polissage chez l'ITDAS (Institut Technique de Développement d'Agriculture Saharienne) pour broyer-les. Puis, nous allons tamiser le pétiole broyé avec un passoire de diamètre 2.3 mm.

Nous profitons 120g de pétiole broyé, et de 480g du même colle (SUPRACOL), pour mouler une plaque de dimensions $(200 \times 200 \times 20) \text{ mm}^3$ dans les moules que nous avons réalisés avant. Ensuite on les met au four de séchage à 70° C pendant 72 heures dans le "laboratoire traitement thermique et fonderie" chez le laboratoire pédagogique du département de Génie Mécanique de l'Université de Biskra.

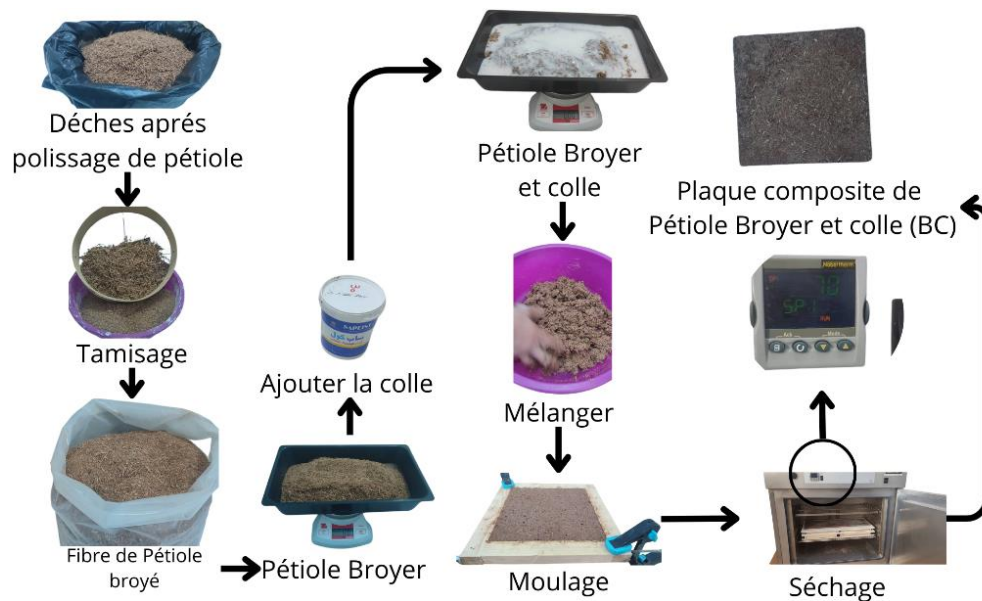


Fig.II.8. Étapes de fabrication du cœur BC.

II.2.2.5. Plâtre

La couche de cœur est constituée de plâtre, et nous le symbolisons par « GP ».

On a besoin de 1062,5 g de plâtre et 625 ml d'eau pour élaborer une plaque de plâtre de dimensions $(200 \times 200 \times 20) \text{ mm}^3$.

- Nous pesons la quantité nécessaire du plâtre ;

- On verse la quantité d'eau préalablement mesurée dans un bol ;
- On ajoute la quantité du plâtre et on attendons une minute ;
- On mélangons le mélange au batteur pendant 90s ;
- On met le mélange dans le moule et on attend un quart d'heure avant de démoulage.



Fig.II.9. Préparation d'une Plaque de plâtre (GP).

La Fig II.7. présente les quatres types des composites à structure sandwich de cette étude.

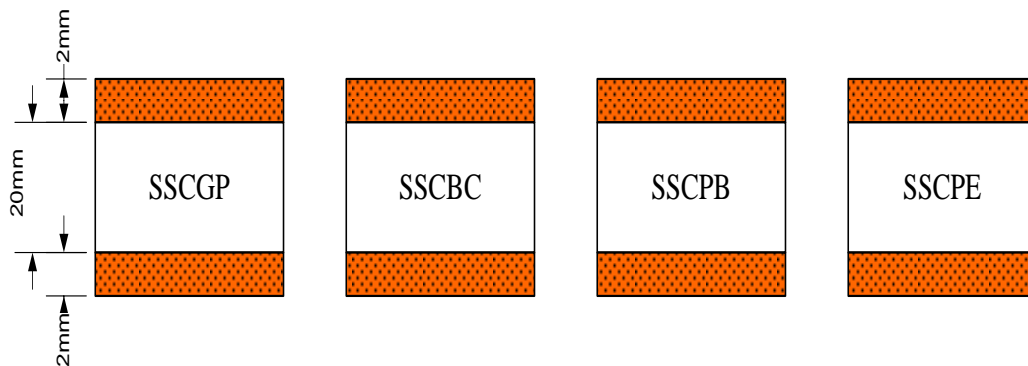


Fig.II.3. Matériaux composites à structure sandwich (Peau et cœur).

Les structures sandwich à été préparé suit le protocole ce dissous :

- Après la prépatation des cœurs des structures sandwich, on laisse la couche de peau sécher partiellement pendant environ une heure, avant de fixer la face du cœur à la couche du peau;
- On laisse-la sécher pendant 12 heures pour le démoulage.



Fig.II.4. Exemple de bio-composite à structure Sandwich.

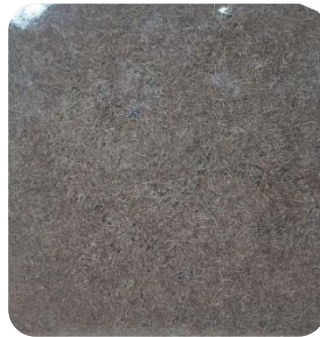
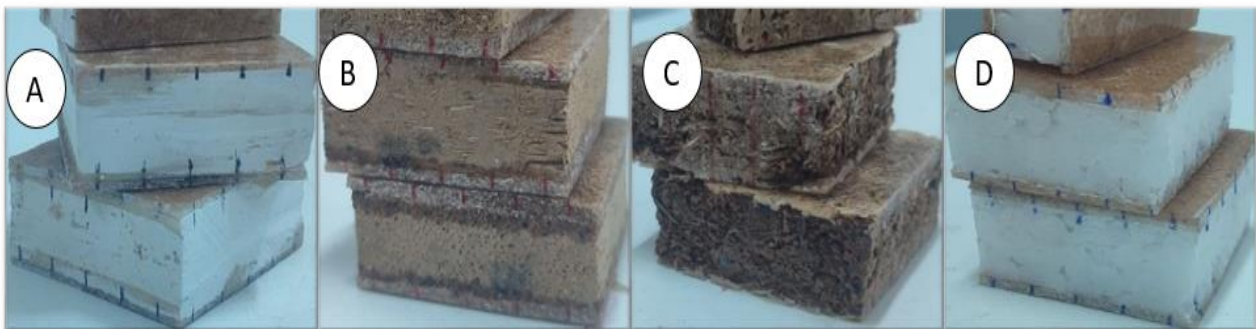


Fig.II.5. peau de la structure Sandwich.

II.2.3. Les éprouvettes des tests physique et thermique

Nous avons prélevé trois échantillons de chaque type de sandwich que nous avons élaboré pour effectuer des tests thermiques et physiques.



**Fig.II.10. A: Échantillon de SSCGP; B:Échantillon de SSCPB;
C:Échantillon de SSCBC; D:Échantillon de SSCPE.**

II.3. Montage des éprouvettes pour une étude de cas

Après avoir préparé six sandwiches de chaque type, gypse, polystyrène, pétiole brut et colle naturelle avec pétiole broyé, nous avons frotté chaque sandwich depuis les bords de la face pour créer un angle de 45°.



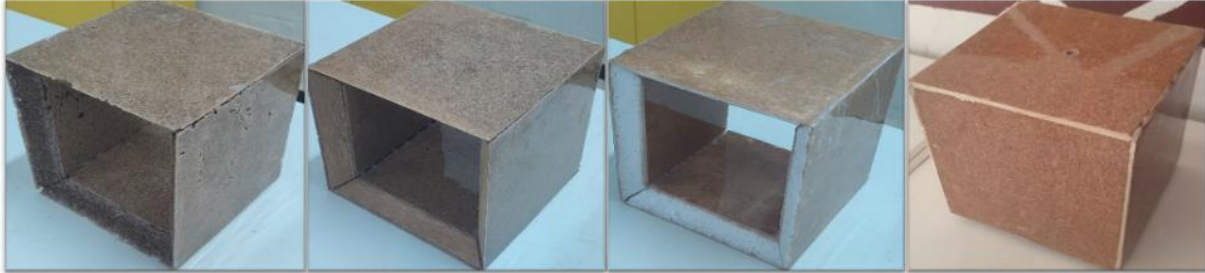
Fig.II.11. Couper des plaques à un angle de 45°.

Nous avons ensuite fait un trou au centre de chaque panneau sandwich.



Fig.II.12. Un trou au centre de chaque panneau sandwich.

Puis collé les six panneaux ensemble pour former un cube.

**Fig.II.13. Collé les six panneaux sandwiches à former un cube.**

II.4. Les tests thermiques et physiques

Les tests thermiques et physiques constituent une étape cruciale dans l'évaluation des matériaux destinés à l'isolation thermique. Ces tests rigoureux permettront de caractériser de manière précise les performances des matériaux étudiés, en particulier ceux composés de fibres naturelles et de matrices polymériques. L'objectif est d'analyser leur capacité à conserver l'énergie, leur résistance à la déformation et leur durabilité sous diverses conditions environnementales.

II.4.1. Test Physique (Densité)

Après avoir préparé les trois échantillons de chaque type de sandwich, et à l'aide d'une pied à coulisse, nous avons pris des mesures de dimension de chaque échantillon 5 fois en longueur, largeur et épaisseur.

Nous avons également pesé chaque échantillon cinq fois.

Et finalement la masse volumique de chaque type a été calculée comme suit :

$$V_{moy} = A_{moy} \cdot B_{moy} \cdot C_{moy} \quad (\text{II.1})$$

V_{moy} : Le volume moyen d'une échantillon [m^3]; A_{moy} : L'épaisseur moyen d'une échantillon [m]; B_{moy} : La longueur d'une échantillon [m]; C_{moy} : Le largeur d'une échantillon [m].

$$m_{moy} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{5} \quad (\text{II.2})$$

m_{moy} : La masse moyenne d'une échantillon [kg].

$$\rho_{moy} = \frac{m_{moy}}{V_{moy}} \quad (II.3)$$

ρ_{moy} : La densité moyenne d'une échantillon [kg/m^3].

$$\rho = \frac{\rho_{moy1} + \rho_{moy2} + \rho_{moy3}}{3} \quad (II.4)$$

ρ : La densité du matériaux [kg/m^3].

II.4.2. Tests thermiques

II.4.2.1. Mesure de la conductivité thermique

Les caractéristiques thermiques de la nouvelle structure sandwich ont été évaluées à l'aide d'échantillons de dimensions $(50 \times 50 \times 20)$ mm³. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un dispositif de caractérisation thermique HOT Disk TPS 500 équipé d'une sonde pouvant atteindre une température maximale de 60°C. Les essais ont été conduits à une température de 36°C et à une humidité relative de 60 %. Les propriétés thermiques évaluées comprennent la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique des échantillons de la structure sandwich, lesquelles varient en fonction du type de noyau utilisé.

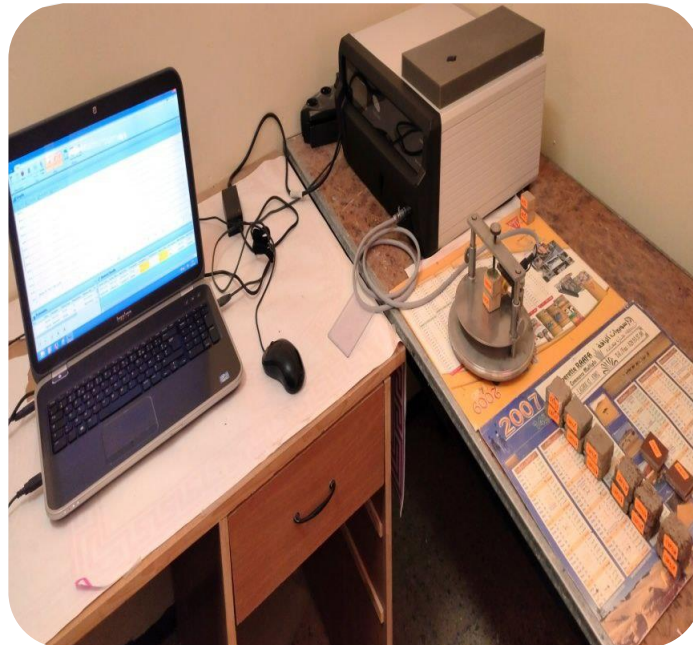


Fig.II.13. Mesure de la conductivité thermique.

II.4.2.2. Performance thermique des matériaux composites à structure Sandwich

Pour étudier la performance thermique des différents types des structures Sandwich, on a étudié le flux de la température dans les boites constitués à ces matériaux.

Cette étude de cas d'une boîte fermée a été réalisé selon les étapes suivantes :

1. Après avoir monté les boites, nous avons installé le circuit électrique pour faire fonctionner les sondes de température.
2. Nous avons placé les boîtes de tests sous l'influence de l'air naturel extérieur pendant 10 heures consécutives.



Fig.II.14. Performance thermique des structures Sandwich.

- Nous avons répété le processus pendant trois jours.

II.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en œuvre les concepts théoriques abordés précédemment et de tester leur applicabilité dans un contexte réel. À travers des expérimentations rigoureuses, des analyses de données approfondies et des études de cas, nous avons pu valider plusieurs hypothèses de travail et répondre aux questions de recherche posées initialement. Les résultats obtenus démontrent non seulement la faisabilité des approches proposées, mais aussi leur efficacité et leurs limites dans des conditions spécifiques.

Ce chapitre prépare le terrain pour des analyses plus approfondies et des discussions détaillées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III
RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1. Introduction

Les expérimentations et les évaluations réalisées ont mis en lumière des éléments inattendus ainsi que des défis techniques nécessitant une attention particulière dans les études à venir. Les leçons apprises de ces expériences offrent des perspectives encourageantes pour l'amélioration et l'optimisation des approches méthodologiques employées.

Les tests et essais réalisés ont également produit des résultats clairs et fiables qui seront examinés en détail dans cette section.

III.2. Discussion des résultats de test physique et thermique

Les résultats des essais physique et thermique sont résumés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1. Résultats des essais physique et thermique.

Structure Sandwich	Physique	Thermique
	Densité [kg/m^3]	Conductivité thermique [W/m.k]
SSCGP	1200.04 \pm 13.64	0,428 \pm 0.030
SSCBC	376.06 \pm 10.70	0,152 \pm 0.028
SSCPB	302.36 \pm 11.48	0,161 \pm 0.024
SSCPE	187.38 \pm 6.07	0,035 \pm 0.025

SSC: Structure sandwich à cœur; **GP:** Plâtre; **BC:** Matériaux composite Colle et Fibres; **PB:** Bois de peuplier; **PE:** Polystyrène expansé.

III.2.1. Résultats physiques

La Fig.III.1 présente les valeurs de densité pour chaque type de panneau sandwich.

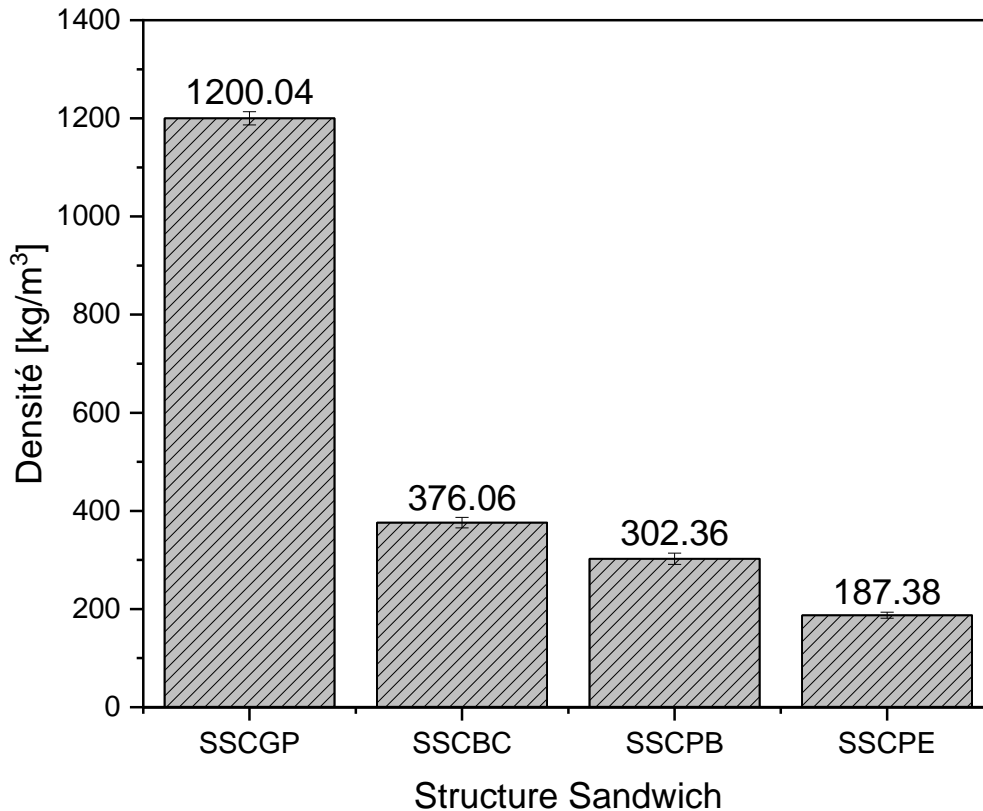


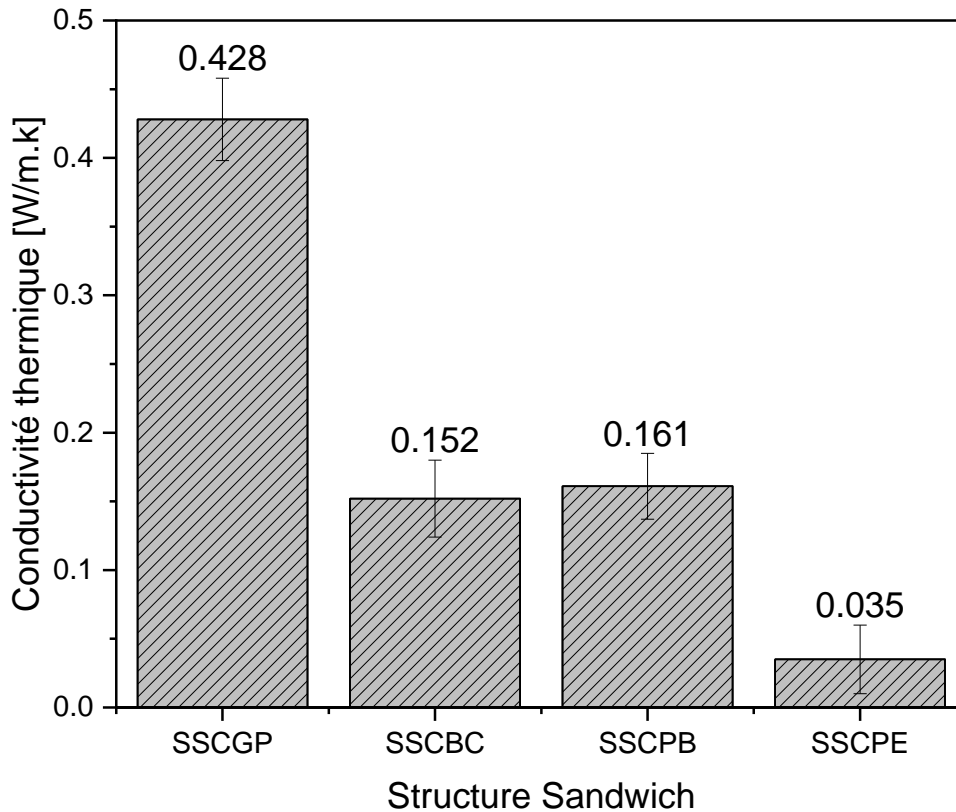
Fig.III.1. Densité des structures Sandwich.

Il est observé que la densité du sandwich à cœur en plâtre (SSCGP) est la plus élevée, atteignant $1200,04 \text{ kg/m}^3$, tandis que la densité la plus basse est attribuée au sandwich à cœur en polystyrène (SSCPE), évaluée à $187,38 \text{ kg/m}^3$. Les densités du bois de pétiole brute (SSCPB) et du bois de pétiole broyé mélangé à de la colle naturelle (SSCBC) étaient de $302,36 \text{ kg/m}^3$ et $376,06 \text{ kg/m}^3$, respectivement. La disparité entre ces deux éléments découle de l'incorporation de colle.

Nous pouvons en déduire que le panneau sandwich en plâtre n'est pas approprié en raison de sa densité élevée, contrairement au panneau sandwich en pétiole qui présente des similitudes avec le polystyrène, largement utilisé dans le domaine de l'isolation et dans d'autres secteurs. Cela implique que le sandwich que nous avons confectionné est fonctionnel et plus performant.

III.2.2. Résultats thermiques

Fig.III.2. Illustrées du conductivité thermique des panneaux sandwich.

**Fig.III.2. Conductivité thermique des structures Sandwich.**

Il a été observé que le sandwich contenant du gypse (SSCGP) au cœur présente une conductivité thermique plus élevée que les autres types étudiés, atteignant une valeur de $0,428 \pm 0,030$ w/m.k. En revanche, le sandwich avec un cœur en polystyrène (SSCPE) a enregistré la valeur de conductivité thermique la plus basse, soit $0,035 \pm 0,025$ w/m.k, représentant une diminution relative de 91,9 %. Les résultats des panneaux (SSCBC) et (SSCPB) convergent, affichant respectivement des valeurs de $0,152 \pm 0,028$ w/m.k et $0,161 \pm 0,024$ w/m.k. Cette similitude entre les valeurs (SSCBC) et (SSCPB) pourrait être attribuée au fait que les panneaux sandwich sont fabriqués à partir du même matériau, bien qu'il existe une légère différence dans leur processus de fabrication. Le premier type implique des planches de bois palm pétiole dans

leur état naturel, tandis que le second est composé de menuiseries en bois palm pétiole avec ajout de colle.

III.2.3. Performance thermique des structures Sandwich

Les résultats des tests de performance thermique des structures sandwich sont présentés dans le Tableau III.2 avec la relation suivante :

$$\Delta T_{moy} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (\text{III.1})$$

ΔT_{moy} : Différence de température des structures sandwich, T_1 : Température pour premier jour, T_2 : Température pour deuxième jour.

Tableau III.2. Les résultats des essais de performance thermique des structures sandwich.

Temps [h.min]	ΔT_{moy} SSCGP [°C]	ΔT_{moy} SSCBC [°C]	ΔT_{moy} SSCPB [°C]	ΔT_{moy} SSCPE [°C]
0.15	2.85±0.05	2.95±0.45	3.10±0.10	3.95±0.85
1.00	3.10±1.20	3.40±0.30	3.95±0.45	5.10±1.40
2.00	3.75±0.95	4.60±0.40	5.10±0.10	5.80±2.00
3.00	5.05±0.95	5.75±1.85	6.05±1.55	7.35±2.35
4.00	6.00±1.40	6.55±1.55	6.80±1.40	8.10±2.20
5.00	6.05±0.65	6.55±0.25	6.80±0.20	8.20±1.30
6.00	5.70±1.10	6.05±0.45	6.15±0.35	6.90±1.20
7.00	4.45±0.35	5.45±0.95	5.50±0.90	6.35±0.45
8.00	4.95±0.45	6.35±0.45	6.35±0.15	6.10±0.75
9.00	5.55±2.25	6.50±1.00	6.35±1.15	5.40±0.60
10.00	5.55±3.25	5.30±1.70	5.00±1.50	3.40±1.20

Fig.III.3. Illustre l'évolution de la différence de température ΔT_{moy} entre l'extérieur et l'intérieur de boîtes fabriquées à partir de structures sandwich avec divers types de noyaux.

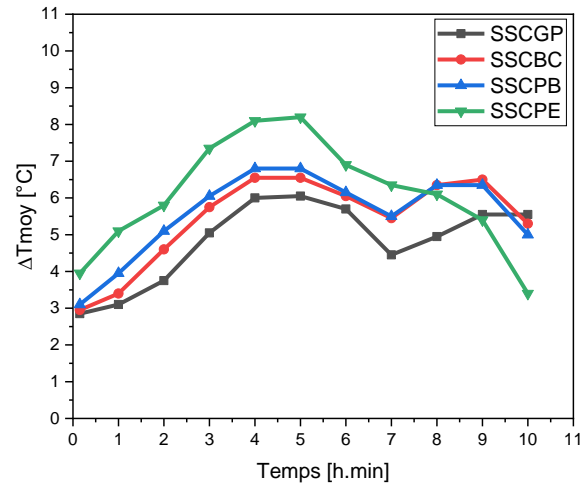


Fig.III.3. Variation de ΔT_{moy} en fonction de temps.

Il est observé que ces graphiques présentent une tendance similaire, caractérisée par une montée jusqu'au pic à 8 heures, suivie d'une descente, en raison d'une diminution de la température de 44 °C. De plus, il est noté que la présence d'une structure sandwich à cœur en polystyrène (SSCPE) confère une meilleure isolation thermique que la température de 44 °C. En revanche, la structure sandwich à cœur en plâtre offre la moins bonne isolation thermique. La structure sandwich à cœur en pétiole broyé mélangé à de la colle (SSCBC) et à cœur en pétiole brute (SSCPB) présente une isolation thermique plus similaire à celle du SSCPE, atteignant jusqu'à 44°C. Ces améliorations en font la meilleure isolation thermique parmi les structures sandwich précédentes, ce qui démontre l'efficacité et les avantages significatifs de la SSCBC.

III.3. Conclusion

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'efficacité de certains panneaux sandwich en termes de résistance à la chaleur, démontrant ainsi une performance remarquable. Une variation significative de la densité des panneaux sandwich a été observée. Il est possible d'établir un lien entre la conductivité thermique et la densité des panneaux sandwich, suggérant ainsi que plus la densité des panneaux sandwich est faible, plus leur conductivité thermique est réduite. Ces conclusions pourraient être exploitées à l'avenir dans divers domaines, tels que la préservation des aliments par le biais du séchage, en contrôlant la température interne d'une enceinte composée de panneaux sandwich par le biais de modifications de ses dimensions.

CHAPITRE IV
ÉTUDE NUMÉRIQUE

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente la simulation d'une boîte aux dimensions spécifiques à l'aide du logiciel d'analyse technique "ANSYS", en se basant sur une modélisation tridimensionnelle effectuée à l'aide du logiciel "SolidWorks". L'étude repose sur les données expérimentales extraites du troisième chapitre, obtenues dans des conditions météorologiques normales.

IV.2. Programmes utilisés dans le processus de simulation

Afin de mener à bien la simulation d'une étude de cas portant sur une boîte de dimensions (200 x 200 x 200) mm³ et d'une épaisseur estimée à 24 mm pour chaque paroi constituant ladite boîte, deux logiciels ont été employés. Le premier, SolidWorks, a été utilisé pour concevoir en trois dimensions la boîte, tandis que le second, Ansys, a permis de réaliser une analyse technique visant à appliquer les conditions internes et externes de température sur la boîte. Quatre types de boîtes, se distinguant par leur matériau, ont été considérés, chaque matériau ayant sa propre conductivité thermique. Les conditions thermiques internes et externes ont été imposées à la boîte. Les températures externe et interne ont été déterminées en se basant sur les données expérimentales enregistrées dans le troisième chapitre.

IV.2.1. Logiciel SolidWorks

Le logiciel de CAO SOLIDWORKS® facilite la modélisation et l'intégration de pièces mécaniques, permettant aux concepteurs de concevoir rapidement des modèles et des dessins complexes, offrant ainsi de nombreux avantages (Voir Fig.IV.1)[34].



Fig.IV.1. Interface SolidWorks 2023.

IV.2.2. Logiciel ANSYS

Le logiciel ANSYS, utilisé pour l'analyse technique, est reconnu comme l'un des meilleurs outils de test de conception en raison de sa grande efficacité et de sa facilité d'utilisation, tout en offrant des résultats d'une excellente précision (Voir Fig.IV.2)[35].



Fig.IV.2. Interface ANSYS 2019R3.

IV.3. Etude de cas d'une boîte de panneaux à structure sandwich

Cette section de la recherche se focalise sur l'exploitation des données expérimentales acquises dans le troisième chapitre concernant les panneaux sandwich. Par la suite, nous procédons à la simulation d'un scénario pour ces échantillons dans le cadre des mêmes conditions expérimentales. Quatre variétés distinctes de panneaux sandwich sont prises en considération.

IV.3.1. Conception de la boîte en 3D à l'aide du logiciel Solid Works

La conception de la boîte a été réalisée en respectant des dimensions spécifiques dérivées des dimensions réelles à l'aide du logiciel SolidWorks (Voir Fig.IV.3). Un stratifié composé de deux couches de matériaux biocomposites d'une épaisseur de 2 mm chacune a été disposé autour d'un cores de 20 mm d'épaisseur, ce dernier variant en matériau selon les informations fournies dans le deuxième chapitre.

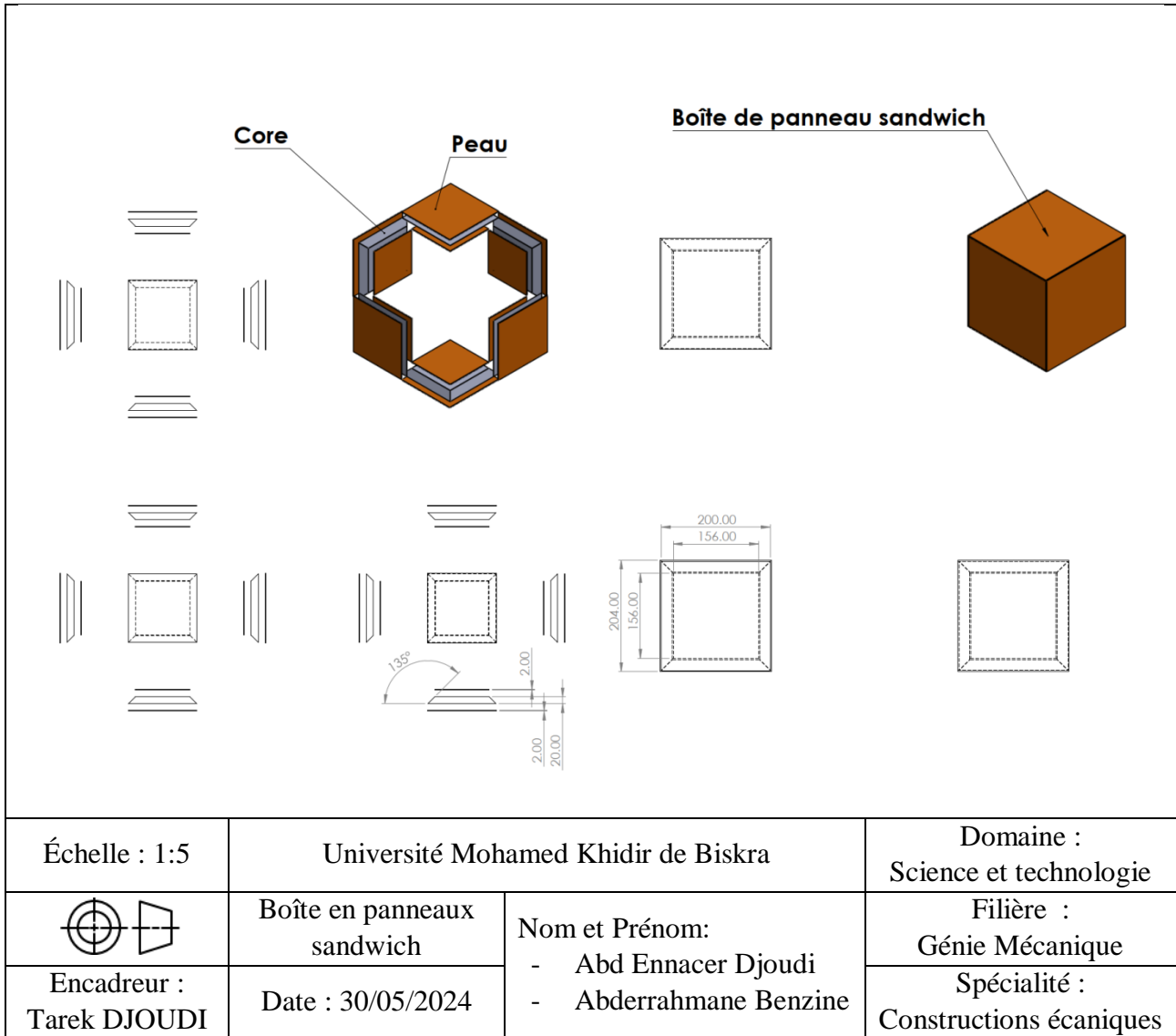


Fig.IV.3. Dessin détaillé de la boîte en panneaux sandwich.

Une fois les composants du panneau sandwich assemblés pour constituer la structure à l'aide du logiciel SolidWorks, le fichier contenant les données de montage est sauvegardé au format Parasolid (*.x_t ;*.x_b) (Voir Fig.IV.4).

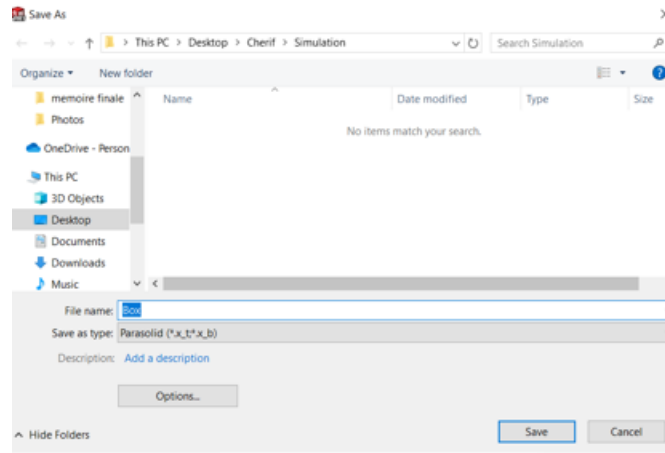


Fig.IV.4. Extension du fichier d'installation pour la découpe des panneaux sandwich pour former le caisson.

IV.3.2. Analyse thermique à l'aide d'ANSYS Workbench

Une analyse thermique a été réalisée pour étudier l'impact des conditions internes et externes de chaleur appliquées à la boîte à l'aide du logiciel ANSYS Workbench.

Une fois le logiciel ouvert, nous choisissons l'icône Steady-State Thermal dans la liste des systèmes d'analyse de la fenêtre Analysis Systems (Voir Fig.IV.5).

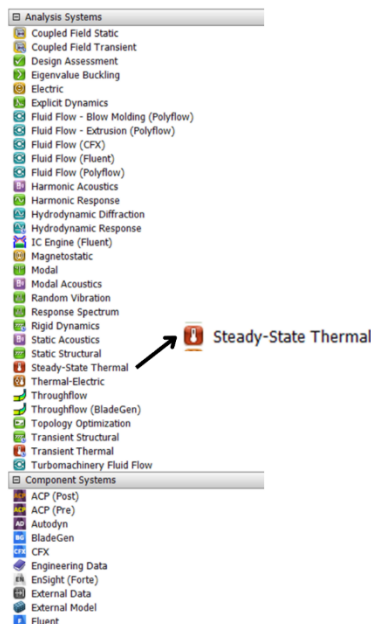


Fig.IV.5. État stable thermique.

Une fois le cas d'étude sélectionné, les caractéristiques du matériau constituant les panneaux sandwich sont renseignées en accédant aux données d'ingénierie (Voir Fig IV.6) afin d'entrer la conductivité thermique de chaque matériau (Voir Tableau IV.1).

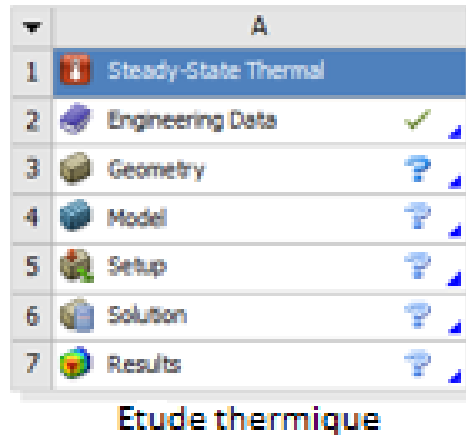


Fig.IV.6. Données géométriques en état thermique stable.

Tableau IV.1. Conductivité thermique des panneaux sandwich adoptés dans l'étude.

Tableau IV.1. Conductivité thermique des panneaux sandwich.

Structure Sandwich	Conductivité thermique [W/m.k]
SSCGP	0,428 ± 0.030
SSCPB	0,152 ± 0.028
SSCBC	0,161 ± 0.024
SSCPE	0,035 ± 0.025

Une fois les données d'ingénierie saisies, nous procédons à la récupération du fichier d'installation des pièces murales préalablement conçues, enregistré au format de l'extension Parasolid (*.x_t;*.x_b).

Pour analyser les conductivité thermiques à travers les panneaux sandwichs constituant le caisson, il est impératif de se conformer aux règles suivantes :

- Évaluer la performance de chaque matériau utilisé dans la fabrication de chaque composant du panneau sandwich.
- Définir une analyse de maillage afin d'améliorer la précision des résultats.
- Mettre en œuvre la chaleur externe conformément au Tableau IV.2.
- Mise en place de la température interne en se référant au Tableau IV.2, en fonction du type de panneau sandwich employé.

Les variations de température enregistrées en fonction du temps ont été systématiquement prises en compte dans l'étude.

Tableau IV.2. Les variations de température de panneau sandwich.

Heure [s]	T _{Atm} [°C]	T _{1SSCPE} [°C]	T _{2SSCPB} [°C]	T _{2SSCBC} [°C]	T _{4SSCGP} [°C]
900	33.7	35.5	33.7	33.2	33.6
7200	33.7	37.4	38.1	37.4	38.0
10800	35.5	39.3	40.5	39.7	40.2
14400	37.9	42.9	42.4	41.8	42.0
18000	38.8	44.7	44.2	43.8	43.4
21600	38.9	45.8	45.5	45.2	44.3
25200	41.3	47.0	47.1	46.9	45.9
28800	41.3	47.2	47.7	47.7	46.1
32400	39.4	45.5	45.9	46.2	43.9
36000	36.8	41.6	42.0	42.3	40.1
39600	32.6	34.8	36.1	36.2	34.9

Une fois les matériaux constituant les parois de la boîte insérés et soumis à des sources de chaleur interne et externe (Voir Fig.IV.7), les résultats de conductivité thermique des parois sont extraits et répertoriés (Voir Tableau IV.3).

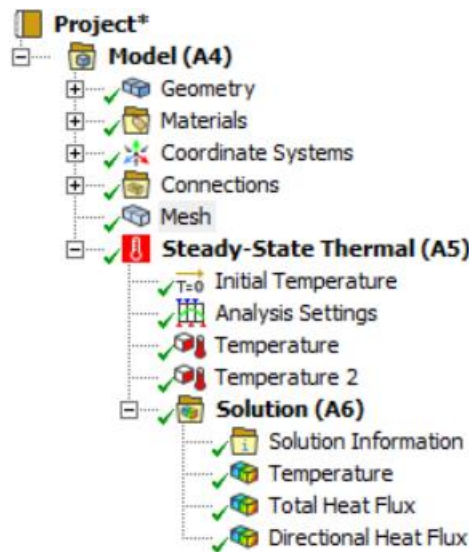
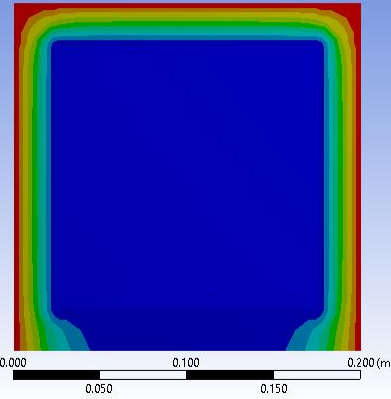
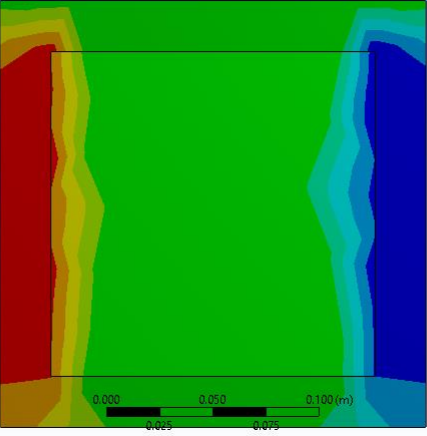
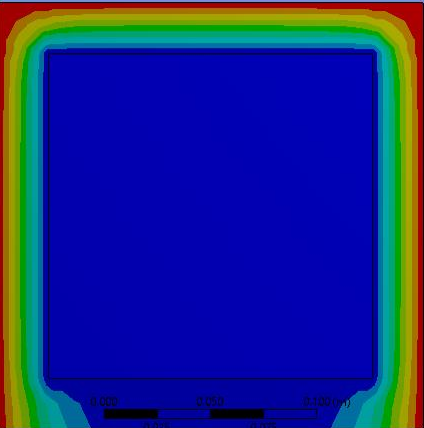
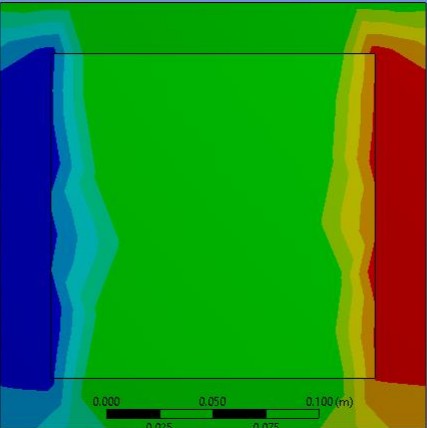
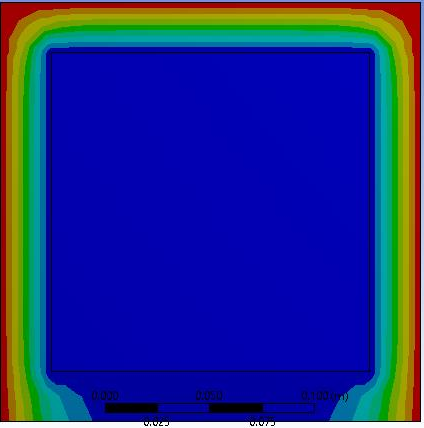
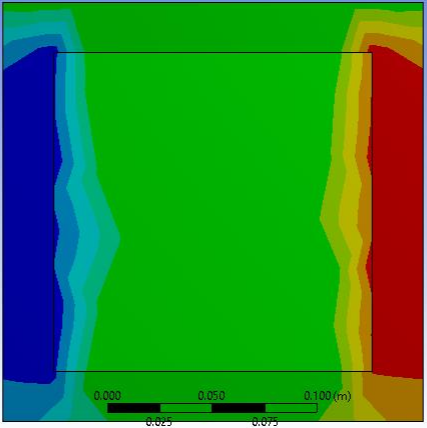
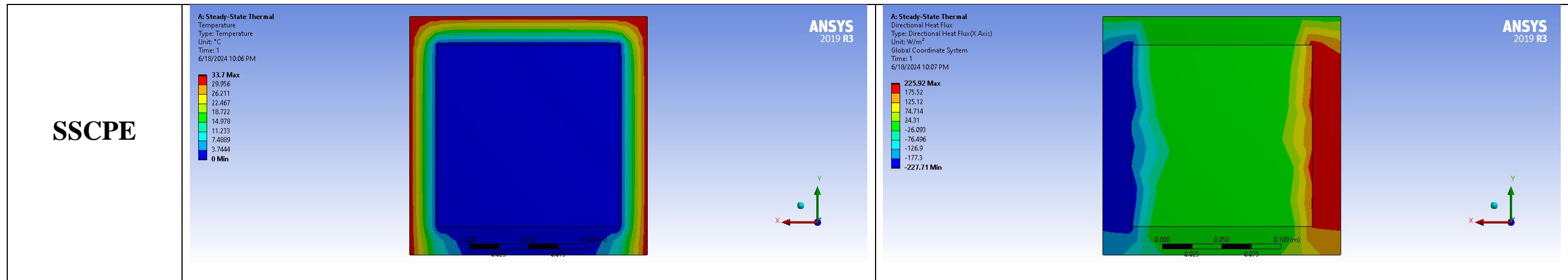


Fig.IV.7. Étapes pour étudier l'analyse technique pour trouver la conductivité thermique du mur.

Tableau IV.3. Résultats obtenus après application des conditions de température interne et externe et adoption des matériaux qui composent les panneaux sandwich.

Tableau IV.3. Résultats de l'étude analytique de la conductivité thermique de quatre types différents de panneaux sandwich.

Panneau sandwich	Température	Flux de chaleur directionnel Y
SSCGP	<p>ANSYS 2019 R3</p> <p>A: Steady-State Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 1 6/19/2024 1:03 AM</p> 	<p>ANSYS 2019 R3</p> <p>A: Steady-State Thermal Directional Heat Flux Type: Directional Heat Flux(X Axis) Unit: W/m² Global Coordinate System Time: 1 6/18/2024 8:53 PM</p> 
SSCPB	<p>ANSYS 2019 R3</p> <p>A: Steady-State Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 1 6/18/2024 10:06 PM</p> 	<p>ANSYS 2019 R3</p> <p>A: Steady-State Thermal Directional Heat Flux Type: Directional Heat Flux(X Axis) Unit: W/m² Global Coordinate System Time: 1 6/18/2024 10:07 PM</p> 
SSCBC	<p>ANSYS 2019 R3</p> <p>A: Steady-State Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 1 6/19/2024 1:50 AM</p> 	<p>ANSYS 2019 R3</p> <p>A: Steady-State Thermal Directional Heat Flux Type: Directional Heat Flux(X Axis) Unit: W/m² Global Coordinate System Time: 1 6/19/2024 1:49 AM</p> 



L'utilisation du programme ANSYS pour la simulation numérique a montré que les matériaux isolants sont efficaces et performants face aux températures élevées lorsque les boîtes sont placées à des températures normales. Il y a une distinction évidente entre les fonds. La disparité dans la répartition de la chaleur peut être attribuée à la composition des panneaux sandwich dont chaque boîte est équipée. À l'avenir, ces résultats de l'analyse numérique pourraient être bénéfiques pour expliquer la répartition de la chaleur dans des espaces clos et restreints.

IV.4. Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence la répartition de la chaleur à l'intérieur de caissons composés de quatre types distincts de panneaux sandwich, en se basant sur une simulation des résultats expérimentaux. Ces données expérimentales pourront être utilisées ultérieurement pour conduire des simulations numériques en vue de développer un modèle efficace pour le processus de séchage des denrées alimentaires. Les variations observées entre les caissons sont attribuables à la nature des panneaux sandwich, notamment à leur conductivité thermique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au cours des deux derniers siècles, les conflits mondiaux se sont principalement focalisés sur la question de l'énergie et de la domination de ses sources. Afin de réduire la consommation énergétique et de préserver l'environnement, la communauté internationale oriente ses efforts vers la recherche de fondements économiques durables. En développant des matériaux hautement performants en termes d'isolation thermique, nous contribuons à diminuer la part d'énergie consacrée au chauffage ou à la régulation de la température intérieure. Notre objectif principal consiste à concevoir des panneaux sandwich offrant une isolation efficace et une légèreté remarquable, pouvant être exploités à l'avenir, tout en explorant d'autres applications potentielles de ces panneaux. Pour notre étude en cours, nous avons choisi de combiner approches expérimentales et une simulation numérique pour une étude de cas.

La recherche expérimentale a principalement porté sur la fabrication de panneaux sandwich d'une épaisseur de 24 mm, qui se distinguaient les uns des autres par la nature de leur couche centrale, ayant une épaisseur fixée à 20 mm. Les différentes couches centrales étudiées étaient constituées de gypse, de plaques à base de tiges de feuilles de pétiole de palmier dattier, ainsi que d'un matériau composite élaboré à partir de paillis de feuilles de pétiole de palmier dattier et de colle, et le polystyrène.

En se basant sur une étude antérieure menée par Tarek DJOUDI et al [32], la couche cutanée a été fabriquée en utilisant un matériau composite d'époxy et de fibre de palmier dattier d'une épaisseur de 2 mm de chaque côté, selon des proportions prédéterminées.

Trois expériences ont été réalisées dans le dessein de caractériser le matériau sandwich et d'explorer de nouvelles approches pour son exploitation optimale. Les expériences menées étaient les suivantes :

- Une expérience physique peut être réalisée en mesurant la densité apparente et en distinguant la dalle la plus légère;
- Une expérience thermique a été réalisée afin de mesurer la conductivité thermique des panneaux sandwich;
- L'expérimentation des performances thermiques a été réalisée afin d'évaluer l'efficacité des panneaux. Des caissons de dimensions 200 x 200 x 200 mm³ ont été utilisés pour

CONCLUSION GÉNÉRALE

étudier la capacité des panneaux à conserver la chaleur interne en présence de chaleur externe;

Les résultats de l'étude ont mis en évidence l'existence de panneaux présentant une grande légèreté et une bonne isolation thermique, en particulier ceux dotés d'une couche centrale en polystyrène. Cette dernière affiche une densité apparente estimée à $187,38 \text{ kg/m}^3$ et une conductivité thermique estimée à $0,035 \text{ w/m.k}$, entraînant des taux de réduction estimés à 85% et 91,9% respectivement par rapport aux panneaux comportant une âme en plâtre. Ces derniers présentent une densité apparente estimée à $1200,04 \text{ kg/m}^3$ et une conductivité thermique estimée à $0,428 \text{ w/m.k}$.

Des panneaux sandwich ont été fabriqués en intégrant une couche centrale composée d'un panneau fabriqué à partir de pétiole de feuilles de palmier dattier et d'un matériau composite contenant des copeaux de feuilles de palmier dattier liés par de la colle. Les résultats obtenus ont montré des valeurs proches en termes de densité ($376,06 \text{ kg/m}^3$, et $302,36 \text{ kg/m}^3$) et de conductivité thermique ($0,152 \text{ W/m.K}$, et $0,162 \text{ W/m.K}$) pour les deux types de panneaux respectivement.

Les résultats de l'analyse des performances thermiques ont mis en évidence une efficacité notable de certains caissons dans le maintien de la chaleur interne, en augmentant celle-ci à des taux spécifiques pendant 10 heures par jour. Les panneaux intégrant une couche de polystyrène au sein de leur structure ont démontré une grande efficacité.

En ce qui concerne l'aspect relatif à la modélisation numérique des caissons exposés à la chaleur interne et externe, basée sur des données expérimentales de performances thermiques, elle a permis de visualiser la répartition de la chaleur en des points spécifiques. Cette simulation pourrait être utilisée à l'avenir pour le séchage respectueux de l'environnement des aliments.

Cette recherche a présenté des résultats prometteurs pour une application potentielle dans l'industrie des sandwichs, en raison de sa polyvalence dans les activités quotidiennes des individus. Ces matériaux peuvent être adaptés en fonction de leur utilisation spécifique, ou des limitations peuvent être imposées, en réalisant des expériences supplémentaires afin de définir leur caractérisation optimale à l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHES

BIBLIOGRAPHES

1. larousse.fr. isolation. Available from:
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/isolation/44464>.
2. ISOLATION, G. Isolation thermique. Isolation thermique; Available from: <https://guide-isolation.net/isolation-thermique/>.
3. Ahcen, Z., L'impact de l'isolation thermique sur l'efficacité énergétique dans l'habitat collectif à Tébessa, 2019, Université Larbi Tébessi - Tébessa. p. 135.
4. TECHNO-SCIENCE. Capacité thermique. Available from: <https://www.techno-science.net/definition/1307.html>.
5. Soumia, H., Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de Ouargla, in GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE2015, UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/9085>. p. 141.
6. Girod, C., Chaleur spécifique à basse température dans l'état normal des cuprates supraconducteurs, in Science des matériaux2020, Université Grenoble Alpes, Université de Sherbrooke (Québec, Canada). p. 189.
7. MICHAUD, F., RHÉOLOGIE DE PANNEAUX COMPOSITES BOIS/THERMOPLASTIQUES SOUS CHARGEMENT THERMOMÉCANIQUE, in FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE2003, UNIVERSITÉ LAVAL Québec, Canada. UNIVERSITÉ BORDEAUX I Bordeaux, France. p. 256.
8. Densité et masse volumique. juin 2006; Available from: <https://svt.ac-versailles.fr/IMG/archives/docpeda/actpeda/lycee/SVTSPC/densmv/notions.html>.
9. TITOUNA, D., ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA SOLUTION NUTRITIVE DANS UN MILIEU POREUX :
CAS DE LA LAINE DE ROCHE FLORICULTURE et EXPERT., in Génie Mécanique2011, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA. p. 123.
10. Deco.fr. Les avantages de la laine de roche. Travaux-isolation; Available from: <https://www.deco.fr/bricolage-travaux/isolation/actualite-782094-avantages-laine-roche.html>.

BIBLIOGRAPHES

11. l'isolation, T.s. LAINE DE VERRE. 2019 10 Octobre 2022; Available from: <https://www.toutsurlisolation.com/laine-de-verre>.
12. thermiques, C. La laine de verre, un isolant économique. Available from: <https://conseils-thermiques.org/contenu/laine-de-verre.php>.
13. FUTURA. Polystyrène expansé : qu'est-ce que c'est ? Maison; Available from: <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-polystyrene-expanse-10104/>.
14. LIÈGE, U.D. More sustainable and recyclable polyurethane foams. 29 November 2022; Available from: https://www.sciences.uliege.be/cms/c_10308886/en/more-sustainable-and-recyclable-polyurethane-foams.
15. LAKHAL, Z., A study of the effect of date palm tree waste on plaster's mechanical and thermal properties, in Construction mécanique2023, Université Mohamed Khider de Biskra. p. 81.
16. Sedap/LIGHTING, A. POURQUOI LE PLÂTRE ? POURQUOI LE PLÂTRE ? ; Available from: <http://m.sedap.com/fr/articles/9-essai-d-ajout-d-article.html>.
17. Mahmoud, B., Étude numérique du comportement à la flexion de composites bio-sourcés, in Génie mécanique2021, Université Larbi Tébessi - Tébessa. p. 87.
18. WIAM, T.C.e.B.H., ETUDE MECANIQUE ET THERMIQUE DE COMPOSITES POLYESTER INSATURE-FIBRE DU PALMIER DATTIER DPLF, in Sciences de la Matière2021, Université Mohamed Khider de Biskra. p. 104.
19. youmiwi. LES FIBRES NATURELLES. Available from: <https://youmiwi.com/blogs/youmiwi/une-fibre-naturelle-c-est-quoi>.
20. BASTÍAS, M.V., MODÉLISATION DU PRESSAGE À CHAUD DES PANNEAUX DE FIBRES DE BOIS (MDF) PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS, in FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE2006, UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC. p. 171.
21. BigMat. Panneau isolant fibre de bois : caractéristiques et avantages. Available from: <https://www.bigmat.fr/conseils-d-experts/panneau-isolant-fibre-bois/>.
22. Zineb, A., ÉTUDE DE COMPORTEMENT D'UNE CHEMINÉE SOLAIRE EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE, in Génie des procédés2011, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA. p. 159.

BIBLIOGRAPHES

23. AMROUNE, S., Caractérisations mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforcés par des fibres de palmier, in Génie mécanique2016, Université 8 Mai 1945 - Guelma -. p. 181.
24. LY, E.H.B., Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose, in Sciences et Génie des Matériaux2008, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE. p. 218.
25. Yazid, B., Caractérisation thermomécanique des bio -déchets de la région de Biskra., in Génie Mécanique.2021, Université Mohamed Khider de Biskra. p. 69.
26. GAMMANE, C., Etude de la rupture en MODE I d'un bio-composite Polymère/fibres de palmier dattier, in Génie Mécanique2020, Université Mohamed Khider de Biskra. p. 50.
27. Farid Touloum, A.B., Abdelhak Kaci, Nouveau bio-composite local à base de fibres cellulosiques. Application à l'isolation thermique en bâtiment., in Génie Mécanique2011, Université de Cergy-Pontoise, Université de Biskra: Premier Séminaire National de Génie Mécanique - Biskra. p. 6.
28. BOUSBA OTHMANE, T.A., Elaboration et évaluation des propriétés mécaniques d'un bio composites à base des déchets de palmier dattier, in Génie Mécanique2021, Université Kasdi Merbah Ouargla. p. 75.
29. Tarek, D., Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à base de fibres de palmier dattier, in Génie Mécanique2019, Université Mohamed Khider – Biskra. p. 161.
30. harizi Sohaib, b.K.A.E., Elaboration et caractérisation d'un bio-composite renforcé par des particules naturelles, in Génie des matériaux2023, Ecole nationale polytechnique.
31. Djoudi, T., et al., Physico-mechanical characterization of composite materials based on date palm tree fibers. *Journal of Natural Fibers*, 2021. **18**(6): p. 789-802.
32. Djoudi, T., H. Djemai, and M. Hecini, Investigating the Impact of Core Type on the Properties of Novel Bio-Composites with a Sandwich Structure Derived from Date Palm Waste. *Journal of Composite & Advanced Materials/Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 2024. **34**(2).
33. Thermiques, C. Le polystyrène expansé, un isolant efficace et accessible. Available from: <https://conseils-thermiques.org/contenu/polystyrene-expanse.php>.
34. SolidWorks. SolidWorks 2023. 2024 [cited 2024 17-06-2024]; Available from: <https://www.solidworks.com/fr>.

BIBLIOGRAPHES

35. ANSYS. ANSYS 2019R3. 2024 [cited 2024 17-06-2024]; Available from: <https://www.ansys.com/blog/ansys-2019-r3-user-experience-and-autonomous-vehicle-development>.