

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



UNIVERSITE DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

En Génie mécanique

Option : Énergétique **Thème**

:

---

**Caractérisation expérimentale de panneaux  
d'isolation thermique et phonique à base  
de déchets et de rejets de la pâte à papier**

---

**Promotrice :** Mme METIDJI Nadia

**Co-promoteur:** Mr. ROUDANE Mohamed  
Tahar

**Réalisé par :**

MIMOUNE

KHALED Fouad

SEMAOUI Saïd

**Année Universitaire 2022-2023**

## Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire de master a été effectué au sein de l'unité de développement des équipements solaire 'UDES' à Bousmail wilaya de Tipaza 'Algérie'. Nous tenons tout d'abord à exprimer nos gratitude à Dieu pour son aide.

Ensuite nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Mme METIDJI Nadia, maître de recherche A dans l'unité de développement des équipements solaires (UDES, Bousmail, Tipaza), notre promotrice, pour son soutien, son encadrement et ses conseils précieux tout au long de la rédaction de ce mémoire. Sa passion pour la recherche et son expertise dans le domaine a grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement Mr. ROUDANE Mohamed, professeur au niveau d'université de blida1, notre Co promoteur, pour sa collaboration et son implication dans ce projet. Ses connaissances approfondies et ses suggestions pertinentes ont été d'une grande valeur ajoutée.

Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de mon profond respect pour avoir pris la peine d'examiner et de juger mon travail.

Nous tenons à exprimer nos gratitude envers Mr. KETFI Omar, chef du département de mécanique, pour son soutien et sa confiance tout au long de nos études. Sa disponibilité et son encouragement ont été d'une grande importance.

Nos remerciements vont également à Mr. BOUTTOUT Abdelouaheb, Mr. DEBAGH Saïd, HAMAIDI Badr Eddine et Mme SELEYMI Amina, chercheurs dans le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiments (CNERIB, Alger), pour leur contribution précieuse à cette étude. Leurs conseils, leur expertise et leur partage de connaissances ont été d'une grande aide dans l'avancement de ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos sincères remerciements à Mr. Belkacem, doctorant au niveau d'université de blida1, pour sa participation active, ses discussions fructueuses et ses conseils avisés ont grandement enrichi notre travail de recherche.

Enfin, nous tenons à remercier notre collègue Mr. BENACHOUR Abderrahmane, étudiant dans l'université de blida1, pour sa collaboration et son soutien tout au long de ce parcours. Sa présence et ses échanges ont été très enrichissants.

Nous sommes reconnaissants envers tous ceux qui ont contribué de près

ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien inestimable a été un moteur dans la réussite de ce travail.

## APPENDICE A

### LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

$\tau$  : facteur de transmission.

$\nabla T$  : le gradient de température[°C]

**APRUE** : l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

**ATG** : Analyse thermogravimétrique.

**A, S** : la surface [ $m^2$ ]

**b** : la largeur des éprouvettes respectivement [ $mm$ ].

**C** : coefficient de transfert thermique [ $w/m^2.k$ ]

**C** : la capacité thermique [ $KJ/kg. k$ ]

**CMC** : Composites à Matrice Céramique.

**CMM** : Composites à Matrice Métallique.

**CMO** : Composites à Matrice Organique.

**Cp** : la capacité thermique massique [ $KJ/m^3.k$ ]

**CT Mètre** : L'appareil qui mesure le coefficient de la conductivité thermique.

**DRX** : la diffraction aux rayons X.

**DTG** : différentielle de l'analyse thermogravimétrique.

**e** : l'épaisseur du matériau [**m**]

**EAH** : Equipements et Applications héliothermiques.

**h** : le coefficient de transfert de chaleur par convection [**w/m<sup>2</sup>.k**] **I1**,

**N1** : local émission.

**I2, N2** : locale réception.

**IRTF** : Infrarouge à Transformée de Fourier.

**K** : la conductivité thermique du matériau [**W/m.k**]

**L** : la distance entre les axes des appuis cylindriques [**mm**].

**m** : la masse du matériau [**g**] **m<sub>0</sub>** : la masse de matériau composite à base de déchet de papier au temps **t<sub>0</sub>** [**g**].

**MEB** : microscopie électronique à balayage.

**MOR** : Le module à la rupture [**MPa**].

**m<sub>t</sub>** : la masse de matériau composite à base de déchet de papier au temps d'immersion **t** [**g**].

**P** : la charge maximale [**N**].

**PIV** : panneau isolant sous vide.

**PSE** : Polystyrène.

**PVA** : Poly Vinyle Alcool.

**R** : indice d'affaiblissement acoustique [**dB**]

**R** : la résistance thermique [**m<sup>2</sup>. k / w**]

**t** : l'épaisseur des éprouvettes respectivement [**mm**]

**Ta** : la température du fluide environnant [**°C**]

**Tr** : représente la durée de réverbération du local [**S**]

**Ts** : la température de la surface [**°C**]

**U** : le coefficient de transmission calorifique [**w/m<sup>2</sup>.k**]

**UDES** : Unité de Développement des Equipements Solaires.

**V** : le volume occupé. [**m<sup>3</sup>**]

**Wa** : l'énergie absorbée [**dB**]

**Wi** : l'énergie incidente [**dB**]

**Wr** : l'énergie réfléchie [**dB**]

**Wt** : l'énergie transmise [**dB**]

**α** : Coefficient d'absorption acoustique.

**λ** : la conductivité thermique [**W/m.k**]

**ρ** : la masse volumique [**kg/ m<sup>3</sup>**]

**Q** : la puissance du rayonnement thermique [**W**]

**ε** : l'émissivité du corps

**σ** : la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ).

**Q** : le flux de chaleur. [**W**]

## Résumé

Ce travail se concentre sur une étude pratique des propriétés thermiques et mécaniques et acoustiques en plus d'une simulation menée à l'aide du logiciel 'Trnsys' sur un nouveau matériau composite à base de déchets et de rejets de la pâte à papier. L'objectif principal est de proposer une solution efficace pour réduire les impacts environnementaux dans le secteur du bâtiment.

Du point de vue thermique, une évaluation approfondie des propriétés d'isolation thermique a été réalisée. Cela comprend la détermination de la résistance thermique, de la chaleur spécifique et de l'influence de l'humidité relative sur le comportement thermique de ces nouveaux matériaux composites. Les résultats ont démontré l'importance de considérer ces matériaux dans la catégorie des isolants destinés au secteur du bâtiment.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, des tests de flexion à trois points ont été effectués sur les nouveaux matériaux composites. Les courbes de charge/déplacement ainsi que les modes de rupture ont été analysés et discutés. Les résultats ont indiqué une bonne résistance à la flexion de ces matériaux.

Du point de vue acoustique, ces nouveaux matériaux sont destinés à être utilisés pour la correction acoustique dans les bâtiments. Des essais d'absorption acoustique ( $\alpha$ ) et d'indice d'affaiblissement acoustique (R) ont été réalisés, démontrant de bonnes propriétés d'isolation acoustique. L'analyse des résultats a confirmé la possibilité et la facilité d'intégration de ces matériaux dans les espaces habitables.

En ce qui concerne la simulation, notre matériau confirmé son efficacité pour améliorer l'isolation thermique et maintenir des températures intérieures confortables et stables.

Cette étude a permis de mettre en évidence les bonnes propriétés d'isolation thermique, la résistance à la flexion et l'efficacité acoustique des nouveaux matériaux composites à base de déchets et de rejets de la pâte à papier. Ces matériaux offrent une solution prometteuse pour réduire les impacts environnementaux et améliorer les performances des bâtiments.

**Mots de passe** : Isolation thermique, biomatériaux, déchets du papier, liants polymériques, séchage solaire

## Summary

This work focuses on a practical study of the thermal, mechanical, and acoustic properties, along with a simulation conducted using the software 'Trnsys,' on a new composite material based on waste and rejects from paper pulp. The main objective is to propose an effective solution to reduce environmental impacts in the building sector.

From a thermal point of view, a thorough evaluation of thermal insulation properties has been conducted. This includes determining the thermal resistance, specific heat, and the influence of relative humidity on the thermal behavior of these new composite materials. The results have demonstrated the importance of considering these materials in the category of insulation materials for the building sector.

Regarding mechanical properties, three-point bending tests have been performed on the new composite materials. Load-displacement curves and failure modes have been analyzed and discussed. The results indicated good bending strength of these materials.

From an acoustic perspective, these new materials are intended to be used for sound correction in buildings. Tests on sound absorption ( $\alpha$ ) and sound reduction index (R) have been conducted, demonstrating good acoustic insulation properties. The analysis of the results confirmed the possibility and ease of integrating these materials into living spaces.

Regarding the simulation, our material has confirmed its effectiveness in improving thermal insulation and maintaining comfortable and stable indoor temperatures.

This study has highlighted the good thermal insulation properties, bending strength, and acoustic efficiency of the new composite materials based on waste and by-products from pulp production. These materials offer a promising solution to reduce environmental impacts and enhance building performance.

**Passwords:** Thermal insulation, biomaterials, paper waste, polymeric binders, solar drying.

## ملخص

خصص هذا العمل لدراسة عملية الخواص الميكانيكية و الحرارية والصوتية، بالإضافة إلى محاكاة تمثيلاً استخدام برنامج "ترانسيس" لمواد مركبة جديدة مصنوعة من نفايات وبقايا لب الورق. الهدف الرئيسي هو تقديم حلاً فعالاً للحد من التأثير البيئية في قطاع البناء.

من الناحية الحرارية، تم إجراء تقييم شامل لخواص العزل الحراري. ويشمل ذلك تحديد المقاومة الحرارية والحرارية النوعية وتأثير الرطوبة النسبية على السلوك الحراري لهذه المواد المركبة الجديدة. أظهرت النتائج أهمية النظر في هذه المواد كعوازل مخصصة لقطاع البناء.

أما بالنسبة للخواص الميكانيكية، تم إجراء اختبارات انثناء بثلاث نقاط على المواد المركبة الجديدة. تم تحليل منحنيات الحمل-الانفصال وأنماط الكسر ومناقشتها أظهرت النتائج مقاومة جيدة للانحناء لهذه المواد.

من الناحية الصوتية، يفترض أن يتم استخدام هذه المواد المركبة الجديدة للتصحيح الصوتي في المباني. تم إجراء اختبارات ، وأظهرت نتائج جيدة في العزل الصوتي. تحليل النتائج أكد إمكانية (R) ومؤشر الضعف الصوتي  $(\alpha)$  الامتصاص الصوتي وسهولة دمج هذه المواد في المساحات السكنية.

فيما يتعلق بالمحاكاة، أكدت موادنا فعاليتها في تحسين العزل الحراري والحفاظ على درجات حرارة داخلية مريحة ومستقرة لقد سلطت هذه الدراسة الضوء على الخصائص الجيدة للعزل الحراري ومقاومة انثناء والكفاءة الصوتية للمواد المركبة الجديدة المصنوعة من نفايات وبقايا لب الورق، توفر هذه المواد حلاً واعداً للحد من التأثيرات البيئية وتحسين أداء المباني.

كلمات مفتاحية: العزل الحراري، المواد الحيوية، نفايات الورق، رابطات البولمر، التجفيف بالطاقة الشمسية

## Table des matières

Introduction Générale: .....	17
Chapitre I : Généralités sur l'isolation thermique.....	20
Introduction: .....	21
1 Enjeux énergétiques et environnementaux dans le secteur du bâtiment.....	21
2 Impact du secteur du bâtiment sur les consommations énergétiques et l'environnement .....	22
3 Etat de l'art sur l'isolation thermique et les matériaux isolants .....	23
3.1 Isolation thermique.....	23
3.2 Isolation par l'extérieur .....	24
3.3 Isolation par l'intérieur .....	24
3.4 Avantages d'isolation thermique .....	25
3.4.1 Avantage économique.....	25
3.4.2 Avantage environnemental .....	25
3.4.3 Réduire le niveau de bruit .....	25
3.4.4 Intégrité structurale d'un bâtiment.....	25
3.4.5 Empêchement de condensation de vapeur .....	26
3.4.6 Protection contre le feu .....	26
4 Classification des matériaux isolants.....	26
4.1 Matériaux inorganiques.....	26
4.1.1 Les isolants minéraux .....	26
4.2 Matériaux organiques.....	27
4.2.1 Les isolants synthétiques.....	27
4.2.2 Les isolants d'origine végétale.....	28
4.2.3 Les isolants d'origine animale .....	29
4.2.4 Matériaux combinés Laine de bois .....	29
5 Propriétés et performances d'un matériau isolant .....	29
5.1 Propriétés physiques.....	30
5.2 Propriétés environnementales .....	30
5.3 Propriétés de l'hygiène et de la santé .....	30
6 Sélection des matériaux isolants.....	30
6.1 Principaux facteurs à considérer .....	30
7 performances thermiques de différents matériaux isolants.....	31

7.1	La conductivité thermique.....	31
7.2	La résistance thermique.....	32
7.3	Le coefficient de transmission calorifique .....	33
7.4	La capacité thermique .....	34
7.5	La masse volumique.....	35
8	Modes de transfert de chaleur.....	36
8.1	Le transfert par conduction .....	37
8.2	Le transfert par convection.....	38
8.3	Le transfert par rayonnement .....	39
	Conclusion .....	39
	ChapitreII : Matériaux composites à base des déchets de papier Introduction.....	40
1	Définition de matériaux composites.....	41
1.1	Grande diffusion.....	41
1.2	Hautes performances .....	42
2	Constituants des matériaux composites.....	42
2.1	Les renforts.....	42
2.2	La matrice.....	43
2.2.1	Composites à Matrice Organique (CMO).....	44
2.2.2	Composites à Matrice Céramique (CMC) .....	45
2.2.3	Composites à Matrice Métallique (CMM).....	45
2.3	L'interphase.....	45
2.4	Les charges.....	46
2.5	Les additives.....	46
3	Cas d'étude .....	46
3.1	Colle liquide de type PVA (Poly Vinyle Alcool).....	46
3.2	Déchets de papier-carton.....	47
3.2.1	Processus d'obtention du papier et les produits en papier carton .....	48
3.2.2	Les propriétés et caractéristiques du papier-carton.....	49
3.3	La fibre cellulosique.....	50
	Conclusion .....	52
	Chapitre III : Matériaux et méthodes Introduction.....	53

1	Mise en œuvre des panneaux d'isolation thermique .....	54
1.1	Traitement des rejets et des déchets .....	54
1.2	Mise en œuvre des panneaux à base de déchets de pâte à papier .....	55
1.2.1	Composition.....	55
1.2.2	Mise en œuvre .....	55
1.3	Séchage de déchet de la pâte à papier .....	57
1.4	Etude granulométrique de la pâte à papier après séchage et broyage .....	58
1.4.1	Analyses granulométriques (Norme AFNOR) .....	58
1.5	La machine à presse .....	59
1.5.1	Principe de Fonctionnement .....	60
2	Technique de caractérisation .....	60
2.1	Propriétés morphologiques par MEB .....	61
2.2	la diffraction aux rayons X.....	61
2.3	Caractéristiques physico-chimiques et chimiques .....	62
2.3.1	Coefficient et cinétique d'absorption d'eau.....	62
2.3.2	Masse volumique apparente et épaisseur.....	62
2.3.3	Analyse thermogravimétrique ATG .....	63
2.4	Propriétés thermiques.....	64
2.4.1	Coefficient de conductivité thermique.....	64
2.5	Les propriétés mécaniques .....	65
2.5.1	L'essai de flexion trois points.....	65
2.6	Caractéristiques acoustiques .....	67
2.6.1	Indice d'affaiblissement acoustique R.....	67
2.6.2	Coefficient d'absorption acoustique $\alpha$ .....	68
2.6.3	Isolement acoustique brute D .....	69
	Conclusion .....	70
	Chapitre IV : Résultats et discussion de la partie expérimentale.....	71
	Introduction.....	72
1	Traitement thermique de déchet de papier.....	72
2	Morphologie de surface.....	73
3	Caractérisation physique.....	75
4	L'analyse thermogravimétrique (ATG).....	75
5	Caractérisation des panneaux d'isolation .....	76

6	Conductivité thermique .....	80
7	Propriétés d'absorption acoustique .....	83
8	Absorption .....	86
9	Résistance à la flexion .....	87
	Conclusion.....	88
	Chapitre V : simulation et Résultats.....	89
	Introduction.....	90
1	Description du logiciel .....	90
2	Fonctionnement du logiciel .....	90
3	Les étapes de travail .....	91
4	Calcul de la résistance thermique .....	96
	Conclusion .....	102
	Conclusion générale.....	103

## **Liste des tableaux**

### Chapitre I : Généralités sur l'isolation thermique

Tableau I.1: conductivité de chaque isolant .....	32
Tableau I.2 : Résistance de chaque isolant .....	33
Tableau I.3 : Capacité thermique de chaque isolant .....	34
Tableau I.4 : masse volumique de chaque isolant .....	35

### Chapitre III : Matériaux et méthodes

Tableau III.1 : Récapitulatif des éprouvettes élaborées. ....	56
---------------------------------------------------------------	----

### Chapitre IV : Résultats et discussion de la partie expérimentale

Tableau IV.1 : analyse quantitative par DRX du déchet de papier. ....	74
Tableau IV.2 : Masse des composites durant le séchage. ....	80
Tableau IV.3: les performances thermiques de notre matériau. ....	81
Tableau IV.4 : Comparaison de la conductivité et de la densité des composites à base de déchet de papier .....	82
Tableau IV.5 : cinq catégories existent selon le niveau du bruit .....	84
Tableau IV.7 : la réduction du bruit de notre matériau .....	85
Tableau IV.8 : Classes d'absorption acoustique .....	86

### Chapitre V : simulation et Résultats

Tableau V.1 : tableau des composants .....	93
Tableau V.2 : paramètres des composants .....	94

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur l'isolation thermique

Figure I.1 : Isolation par l'extérieur .....	24
Figure I.2 : Isolation intérieure .....	25
Figure I.3 : Panneau isolant sous vide .....	27
Figure I.4 : Les trois modes de transfert de chaleur .....	36
Figure I.5 : Le transfert par conduction .....	37
Figure I.6 : Le transfert par convection .....	38
Figure I.7 : Le transfert par rayonnement thermique .....	38

### Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier

Figure II.1 : Schéma d'un matériau composite .....	42
Figure II.2 : Différentes familles du renfort .....	43
Figure II.3 : Différentes familles de matrice .....	44
Figure II.4 : Colle à papier en PVA .....	47
Figure II.5 : Les déchets papier dans l'Algérie .....	48
Figure II.6 : Processus de la fabrication de papier .....	49
Figure II.7 : La fibre cellulosique .....	51
Figure II.8 : la structure moléculaire de fibre cellulosique .....	51

### Chapitre III : Matériaux et méthodes

Figure III.1 : Production des composites a) malaxage du liant ; b) malaxage du mélange ; c) compactage .....	56
Figure III.2 : Composites produits .....	57
Figure III.3 : Séchoir solaire et la distribution des produits dans les plateaux .....	58
Figure III.4 : Appareil utilisé pour l'analyse granulométrique .....	59
Figure III.5 : la machine à presse .....	60
Figure III.6 : Schéma de principe de l'analyse thermo gravimétrique .....	63
Figure III.7 : CT mètre a sonde .....	64
Figure III.8 : La sonde utilisée dans l'essai .....	65
Figure III.9 : Principe du test en flexion trois points sur une éprouvette .....	66
Figure III.10 : Essai de flexion 03 points. (A) Montage normalisé, (B) Montage de l'échantillon sur la machine d'essai. ....	67
Figure III.11 : Ondes incidentes, réfléchies et transmises pour un matériau soumis à une onde Acoustique d'incidence $\alpha$ .....	68
Figure III.12 : la chambre utilisée dans l'essai .....	70

### Chapitre IV : Résultats et discussion de la partie expérimentale

Figure IV.1 : Variation de température pour 9 points dans la serre solaire avec le temps de séchage .....	73
Figure IV.2 : Vue au microscope électronique à balayage de la structure du déchet de	

papier. ....	73
Figure IV.3 : Molécule de cellulose .....	74
Figure IV.4 : Thermo grammes ATG et DTG de la décomposition des déchets de papier. ....	76
Figure IV.5 : Courbe de distribution de la taille de particules de la pâte à papier après broyage. ....	77
Figure IV.6 : Influence de la sphérisation sur la géométrie des particules et sur la teneur en poussière de la pâte à papier : (a) avant, (b) après. ....	77
Figure IV.7 : Influence de la pression de mise en œuvre (densité) sur la friabilité des éprouvettes : a) : matériau friable, b) : matériau compact et stable dimensionnellement. ....	78
Figure IV.8 : influence de la méthode de séchage sur la qualité des éprouvettes : (gauche) solaire, (droite) étuveuse. ....	79
Figure IV.9 : Masse des composites durant le séchage. ....	79
Figure IV.10 : la conductivité thermique en fonction de la masse volumique. ....	83
Figure IV.11 : l'isolement acoustique brut en fonction des plages des fréquences. ....	84
Figure IV.12 : coefficient de l'absorption acoustique en fonction des plages des fréquences. ....	85
Figure IV.13 : Absorption de l'eau en fonction du temps d'immersion des échantillons E1, E2. ....	87
Figure IV.14 : Courbe force-déplacement de matériau composite E1 en flexion 3 points. ....	88
Figure IV.15 : Courbe force-déplacement de matériau composite E2 en flexion 3 points. ....	88

## Chapitre V : simulation et Résultats

Figure V.1 : Interface du logiciel Trnsys18 .....	91
Figure V.2 : la maison dessinée pour faire l'étude .....	91
Figure V.3 : l'installation proposée pour la simulation .....	92
Figure V.4 : fichier du météo 'Dar El Beida' .....	92
Figure V.5 : les températures en fonction du temps .....	94
Figure V.6 : variation de la température ambiante pendant une année .....	95
Figure V.7 : La quantité de chaleur échangé en printemps .....	96
Figure V.8 : différence de la température en printemps. ....	96
Figure V.9 : La quantité de chaleur échangé dans l'été .....	97
Figure V.10 : différence de la température dans l'été .....	98
Figure V.11 : La quantité de chaleur échangée dans l'automne.....	99
Figure V.12 : différence de la température dans l'automne .....	99
Figure V.13 : La quantité de chaleur échangée en hiver .....	100
Figure V.14 : différence de la température en hiver .....	100
Figure V.15 : la variation de la résistance thermique en fonction du temps .....	102

## **Introduction générale :**

En Algérie et depuis quelques années, l'importante production des déchets et plus particulièrement des boues de papeterie qui présentent de plus en plus un réel problème environnemental. L'industrie du papier génère des quantités considérables de déchets dont la mise en décharge a été, jusque-là, le moyen d'élimination le plus simple et le moins onéreux.

D'un point de vue environnemental et économique, la mise en décharge est considérée comme la méthode de gestion des boues la plus simple pour une entreprise industrielle. Toutefois, elle présente des inconvénients majeurs tels que :

- Le coût élevé de transport à cause de l'éloignement des usines des sites de décharge.
- Raréfaction du nombre de sites : les permis pour l'ouverture de nouveaux sites sont difficiles à obtenir, et ce, pour limiter la contamination des sols et des eaux souterraines.
- De nouvelles réglementations sur la gestion des déchets, avec des normes environnementales de plus en plus sévères, induisent des coûts supplémentaires de gestion.
- Dégagement d'odeurs causées par l'activité bactérienne.

Aujourd'hui, les matériaux d'isolation thermique et phonique utilisés dans le bâtiment sont, essentiellement : la mousse polystyrène, la mousse polyuréthane, le liège, la ouate de cellulose, ...etc. La ouate de cellulose fabriquée à partir de papier journal et de magazines est, en effet, un très bon isolant thermique et phonique utilisé dans certains pays européens comme l'Allemagne et la France. Le produit qui sera développé dans le cadre de cette étude est similaire à la ouate de cellulose par rapport à la nature de la fibre de base utilisée (matériaux bio-sources).

La filière des matériaux bio-sources a été identifiée comme l'une des filières vertes ayant un potentiel de développement économique élevé pour l'avenir, notamment en raison de son rôle pour diminuer notre consommation de matières premières d'origine fossile, limiter les émissions de gaz à effet de serre et créer de nouvelles filières économiques.

L'énergie consommée dans le secteur du bâtiment (résidentiels et commerciaux) représente 20,1% de l'énergie totale consommée dans le monde entier [1].

Les matériaux de construction ordinaires tel que le béton, le parpaing, l'acier...etc. sont des matériaux énergivores qui consomment des quantités considérables en matière d'énergie primaire et des rejets des gaz à effet de serre pour leurs productions. Les enjeux écologiques actuels génèrent un regain d'intérêt de l'utilisation de ces matériaux bio-sources présentant des propriétés spécifiques à leur emploi et dont les masses volumiques sont faibles.

Pour cela, les bâtisseurs ont commencé à chercher non seulement les performances mécaniques mais, ils tentent également de chercher les qualités thermiques et acoustiques des matériaux.

Cette étude a pour but, donc, la valorisation d'un rejet industriel, à base de courtes fibres cellulosiques, généré par les lignes de recyclage du papier et du carton usagés dans la fabrication de matériaux d'isolation thermique et phonique pour le secteur du bâtiment. Ces matériaux qui se présentent sous la forme de panneaux serviront à l'isolation des parois et des planchers des constructions de tous types. Cette étude énonce la méthodologie à suivre pour la valorisation de ces déchets et rejets en présentant les traitements et les transformations qu'ils doivent subir avant d'être incorporés dans les formulations des panneaux d'isolation. Le but est de transformer ces déchets et rejets en une matière première de base pour la formulation de nouveaux matériaux composites adaptés à l'isolation thermique. Etant constitués principalement de fibres cellulosiques ayant subis une dégradation mécanique et chimique, cette nouvelle matière assurera la fonction d'isolant thermique et phonique dans les formulations proposées. Le reste des composants utilisés serviront comme liants, fongicides et retardateurs de la propagation du feu. Ce travail consiste aussi à caractériser expérimentalement le comportement thermique, mécanique et phonique de matériaux composites utilisés pour l'isolation de l'enveloppe du bâtiment. Une étude de simulation des transferts de chaleur au sein des parois d'un habitat constituées par ce type de matériaux.

Pour mener à bien ce travail, ce manuscrit s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique rappelant tout d'abord le contexte et les enjeux énergétiques et environnementaux du secteur du bâtiment, ainsi que l'importance de l'isolation thermique et les avantages qu'elle offre. Finalement une partie qui concentre sur les modes de transfert de chaleur.

Le second chapitre présente une partie aux généralités sur les matériaux

composites, cela nous a permis de poser les bases de ce travail en réalisant un état de l'art des connaissances sur les matériaux composites. Dans la deuxième partie on a étudié notre cas de composite à base de déchets de papier.

Ensuite, le troisième chapitre contient la présentation d'une part les matériaux utilisés dans le cadre de notre recherche, et d'autre part les dispositifs employés pour la mise en œuvre et la caractérisation de notre matériau.

Après, le quatrième chapitre consacré à la discussion de l'ensemble des résultats obtenus à partir des différents tests effectués.

Enfin, le dernier chapitre représente la partie de la simulation réalisée par logiciel 'Trnsys' qui nous aide à évaluer notre matériau et avoir des résultats pendant une certaine durée et paramètres dépend du temps.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et les perspectives.

---

## **Chapitre I : Généralités sur l'isolation thermique**

---

**Introduction :**

De nombreuses études sont actuellement menées sur l'efficacité énergétique des bâtiments, en particulier sur la réduction de leur consommation d'énergie.

Ce chapitre aborde ces aspects en deux parties. Dans la première partie, les enjeux énergétiques et environnementaux du secteur du bâtiment sont présentés, ainsi que l'importance de l'isolation thermique et les avantages qu'elle offre. La deuxième partie se concentre sur les modes de transfert de chaleur.

**1 Enjeux énergétiques et environnementaux dans le secteur du bâtiment :**

Aujourd'hui, l'impact négatif des activités humaines (industrie, construction, etc.) sur l'environnement et la nécessité de réduire cet impact au niveau international renforce la motivation à intégrer les projets dans des démarches de développement durable et de maîtrise de l'énergie. Le développement durable est le résultat d'un long processus qui a propulsé les questions environnementales à l'agenda politique des pays développés depuis les années 1970, en raison des catastrophes environnementales d'origine humaine et de la hausse des prix des combustibles fossiles [1].

La définition la plus largement acceptée du développement durable est celle que l'on trouve dans le rapport de 1987 de Gro Harlan Brundtland [1], présidente de la commission mondiale sur l'environnement et le développement à l'ON « le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Néanmoins, la capacité des générations futures à gagner leur vie est menacée.

Ces menaces incluent :

Les rejets en quantités importantes de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone méthane etc.) par les activités humaines, ont provoqué le processus du réchauffement climatique et cela a été déterminé par la majorité des scientifiques.

Rareté des ressources naturelles. Certains d'entre eux sont considérés comme essentiels au fonctionnement de notre société (pétrole, gaz, charbon, etc.) [2].

La maîtrise de la consommation d'énergie est donc la meilleure solution Concernant la question du changement climatique. Elle l'aide également à ralentir

l'épuisement des ressources fossiles, alors qu'une part importante de la consommation d'énergie peut être assurée par les énergies renouvelables [3].

## **2 Impact du secteur du bâtiment sur les consommations énergétiques et l'environnement :**

Toutes les activités liées au secteur de la construction (conception, construction utilisation démolition, etc.) ont un impact direct ou indirect sur l'environnement [4].

Le secteur du bâtiment en particulier reste l'un des secteurs les plus polluants non seulement en raison de la surconsommation et du gaspillage d'énergie, mais aussi en raison de l'élimination des déchets non recyclé [5]. Les bâtiments sont responsables de plus d'un tiers des émissions de dioxyde de carbone. Il convient également de noter que le dioxyde de carbone est l'un des principaux gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Toutes les activités liées au secteur de la construction (conception, construction utilisation, démolition, etc.) ont un impact direct ou indirect sur l'environnement [4].

En Algérie, selon un rapport de l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) [6], d'après le bilan des émissions de dioxyde de carbone par secteur, l'habitat résidentiel est classé troisième après les industries énergétiques et le transport, avec 6312 Teq CO<sub>2</sub> (tonnes équivalent de CO<sub>2</sub>), derrière l'énergie et les transports. De plus, le secteur a également un impact important sur la qualité de l'air intérieur et la santé, qui sont de plus en plus reconnus comme des critères importants dans la construction.

Le cycle de vie d'un bâtiment (production des matériaux : extraction des matières premières, transformation et pose) a un impact sur l'environnement.

De plus, sa démolition produit des déchets, des émissions polluantes. Pour minimiser ces impacts, des recherches visent à développer l'utilisation de matériaux de construction à faible impact environnemental et qui sont renouvelables, consomment très peu d'énergie ou de combustibles fossiles produisent un minimum de pollution et de risques pour la santé, et devrait permettre de diminuer efficacement les émissions de dioxyde de carbone.

Le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore en Algérie, représentant

plus de 42% de la consommation totale d'énergie. Par exemple, les habitats consomment en moyenne plus de 151 kWh/an pour le chauffage, la climatisation, l'eau sanitaire et l'éclairage, l'Algérie est en retard, essentiellement à cause de la subvention par l'état des énergies fossiles comme le gaz naturel. Dans ce contexte, l'exemple le plus important est les déperditions thermiques dans l'habitat qui se traduisent par des pertes de chaleur à travers les toitures, les murs les ponts thermiques, les planchers et le phénomène de renouvellement d'air. Un autre sujet de préoccupation est le pourcentage de déchets non recyclés. Actuellement, il est rejeté dans la nature en grande quantité et pollue l'environnement [7].

En effet, les démarches de maîtrise de l'énergie proposées pour ce secteur portent notamment sur l'introduction de l'isolation thermique des bâtiments qui permet d'une part de réduire la consommation d'énergie liée au chauffage, la climatisation d'un logement d'environ 40%, et d'autre part de valoriser les déchets naturels rejetés [8]. Le secteur du bâtiment est un grand consommateur de matières premières, joue donc un rôle important dans la logique de valorisation des déchets naturelle.

### **3 Etat de l'art sur l'isolation thermique et les matériaux isolants :**

#### **3.1 Isolation thermique :**

L'isolation joue un rôle important dans la réduction de la consommation d'énergie et la création d'espaces de vie plus sains et plus confortables dans les bâtiments.

En effet, une meilleure isolation signifie que les gens choisissent des systèmes de climatisation moins puissants et donc plus économiques [9].

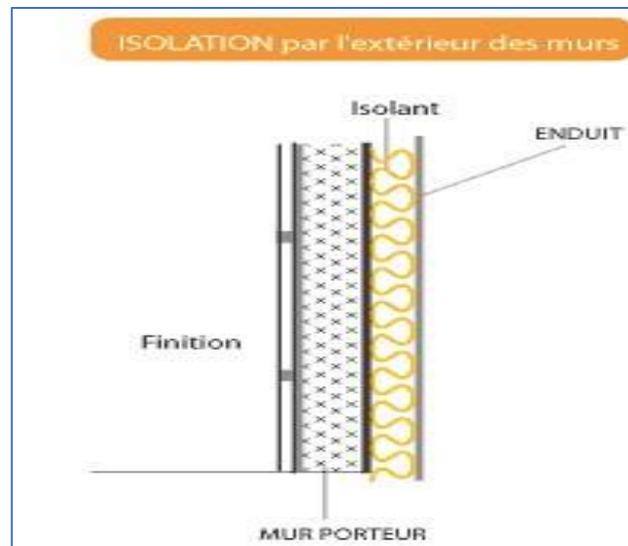
Selon la littérature [10], L'isolation thermique est une technique ou un moyen matériel (matériau ou combinaison de matériaux) pour limiter les transferts thermiques par conduction, Convection et rayonnement entre l'extérieur et l'intérieur d'une habitation. Ça ralentit le débit en raison de sa résistance thermique élevée la chaleur s'accumule à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. Il s'agit d'une mesure essentielle pour atteindre un niveau satisfaisant de conditions thermiques.

En fait, la notion de bien-être thermique est plus large que celle de confort thermique. Encore et encore ce dernier correspond à l'absence de sensations corporelles

désagréables, c'est-à-dire "froid, avoir". "Chaud"- la santé thermique dépend de facteurs culturels et psychologiques [11].

### **3.2 Isolation par l'extérieur :**

L'installation de l'isolant sur la surface extérieure du mur, appelée isolation par l'extérieur est une approche souvent considérée comme la plus coûteuse mais également la plus performante. Cette méthode offre une isolation optimale pour le confort en été et en hiver car elle permet de préserver l'inertie thermique élevée des murs intérieurs tout en éliminant les ponts thermiques. Un bon isolant se caractérise par une faible conductivité thermique. En général, les matériaux plus légers est de meilleurs isolants car leur densité réduite entraîne une plus grande séparation entre.



**Figure I.1 :** Isolation par l'extérieur [13]

### **3.3 Isolation par l'intérieur :**

L'isolation intérieure est une méthode qui consiste à isoler un bâtiment en plaçant un matériau isolant derrière une cloison en maçonnerie ou une ossature.

C'est le procédé le plus couramment utilisé par les constructeurs en raison de sa facilité de mise en œuvre.

Cependant, cette approche présente quelques inconvénients, notamment l'annulation de l'inertie thermique de la paroi isolée et l'absence de prévention des ponts thermiques sur la maçonnerie [12].

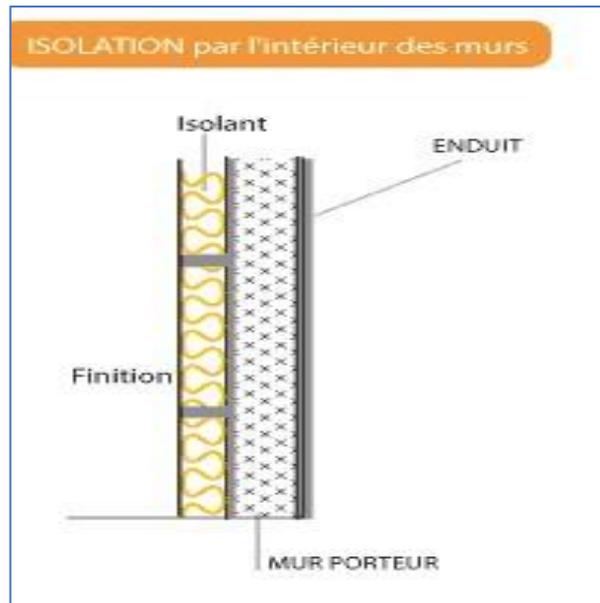


Figure I.2 : Isolation intérieure [13].

### 3.4 Avantages d'isolation thermique :

Le principal avantage de l'isolation est qu'elle réduit la dépendance à l'égard des systèmes (mécaniques/électriques) pour assurer le bon fonctionnement du bâtiment

En économisant l'énergie et les ressources naturelles associées. Outre le confort thermique, l'utilisation de l'isolation dans les bâtiments apporte également d'autres avantages tels que [10] :

**3.4.1 Avantage économique :** En utilisant des matériaux d'isolation, vous pouvez réaliser d'importantes économies d'énergie avec un petit investissement. Réduisez les coûts de fonctionnement de l'énergie.

**3.4.2 Avantage environnemental :** L'utilisation de l'isolation réduit non seulement les coûts de fonctionnement de l'énergie, mais entraîne également des avantages environnementaux tels que le recyclage des déchets qui contribuent aux émissions de polluants.

**3.4.3 Réduire le niveau de bruit :** L'isolation réduit les bruits nocifs et gênants des pièces voisines et de l'extérieur. Cela améliore le confort acoustique des bâtiments isolés.

**3.4.4 Intégrité structurale d'un bâtiment :** De violentes fluctuations de température peuvent provoquer un transfert de chaleur indésirable et endommager les structures des bâtiments. Le maintien d'un bâtiment avec des fluctuations de température minimales aide à préserver l'intégrité de la structure du bâtiment. Ceci peut être réalisé avec une bonne isolation et peut prolonger la durée de vie du bâtiment.

**3.4.5 Empêchement de condensation de vapeur :**

Une bonne installation de l'isolant peut empêcher la condensation de vapeur sur les surfaces du bâtiment.

Cependant, des précautions doivent être prises pour éviter les effets néfastes sur la structure du bâtiment en raison d'une mauvaise installation ou d'une mauvaise construction de l'isolation. De plus, les barrières contre l'humidité sont couramment utilisées pour empêcher l'humidité de pénétrer dans l'isolant à basse température.

**3.4.6 Protection contre le feu :** En cas d'incendie, choisir la bonne isolation et l'installer correctement peut ralentir la chaleur et empêcher la flamme de pénétrer dans le bâtiment.

**4 Classification des matériaux isolants :**

Les matériaux isolants peuvent être classés en trois groupes principaux. C'est-à-dire les matériaux inorganiques (isolants minéraux), les matériaux organiques (isolants synthétiques, végétaux et animaux) et les matériaux composites (comme la laine de bois) [14].

**4.1 Matériaux inorganiques :**

**4.1.1 Les isolants minéraux :**

L'isolant minéral est fabriqué à partir de matériaux naturels inorganiques. Ceux-ci comprennent le verre mousse, la laine de verre, la laine de roche (en particulier le basalte), la perlite, la vermiculite et l'argile expansée [11] [15].

Il a de bonnes performances thermiques, une haute résistance au feu, une stabilité et une robustesse, et est largement utilisé dans tous les domaines de la construction.

Il peut être réalisé sous différentes formes (matelas ou panneau) [11]. La laine de roche et la laine de verre sont les matériaux d'isolation les plus couramment utilisés [15].

## **4.2 Matériaux organiques :**

### **4.2.1 Les isolants synthétiques :**

L'isolation synthétique est généralement utilisée pour l'isolation externe.[16] les propriétés d'isolation thermique des panneaux de polyuréthane et de polystyrène utilisé comme isolants extérieurs des bâtiments ont été étudiées. Ils ont montré que ces matériaux ont des propriétés thermiques intéressantes. Cependant il existe de nombreux types d'isolants synthétiques. Polystyrène, polyuréthane, mousse d'urée formaldéhyde, mousse phénolique, mousse de chlorure de polyvinyle, polyester [11],[17]. Parmi les isolants synthétiques, il existe également une nouvelle génération d'isolants spécialement conçus pour des performances élevées, notamment : B. PIV (panneau isolant sous vide), aérogel, brique de terre cuite à simple paroi, bloc d'argile expansée à simple paroi, etc. [15]

#### **4.2.1.1 Le PIV (panneaux d'isolants sous vide) :**

Le PIV est constitué d'un matériau "noyau" placé à l'intérieur d'une cavité, enveloppé dans un film étanche. Les panneaux d'isolation sous vide ont d'excellentes propriétés thermiques, avec une conductivité thermique de  $0,0042 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $0,0050 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Il a une bonne isolation phonique et une bonne résistance à la compression.



**Figure I.3 : Panneau isolant sous vide [18]**

**4.2.1.2 L'aérogel :**

Mis au point par des chimistes américains en 1931, ce procédé de fabrication a été mis au point par la NASA pour isoler les satellites. Retirez l'eau du gel de silice et remplacez-la par de l'air [19]. L'aérogel possède d'excellentes propriétés d'isolation thermique. Composé à 99,8% d'air, l'aérogel est très léger et ressemble plus à un nuage de poussière qu'à un isolant traditionnel. Il a une excellente conductivité thermique de  $0,011 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et  $0,013 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . A titre de comparaison : elle est trois fois plus isolante que la laine de verre.

**4.2.1.3 Brique mono mur en terre cuite :**

C'est un matériau de maçonnerie en terre cuite qui se met en œuvre de manière classique, sa conductivité thermique varie entre  $0.12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et  $0.18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et peut descendre jusqu'à  $0.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  avec le remplissage des alvéoles par un matériau isolant comme la laine de roche. Il offre également une faible inertie thermique et régule par sa structure microporeuse l'humidité de l'habitat.

**4.2.1.4 Blocs mono mur en argile expansée :**

Ce sont des blocs de billes d'argile expansée qui ont été cuits, calibrées puis mélangées avec du ciment. De plus, la conductivité thermique est de  $0,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . L'argile expansée elle-même n'est pas un matériau très isolant, mais elle est très résistante au feu, à l'eau et à la pression. Pour cette raison, ce matériau est largement utilisé dans la construction.

**4.2.2 Les isolants d'origine végétale :**

Les isolants d'origine végétale sont de plus en plus utilisés dans le domaine de l'isolation en raison de leurs propriétés intéressantes et de leur disponibilité. Les matériaux d'isolation les plus utilisés sont la laine de bois, la ouate, la laine de lin, la laine de coco, la cellulose, la paille, les épis, le liège moussé et le chanvre (laine et béton de chanvre) [11]. Cette section décrit certains des isolateurs les plus courants.

**4.2.2.1 Liège expansé :**

Ce matériau est broyé en granulés et expansé par de la vapeur chaude (300°C) dans un four autoclave. Au cours de ce processus, les granulés gonflent et s'agglomèrent sous l'action de la résine contenue dans les granulés. Le carton est ensuite découpé à l'épaisseur souhaitée. Ce sont des granulés, des panneaux ou des éléments composites préfabriqués [11].

**4.2.2.2 Chanvre :**

À la fin des années 1980, le chanvre a commencé à être utilisé en France comme matériau de construction et pour l'isolation. Le tailleur de pierre italien Rousset a eu l'idée d'imprégner les particules de la partie centrale de la tige entourée de longues fibres, avec des silicates. Cela se produit dans les granulés de chanvre, les granulés et les fibres longues, et uniquement dans les fibres longues (laine de chanvre) [11].

**4.2.2.3 Cellulose :**

La laine de cellulose est fabriquée à partir de papier recyclé obtenu à partir de papier journal vierge. Le papier est déchiqueté, floconné et stabilisé avec une variété d'agents de texture (gypse, sels de bore, sels de sodium, sels de calcium, etc.) qui varie selon les fabricants. Disponible sous forme de panneau isolant texturé ou de panneau d'implantation. Il est utilisé comme isolant aux États-Unis et en Scandinavie (une partie de l'Europe) depuis les années 1930 [11] [17].

**4.2.3 Les isolants d'origine animale :****4.2.3.1 Laine de mouton :**

Depuis 1990, dans les pays germaniques, la laine de mouton a été conditionnée industriellement pour devenir un matériau homologué du bâtiment. Elle peut être utilisée comme isolante de remplissage à disposer manuellement [11] [17].

**4.2.4 Matériaux combinés Laine de bois :**

Les panneaux de laine de bois sont fabriqués à partir de fibres de bois et le liant est la lignine de bois. Ce matériau naturel a une conductivité thermique similaire aux autres laines isolantes et garantit une très longue durée de vie grâce à la structure rigide

de la structure rainurée [9]. Utilisé comme isolation thermique ou panneaux auxiliaires d'isolation technique [17].

## **5 Propriétés et performances d'un matériau isolant :**

La conductivité thermique n'est pas la seule considération lors du choix de l'isolant. En fait, les propriétés des matériaux isolants peuvent être globalement divisées en trois groupes [14] [17] :

### **5.1 Propriétés physiques :**

Ils décrivent le comportement des matériaux en termes de densité, de résistance mécanique, de capacité d'isolation thermique, d'absorption acoustique, de résistance à l'humidité et au feu, de stabilité dimensionnelle, etc.

### **5.2 Propriétés environnementales :**

Ce deuxième groupe comprend l'énergie grise primaire, l'énergie totale utilisée dans la fabrication, le transport et finalement le recyclage des matériaux, les émissions de gaz associées aux matériaux de fabrication, l'utilisation d'additifs antis biologiques etc.

### **5.3 Propriétés de l'hygiène et de la santé :**

Le troisième groupe s'intéresse à la santé publique durant la production l'utilisation et l'étape finale de disposition des matériaux (par rapport aux besoins en oxygène à l'élimination des odeurs, fumées et gaz nocifs divers). Chaque matériau peut avoir des conséquences sur la santé, à titre d'exemple le rejet de poussières ou particules (comme la laine de verre).

## **6 Sélection des matériaux isolants :**

### **6.1 Principaux facteurs à considérer :**

L'un des critères essentiels dans le choix d'un isolant est sa résistance thermique R. Cependant d'autres critères doivent également être pris en compte pour une sélection adéquate. En général, ces critères incluent :

- Neutralité chimique : l'isolant ne doit pas réagir chimique me avec les autres matériaux de construction utilisés.
- Ininflammabilité : il est préférable d'éviter l'utilisation de matériaux facilement inflammables, afin d'assurer la sécurité.
- Durabilité : l'isolant doit résister aux agents atmosphériques tels que l'humidité et la chaleur, afin de maintenir ses performances sur le long terme.
- Stabilité dimensionnelle à la température : les matériaux isolants utilisés en toiture plate, exposés à des températures élevées dues à l'ensoleillement doivent présenter de faibles coefficients de dilatation et de retrait.
- Facilité de mise en œuvre : le mode d'installation et de manipulation de l'isolant doit être pris en considération.
- Coût : le coût global de l'isolant, incluant son acquisition et sa mise en place doit être évalué

En tenant compte de ces différents critères, il est possible de faire un choix éclairé pour sélectionner le meilleur isolant adapté à chaque situation [20].

### **7 performances thermiques de différents matériaux isolants :**

Lorsque vous choisissez entre la vaste gamme de matériaux, il est nécessaire de mesurer la performance des isolants thermiques. Comment ? En prenant en compte les deux caractéristiques suivantes :

- La valeur Lambda ( $\lambda$ ), appelée le coefficient de conductivité thermique.
- La valeur R, qui représente le coefficient de résistance thermique.

Un isolant est un matériau qui limite les échanges d'énergie entre deux systèmes. Il est préférable de choisir un isolant qui empêche la chaleur de s'échapper en hiver mais qui, en été, l'empêche de rentrer dans la maison. Ceci évite de recourir à la climatisation ou à un surchauffement de votre maison, qui vous le savez est un processus très énergivore.

#### **7.1 La conductivité thermique :**

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) d'un matériau mesure sa capacité à conduire

la chaleur. Elle indique la quantité de chaleur qui est transférée par unité de surface et par unité de temps, lorsque soumise à un gradient de température [21].

L'équation suivante :

$$\lambda = Q / (A * \Delta T) \quad (\text{I. 1})$$

Où :

$\lambda$  : la conductivité thermique. [W/m.k]

$Q$  : le flux thermique. [W]

$A$  : la section. [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  : la différence de température. [k]

**Tableau I.1:** conductivité de chaque isolant [22]

	$\lambda$ en W/(m/K	
	Min	Max
Laine de verre	0,032	0,040
Laine de roche	0,034	0,040
Laine de chanvre	0,041	0,044
PSE	0,031	0,038
Liège	0,029	0,035
Plume de canard	0,040	0,042
Polyuréthane	0,021	0,028
Laine de bois	0,038	0,060
Laine de mouton	0,039	0,042
Laine de lin	0,037	0,041
Ouate de cellulose	0,038	0,040
Laine de coton	0,039	0,041

## **7.2 La résistance thermique :**

La résistance thermique (R) d'un matériau mesure sa capacité à faire face aux variations de température, que ce soit le froid ou la chaleur. Elle est calculée en divisant l'épaisseur du matériau (e) par sa conductivité thermique ( $\lambda$ ) [21].

L'équation suivante :

$$R = e / \lambda \quad (I.2)$$

Où

**R** : la résistance thermique du matériau. [ $m^2 \cdot k / w$ ]

**e** : l'épaisseur du matériau. [**m**]

**$\lambda$**  : la conductivité thermique du mater [**W/m.k**]

**Tableau I.2** : Résistance de chaque isolant [22]

	<b>R en M<sup>2</sup>K/W</b> <b>Pour 200mm</b>
Laine de verre	5,00
Laine de roche	5,00
Laine de chanvre	4,55
Polystyrène (PSE)	5,26
Liège	5,71
Plume de canard	4,76
Polyuréthane	7,14
Laine de bois	3,33
Laine de mouton	4,76
Laine de lin	4,88
Ouate de cellulose	5,00
Laine de coton	4,76

### **7.3 Le coefficient de transmission calorifique :**

Le coefficient de transmission calorifique ( $U$ ) mesure les pertes de chaleur d'un matériau ou d'une paroi. Il est défini comme l'inverse de la résistance thermique ( $R$ ) ce qui signifie qu'il est calculé en prenant la réciproque de la résistance thermique [23].

L'équation suivante :

$$U = 1 / R \quad (\text{I.3})$$

Où :

$U$  : le coefficient de transmission calorifique. [ $\text{w/m}^2 \cdot \text{k}$ ]

$R$  : la résistance thermique du matériau ou de la paroi. [ $\text{m}^2 \cdot \text{k} / \text{w}$ ]

#### **7.4 La capacité thermique :**

La capacité thermique représente l'énergie requise pour augmenter la température d'un corps de 1 Kelvin. Elle est exprimée en joules par kelvin (J/K) et est une grandeur extensive [23].

L'équation suivante :

$$C = C_p * m \quad (\text{I.4})$$

Où :

$C$  : la capacité thermique. [ $\text{Wh /m}^3 \cdot \text{K}$ ]

$C_p$  : la capacité thermique massique. [ $\text{Wh /m}^3 \cdot \text{K.kg}$ ]

$m$  : la masse du corps. [ $\text{kg}$ ]

**Tableau I.3 : Capacité thermique de chaque isolant [24]**

<b>Isolant</b>	<b>Capacité thermique (Wh /m<sup>3</sup>· K)</b>
Ouate de cellulose	21,45
Laine de roche en vrac	6
Perlite expansée	24,93
Laine de chanvre en vrac	9,75

Polystyrène expansé	6,894
Laine minérale rouleau	4,5
Laine minérale semi-lourde	23,8
Laine de chanvre en rouleau ou en vrac	9,75
Polystyrène extrudé	11,55
Laine de bois	112,5
Laine de roche pour sol	33,8
Polyuréthane	8,155

**7.5 La masse volumique :**

La masse volumique d'une substance, qu'il s'agisse d'un liquide ou d'un solide correspond à la quantité de matière contenue par unité de volume [25].

L'équation suivante :

$$\rho = m/V \tag{I.5}$$

Où

$\rho$  : la masse volumique. [ Kg/m<sup>3</sup> ]

$m$  : la masse du matériau. [Kg]

$V$  : le volume occupé. [m<sup>3</sup>]

**Tableau I.4 : masse volumique de chaque isolant [24]**

<b>Isolant</b>	<b>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Ouate de cellulose	55
Laine de roche en vrac	25
Perlite expansée	90
Laine de chanvre en vrac	25

Polystyrène expansé	18
Laine minérale rouleau	18
Laine minérale semi-lourde	70
Laine de chanvre en rouleau ou en vrac	25
Polystyrène extrudé	35
Laine de bois	150
Laine de roche pour sol	130
Polyuréthane	35

**8 Modes de transfert de chaleur :**

Les échanges thermiques sont les phénomènes de transfert d'énergie sous forme de chaleur dus à une différence spatiale de température. Celle-ci est définie comme étant l'énergie transférée du milieu à plus haute température vers le milieu à plus basse température. Dans un transfert de chaleur, les deux principaux paramètres sont le gradient de température et le flux de chaleur [26].

Il existe trois principaux modes de transfert d'énergie thermique : la conduction la convection et le rayonnement thermique. La conduction se produit lorsque le flux de chaleur passe d'un corps à un autre, par contact. On parle de convection lorsque la chaleur est transmise par les déplacements convectifs du corps chauffé. Ce mode de transfert implique un déplacement de matière dans le milieu. Enfin, le rayonnement ou radiation– correspond à l'ensemble des corps qui émettent de la lumière et sont eux-mêmes chauffés par la lumière qu'ils absorbent. C'est le cas des rayons du soleil. (Cermak et Rybach, 1982) [27].



**Figure I.4 :** Les trois modes de transfert de chaleur [28].

### **8.1 Le transfert par conduction :**

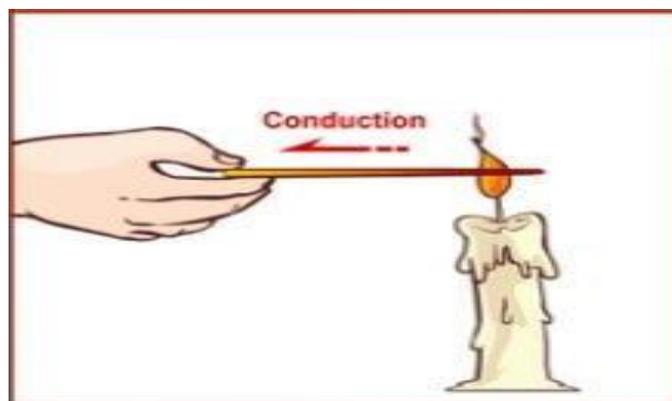
La conduction thermique est le transfert de chaleur dans un milieu opaque sans déplacement de matière, causé par une différence de températures. Elle se produit à l'intérieur d'un corps de deux manières ; par les vibrations des atomes ou molécules et par les électrons libres [29].

L'équation de conduction thermique est donnée par la loi de Fourier, qui peut être exprimée comme suit :

$$Q = -K \cdot \nabla T \quad (\text{I.6})$$

Où :

- $Q$  : le flux de chaleur. [W/m<sup>2</sup>]
- $K$  : la conductivité thermique du matériau. [W/m.k]
- $\nabla T$  : le gradient de température. [k/m]



**Figure I.5 :** Le transfert par conduction [30].

### 8.2 Le transfert par convection :

La convection implique le transport d'énergie par la combinaison de la conduction de l'accumulation d'énergie et du mouvement du milieu. Elle est considérée comme le mécanisme prédominant de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection à partir d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide environnant se déroule en plusieurs étapes.

Tout d'abord, la chaleur se propage par conduction de la surface vers les molécules du fluide adjacent, augmentant ainsi la température et l'énergie interne de ces molécules. Ensuite, les molécules se mélangent avec d'autres molécules et transfèrent une partie de leur énergie. Dans ce processus, le fluide et l'énergie sont simultanément transportés par l'écoulement, l'énergie étant désormais stockée dans les molécules du fluide et transportée grâce à leur mouvement [31].

La puissance transférée par convection est donnée par la relation :

$$Q = h \cdot S (T_s - T_a) \quad (\text{I.7})$$

- $Q$  : le flux de chaleur. [W/m<sup>2</sup>]
- $h$  : le coefficient de transfert de chaleur par convection.
- $S$  : la surface. [m<sup>2</sup>]
- $T_s$  : la température de la surface. [k]
- $T_a$  : la température du fluide environnant.[k]

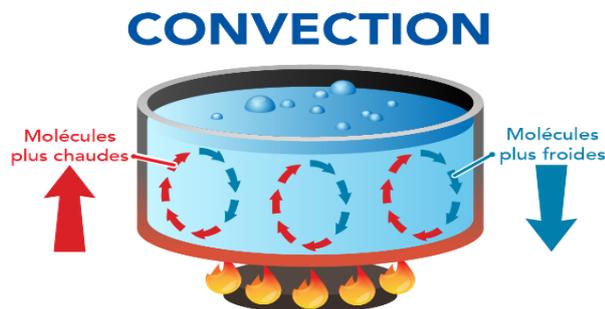


Figure I.6 : Le transfert par convection [32]

### 8.3 Le transfert par rayonnement :

Le transfert de rayonnement thermique désigne le processus de transfert de chaleur par les ondes électromagnétiques émises par un corps en raison de sa température. Il se produit sans avoir besoin d'un support ou d'un contact direct entre les objets. Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est régi par les principes de l'électromagnétisme et implique l'émission, l'absorption et la transmission du rayonnement thermique [33].



**Figure I.7 :** Le transfert par rayonnement thermique [34] La

puissance transférée par rayonnement est donnée par la relation :

$$Q(W) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot s (T_s^4 - T_a^4) \quad (I. 8)$$

Où :

- $Q(W)$  : la puissance du rayonnement thermique.  $[W/m^2 \cdot K^4]$
- $\varepsilon$  : l'émissivité du corps.
- $\sigma$  : la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ).
- $s$  : la surface émissive du corps.  $[m^2]$
- $T_s$  : la température absolue du corps émetteur.  $[k]$
- $T_a$  : la température absolue de l'environnement.  $[k]$

### Conclusion :

Ce chapitre consacré deux parties distinctes. Dans la première partie, nous abordons les enjeux énergétiques et environnementaux du secteur du bâtiment, ainsi que l'importance capitale de l'isolation thermique et les nombreux avantages qu'elle procure. La seconde partie est quant à elle dédiée à l'étude des différents modes de transfert de chaleur.

---

## **Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier**

---

**Introduction :**

Un matériau composite consiste en une combinaison de deux ou plusieurs matériaux aux propriétés différentes. Ils se complètent, résultant en une substance hétérogène. Les performances globales surpassent les composants individuels.

Le principal avantage de l'utilisation de matériaux composites réside dans leurs propriétés particulières.

Il présente des avantages significatifs par rapport aux matériaux conventionnels.

L'utilisation de matériaux composites à base de fibres végétales (chanvre, paille lin papier, bois, dates etc.) est une bonne solution pour réduire leur impact sur l'environnement et assurer un environnement intérieur confortable [35].

De plus, l'utilisation de matières végétales présente les avantages suivants :

- Ils sont une ressource abondante, renouvelable, recyclable et durable.
- Les végétaux se renouvellent périodiquement et par conséquent assurent une ressource abondante sachant que les autres ressources (charbon pétrole gaz) s'épuiseront d'ici quelques décennies.
- Réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- Faible énergie grise : L'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et enfin à la démolition du matériau ou à son élimination à la fin de sa vie.

**1 Définition de matériaux composites :**

Un composite est une combinaison de deux matériaux aux propriétés différentes qui se complètent, ce qui donne un matériau avec de meilleures performances globales que les composants individuels.

Il existe deux types de matériaux composites [36] :

**1.1 Grande diffusion :**

Les matériaux composites courants offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par la réduction des prix de revient, composition polyester avec

**Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier**  
fibre de verre longue ou courte (en mat ou tissu) et la simplicité du principe de fabrication des matériaux (moulage contact, SMC et injection).

### **1.2 Hautes performances :**

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le secteur aéronautique, où la demande de hautes performances déduit de fortes valeurs ajoutées.

Les renforts sont des fibres plutôt longues.

Le taux de renforcement du renfort est supérieur à 50 %.

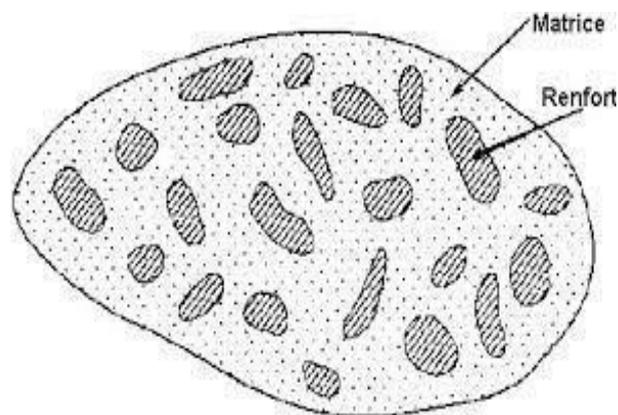
Ces composites sont fabriqués selon les procédés suivants :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire, nombreux processus sont encore manuels.[36]

### **2 Constituants des matériaux composites :**

Les principaux composants des matériaux composites sont :

- Matrice.
- Les renforts. [36]



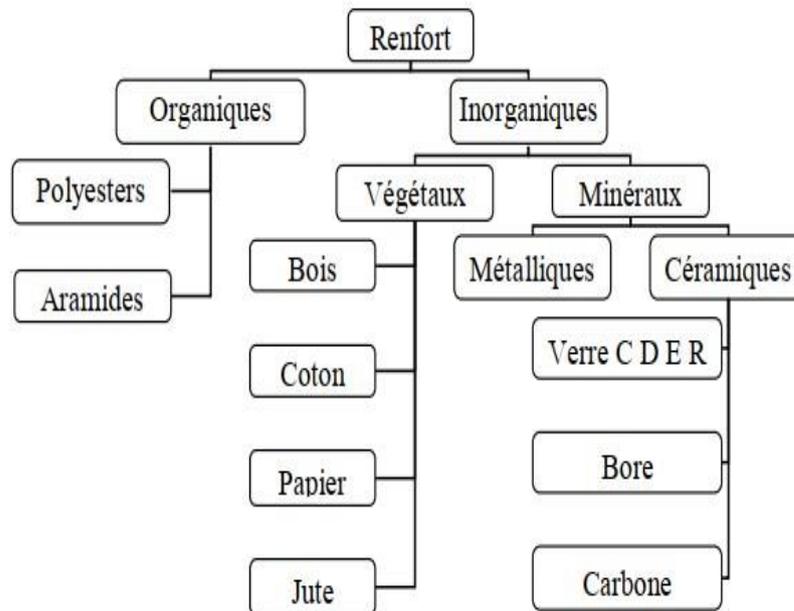
**Figure II.1 :** Schéma d'un matériau composite [37]

### **2.1 Les renforts :**

Les renforts contribuent à l'amélioration de la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites fibreux (fibres organiques ou inorganiques).

## **Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier**

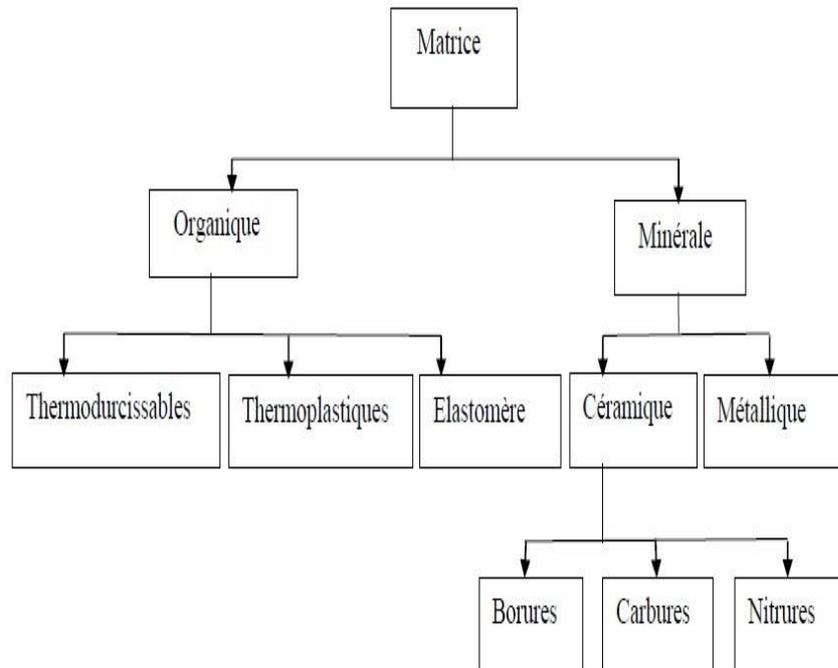
Les composites sont souvent désignés par leur type de renfort. Ainsi, il existe des composites particulaires, des composites sandwiches, des composites en phase dispersée ou encore des composites fibreux [38]. Les différentes natures de renfort sont présentées par le schéma suivant :



**Figure II.2 :** Différentes familles du renfort [39]

### **2.2 La matrice :**

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique de la fibre. La matrice à différentes natures est représentée par la figure II.3.



**Figure II.3 :** Différentes familles de matrice [40]

### **2.2.1 Composites à Matrice Organique (CMO) :**

Composites à matrice organique sont fabriqués en résine polymère en forcé de fibre de verre, de carbone ou de polypropylène. Ce sont les composés les plus courants car les coûts de revient sont généralement suffisamment bas pour permettre une production de masse.

Il existe de nombreux types de résines polymères synthétiques qui sont généralement divisées en deux catégories principales.

#### **○ Les résines thermoplastiques :**

Ils se présentent sous forme solide (granulés, plaques, etc.). Ce sont les types de plastique qui deviennent souples sous l'effet de la chaleur, peut être moulé et façonné par la chaleur : en refroidissant ils se solidifient.

Ils sont constitués de longues molécules linéaires, reliées entre elles par de faibles liaisons (Type hydrogène ou Van der Waals). Ces liaisons sont rompues et refroidies de manière réversible.

**○ Les résines thermodurcissables :**

Polymérisation thermique. Une fois mis en forme, ils résistent à la température et leur transformation est irréversible, du fait de la nature des liaisons moléculaires sous forme de réseaux tridimensionnels. (Une liaison covalente). Ils sont les plus couramment utilisés en raison de leur facilité de mise en œuvre. Plus dur et plus durable que les thermoplastiques.

**○ Les résines thermostables :**

Les thermoplastiques se distinguent essentiellement des autres plastiques par efficacité thermique. Plastique résistant à la chaleur spécialement développée pour l'aéronautique et le spatial [40].

**2.2.2 Composites à Matrice Céramique (CMC) :**

Beaucoup plus chère, il s'agit d'une matrice céramique renforcée de fibres courtes ou de filaments. La matrice et le renfort sont réalisés dans des matériaux tels que le carbure de silicium, le carbone ou l'aluminium, utilisables à très hautes températures.

**2.2.3 Composites à Matrice Métallique (CMM) :**

La matrice de ces matériaux est des métaux légers tels que l'aluminium le magnésium ou le titane. Le renfort est constitué de fibres ou de particules céramiques telles que le carbure de silicium. Ils sont aussi très coûteux.

**2.3 L'interphase :**

Il existe différents types de matériaux composites selon le couple renfort/matrice choisi. Chacune de ces familles a des propriétés différentes et le type de renfort utilisé est différente pour chaque famille.

Entre renfort et la matrice se trouve une zone de liaison appelée "INTERFACE". Des charges et des additifs peuvent être ajoutés au mélange sous forme de fragmentaires de poudres ou de liquides, notamment chimiques, pour modifier les propriétés de la matrice à laquelle il est ajouté.

**2.4 Les charges : [39]**

## **Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier**

Les charges de renforcement ont pour but d'améliorer les propriétés mécaniques ou de réduire le coût de la résine tout en maintenant les performances de la résine.

Généralement, ces charges sont des microbilles ou des particules(poudre).

Les principales charges utilisées sont :[41]

- Charges organiques : fibre et poudre de cellulose, pâte de bois, poudre de remplissage de fruits.
- Charges minérales : carbonate de calcium et/ou de magnésium, silice, sulfate.
- Charge métallique : poudre ou paillettes de nickel, cuivre, etc.
- Charges synthétiques : microbilles de verre, silices, fibres de nylon, ryselan.

### **2.5 Les additives :**

C'est une substance ajoutée à la résine pour modifier ou améliorer le comportement ou les propriétés rhéologiques du produit fini [42] :

- Accélérateurs et catalyseurs de polymérisation.
- Diluant.
- Plastifiants ou flexibilisateurs.
- Tensioactifs.
- Pigments et colorants.
- Stabilisateurs : Anti-oxydation, anti-ultraviolets, anti-ozone, antistatique.

### **3 Cas d'étude :**

Au cours de cette étude en consacrer à la valorisation d'un déchet de pâte à papier généré par les usines de transformation et de recyclage du carton et du papier usagés dans le bâtiment et ce grâce à sa forte teneur en fibres cellulosique d'origine naturelle. Un intérêt particulier a été porté au déchet de pâte à papier, comme renfort dans la fabrication des matériaux composites à matrice Organique (Colle liquide de type Poly Vinyle Alcool).

#### **3.1 Colle liquide de type PVA (Poly Vinyle Alcool) :**

Cette colle est largement utilisée par l'industrie de bois et de papier et ce à cause de sa très bonne adhérence aux fibres cellulosique et sa simplicité d'utilisation. Par

## **Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier**

conséquent, ces avantages nous ont conduits à choisir un polymère type PVA comme matrice de nos matériaux composites isolants. Présente sous une forme laiteuse de couleur blanche, d'où leur appellation de « colle blanche ». [43]



**Figure II.4 :** Colle à papier en PVA

### **3.2 Déchets de papier-carton :**

L'appellation "papier-carton" regroupe de nombreux produits fabriqués principalement à partir des fibres végétales naturelles, et une grande partie de ces produits sont recyclables, tels que les emballages et les journaux. En règle générale la consommation de papier-carton est liée au niveau du développement et de richesse d'un pays [44].

La consommation mondiale de papier diminue de 5% par an depuis plusieurs années, tandis que celle du carton reste stable. En moyenne une personne consomme 136Kg par an, les deux tiers de ce volume ont été recyclés en 2014 soit (67%).

La production est issue de quatre sources :

- Industrielle : sous-produit de la transformation de papier-carton.
- Commerciale : emballages, journaux.
- Ménagère : emballages, magazine, papier divers.
- Bancaire : vieux billets usagés.

Les papiers à usage graphique et les papiers d'emballage représentent environ 90% du total des déchets papier. En 2014, le volume collecté hors emballages était de 7.3 millions de tonnes (**Tristan, 2018**).

À l'heure actuelle, la quantité de papier récupéré en Algérie est estimée à 150 000 tonnes par an d'après l'agence nationale des déchets. Le secteur de la récupération

## **Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier**

des vieux papiers se développe de manière timide, laissant un énorme potentiel inexploité. Les vieux papiers sont considérés comme une ressource essentielle pour le recyclage offrant des avantages en termes de productivité.

Ils représentent ainsi une option stratégique pour l'Algérie, lui permettant de réduire ses importations de pâte vierge [45].



**Figure II.5 :** Les déchets papier dans l'Algérie [46]

### **3. 2.1 Processus d'obtention du papier et les produits en papier carton :**

Les pâtes à papier sont produites à partir de diverses sources de bois (ainsi que d'autres végétaux tels que le bambou, l'alfa, les bagasses). Les végétaux contiennent des fibres cellulosiques, de l'hémicellulose, de la lignine et d'autres composés (résines sels minéraux, etc.). En simplifiant, la lignine agit comme un agent liant pour les fibres cellulosiques, conférant ainsi une solidité à l'ensemble. Pour obtenir la pâte à papier c'est-à-dire extraire les fibres cellulosiques, il est nécessaire de rompre les liaisons entre les fibres [47].

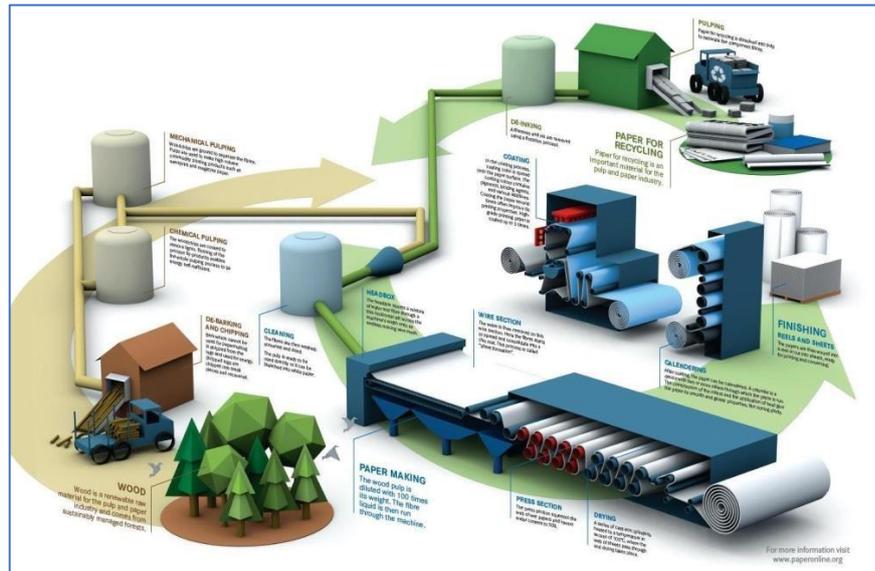
- Soit par un processus mécanique, impliquant le cisaillement du bois (pâte mécanique).
- Soit par un processus chimique, impliquant la dissolution de la lignine (pâte chimique).

Les fibres de cellulose possèdent la capacité de s'agglomérer, ce qui confère à la feuille sa résistance.

Le processus de fabrication du papier suit les étapes suivantes :

## Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier

- Les fibres sont dispersées dans l'eau.
- Les fibres sont raffinées pour leur donner les caractéristiques souhaitées.
- Les autres constituants sont ajoutés.
- L'eau est éliminée pour former la feuille.
- La feuille est pressée et séchée.
- Des traitements de surface tels que le surfaçage ou le couchage peuvent être appliqués.



**Figure II.6 :** Processus de la fabrication de papier [48].

### 3.2.2 Les propriétés et caractéristiques du papier-carton :

Les différentes qualités de papier sont déterminées par un ensemble de caractéristiques clés [47]

#### ○ **Le grammage :**

Le grammage d'un papier correspond à la masse d'un mètre carré de ce papier. Par exemple, le grammage courant est de 45 g/m<sup>2</sup> pour le papier journal, de 80 g/m<sup>2</sup> pour le papier de photocopie, et de 170 g/m<sup>2</sup> ou plus pour le carton. [46]

#### ○ **L'épaisseur :**

L'épaisseur du papier est mesurée en micromètres (1/1000 de millimètre). En utilisant les mêmes exemples précédents, le papier journal a une épaisseur de 70

**Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier**  
micromètres, le papier de photocopie a une épaisseur de 100 micromètres, et un carton de 170 g/m<sup>2</sup> a une épaisseur de 200 micromètres ou 0,2 mm [47].

○ **L'orientation des fibres :**

Dans le processus de fabrication du papier à la main, les fibres seraient disposées de manière aléatoire. En revanche, dans les papiers fabriqués en machine, la majorité des fibres sont alignées dans le sens longitudinal, ce qui confère au papier des propriétés de rigidité et de résistance différentes dans sa longueur et sa largeur [47].

○ **La structure de la feuille :**

Le terme "structure de la feuille" fait référence à la répartition homogène des fibres dans le papier. Une structure homogène garantit de meilleures propriétés d'opacité de stabilité et une meilleure capacité d'impression [47].

○ **La rigidité :**

La rigidité joue un rôle essentiel dans la facilité de pliage du papier, que ce soit dans une presse d'imprimerie ou dans une imprimante laser. Un papier plus rigide sera plus facile à plier [47].

○ **La résistance à la rupture par traction :**

La résistance à la traction est la capacité d'une feuille de papier à résister à une force de traction maximale sans se déchirer. Un papier présentant une résistance élevée à la traction sera plus performant en machine et permettra une vitesse d'impression plus élevée sur les presses à formulaires [47].

**3.3 La fibre cellulosique :**

Les fibres cellulosiques sont des fibres d'origine végétale composées principalement de cellulose, un polymère naturel présent dans les parois cellulaires des plantes. Elles sont extraites de sources végétales telles que le bois, le coton, le lin le chanvre, etc. Les fibres cellulosiques sont caractérisées par leur résistance, leur légèreté et leur flexibilité, ce qui en fait des matériaux polyvalents utilisés dans de nombreux domaines tels que l'industrie textile, l'emballage, la papeterie et la construction. Leur structure fibreuse permet une bonne absorption de l'humidité et une excellente capacité d'isolation thermique.

## Chapitre II : Matériaux composites à base des déchets de papier

De plus, étant des fibres naturelles, elles sont biodégradables et respectueuses de l'environnement. [49]

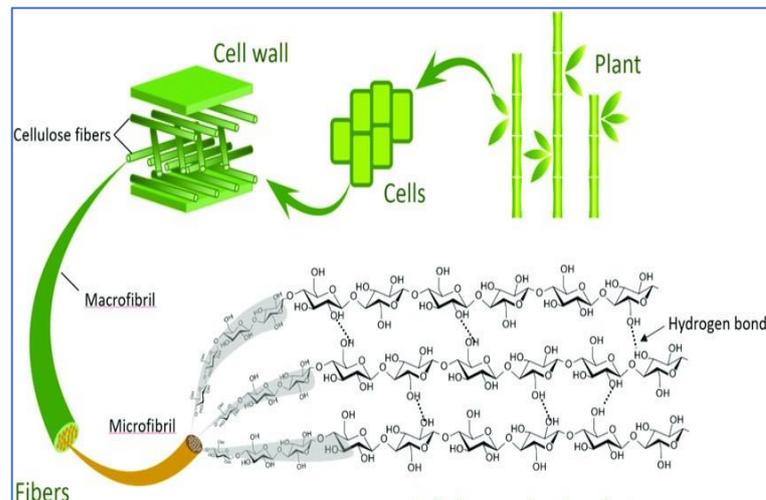


Figure II.7 : La fibre cellulosique [50]

La cellulose pure présente une structure moléculaire presque parfaitement régulière avec seulement quelques défauts pour chaque millier d'unités. Les microfibrilles de cellulose possèdent un centre très cristallin, tandis que les chaînes de surface sont plus désordonnées, formant des zones paracristallines.

Ces zones, ainsi que les défauts de cristallinité qui se produisent lors de la biosynthèse de la cellulose, constituent la phase amorphe de la cellulose. Ainsi, les microfibrilles de cellulose sont composées de zones cristallines parfaitement ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées [51].

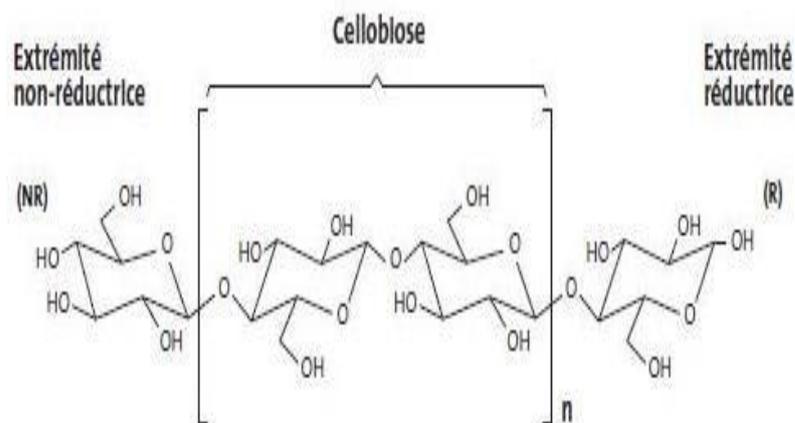


Figure II.8 : la structure moléculaire de fibre cellulosique [49]

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié les matériaux composites de manière générale dans la première partie, cela nous a permis de comprendre les caractéristiques les propriétés et les applications des composites.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous nous sommes focalisés sur notre cas d'étude, allant la formulation et la mise en forme du composite.

---

## **Chapitre III : Matériaux et méthodes**

---

**Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les conditions et les étapes d'élaboration d'un composite à base de déchet de papier, suivi par d'une consolidation.

L'évolution de la morphologie et l'étude microstructurale du composite élaboré ont été observées par microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction aux rayons X (DRX) et l'analyse thermogravimétrique (ATG).

Les échantillons élaborés de notre étude ont été testés pour leur résistance à la flexion et à l'absorption d'eau, des essais de la conductivité thermique ainsi que l'isolation acoustique sont effectuées sur nos échantillons.

**1 Mise en œuvre des panneaux d'isolation thermique :**

La mise en œuvre du matériau d'isolation thermique et phonique à base de déchets de pâte à papier récupérés dans les usines de Tonic Industrie, qui est objet de cette étude s'effectue en deux (02) phase principale comme décrite ci-dessous :

**1.1 Traitement des rejets et des déchets :**

Les déchets et les rejets à base de fibre de cellulose avant d'être utilisés comme matière première pour la fabrication des panneaux d'isolation, ces derniers doivent être traitée transformer comme suit : **a/- Traitement thermique:**

Cette opération a pour objet de sécher les déchets et les rejets objet de cette étude pour évacuer l'humidité et les matières volatiles contenues dans le produit et ce afin de faciliter leur manipulation et élimination des mauvaises odeurs.

**b/- Broyage:**

Cette opération a pour objet de réduire la taille des particules du déchet solide issu de l'étape précédente (séchage) jusqu'à des valeurs inférieures à cinq (05) mm.

Cette étape est nécessaire pour garantir une bonne répartition des différents composés qui constituent la formulation du matériau d'isolation et pour assurer un bon empilement des particules à base de la fibre de cellulose qui assure la fonction d'isolation.

**c/- Elimination de la fraction poussiéreuse par sphérification :**

Le broyage du déchet solide (après séchage) produit une fraction poussiéreuse de la fibre d'environ 5%. Cela rend difficile la manipulation de cette matière première et nécessite un pourcentage de liant plus important pour le collage des particules entre elles lors de la mise en œuvre des panneaux d'isolation. Une méthode de sphérification des particules dans un milieu humide est utilisée pour coller cette poudre aux grosses particules et obtenir ainsi une matière première composée de particules de forme sphérique. La méthode consiste, donc en le mélange continu de la matière broyée dans un milieu humide (50% eau et 50% matière broyée) jusqu'à disparition totale de la fraction poussiéreuse.

## **1.2 Mise en œuvre des panneaux à base de déchets de pâte à papier :**

### **1.2 .1 Composition :**

La composition des panneaux d'isolation objet de cette étude est basée sur les particules (70% à 90%), de forme sphérique, obtenus après les étapes de traitement décrites dans la section-1.1 (**a**, **b** et **c**), le reste de la formulation est constituée des composés suivants :

**a/- Résine polymérique:** La fonction première de cet élément est le collage des particules des déchets entre elles pour garantir une bonne stabilité dimensionnelle du panneau d'isolation. **b/- Retardateur de flamme:** C'est un composé chimique à base de borate qui empêche les feux de se propager dans le cas de déclenchement d'un incendie. **c/- Fongicide:** C'est une substance qui empêche les champignons parasites de se former dans les panneaux d'isolation.

### **1.2.2 Mise en œuvre :**

La mise en œuvre des panneaux d'isolation est effectuée par moulage des différentes formulations dans des moules fermés au niveau du laboratoire Équipements et Applications Héliothermiques (EAH) à l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES). Ainsi, les proportions de chaque compositions ont mélangées dans un malaxeur et versées dans des moules de dimensions adéquates (figure III.1 a,b). Les échantillons sont ensuite compactés sous une pression de 0,03 MPa (figure III.1c). Après le compactage (figure III.2), ils sont placés dans un séchoir solaire jusqu'à solidification.

Après réalisation des composites, leur séchage est suivi par pesées régulières jusqu'à stabilisation totale (tableau III.1).

**Tableau III.1 : Récapitulatif des éprouvettes élaborées.**

Échantillons	Quantité de papier (%)	Quantité d'eau + colle (%)	La masse totale de panneaux (g)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>E1</b>	33.38%	32.26%	980g	1020.83
<b>E2</b>	33.33%	33.33%	1010g	1052.08
<b>E2</b>	34.29%	34.41%	1040g	1083.33



**Figure III.1 : Production des composites a) malaxage du liant ; b) malaxage du mélange ; c) compactage**

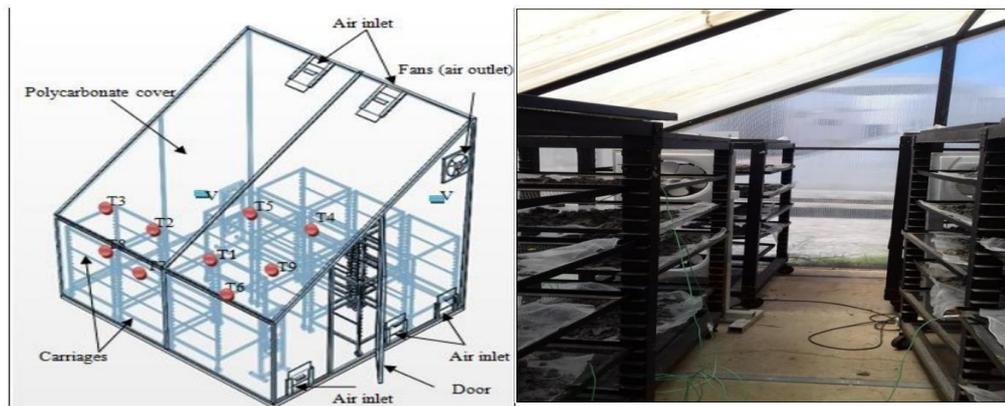


**Figure III.2 :** Composites produits

### **1.3 Séchage de déchet de la pâte à papier :**

Dans le but de sécher nos déchets de papier on a utilisé le séchoir solaire construit dans l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) à Bou- Ismail en Algérie. La structure du séchoir est illustré à la figure III.2. Ce dernier contient un toit incliné à la latitude (36 degrés). Il est fait d'une plaque de polycarbonate sur un plancher en fer carré. Les produits à sécher sont placés dans neuf chariots, chaque chariot a six plateaux et la capacité maximale de chaque plateau est de 3,5 kg. Les déchets de papier utilisés pour les expériences de séchage proviennent de l'industrie papetière de la région de Bou-Ismaïl, comme la montre la figure III.3. Lorsque le rayonnement solaire traverse le toit en polycarbonate, il chauffe à la fois l'air et les produits à l'intérieur du séchoir ainsi que le sol en béton. Grâce à l'exposition directe des produits au rayonnement solaire et à l'air de séchage chauffé, la vitesse de séchage des produits est accélérée.

Des thermocouples (type K) ont été utilisés pour mesurer la température de l'air dans le séchoir car ils sont très sensibles aux variations de température de l'air dans les échoir (figure III.3).



**Figure III.3 :** Séchoir solaire et la distribution des produits dans les plateaux [52]

#### **1.4 Etude granulométrique de la pâte à papier après séchage et broyage :**

Afin de procéder à la mise en œuvre d'éprouvettes normalisées par moulage il a été jugé nécessaire de broyer la pâte à papier séchée et ce pour assurer une bonne homogénéisation et distribution des différents constituants rentrant dans la composition de notre matériau isolant. La détermination de la fraction poussiéreuse est, aussi d'une grande importance car la présence de la poussière dans la matière résulte en une densité de produit élevée et augmente le besoin en colle pour lier les particules.

##### **1.4.1 Analyses granulométriques (Norme AFNOR) :**

L'analyse granulométrique désigne le processus d'étude de la répartition des grains de différentes tailles dans un échantillon donné, en fonction de leurs caractéristiques (poids taille.). Grâce à l'analyse granulométrique, il est possible de déterminer la taille et les proportions pondérales des grains qui composent les échantillons.

Les matériels nécessaires lors de notre essai sont des tamis d'ouverture (en mm 5,6 ; 1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,125 ; 0,05) et d'une balance de précision.



**Figure III.4 :** Appareil utilisé pour l'analyse granulométrique

#### **1.4.1.1 Principe de l'essai :**

L'essai implique la classification des grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis superposés, avec des ouvertures de taille décroissantes de haut en bas. Le déchet de papier à étudier est placé sur la partie supérieure des tamis et les grains sont classés en effectuant des vibrations sur la colonne de tamis.

#### **1.5 La machine à presse :**

La machine à presse est un dispositif utilisé dans la production d'éléments de construction. Sa présence facilite le processus de fabrication en utilisant déchet de papier avec un liant, ce qui nous donne un matériau de construction de qualité. Le principe de fonctionnement de la machine à presse repose sur la compression de la face inférieure des matériaux à l'aide d'un piston, tandis que la face supérieure est maintenue en place par un couvercle ayant la même composition que le corps. La forme des matériaux obtenus dépend du moule utilisé lors du processus de moulage.



**Figure III.5 :** la machine à presse

### **1.5.1 Principe de Fonctionnement :**

Les constructeurs de la machine définissent le principe de fonctionnement de la presse en se basant sur des calculs précis effectués avant sa conception. Lors de nos essais, nous avons utilisé une machine à presse qui fonctionne selon les principes suivants : une fois que le moule est rempli par le mélange de matières premières (la pâte de papier, le liant) le couvercle se ferme et le piston remonte après le glissement du levier vers l'avant et pressé jusqu'à ce que le taux de compression soit obtenu. En faisant l'inverse c'est-à-dire en amenant en arrière, le couvercle s'ouvre puis le démoulage du matériau est effectué en poussant le levier vers le bas.

### **2 Technique de caractérisation :**

Pour mettre en évidence la modification chimique de notre isolant b et les performances des matériaux composites élaborés, différents tests ont été utilisés à savoir :

- Propriété morphologique : Microscope Electronique à Balayage (MEB) et la diffraction aux rayons X (DRX)
- Propriétés physico- chimiques : Coefficient et cinétique d'absorption d'eau, Masse volumique apparente et épaisseur, analyse thermogravimétrique.
- Propriétés mécaniques : test de flexion.
- Propriétés thermiques : Coefficient de conductivité thermique (CT Mètre).

### **2.1 Propriétés morphologiques par MEB :**

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un instrument qui utilise un faisceau d'électrons pour visualiser des échantillons à une échelle microscopique.

Il offre une résolution élevée et permet de capturer des détails fins.

Le fonctionnement du MEB implique l'émission d'un faisceau d'électrons qui balaie la surface de l'échantillon. Les électrons réfléchis, émis ou dispersés sont collectés pour former une image en trois dimensions du spécimen.

Le MEB est précieux pour l'observation de la topographie, la détection des défauts l'analyse de la composition chimique et l'étude des propriétés des matériaux à une échelle microscopique.

Il est largement utilisé dans la recherche scientifique, l'industrie, la biologie la géologie et la nanotechnologie.

Plusieurs acquisitions des images ont été réalisées sur l'échantillon dans plusieurs zones et avec différents grossissements allant de 200 fois jusqu'à 6 000 X.

La section transversale des fibres de papier ainsi que leur morphologie de surface après traitements a été observées à l'aide du MEB Quanta 250 de la compagnie FEI couplé d'un détecteur des électrons secondaire LFD. Les observations ont été réalisées en vide partiel avec une tension d'accélération de (10 et 12.5 KV), le mode de pression utilisé (Low vacuum 60 Pa) et la distance de travail (WD) est de 9.8 à 10.3 mm.

### **2.2 la diffraction aux rayons X :**

Le principe de cette méthode repose sur l'irradiation de l'échantillon par des rayons X entraînant l'ionisation de ses atomes à l'origine d'éjection d'électrons. Pour chaque atome le nombre d'électrons émis est déterminé en fonction de l'énergie de liaison les maintenant sur leurs orbitales. Chaque élément chimique étant caractérisé par un spectre unique la proportion de chaque atome présent à la surface de l'échantillon est obtenue par intégration des pics correspondants. La profondeur de mesure est d'un micron. Un (01) échantillon sous forme de poudre (déchets de papier) a été analysé par le diffractomètre de rayons X D8 ADVANCE A25, équipé d'une source à rayons X dont la tension appliquée a été de 40 kV pour un courant de 25 mA, avec une durée de mesure (47min) la longueur d'onde prise dans cet essai est ( $K\alpha_1$  1.54060 Å) et ( $K\alpha_2$  : 1.54439Å).

**2.3 Caractéristiques physico-chimiques et chimiques :****2.3.1 Coefficient et cinétique d'absorption d'eau :**

La cinétique d'absorption d'eau de notre matériau a été déterminée en immergeant des fragments de notre matériau (16cm×4cm×15cm) dans de l'eau distillée à (23 ± 1) °C. Les essais ont été réalisés pour deux échantillons (E1, E2). Les pesées des échantillons sont été effectuées à l'aide d'une balance Sartorius précise à ± 0,001 g.

A l'issue de chacune des périodes d'immersion (2min, 6 min, 14 min, 24min, 34min, 44min, 54min, 60min, 1440min) des pesées ont été effectuées dans la minute qui a suivi le retrait à partir de l'eau après que les échantillons aient été superficiellement séchés en utilisant du papier absorbant afin d'éliminer l'eau inter-fibres.

Pour chaque éprouvette, le coefficient d'absorption d'eau a été obtenu par la relation suivante :

$$\text{Coefficient d'absorption d'eau (\%)} = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Où :

$m_0$  : la masse de matériau composite à base de déchet de papier (sèches) au temps  $t_0$  (g).

$m_t$  : la masse de matériau composite à base de déchet de papier au temps d'immersion  $t$  (g).

**2.3.2 Masse volumique apparente et épaisseur :****a) Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente a été calculée suivant l'équation développée au (II.7.5) de cette même partie. Le volume pour chaque éprouvette a été obtenu à partir du produit des moyennes de longueur, de largeur et d'épaisseur. Trois mesures de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur de chaque éprouvette ont été déterminées à l'aide d'un pied à coulisse dont la précision est de 0,01 mm. Leurs pesées ont été réalisées à l'aide d'une balance Sartorius exacte à ± 0,001 g.

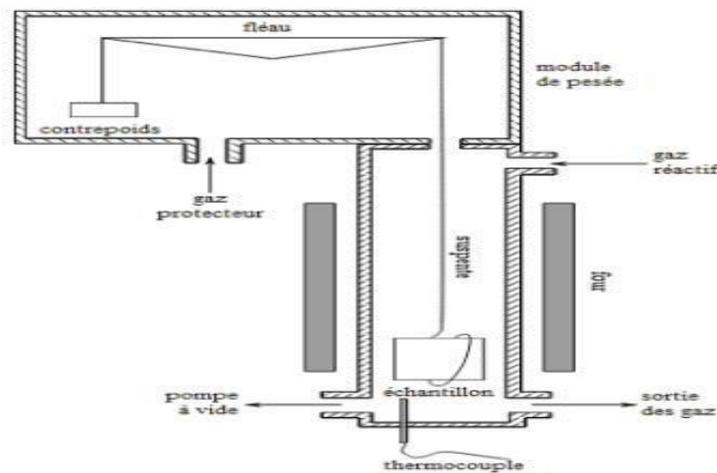
**b) Epaisseur :**

L'épaisseur pour chaque éprouvette a été obtenue à partir de la moyenne des épaisseurs. Trois mesures (bord gauche, milieu, bord droit) d'épaisseur de chaque éprouvette ont été déterminées à l'aide d'un pied à coulisse dont la précision est de 0,01 mm.

### **2.3.3 Analyse thermogravimétrique ATG :**

Les analyses thermogravimétriques (ATG) des fibres du papier et traitées ont été réalisées à l'aide d'un équipement SDT Q600 TA Instrument. Equipé d'un four compact de température variant de 50 °C à 1500 °C et d'une balance de capacité maximale de (1300 ± 0,0001) mg.

Cette méthode permet de suivre la variation de la masse des échantillons en fonction de la température et ainsi de comparer l'influence des traitements sur la stabilité thermique des fibres. La mesure thermogravimétrique est possible à l'aide d'un appareil d'analyse thermo gravimétrique composé d'un four dans lequel l'échantillon est placé. La nacelle est reliée directement à une balance. La Figure III.6 reprend le principe de fonctionnement d'un appareil d'analyse thermogravimétrique.



**Figure III.6 :** Schéma de principe de l'analyse thermo gravimétrique [53]

Pour faciliter la lecture, les résultats ont été ensuite dérivés grâce au logiciel Pyris pour obtenir la courbe différentielle de l'analyse thermogravimétrique (DTG). Cette courbe permet d'identifier plus facilement les phénomènes de perte de masse puisqu'ils se présentent sous forme de pics.

## **2.4 Propriétés thermiques :**

### **2.4.1 Coefficient de conductivité thermique :**

Dans le but de déterminer le coefficient de conductivité thermique des échantillons de dimension (16×15×4cm) confectionnés.

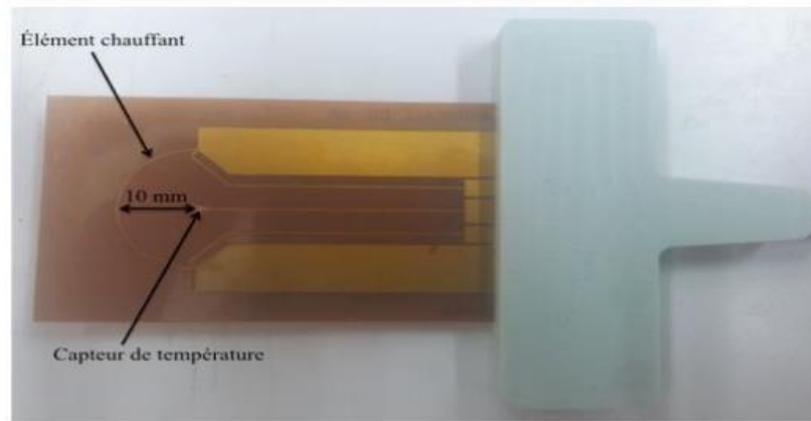
Les surfaces rugueuses ont été transformées en surfaces lisses, planes et parallèles en utilisant une ponceuse à papier à verre. Cette méthode permet d'obtenir des résultats satisfaisants en matière de qualité de surface. Les critères essentiels pris en considération sont le dosage précis de la charge utilisée pour obtenir les caractéristiques souhaitées.

Le dispositif utilisé pour déterminer les valeurs du coefficient de conductibilité thermique de nos échantillons est le CT mètre à sonde. Ce dernier est développé par le SCTB, conforme à la norme NF EN 993-1541.



**Figure III.7 :** CT mètre à sonde

La sonde, constituée du fil résistif et du thermocouple dans un support isolant en kapt on est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Le CT mètre utilise cette méthode avec les critères suivants : Conductivité de 0,02 à 5 W.m-1.K-1.



**Figure III.8 :** La sonde utilisée dans l'essai [53]

- Température de mesure de 20 à 80 °C.
- Échantillons : au moins 80×40 mm, de quelques millimètres d'épaisseur pour les isolants à quelques centimètres pour les conducteurs.

La résistance thermique ( $R$ ) des éléments est proportionnelle à l'épaisseur et inversement proportionnelle à  $\lambda$  elle est déterminée suivant la relation [53] :

$$R = \frac{E}{\lambda} \quad (\text{III.2})$$

## **2.5 Les propriétés mécaniques :**

### **2.5.1 L'essai de flexion trois points :**

En effet, la résistance à la flexion est une caractéristique essentielle lorsqu'il s'agit de choisir les matériaux de construction pour les murs d'un bâtiment. Les murs supportent généralement des charges verticales provenant du poids de la structure et des charges horizontales dues aux forces sismiques ou au vent. Par conséquent, les matériaux utilisés pour les murs doivent être capables de résister à ces forces sans se déformer ou s'effondrer.

Les tests de résistance à flexion à 3 points sont réalisés sur des blocs de dimensions (4.4 x 4.4 x 16 cm). Le dispositif de flexion permet d'appliquer la force de flexion ( $f$ ) au milieu de l'échantillon. La résistance maximale à la flexion et le module d'élasticité sont déterminés par les équations suivantes :

Le module à la rupture (MOR) a été obtenu par l'équation suivante :

$$\text{MOR (MPa)} = \frac{1,5 \times p \times L}{b \times t^2} \quad (\text{III.3})$$

**P** : la charge maximale

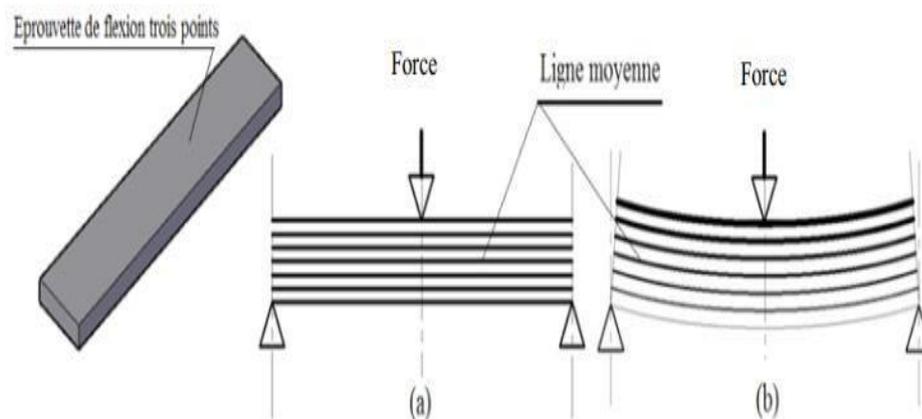
**L** : la distance entre les axes des appuis cylindriques

(mm). **b** : la largeur des éprouvettes respectivement (mm).

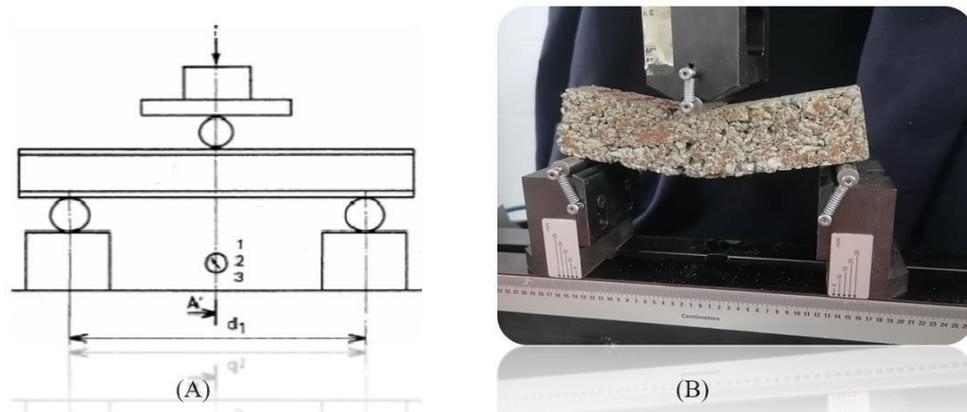
**t** : l'épaisseur des éprouvettes respectivement (mm).

### 2.5.1.1 Principe de tests en flexion trois points :

L'essai en flexion trois points consiste à soumettre une éprouvette rectangulaire posée sur deux appuis, à un effort vertical agissant au milieu de l'éprouvette (Figure III.9). La sollicitation en flexion impose à l'éprouvette un fléchissement qui engendre une traction (lignes fines) et une compression (lignes épaisses) de part et d'autre de la ligne moyenne (Figure III.9-a et -b).



**Figure III.9** : Principe du test en flexion trois points sur une éprouvette [53]



**Figure III.10** : Essai de flexion 03 points. (A) Montage normalisé, (B) Montage de l'échantillon sur la machine d'essai.

Selon la norme brésilienne ABNT NBR 14810 (ABNT NBR 14810, 2006) correspondant à la norme européenne EN 310 (EN 310, 1993), la résistance à la flexion (MOR) a été déterminée dès la fin du séchage des panneaux, grâce à la machine universelle emic DL 30000 équipée d'un système de flexion et d'un dispositif d'acquisition de données automatiques. Les éprouvettes ont été placées sur deux appuis cylindriques parallèles dont les centres étaient espacés de **160 mm**.

Le chargement a été piloté en déplacement et a été appliqué au centre de chaque éprouvette entre les deux appuis : la vitesse était de **5mm/min**.

## 2.6 Caractéristiques acoustiques :

Les éco-matériaux d'origine naturelle, tels que le papier, peuvent être utilisés sous forme brute dans la construction. Cependant, ils sont également transformés en granulats ou en fibres pour une utilisation plus spécifique.

La connaissance des propriétés acoustiques est indispensable pour la construction des bâtiments, des ouvrages et dans l'application des calculs de stabilité des bâtiments.

Les principaux paramètres de comportement acoustique d'un matériau sont :

### 2.6.1 Indice d'affaiblissement acoustique R :

On suppose que les niveaux d'intensité acoustique sont  $N_1$  dans le local émission et  $N_2$  dans la locale réception. On appelle affaiblissement d'une paroi :

$$Rb = N1 - N2 \quad (\text{III.4})$$

On suppose que les intensités acoustiques sont  $I_1$  dans le local émission et  $I_2$

dans la locale réception. On appelle  $\tau$  le facteur de transmission défini par :

$$\tau = \frac{I_2}{I_1} \tag{III.5}$$

$$Rb = 10 \cdot \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right) - 10 \cdot \log \left( \frac{I_2}{I_0} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{I_2}{I_1} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{\tau} \right) \tag{III.6}$$

Alors l'isolement brut s'écrit :

**○ Affaiblissement normalisé :**

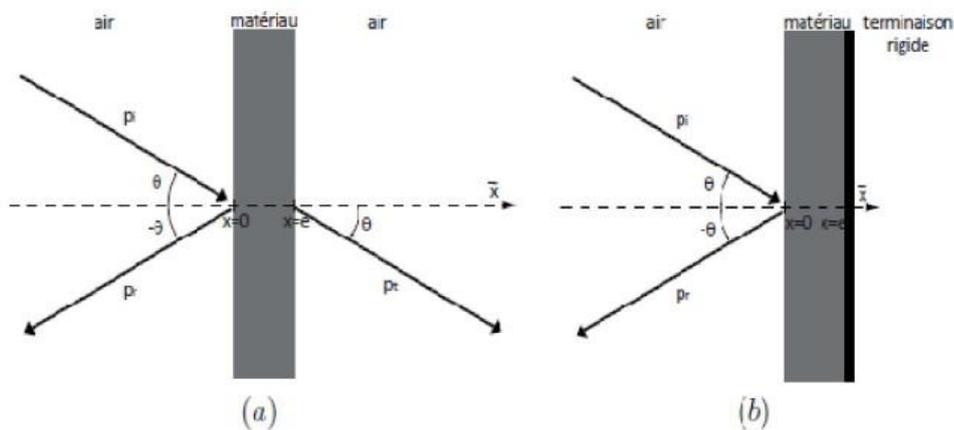
Cet affaiblissement tient compte du phénomène de réverbération dans le local de réception.

$$Rb = N1 - N2 + 10 \cdot \log \left( \frac{Tr}{0,5} \right) \tag{III.7}$$

**Tr** : représente la durée de réverbération du local. 0.5 s représente la durée de réverbération d'un local de référence.

**2.6.2 Coefficient d'absorption acoustique  $\alpha$  :**

On définit généralement le coefficient d'absorption acoustique d'un matériau en le considérant juxtaposé à une terminaison rigide ayant pour but d'imposer une condition limite de vitesse normale nulle. Cela est illustré à la Figure III.11 (b). L'absorption est comprise par définition entre 0 pour des matériaux parfaitement réfléchissants et 1 pour des matériaux totalement absorbants.



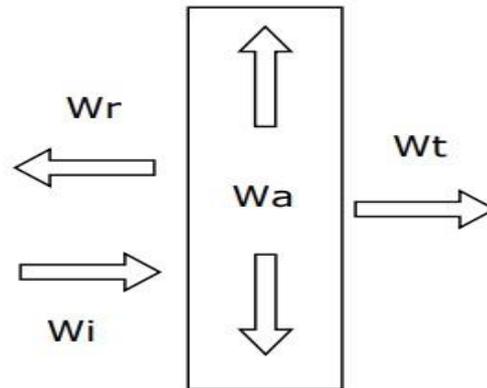
**Figure III.11 :** Ondes incidentes, réfléchies et transmises pour un matériau soumis à une onde Acoustique d'incidence  $\alpha$  [53]

**Wi** : l'énergie incidente.

**Wr** : l'énergie réfléchie.

**Wa** : l'énergie absorbée.

**Wt** : l'énergie transmise.



La détermination du coefficient d'absorption acoustique  $\alpha$  d'après la relation suivante :

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad \text{(III.8)}$$

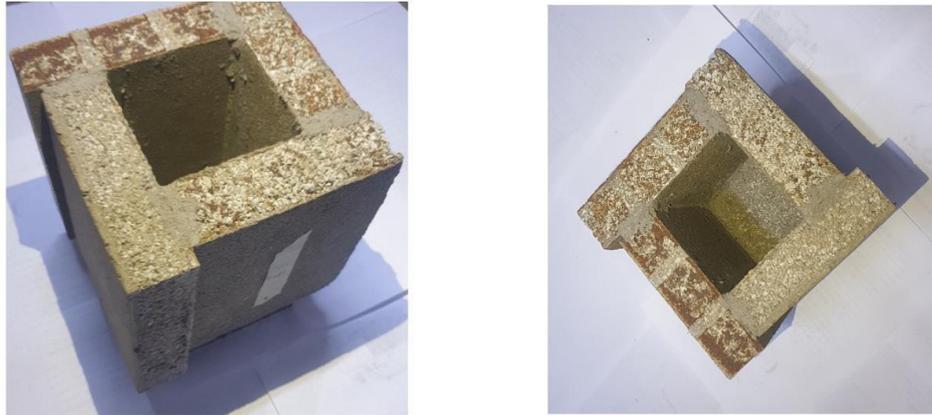
On distingue deux grands types de considérations au niveau de la qualité acoustique d'un bâtiment :

- L'isolation acoustique correspond aux moyens utilisés pour contrôler la transmission d'énergie acoustique d'une pièce à une autre. Le plus souvent dans le but de réduire au maximum les niveaux des bruits transmis.
- La correction acoustique, pour sa part, fait référence à tous les moyens mis en œuvre afin de contrôler la réponse d'une pièce à une excitation acoustique provenant de la même pièce dans l'optique de contrôler les niveaux de bruits et l'intelligibilité. Les résultats montrent que le comportement des fibres et particules de bois dépendent grandement de la résistance au passage à l'air des matériaux elle-même étant contrôlée par la densité apparente de ces derniers.

### 2.6.3 Isolement acoustique brute D :

L'isolement acoustique "D" mesure la capacité des éléments de construction, tels que les murs, les plafonds, les portes, etc., à atténuer la transmission du son entre le local d'émission et le local de réception. Plus la valeur de l'isolement acoustique "D" est élevée plus la réduction du bruit est importante et meilleure est l'isolation acoustique entre les deux espaces. Pour effectuer les mesures on a utilisé la méthode suivante :

Après la génération des différentes fréquences dans la plage de 500 à 4000 Hz ce qui couvre une gamme de fréquences couramment associées aux bruits ambiants et aux sources sonores diverses. En mesurant le niveau sonore à l'extérieur de la chambre avec un appareil de mesure dédié, on a obtenu la mesure du bruit généré à l'extérieur de la chambre. Ensuite en mesurant le niveau sonore à l'intérieur de la chambre avec un autre appareil, on a obtenu à mesure du bruit perçu ou reçu à l'intérieur de la chambre.



**Figure III.12 :** la chambre utilisée dans l'essai **Conclusion**

⋮

Dans ce chapitre, nous avons étudié les conditions et les étapes d'élaboration de notre isolant ainsi que les tests pour évaluer ce matériau. Les tests représentés ci-dessous ont été effectués sur nos échantillons :

- Microscopie électronique à balayage (MEB) : Cette technique permet d'observer la structure et la morphologie de notre isolant.
- Diffraction aux rayons X (DRX) : Cette technique est utilisée pour déterminer la structure cristalline de notre isolant.
- Les analyses thermogravimétriques (ATG) : c'est une méthode couramment utilisée pour étudier les propriétés thermiques des matériaux.
- Conductivité thermique : Ce test mesure la capacité de notre isolant à résister à la transmission de la chaleur.

Isolation acoustique : Ce test évalue la capacité de notre isolant à atténuer le bruit et les vibrations.

---

**Chapitre IV : Résultats et discussion de la partie  
expérimentale**

---

La présente d'étude concerne la valorisation d'un rejet industriel, à base de courtes fibres cellulosiques, généré par les lignes de recyclage du papier et du carton usagés dans la fabrication de matériaux d'isolation thermique et phonique pour le secteur du bâtiment.

Ces matériaux qui se présentent sous la forme de panneaux serviront à l'isolation des parois et des planchers des constructions de tous types. Afin que ce matériau soit valorisé et utilisé au mieux, une caractérisation de ce dernier s'impose dans un premier temps. Dans cette optique, dans le chapitre suivant, ses propriétés morphologiques et physiques, phonique et mécaniques sont investigues et confrontées à la bibliographie quand les données sont disponibles.

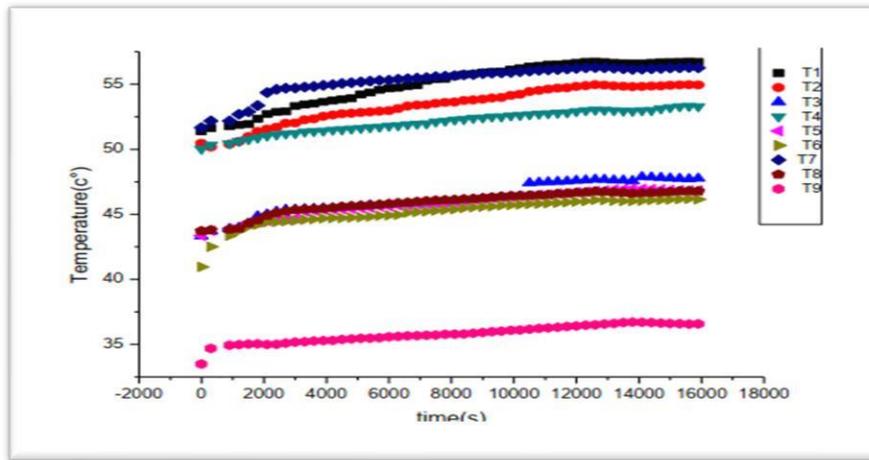
### **1 Traitement thermique de déchet de papier :**

Afin de connaître le sens préféré de transfert de chaleur dans l'échantillon par rapport au débit d'air, nous avons placé neuf (9) thermocouples dans un plan horizontal d'un échantillon

La Figure 28 montre l'évolution de la température à 0.04m sous la surface d'évaporation (les thermocouples sont situés aux différents points 1, 2, ... et 9).

A noter que la température n'est pas uniforme en tous les points d'un même plan cela est probablement dû à la mauvaise circulation de l'air de séchage qui a généré des zones chauffantes (au-dessus des trous d'entrée de l'air chaud) et les zones moins chauffées (les nervures de la crémaillère). La température maximale à l'intérieur de la serre était d'environ 56,72 °C au point T1 à 13h30, le rayonnement solaire était de 521,2018 W/m<sup>2</sup> à ce moment-là (Fig.IV.1).

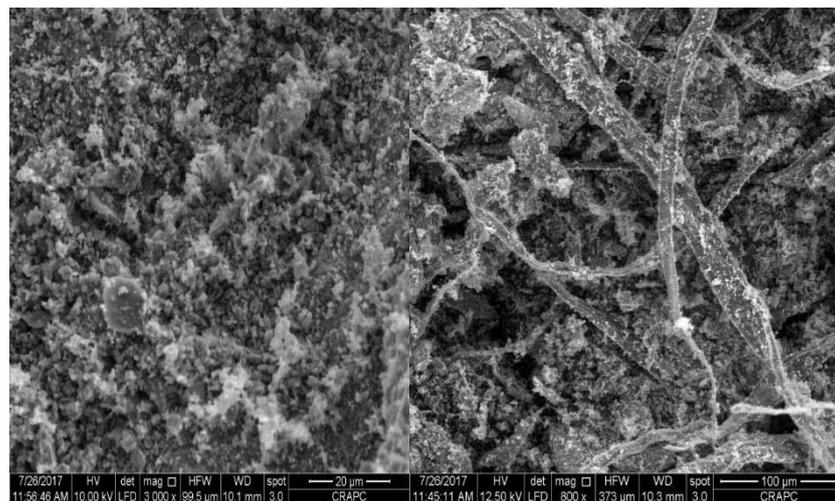
Le gradient de température à l'intérieur du séchoir solaire à effet de serre de 9 h 30 à 13 h 30 est de l'ordre de 36,48 à 56,72 °C.



**Figure IV.1 :** Variation de température pour 9 points dans la serre solaire avec le temps de séchage

## 2 Morphologie de surface :

Les observations au MEB visibles sur la figure IV.2 illustrent l'aspect général de la morphologie de surface des fibres de pâte à papier. Elle se caractérise par la présence de nombreuses cavités réparties uniformément lui conférant une configuration rugueuse préférable à une surface lisse dans le cadre de l'élaboration de composites. En effet, la rugosité de surface des renforts fibreux contribuerait à améliorer l'adhésion fibres/polymère par une augmentation de l'accrochage mécanique au niveau de l'interface entre les fibres et la matrice et par un accroissement de leurs surfaces de contact effectives avec le polymère.



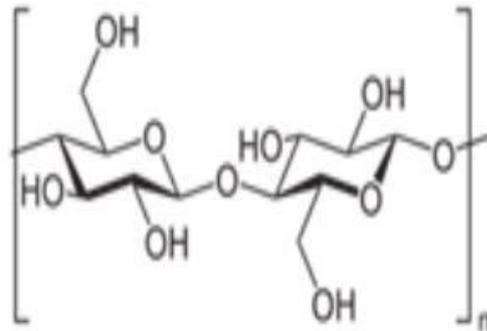
**Figure IV.2 :** Vue au microscope électronique à balayage de la structure du déchet de papier.

Le diagramme de diffraction des rayons X est réputé très fiable pour l'analyse des poudres et l'identification des différents éléments entrants dans sa composition.

## **Chapitre IV : Résultats et discussions de la partie expérimentale**

Les résultats quantitatifs résumés dans le tableau IV.1 montrent clairement que les deux éléments entrant dans la composition de ces déchets sont le carbone et oxygène.

La masse de ces deux éléments représente environ 70 % de l'échantillon analysé. Cela peut être s'explique par le fait que la molécule de cellulose est essentiellement composée de carbone et d'oxygène en plus de l'hydrogène (figure IV.3).



**Figure IV.3 : Molécule de cellulose [54]**

**Tableau IV.1 : analyse quantitative par DRX du déchet de papier.**

N°	Element	Result	Unit	Line	Intensity
1	C	30.7	% mass	C-KA	38.7242
2	O	42.9	% mass	O-KA	18.0852
3	Na	0.11	% mass	Na-KA	0.506
4	Mg	0.339	% mass	Mg-KA	5.1837
5	Al	0.919	% mass	Al-KA	47.3079
6	Si	1.26	% mass	Si-KA	80.8633
7	P	0.014	% mass	P-KA	1.821
8	S	0.0509	% mass	S-KA	6.454
9	Cl	0.191	% mass	Cl-KA	6.1128
10	K	0.0476	% mass	K-KA	2.7011
11	Ca	23.3	% mass	Ca-KA	1183.438
12	Ti	0.0367	% mass	Ti-KA	0.3346
13	Mn	0.0078	% mass	Mn-KA	0.373
14	Fe	0.0918	% mass	Fe-KA	7.1707
15	Ni	0.0014	% mass	Ni-KA	0.2183
16	Cu	0.0035	% mass	Cu-KA	0.7196
17	Zr	0.0081	% mass	Zr-KA	2.3207
18	Sr	0.0219	% mass	Sr- KA	24.3282

### **3 Caractérisation physique :**

#### **3.1 L'analyse thermogravimétrique (ATG) :**

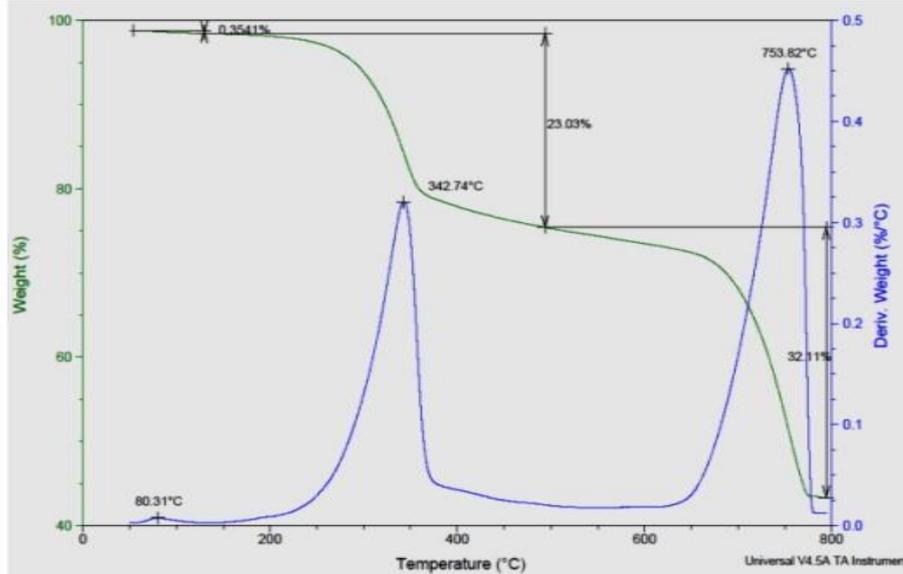
## **Chapitre IV : Résultats et discussions de la partie expérimentale**

L'analyse thermogravimétrique a également été réalisée sur les fibres de déchets de papier. Généralement, cette étude thermique des matériaux celluloses est réalisée afin d'observer le processus de décomposition thermique de la structure de ces derniers et ainsi de prévoir les meilleures conditions de températures de mise en œuvre de composites polymères sans dégrader les propriétés des fibres naturelles [55]. En outre, cette analyse permet de mieux comprendre les effets des traitements sur la stabilité thermique et la composition pariétale des renforts fibreux [56]. L'évolution du pourcentage de la masse (ATG) des fibres de déchets de papier ainsi que leur dérivée (DTG) sont représentées en fonction de la température à la Figure IV.4. Elles permettent de confirmer la présence des principaux éléments chimiques des fibres végétales comme développé ci-après.

L'analyse thermogravimétrique (ATG) (Figure 31) a été réalisée sous atmosphère inerte (Azote), poids de l'échantillon (10 mg), vitesse de chauffe (10°C/min) et plage de températures (50 °C-800 °C). Examen et analyse de l'DTG thermo gramme résultant du chauffage de l'échantillon de 50 °C à 800 °C révèle que le produit passe par trois (03) principales transformations physiques et chimiques illustrées par le thermo gramme ATG. Une première phase est observée entre 70 °C et 90 °C ce qui est probablement dû à l'évaporation des traces d'eau ayant traversé le produit lors de son contact avec l'air ambiant. Cette évaporation atteint son maximum vitesse lorsque la température du produit approche 80,31 °C comme indiqué sur la courbe DTG.

Une deuxième phase de transition se situe entre 200 °C et 380 °C, ce qui entraîne une perte de poids de 23 % avec un taux de perte maximal d'environ 0,3 % / °C autour de 342 °C. Cette transition peut être expliquée par une probable décomposition des radicaux attachés à la molécule de cellulose sous l'influence de la température [57].

Un taux de perte de poids rapide est observé entre 650 °C et 760 °C. Cette perte de poids rapide caractérisée par une vitesse maximale de 0,45% / °C vers 753 °C est probablement causée par une décomposition totale de la molécule de cellulose. Il est important de noter que la décomposition de l'échantillon illustrée par sa courbe ATG. Environ 45 % de l'échantillon est retrouvé à la fin du processus, ce qui est dû à la décomposition totale de la molécule de cellulose [56].



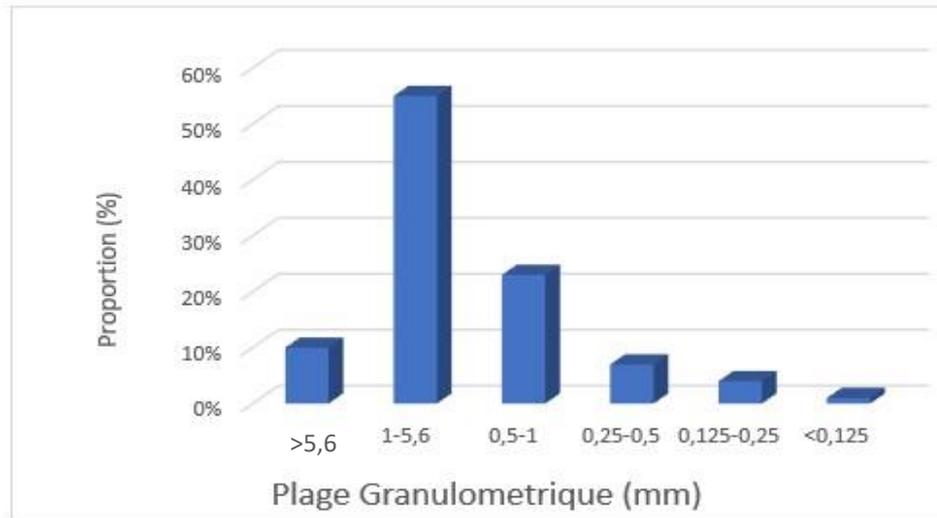
**Figure IV.4 :** Thermo grammes ATG et DTG de la décomposition des déchets de papier.

Après avoir caractérisé les déchets de papiers, utilisant les moyens expérimentaux tels que : DRX, MEB, ATG. Nous avons vérifié que ces substances ne contiennent pas d'éléments toxiques, néfaste à la santé humaine qui peut limiter leurs applications. Ces résultats nous permettent l'application de ces substances dans le bâtiment.

#### **4 Caractérisation des panneaux d'isolation :**

La connaissance du grain et du joint de grain est fondamentale et nécessaire pour interpréter le comportement des matériaux invoqués, pour expliquer les mécanismes dans des domaines très différents, comme les propriétés mécaniques ou propriétés thermiques.

Les résultats obtenus de la taille de particules de la pâte à papier après broyage (FigureIV.5) montrent que la teneur de la matière broyée en taille poussiéreuse est proche du 5%. Par conséquent, il a été jugé nécessaire soit d'éliminer cette fraction et la réserver pour une autre application, soit développer une méthode de transformation intermédiaire pour récupérer cette fraction.



**Figure IV.5 :** Courbe de distribution de la taille de particules de la pâte à papier après broyage.

Après examen des différentes techniques utilisées pour la sphérification des matériaux à partir de fraction poudreuse, nous avons opté à l'utilisation d'une méthode qui utilisait par l'industrie des pâtes alimentaires. La méthode consiste à procéder au mélange continu (sans interruption) de la matière avec humidification progressive jusqu'à adhésion totale de la fraction poudreuse aux autres particules. Les essais menés sur notre pâte à papier ont montré (comme indiqué dans la figure IV.6 ci-dessous) que toute la fraction poussiéreuse est récupérée avec amélioration de la géométrie des particules (forme sphérique). A cet effet, cette méthode a été adoptée pour la préparation des compositions.



**Figure IV.6 :** Influence de la sphérification sur la géométrie des particules et sur la teneur en poussière de la pâte à papier : (a) avant, (b) après.

L'influence de certains paramètres et conditions de mise en œuvre sur la qualité des éprouvettes a été examinée.

## **Chapitre IV : Résultats et discussions de la partie expérimentale**

Ci-dessous sont présentées quelques images montrant l'influence de certains paramètres comme suit :

### **a- Influence de la densité**

Comme il est clairement montré sur la Figure IV.7, la densité a une grande influence sur la qualité du produit final. Cela est dû à un bon compactage des particules qui résulte en une bonne adhésion et une bonne stabilité dimensionnelle. Il a été constaté aussi, que lorsque les éprouvettes sont réalisées à relativement haute pression, le retrait des dimensions est très faible.



**Figure IV.7 :** Influence de la pression de mise en œuvre (densité) sur la friabilité des éprouvettes : a) : matériau friable, b) : matériau compact et stable dimensionnellement. **b-**

### **Influence de la méthode de séchage :**

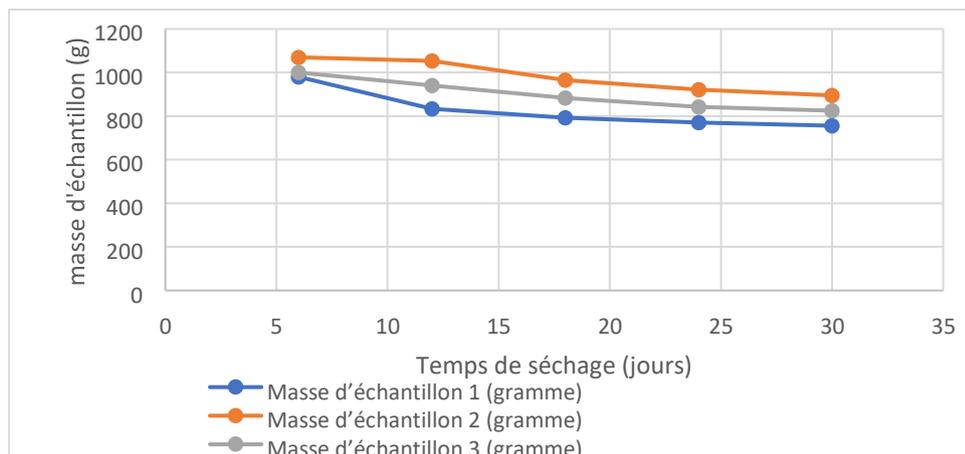
Comme la mise en œuvre des éprouvettes a été effectuée dans un milieu humide une opération de séchage des échantillons est nécessaire. Dans une première phase les éprouvettes ont été séchées dans une étuveuse à grande circulation de l'air. Toutefois il a été constaté que le séchage rapide et forcé des éprouvettes résulte en un retrait très important qui provoque, parfois, des fissures considérables qui fragilisent le produit comme illustré par la Figure IV.8.

Afin de remédier à ce problème, il a été jugé utile et nécessaire d'utiliser le séchage solaire qui est connu de fonctionner avec des vitesses de séchage beaucoup plus faible. En effet, les essais effectués ont révélé que le séchage solaire est très adapté et résulte en la production d'éprouvettes de très haute qualité (Figure IV.8) avec un retrait très faible. Cela est dû, essentiellement, aux faibles températures et à la faible circulation de l'air dans les séchoirs solaires.



**Figure IV.8 :** influence de la méthode de séchage sur la qualité des éprouvettes : (gauche) solaire, (droite) étuveuse.

Le suivi massique réalisé durant la stabilisation montre que la durée de séchage est d'environ 30 jours quelle que soit la formulation considérée (figure IV.9). La masse volumique apparente, obtenue par mesure et pesée des échantillons, varie entre **1020,83-1090.33 kg/m<sup>3</sup>, 1052.08-1120.48 kg/m<sup>3</sup> et 1083.33-1162.2 kg/m<sup>3</sup>** respectivement pour E1, E2, E3 (tableau IV.2). Selon Melo et al, la variabilité des masses volumiques observée pour une même configuration de panneau se produit lors de l'élaboration des composites et possède comme causes principales les variations dans la masse, la teneur en humidité et la distribution des particules dans les panneaux[58]



**Figure IV.9 :** Masse des composites durant le séchage.

**Tableau IV.2 :** Masse des composites durant le séchage.

Temps de séchage (jours)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		
	E1	E2	E3
6	1090.33	1120.48	1162.2
18	1045.4	1076.01	1102.66
30	1020.83	1052.08	1083.33

### 5 Conductivité thermique :

La conductivité thermique correspond au flux de chaleur traversant un mètre de matériau soumis à un écart de température de 1 Kelvin entre la face entrante et la face sortante [59]. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant [60] [61].

À partir du tableau1, il apparaît que la conductivité thermique des trois panneaux étudiés varie de 0.148 W/m.K à 0.185 W/m.K. Par ailleurs, la masse volumique apparente des panneaux augmentée influence leurs propriétés thermiques il y a une relation de corrélation directe entre la masse volumique et la conductivité thermique habituellement plus grande est la masse volumique, plus élevée est la conductivité thermique. En effet, moins les panneaux sont denses, plus ils contiennent de vides et plus faible est leur conductivité thermique, la conductivité thermique de l'air étant inférieure à celle de substances solides [62] [63] [61].

Après le tableau IV.3 on a trouvé la valeur de la résistance thermique est entre 0.22 et 0.27 m<sup>2</sup>.k/w, donc la combinaison d'un isolant ayant une résistance thermique de 0.22 m<sup>2</sup>. K/W et une masse volumique de 1020.83 (kg/m<sup>3</sup>) (E1) est considérée comme un bon résultat en matière d'efficacité d'isolation thermique

**Tableau IV.3 :** les performances thermiques de notre matériau.

<b>Éprouvettes</b>	<b>Chaleur spécifique (KJ/m<sup>3</sup>.k)</b>	<b>Conductivité Thermique (W/m. k)</b>	<b>Coefficient de transmission calorifique (w/m<sup>2</sup>.k)</b>	<b>Résistance thermique (m<sup>2</sup>.k/w)</b>	<b>Capacité thermique (KJ/kg.k)</b>
<b>E1</b>	774.2	0.148	3.7	0.27	0.758
<b>E2</b>	768.1	0.163	4.075	0.24	0.775
<b>E3</b>	688.5	0.185	4.62	0.22	0.716

Le tableau IV.4 illustre une comparaison de la conductivité thermique de nos matériaux composites à base de déchet de papier ainsi que de la densité à d'autres composites qui contiennent des particules végétales destinées à améliorer l'isolation thermique des habitations.

Ces valeurs indiquent que notre matériau qui présente une densité importante par rapport à d'autres produits est un bon isolant.

**Tableau IV.4 :** Comparaison de la conductivité et de la densité des composites à base de déchet de papier

Composites Références	Conductivité (W/m.k)	Densité Références (Kg/m3)
E1/E2/E3 cette étude	0.148/0.163/0.185	1 020.83/1052.08/1083.33
Bois-ciment (0-10% masse) [64]	1.86 - 0.64	1970-1780
Gyse / bois de palmier dattier (10% masse) [65]	0.15/0.17	753
Fibres de papier kraft constituant les sacs de ciment [66]	0.1640	600
Mortier-fibre de coco (10% masse) [67]	0,65	502
Mortier-fibre de coco (15% masse) [67]	0.54	1464
Mortier-fibre de Durion (15% masse) [67]	0.79	1832

D'autre part, de l'humidité relative du composite qui dépend de la teneur en eau des particules de déchets de papier une fois les particules de déchet de papier sèchent, leur volume baisse en donnant lieu à l'apparition de nouveaux pores, dans une structure déjà poreuse, ce qui explique la diminution de la conductivité thermique du composite à base de déchets papier (figure IV.10).[64]

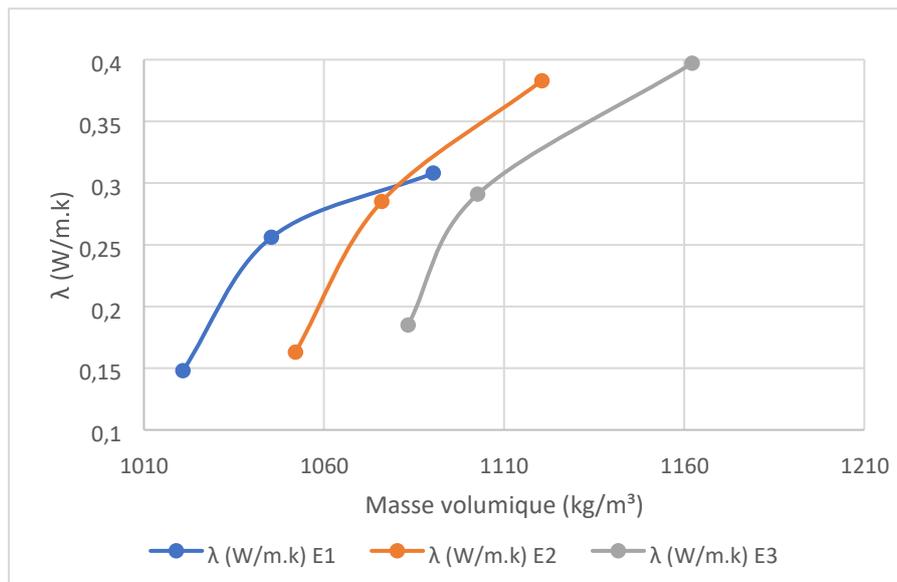


Figure IV.10 : la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

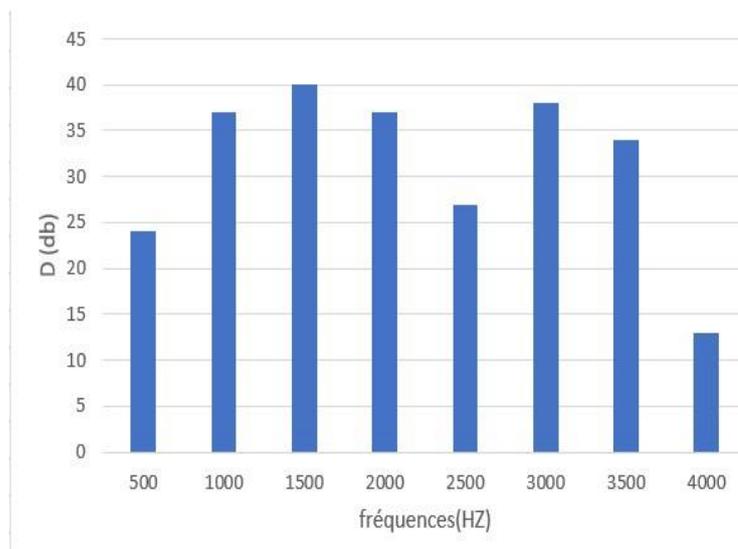
## **Chapitre IV : Résultats et discussions de la partie expérimentale**

### **6 Propriétés d'absorption acoustique :**

Lors de la construction d'un bâtiment, les matériaux et éléments utilisés doivent aussi bien répondre aux exigences de la Réglementation Thermique RT 2012 qu'à celles de la Réglementation Acoustique en vigueur (NRA). Au-delà des exigences de la NRA abordées plus haut, il existe des normes à respecter pour s'assurer que l'isolation phonique d'un appartement neuf est de bonne qualité.

Selon les types de bruits absorbés (bruits aériens, bruits de choc ou bruits d'équipement), on peut calculer (en décibels) la qualité de l'isolation et ainsi s'assurer du respect des normes acoustiques applicables à des logements neufs. Ce notamment grâce à certains indices.

La propriété d'absorption acoustique est la capacité d'un mur à réfléchir les ondes sonores incidentes [68]. D'après la figure IV.11 on remarque que notre matériau étudié n'isole pas toutes les fréquences de son de manière égale.



**Figure IV.11 :** l'isolement acoustique brut en fonction des plages des fréquences.

La masse surfacique de notre matériau est d'une valeur de 40.24 kg/m<sup>2</sup>, par projection sur l'axe vertical on trouve la valeur de 35<R<45.

En matière d'isolement aux bruits extérieurs en façade, l'exigence minimale de 30 dB peut en fait atteindre 45 dB en fonction du niveau sonore subi.

**Tableau IV.5 :** cinq catégories existent selon le niveau du bruit [69]

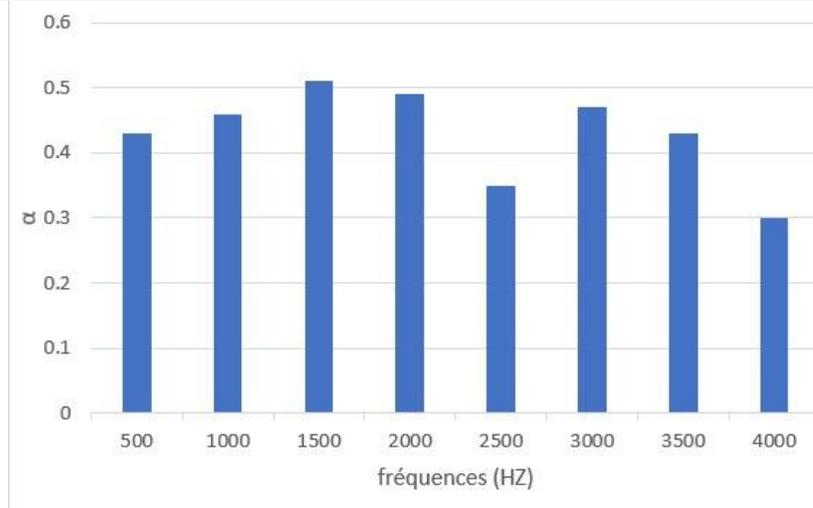
Catégorie	Niveau sonore environnant	Isolation minimum en façade
1	+ de 81 dB	45dB
2	Entre 76 et 81 dB	42dB
3	Entre 70 et 76 dB	38dB
4	Entre 65 et 70 dB	35dB
5	Entre 60 et 65 dB	30dB

Tableau IV.6 : la réduction du bruit de notre matériau

Fréquences (hz)	Niveau sonore (dB)	
	La réception L1	L'émission L2
1000	42	79
1500	38	78
2000	38	75
3000	42	80

On remarque qu'on a des résultats identiques entre le tableau IV.5 qui suit la norme d'isolation acoustique des bâtiments et le tableau IV.6 qui représente l'isolation acoustique de notre matériau isolant étudié.

Suivant la norme internationale ISO 11654 [70] qui répartit les performances d'absorption acoustique en cinq classes : de A à E. Les valeurs  $\alpha$  sont comparées à une série de courbes de référence établies (figure IV.12). Puisque la plage entre les courbes de référence est large, les classes d'absorption ne fournissent qu'une indication générale sur les caractéristiques du matériau (tableau IV.7).



**Figure IV.12 :** coefficient de l'absorption acoustique en fonction des plages des fréquences.

Selon le tableau IV.7 qui classe les matériaux selon leur coefficient d'absorption acoustique, nous avons constaté que notre matériau est de classe D. Ces résultats nous renseignent sur le classement acoustique moyen de ce nouveau matériau élaboré.

**Tableau IV.7 :** Classes d'absorption acoustique [70]

A	Calasses d'absorption acoustique
0,90 – 1,00	A
0,80 – 0,85	B
0,60 – 0,75	C
0,30 – 0,55	D
0,15 – 0,25	E
0,00 – 0,10	Nom classé

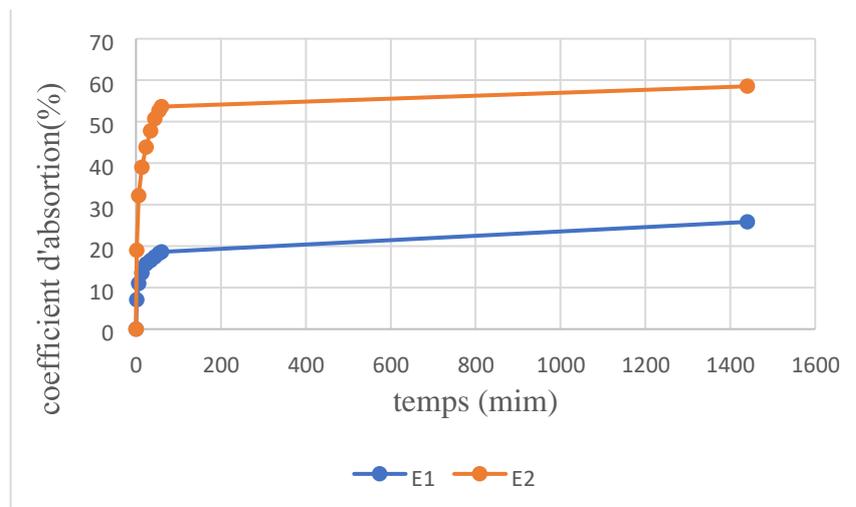
À la fin on peut dire que notre matériau isolant est utilisable dans les habitats à cause de son isolement acoustique et son affaiblissement acoustique qui arrête ou diminue le niveau du bruit dans le bâtiment.

### **7 Absorption :**

Une des caractéristiques importantes des fibres végétales est le pouvoir absorbant de ces fibres, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeable du fait de leur

## Chapitre IV : Résultats et discussions de la partie expérimentale

importante porosité. La cinétique d'absorption d'eau de deux matériaux composites à base de courtes fibres cellulosiques du déchet de papier (E1 et E2) est présentée dans la figure 40. Donc, la figure IV.13 montre l'évolution de l'absorption d'eau des échantillons E1 et E2 en fonction du temps d'immersion. Nous remarquons que l'absorption de l'eau atteint 50,73 % pour E1, après 44 mn, et 25,85 % après 1440 mn pour E2. La diffusion de l'humidité dans le déchet de papier a eu lieu en raison du gradient d'humidité entre la surface et le centre : l'eau migre alors d'un milieu plus concentré vers le moins concentré [66]. D'après ces résultats, on peut suggérer que les composites étudiés sont appropriés à être utilisés dans des environnements humides.

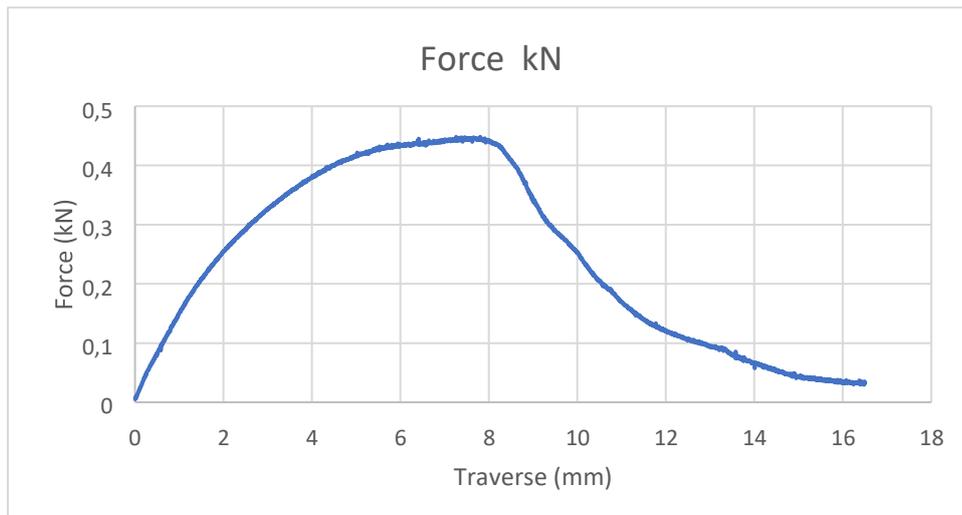


**Figure IV.13 :** Absorption de l'eau en fonction du temps d'immersion des échantillons E1, E2.

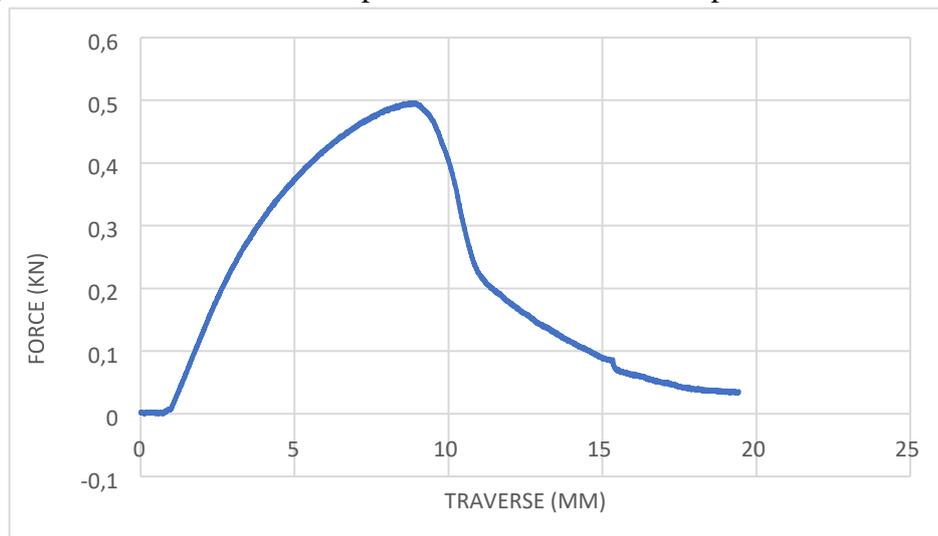
### 8 Résistance à la flexion :

Les résultats des résistances à la flexion (MOR) des deux formulations de panneaux étudiés (E1, E2) sont mesurées on utilise les Figure IV.14 et Figure IV.15 respectivement.

Les résultats obtenus aux Figures IV.14,IV.15 montrent que les panneaux E1 affichent une résistance à la flexion moyenne **1.397 MPa**, significativement supérieures à celles de E2 (**0,0079MPa**), cette variabilité de la résistance à la flexion (MOR) obtenus pour E1 et E2 pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité du maillage pour E1 par rapport E2, d'autre part avec la masse volumique apparente des panneaux. D'autres travaux réalisés sur des panneaux de particules de bois relevèrent aussi un effet linéaire significatif de la masse volumique sur ces propriétés mécaniques [71] [72].



**Figure IV.14 :** Courbe force-déplacement de matériau composite E1 en flexion 3 points.



**Figure IV.15 :** Courbe force-déplacement de matériau composite E2 en flexion 3 points.

### **Conclusion :**

Caractérisation des vieux papiers à l'aide de méthodes expérimentales telles que : DRX, SEM et ATG. Cette dernière nous a permis de vérifier que ces matériaux ne contiennent pas d'éléments toxiques nocifs pour la santé humaine pouvant limiter leurs applications dans l'industrie de la construction. Cependant, toutes les propriétés des matériaux composés évalués dans cette étude présentent des valeurs qui sont d'un ordre de grandeur flexion, acoustique) ou meilleures (conductivité thermique) et même moyennes (absorption d'eau) que celles rapportées dans la littérature pour les panneaux. Isolation des particules végétales.

---

## **Chapitre v : simulation et Résultats**

---

**Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons présenter une simulation réalisée avec Trnsys18 pour évaluer l'efficacité de notre isolant thermique dans un habitat. Cette simulation nous permettra d'étudier l'isolation thermique offerte par ce nouveau matériau et d'analyser les différentes températures obtenues.

Pour mener à bien cette simulation, nous avons utilisé un modèle de bâtiment représentatif de notre habitat, en prenant en compte ses caractéristiques géométriques, sa configuration, ses matériaux de construction et son système de chauffage. Nous avons intégré les propriétés thermiques de notre isolant dans le modèle.

**1 Description du logiciel :**

Le logiciel TRNSYS 18 permet la simulation thermique dynamique appliquée au bâtiment. Il permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment (emplacement matériaux de construction utilisés, architecture globale, concept énergétique choisi, etc.) mais aussi des systèmes (chauffage, climatisation, énergies renouvelables...) pour l'étude détaillée du comportement thermique de ce bâtiment [73].

TRNSYS 18 est un outil universel et modulaire, universel a cause des centaines de composants standard intégrés dans la bibliothèque permettent de simuler les bâtiments (mono ou multizone), les systèmes de chauffage et de climatisation, même les plus complexes tels que les systèmes utilisant les énergies renouvelables innovants (solaire, éolienne, géothermie...). Modulaire par ce qu'il est facile d'ajouter de nouveaux composants, des systèmes et des concepts énergétiques. Il est possible d'ajouter des composants utilisateurs à partir de nombreux langages de programmation.

**2 Fonctionnement du logiciel :**

Le logiciel Trnsys18 est basé sur une approche de simulation numérique en utilisant des blocs fonctionnels appelés "composants". Ces composants représentent les différents éléments du système énergétique, tels que les panneaux solaires les échangeurs de chaleur, les unités de climatisation, les systèmes de stockage d'énergie, etc. Les utilisateurs peuvent créer des modèles en assemblant ces composants et en définissant leurs propriétés.

Trnsys 18 propose une bibliothèque de composants préconstruits couvrant un large éventail de technologies et de systèmes énergétiques. Les utilisateurs peuvent également développer leurs propres composants personnalisés pour représenter des éléments spécifiques ou des technologies non disponibles dans la bibliothèque standard.

### **3 Les étapes de travail :**

#### **3.1 L'ouverture du logiciel :**

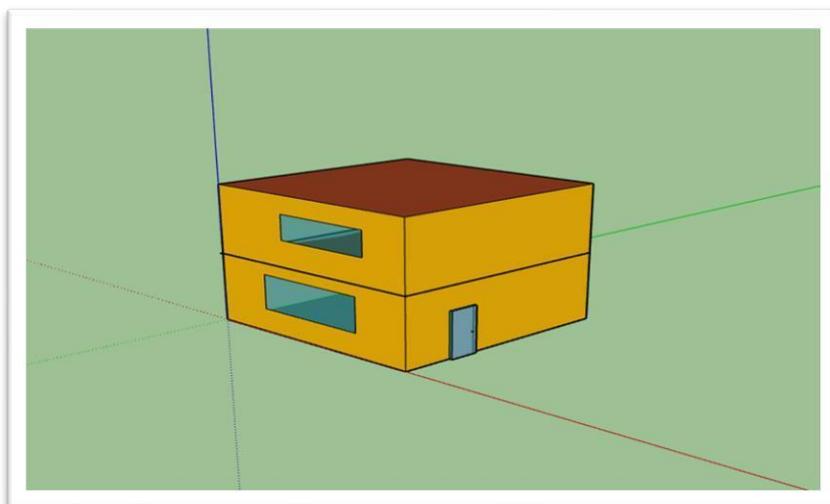
Lorsque on ouvre le logiciel on avoir directement cette interface simple



**Figure V.1 :** Interface du logiciel Trnsys18

#### **3.2 L'importation de l'habitat :**

Il est obligé d'avoir un immeuble ou un habitat pour effectuer la simulation pour cette raison on fait une simple maison par logiciel 'SketchUp'



**Figure V.2 :** la maison dessinée pour faire l'étude

3.3 Configuration de l'installation :

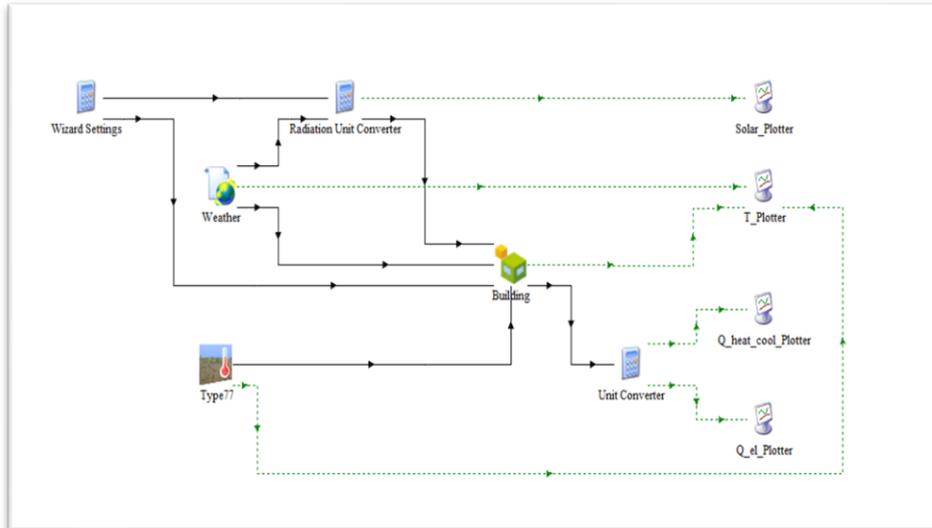


Figure V.3 : l'installation proposée pour la simulation 3.4

Choix de la météo :

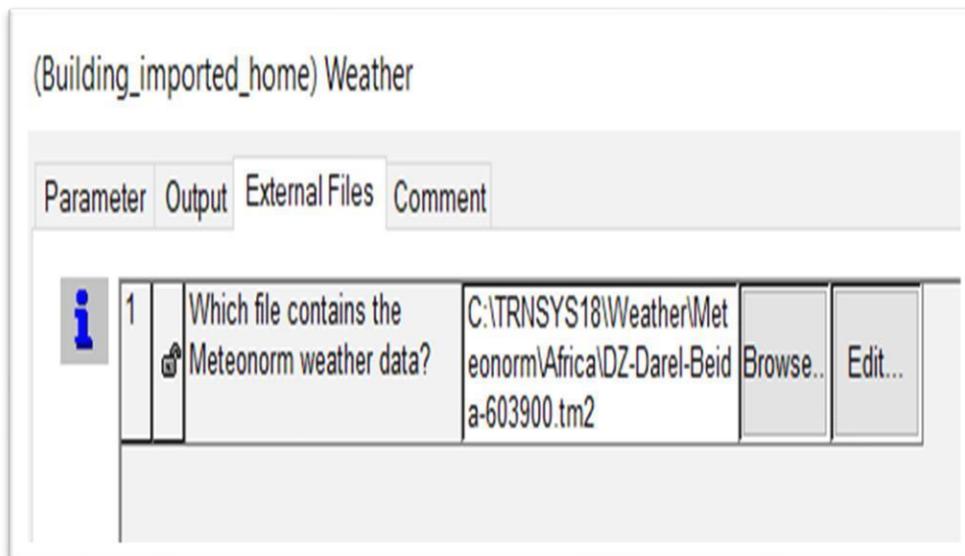
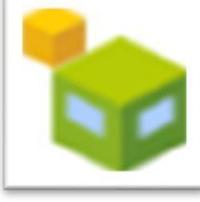


Figure V.4 : fichier du météo 'Dar El Beida'

Dans notre cas la météo utilisée est de 'Dar El Beida' c'est un endroit situé dans le nord de l'Algérie.

Le tableau si dessous représente les composants utilisés dans l'installation :

Tableau V.1 : tableau des composants [75]

Composant	Sympole	fonction
<b>Type 65</b>		Le composant « Plotter » est également utile pour présenter les résultats de manière claire et convaincante dans des rapports ou des présentations
<b>Type 15 – 6</b>		L'un des composants les plus importants dans TRNSYS 18, car il fournit les données météorologiques nécessaires pour les Simulations thermiques et énergétiques
<b>Type 77</b>		Il fournit des données de température du sol pour les simulations de systèmes de chauffage et de refroidissement géothermiques.
<b>Equation</b>		Permet de définir des relations mathématiques pour les simulations. Il peut être utilisé pour créer des expressions mathématiques Complexes pour les variables de simulation
<b>Type 56</b>		Utilisé pour modéliser le comportement thermique des bâtiments résidentiel la à un étage. Il fournit des données telles que la surface de plancher, l'isolation, les ouvertures, etc., qui sont nécessaires pour simuler la performance énergétique d'un bâtiment résidentiel

3.5 Configuration des paramètres et propriétés des composants :

Tableau V.2 : paramètres des composants

	Epaisseur (m)	Conductivité (Kj/hr.m.k)	Conductivité (w/m.k)	Capacité (Kj/kg.K)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )
Finition	0.01	1.5	0.416	1.1	1250
Isolant	0.04	0.53	0.148	0.774	1005.65
Brick	0.1	4.8	1.3	0.9	2000
Béton	0.1	7.56	2.1	1	2200

On ajoute aussi les déperditions par les fenêtres dans la base de paramètres et modifications de Trnbuild pour actualiser les données de calcul.

3.6 Lancement de la simulation :

Après le lancement de la simulation, le graphe si dessous s’affiche dans une nouvelle fenêtre :

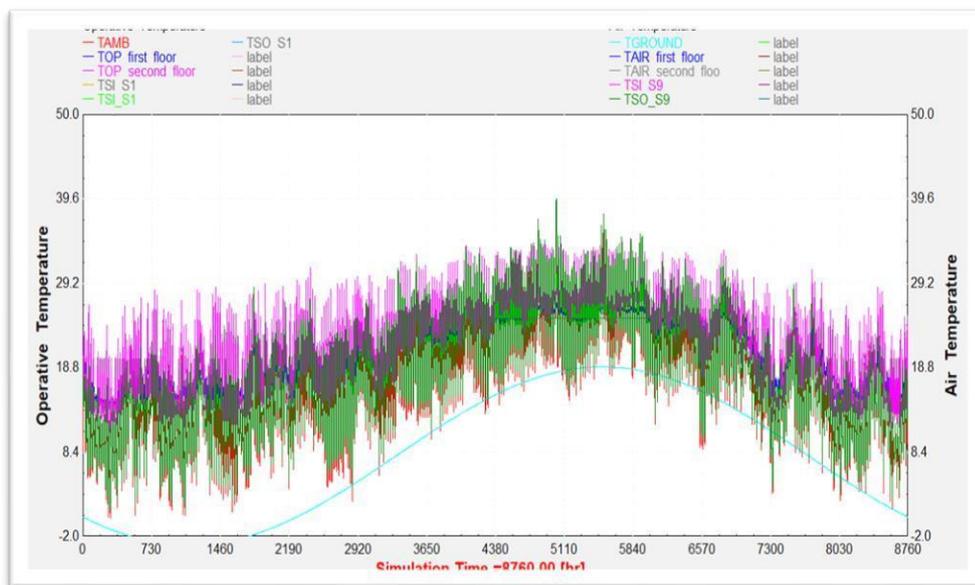
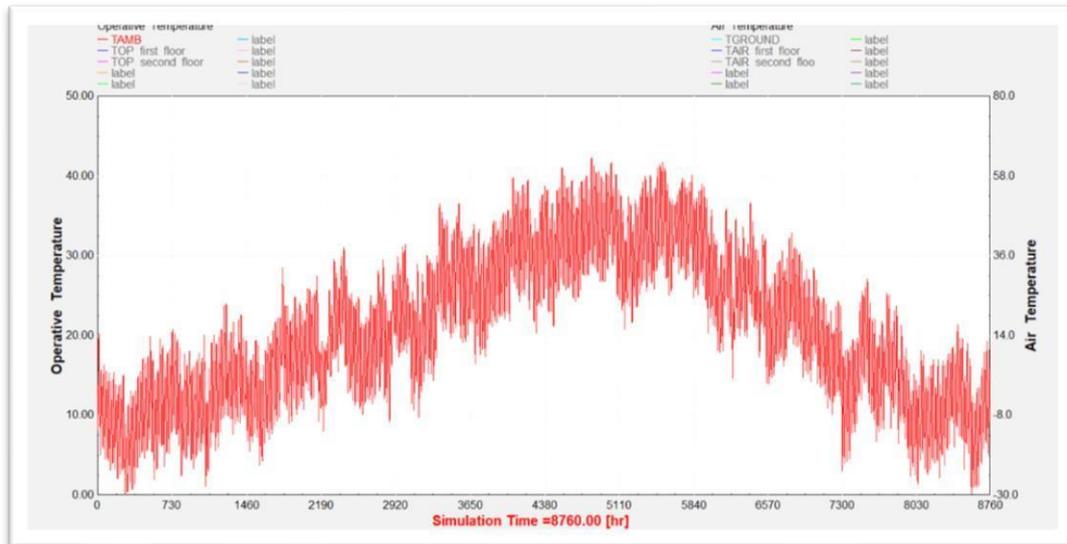


Figure V.5 : les températures en fonction du temps

La simulation a été réalisée sur une période d'un an, en utilisant les données climatiques appropriées pour la région où se situe l'habitat. Nous avons pris en compte

des paramètres tels que la température extérieure, le rayonnement solaire, la ventilation et la consommation d'énergie du système de chauffage. Pendant la simulation, nous avons surveillé et enregistré les températures à différents endroits de l'habitat, y compris les murs, les planchers, les plafonds et les espaces intérieurs. Cela nous a permis de visualiser et d'analyser les variations de température à travers le bâtiment et d'évaluer l'efficacité de notre isolant



**Figure V.6 :** variation de la température ambiante pendant une année

Dans notre cas, la variation de température observée entre 0 et 21°C pendant l'hiver indique des températures relativement froides. L'hiver est généralement caractérisé par des températures plus basses par rapport aux autres saisons de l'année.

Il est courant de constater une variation de température significative pendant les mois d'été. Les températures sont de 25 à 42°C, peuvent être considérées comme assez élevées et indiquent un climat chaud.

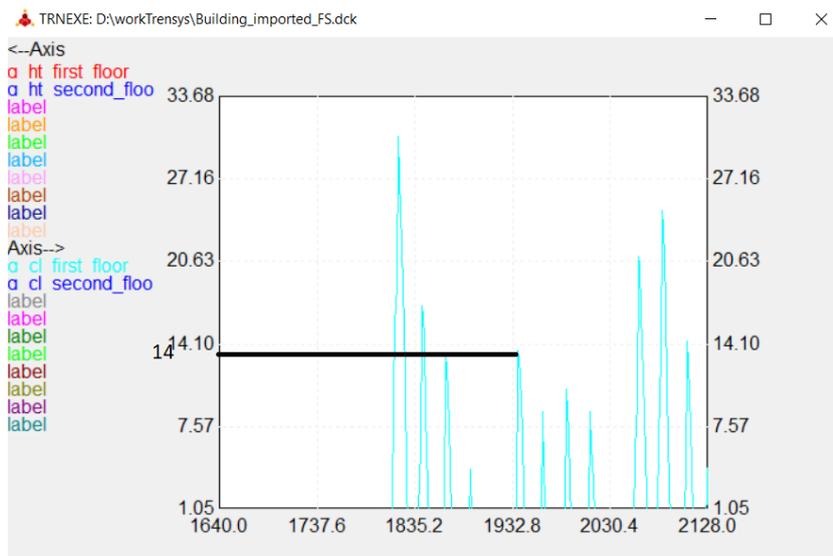
Les résultats de la simulation ont montré une amélioration significative de l'isolation thermique de l'habitat grâce à l'utilisation de notre isolant. Les températures à l'intérieur du bâtiment étaient mieux régulées et les variations de température étaient réduites par rapport à un scénario sans isolant ou avec un isolant conventionnel.

**4 Calcul de la résistance thermique :**

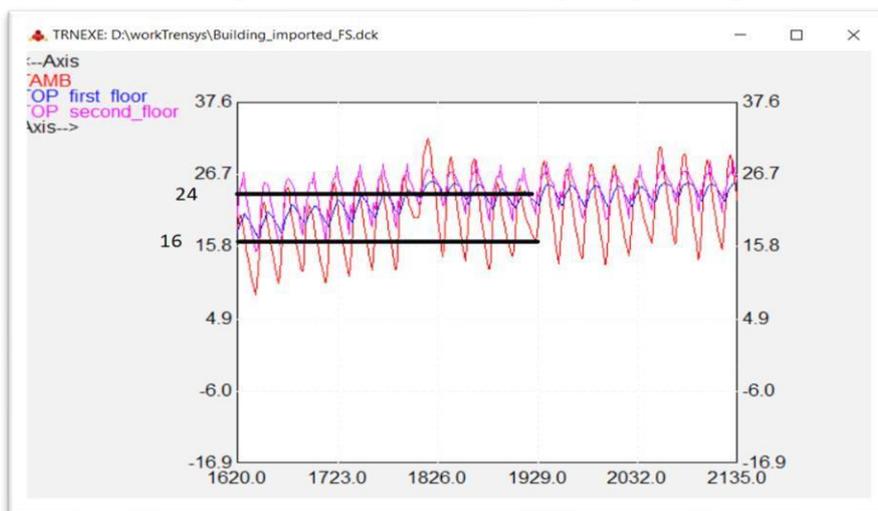
Pour calculer la valeur de la résistance thermique à partir du graphe on va déterminer les valeurs de variation de températures entre le milieu extérieur et intérieur ainsi que la quantité de chaleur d'échange :

**4.1 Calcul en printemps :**

Dans le premier cas on va calculer la valeur de la résistance thermique dans la période du printemps. On a les résultats ci-dessous :



**Figure V.7 :** La quantité de chaleur échangé en printemps



**Figure V.8 :** différence de la température en printemps.

Selon la loi de la quantité de chaleur :

$$Q = C \times \Delta T$$

(V.1)

C : coefficient de transfert thermique

$\Delta T$  : différence de température

Q : quantité de chaleur échangé

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (\text{V.2})$$

$$Q = 14 \text{ W et } \Delta T = (24 - 16) = 8$$

$$C = \frac{14}{8}$$

$C = 1.75 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$  Pour avoir la valeur de R il suffit de faire l'inverse du coefficient d'échange.

$$R = \frac{1}{C}$$

On remplace la valeur de  $C = 1.75$

$$R = \frac{1}{1.75}$$

$$R = 0.57 \text{ m}^2 \cdot \text{k} / \text{w}$$

#### 4.2 Calcul en été :

Dans le deuxième cas on va calculer la valeur de la résistance thermique dans la période d'été. On avoir les résultats si dessous :

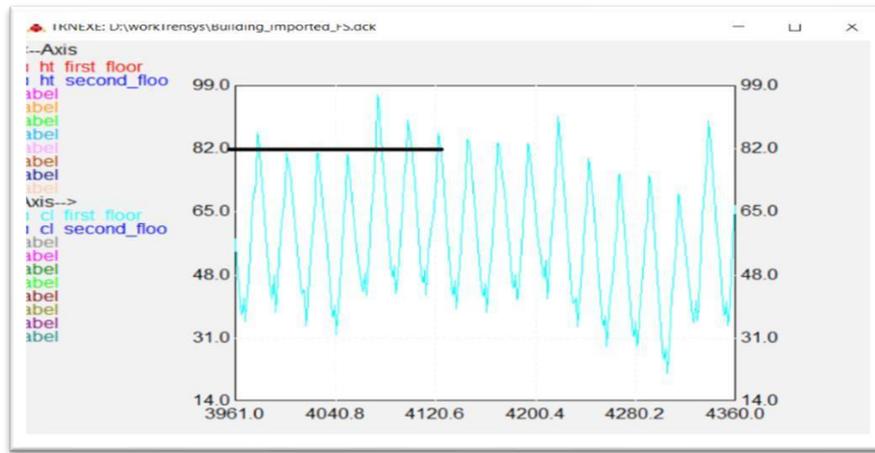


Figure V.9 : La quantité de chaleur échangé dans l’été

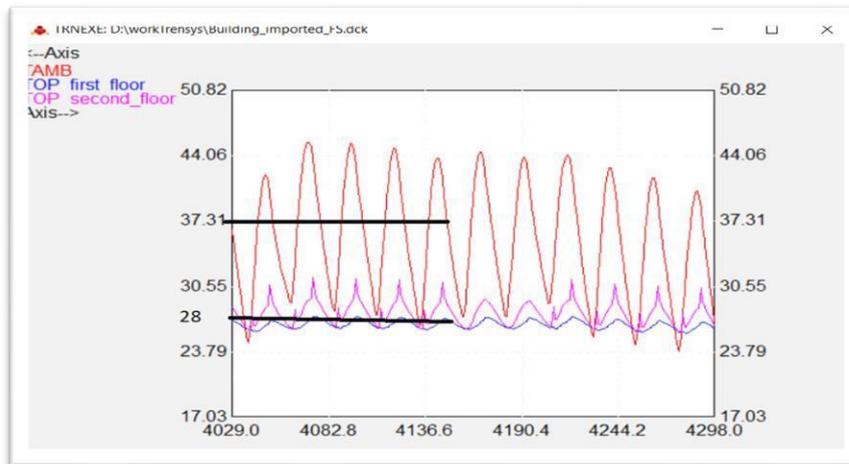


Figure V.10 : différence de la température dans l’été

Selon l’équation de la quantité de chaleur, on va déterminer la de résistance thermique :

$$Q = C \times \Delta T$$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

$$Q=82 \text{ et } \Delta T = (37-28) = 9$$

$$C = \frac{82}{9}$$

$$C=9.11 \text{w/m}^2 \cdot \text{K}$$

Pour avoir la valeur de R il suffit de faire l'inverse du coefficient d'échange.

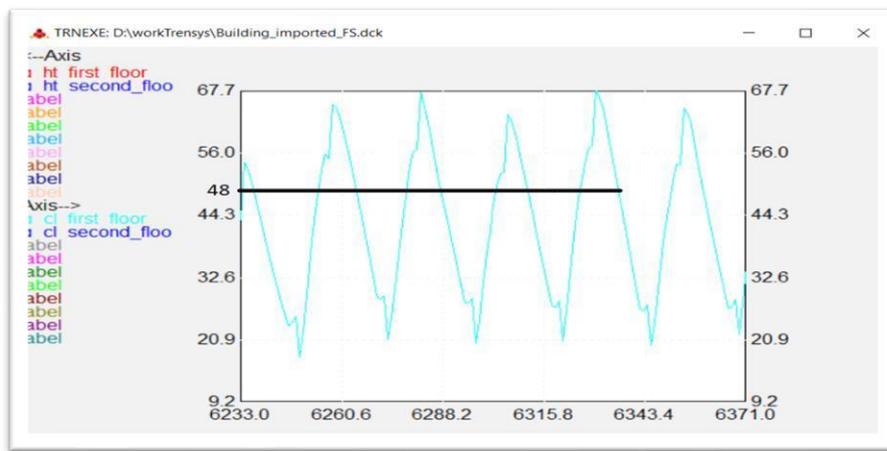
$$R = \frac{1}{C}$$

$$R = \frac{1}{9.11}$$

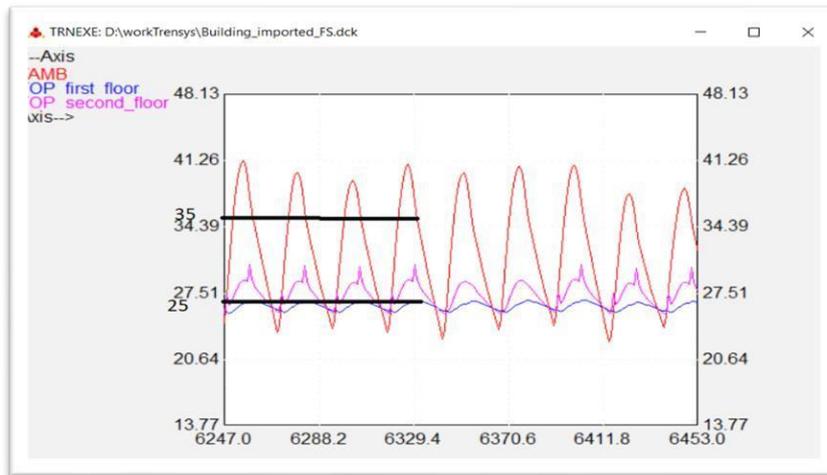
R=0.10 m².k/w

**4.3 Calcul dans l'automne :**

Dans le troisième cas on va calculer la valeur de la résistance thermique dans la période d'automne. On avoir les résultats si dessous :



**Figure V.11 :** La quantité de chaleur échangée dans l'automne



**Figure V.12 :** différence de la température dans l'automne

Selon l'équation de la quantité de chaleur, on va déterminer la valeur de résistance thermique :

$$Q = C \times \Delta T$$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

$Q = 48$  et  $\Delta T = (35-25) = 10$

$$C = \frac{48}{10}$$

$C = 4.8 \text{w/m}^2.\text{K}$

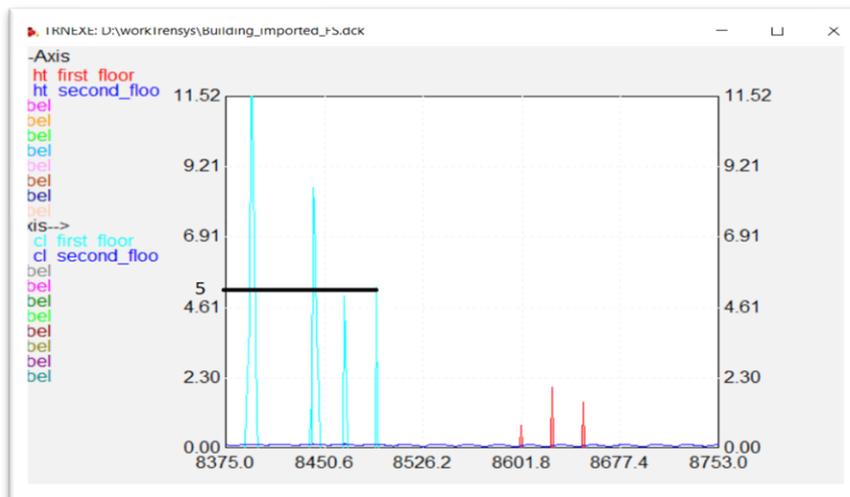
Pour avoir la valeur de R il suffit de faire l'inverse du coefficient d'échange.

$$R = \frac{1}{C}$$

$$R = \frac{1}{4.8}$$

$R=0.20 \text{ m}^2.\text{k/w}$

#### 4.4 Calcul dans l'hiver :



**Figure V.13 :** La quantité de chaleur échangée en hiver

Dans le quatrième cas on va calculer la valeur de la résistance thermique dans la période d'hiver. On avoir les résultats si dessous :

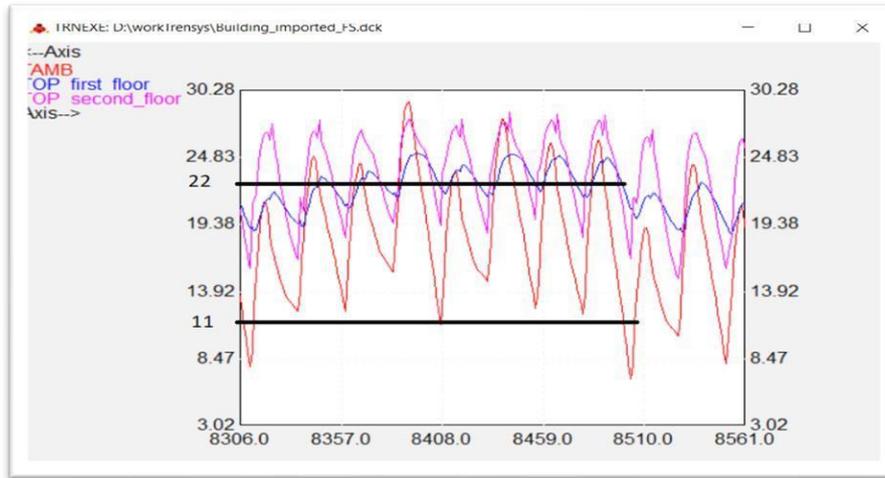


Figure V.14 : différence de la température en hiver

$$Q = C \times \Delta T$$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

**Q =5 et  $\Delta T=(22-11)=11$**

$$C = \frac{5}{11}$$

**C=0.45w/m<sup>2</sup>.K**

Pour avoir la valeur de R il suffit de faire l'inverse du coefficient d'échange.

$$R=1/C$$

$$R = \frac{1}{0.45}$$

**R = 2.2 m<sup>2</sup>. k/w**

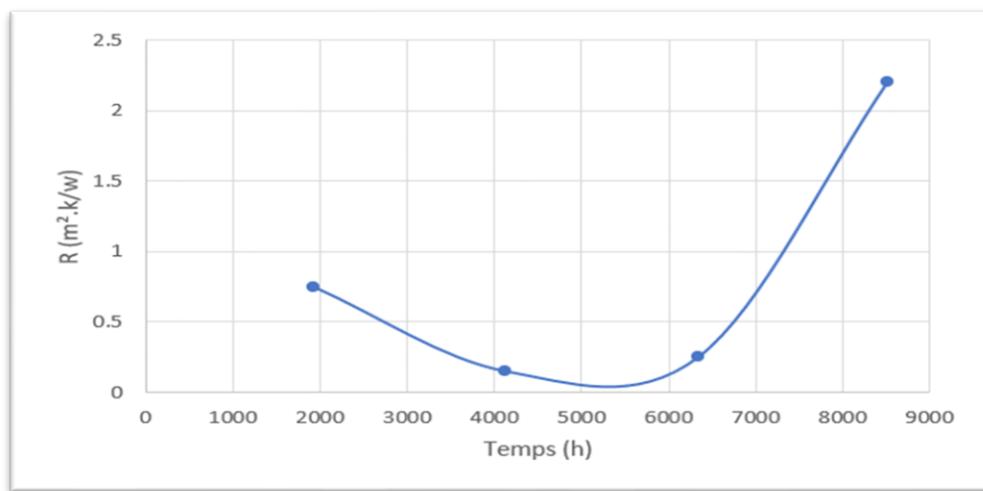
Après tous ces calculs et les valeurs de la résistance thermique qu'on avoir on va les présenter dans un graphe en fonction du temps :

À partir de ce graphique, il semble effectivement que la résistance thermique de l'isolant soit plus élevée pendant la période hivernale que pendant la période estivale.

Cela peut indiquer que l'isolant est plus efficace pour isoler contre le froid que contre la chaleur.

Plus la valeur de résistance thermique est élevée, plus le matériau est isolant. La résistance thermique de l'isolant est supérieure à 2 ( $\text{m}^2 \cdot \text{k}/\text{w}$ ) en hiver et d'environ 0,1 à 0,2 ( $\text{m}^2 \cdot \text{k}/\text{w}$ ) en été, cela suggère que l'isolant offre une meilleure isolation thermique pendant les mois froids

Il est également possible que d'autres variables influent sur la variation de la résistance thermique, telles que les conditions météorologiques, l'utilisation des systèmes de chauffage ou de refroidissement, l'isolation des autres composants du bâtiment.



**Figure V.15 :** la variation de la résistance thermique en fonction du temps

### **Conclusion :**

En conclusion, la simulation réalisée avec Trnsys18 a donné des résultats positifs et encourageants en ce qui concerne l'efficacité de notre isolant thermique dans l'amélioration de l'isolation thermique d'un habitat. Les résultats obtenus, tels que le coefficient d'échange et la résistance thermique, ont démontré l'efficacité de notre isolant pour réduire les pertes de chaleur et maintenir des températures intérieures confortables et stables.

Ces résultats confirment l'utilité et les avantages de notre isolant dans les projets de construction, en offrant une meilleure performance énergétique et un confort accru aux occupants. Ils renforcent la pertinence de choisir notre isolant pour améliorer l'efficacité énergétique et créer des environnements intérieurs plus agréables et durables.

## **Conclusion générale :**

Le présent travail concerne la valorisation d'un rejet industriel, et de donner à l'industrie de recyclage de papier et de carton usagés une solution pratique est efficace pour l'élimination de ces rejets et déchets nuisibles à l'environnement des usines et de développer de nouveaux matériaux pour l'isolation thermique et phonique des bâtiments avec une faible empreinte écologique. Ce type de matériaux présente d'une part des intérêts économiques non négligeables à la fois un faible coût de revient et une possibilité de créer de la richesse à travers l'installation d'unité de production.

Les principales constatations tirées à la fin de ce travail, sont les suivantes :

- La caractérisation des déchets de papiers, utilisant les moyens expérimentaux tels que : DRX, MEB, ATG, à permis de vérifier que ces substances ne contiennent pas d'éléments toxiques, néfastes à la santé humaine qui peut limiter leurs applications. Ces résultats nous permettent l'application de ces substances dans le bâtiment.
- Le matériau composite à base de déchet de papier a permis d'obtenir de bons résultats sur le plan isolation phonique.
- La résistance thermique, autrement dit l'isolation thermique des matériaux synthétisés est très intéressante.
- Les matériaux composites étudiés ont une bonne résistance à la flexion.
- Les résultats de simulation réalisée avec Trnsys pour notre matériau ont confirmé son efficacité pour améliorer l'isolation thermique et maintenir des températures intérieures confortables.

Cette étude a permis de mettre en évidence les bonnes propriétés d'isolation thermique, la résistance à la flexion et l'efficacité acoustique des nouveaux matériaux composites à base de déchets et de rejets de la pâte à papier. Ces matériaux offrent une solution prometteuse pour réduire les impacts environnementaux et améliorer les performances des bâtiments.

Ce travail ouvre de nombreuses perspectives telles que :

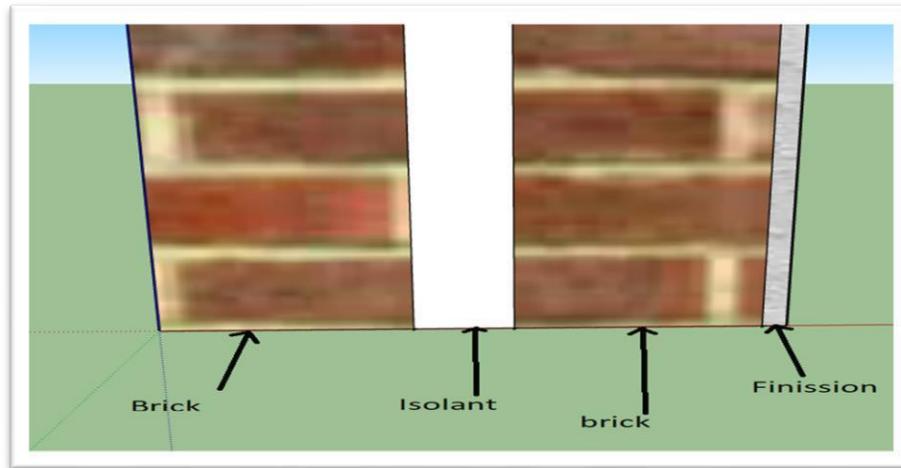
- Étude l'essai de la flamme des matériaux composites étudiés.

- L'effet du vieillissement des matériaux composites.
- La détermination des courbes de sorption des matériaux étudiés.
- Étude de la durabilité du matériau composite à base de déchet de papier.
- Je pense que c'est intéressante à approfondir l'étude de la réalisation d'une simulation dans trois régions différentes pour étudier les variations de température avec et sans chauffage et climatisation. Les régions choisissent par exemple le pôle Nord, l'Algérie et le désert, qui ont des caractéristiques climatiques distinctes, pour mesurer les variations de température en modifiant l'épaisseur de l'isolant de 4 cm à 8 cm dans chaque région. Ensuite, comparerons les résultats obtenus avec et sans chauffage et climatisation dans l'installation.
- Et enfin point qui paraît important correspondant pour chaque simulation, on fait les évaluations de coût de l'électricité utilisée et récupérée lorsque l'épaisseur de l'isolant est doublée. Cette analyse nous permettra de terminer l'efficacité de l'isolant dans chaque région et son impact sur la consommation d'énergie.

**Annexe :**

**Composition des murs et plafond :**

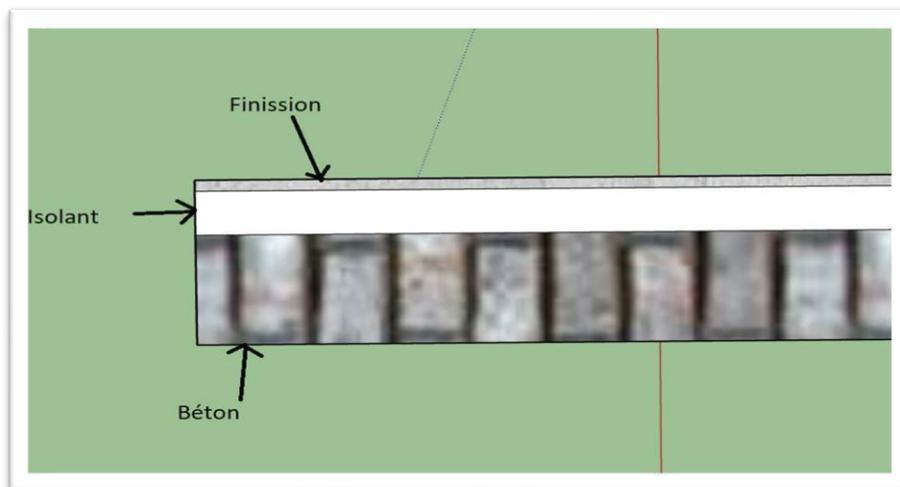
La figure 1 illustre la composition des murs et plafond.



**Figure 1 :** Composition des murs et plafond

**Composition du sol :**

La figure 2 suivante monte les composants utilisés dans le plancher.



**Figure 2 :** les composants utilisés dans le plancher

**Caractéristiques et propriétés :**

Les valeurs exprimées dans le tableau sont prises partir de 'Trnbuild' et le paramètre ajouté à la cour de la conception

**Tableau 1 : paramètres de porte et fenêtre**

	<b>Largeur (m)</b>	<b>Longueur (m)</b>	<b>Coefficient d'échange (W/m<sup>2</sup>.K)</b>
Porte en aluminium	1	2	1.5
Fenêtre simple vitrage	1.5	4	1.1

**Références :**

- [1] Ceyte, "État, acteurs privés et innovation dans le domaine des matériaux de construction écologique : Le développement du béton de chanvre depuis 1986," Thèse de Master, Institut d'Études Politiques de Lyon, 2007, pp. 191.
- [2] C. Magniont, "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agrores sources," Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010, pp. 343.
- [3] M.A. BoukliHacène, N. E. C. Sari, and B. Benyoucef, "La construction écologique en Algérie Question de choix ou de Moyens ?" *Revue des Energies Renouvelables* vol.14, pp. 627 - 635, 2011.
- [4] T. T. Nguen, "Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre," Thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud, 2010, pp. 168.
- [5] C. Terrible, V. Vincent, and F. Florio, "Déchets du bâtiment et des travaux publics," dans le *Revue : Technique de l'ingénieur*, c5600, Août 2006.
- [6] "L'efficacité énergétique dans le bâtiment," *Portail Algérien des énergies renouvelables (articles 3746)*, 2014.
- [7] M. Dahli and R. Toubal, "Matériau isolant thermique à base de déchets ménagers et oléicoles," *Revue des Energies renouvelables*, vol. 13, pp. 339-346, 2010.
- [8] "Isolation thermique des bâtiments," *Portail Algérien des Energies Renouvelable*, 2012.
- [9] P. Meukam, "Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments," Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004 pp.157.
- [10] Dr. Mohammad S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Building and Environment*, vol. 40, pp. 353-366, 2005.

- [11] J.-P. Oliva, L'isolation écologique : conception, matériaux, mise en oeuvre : terre vivante, mens, france,2001,2007.
- [12] Aichaoui Saber, Cheggouri Abderrezak,"Contribution à l'étude des matériaux de construction aux bâtiments à basse consommation d'énergie dans les zones arides " Thèse de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 19.06.2019.
- [13] Isolation Thermique des Murs (2013) Isolation France.  
<https://www.isolationfrance.fr/isolation-thermique/isolation-thermique-murs>.
- [14] A. M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," Energy and Building, vol. 37, pp. 77-86, 2005.
- [15] MM. fragos and Trouillez, Le guide de l'isolation : Fine Media, Paris, 2012.  
[contacte@finemedia.fr](mailto:contacte@finemedia.fr).
- [16] L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, and I. Fernande.  
"Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction," Energy and Buildings, vol. 42, pp. 630–636, 2010.
- [17] M. Chikhi, "Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible cout pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires," Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2013, pp. 163.
- [18] P. Mukhopadhyaya, "Isolation thermique haute performance : toujours plus". Institut de recherche en construction du CNRC, pp. 1-6, juillet, 2010.
- [19] "Guide des matériaux isolants", Espace info : Energie C.A.U.E. de la HauteLoire,16 rue Jean Solvain, 43000 Le Puy En Velay. [www.eie43.fr](http://www.eie43.fr).
- [20] Brahim BELGAID, "Aide-mémoire de l'isolation thermique du bâtiment" Département d'architecture Université de Batna.

- [21] HOLLAERT Laurie, "Analyse de la rentabilité financière et des avantages liés à l'isolation thermique étude de cas adaptés au modèle belge", Mémoire de Master Université libre de Bruxelles 2014.
- [22] ABDUL AZIZ Jamil, " ISOLATION THERMIQUE ET EFFICACITE ENERGETIQUE" STPI P6 / 2017 – 39.
- [23] HAKKOUM Soumia, " Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de Ouargla " Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2015.
- [24] Finition Maison - Petits Travaux Maison.  
<https://www.ideesmaison.com/Construction/Petits-travaux-et-finitions>.
- [25] La Masse volumique - physique-chimie - 3E ASP.  
[https://www.assistancescolaire.com/eleve/3e/physique-chimie/reviser-une-notion/3\\_pc\\_03](https://www.assistancescolaire.com/eleve/3e/physique-chimie/reviser-une-notion/3_pc_03).
- [26] Volume 50 | number 6 September 2021 Heat Transfer - Wiley Online Library.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/htj.21806>.
- [27] R. Spotnitz et al. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells | J. Power Sour | (2003).
- [28] Admin (2022) Examples of conduction, convection, and radiation - modes of Heat Transfer & Videos, BYJUS. <https://byjus.com/chemistry/heat-transfer/>.
- [29] Yves Jannot, "Transfert de chaleur 1 : Conduction et convection ", Volume 1 Christian Moyne, Alain Degiovann.
- [30] A.-L. Beaucour, P. Pliya, F. Faleschini, R. Njinwoua, C. Pellegrino, A. Noumowé "Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate ", Construction and Building Materials, Volume 25, 2020 119385, ISSN 09500618.
- [31] "Cours de convection et rayonnement", Plate-forme TTE-C.E.S.I.R. E, Université Joseph Fourier Grenoble.

- [32] Convection currents vector illustration labeled diagram Vector Mine.  
<https://vectormine.com/item/convection-currents-vector-illustration-labeled-diagram>.
- [33] Maryait Khader, Mohammed M. Babatin, Ahmed M. Megahed,  
"Numerical Study of Thermal Radiation Phenomenon and Its Influence on Amelioration of the Heat Transfer Mechanism through MHD Non-Newtonian Casson Mode I", Feb 2022.
- [34] Team, P. (2022) Thermal radiation: Explanation, characteristics, examples PSIBERG. <https://psiberg.com/thermal-radiation>.
- [35] A. D. Tranle, "Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment", Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2010 pp. 221.
- [36] METRANE NOUREDDINE, "Contribution à l'étude du comportement d'un matériau composite à base de fibres de carbone pour la réalisation de prothèses orthopédiques (ONAAPH Annaba)", MEMOIRE MASTER, Université Annaba, 2018/2019.
- [37] Dr. Taqiyeddine MOUMENE, " Polycopie de Cours Les composites ", Master I Chimie des Matériaux ", Université Ibn Khaldoun- Tiaret.
- [38] j. Aucher, " Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable", Thèse de doctorat, France, INS de Rouen (2009).
- [39] L. GORNET, " Généralités sur les matériaux composites ", (Version 1 - 6), (2010).
- [40] HADBI ZINEB, "Etude du comportement mécanique du matériau composite des prothèses orthopédiques ", Mémoire master, juin 2018.
- [41] CARMA, "Glossaire des matériaux composite ", INSA de Rouen, France, (2009).

- [42] D. Azzedine, "Étude du comportement à la rupture du béton polymère renforcé par des fibres végétales ", Mémoire master, Université de M'sila, (2012, juin).
- [43] Mehidi Imanen, "Préparation d'une colle à base d'alcool polyvinylique destiné au collage du papier et du carton ondulé ", Mémoire master, Université de Mohammed Seddik Ben Yahia JIJEL, 2019.
- [44] HASSAINE Malik, "METALSI-TANI Zakaria, Utilisation des déchets textiles et carton dans l'isolation ", Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen  
30.09.2021.
- [45] Loucif Imane, " Etude De La Valorisation Des Déchets En Papiers Et Cartons Au Sein De Tonic Industrie ", Mémoire master, Université Mouloud Mameri Tizi Ouzou, 2015\2016.
- [46] Algérie, G. (2022) L'industrie du Recyclage Papier, GINIDEX ALGERIE.  
<https://ginidex.com/2021/07/07/lindustrie-du-recyclage-papier>.
- [47] RANDRIAMALALA Helifiononana Elodie, "Contribution à la valorisation des déchets papier- carton : paramétrage d'une machine à broyer pour l'obtention du liant papier", Mémoire d'ingénierie UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, Madagascar  
19.09.2014.
- [48] Leaving the lightest possible footprint (2021) European Tissue Symposium.  
<https://europeantissue.com/leaving-the-lightest-possible-footprint>.
- [49] Institut national de recherche et de sécurité | Fiche toxicologique n°282 | Fibres de cellulose Edition 2011.
- [50] Nick Serpone, Masahiro Yoshizawa-Fujita, Daisuke Sakemi, Yuhei Arai, Satoshi Yamazaki, Satoshi Horikoshi, " Synthesis of Recyclable Magnetic Cellulose Nanofibers from Ionic Liquids for Practical Applications in Separation Science ", Journal of Oleo Science, May 2021.
- [51] Negoudi Abdelhakim, Khinech Sayah, " Etude De Comportement Mécanique Des Composites Bi sources ", Université Kasdi Merbah OUARGLA, 08/06/2015.

- [52] Nadia Metidji, Mourad Chikhi and Rabah Sellami, " Valorization of paper waste by solar drying", *Journal Of Industrial Engineering Research*, 2018. 4(4): 15-21
- [53] Lisa VIDIL, "Etude de matériaux naturels 2D –Potentialités d'utilisation comme renfort de matériaux composites", Thèse pour le doctorat en chimie des matériaux, UNIVERSITE DES ANTILLES, Pointe-à-Pitre, 2019.
- [54] KONTTURI, E., TAMMELIN, T. & ÖSTERBERG, M, "Cellulose—model films and the fundamental approach", *Chemical Society Reviews* vol. 35, n°12, p. 1287- 1304, (2006)
- [55] MONTEIRO, S. N., CALADO, V., MARGEM, F. M. & RODRIGUEZ, R. J. S. "Thermogravimetric Stability Behavior of Less Common Lignocellulosic Fibers - a Review" *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 1, n°3, p. 189- 199, (2012).
- [56] OUAJAI, S. & SHANKS, R. A, "Biocomposites of Cellulose Acetate Butyrate with Modified Hemp Cellulose Fibres", *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 294, n°3, p. 213- 221, (2009).
- [57] YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D. H. & ZHENG, C, "Characteristics of hemi cellulose, cellulose and lignin pyrolysis", *Fuel*, vol. 86, n°12–13, p. 1781- 1788, (2007).
- [58] MELO, R. R. DE, SANTINI, E. J., HASELEIN, C. R. & STANGERLIN, D. M. "Proprieda des físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz", *Ciência Florestal*, vol. 19, n°4, p. 449- 460, (2009).
- [59] GAUTHIER, S., "Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3 $\omega$  phdthesis", Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, (2012).
- [60] KAWASAKI, T., ZHANG, M. & KAWAI, S., "Manufacture and properties of ultra-lowdensity fiberboard", *Journal of Wood Science*, vol. 44, n°5, p. 354- 360, (1998).
- [61] ZHOU, X., ZHENG, F., LI, H. & LU, C., "An environment-friendly thermal insulationmaterial from cotton stalk fibers", *Energy and Buildings*, vol. 42, n°7, p.

1070- 1074, (2010).

- [62] XU, J., SUGAWARA, R., WIDYORINI, R., HAN, G. & KAWAI, S., "Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core", *Journal of Wood Science*, vol. 50, n°1, p. 62- 67, (2004).
- [63] WEI, K., LV, C., CHEN, M., ZHOU, X., DAI, Z. & SHEN, D., "Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing", *Energy and Buildings*, vol. 87, p. 116- 122, (2015).
- [64] Touloum et al. / *J. Appl. Eng. Sci. Technol*, 2(2) : 57-63, (2016).
- [65] Chikhi, M, "Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible cout pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires". Thèse de doctorat en physique énergétique, l'université Hadj Lakhdar de Batna, (2013).
- [66] CRAVO, J. C. M., DE LUCCA SARTORI, D., MARMOL, G., DE CARVALHO BALIEIRO, J. C., DEOLIVEIRA MACHADO, G. & FIORELLI, J., "Manufacture of particleboard based on cement bag and castor oil polyurethane resin", *Construction and Building Materials*, vol. 87, p.8- 15, (2015).
- [67] KHEDARI, J., CHAROENVAI, S. & HIRUNLABH, J, "New insulating particleboards fromdurian peel and coconut coir", *Building and Environment*, vol. 38, n°3, p. 435- 441, (2003).
- [68] Nazi P., Heger F, "Comportement thermo-hydromécanique du bois : Applications technologiques et dans les structures", *Presses polytechniques universitaires romandes*, (2005).
- [69] Réglementation Acoustique : La Nouvelle Réglementation Tout sur l'isolation.  
<https://www.toutsurlisolation.com/reglementation-acoustique>
- [70] Acoustique, "Absorbants pour l'utilisation dans les bâtiments", *Évaluation de l'absorption acoustique*, ISO 11654. (1997).
- [71] E. Ouedraogo, O. Coulibaly, A. Ouedraogo, A. Messan "Caractérisation mécanique et thermo physique des blocs de terre comprimée stabilisée

au (cellulose) et/ou au ciment", JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES 2, 68–76,

(2015).

[72] MELO, R. R. & MENEZZI, C. H. S, " Influência da Massa Específica nas Propriedades Físico-Mecânicas de Painéis Aglomerados", Silva Lusitana, vol. 18, n°1, p.

59, (2010).

[73] TRNSYS, logiciel expert pour la simulation énergétique dynamique 100% flexibleBatiweb.

<https://www.batiweb.com/produit-btp/trnsys-logiciel-expert-pour-la-simulation-energetique-dynamique-100-flexible-343283>

[74] BENGHALIA Zakaria, "Etude de faisabilité d'un système PV-éolien-hydrogène pour l'alimentation d'un ensemble d'habitation climatique ", Mémoire Master. Université Blida1 2016-2017.