

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistre

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Licence professionnelle

Domaine : Sciences et technologies,
Filière : Energies renouvelables
Spécialité : Energies renouvelables et environnement

Thème

Evaluation du comportement thermique d'éco-
matériaux isolants

Présenté par :

ADJILA Anfal
BEN HEDID Chaima

Soutenue publiquement le : 20/05/2025

Devant le jury composé de :

CHERIF SALAH
BOUSDIRA KHALIDA
BOUKHARI HAMED

Maitre-assistant B
Maitre de recherche A
Maitre-assistant B

Université de Ghardaïa
URAER – Ghardaïa
Université de Ghardaïa

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, particulièrement :

- L'université de Ghardaïa.
- L'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables URAER(Ghardaïa).

Nos remerciements s'adressent tout d'abord au Directeur de l'unité de recherche appliquée en énergie renouvelables (URAER), pour nous avoir permis de réaliser notre stage au niveau de l'URAER (Ghardaïa).

Nous adressons également nos vifs et sincères remerciements à notre promotrice **Dr Khalida BOUSDIRA** pour son aide, sa gentillesse, sa patience ainsi que les orientations qu'elle nous a prodigué tout au long de ce travail.

Nous exprimons particulièrement nos remerciements au président de jury d'avoir accepté de présider notre soutenance. Notre profonde gratitude s'adresse également à l'ensemble des membres de jury pour l'intérêt porté à notre mémoire.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'ensemble de nos enseignants et responsables du projet de License professionnelle en énergie renouvelables auquel nous avons eu le privilège d'y bénéficier.

Enfin, nous remercions nos parents, nos familles et nos amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Résumé :

L'isolation thermique est essentielle face aux enjeux du changement climatique et à la hausse de la consommation énergétique. Bien que performants, les isolants traditionnels ont un impact écologique, ce qui motive la recherche de solutions plus durables comme les éco-matériaux, offrant une alternative respectueuse de l'environnement.

Ce mémoire met en avant l'importance de l'isolation thermique pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques. Il souligne l'impact écologique des isolants traditionnels et explore les éco-matériaux comme alternative durable. L'étude analyse leurs propriétés thermiques en comparant leur performance avec des matériaux conventionnels. Cette étude a révélé le pouvoir isolant optimale de deux matériaux écologiques constitué de biomasse locale mélangé séparément avec le sable. Ces résultats révèlent la performance thermique de ces éco-matériaux dans les constructions bioclimatiques dans les zones sahariennes.

Mots clé : éco-matériau isolant, déphasage, profil thermique

Abstract

Thermal insulation is essential in the face of climate change and rising energy consumption. Although effective, traditional insulation materials have an environmental impact, motivating the search for more sustainable solutions such as eco-materials, offering an environmentally friendly alternative.

This thesis highlights the importance of thermal insulation in addressing environmental and energy challenges. It underlines the ecological impact of traditional insulation materials and explores eco-materials as a sustainable alternative. The study analyzes their thermal properties by comparing their performance with conventional materials. This study revealed the optimal insulating power of two ecological materials consisting of local biomass mixed separately with sand. These results reveal the thermal performance of these eco-materials in bioclimatic construction in Saharan regions.

Keywords: eco-insulating material, phase shift, thermal profile

ملخص

يعد العزل الحراري ضروريًا في مواجهة تغير المناخ وارتفاع استهلاك الطاقة. على الرغم من كفاءتها، فإن مواد العزل التقليدية لها تأثير بيئي، مما يحفز البحث عن حلول أكثر استدامة مثل المواد البيئية، والتي تقدم بديلاً صديقاً للبيئة.

تسلط هذه الأطروحة الضوء على أهمية العزل الحراري في مواجهة التحديات البيئية والطاقة. ويسلط الضوء على التأثير البيئي للعزل التقليدي ويستكشف المواد البيئية كبديل مستدام. وتقوم الدراسة بتحليل خصائصها الحرارية من خلال مقارنة أدائها مع المواد التقليدية. كشفت هذه الدراسة عن القوة العازلة المثالية لمادتين بيئيتين تتكونان من الكتلة الحيوية المحلية المخلوطة بشكل منفصل مع الرمل. تكشف هذه النتائج عن الأداء الحراري لهذه المواد البيئية في البناء البيومناخي في المناطق الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: مادة عازلة بيئية، تحول الطور، المظهر الحراري

Table des matières

Remerciement.....	i
Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations :	xiv
Introduction générale :.....	1
Structure du mémoire :.....	1
Chapitre 1 : Transfert the chaleur	3
1. Introduction :.....	3
2. Notions fondamentales :	3
2.2. Champ de température :	4
2.3. Gradient de température :.....	4
2.4. Flux de chaleur :.....	5
2.5. Bilan énergétique :	5
2.6. Densité du flux thermique :.....	5
2.7. Conductivité thermique :.....	6
3. Modes de transfert thermique :	6
3.1. Transfert de chaleur par conduction :.....	6
3.2. Transfert thermique par convection :	8
3.3. Transfert thermique par rayonnement :.....	10
4. Analogie électrique :.....	11
5. Principe de fonctionnement et son rôle d'un échangeur de chaleur :	11
6. Conclusion :	12
7. Références bibliographiques	12

Chapitre 2 : Isolation Thermique	14
.1 Introduction :	14
2. Définition :	14
3. Consommation d'énergie :	15
3.1. Efficacité énergétique.....	15
3.2 Consommation d'énergie en Algérie	15
4. But de l'isolation thermique :	16
5. Techniques d'isolation thermique :	16
5.1 Isolation thermique par l'intérieur :	16
5.1 Isolation thermique par l'extérieur :.....	17
6. Différents types d'isolants :	18
6.1 Isolants minéraux :	18
6.2. Isolants synthétiques :	18
6.3. Isolants d'origine animale :	20
6.4. Les isolants végétaux :	21
6.5. Isolation nouvelle génération :	23
7. Caractéristiques des matériaux d'isolation thermique :	25
8. Avantages et inconvénients des isolants thermiques :	26
9. Propriétés et performances d'un matériau isolant :	26
9.1 Propriétés physiques :	27
9.2 Propriétés environnementales :	27
9.3. Propriétés de l'hygiène et de la santé :	27
10. Réglementation thermique :	27
10.1 Enjeux de la réglementation thermique.....	27
10.2 Réglementation thermique Algérienne :	27
10.3 Exigences thermiques pour les bâtiments neufs.....	28

.11 Conclusion :	28
12. Références bibliographiques	29
Chapitre 3 : Propriétés thermiques des isolants	31
1 Introduction :	31
2 Conductivité thermique (λ) :	31
2.1 Définition :	31
2.2 Classification des méthodes de mesure de λ :	32
2.3 Mesure de la conductivité thermique :	32
2.4 Méthode flash :	33
3 Effusivité thermique(b) :	34
3.1 Définition :	34
3.2 Mesure de l'effusivité thermique par méthode PLAN CHAUD :	35
4. Diffusivité thermique(α) :	35
4.1 Définition :	35
4.2 Méthodes de mesure de α :	36
4.3 Méthode flash :	36
5. Capacité thermique(c_p) :	37
5.1 Définition :	37
5.2 Méthodes de mesure de la capacité thermique :	37
6. Conclusion :	38
7. Références bibliographiques :	39
Conclusion générale	40
Contributions	40
Critique du travail	40
Travaux futurs de recherche	40
Perspective du domaine	41

Liste des figures

Chapitre1	
Figure 1.1: Les modes de transferts de chaleur[1].....	3
Figure 1.2: Isotherme et gradient thermique[3].....	4
Figure 1.3: Système et bilan énergétique[3].....	5
Figure 1.4: Transfert de chaleur par conduction[1].....	6
Figure 1.5: Sens du flux de chaleur travers une paroi[6].....	7
Figure 1.6: La distribution de la température dans une paroi cylindrique[6].....	8
Figure 1.7: Transfert thermique par convection[1].	9
Figure 1.8: Répartition du rayonnement solaire reçu par une surface[1].	10
Figure 1. 9 : Résistance thermique	11
Figure 1.10: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur[6]	12
Figure 2.11: Pertes de chaleur d'une maison construite avant 1974 [2].....	14
Figure 2.12: Consommation énergétique dans le secteur ménager en Algérie (Source : DGE, 2000, réadapté par auteur)[4]	16
Figure 2.13: Exemple sur l'isolation par intérieur[6]	16
Figure 2.14: Exemple sur l'isolation par extérieur[6]	17
Figure 2.15 : Exemple sur l'isolation intégrée[6].....	17
Figure 2.16 : Répartition du marché de l'isolation rapportée en France en 2011[2].....	18
Figure 2.17: Isolants d'origine minérale. (a)- laine de roche ; (b)- laine de verre ; (c)- argile expansée[7].....	18
Figure 2.18 : Isolants d'origine synthétique. (a)- polystyrène ; (b)- polyuréthane ; (c)- réflecteurs ; (d)- verre cellulaire[7]	19
Figure 2.19: Isolant d'origine animale. (a)- la laine de coton; (b)- plume de canard ; (c)- laine de mouton[7].....	20

Figure 2.20: la ouate de la cellulose. (a)- matériau brut (papier broyé et traité) ; (b)- panneaux fabriqués en ouate de cellulose[7]	21
Figure 2.21: le chanvre. (a)- plante du chanvre et coupe de son tronc ; (b)- chènevotte ; (c)- rouleau de la laine de chanvre[7]	22
Figure 2.22: Panneau de la fibre de bois[9]	22
Figure 2.23: Panneau de liège[2]	23
Figure 2.24: Types des Pailles[11]	23
Figure 2.25: Isolants nouvelle génération[2]	24
Figure 3.26 : Schéma expérimental permettant de mesure la diffusivité thermique[4]	33
Figure 3.27 : Thermogramme en face arrière en fonction du temps[4]	34
Figure 3.28 : Schéma de la méthode Plan Chaud[5]	35
Figure 3.29 : Schéma de la méthode Flash[5]	37
 Chapitre2	
Figure 1.1: Les modes de transferts de chaleur[1]	3
Figure 1.2: Isotherme et gradient thermique[3]	4
Figure 1.3: Système et bilan énergétique[3]	5
Figure 1.4: Transfert de chaleur par conduction[1]	6
Figure 1.5: Sens du flux de chaleur travers une paroi[6]	7
Figure 1.6: La distribution de la température dans une paroi cylindrique[6]	8
Figure 1.7: Transfert thermique par convection[1].	9
Figure 1.8: Répartition du rayonnement solaire reçu par une surface[1].	10
Figure 1. 9 : Résistance thermique	11
Figure 1.10: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur[6]	12
Figure 2.1: Pertes de chaleur d'une maison construite avant 1974 [2]	14
Figure 2.2: Consommation énergétique dans le secteur ménager en Algérie (Source : DGE, 2000, réadapté par auteur)[4]	16
Figure 2.3: Exemple sur l'isolation par intérieur[6]	16

Figure 2.4: Exemple sur l'isolation par extérieur[6]	17
Figure 2.5 : Exemple sur l'isolation intégrée[6].....	17
Figure 2.6 : Répartition du marché de l'isolation rapportée en France en 2011[2].....	18
Figure 2.7: Isolants d'origine minérale. (a)- laine de roche ; (b)- laine de verre ; (c)- argile expansée[7].....	18
Figure 2.8 : Isolants d'origine synthétique. (a)- polystyrène ; (b)- polyuréthane ; (c)- réflecteurs ; (d)- verre cellulaire[7]	19
Figure 2.9: Isolant d'origine animale. (a)- la laine de coton; (b)- plume de canard ; (c)- laine de mouton[7]	20
Figure 2.10: la ouate de la cellulose. (a)- matériau brut (papier broyé et traité) ; (b)- panneaux fabriqués en ouate de cellulose[7]	21
Figure 2.11: le chanvre. (a)- plante du chanvre et coupe de son tronc ; (b)- chènevotte ; (c)- rouleau de la laine de chanvre[7]	22
Figure 2.12: Panneau de la fibre de bois[9].....	22
Figure 2.13: Panneau de liège[2]	23
Figure 2.14: Types des Pailles[11]	23
Figure 2.15: Isolants nouvelle génération[2]	24
Figure 3.1 : Schéma expérimental permettant de mesure la diffusivité thermique[4]	33
Figure 3.2 : Thermogramme en face arrière en fonction du temps[4].....	34
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Plan Chaud[5]	35
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Flash[5]	37
 Chapitre 3	
Figure 3.1 : Schéma expérimental permettant de mesure la diffusivité thermique[4]	32
Figure 3.2 : Thermogramme en face arrière en fonction du temps[4].....	33
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Plan Chaud[5]	34
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Flash[5]	36

Chapitre 4

Figure 1.1: Les modes de transferts de chaleur[1].....	3
Figure 1.2: Isotherme et gradient thermique[3].....	4
Figure 1.3: Système et bilan énergétique[3].....	5
Figure 1.4: Transfert de chaleur par conduction[1].....	6
Figure 1.5: Sens du flux de chaleur travers une paroi[6].....	7
Figure 1.6: La distribution de la température dans une paroi cylindrique[6].....	8
Figure 1.7: Transfert thermique par convection[1].	9
Figure 1.8: Répartition du rayonnement solaire reçu par une surface[1].	10
Figure 1.9 : Résistance thermique	11
Figure 1.10: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur[6]	12
Figure 2.1: Pertes de chaleur d'une maison construite avant 1974 [2].....	14
Figure 2.2: Consommation énergétique dans le secteur ménager en Algérie (Source : DGE, 2000, réadapté par auteur)[4]	16
Figure 2.3: Exemple sur l'isolation par intérieur[6]	16
Figure 2.4: Exemple sur l'isolation par extérieur[6]	17
Figure 2.5 : Exemple sur l'isolation intégrée[6].....	17
Figure 2.6 : Répartition du marché de l'isolation rapportée en France en 2011[2].....	18
Figure 2.7: Isolants d'origine minérale. (a)- laine de roche ; (b)- laine de verre ; (c)- argile expansée[7].....	18
Figure 2.8 : Isolants d'origine synthétique. (a)- polystyrène ; (b)- polyuréthane ; (c)- réflecteurs ; (d)- verre cellulaire[7]	19
Figure 2.9: Isolant d'origine animale. (a)- la laine de coton; (b)- plume de canard ; (c)- laine de mouton[7]	20
Figure 2.10: la ouate de la cellulose. (a)- matériau brut (papier broyé et traité) ; (b)- panneaux fabriqués en ouate de cellulose[7]	21
Figure 2.11: le chanvre. (a)- plante du chanvre et coupe de son tronc ; (b)- chènevotte ; (c)- rouleau de la laine de chanvre[7]	22

Figure 2.12: Panneau de la fibre de bois[9].....	22
Figure 2.13: Panneau de liège[2].....	23
Figure 2.14: Types des Pailles[11].....	23
Figure 2.15: Isolants nouvelle génération[2].....	24
Figure 3.1 : Schéma expérimental permettant de mesure la diffusivité thermique[4]	33
Figure 3.2 : Thermogramme en face arrière en fonction du temps[4].....	34
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Plan Chaud[5]	35
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Flash[5]	37
Chapitre 5	
Figure 1.1: Les modes de transferts de chaleur[1].....	3
Figure 1.2: Isotherme et gradient thermique[3].....	4
Figure 1.3: Système et bilan énergétique[3].....	5
Figure 1.4: Transfert de chaleur par conduction[1].....	6
Figure 1.5: Sens du flux de chaleur travers une paroi[6].....	7
Figure 1.6: La distribution de la température dans une paroi cylindrique[6]	8
Figure 1.7: Transfert thermique par convection[1].	9
Figure 1.8: Répartition du rayonnement solaire reçu par une surface[1].	10
Figure 1. 9 : Résistance thermique	11
Figure 1.10: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur[6]	12
Figure 2.1: Pertes de chaleur d'une maison construite avant 1974 [2].....	14
Figure 2.2: Consommation énergétique dans le secteur ménager en Algérie (Source : DGE, 2000, réadapté par auteur)[4]	16
Figure 2.3: Exemple sur l'isolation par intérieur[6]	16
Figure 2.4: Exemple sur l'isolation par extérieur[6]	17
Figure 2.5 : Exemple sur l'isolation intégrée[6].....	17

Figure 2.6 : Répartition du marché de l'isolation rapportée en France en 2011[2].....	18
Figure 2.7: Isolants d'origine minérale. (a)- laine de roche ; (b)- laine de verre ; (c)- argile expansée[7].....	18
Figure 2.8 : Isolants d'origine synthétique. (a)- polystyrène ; (b)- polyuréthane ; (c)- réflecteurs ; (d)- verre cellulaire[7]	19
Figure 2.9: Isolant d'origine animale. (a)- la laine de coton; (b)- plume de canard ; (c)- laine de mouton[7]	20
Figure 2.10: la ouate de la cellulose. (a)- matériau brut (papier broyé et traité) ; (b)- panneaux fabriqués en ouate de cellulose[7]	21
Figure 2.11: le chanvre. (a)- plante du chanvre et coupe de son tronc ; (b)- chènevotte ; (c)- rouleau de la laine de chanvre[7]	22
Figure 2.12: Panneau de la fibre de bois[9].....	22
Figure 2.13: Panneau de liège[2]	23
Figure 2.14: Types des Pailles[11]	23
Figure 2.15: Isolants nouvelle génération[2]	24
Figure 3.1 : Schéma expérimental permettant de mesurer la diffusivité thermique[4]	33
Figure 3.2 : Thermogramme en face arrière en fonction du temps[4].....	34
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Plan Chaud[5]	35
Figure 3.3 : Schéma de la méthode Flash[5]	37

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1:Caractéristiques des isolants thermiques[7].	25
Tableau 2.2:Avantages et inconvénients des isolants thermiques[7].	26

Liste des abréviations :

b	Effusivité thermique ($J \cdot K^{-1} \cdot m^2 \cdot s^{-1/2}$)
BG	Matériau biosourcé et géosourcé
C	Chaleur spécifique ($J/Kg.K$)
cp	la capacité thermique massique c ($J \cdot Kg^{-1}$)
D	Déphasage
d2	Temps enregistré pour atteindre la température maximale au niveau de la face de l'échantillon non irradiée par la source de chaleur
d3	Temps enregistré pour atteindre la température maximale au niveau de la face de l'échantillon irradiée par la source de chaleur
dS	Surface d'échange élémentaire (m^2)
dt	Intervalle de temps élémentaire(s)
DTR	Document Technique Réglementaire
DU	Différence de potentiel (V)
e	Epaisseur du mur(m)
h	Coefficient d'échange par convection ($W/m^2.K$)
I	Intensité du courant (A)
Q	Quantité de chaleur (J)
R	Résistance thermique (K/W)
rc	Résistance thermique de conduction
rv	Résistance thermique de convection (K/W)
S	Section transversale de mur (m)
S	Surface (m^2)
t	temps (s)
T	Température ($^{\circ}C$)
T1	Température ambiante à l'intérieur de la boîte ($^{\circ}C$)
T2	Température de la face d'échantillon non irradiée par la source de chaleur ($^{\circ}C$)
T3	Température de la face d'échantillon irradiée par la source de chaleur ($^{\circ}C$)
α	Diffusivité thermique ($m^2 \cdot s^{-1}$)
ΔT	Changement de température subi par l'objet ou le système ($^{\circ}C$)
ΔT	Différence entre la température maximale atteinte et la température de départ
$\Delta \theta$	Ecart de température entre deux surfaces (K)
λ	Conductivité thermique ($W/m.K$)
ρ	la masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$)
Φ	Flux thermique (W)

Introduction générale :

Face aux défis liés aux changements climatiques et à la consommation croissante d'énergie, l'importance de l'isolation thermique est de plus en plus reconnue. Les matériaux isolants traditionnels, bien que performants, présentent souvent des impacts environnementaux significatifs[1]. L'émergence des éco-matériaux propose une solution écologique, offrant des alternatives durables aux matériaux conventionnels. Leur évaluation thermique est essentielle pour garantir leur efficacité et leur intégration dans des applications variées, notamment dans le domaine de la construction et de l'efficacité énergétique[2].

Ainsi, notre mémoire se propose à l'étude du comportement thermique d'éco-matériaux isolants qui exige une évaluation rigoureuse et précise afin de confirmer leur pertinence. Pour ce faire Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants :

1. Analyser les caractéristiques thermiques des éco-matériaux isolants sélectionnés.
2. Tester les performances d'un prototype développé pour l'évaluation du comportement thermiques des matériaux étudiés à travers la détermination de quelques caractéristiques thermophysiques.
3. Comparer ces propriétés avec ceux des matériaux isolants conventionnels afin de déterminer leurs avantages potentiels.

Pour répondre aux objectifs précédents, l'approche méthodologique détaillée se base tout d'abord sur la conception de matériaux écologiques isolants. Les éco-matériaux isolants ainsi préparés sont soumis à une impulsion thermique de courte durée à flux constant afin de constater l'évolution de leur comportement thermique. Ce prototype a été développé par une équipe de recherche de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelable URAER – Ghardaïa.

Les résultats de cette étude permettront d'évaluer l'efficacité thermique de l'éco-matériau et sa stabilité dans des conditions variées. Par ailleurs, cette étude permettrait également l'évaluation de la performance thermique du prototype utilisé par la détermination du déphasage des matériaux choisis. Ils fourniront également une base pour des recommandations futures sur l'utilisation de ce type de matériau[3].

Structure du mémoire :

Ce mémoire est organisé comme suit :

Chapitre 1 : Transfert de chaleur comprend des notions fondamentales sur les modes de transfert de chaleur.

Chapitre 2 : Isolation Thermique comprend des notions générales sur l'isolation, la réglementation thermique, la classification des isolants.

Chapitre 3 : Propriétés thermiques présente les principales propriétés thermiques des isolants ainsi que les méthodes de mesure correspondantes.

Références bibliographiques

- [1] L. Soudani, G. Garnier, M. Cosnier, N. Place, et E. Gourlay, « Projet ADEME ACLI-BIO: Etude du vieillissement d'isolants biosourcés dans une perspective de changement climatique », 2022.
- [2] Ouarab Yanis Mehdi, Bellal Nabil « Etude et réalisation d'un isolant à base de matériaux biosourcés».
- [3] M. B. Hafidha et M. T. Hayet, « Elaboration d'un éco-matériau de construction à base des isolants recyclés ».

Chapitre 1 : Transfert the chaleur

1. Introduction :

La thermodynamique évalue l'énergie échangée par un système pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique, ou thermocinétique, décrit l'évolution des grandeurs du système, comme la température, entre les états d'équilibre initial et final en fonction des variables spatiales et temporelles.

La chaleur, mode de transfert d'énergie, se déclenche par une différence de température et, selon le troisième principe de la thermodynamique, se transfère spontanément du chaud vers le froid jusqu'à l'équilibre thermique. L'unité de mesure de la chaleur est le joule, mais la calorie est aussi couramment utilisée.

Le transfert de chaleur, présent dans divers secteurs et phénomènes quotidiens, nécessite la connaissance des lois physiques pour orienter les échanges thermiques selon les besoins[1].



Figure 1.1: Les modes de transferts de chaleur[1]

2. Notions fondamentales :

Nous allons tout d'abord définir les principales grandeurs qui interviennent dans la résolution d'un problème de transfert thermique[2].

2.1. Transfert thermique :

Le transfert de chaleur, ou transfert de chaleur, entre deux objets est provoqué par la différence de température entre eux. Ce phénomène est représenté par le troisième principe de la

thermodynamique qui, comme mentionné ci-dessus, stipule que la chaleur se propage du chaud au froid entre deux objets en contact jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint [1].

Dans un phénomène donné, il existe trois modes de transfert de chaleur, qui peuvent exister individuellement ou simultanément (cf. figure.1.1) :

- Conduction ou diffusion thermique.
- Rayonnement thermique.
- Convection.

2.2. Champ de température :

Le transfert d'énergie est déterminé par l'évolution de la température dans l'espace et dans le temps : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est une quantité scalaire, appelée champ de température. Nous distinguerons deux cas [3]:

- Champ de température indépendant du temps : Cet état est considéré comme permanent ou stationnaire.

- Evolution du champ de température dans le temps : cet état est considéré comme variable, instable ou transitoire.

2.3. Gradient de température :

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme (cf. figure.1.2). La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température [3]:

$$\overline{grad}(T) = n^{\vec{}} \frac{\partial t}{\partial n} \tag{1}$$

Avec :

$n^{\vec{}}$: Vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial t}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

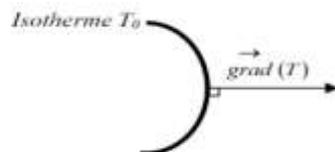


Figure 1.2: Isotherme et gradient thermique [3]

2.4. Flux de chaleur :

La chaleur circule sous l'influence de gradients de température allant des températures élevées aux températures basses. La chaleur transférée par unité de temps et par unité de surface d'une surface isotherme est appelée densité de flux thermique ϕ (W.m²)[3].

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

Où S est l'aire de la surface (m²).

On appelle flux de chaleur ϕ (W) la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

2.5. Bilan énergétique :

La détermination du champ de température implique d'écrire un (ou plusieurs) bilans énergétiques. Il faut d'abord définir le système (S) par ses limitations spatiales, puis établir un inventaire des différents flux de chaleur qui affectent l'état de ce système, comme le montre la figure 1.3 [3].

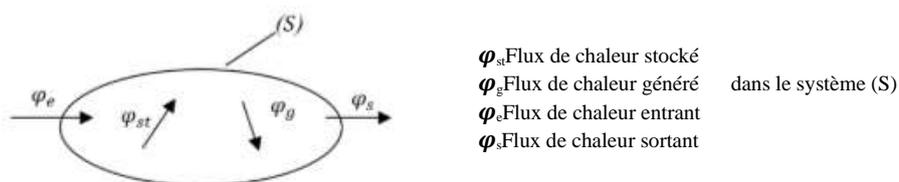


Figure 1.3: Système et bilan énergétique[3]

On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S):

$$\phi_e + \phi_g = \phi_s + \phi_{st} \quad (4)$$

2.6. Densité du flux thermique :

La densité de flux thermique ϕ correspond au flux thermique par unité de surface. Nous utilisons la densité car le flux de chaleur n'est pas uniforme sur toute la surface[3].

2.7. Conductivité thermique :

La conductivité thermique d'un matériau décrit sa capacité à transférer de la chaleur sans déplacer le matériau. C'est la quantité de chaleur, mesurée en joule, transférée à travers une épaisseur de 1 m dans un solide en raison d'une différence de 1 degré (K ou °C)[1].

Un matériau est considéré comme isolant thermique si sa conductivité thermique est inférieure à $0,06 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

En revanche, si la conductivité thermique du matériau est supérieure à $10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

3. Modes de transfert thermique :

Le transfert thermique est un processus complexe qui est réalisé par la superposition des trois modes fondamentaux : conduction, convection et rayonnement. Dans le cas où l'un de ces trois modes est déterminant, les effets des autres sont peu importants ; aussi ils peuvent être négligés, simplifiant considérablement l'analyse du cas concerné. En tenant compte de ces conditions, on va présenter ensuite le mécanisme d'apparition de chacun de ces modes [4]:

3.1. Transfert de chaleur par conduction :

La conduction est le transfert de chaleur sans mouvement de matière et constitue le seul mode de transfert de chaleur au sein des solides.

La capacité à diriger la chaleur est définie par la conductivité thermique et la différence de température. La conduction s'effectue des zones chaudes vers les zones froides(cf. figure 1.4 et 1.5) [5].

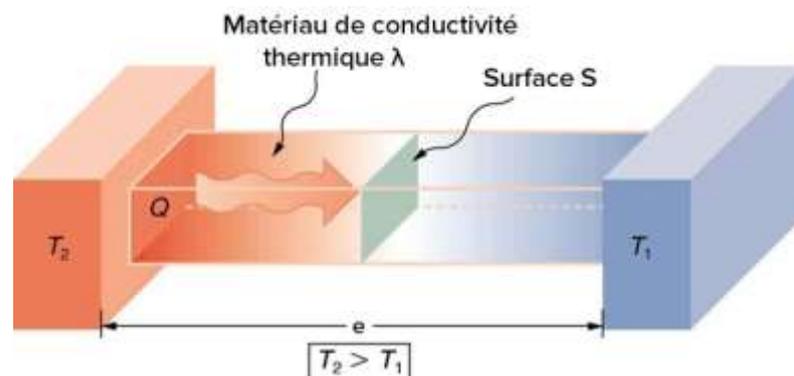


Figure 1.4: Transfert de chaleur par conduction[1]

3.1.1 La loi de Fourier (1807) décrit le phénomène de conductivité thermique, c'est-à-dire la description de la diffusion de la chaleur à travers un matériau solide. Fourier a découvert que

le flux de chaleur qui traverse un matériau d'une face 1 à une face 2 est toujours proportionnel à l'écart de température entre les deux faces[6].

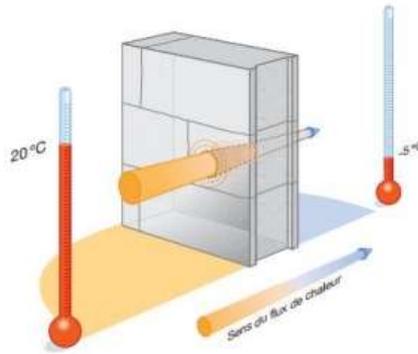


Figure 1.5: Sens du flux de chaleur travers une paroi[6]

L'équation de la loi de Fourier s'écrit de la manière suivante :

$$\Phi = -k A \overline{\text{grad}T} \quad (5)$$

Cas d'une paroi verticale : le gradient de température au point x considéré, c'est-à-dire la variation de la température T par unité de longueur dans la direction x .

Le gradient de température s'écrit de la manière suivante :

$$\overline{\text{grad}T} = \frac{(T+dT)-T}{(x+dx)-x} = \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Donc :

$$\Phi = -K \cdot A \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

Cas d'une paroi cylindrique : le gradient de température au rayon r considéré, est la variation de la température T par unité de rayon r (cf. figure 1.6)[6].

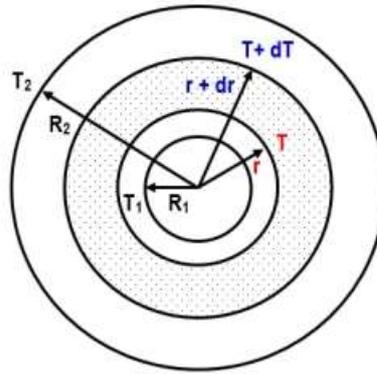


Figure 1.6: La distribution de la température dans une paroi cylindrique[6]

Le gradient de température s'écrit de la manière suivante :

$$\overline{\text{grad}T} = \frac{(T+dT)-T}{(r+dr)-r} = \frac{dT}{dr} \tag{8}$$

Pour déterminer la loi d'évolution de la température, on part de nouveau de la loi de Fourier :

$$\Phi = -\lambda A \frac{dT}{dr} \tag{9}$$

Donc :

$$\Phi = 2\lambda\pi L \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \tag{10}$$

3.2. Transfert thermique par convection :

Ce mode de transfert est propre aux fluides car il s'accompagne d'un transfert de masse, leur donnant une plus grande liberté de mouvement grâce au vide qui sépare les particules du fluide.

L'étude du transfert de chaleur par convection détermine principalement l'échange thermique qui se produit entre un fluide et une paroi. Selon le mécanisme générant le mouvement fluide, on distingue(cf. figure 1.7)[1]:

3.2.1. Convection naturelle (libre):

La différence de température entre le fluide et la paroi entraîne une diminution ou une augmentation de la densité, entraînant un mouvement cyclique du fluide.

3.2.2. Convection forcée : le mouvement est imposé par des agents extérieurs (pompes, ventilateurs, etc.)

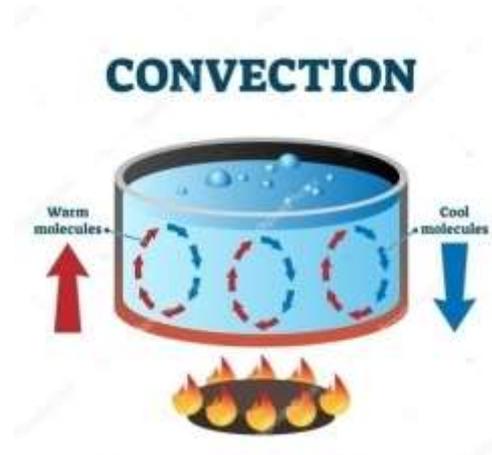


Figure 1.7: Transfert thermique par convection[1].

3.2.3. Résistance thermique de convection :

La résistance thermique de convection d'un élément exprime sa résistance thermique au passage d'un flux de chaleur d'origine convective à travers une surface. Elle s'exprime en (K/W).

La résistance thermique de convection pour 1m² de surface est donnée par la relation[6]:

$$r_v = \frac{1}{h} \quad (11)$$

h étant le coefficient d'échange de chaleur par convection ($W/m^2 \cdot K$)

La quantité de chaleur qui traverse un élément dS pendant l'intervalle de temps dt s'écrit :

$$\delta = h \cdot dS \cdot Dt \quad (12)$$

Quel que soit le régime d'écoulement du fluide et le type de convection, le flux de chaleur est donné par la loi de Newton :

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot (T_P - T_\infty) \cdot dS \quad (13)$$

Où :

$(T_P - T_\infty)$: est la différence de températures entre le corps solide ou paroi et le fluide (K).

dS : surface d'échange élémentaire (m^2).

Le coefficient h dépend de nombreux paramètres :

- Caractéristiques du fluide.

- Nature de l'écoulement.
- La température.
- La forme de la surface d'échange

3.3. Transfert thermique par rayonnement :

Le transfert de chaleur par rayonnement correspond à l'énergie du champ électromagnétique aux longueurs d'onde du rayonnement thermique. Ce type d'énergie et son interaction avec la matière nécessitent l'introduction de nouvelles quantités monochromatiques, en particulier pour les caractéristiques radiatives de la matrice solide [7].

Par exemple : En été, le fort rayonnement du soleil chauffe les surfaces exposées comme les murs, les terrasses, les vitres, chaque corps a une capacité d'absorption différente (cf. figure 1.8).

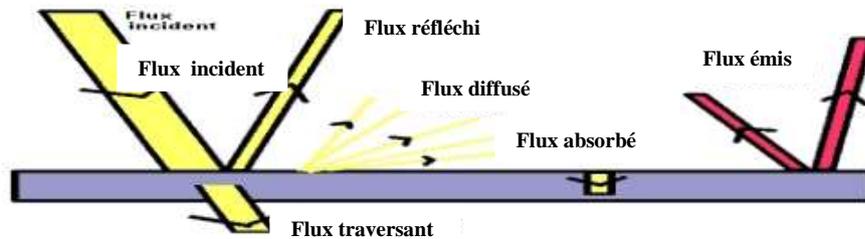


Figure 1.8: Répartition du rayonnement solaire reçu par une surface[1].

L'équation de base utilisée pour calculer le transfert de chaleur par rayonnement est :

$$\Phi = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \tag{14}$$

Avec :

$$\sigma = 5,670 3 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4} \tag{15}$$

3.3.1. Structure du rayonnement :

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques suivant le processus :

- Émission : Conversion de l'énergie fournie à une source en énergie électromagnétique.
- Transmission : La transmission de l'énergie électromagnétique s'effectue par la propagation d'ondes dont une partie est absorbée par le milieu qu'elle traverse.

- Réception : Lors de la réception, il y a la conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique ou absorption. En effet, les photons atteignant le matériau excitent les électrons, qui se recombinent avec les trous en dissipant la chaleur[1].

4. Analogie électrique :

La puissance thermique Φ peut également s'écrire[8]:

$$\Phi = \lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x} \Leftrightarrow \Phi = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{\lambda S}} \quad (16)$$

Cette relation est similaire à la loi d'Ohm en électricité, qui définit l'intensité du courant comme le rapport entre la différence de potentiel et la résistance.

$$I = \frac{V}{R} \quad (17)$$

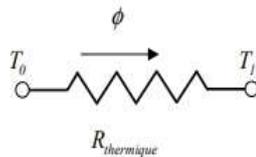


Figure 1. 9 : Résistance thermique

On peut noter qu'il existe une analogie mathématique directe entre la conduction thermique (loi de Fourier) et la conduction électrique (loi d'Ohm). La résistance analogue dans la loi de Fourier est appelée **résistance thermique**, représentée par (R_{th}) et définie comme :

$$R_{th} = \frac{\Delta x}{\lambda S} \quad (18)$$

5. Principe de fonctionnement et son rôle d'un échangeur de chaleur :

Le principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur est défini par la circulation de deux fluides (chaud et froid) dans des canalisations qui les mettent en contact thermique à travers des parois, généralement métalliques. D'une manière générale, ce qui facilite l'échange entre eux, c'est le transfert de chaleur du fluide chaud vers le fluide froid.

La difficulté réside dans la définition de surfaces d'échange suffisantes entre les deux fluides pour transférer une quantité de chaleur donnée. Cette dernière dépend non seulement de la surface mais également de la température d'entrée, des propriétés thermiques (chaleur spécifique, conductivité thermique) et du coefficient d'échange convection (cf. figure 1.10) [6].

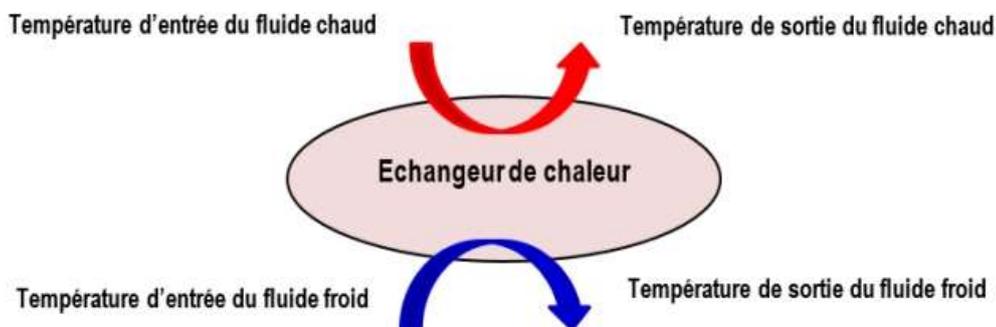


Figure 1.10: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur[6]

6. Conclusion :

Le transfert de chaleur est un phénomène fondamental en thermodynamique, influençant de nombreux processus naturels et industriels. Ce chapitre a permis de comprendre telles que le champ et le gradient de température, le flux de chaleur et le bilan énergétique. La densité du flux thermique et la conductivité thermique sont des paramètres clés pour quantifier et optimiser les échanges de chaleur.

Les trois modes de transfert thermique – conduction, convection et rayonnement – ont été détaillés, chacun ayant ses propres principes et applications. La conduction implique la transmission de chaleur à travers un matériau, la convection repose sur le mouvement des fluides, et le rayonnement permet un échange thermique sans contact direct.

Enfin, le principe de fonctionnement des échangeurs de chaleur a été abordé, soulignant leur rôle crucial dans les systèmes industriels et domestiques. Ces dispositifs permettent de maximiser l'efficacité énergétique en facilitant le transfert thermique entre différents fluides ou surfaces.

Ce chapitre constitue une base solide pour approfondir l'étude des transferts thermiques et leur application dans divers domaines scientifiques et techniques.

7. Références bibliographiques

[1] « Etude Numérique des performances des matériaux isolants dans le bâtiment (régime permanent) sous conditions de températures réelles de Constantine ».

- [2] D. Jannot, Yves Alain, *Mesure des propriétés thermiques des matériaux: 2e édition revue et augmentée*.
- [3] Y. Jannot, *TRANSFERTS THERMIQUES*. 2012.
- [4] A.-M. Bianchi, Y. Fautrelle, et J. Etay, *Transferts thermiques*. 2004.
- [5] N. HARCH, « Etude comparative sur les caractéristique thermiques de matériaux de construction ».
- [6] A. Asmaâ et A. Sara, « Effets du nombre de spire sur l'amélioration du transfert thermique dans l'échangeur de chaleur à tube hélicoïdal », université Ibn Khaldoun, 2024.
- [7] C. Langlais, « Isolation thermique à température ambiante. Bases physiques ».
- [8] Salah Eddine REBHI « Production De La Chaleur A Des Températures Variées Par Les Echangeurs Tubulaires Coaxiaux ».
- [9] NEBBALI Rezki, KECILI Idir « Etude paramétrique d'un chauffe- eau solaire plan ».

Chapitre 2 : Isolation Thermique

1. Introduction :

Le climat des zones désertiques est caractérisé par des températures élevées qui atteignent parfois de grandes quantités de chaleur dans le pays, ce qui nécessite de consommer une grande quantité d'énergie électrique pour la climatisation en été et le chauffage en hiver.

Pour réduire la consommation d'énergie, il est nécessaire d'utiliser une isolation thermique dans le plafond et les murs pour réduire le transfert de chaleur et les fuites à l'intérieur du bâtiment (cf. figure 2.1). Ce chapitre est basé sur l'étude des matériaux d'isolation thermique dans les bâtiments, et leur rôle dans la réduction de la consommation d'énergie électrique nécessaire pour fournir le niveau de confort approprié à l'individu. Ce chapitre explore les différentes facettes de l'isolation thermique, y compris ses définitions, ses avantages, ses inconvénients, les types de matériaux isolants, ainsi que les propriétés et critères de choix des isolants.

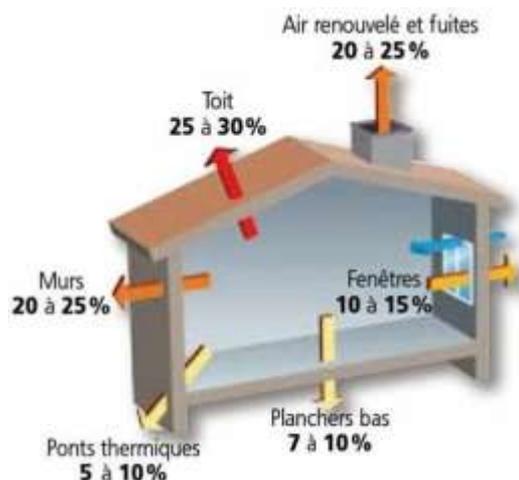


Figure 2.11: Pertes de chaleur d'une maison construite avant 1974 [2]

2. Définition :

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre environnements chauds et froids. L'isolation thermique est utilisée dans des domaines variés (bâtiment, industrie, automobile...).

L'isolation d'un bâtiment réduit les échanges thermiques entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur, réduisant ainsi les besoins en chauffage et en climatisation (le cas

échéant). Il s'agit principalement de l'isolation des murs extérieurs, des toitures et des rez-de-chaussée ; différentes techniques de mise en œuvre sont utilisées pour chaque situation[1].

3. Consommation d'énergie :

Les économies d'énergie sont devenues un objectif stratégique dans le monde entier, qui permettra de protéger l'environnement et de conserver les ressources naturelles. La consommation d'énergie dans les bâtiments pour le chauffage et la climatisation est considérée comme l'une des principales sources de consommation d'énergie dans de nombreux pays. Par conséquent, on cherche en permanence des alternatives appropriées pour préserver l'énergie et minimiser sa perte.

Par la suite, les isolants thermiques, qui font partie des matériaux de construction, gagnent de plus en plus d'importance en tant que moyen d'économiser l'énergie [3].

3.1. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique des bâtiments passe par une bonne conception architecturale, un traitement adapté de l'enveloppe et du renouvellement d'air, ainsi qu'une bonne gestion du bâtiment (ouverture/fermeture des stores, températures de consigne adaptées, etc.)[4].

3.2 Consommation d'énergie en Algérie

La consommation d'énergie en Algérie est caractérisée par les éléments suivants (cf. figure 2.2) :

- Multiplication de la consommation : La consommation globale d'énergie en Algérie a été multipliée par quatre entre les années 1980 et 2000.
- Vecteurs d'énergie : Électricité, gaz naturel, fuel, charbon, bois et piles électriques.
- Usages domestiques :
 - Chauffage : 60 % de l'énergie domestique.
 - Éclairage, électroménager, audiovisuel, climatisation : 20 %.
 - Eau chaude sanitaire : 15 %.
 - Cuisson : 5 %.
- Évolution de la consommation par habitant : De 0.48 TEP en 1990 à 1.88 TEP en 2020.
- Demande pour le secteur habitat : Forte demande pour le chauffage en hiver et la climatisation en été[4].

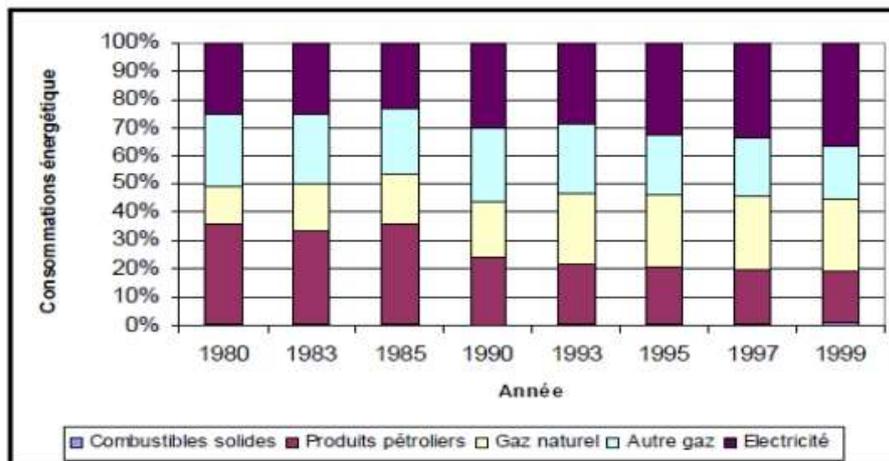


Figure 2.12: Consommation énergétique dans le secteur ménager en Algérie (Source : DGE, 2000, réadapté par auteur)[4]

4. But de l’isolation thermique :

L'isolation thermique est utilisée pour[5]:

- Réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments
- Assurer le confort des vêtements
- L’isolation phonique
- Réduire les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment

5. Techniques d’isolation thermique :

5.1 Isolation thermique par l’intérieur :

L'isolation thermique par l'intérieur améliore la performance énergétique des murs, toitures (combles perdus et habitables) et planchers. Les isolants, installés en plaques à l'intérieur des murs, sont faciles à poser et moins coûteux que l'isolation extérieure (cf. figure 2.3). Des matériaux comme la laine minérale, performante et économique, sont couramment utilisés. Cette méthode est idéale pour les rénovations et le renforcement de l'isolation, bien qu'elle puisse réduire l'espace de vie[6].



Figure 2.13: Exemple sur l’isolation par intérieur[6]

5.1 Isolation thermique par l'extérieur :

L'isolation thermique par l'extérieur est utilisée pour isoler les toits, les combles et les murs, bien qu'elle soit plus coûteuse et nécessite des travaux conséquents. Elle est particulièrement recommandée lors de la réfection des toitures ou des ravalements de façades. Son principal avantage est qu'elle enveloppe le bâtiment, éliminant ainsi les ponts thermiques linéiques, notamment autour des portes, fenêtres et balcons. Une large gamme d'isolants est disponible, allant de matériaux économiques comme la laine de verre et la laine de roche, à des options plus coûteuses comme les panneaux isolants sous vide (PIV) et le verre cellulaire[6](cf. figure 2.4).



Figure 2.14: Exemple sur l'isolation par extérieur[6]

L'isolation intégrée concerne l'isolation des murs dans leur épaisseur et s'applique principalement aux nouvelles constructions dès le début des travaux ou lors de rénovations importantes, comme une extension ou une surélévation. Cette méthode permet de gagner du temps et de réduire les coûts. Parmi ses avantages, elle limite les risques de ponts thermiques et représente une solution durable puisque l'isolant n'est pas exposé aux agressions externes. Elle bénéficie ainsi de la même durée de vie que les murs porteurs(cf. figure 2.5)[6].



Figure 2.15 : Exemple sur l'isolation intégrée[6].

6. Différents types d'isolants :

Il existe une variété d'isolants thermiques utilisés dans les divers domaines. Ils se classifient selon leurs origines comme suit (cf. figure 2.6) :

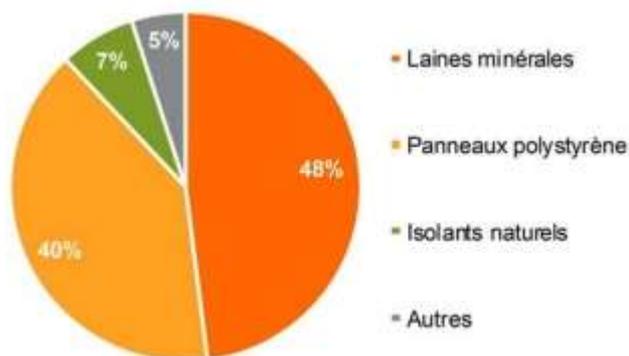


Figure 2.16 : Répartition du marché de l'isolation rapportée en France en 2011[2]

6.1 Isolants minéraux :

Les isolants entrant dans cette catégorie sont constitués de matériaux minéraux. La laine de verre, la laine de roche sont les isolants les plus couramment utilisés aujourd'hui. Ce sont des fibres synthétiques de la famille des silicates. Ils possèdent de bonnes propriétés isolantes, mais leur durabilité dans le temps est loin d'être exceptionnelle. D'un point de vue environnemental, leurs coûts énergétiques sont élevés. Dans la même catégorie se trouvent également les argiles expansées ; il s'agit de granulés verts de différentes tailles de particules produits par la cuisson d'aggrégats d'argile brute dans un four rotatif à une température de 1 100 °C(cf. figure 2.7)[2].

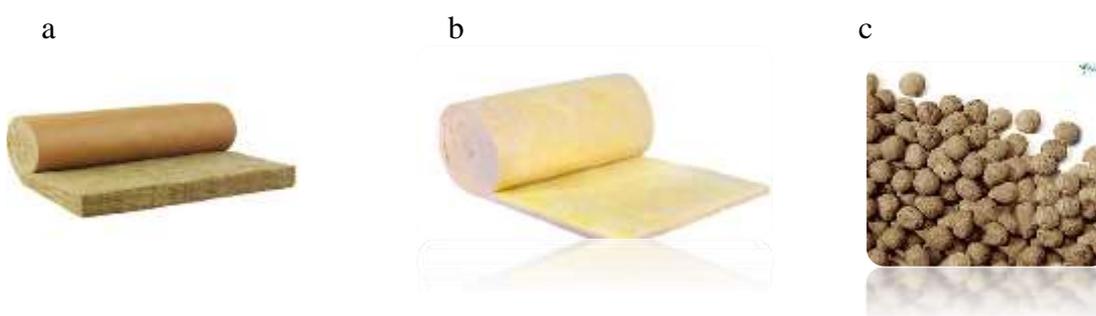


Figure 2.17: Isolants d'origine minérale. (a)- laine de roche ; (b)- laine de verre ; (c)- argile expansée[7]

6.2 Isolants synthétiques :

Ce type d'isolant est réalisé grâce à la synthèse de produits d'hydrocarbures ou de certains alliages métalliques. Les polystyrènes expansés sont les matériaux isolants synthétiques les plus couramment utilisés ; ils sont obtenus à partir d'hydrocarbures expansés à la vapeur et au

pentane. Ils sont fortement recommandés pour une utilisation dans les panneaux destinés à la construction de murs de bâtiments. Viennent ensuite les mousses de polyuréthane obtenues à l'aide de catalyseurs et de propulseurs à base d'isocyanate. Ils sont utilisés pour l'isolation thermique des façades et terrasses des bâtiments. Ajoutez aux deux isolants précédents : des réflecteurs (membranes multicouches) et du verre mousse. Ce dernier est obtenu par fusion de matières premières verrières (sable siliceux, feldspath, carbonate de sodium et calcium) et recyclage du verre avec ajout de carbone puis refroidissement(cf. figure 2.8)[2].

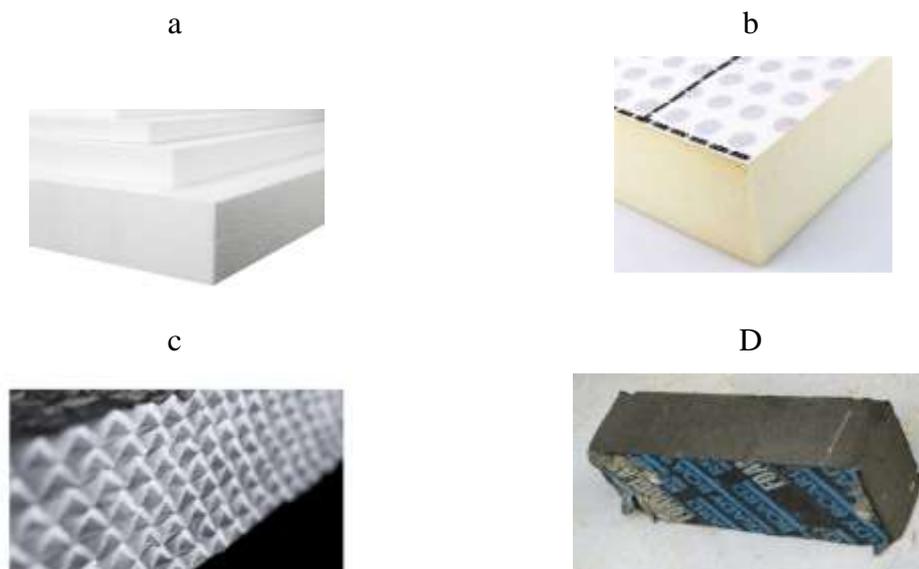


Figure 2.18 : Isolants d'origine synthétique. (a)- polystyrène ; (b)- polyuréthane ; (c)- réflecteurs ; (d)- verre cellulaire[7]

6.2.1 Polyuréthane (PUR) :

Le polyuréthane (PUR) est formé par une réaction entre des isocyanates et des polyols (alcools contenant plusieurs groupes hydroxyles). Au cours du processus d'expansion, les pores fermés sont remplis d'un gaz d'expansion, HFC, CO₂ ou C₆H₁₂. Le matériau isolant est produit sous forme de panneaux ou en continu sur une ligne de production. Le PUR peut également être utilisé comme mousse expansive sur le chantier, par exemple pour sceller les contours des fenêtres et des portes et pour remplir diverses cavités. Les valeurs de conductivité thermique typiques du PUR se situent entre 20 et 30 mW/(mK), soit considérablement inférieures à celles des produits en laine minérale, en polystyrène et en cellulose[8].

6.2.2 Polystyrène expansé (PSE) :

Le polystyrène expansé (EPS) est fabriqué à partir de petites sphères de polystyrène (issu du pétrole brut) contenant un agent d'expansion, par exemple du pentane C_6H_{12} , qui se dilatent sous l'effet de la chaleur de la vapeur d'eau. Les sphères en expansion sont liées entre elles au niveau de leurs zones de contact. Le matériau isolant est coulé sous forme de panneaux ou en continu sur une ligne de production. L'EPS a une structure à pores partiellement ouverts. Les valeurs de conductivité thermique typiques de l'EPS se situent entre 30 et 40 mW/(mK) [8].

6.2.3 Polystyrène extrudé (PSX) :

Le polystyrène extrudé (XPS) est produit à partir de polystyrène fondu (issu du pétrole brut) en ajoutant un gaz d'expansion, par exemple HFC, CO_2 ou C_6H_{12} , où la masse de polystyrène est extrudée à travers une buse avec une libération de pression provoquant l'expansion de la masse. Le matériau isolant est produit en longueurs continues qui sont coupées après refroidissement. Le XPS a une structure à pores fermés. Les valeurs de conductivité thermique typiques du XPS sont comprises entre 30 et 40 mW/(mK) [8].

6.3. Isolants d'origine animale :

La source de ce type d'isolant est constituée de poils d'animaux et de leurs peaux. Les isolants les plus couramment utilisés sont la laine, le coton et les plumes de canard. Ils sont disponibles en rouleaux, panneaux semi-rigides et feutre acoustique. L'isolation des bâtiments à base de plumes de canard est une innovation qui valorise les déchets des abattoirs. L'isolation est composée de 70% de plumes de canard, 10% de laine pour une meilleure élasticité et 20% de fibres textiles pour la stabilité(cf. figure 2.9) [7].

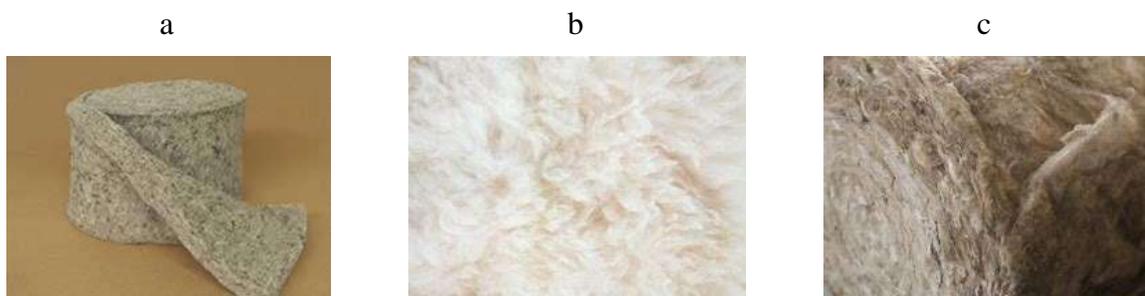


Figure 2.19: Isolant d'origine animale. (a)- la laine de coton; (b)- plume de canard ; (c)- laine de mouton[7]

6.4. Les isolants végétaux :

Cette catégorie d'isolants répondant aux principaux critères 'éco construction, elle s'inscrit tout à fait dans la philosophie HQE (haute qualité environnementale). Peu énergivores au moment de leur fabrication, biodégradables, ces matériaux se présentent sous diverses formes : vrac, laine, conglomérat, rouleaux, panneaux. Leur coût encore élevé devrait sous la demande constante des prescripteurs avoir tendance à baisser sérieusement à moyen terme[4].

6.4.1. Ouate de cellulose :

La charge cellulosique provient de papier recyclé, principalement de journaux neufs invendus et de chutes de papier d'impression neuf, son élaboration consiste d'abord à broyer le papier et à séparer les fibres, puis à le stabiliser en incorporant divers réactifs (gypse, sel) pour renforcer sa résistance au feu et sa stabilité structurelle. Ce type d'isolation est très polyvalent (cf. figure 2.10)[7].

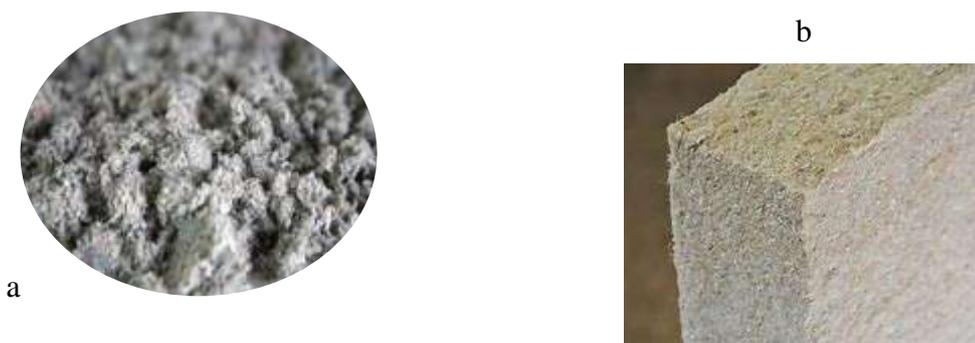


Figure 2.20: la ouate de la cellulose. (a)- matériau brut (papier broyé et traité) ; (b)- panneaux fabriqués en ouate de cellulose[7]

6.4.2. Chanvre :

Le chanvre est une plante cultivée annuelle qui comporte deux types de fibres : les fibres longues utilisées pour les tissus, les cordes, la papeterie et l'isolation en chanvre (feuilles et rouleaux semi-rigides) et les agrégats de chanvre courts(cf. figure 2.11)[7].



Figure 2.21: le chanvre. (a)- plante du chanvre et coupe de son tronc ; (b)- chènevotte ; (c)- rouleau de la laine de chanvre[7]

6.4.3.Fibre de bois :

La fibre de bois est extraite par défibrillation de déchets de bois ou de liège, et l'isolation en fibre de bois est fabriquée humide ou sèche par des procédés industriels. Ces isolants sont constitués d'au moins 80% en masse de fibres de bois, agglomérées avec ou sans utilisation de liants. Ils se présentent sous différentes formes : panneaux rigides ou semi-rigides, panneaux en feutre ou souples(cf. figure 2.12)[9].



Figure 2.22: Panneau de la fibre de bois[9]

6.4.4.Liège :

Le liège est un produit agricole et une matière présente dans l'écorce de certains arbres, notamment celle du chêne-liège. Ce dernier est le seul arbre dont l'écorce peut être enlevée sans mourir. De plus, l'écorce se régénère de quelques millimètres chaque année, elle peut donc être à nouveau récoltée au bout d'une quinzaine d'années. Il protège l'arbre des insectes, du froid et des intempéries tout en permettant à l'arbre de respirer à travers les lenticelles (trous dans les

bouchons et certains fruits). Le chêne-liège est un puits de carbone, et son effet est encore plus prononcé lorsque l'arbre est utilisé pour produire du liège(cf. figure 2.13) [10].



Figure 2.23: Panneau de liège[2]

6.4.5. Paille :

La paille provient des tiges de certaines graminées appelées céréales (blé, orge, avoine, seigle, etc.) et est coupée lors de la récolte des céréales.

La paille est utilisée depuis longtemps dans la construction, notamment en utilisant des épis de maïs pour les murs et du chaume pour les toits. La pratique consistant à utiliser des bottes de paille dans la construction est apparue aux États-Unis à la fin du XIXe siècle, et la première maison française construite en bottes de paille remonte à 1921. Depuis, de nombreuses technologies ont été développées, tout comme la paille. Peut être utilisé dans la construction aujourd'hui différentes formes(cf. figure 2.14)[11].

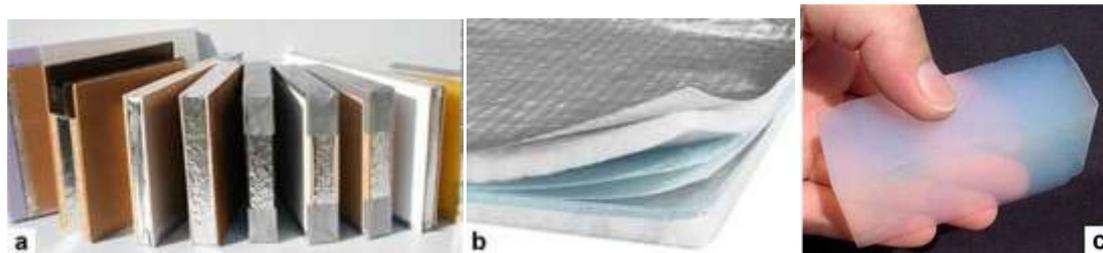


Bottes de Paille Enduit Terre/Paille Panneaux de paille

Figure 2.24: Types des Pailles[11]

6.5. Isolation nouvelle génération :

Une nouvelle génération de matériaux isolants avec une excellente efficacité thermique est également disponible sur le marché. Il s'agit notamment de l'isolation sous vide, de l'isolation réfléchissante et des aérogels. Ils sont visibles sur la Figure (cf. figure 2.15) [2].



(a) Panneaux sous vide (b) Panneau réfléchissant et (c) Aéro-gel

Figure 2.25: Isolants nouvelle génération[2]

6.5.1 Isolants sous vide :

Les isolants sous vide, ou VIP (Vacuum Insulation Panel), sont les plus performants du marché grâce à leur très faible conductivité thermique de 0.005 W/m.K , environ 6 fois plus petite que celle des isolants conventionnels. Ils sont composés d'un vide enveloppé dans une coque de silice amorphe, entourée d'un film de polyester métallisé thermosoudé, et recouverts de polystyrène extrudé des deux côtés. Le principal inconvénient des VIP est la difficulté de leur mise en place, car ils ne peuvent pas être coupés sur le chantier sans compromettre le vide intérieur. Par conséquent, un calepinage précis des pièces à isoler est nécessaire, ce qui engendre un coût plus élevé par rapport aux isolants traditionnels[2].

6.5.2. Isolants réfléchissant

Les isolants réfléchissants sont souvent utilisés en complément d'isolation. Ils sont composés de plusieurs couches de feuilles d'aluminium ou aluminasses, assemblées sur des couches intermédiaires de différentes natures (mousses souples, feutres divers, polyéthylènes à bulles, etc.). L'épaisseur de l'isolant final varie de quelques millimètres à plusieurs centimètres. Pour améliorer leurs performances thermiques, une ou deux lames d'air non ventilées sont créées de chaque côté du panneau. La mise en œuvre doit être très précise car toute ventilation des lames d'air réduit l'efficacité thermique. La résistance thermique des isolants réfléchissants varie entre 0.1 et $1.0 \text{ m}^2.\text{K/W}$, et peut atteindre 0.5 à $2.0 \text{ m}^2.\text{K/W}$ avec des lames d'air correctement mises en œuvre. Ils sont généralement conditionnés sous forme de rouleaux[2].

6.5.3 Aéro-gel :

L'aéro-gel de silice est un isolant créé par la nanotechnologie. C'est un gel (parfois clair) dans lequel le composant liquide a été remplacé par un gaz. Sa composition finale est de 95 à 98 % d'air et de 2 à 5 % de silice. Il présente donc une faible densité comprise entre 60 et 80 kg/m^3 et une excellente conductivité thermique ($0,012 \text{ W/(m.K)}$). De plus, ce type d'isolant présente

l'avantage de pouvoir être utilisé sur des murs translucides. Cependant, son principal inconvénient est que son prix peut atteindre 500 €/m²[2].

7. Caractéristiques des matériaux d'isolation thermique :

Letableau2.1 résume certaines des principales caractéristiques présentées par les isolants thermiques de différentes origines[7].

Tableau 2.1:Caractéristiques des isolants thermiques[7].

Origine	Désignation	Utilisations	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.°C)	Comportement au feu	Perméabilité à la vapeur d'eau
Synthétique	Polystyrène	Paroi des murs	20 à 30	0.035	Moyennement inflammable	Imperméable
	Polyuréthane	Chapes et terrasses	30 à 40	0.025	Moyennement inflammable	Imperméable
	Verre cellulaire	Toitures et terrasses	100 à 165	0.035 à 0.048	Incombustible	Parfaitement imperméable
Végétale	Ouate de cellulose	Parois légères	35 à 45	0.035 à 0.040	Difficilement inflammable	Hydrophile
	Chanvre	Polyvalente	25 à 35	0.039	Difficilement inflammable	Hydrophile
	Laine de bois Parois	Verticales	160 à 260	0.042 à 0.072	Inflammable	Hydrophile
Minérale	Laine de roche	Polyvalente	40	0.04	Ininflammable	Perméable
	Laine de verre	Polyvalente	25	0.035	Ininflammable	Peu sensible
	Argile expansée	Planchers et murs	300 à 500	0.103 à 0.0108	Ininflammable	Variable en fonction du liant

Animale	Laine de coton	Polyvalente	25 à 30	0.040	Inflammable	Très hydrophile
	Laine de mouton	Polyvalente	10 à 30	0.035 à 0.045	Inflammable	Très hydrophile

8. Avantages et inconvénients des isolants thermiques :

L'utilisation des différents isolants thermiques dans les divers domaines de la construction nécessite un choix judicieux basé sur leurs qualités d'isolation et leurs inconvénients. Le tableau 2.2 est une récapitulation des principaux avantages et inconvénients de chaque origine d'isolant [7].

Tableau 2.2:Avantages et inconvénients des isolants thermiques[7].

	Avantages	Inconvénients
Isolants d'origine minérale	Disponibilité Coût faible (prix de revient)	Ressource non renouvelable. Difficilement recyclable
Isolants d'origine synthétique	Bonne performance thermique. Coût admissible Dégagement des gaz toxiques	Ressource non renouvelable. Non recyclable
Isolants d'origine végétale	Ressource renouvelable Bon pouvoir hygroscopique Sans effet sur la santé Facilité de pose	Coût élevé Cycle de vie restreint.
Isolants d'origine animale	Matériau durable Bon pouvoir hygroscopique	Coût élevé Disponibilité limitée

9. Propriétés et performances d'un matériau isolant :

La conductivité thermique n'est pas la seule propriété à prendre en compte dans le choix d'un isolant. En effet, les propriétés d'un matériau isolant sont subdivisées en trois groupes essentiels [12] :

9.1 Propriétés physiques :

Elles décrivent le comportement du matériau en termes de densité, de la résistance mécanique, de la capacité d'isolation thermique, de l'absorption acoustique, la résistance à l'humidité et au feu, stabilité dimensionnelle, etc.

9.2 Propriétés environnementales :

Ce deuxième groupe comprend des propriétés comme l'énergie intrinsèque primaire, la quantité d'énergie totale qu'il a fallu prendre pour produire, transporter et à terme recycler le matériau, les émissions de gaz pour la production de la matière, l'utilisation d'additifs contre les effets biologiques etc.

9.3. 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).

10. Réglementation thermique :

La régulation thermique est un ensemble de lois visant à maîtriser l'énergie, ceci pour assurer le confort des occupants du bâtiment et réduire les émissions des polluants locaux et mondiaux, et réduire les coûts d'exploitation du site (notamment chauffage)[13].

10.1 Enjeux de la réglementation thermique

- Économiques : Réduire la facture énergétique.
- Environnementaux : Réduire l'effet de serre conformément aux accords de Rio et au protocole de Kyoto.
- Sociaux : Assurer un meilleur confort pour les personnes.

10.2 Réglementation thermique Algérienne :

La réglementation thermique en Algérie est encadrée par la loi sur la maîtrise de l'énergie, qui vise à promouvoir l'efficacité énergétique dans les bâtiments neufs. Cette loi repose sur le décret exécutif n° 2000-90 du 24 avril 2000, qui établit des exigences pour l'isolation thermique et la réduction des pertes énergétiques[13].

Ses principaux objectifs sont :

- L'utilisation rationnelle de l'énergie

- Le développement des énergies renouvelables
- La réduction de l'impact environnemental du système énergétique

10.3 Exigences thermiques pour les bâtiments neufs

Les bâtiments doivent respecter au moins l'une des deux conditions suivantes :

1. La déperdition calorifique en hiver inférieure à une limite définie « déperdition de référence ».
2. L'apport calorifiques en été inférieurs à une limite définie « apport de référence ».

Les valeurs de référence spécifiques sont définies dans les Documents Techniques Réglementaires (D.T.R.), approuvés par arrêté du ministre chargé de l'habitat.

Cette réglementation vise à assurer une meilleure efficacité énergétique et à encourager l'utilisation de techniques et matériaux innovants pour l'isolation thermique des bâtiments en Algérie[13].

11. Conclusion :

L'isolation thermique joue un rôle fondamental dans la réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Ce chapitre a permis de définir l'isolation thermique et son importance dans la diminution des pertes de chaleur, en mettant l'accent sur son impact en Algérie.

Les différentes techniques d'isolation thermique ont été explorées, notamment l'isolation par l'intérieur et par l'extérieur, chacune présentant des avantages spécifiques en fonction des besoins et des contraintes structurelles. Les matériaux isolants ont été classifiés selon leur origine : minéraux, synthétiques, animaux, végétaux et ceux de nouvelle génération, chacun ayant des propriétés particulières influençant leur performance thermique.

L'étude des caractéristiques des matériaux isolants et de leurs propriétés – physiques, environnementales, et liées à l'hygiène et à la santé – a permis d'évaluer leurs avantages et inconvénients. La réglementation thermique, en particulier en Algérie, a été abordée, soulignant les exigences pour les bâtiments neufs afin de garantir une construction durable et économe en énergie.

Ce chapitre constitue ainsi une base essentielle pour comprendre l'isolation thermique, ses principes, ses applications et ses enjeux dans la conception de bâtiments plus efficaces et respectueux de l'environnement.

12. Références bibliographiques

- [1] S. Fohanno, G. Nasr, E. Antczak, L. Lahoche, Z. Younsi, et Y. Chérif, « Analyse typologique et thermique des maisons anciennes de lilile . Etude expérimentale et numérique des parois verticales ».
- [2] M. Viel, « Développement de composites bio-sourcés destinés à l'isolation des bâtiments ».
- [3] B. Abu-Jdayil, A.-H. Mourad, W. Hittini, M. Hassan, et S. Hameedi, « Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview », *Construction and Building Materials*, vol. 214, p. 709-735, juill. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102.
- [4] E. B. BENSEGHIRA, « Etude de l'isolation thermique d'un local situé dans la région de Ouargla (sud -est de l'Algérie) », MASTER EN Mécanique énergétique, KASDI MERBAH, Ouargla, 2014.
- [5] SAYAH Romaisa et HACHEMI Wissam « Evaluation_des_performances_thermiques_et_analyse_des_coûts_des_isolants_utilises_dans_les_bâtiments_courants ».
- [6] « Etude Numérique des performances des matériaux isolants dans le bâtiment (régime permanent) sous conditions de températures réelles de Constantine ».
- [7] Sediri Fatima « Mise au point et analyse thermique d'un nouveau matériau composite à base végétale destiné à réduire les déperditions thermiques des locaux. ».
- [8] B. P. Jelle, « Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities », *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 10, p. 2549-2563, oct. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- [9] M. Aghahadi, « Etude expérimentale et modélisation physique des transferts couplés chaleur-humidité dans un isolant bio-sourcé. ».
- [10] DJIDI TINHINANE , BEHAIRI RABAH « Impact de l'utilisation des matériaux bio-sourcés sur les performances thermiques et énergétiques des bâtiments ».
- [11] SAFI Nouredine , MEGUIRECHE Hamza « Valorisation de matériaux géo- et bio-sourcés pour la construction durable ».
- [12] Nadia BENMANSOUR « Developperment et caractersation de composites naturels locaux adaptes a l'isolatoin thermique dans l'habitat ».

[13]F. Touloum, « Contribution au développement de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment. Utilisation du bois de palmier dattier. », 2018.

Chapitre 3 : Propriétés thermiques des isolants

1 Introduction :

Les propriétés thermiques des matériaux décrivent leur comportement face aux échanges thermiques. Elles incluent des propriétés stationnaires comme la conductivité thermique et l'émissivité, ainsi que des propriétés dynamiques telles que la diffusivité et l'effusivité thermiques. Ces propriétés, appelées aussi "propriétés de transport", sont liées au mouvement des atomes et des molécules qui transfèrent la chaleur. De plus, elles définissent la capacité du matériau à absorber l'énergie thermique pour augmenter sa température ou modifier son état (par exemple, capacité thermique, enthalpie de fusion, coefficient de dilatation thermique). Toutes ces propriétés varient en fonction de la nature et de la température du matériau, ce qui rend essentielle une mesure précise des deux éléments pour les déterminer.

Les méthodes traditionnelles pour mesurer les propriétés thermo physiques des matériaux ne permettent de déterminer qu'un seul paramètre à la fois. La conductivité thermique est mesurée en régime permanent en observant les variations de température et de flux de chaleur, tandis que la diffusivité thermique est obtenue en état transitoire grâce à la « méthode flash ». Bien que connaître la densité, la conductivité et la diffusivité thermique soit utile pour restaurer la capacité thermique des matériaux, rares sont les techniques capables de mesurer simultanément la conductivité et la diffusivité. Une nouvelle méthode photo thermique utilisant un laser comme source d'excitation permet d'exciter l'échantillon périodiquement. En mesurant la température à différents points, on peut analyser les déphasages entre les mesures et la source[1].

2 Conductivité thermique (λ) :

2.1 Définition :

La conductivité thermique(λ) est le flux de chaleur traversant un matériau d'épaisseur un mètre, pour une différence de température d'un kelvin entre les deux faces entrantes et sortante. Elles'exprime en $W.m^{-1}K^{-1}$. Sa valeur permet de quantifier le pouvoir du matériau à conduire la chaleur (en termes d'amplitude). Plus elle est faible, plus le matériau est isolant (conduction faible). La conductivité thermique(λ) est donnée par la formule :

$$\lambda = \frac{e \cdot \varphi}{\Delta\theta} \quad (1)$$

λ : Conductivité thermique en (W.m/k)

$\Delta\theta$: Ecart de température entelles deux surfaces en (K)

e : Epaisseur du matériau en (m)

φ : Flux thermique en (W)

2.2 Classification des méthodes de mesure de λ :

Les méthodes de mesure de la conductivité thermique (λ) peuvent être classées selon trois critères :

- Le type de régime thermique ;
- Le type de mesure ;
- La géométrie de l'appareillage et des éprouvettes.

- Le régime thermique utilisé peut-être stationnaire ou transitoire. Dans les appareillages à plaque chaude gardée, à fluxmètres et à symétrie cylindrique, le régime thermique couramment utilisé est stationnaire. Dans certains appareillages à fluxmètres, dans la méthode flash et dans la méthode du fil chaud, le régime thermique est transitoire.

- Les méthodes peuvent aussi être classées comme absolues ou relatives (méthodes de comparaison). Sont des méthodes absolues : la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode à symétrie cylindrique, la méthode du fil chaud et la majorité des méthodes en régime thermique transitoire.

- Le dernier critère de classement peut être la géométrie de l'appareillage et des éprouvettes. On parle de géométrie plane avec des éprouvettes soit carrées, soit circulaires pour les appareillages à plaque chaude gardée ou à fluxmètres ; on parle de géométrie cylindrique pour les appareillages à symétrie cylindrique ; enfin on parle d'approximation de l'espace semi-infini pour certaines méthodes flash ou d'espace infini à symétrie radiale pour la méthode du fil chaud[2] .

2.3 Mesure de la conductivité thermique :

La conductivité thermique d'un matériau quantifie la capacité de celui-ci à transmettre la chaleur. Cette propriété varie en fonction de la température et de la composition du matériau. Par exemple la conductivité peut varier de 237 W.m⁻¹.K⁻¹ pour l'aluminium pur à 130 W.m⁻¹.K⁻¹ pour un alliage faiblement allié. C'est pour cela que dans des applications critiques il est nécessaire de mesurer cette propriété sur les matériaux réellement utilisés.

Les trois méthodes les plus couramment utilisées dans l'industrie et la recherche sont :

- La méthode de la plaque chaude gardée
- La méthode flash
- La méthode du fil chaud[3].

2.4 Méthode flash :

Cette méthode est très utile pour mesurer la conductivité thermique sur de petits échantillons.

Elle est incontournable pour mesurer la conductivité thermique à haute température où la mesure de température par pyrométrie de contact est inopérante. Cette méthode ne nécessite pas de mesurer précisément la température. Cependant on ne peut mesurer que la diffusivité α :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2)$$

Où : λ est la conductivité, α la diffusivité, ρ la masse volumique et c la chaleur massique. Le schéma du dispositif expérimental est présenté ci-dessous (cf. Figure 3. 1). On chauffe par un flash lumineux, un laser ou un bombardement ionique. On mesure sur l'autre face l'élévation de température par pyrométrie.

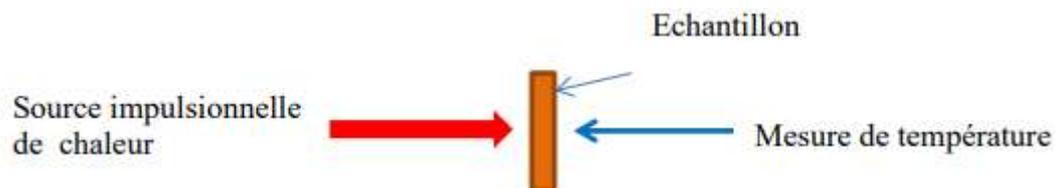


Figure 3.26 : Schéma expérimental permettant de mesurer la diffusivité thermique[4]

Le principe consiste ensuite à analyser le thermogramme (montée en température sur la face arrière) (cf. figure 3.2) pour déterminer la diffusivité :

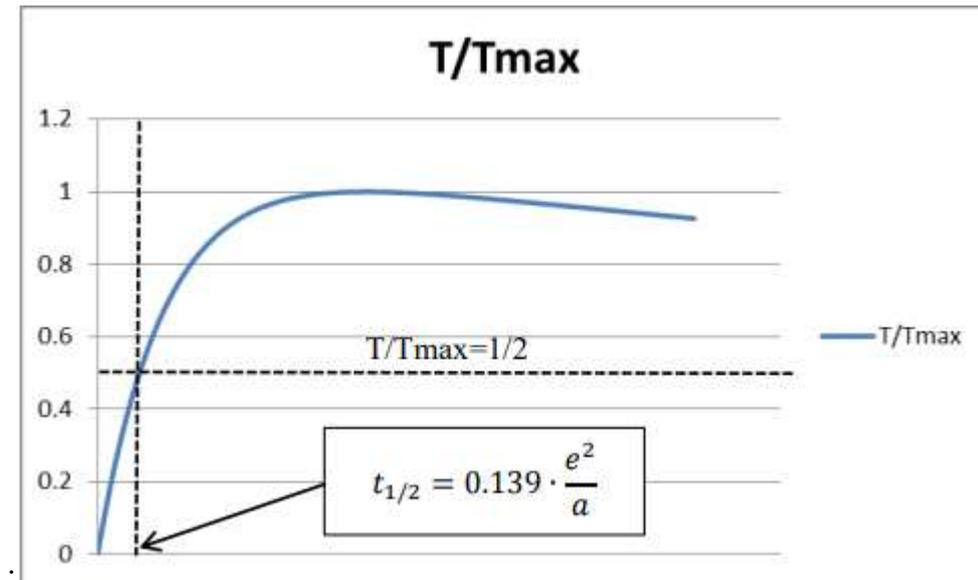


Figure 3.27 : Thermogramme en face arrière en fonction du temps[4]

La décroissance après l'obtention de T_{\max} est due au caractère non adiabatique de l'expérience.

La méthode la plus simple est de déterminer le temps nécessaire $t_{1/2}$ pour obtenir une élévation de la moitié de l'élévation maximale de température (dans le cas d'un système adiabatique). On obtient la diffusivité ainsi :

$$a = 0.139 \cdot \frac{e^2}{t_{1/2}} \quad (3)$$

e : est l'épaisseur de l'échantillon[4]

3 Effusivité thermique(b) :

3.1 Définition :

L'effusivité thermique exprimée en $J \cdot K^{-1} \cdot m^2 \cdot s^{-1/2}$ Traduit la capacité d'un matériau échanger de la chaleur avec son environnement. Plus précisément, cette propriété rend compte de la sensibilité de la température de surface d'un matériau à une variation du flux de chaleur reçu par cette surface. Ainsi, un matériau très conducteur et très capacitif aura une température de surface peu sensible à des variations de flux et sera donc très effusif. Cette propriété est reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation[5] :

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (4)$$

λ : la conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

ρ : la masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

c : la capacité thermique massique c ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

3.2 Mesure de l'effusivité thermique par méthode PLAN CHAUD :

Dans la méthode du plan chaud, une source thermique sous la forme d'une nappe (résistance) chauffante de faible épaisseur est placée entre deux échantillons du matériau à caractériser (cf. Illustration 1). On applique un échelon de flux de chaleur à la résistance chauffante et on relève l'évolution de la température au centre de cette même résistance à l'aide d'un thermocouple. La géométrie plane suggère que le transfert est unidirectionnel dans la zone centrale du plan et donc que les effets des pertes latérales sont négligés.

On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de :

- L'effusivité thermique b ,
- La capacitance thermique de l'ensemble {sonde + résistance chauffante},
- La résistance de contact R à l'interface sonde/échantillon.

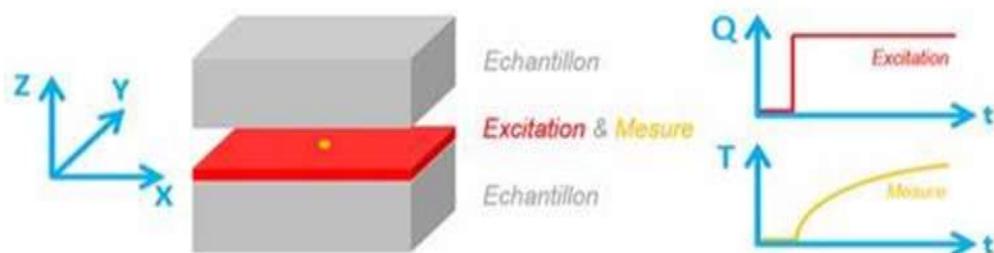


Figure 3.28 : Schéma de la méthode Plan Chaud [5]

4. Diffusivité thermique(α) :

4.1 Définition :

La diffusivité thermique notée α exprimée en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ est la grandeur qui régit le comportement thermique d'un matériau en régime transitoire. Elle caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur plus ou moins rapidement. Cette grandeur est reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation [6] :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (5)$$

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

ρ : la masse volumique du matériau [kg/m³]

c : la chaleur spécifique du matériau [J/kg.K]

4.2 Méthodes de mesure de α :

Les principales méthodes de mesure de la diffusivité sont :

- **Méthode de plaque chaude gardée**
- **Méthode de mesure en régime permanent**
 - Plaque chaude
 - Méthode de la barre
- **Méthode de mesure en régime quasi établi**
 - Méthode de fil chaud
 - Sondes thermiques
- **Méthode de mesure en régime transitoire**
 - Méthode flash

4.3 Méthode flash :

Dans son principe, cette méthode consiste à soumettre la face avant d'un échantillon plan à une impulsion de flux de chaleur de courte durée (Dirac d'énergie) et d'enregistrer l'évolution temporelle de la température (appelée thermogramme) en un ou plusieurs points de l'échantillon, soit sur la face excitée de l'échantillon (face avant), soit sur la face opposée à l'excitation (face arrière).

L'analyse théorique du thermogramme permet d'estimer la diffusivité thermique apparente de l'échantillon. Les modèles de dépouillement du thermogramme sont nombreux et visent à résoudre l'équation de la chaleur avec des conditions aux limites et des conditions initiales plus ou moins complexes afin d'être le plus proche possible des conditions réelles.

La méthode Flash face avant est assez présente dans les applications industrielles, où il n'est pas forcément aisé "d'accéder" à la face arrière des matériaux et où les cadences peuvent être

élevées. Les dispositifs de laboratoire sont, par contre, basés traditionnellement sur l'exploitation de la réponse en face arrière [5].

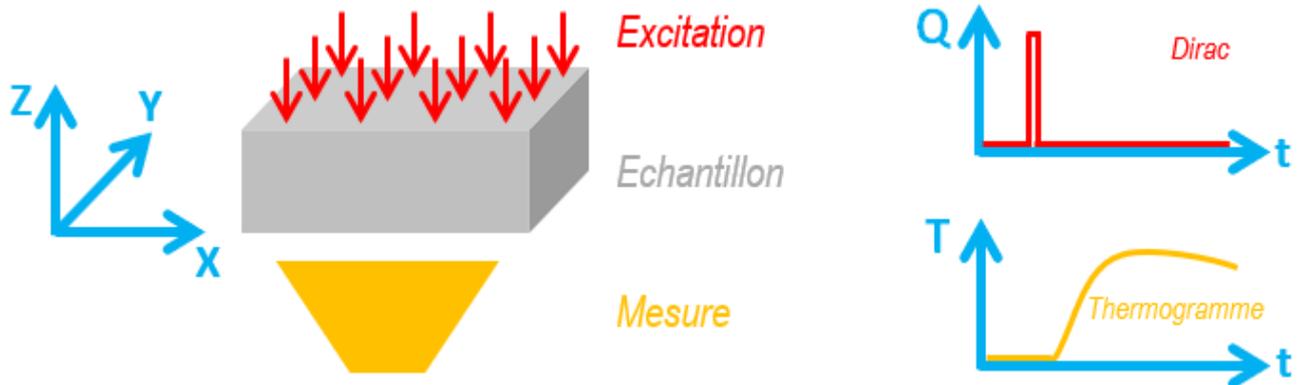


Figure 3.29 : Schéma de la méthode Flash[5]

5. Capacité thermique (cp) :

5.1 Définition :

La définition de la capacité thermique peut être définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un objet ou d'un système d'une unité de température (généralement des degrés Celsius ou Kelvin).

Elle est exprimée en unités d'énergie par degré Celsius ou Kelvin, c'est-à-dire en joules par degré Celsius ($J/^{\circ}C$) ou en joules par Kelvin (J/K).

La formule générale de calcul de la capacité thermique (C) d'un objet ou d'un système peut s'exprimer comme suit :

$$c = \frac{Q}{\Delta T} \quad (6)$$

Où:

C_p : est la capacité thermique ($J/^{\circ}C$).

Q : est la quantité de chaleur transférée ou absorbée par l'objet ou le système (J).

ΔT : est le changement de température subi par l'objet ou le système ($^{\circ}C$) [7]

5.2 Méthodes de mesure de la capacité thermique :

Un certain nombre de méthodes sont employées par les laboratoires pour mesurer la capacité thermique. La première est la technique dynamique qui consiste à soumettre la matière à un flux

de chaleur sur une période définie. Ensuite, il faut mesurer la phase et l'amplitude des variations de température observée. Cette méthode est adaptée pour les matériaux dont la capacité thermique évolue au fur et à mesure que la température connaît des fluctuations. Toutefois, pour appliquer cette technique, il est nécessaire de maîtriser l'intensité et la fréquence du flux thermique.

D'autre part, la méthode calorimétrique qui implique l'usage d'un calorimètre adapté est également utilisée. L'utilisateur doit y placer le corps à analyser pour mesurer la quantité de chaleur qui est dégagée lors d'une variation de température. Cette technique est très employée parce qu'elle permet d'obtenir des mesures précises de manière simple. Elle est néanmoins plus indiquée pour les matières solides ou liquides.

Enfin, l'approche différentielle consiste à mettre le corps dans un four, avec un matériau de référence dont le pouvoir calorifique est connu. Après le chauffage ou le refroidissement, il faut mesurer la différence de température entre les deux. La capacité thermique de l'échantillon est proportionnelle à la différence obtenue. Cette technique est rapide et convient aux matières gazeuses, solides et liquides. Elle requiert l'usage d'un matériau de référence et peut être affectée par les changements extérieurs.

Méthode calorimétrique : Utilisation de calorimètres pour mesurer la chaleur dégagée ou absorbée lors des variations de température. Cette méthode est idéale pour les substances solides ou liquides[8].

6. Conclusion :

L'étude des propriétés thermiques des matériaux, notamment la conductivité thermique, l'effusivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique, permet de mieux comprendre leur comportement face aux transferts de chaleur. Ces caractéristiques sont essentielles dans de nombreux domaines d'application, tels que l'isolation thermique, la conception de dispositifs électroniques, et les processus industriels nécessitant un contrôle précis de la température.

Parmi les différentes méthodes de mesure, la méthode flash et la méthode Plan Chaud se distinguent par leur efficacité et leur précision. Ces techniques apportent des données essentielles permettant l'optimisation des matériaux utilisés dans des environnements où la gestion thermique est primordiale.

Ainsi, une analyse approfondie de ces propriétés thermiques, couplée à des méthodes de mesure adaptées, contribue au développement de matériaux toujours plus performants et optimisés pour répondre aux exigences thermiques spécifiques de chaque application.

7. Références bibliographiques :

- [1] « Taleb AHE, Rebbouh MA, Morceli A. Isolation thermique d'une habitation par fibre de palmier dattier. Licence professionnelle en Energie Renouvelable. Université de Ghardaïa, 2021 « isolation ».
- [2] S. Klarsfeld, « Conductivité thermique des isolants ».
- [3]B. Le Neindre, « Mesure de la conductivité thermique des liquides et des gaz », Techniques de l'ingénieur, R2920-V2 (1996).
- [4] « Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash », Techniques de l'Ingénieur. Consulté le: 28 avril 2025.
- [5] « Quelques manifestations de l'effusivité », Techniques de l'Ingénieur. Consulté le: 22 avril 2025.
- [6] B. Hay, J.-R. Filtz, et J.-C. Batsale, « Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash », *Techniques d'analyse*, mars 2004,
- [7] « Capacité thermique : définition, exemples, types et formule ». Consulté le: 16 avril 2025.
- [8] « Mesure de la capacité thermique spécifique c_p à l'aide de LFA - Linseis ».

Conclusion générale

L'évaluation du comportement thermique des éco-matériaux isolants constitue une avancée significative dans le domaine de l'efficacité énergétique et de la construction durable. À travers cette étude, nous avons pu analyser les performances thermiques d'éco matériaux isolants innovants, permettant d'apprécier leur potentiel en matière de réduction des pertes énergétiques et d'amélioration du confort thermique. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'éco-matériaux offre une alternative prometteuse aux isolants conventionnels, contribuant à une meilleure régulation thermique tout en minimisant l'empreinte environnementale.

Contributions

Ce mémoire apporte plusieurs contributions :

- Une caractérisation des propriétés thermiques des éco-matériaux étudiés.
- Une comparaison approfondie avec les isolants conventionnels, permettant de situer les avantages et les limites des matériaux écologiques étudiés.
- L'élaboration d'une méthodologie expérimentale et numérique pouvant être reproduite pour d'autres matériaux écologiques.
- Une réflexion sur l'intégration des éco-matériaux dans le secteur de la construction, soulignant leur impact potentiel sur l'efficacité énergétique des bâtiments.

Critique du travail

Malgré les avancées réalisées, certaines limites doivent être prises en compte :

- La variabilité des conditions expérimentales pourrait affecter la précision des résultats.
- Le nombre de tests réalisés reste limité, ce qui pourrait restreindre la généralisation des conclusions.
- L'absence de simulations longue durée, qui permettraient d'évaluer la stabilité thermique du matériau sur plusieurs cycles saisonniers.
- Une approche plus approfondie sur l'impact économique et environnemental du matériau aurait renforcé la portée de l'étude.

Travaux futurs de recherche

Plusieurs pistes de recherche pourraient être envisagées :

- L'exploration de nouvelles combinaisons de matériaux pour améliorer le compromis entre isolation thermique et impact environnemental.
- L'intégration du matériau dans des prototypes de bâtiments pour analyser son efficacité à l'échelle réelle.

Perspective du domaine

L'avenir des éco-matériaux isolants s'annonce prometteur, notamment avec l'évolution des réglementations environnementales et la prise de conscience collective sur la nécessité de réduire la consommation énergétique. Les innovations dans le domaine des biomatériaux et des composites permettent d'envisager une amélioration continue des performances thermiques. À terme, ces avancées pourraient transformer l'industrie du bâtiment en favorisant des constructions plus durables et énergétiquement performantes, contribuant ainsi à un avenir plus respectueux de l'environnement.

Annexe

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie

جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم : الآلية والكهروميكانيك
شعبة : طاقات متجددة
تخصص : طاقات متجددة و بيئة

غرداية في : 2025/06/15

شهادة ترخيص بالتصحيح والايذاع:

انا الأستاذة بوسديرة خليفة
بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة ب:

Evaluation du comportement thermique d'éco-matériaux isolants

من انجاز الطالب (الطالبة):

عجيلة أنقال

بن حديد شيماء

التي نوقشت/قويت بتاريخ : 20 ماي 2025

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم



امضاء المسؤول عن التصحيح