

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Djilali BOUNAAMA KHEMIS-MILIANA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Spécialité : Génie mécanique

Option : Energétique

Présenté par

Sediri Fatima

Rabahi Wafaa

**Mise au point et analyse thermique d'un nouveau
matériau composite à base végétale destiné à réduire
les déperditions thermiques des locaux.**

Soutenu Publiquement le : 05/06/2016

Devant le jury composé de :

Dr .Mazzouzi Ridha

Président

Univ. Khemis-Miliana

Dr .Hemis Ahmed

Examineur

Univ. Khemis-Miliana

Dr. Azzouzi Djelloul

Encadreur

Univ. Khemis-Miliana

Promotion JUIN 2016

Remerciements

En premier lieu nous tenons à remercier Dieu pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. à notre encadreur pédagogique Dr. Azzouzi Djelloul : vous avez bien voulu nous confier ce travail riche d'intérêt et nous guider à chaque étape de sa réalisation.

Vous nous avez toujours réservé le meilleur accueil, malgré vos Obligations professionnelles. Vos encouragements inlassables, votre amabilité, votre gentillesse méritent toute admiration.

Nous saisissons cette occasion pour vous exprimer notre Profonde gratitude tout en vous témoignant notre respect.

Nous tenons à notifier un remerciement spécial à Mr. Abd El Hak KHarachi

Nous désirons exprimées nos vifs remerciements à tous les membres de familles spécialement les parents avec l'expression sincères de sentiments et leurs soutiens et leurs encouragements permanents.

A membres du jury ; Vous nous faites l'honneur d'accepter avec une très Grande amabilité de siéger parmi notre jury de ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos reconnaissances à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin.

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu, tout puissant, j'ai achevé ce

Modeste travail que je dédie :

Je dédie ce modeste travail à ma mère que j'aime très fort et je la souhaite très longue vie pleine de joie et beaucoup de santé, pour que je puisse rendre le minimum de ce qu'elle m'a offert tout au long des années de ma vie.

A mon père, pour sa confiance, son encouragement et son soutien morale et matériel pendant toute la durée de mes études.

A mes sœurs : Fatiha, Salîha, aïcha, Karîma, Chaimaa.

Mes frères: Mohamed, Ahmed, Brahim

Les bébés: meriême, Abd nour, tasnime, sohaïbe, amine

Mes cousines et toute la famille sediri, zitouni,

A ma binôme : wafaà

A mes amis les plus proches : Léïla, chérifa, Hafidha, rabiaà, fathia, pour leur amitié et leur aide....

A mes amis de l'université de Djillali Bounaama

A tous les étudiants de génie mécanique –énergétique-

Fatima



Dédicaces

Je remercie tout d'abord notre clément Dieu qui m'a donné la puissance pour que je puisse terminer ce travail

Je dédie ce modeste travail à ma mère : Affable, honorable, aimable . Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

A mon papa, Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et Nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation

A mes belles sœurs : Amoula, Hanaa, et ma petite Ferial

A MiMa : Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

Mes tentes : Aicha et Hanan

A ma chère Nouza

Mes oncles ,et toute la famille Rabahi et Zebentout

A ma binôme : Fatima

A mes copines les plus proches :Hafidha, Cherifa, Leila, Sousou, Zahra Mouchira ,Soumia pour leur amitié et leur aide....

A mes amis de l'université de Djillali Bounaama et surtout G.M

Wafaa

Résumé

Les matériaux isolants couvrent une large bande d'utilisation dans de divers secteurs à savoir; le bâtiment, l'industrie légère, l'agro-alimentaire et le secteur médical. La recherche d'un matériau possédant une bonne qualité d'isolation est l'enjeu majeur sur lequel travaillent les spécialistes du domaine ainsi que les industriels. L'une des alternatives des matériaux d'isolation classique est le matériau composite à base de fibre végétale. Ce dernier se présente sous forme de matrice contenant un élément de base (plâtre par exemple) au quel on associe une fraction de fibres végétales.

Dans cette optique, le travail présenté à travers ce manuscrit, s'inscrit dans la catégorie des travaux d'investigation et de recherche entrepris dans le domaine de l'éco-construction. L'étude a été entamée dans le souci de mettre au point un composite à base de fibres végétales tout, en analysant expérimentalement l'effet de la fraction massiques des fibres sur le pouvoir isolant de ce composite. La concrétisation de cette idée permet de faire des économies importantes en énergie afin de remplacer les matériaux d'isolation classique largement utilisés.

Mots clés : les isolants thermiques, fibres végétales, matériaux composites, propriétés thermiques .

Abstract

Insulating materials cover a wide strip of use in various sectors namely; construction, light industry, food industry and the medical sector. The search for a material with good insulation quality is the major issue on which work specialists in the field as well as industrial. One alternative of conventional insulating materials is the composite material based on vegetable fiber. The latter is in matrix form containing a base member (e.g. plaster) to which is associated a fraction of vegetable fibers.

In this context, the work presented throughout the manuscript, is in the category of investigative and research work undertaken in the field of green building. The study was initiated in order to develop a composite made from plant fibers while in experimentally analyzing the effect of the mass fraction of the fibers on the insulating power of this composite. The realization of this idea allows for significant savings in energy to replace conventional insulation materials widely used .

Keyword : thermal insulating , tropical plant fiber, composite material, thermal proprieties .

تغطي المواد العازلة شريط عريض من استخدامهما في مختلف القطاعات وهي: البناء والصناعات الخفيفة والصناعات الغذائية والقطاع الطبي. عن مادة ذات نوعية جيدة العزل هو القضية الرئيسية على المتخصصين الذين يعملون في الميدان منه . بديل واحد لمواد العزل التقليدية هي المواد المركبة القائمة على الالياف النباتية. هذا الأخير هو في () الذي يرتبط جزء من الالياف النباتية.

في هذا السياق عرضت في جميع انحاء مخطوطة تدرج في فئة اعمال التحقيق والبحوث التي أجريت الدراسة من اجل تطوير مركب مصنوع من الالياف النباتية بينما في تحليل تجريبي للتأثير على جزء من كتلة الالياف على قوة عازلة من هذا . تحقيق هذه الفكرة يسمح لتحقيق وقرات كبيرة في العازلة التقليدية المستخدمة على نطاق واسع.

العوازل الحرارية الياف نباتية،
حرارية.

Liste des illustrations graphiques et tableaux

Figure.1.1	Isolants d'origine minérale. (a)- laine de roche ; (b)- laine de verre ; (c)- argile expansée	20
Figure.1.2	Isolants d'origine synthétique. (a)- polystyrène (b)- polyuréthane ; (c)- réflecteurs ; (d)- verre cellulaire	21
Figure.1.3	la ouate de la cellulose. (a)- matériau brut (papier broyé et traité) ; (b)- panneaux fabriqués en ouate de cellulose.	22
Figure.1.4	le chanvre. (a)- plante du chanvre et coupe de son tronc; (b)- chènevotte ; (c)- rouleau de la laine de chanvre	22
Figure.1.5	panneau de la laine de bois	23
Figure.1.6	Isolant d'origine animale. (a)- la laine de coton; (b)- plume de canard ; (c)- laine de mouton	23
Figure.2.1	Schéma de principe de la méthode Flash	29
Figure.2.2	Schéma de principe de la méthode du fil chaud	29
Figure.2.3	Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée	30
Figure.2.4	Plâtre sous forme de poudre blanche	32
Figure.3.1	Image d'une gousse ouverte du petit pois	35
Figure.3.2	Gousses du petit pois collectées	36
Figure.3.3	Gousses séchées	36
Figure.3.4	Fibres végétales obtenues après broyage	37
Figure.3.5	Sac du plâtre utilisé dans ce projet d'étude	38
Figure.3.6	Vue du moule d'échantillonnage	38
Figure.3.7	Opération de pesage ; (a)- masse du plâtre, (b)- masse des fibres végétales	39

Figure.3.8	Pipete pour le dosage d'eau	40
Figure.3.9	Préparation de la pâte ; (a)- mélange sec, (b)- mélange humide, (c)- pâte	40
Figure.3.10	Moule préparé à recevoir la pâte du composite	41
Figure.3.11	Pesage de l'ensemble à vide (sans pâte)	41
Figure.3.12	Pesage de l'ensemble en charge (avec pâte)	42
Figure.3.13	Démoulage et récupération de l'échantillon	42
Figure.3.14	Echantillon du composite plâtre/fibre végétale	43
Figure.3.15	Opération de centrage de l'échantillon	43
Figure.3.16	Coulage du mortier isolant sur la surface radiale	44
Figure.3.17	Démoulage et récupération du porte échantillon	44
Figure.3.18	Séchage des portes échantillons ; (a)- étuve, (b)- réglage de température, (c)- portes échantillons dans l'étuve	45
Figure.4.1	Unité de conduction thermique WL370	46
Figure.4.2	Description de la source chaude et froide de l'unité WL370	47
Figure.4.3	Description des résistances thermiques du dispositif D'expérimentation	48
Figure.4.4	Réglage du flux thermique appliqué	49
Figure.4.5	Echantillon du plâtre sans fibres végétales	50
Figure.4.6	Mise en place de l'échantillon 0% fibres sur l'unité WL370	50
Figure.4.7	Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 0% fibre)	51
Figure.4.8	Echantillon du composite plâtre / 5% fibre végétale	52

Figure.4.9	Mise en place de l'échantillon 5% fibres sur l'unité WL370	52
Figure.4.10	Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 5% fibre végétale)	53
Figure.4.11	Echantillon du composite plâtre / 10% fibre végétale	54
Figure.4.12	Mise en place de l'échantillon 10% fibres sur l'unité WL370	54
Figure.4.13	Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 10 % fibre végétale)	55
Figure.4.14	Echantillon du composite plâtre / 15% fibre végétale	56
Figure.4.15	Mise en place de l'échantillon 15% fibres sur l'unité WL370	56
Figure.4.16	Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 15 % fibre végétale)	57
Figure.4.17	Echantillon du composite plâtre / 20% fibre végétale	58
Figure.4.18	Mise en place de l'échantillon 20 % fibres sur l'unité WL370	58
Figure.4.19	Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 20 % fibre végétale)	59
Figure.4.20	. Echantillon du composite plâtre / 25% fibre végétale	60
Figure.4.21	Mise en place de l'échantillon 25 % fibres sur l'unité WL370	60
Figure.4.22	Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 25 % fibre végétale)	61
Figure.4.23	effet de la fraction des fibres sur la conductivité thermique du composite	62
Figure.4.24	Effet de la fraction des fibres sur la masse volumique du composite	63
Tableau.1.1	caractéristiques des isolants thermiques	24
Tableau.1.2	avantages et inconvénients des isolants thermiques	25

Symboles et Définition

Nomenclature :

Symbole	Définition	Unité
e	Epaisseur	m
K	coefficient de conductivité thermique	W/m.K
A	Section de passage	$\frac{m^2}{m}$
a	Diffusivité thermique	$\frac{m^2}{s}$
ρ	Masse volumique	$\frac{kg}{m^3}$
c_p	Chaleur spécifique	J/kg.k
T	Température	K
ΔT	Ecart de température	K
S	Surface	$\frac{m^2}{m}$
Q	Flux thermique	W
R^L	Résistance thermique du laiton	K/W
R^E	Résistance thermique de l'échantillon	K/W
K^L	Conductivité thermique du laiton	W/m.K
K^E	Conductivité thermique de l'échantillon	W/m.K

Abréviations

CMO	les composites à matrice organique
CMC	Les composites à matrice minérale (céramique)
CMM	les composites à matrice métallique



Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des illustrations graphiques et tableaux

Symboles et définition

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 : Généralités sur les isolants thermiques

1-1.Introduction	18
1-2. - Critères de choix d'un isolant thermique.....	18
1-3. Caractéristiques thermiques des isolants.....	19
1-4. Les isolants thermiques	20
1-4.1. Isolants d'origine minérale	20
1-4-2. Isolants synthétiques.....	20
1-4-.3. Isolants d'origine végétale.....	21
1-4-3.1.la ouate du cellulose.....	21
1-4-3.2.le chanvre.....	22
1-4.3.3 La laine de bois	23

Sommaire

1-4.4 Isolants d'origine animale	23
1-5. Caractéristiques des isolants thermiques.....	24
1-6. Avantages et inconvénients	25
Conclusion.....	25

Chapitre 2 : Matériaux composites à base de fibres végétales

2-1.Introduction.....	26
2-2.Notions sur les matériaux composites.....	26
2-2.1. Critère de performance d'un matériau composite	27
2-3. Typologie des matériaux composites.....	27
2-3.1.Selon la nature des constituants	27
2.3.2. Selon la forme des constituants.....	27
2-3.2.1.Les matériaux composites à particules	27
2-3.2.2.Les matériaux composites à fibres.....	28
2-4.Caractérisation des matériaux composites	28
2-4.1.Caractérisation mécanique	28
2-4.2.Caractérisation thermique.....	28
2-5.Composites plâtre/fibres végétales.....	30
2.5.1. Caractéristiques et comportement du plâtre.....	31
2-6. Utilisation du plâtre.....	32
2-6.1.Applications des composites de plâtre/fibres.....	33
2-7.Les fibres végétales.....	33
2-7.1. Applications	33

Sommaire

2-7.2.Classification des fibres végétales	33
2-7.3.Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	34

Chapitre 3 : Préparation du composite plâtre/fibre végétale

3-1.Introduction.....	35
3-2.Présentation de la source végétale.....	35
3-3.Préparation de la fibre végétale.....	35
3-4.Présentation du plâtre utilisé	37
3-5.Protocole de préparation des échantillons	38
3-5.1.Dosage et préparation de la pâte du composite.....	39
3-5.2.Mise en forme de l'échantillon	41
3-5.2.1.Isolation thermique radiale de l'échantillon	43
3-5.2.1.Séchage du porte échantillon	45

Chapitre 4 : protocole d'expérimentation et interprétation des résultats.

4-1. Introduction	46
4-2. Présentation de l'unité de conduction (WL370).....	46
4-3. Protocole d'expérimentation et approche analytique	47
4-3.1. Approche analytique	48
4-4. Caractérisation thermique des échantillons	49
4-4.1.Échantillon du plâtre sans fibres végétales	50

Sommaire

4-4.2.Échantillon composite plâtre /5% fibre.....	52
4-4.3.Échantillon composite plâtre /10 % fibre	54
4-4.4.Échantillon composite plâtre /15 % fibre	56
4-4.5.Échantillon composite plâtre /20 % fibre	58
4-4.5.Échantillon composite plâtre /25 % fibre	59
4-5. Effet de la fraction des fibres sur la conductivité thermique.....	61
4-6. Effet de la fraction des fibres sur masse volumique.....	62

Conclusion et perspectives

Références bibliographique

Introduction générale

Introduction :

Au cours des dernières décennies, de nouveaux matériaux composites à base de fibres ont émergé dans le paysage industriel. Les contraintes environnementales et les nouvelles réglementations sur le recyclage des matériaux composites ont poussé les industriels à développer de nouveaux matériaux issus de ressources renouvelables.

L'introduction de fibres naturelles dans des matrices biodégradables ou non peut apporter des avantages notoires par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites ; faibles masse volumique, bonnes propriétés thermique, un prix de revient acceptable.

D'une manière générale, les parties les moins nobles de la plante, qui ne sont pas exploitées dans l'industrie textile sont le plus souvent utilisées dans ces composites. Elles améliorent le pouvoir d'isolation des matériaux.

D'un point de vue écologique, les exigences culturelles du petit pois sont convenables. C'est une ressource renouvelable d'avenir, sans conséquence néfaste sur l'environnement et la santé. Le nombre d'études concernant les nouveaux matériaux composites exploités dans la construction est en continuelle augmentation et leur développement représente un enjeu important. Ces travaux s'intéressent à l'élaboration d'agro-composites à base de végétaux utilisant les parties les moins nobles de la plante du petit pois. Etant conscient que les performances thermiques sont étroitement liés aux procédés de mises en œuvres ainsi que des constituants, il s'agit donc d'évaluer les propriétés thermiques de ces composites.

Objectif et cadre du projet d'étude :

L'objectif visé à travers cette étude, est d'analyser l'effet que présentent les fibres de la gousse du petit pois dans l'amélioration du pouvoir d'isolation de la matrice du plâtre. Afin d'atteindre à l'objectif suscité, une partie expérimentale a été effectuée au niveau du laboratoire de thermique visant à déterminer la conductivité thermique des différents échantillons composites préalablement préparés. .

Ce manuscrit débute par un premier chapitre, dans lequel les différents isolants thermiques sont succinctement présentés. Une récapitulation de leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs caractéristiques est explicitement faite en fin du chapitre. Dans le deuxième chapitre, des généralités sur les matériaux composites utilisés dans le domaine de construction bâtiment ainsi qu'une étendue sur les fibres naturelles sont exposées.

Introduction générale

A travers le troisième chapitre, une présentation de la démarche de mise au point et préparation des échantillons composites plâtre/fibres végétales est faite, tout en introduisant les différentes étapes suivies.

Dans le quatrième chapitre, on s'est focalisé à présenter le protocole d'expérimentation adopté dans l'évaluation de la conductivité thermique des différents échantillons composites, en se basant sur l'approche analytique développée. Dans le même chapitre, les résultats expérimentaux relatifs à chaque échantillon sont présentés en graphes et interprétés à l'issue de chaque processus d'expérimentation. Une synthèse des différents résultats obtenus est présentée dans une conclusion générale avec les perspectives envisagées.

1.1. Introduction :

L'isolation thermique vise à conserver la chaleur à l'intérieur des espaces de vie, en l'empêchant de s'évacuer des logements chauffés en hiver ainsi de se pénétrer à l'intérieur en été. En d'autre terme, elle joue le rôle de barrière thermique entre les milieux en contact thermique en minimisant les déperditions de chaleur. Une bonne isolation, participe efficacement dans le confort des espaces thermiquement conditionnés et permet de faire des économies importantes en énergie. L'investissement dans le domaine d'isolation thermique est promoteur car, son coût est amorti en quelques années mais par la récupération d'environ la moitié de notre facture énergétique, suite aux déperditions thermiques.

L'isolation thermique d'un immeuble, doit être réalisée en priorité au niveau des zones où la déperdition est importante. En générale l'isolation thermique des bâtiments désigne l'ensemble des moyens mis en œuvre afin de limiter les transferts des calories (chaud) et frigorifiques (froid) [1]

1.2. Critères de choix d'un isolant thermique :

Lors du choix de matériau d'isolation, il est intéressant, du point de vue éco-construction (construire à moindre coût), de ne pas se limiter seulement aux performances thermiques du matériau. Le choix d'un isolant devrait se faire sur la base des critères suivants :

- ✚ Propriétés thermiques : elles sont généralement décrites par des notions telles que la conductivité thermique ($W / m.K$) et la diffusivité thermique (m^2 / s). Plus la conductivité d'un matériau est faible plus son pouvoir d'isolation est important. De plus, la diffusivité thermique qui est fonction de la conductivité, la masse volumique et la chaleur spécifique du matériau représente la vitesse à laquelle la température de surface d'un matériau varie. Alors un matériau de faible diffusivité thermique présente une bonne caractéristique d'isolation thermique.
- ✚ Propriétés techniques : dans cette catégorie de propriétés s'affichent ; le comportement au feu (point d'inflammabilité), la perméabilité à la vapeur

d'eau (porosité), le comportement à l'humidité, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps (l'isotropie) ainsi que l'isolation acoustique.

- ✚ Propriétés environnementales : cet ensemble de propriétés englobe les paramètres caractéristiques qui présentent un impact nocif sur l'environnement durant le cycle de vie d'un matériau isolant. En outre on cite ; l'émission des gaz à effet de serre, la génération des gaz acidifiants, le pouvoir toxique à l'eau et aux êtres humains.
- ✚ Propriétés économiques : elle introduit le coût du matériau et compris son extraction, sa fabrication, son transport ainsi que de sa mise en œuvre. En d'autre terme, elle traduit le prix de revient du matériau en question [2].

1.3. Caractéristiques thermiques des isolants :

Les principales caractéristiques thermiques d'un isolant thermique sont illustrées ci-dessous :

- ✚ Résistance thermique (R_T): un matériau isolant doit présenter une très bonne résistance thermique. Cette dernière est inversement proportionnelle à la conductivité thermique et proportionnelle à l'épaisseur de l'isolant. Elle est traduite par le rapport $\left(\frac{e}{KA}\right)$.
- ✚ Conductivité thermique (K): traduite par la quantité de chaleur transmise à travers un matériau par unité de temps. Plus sa valeur est petite, plus le matériau est isolant.
- ✚ Diffusivité thermique (a) : la diffusivité thermique d'un matériau apparait comme le rapport entre de la conductivité thermique et la chaleur volumique $\left(\frac{K}{\dots C_p}\right)$.
- ✚ Capacité thermique (C) : elle représente la capacité du matériau à stocker de la chaleur, traduisant sa capacité d'inertie thermique en fonction du temps[3,9].

1.4. Les isolants thermiques :

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

1.4.1. Isolants d'origine minérale :

Les isolants qui font partie de cette catégorie sont issues de matériaux minéraux. La laine de verre et laine de roche ; sont aujourd'hui, les isolants les plus utilisés. Ce sont des fibres artificielles de la famille des silicates. Ils présentent de bonnes performances d'isolation mais leur tenue dans le temps est loin d'être excellente. Sur le plan environnemental, leur coût énergétique est élevé. Dans cette même catégorie s'affiche l'argile expansée ; il s'agit des billes brutes de différentes granulométries produites par cuisson de granulats d'argile crue à 1100°C dans des fours rotatifs. [3]

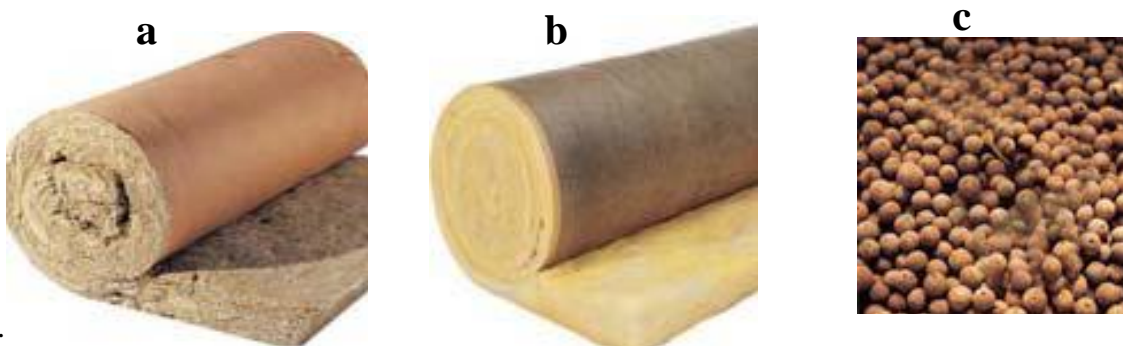


Figure.1.1 : Isolants d'origine minérale. (a)- laine de roche ; (b)- laine de verre ; (c)- argile expansée.

1.4.2. Isolants synthétiques :

Cette catégorie d'isolant est produite à partir du processus de synthèse des produits hydrocarbures ou de quelques alliages métalliques. Les polystyrènes expansés sont les isolants synthétiques les plus utilisés ; ils sont obtenus à partir d'hydrocarbures expansés à la vapeur d'eau et au pentane. Leur utilisation en panneaux dans la construction des parois d'immeubles est très recommandée. En deuxième position s'affiche la mousse polyuréthane obtenu à l'aide de catalyseurs et d'agents propulseurs à base d'iso cyanates. Ils trouvent leur utilisation dans l'isolation des murs extérieurs

des immeubles ainsi que les terrasses. Au deux précédents isolants s'ajoute ; les réflecteurs (film multicouches) et le verre cellulaire. Ce dernier est obtenu par fusion des matières premières du verre (sable siliceux, feldspath, carbonates de calcium et de sodium) et de verre de récupération et ajout de carbone suivi d'un refroidissement. [4]

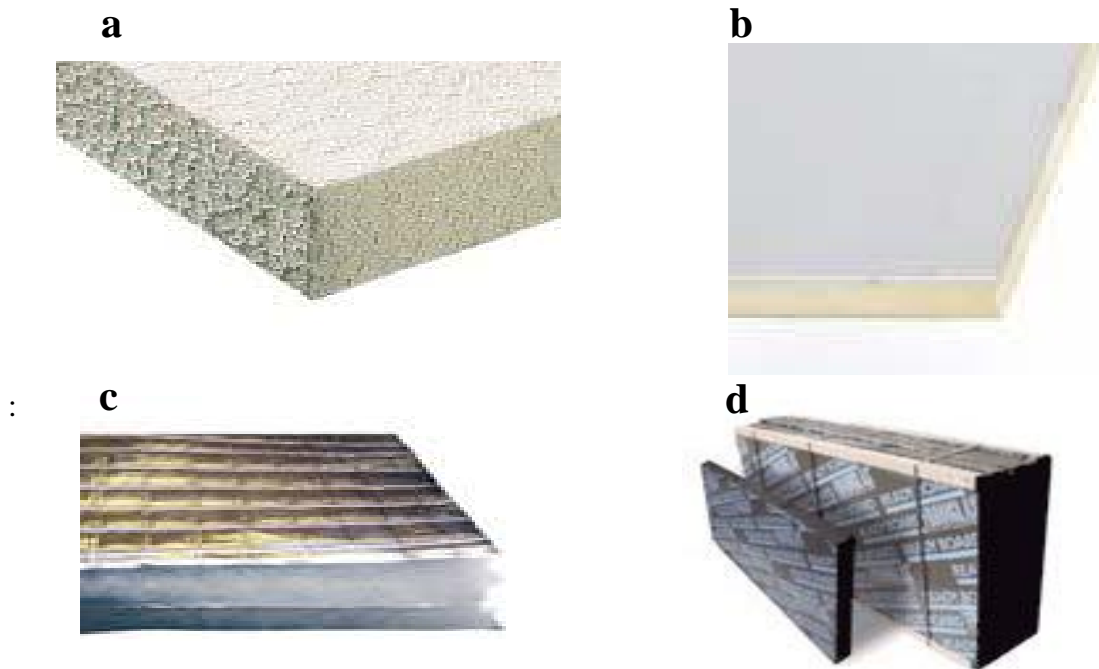


Figure.1.2 : Isolants d'origine synthétique. (a)- polystyrène ; (b)- polyuréthane ; (c)- réflecteurs ; (d)- verre cellulaire.

1.4.3. Isolants d'origine végétale :

Cette catégorie d'isolant répond parfaitement aux principaux critères d'éco-construction. Ils sont peu énergivores (consomment moins d'énergie lors de leur fabrication), de plus, ils sont biodégradables. Ces matériaux se présentent sous diverses formes : vrac, laine, conglomérat, rouleaux, panneaux[3].

1.4.3.1. La ouate de cellulose :

La ouate de cellulose est issue du recyclage du papier, principalement à partir de journaux neufs invendus et des coupes de papier neuf d'imprimerie. Sa mise au point passe d'abord par le broyage et défibrage du papier, puis on le stabilise par incorporations de divers agents (gypse, sel) afin de renforcer sa résistance au feu ainsi que sa stabilité structurale. Ce type d'isolant est d'une utilisation polyvalente [3].

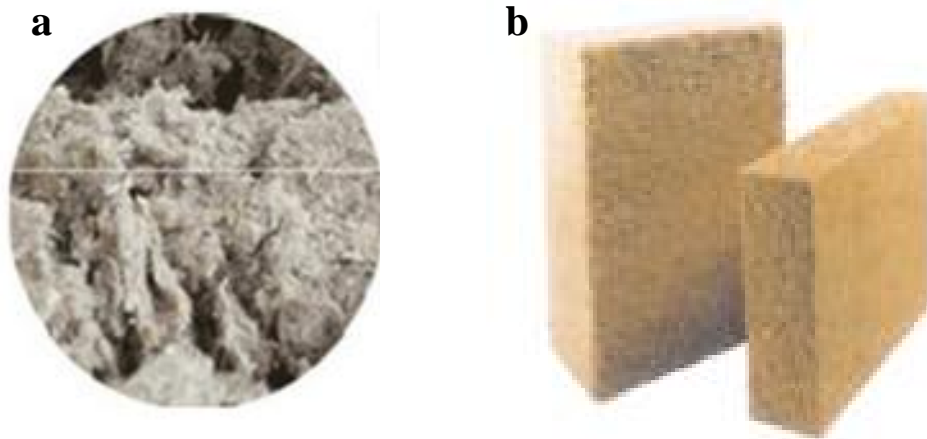


Figure.1.3 : la ouate de la cellulose. (a)- matériau brut (papier broyé et traité) ; (b)- panneaux fabriqués en ouate de cellulose.

1.4.3.2. Le chanvre :

Le chanvre est une plante annuelle cultivée, elle présente deux types de fibres : longue pour les tissus, cordage, papeterie et les isolants en laine de chanvre (panneaux semi rigides et rouleaux) et courte pour les granulats chènevotte.[3]

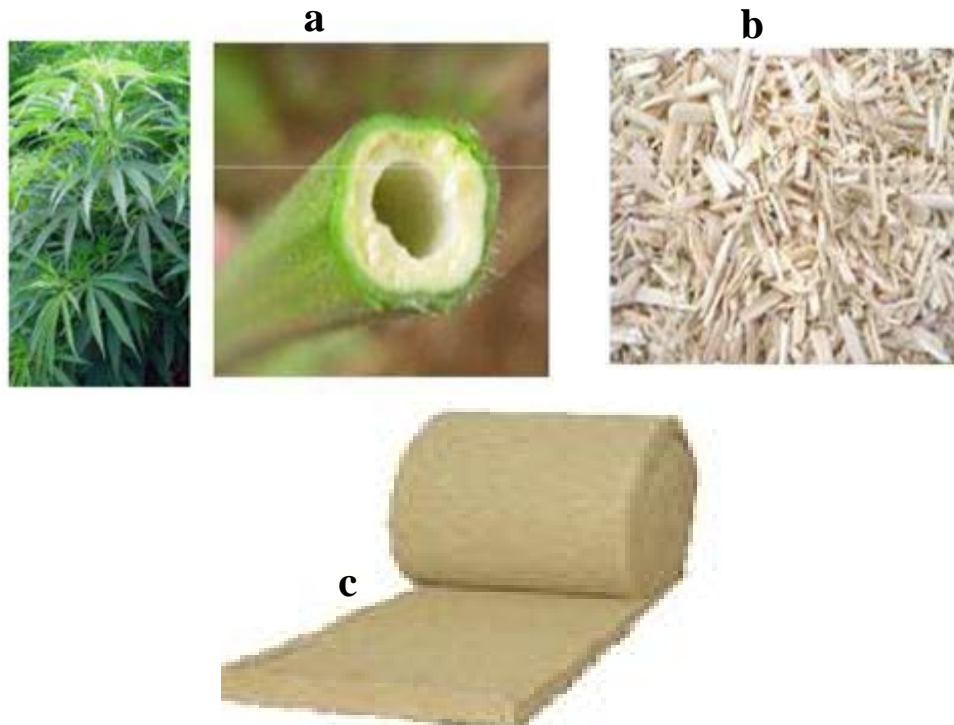


Figure.1.4 : le chanvre. (a)- plante du chanvre et coupe de son tronc ; (b)- chènevotte ; (c)- rouleau de la laine de chanvre.

1.4.3.3. La laine de bois :

Ce type d'isolant est obtenu à partir des déchets de bois compressés, liés par la lignine (colle naturelle du bois). Il se présente sous différentes formes à savoir ; panneaux mous, panneaux composites multicouches et panneaux semi rigides bitumés. Il trouve son utilisation comme isolant dans les sous toitures et les parois verticales des murs [5].



Figure.1.5 : Panneau de la laine de bois.

1.4.4. Isolants d'origine animale :

La source de cette catégorie d'isolants est la laine d'animaux ainsi que leurs peaux. Les plus utilisés parmi ces isolants sont la laine de mouton, la laine de coton et la plume de canard. Ils se présentent sous formes de rouleaux, panneaux semi rigides et feutre pour isolation phonique. L'isolant pour le bâtiment à base de plume de canard est une innovation permettant de valoriser des déchets d'abattoirs. Les isolants sont fabriqués à partir de 70% de plume de canard, de 10% de laine de mouton pour une meilleure élasticité et de 20% de fibre textile pour la stabilité.[3]



Figure.1.6 Isolant d'origine animale. (a)- la laine de coton; (b)- plume de canard ; (c)- laine de mouton.

1.5. Caractéristiques des isolants thermiques :

Le tableau (1.1) récapitule les principales caractéristiques que présentent quelques isolants thermiques de différentes origines [6].

Tableau.1.1 :Caractéristiques des isolants thermiques.

Origine	Désignation	utilisation	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.°c)	Comportement au feu	Perméabilité à la vapeur d'eau
minérale	Laine de roche	<i>polyvalente</i>	40	0.04	<i>inflammable</i>	<i>perméable</i>
	Laine de verre	<i>polyvalente</i>	25	0.035	<i>inflammable</i>	<i>Peu sensible</i>
	Argile expansée	<i>Planchers et murs</i>	300 à 500	0.103 à 0.0108	<i>inflammable</i>	<i>Variable en fonction du liant</i>
synthétique	polystyrène	<i>Paroi des murs</i>	20 à 30	0.035	<i>Moyennement inflammable</i>	<i>Imperméable</i>
	polyuréthane	<i>Chapes et terrasses</i>	30 à 40	0.025	<i>Moyennement inflammable</i>	<i>Imperméable</i>
	Verre cellulaire	<i>Toitures et terrasses</i>	100 à 165	0.035 à 0.048	<i>incombustible</i>	<i>Parfaitement imperméable</i>
Végétale	Ouate de cellulose	<i>Parois légères</i>	35 à 45	0.035 à 0.040	<i>Difficilement inflammable</i>	<i>hydrophile</i>
	Chanvre	<i>polyvalente</i>	25 à 35	0.039	<i>Difficilement inflammable</i>	<i>hydrophile</i>
	Laine de bois	<i>Parois verticales</i>	160 à 260	0.042 à 0.072	<i>inflammable</i>	<i>hydrophile</i>
Animale	Laine de coton	<i>polyvalente</i>	25 à 30	0.040	<i>inflammable</i>	<i>Très hydrophile</i>
	Laine de mouton	<i>polyvalente</i>	10 à 30	0.035 à 0.045	<i>inflammable</i>	<i>Très hydrophile</i>

1.6. Avantages et inconvénients :

L'application des différents isolants thermiques dans les divers domaines de construction a mis en jeu, la nécessité de faire un choix adéquat de l'isolant à utiliser en se basant sur ses qualités d'isolation présentées ainsi que l'ensemble d'inconvénients. Dans le tableau ci dessous, une récapitulation des principaux avantages et inconvénients de chaque origine d'isolant sont explicitement énumérées.

Tableau.1.2 : Avantages et inconvénients des isolants thermiques.

	Avantages	inconvénients
Isolants d'origine minérale	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Disponibilité. ➤ Coût faible (prix de revient) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ressource non renouvelable. ➤ Difficilement recyclable.
Isolants d'origine synthétique	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bonne performance thermique. ➤ Coût admissible. ➤ Dégagement des gaz toxiques. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ressource non renouvelable. ➤ Non recyclable.
Isolants d'origine végétale	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ressource renouvelable. ➤ Bon pouvoir hygroscopique. ➤ Sans effet sur la santé. ➤ Facilité de pose. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût élevé. ➤ Cycle de vie restreint.
Isolants d'origine animale	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Matériau durable. ➤ Bon pouvoir hygroscopique. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût élevé. ➤ Disponibilité limitée.

2.1. Introduction :

Les fibres naturelles sont de plus en plus employées pour le renforcement des propriétés thermo physiques des matériaux de construction. si ces fibres possèdent généralement des propriétés inférieures aux fibres inorganiques classiques, elles possèdent en revanche plusieurs avantages dont un coût de revient beaucoup plus faible. Cependant, ces fibres étant d'origine naturelle, il existe une grande variabilité de propriétés pour une même espèce. L'utilisation de fibres naturelles est en expansion dans le domaine du bâtiment afin de remplacer les matériaux d'isolation classiques par des matériaux naturels trouve un grand champ d'application. Dans ce cas, ces fibres s'utilisent seules, soit en combinaison avec d'autres matériaux, afin de créer des matériaux de gros œuvre ou de finition possédant une résistance thermique plus élevée. Dans d'autres secteurs, les fibres naturelles sont associées à des polymères afin de former des matériaux composites dont les applications sont croissantes que ce soit dans le domaine de l'électronique, de l'automobile ou du bâtiment. Cependant, le comportement thermique de ces matériaux doit également dans certains cas être pris en compte, soit parce que l'on souhaite que le matériau puisse évacuer de la chaleur ou bien au contraire parce que l'on souhaite que celui-ci possède de bonnes propriétés isolantes [7].

2.2. Notions sur les matériaux composites :

Un matériau composite est un matériau composé de deux ou de plusieurs matériaux différents. Le but d'associer plusieurs matériaux est d'en concevoir un ayant les meilleures caractéristiques souhaitées, qu'ils n'ont pas séparément.

Les matériaux composites sont généralement constitués de fibres ou de formes dérivées en phase dans une matrice. Ils peuvent être de nature organique, métallique ou céramique. La matrice a pour but de maintenir la cohésion, l'orientation et la protection des fibres ainsi que de transmettre les sollicitations.

Ils peuvent être classés selon plusieurs manières (BERTHELOT, 1992) :

✚ Suivant les constituants : en fonction de la forme des constituants, les matériaux composites peuvent être classés en deux familles :

- Les matériaux à fibres : les renforts se trouvent sous forme de fibres continues, Coupées ou courtes. Les caractéristiques mécaniques du matériau dépendent de L'arrangement des fibres ainsi que de leur nature [4].
- Les matériaux à particules : les renforts se trouvent sous forme de particules, à

L'inverse les particules n'ont pas de dimension privilégiée. Différents types de Particules existent et seront choisis en fonction du gain souhaité. Les particules Peuvent augmenter la rigidité, diminuer l'abrasion ou encore améliorer la tenue au feu du matériau.

- ✚ Suivant la nature des constituants : en fonction de la nature de la matrice les matériaux composites sont classés : composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale [4,5].

2.2.1. Critère de performance d'un matériau composite :

Les performances d'un matériau composite résultent en général des propriétés des Matériaux constituants, de leur distribution géométrique, de leurs interactions. Un Composite peut donc se caractériser par la nature et les propriétés de ses constituants, par la géométrie et la distribution du renfort ainsi que par la nature de l'interface matrice renfort. Le renfort est caractérisé par sa forme, sa taille, sa concentration, sa disposition ou orientation. Cette concentration se mesure en général par la fraction volumique ou Par la fraction massique [1]

2.3. Typologie des matériaux composites :

2.3.1. Selon la nature des constituants :

Trois grandes classes de matériaux composites existent selon la nature de la matrice ; les composites à matrice organique (CMO) de grande utilisation industrielle ; les composites à matrice minérale (céramique) (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire, le militaire, et le freinage (freins carbone), enfin les composites à matrice métallique (CMM) dont les applications sont les mêmes que les (CMC).

2.3.2. Selon la forme des constituants :

En fonction de la forme des constituants, les matériaux composites se regroupent en deux grandes classes : les matériaux composites à particules ou à fibres [4,8].

2.3.2.1 Les matériaux composites à particules :

Cette catégorie renferme les composites dont le renfort est sous forme de particules. La rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait et autres sont les caractéristiques souvent recherchées lorsque les particules sont utilisées comme renfort réduisant ainsi le coût du matériau.

2.3.2.2. Les matériaux composites à fibres :

Il s'agit des composites dont le renfort est sous forme de fibres. Elles peuvent être longues ou bien courtes. L'arrangement des fibres et leurs orientations permettent d'avoir des matériaux à la carte avec des propriétés mécaniques spécifiques. La nature des constituants, leurs proportions et orientations constituent des leviers pour varier à volonté les caractéristiques mécaniques et physiques en fonction des performances recherchées.

2.4. Caractérisation des matériaux composites :

La caractérisation d'un matériau composite est un examen qui utilise les méthodes et moyens requis pour cerner les particularités, les possibilités pour un usage donné [1]. Nous exposons dans ce paragraphe, les principales méthodes utilisées pour connaître ou prévoir le comportement thermique qu'un matériau composite pourrait avoir en service.

2.4.1. Caractérisation mécanique :

Le dimensionnement d'une structure exige la connaissance du matériau et ses caractéristiques mécaniques, elles sont déterminées à l'aide d'essais mécaniques. Les plus utilisés sont notamment, les essais de traction, de flexion et de compression.

2.4.2. Caractérisation thermique :

La connaissance des caractéristiques thermiques d'un matériau de construction est indispensable pour permettre de juger le degré de son application. Pour cela, dans les laboratoires, ingénieurs et chercheurs ont recours à diverses méthodes pour évaluer les propriétés thermiques d'un matériau en fonction de leurs besoins. Les plus classiques utilisent des capteurs de température de contact comme la méthode Flash, celle du fil chaud, de la plaque chaude gardée, des sondes thermiques.

- **Méthode Flash** : Un échantillon à faces parallèles (Figure.2.1), initialement isotherme, est soumis sur l'une de ses faces à une impulsion thermique de courte durée et uniforme. Un thermocouple en contact avec la face opposée au flash permet d'enregistrer l'élévation de sa température à partir de l'émission du flash sur la face avant. Une modélisation du transfert de chaleur permet d'estimer la diffusivité thermique du matériau.

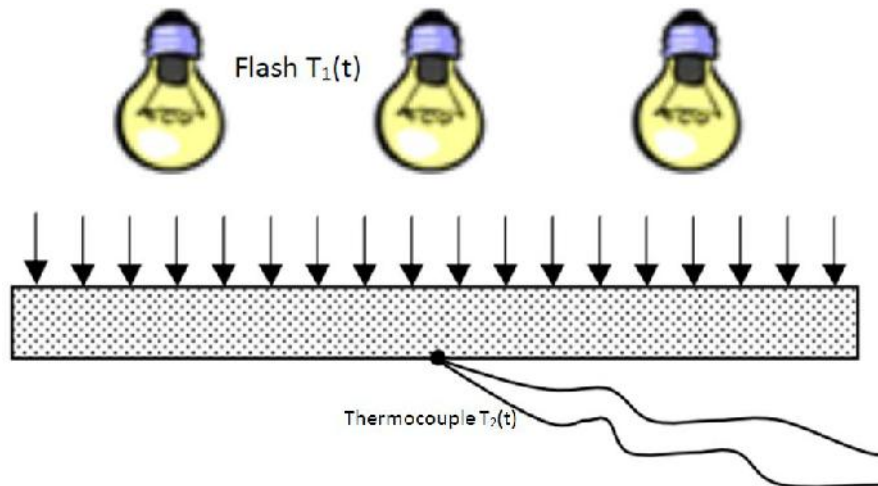


Figure.2.1. : Schéma de principe de la méthode Flash.

➤ **Méthode du fil chaud** : la méthode du fil chaud a pour objectif d'évaluer la conductivité thermique (Norme ISO 8894), à partir de l'élévation en température de la sonde chaude. Elle consiste donc, à placer une sonde chauffante entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser, d'épaisseurs supposées infinies et initialement isothermes, à l'exemple de la méthode du fil chaud que montre la Figure.2.2. ensuite on applique un flux de chaleur constant à la sonde chauffante et on relève l'évolution de la température de cette sonde. On considère que le transfert de chaleur autour de la sonde et au centre de l'échantillon est radial. Par une modélisation de l'évolution de la température à ce lieu, on estime la caractéristique thermique du matériau. Les méthodes à sonde sont très adaptées à des matériaux très diffusifs [1].

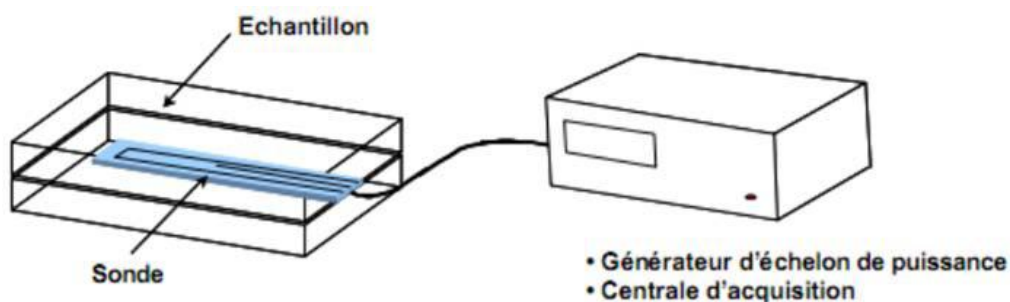


Figure.2.2. : Schéma de principe de la méthode du fil chaud.

➤ **Méthode de la plaque chaude gardée** : La plaque chaude produisant par effet Joule une puissance de chauffe Q_0 uniforme et constante est placée entre deux échantillons identiques du matériau à tester (Figure.2.3). Les faces extérieures des échantillons sont

chacune en contact avec une plaque de refroidissement en matériau assez conducteur et maintenue à température inférieure à celle de la plaque chaude. Une température de garde T_1 est entretenue autour de la plaque chaude pour garantir un transfert unidirectionnel vers les matériaux à mesurer [1]. Les thermocouples placés sur les deux faces des échantillons détectent les variations de température $\Delta T \uparrow$ et $\Delta T \downarrow$ et la conductivité thermique peut être estimée par l'équation (2.1) pour un volume donné $e \times s$ de la plaque chauffante. Cette méthode qui donne une précision de la mesure assez bonne ne s'applique qu'aux isolants dont on peut négliger les résistances de contact par rapport à la résistance du matériau.

$$K = \frac{e \times Q_0}{s(\Delta T \uparrow + \Delta T \downarrow)} \quad 2.1$$

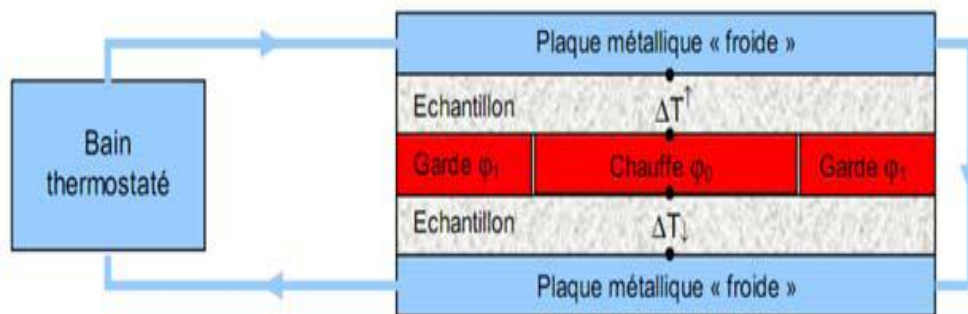


Figure.2.3. : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée.

2.5. Composites plâtre/fibres végétales:

Le plâtre comme il a été déjà souligné est un matériau extrêmement fragile. Sa Disponibilité et ses vertus avérées permettent de s'y pencher pour chercher les possibilités de réduire l'effet de ce principal défaut (fragilité) ainsi que d'améliorer ses caractéristiques thermiques en l'occurrence ; la conductivité thermique. Il est avéré que le renforcement par des fibres apporte une importante réduction de cette fragilité. Des études sont donc menées à travers le monde entier pour le renforcer avec des fibres prises localement. La fabrication du composite à matrice plâtre utilise la procédure que de mise en œuvre du plâtre ; il est question

en général d'avoir les fibres mélangées dans la pâte de plâtre, de verser le mélange dans un moule et de démouler après la prise.

Ils existent plusieurs composites de plâtre/fibre végétales, on cite :

- a- Composite plâtre / fibres de sisal.
- b- Composite plâtre / fibres de bois.
- c- Composite plâtre / fibres synthétiques.

2.5.1. Caractéristiques et comportement du plâtre :

- ❖ **Résistance thermique** : Le plâtre est un mauvais conducteur de la chaleur et donc un bon isolant thermique. Cette propriété est due à la structure poreuse du plâtre, qui résulte du départ de l'eau lors du séchage. L'isolation thermique est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique K qui varie en fonction de la densité d'une valeur de 0.4 à 0.6 W/m.°C.
- ❖ **Résistance mécanique** : La dureté du plâtre varie d'environ 55 à 80 sur l'échelle de dureté Shore. Elle dépend de la proportion d'eau utilisée lors du gâchage, de la qualité de cette eau et du plâtre et de la température et vitesse de séchage.
- ❖ **Fabrication**: Le plâtre est un mélange pulvérulent préparé, à partir de la calcination du gypse, roche sédimentaire rassemblées en masses énormes de pierre à plâtre que l'on retrouve parfois sous forme de cristaux. La pierre est généralement extraite de mines ou de carrières souterraines puis cuite et ensuite cassée, broyée et moulue pour donner la poudre blanche du plâtre comme indiqué sur la figure.2.4.
- ❖ **Comportement mécanique** : Le plâtre est un matériau en général dur et fragile, ses caractéristiques mécaniques dépendent du type de semi hydrate ou de la mise en œuvre principalement du taux de gâchage et de l'effet de masse. Les informations disponibles dans la littérature relatives à son comportement mécanique connaissent conséquemment une variation selon les paramètres utilisés.
- ❖ **Comportement hygrométrique** : Le plâtre est très sensible à l'eau. L'intérêt de l'étude de son comportement hygrométrique se trouve dans l'examen de son influence sur les performances structurelles par exemple. On en conclut que le plâtre absorbe davantage d'eau pour un taux d'humidité relative important. L'étude du plâtre en présence de l'eau est aussi justifiée pour comprendre son comportement vis-à-vis de l'humidité dans des applications fonctionnelles.



Figure.2.4. : Plâtre sous forme de poudre blanche.

❖ **Comportement thermique et au feu :** Dès les premières utilisations du plâtre, sa tenue vis-à-vis au feu a été découverte. Il est présentement connu que la température du plâtre reste inférieure à 140°C tant que toute l'eau n'est pas libérée et vaporisée, que sous l'action du feu sur le plâtre ne donne naissance à aucun gaz ou vapeur de caractère toxique, corrosif ou asphyxiant, aucune fumée ni de produit susceptible d'activer le feu. Il est donc classé comme coupe feu selon le critère d'isolation.

2.6. Utilisation du plâtre:

Le plâtre a des utilisations assez diversifiées. Employé dans la réalisation des logements, comme plafonds ou doublage des Murs, il participe à l'amortissement des bruits d'impact et aériens. Les salles de cinéma, les aéroports, les studios d'enregistrement et les hôpitaux sont des lieux qui bénéficient favorablement de cette caractéristique. Le plâtre est très utilisé dans la décoration intérieure grâce à sa capacité de se mouler sur toutes les formes et à se prêter à tout type de finition. Il laisse passer la vapeur d'eau, régule le degré d'hygrométrie dans le cas de fortes fluctuations. De plus, il absorbe l'humidité de l'air quand il fait chaud et la restitue quand il fait froid. Associé à des isolants (polystyrène expansé, laine minérale, film chauffant en Plafond), il participe au confort thermique des enceintes.

2.6.1. Applications des composites de plâtre/fibres :

Toute la recherche sur le renforcement du plâtre a pour objectif de diminuer sa fragilité en diminuant sa conductivité thermique. Les applications des plâtres renforcés de fibres sont donc évidentes. Il s'agit de pouvoir les utiliser dans tous les domaines de construction où le plâtre est demandé avec des possibilités de sollicitations mécaniques et thermiques élevées : les cloisons, les plafonds, etc. [1,7]

2.7. Les fibres végétales :

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétales dans la construction remonte aux années où l'on fabriquait des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du ciment, plâtre et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétale.

2.7.1. Applications :

L'utilisation des fibres végétales est croissante dans les secteurs du bâtiment, des transports et des loisirs. Elles peuvent être utilisées seules comme la ouate de cellulose ou la laine de chanvre qui servent d'isolants dans le bâtiment. Ou alors, elles peuvent être utilisées en association avec un matériau minéral formant ainsi un matériau composite à base de fibres végétales.

2.7.2. Classification des fibres végétales :

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance d'origine en l'occurrence ; les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

Les fibres de feuille : Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer. Ces fibres sont dures et rigides.

Les fibres de tige : Les fibres de tige sont obtenues des tiges de plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet et en toute longueur.

Les fibres de bois : Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes.

Les fibres de surface : Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains.

2.7.3. Avantages et inconvénients des fibres végétales :

Avantages : Les fibres végétales combinent plusieurs avantages. Elles constituent tout d'abord une *ressource biodégradable* locale. De plus, elles présentent un *faible coût* : jusqu'à neuf fois moins chères que les fibres de verre et jusqu'à cinq cent fois moins chères que les fibres de carbone. Elles sont issues des parties *renouvelables* des plantes. un *faible impact environnemental* (six fois moins énergivore que les fibres de verre et douze fois moins que les fibres de carbone) que présentent. Enfin, elles possèdent une *faible densité* ce qui leur confère des propriétés spécifiques (grandeurs physiques ramenées à la densité) comparables à celles des fibres de verre dont elles constituent une alternative.

Inconvénients : Les fibres végétales présentent aussi un certain nombre d'inconvénients qui découlent principalement du caractère naturel de ces fibres. Par conséquent, elles présentent une *forte variabilité des propriétés* pour une même espèce en fonction de plusieurs facteurs comme le climat, la densité de semis, l'âge de la plante, etc. A titre d'exemple, la teneur en cellulose – principal composant d'une fibre végétale dont la quantité influe sur les propriétés de la fibre – varie en fonction de l'âge de la plante.

3.1. Introduction :

Comme il a été traité dans le chapitre précédent, le composite plâtre/ fibre végétale demeure comme substitut de grande utilité dans le domaine de l'éco- construction. Dans cette optique, un travail d'investigation visant à mettre au point un nouveau composite plâtre / fibre végétale a été entrepris afin de mettre au point un composite dont les caractéristiques thermiques sont requises. Il s'agit d'un matériau composé du plâtre et d'une fibre végétale issue de la gousse du petit pois.

L'idée d'utiliser ce type de fibre est fondée sur le rôle majeur que joue cette gousse, afin de garantir d'une part ; une isolation thermique des graines du petit pois et d'autre part, sa participation à préserver une ambiance intérieure favorable à leur développement. En se basant sur ce constat, la gousse du petit pois a été choisie comme source de fibres végétales dans cette étude.

3.2. Présentation de la source végétale :

Le petit pois (*Pisum sativum*) comme toutes les papilionacés est un légume porté à l'intérieur d'une gousse s'ouvrant par deux fentes mais formé par un seul carpelle. Les graines de couleur verte se disposant l'une après l'autre tout au long de la partie intérieure de la gousse comme schématisé sur la figure.3.1.



Figure.3.1 : Image d'une gousse ouverte du petit pois.

3.3. Préparation de la fibre végétale :

La fibre de la gousse du petit pois est obtenue à travers un processus de préparation qui tient compte de la nature de cette source ainsi que ses caractéristiques végétales. Les étapes de préparations se sont déroulées dans l'ordre chronologique suivant :

A/ Collecte de la gousse : une collecte d'une quantité de la gousse du petit pois a été effectuée. La masse de la quantité collectée (figure.3.2) est déterminée à l'aide d'une balance électronique.



Figure.3.2 : Gosses du petit pois collectées.

B/ séchage : la quantité collectée est en suite séchée dans une ambiance à l'air libre sous une température de 35°C. La durée de séchage s'est étalée à 8 jours (192 heures) afin d'enregistrer une très faible différence de masse soit 0.35%. La figure.3.3 illustre l'état de la gousse séchée.



Figure.3.3 : Gosses séchées.

Il est à noter que le procédé de séchage naturel a été adopté afin d'éviter le séchage forcé (étuves et fours) qui peut engendrer une défaillance de la structure des fibres végétales (risque de s'enflammer).

C/ broyage de la gousse : à l'aide d'un mixeur à axe vertical, la masse séchée est broyée pendant 15 minutes afin d'atteindre une quasi homogénéité de la taille des fibres végétales issues de cette opération. Une même taille de fibres végétale est difficilement à obtenir suite à la microstructure aléatoire de chaque gousse. Une vue de ces fibres est illustrée sur la figure.3.4.



Figure.3.4 : Fibres végétales obtenues après broyage.

3.4. Présentation du plâtre utilisé :

Le plâtre utilisé dans la préparation de notre matériau composite est fabriqué par l'entreprise algérienne MANHARGYPS, livré soit en sac (figure.3.5) soit en vrac. Selon la fiche technique fournie par le même fabricant, le plâtre en question possède les propriétés suivant :

- masse volumique de 1485 kg/m^3 .
- Conductivité thermique de $0.62 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$
- Résistance au feu excellente.
- Aucun effet nocif sur l'environnement.



Figure.3.5 : Sac du plâtre utilisé dans ce projet d'étude.

3.5. Protocole de préparation des échantillons :

Les échantillons d'expérimentation du composite en question sont mis en forme permettant leur montage adéquat sur l'unité d'expérimentation GUNT WL 370, disponible au niveau du laboratoire de thermique de la faculté des sciences et technologie. La forme de l'échantillon est cylindrique dont le diamètre de base est de 25 mm et une hauteur de 30 mm donnant un volume de 14.71 cm^3 . Afin de réaliser cette forme exigée, on a conçu un moule en acier doux d'un diamètre intérieur de 25 mm et une profondeur de 30 mm. Ce moule comme indiqué sur la figure.3.6 est composé de deux mâchoires identiques qui se fixent entre elles par un anneau de serrage.



Figure.3.6 : Vue du moule d'échantillonnage.

3.5.1. Dosage et préparation de la pâte du composite :

La première étape dans la préparation d'un échantillon est la détermination des dosages massiques des différents éléments qui constituent le mélange. Notre composite est constitué de trois éléments qui sont respectivement ; le plâtre, la fibre de la gousse et l'eau. Alors, pour un composite d'un pourcentage donné de fibre, on fixe une masse donnée du mélange sans la masse d'eau et puis on calcule la masse du plâtre ainsi que celle de la fibre végétale correspondant au pourcentage préalablement fixé. Les deux figures.3.7. (a) et (b) illustrent l'opération de pesage de la masse du plâtre et celle des fibres à l'aide d'une balance électronique. Dans cet échantillon d'exemple la masse du mélange est prise pour 30 g, répartie en 24 g de plâtre et 6 g de fibre donnant un composite plâtre/ fibres de 80/20 dont 80% ; est la fraction massique du plâtre et 20% la fraction massique des fibres végétales.

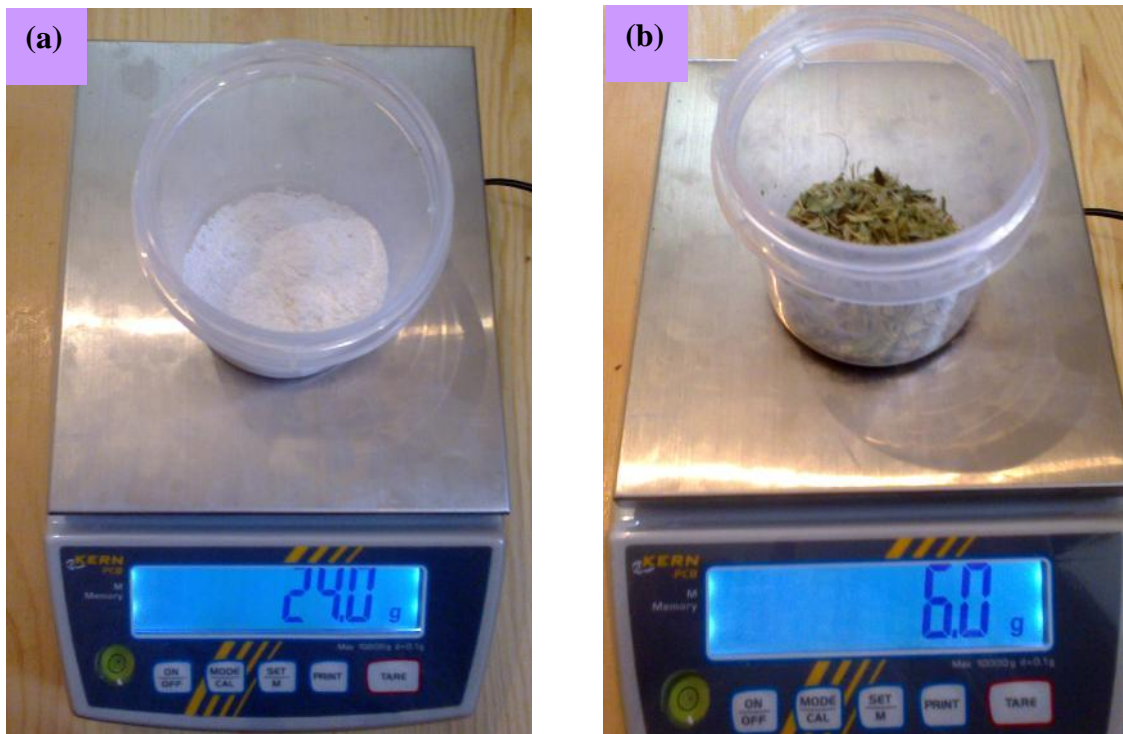


Figure.3.7 : Opération de pesage ; (a)- masse du plâtre, (b)- masse des fibres végétales

Il est à noter que le rapport massique eau sur plâtre E/P est maintenu constant à une valeur de 0.4 pour l'ensemble d'échantillons préparés. Le dosage en eau se fait par le biais d'une pipette graduée comme schématisé sur la figure.3.8.



Figure.3.8 : Pipete pour le dosage d'eau.

Une fois toutes les masses sont déterminées et mesurées, on procède à la préparation du mélange en versant les masses du plâtre et fibre dans un récipient (figure.3.9.a). Le mélange est ensuite malaxé à sec afin de l'homogénéiser (figure.3.9.b). La quantité d'eau est versée dans le mélange qui subit un malaxage humide en produisant une pâte (figure.3.9.c) prête à l'utilisation comme échantillon d'expérimentation.

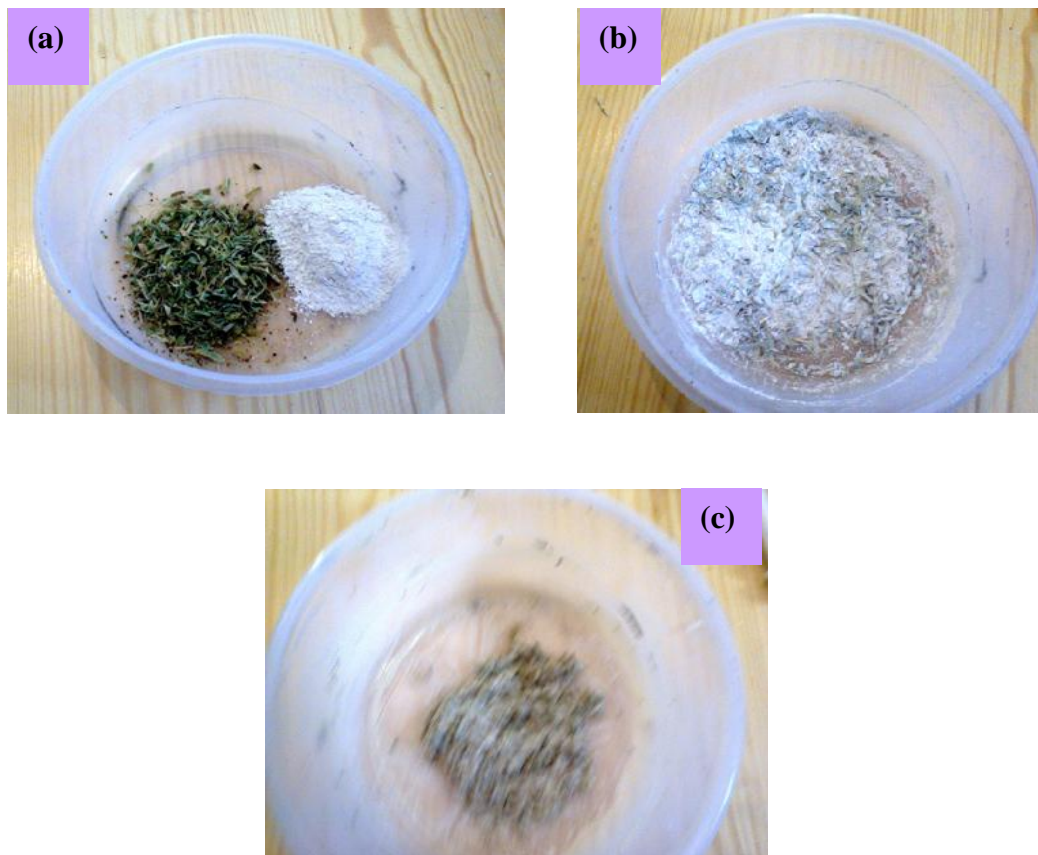


Figure.3.9 : Préparation de la pâte ; (a)- mélange sec, (b)- mélange humide, (c)- pâte.

3.5.2. Mise en forme de l'échantillon :

La pâte du composite précédemment préparée sera versée dans le moule dont les deux mâchoires sont serrées et la surface intérieure est couverte d'un film plastifié (figure3.10.). Ce dernier sert comme séparateur entre la pâte et la surface dure du moule, ce qui facilite l'opération de démoulage.



Figure.3.10 : Moule préparé à recevoir la pâte du composite.

Le moule est mis dans une cuvette en verre constituant un ensemble à vide (sans pâte). Cet ensemble est pesé (figure.3.11) avant remplissage en pâte afin de déterminer la masse de l'échantillon une fois le moule est rempli.



Figure.3.11 : Pesage de l'ensemble à vide (sans pâte).

Le remplissage du volume intérieur du moule en pâte du composite est effectué manuellement, tout en appliquant une certaine pression sur la pâte afin de chasser les vides et d'assurer un bon remplissage du moule. Il est à noter que cette opération du remplissage s'est fait sur la balance et une lecture directe de la masse est faite. La différence entre la masse affichée en charge (figure.3.12) et la masse à vide affichée (figure.3.11) représente la masse de l'échantillon du composite plâtre/ fibre végétale à l'état initial avant séchage.



Figure.3.12 : Pesage de l'ensemble en charge (avec pâte).

L'échantillon est séché à l'air libre en le mettant dans une ambiance dont la température varie entre 35°C et 40°C. Le processus de séchage est contrôlé par la mesure systématique de la masse de l'ensemble chaque 6 heures. Une fois la différence de masse devient inférieure à 0.1g, le processus de séchage est arrêté et l'échantillon est récupéré en démoulant les deux mâchoires du moule comme indiqué sur la figure.3.13.



Figure.3.13 : Démoulage et récupération de l'échantillon.

L'échantillon récupéré comme indiqué sur la figure.3.13 est en suite pesé sur la balance afin de déterminer sa masse dans le but de calculer sa masse volumique après séchage.

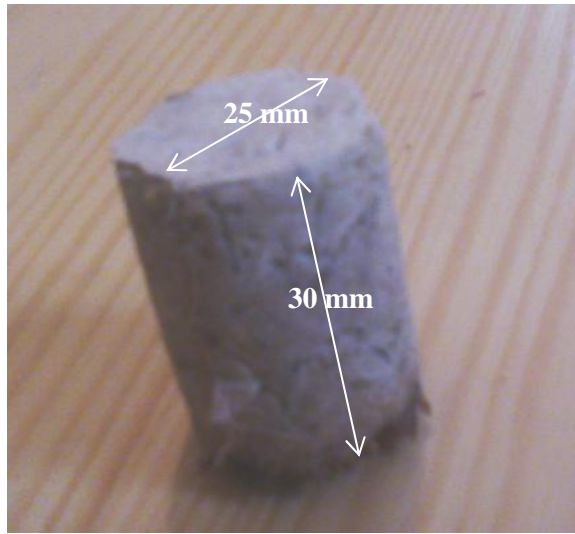


Figure.3.14 : Echantillon du composite plâtre/fibre végétale.

3.5.2.1. Isolation thermique radiale de l'échantillon :

Comme il a été indiqué dans le paragraphe précédent, l'unité d'expérimentation GUNT WL 370 ne reçoit que les échantillons de forme exigée et prédéterminée. Alors, la face radiale de l'échantillon de la figure.3.14 sera isolée thermiquement sur une épaisseur de 30 mm et un rayon de 60 mm. Pour ce la, un moule a été conçu dans les mêmes dimensions exigée afin d'assurer une dimension adéquate à celle requise par l'unité d'expérimentation.

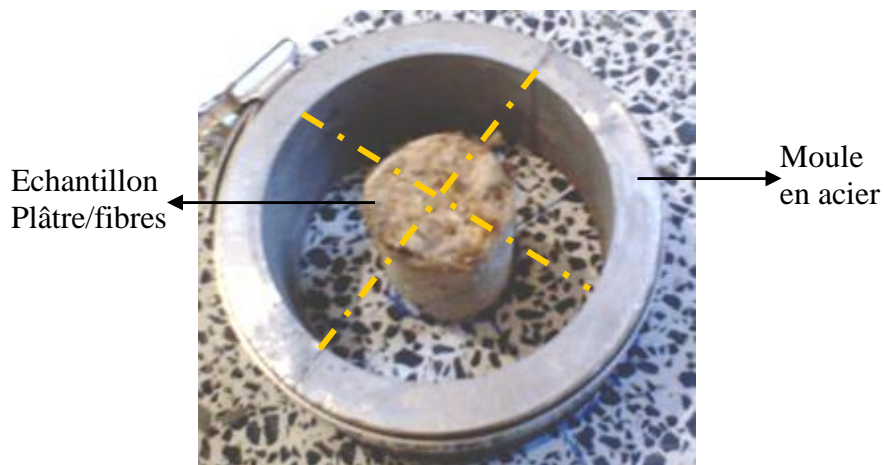


Figure.3.15 : Opération de centrage de l'échantillon.

L'isolant thermique utilisé est un mortier composé d'un ciment réfractaire, ciment blanc et une fraction de la chaux. Au début, l'échantillon composite est centré au milieu du moule (figure.3.15). Une fois le centrage est réalisé, on procède à verser le mortier isolant dans le volume offert sur la face radiale de l'échantillon tout en veillant à son maintien dans une position centrée (figure.3.16).



Figure.3.16 : Coulage du mortier isolant sur la surface radiale.

Les deux mâchoires du moule qui renferme le mortier isolant sont détachées entre elles en desserrant le collier de serrage après 2 jours du coulage comme indiqué sur la figure.3.17.

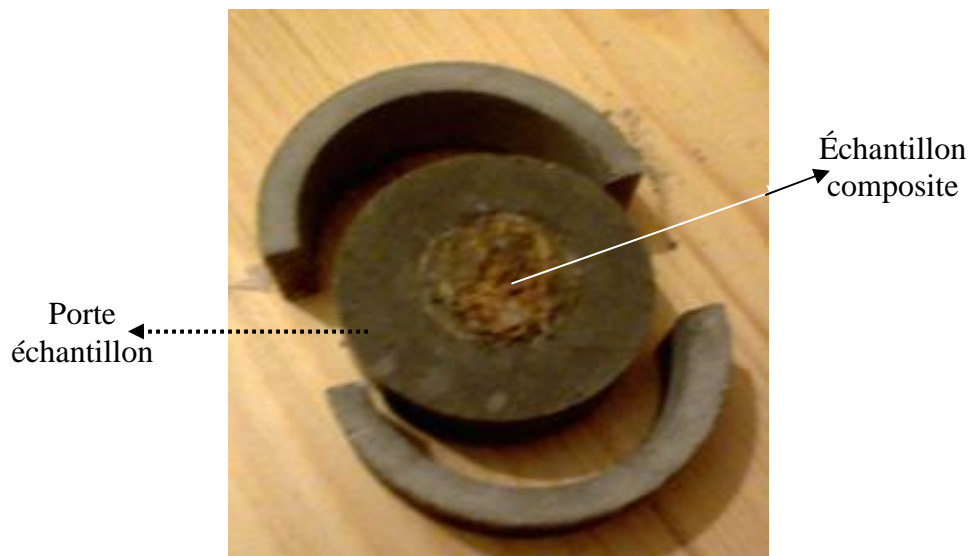


Figure.3.17 : Démoulage et récupération du porte échantillon.

3.5.2.1. Séchage du porte échantillon :

Le mortier d'isolation qui couvre l'échantillon composite a subi un séchage à l'intérieur d'une étuve sous une ambiance intérieur de 55°C (figure.3.18). Le processus s'est déroulé de façon permanente jusqu'à une différence de masse inférieure à 0.1g.



Figure.3.18 : Séchage des portes échantillons ; (a)- étuve, (b)- réglage de température, (c)- portes échantillons dans l'étuve.

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, les différentes étapes expérimentales accomplies sur l'ensemble d'échantillons seront explicitement éclatées. De plus, l'unité de conduction thermique GUNT WL370 ainsi que la méthode de calcul de la conductivité thermique sont exposées. Les mesures prélevées au cours de chaque processus d'expérimentation, représentent la banque de données qui permet l'élaboration des différentes allures illustrant les courbes de variation des paramètres qui interviennent dans le processus de conduction thermique des matériaux.

4.2. Présentation de l'unité de conduction (WL370) :

L'unité de conduction thermique (WL 370) est un dispositif expérimental destiné à déterminer la conduction thermique des matériaux. Ce dispositif offre la possibilité d'étudier la conduction thermique radiale ainsi que celle linéaire comme indiqué sur la figure (4.1).

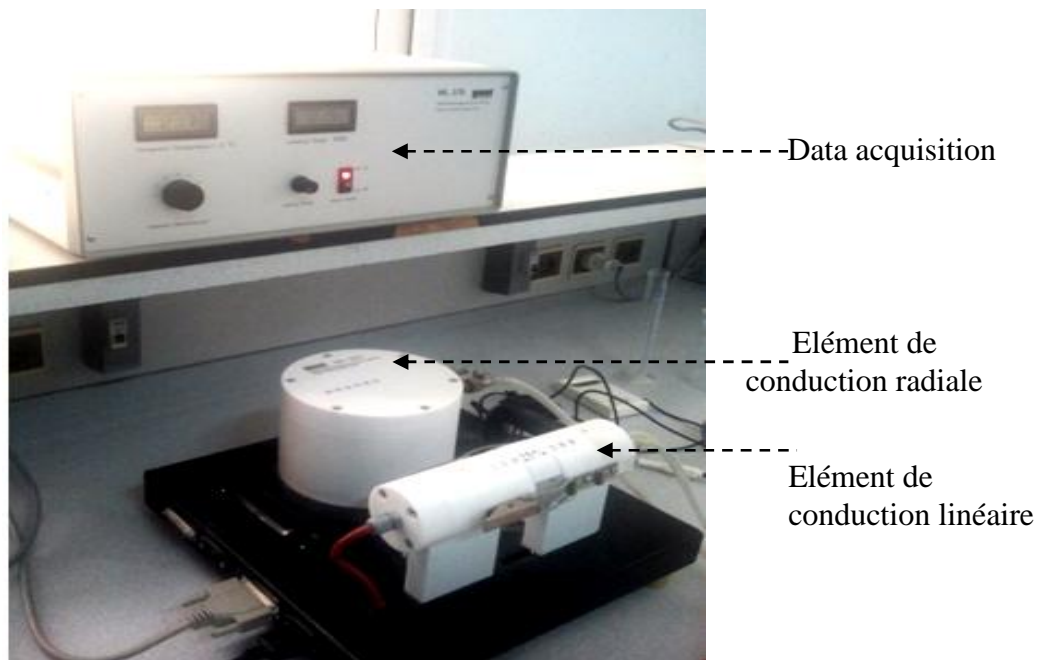


Figure.4.1 : Unité de conduction thermique WL370.

Un enregistreur digital fait partie intégrante du dispositif, assurant la lecture de la température ainsi que le flux thermique appliqué au niveau de la source chaude (1^{er} bout). Il est à noter que le flux thermique généré au niveau de cette source ne peut guère dépasser une valeur de 125W. Le dispositif est refroidi au niveau de sa source froide (2^{ème} bout) par le biais d'un système de refroidissement ouvert à circulation forcée d'eau (figure.4.2).

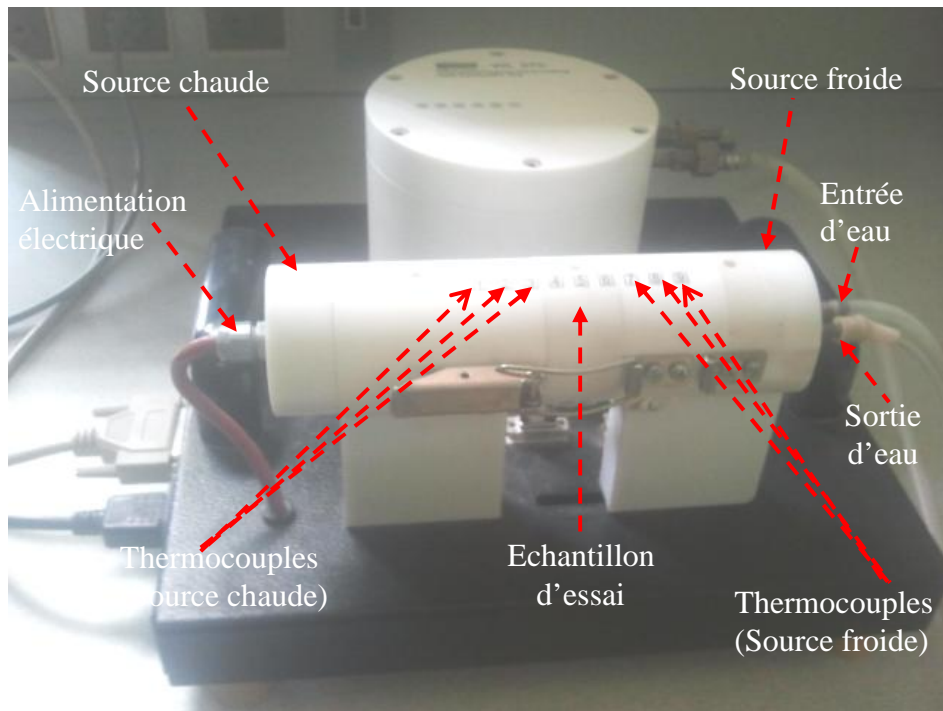


Figure.4.2 : Description de la source chaude et froide de l'unité WL370.

Sur l'élément de conduction linéaire sont positionnés six thermocouples, trois dans la partie chaude et le reste dans la partie froide avec un entraxe de 10 mm entre chaque deux thermocouples successifs.

4.3. Protocole d'expérimentation et approche analytique :

Le processus d'expérimentation visant à déterminer la conductivité thermique d'un matériau donné se déroule selon les étapes suivantes:

- ✓ Vérification de l'alimentation électrique de la source chaude avant la mise sous tension de sa résistance électrique.
- ✓ Réglage du débit d'eau de refroidissement.
- ✓ Mise en place et serrage de l'échantillon d'expérimentation.
- ✓ Fixer le flux thermique à appliquer au niveau de la source chaude.
- ✓ Lecture de températures affichées pour chaque thermocouple.

4.3.1. Approche analytique :

L'approche analytique adoptée dans le calcul de la conductivité thermique est basée sur la loi de la conduction thermique. Cette conductivité est calculée après avoir prélevé les températures T_3 et T_7 atteintes en régime permanent sous un flux thermique Q constant appliqué au niveau de la source chaude. Ce régime permanent est établi après que, l'échantillon passe de son régime transitoire caractérisé par une variation de température à une stagnation de température ou une variation ne dépassant pas 1%.

A travers le schéma illustré sur la figure.4.3, le flux thermique traversant l'échantillon d'essai est exprimé par :

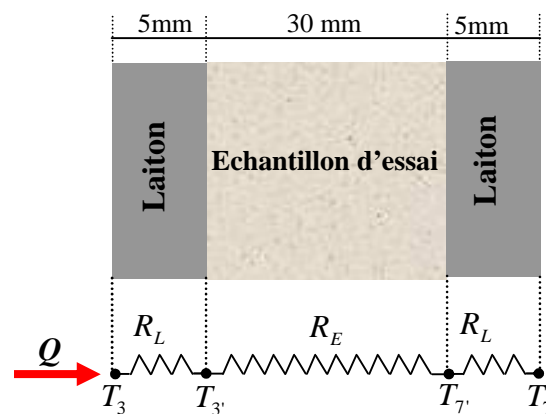


Figure.4.3 : Description des résistances thermiques du dispositif D'expérimentation.

$$Q = \frac{T_3 - T_7}{\sum_{i=1}^3 R} = \frac{T_3 - T_7}{R_L + R_E + R_L} = \frac{T_3 - T_7}{R_E + 2R_L} \quad 4.1$$

dont les résistances thermiques sont exprimées comme suit :

$$R_L = \frac{e_L}{A_L K_L} \quad 4.2$$

$$R_E = \frac{e_E}{A_E K_E} \quad 4.3$$

la surface de contact entre l'échantillon et le laiton est la même :

$$A_E = A_L \quad 4.4$$

Introduisons les expressions (4.2), (4.3) et (4.4) dans (4.1), la conductivité thermique de l'échantillon aura pour expression :

$$K_E = \frac{e_E}{\frac{A_E}{Q}(T_3 - T_7) + \frac{2e_L}{K_L}} \quad 4.5$$

Il est à noter que la conductivité thermique du laiton est une donnée du constructeur et qui vaut une valeur $K_L = 113W / m.K$

4.4. Caractérisation thermique des échantillons :

Après avoir préparé l'ensemble des échantillons comme cité dans le chapitre (3), ces derniers ont fait l'objet d'essais expérimentaux sur l'unité de conduction WL370. Dans cette partie du travail, sera exposée la démarche expérimentale adoptée au cours de l'évaluation de la conductivité thermique ainsi que la masse volumique de chaque échantillon séparément. Les résultats et discussions relatifs à chaque échantillon sont affichés en fin du processus. Le flux thermique appliqué dans tout les processus d'expérimentation est fixé à une valeur de 15W (figure.4.4), tandis que le débit d'eau de refroidissement est maintenu constant à une valeur de 2 litres/h.



Figure.4.4 : Réglage du flux thermique appliqué.

Dans la première étape, l'échantillon d'essai est mis en place dans le dispositif suivi par le réglage du flux thermique ainsi que le débit d'eau de refroidissement. La lecture des différentes températures est faite chaque 5min jusqu'au moment où le régime permanent s'établit.

4.4.1.Échantillon du plâtre sans fibres végétales :

L'évaluation de la conductivité thermique ainsi que la masse volumique de l'échantillon du plâtre sans fibres (figure.4.5) est de grande importance, car elle permet d'une part ; la vérification des données du fabricant et d'autre part ; l'acquisition d'une valeur de référence au quelle, toutes les valeurs relatives aux différents échantillons composites seront comparées afin de vérifier la faisabilité d'un tel composite.

Il est à noter que la masse volumique est calculée comme étant la masse de l'échantillon après séchage sur le volume du moule qui vaut 14.71 cm^3 (voir figure.3.11).

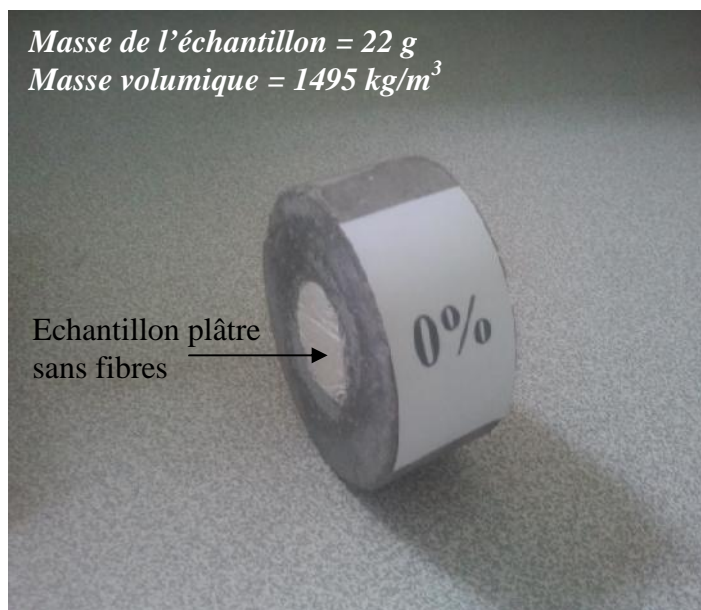


Figure.4.5 : Echantillon du plâtre sans fibres végétales.



Figure.4.6 : Mise en place de l'échantillon 0% fibres sur l'unité WL370.

L'échantillon est mis en place dans l'unité de conduction comme indiqué sur la figure.4.6 sous les paramètres d'expérimentation préalablement réglés (15W, 2l/h). La lecture des températures chaque 5 min a permis de tracer la courbe de l'écart de température ($T_3 - T_7$) en fonction du temps comme illustré sur la figure.4.7.

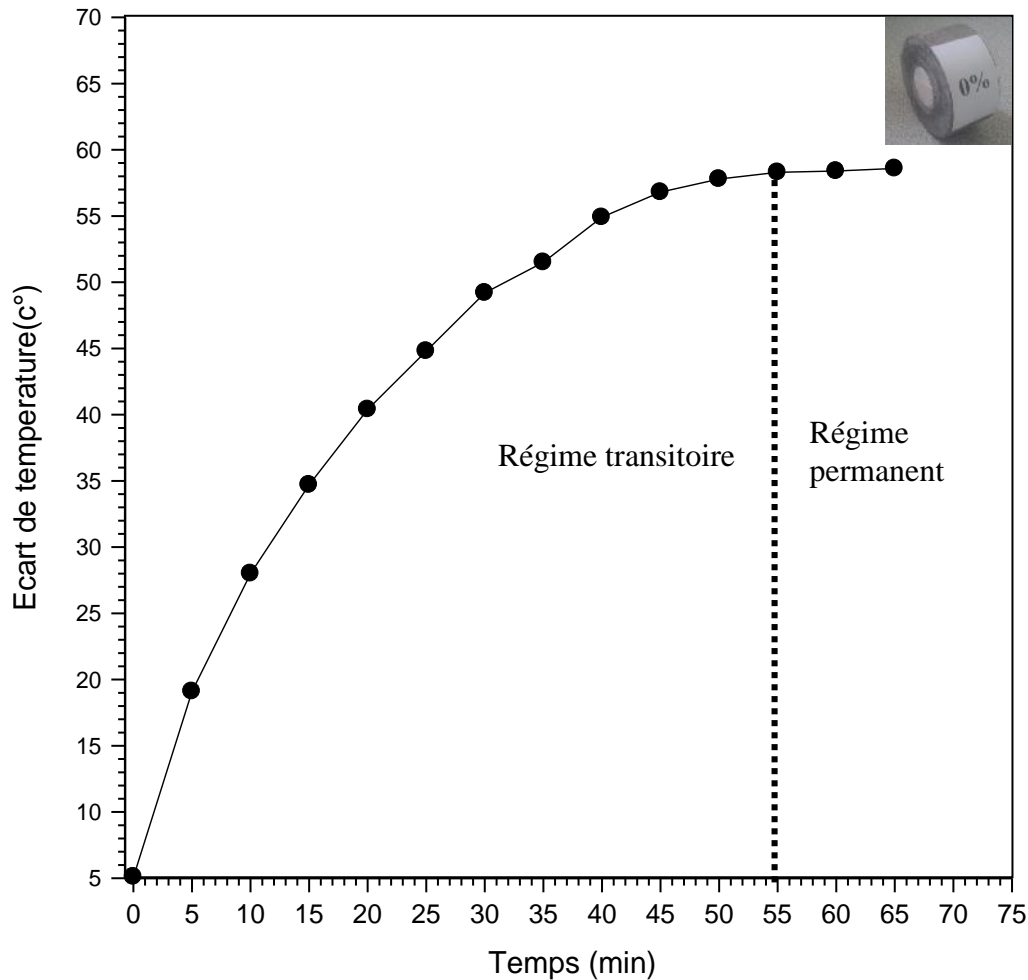


Figure.4.7 : Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 0% fibre).

A travers la figure (4.7) on constate que le régime transitoire s'étale entre 0 à 55min. Après cette durée, le régime permanent est établi et la variation de l'écart de température est insignifiante. Alors, l'écart de température qui sera utilisé dans l'expression (4.5) correspond à la moyenne des écarts entre 55 min et 65 min. le calcul de la conductivité thermique K_E de l'échantillon fait ressortir une valeur de :

$$K_E = 0.6W / m.K$$

4.4.2.Échantillon composite plâtre /5% fibre :

L'échantillon composite 5% fibres (figure.4.8) possède une masse de 20.9g après séchage, ce qui donne une masse volumique de l'ordre de 1420 kg/m^3

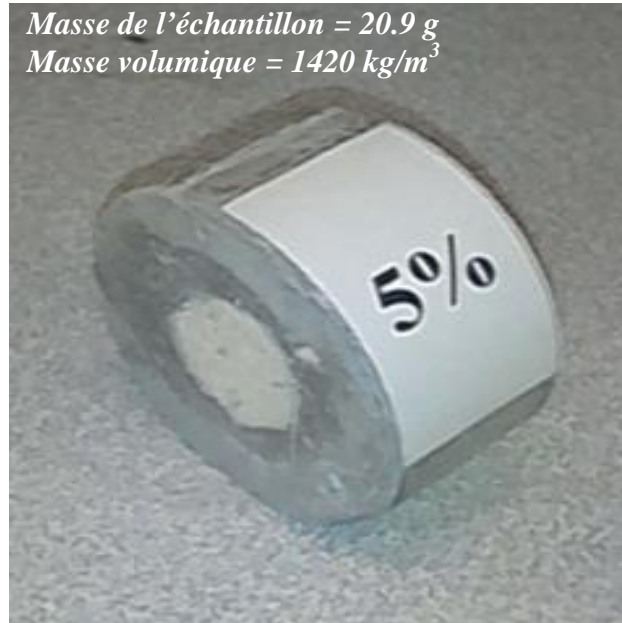


Figure.4.8 : Echantillon du composite plâtre / 5% fibre végétale.



Figure.4.9 : Mise en place de l'échantillon 5% fibres sur l'unité WL370.

Les résultats traduits par la figure (4.10) montrent que le régime permanent est atteint après 80 min d'échange thermique. Il est clair que cette durée d'établissement du régime est nettement supérieure à celle enregistrée pour l'échantillon 0 % fibres.

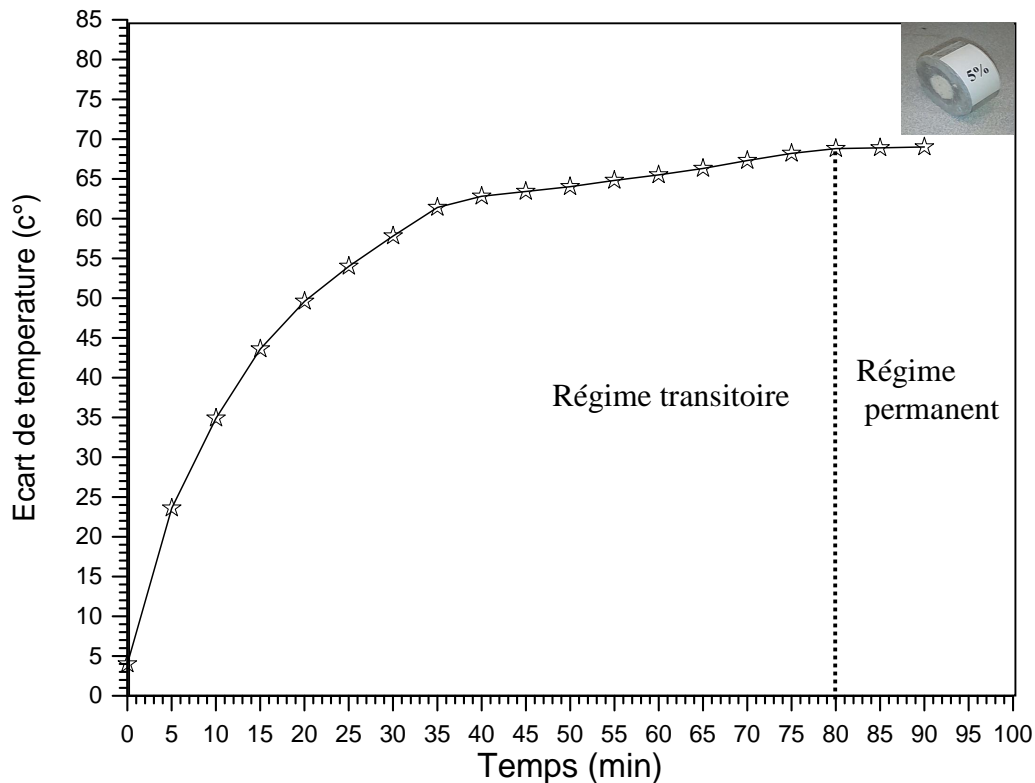


Figure.4.10 : Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 5% fibre végétale).

Ce ci peut être expliqué par, l'effet des fibres de la gausse du petit pois dans le retardement du régime permanent, donnant ainsi une meilleur qualité d'isolation au composite que celle du plâtre sans fibres. Il est à noter que ce premier résultat encourageant nous a motivé à continuer cette démarche expérimentale.

La conductivité thermique du composite (plâtre/5% fibre) a pour valeur :

$$K_E = 0.51W / m.K$$

4.4.3.Échantillon composite plâtre /10 %fibre :

L'échantillon du composite plâtre /10% fibre (figure.4.11) affiche une masse de 19.2g après séchage, donnant une masse volumique de l'ordre de 1336 kg/m^3 . Cet échantillon est parait plus léger que les deux échantillons précédents.



Figure.4.11 : Echantillon du composite plâtre / 10% fibre végétale.



Figure.4.12 : Mise en place de l'échantillon 10% fibres sur l'unité WL370.

Les résultats obtenus à travers les essais expérimentaux de cet échantillon, montrent que le régime permanent s'établi après une durée de 80 min (figure.4.13). Il est remarqué que cette durée d'établissement est équivalente à celle enregistrée dans l'échantillon composite plâtre/ 5% fibres.

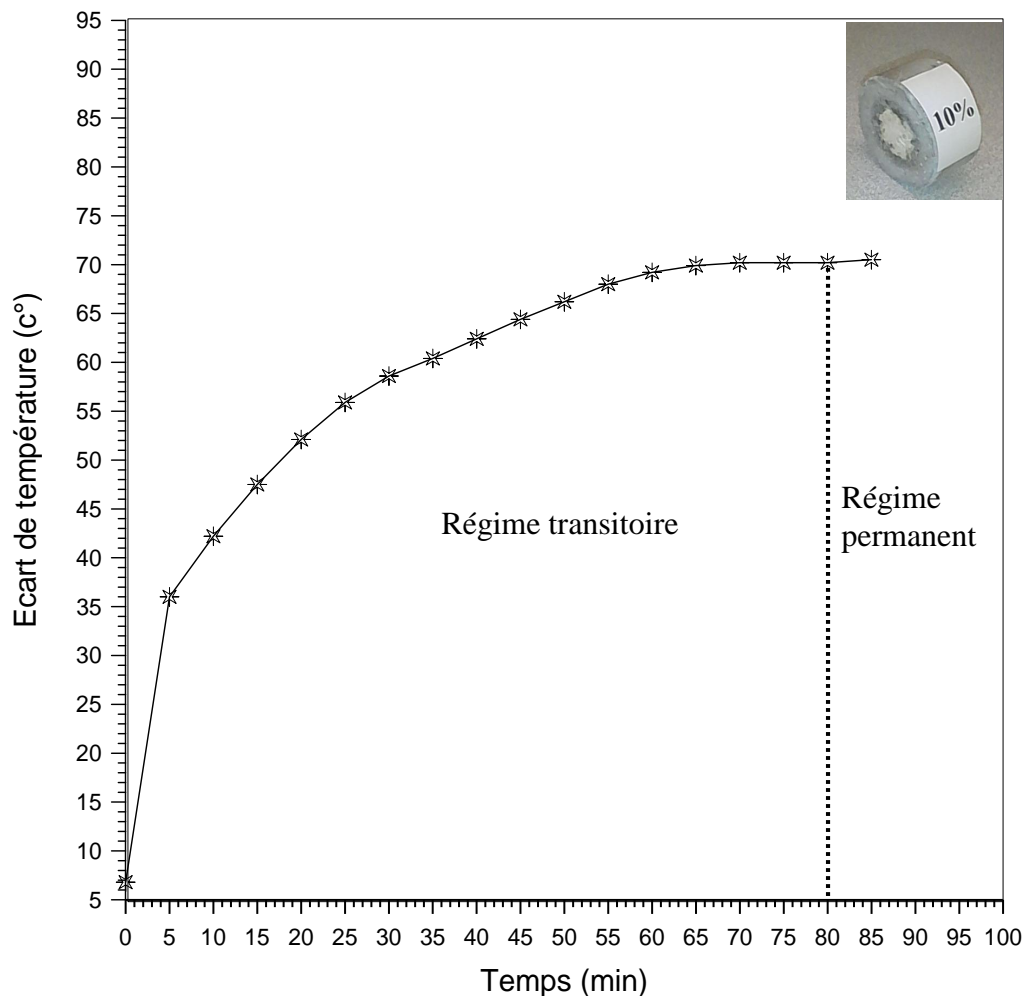


Figure.4.13 : Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 10 % fibre végétale).

On constate que, l'augmentation de la fraction massique de la fibre végétale en passant de 5% à 10% n'a pas affectée le comportement thermique vis-à-vis à l'atteinte du régime permanent, mais en contre partie, une diminution de la conductivité thermique est enregistrée. Cette dernière est passée à une valeur de :

$$K_E = 0.495 \text{ W / m.K}$$

4.4.4.Échantillon composite plâtre /15 %fibre :

L'élévation de la fraction massique des fibres de la gousse du petit pois dans le composite engendre une diminution sensible de sa masse et par conséquent une diminution de sa masse volumique. L'échantillon en question a affiché une masse après séchage de 18.1 g donnant une masse volumique de 1230 kg/m^3 .



Figure.4.14 : Echantillon du composite plâtre / 15% fibre végétale.



Figure.4.15 : Mise en place de l'échantillon 15% fibres sur l'unité WL370.

A travers la figure (4.16) illustrant la variation de l'écart de température entre les faces de l'échantillon en fonction du temps, il apparait clairement que le régime thermique s'établit autour de 80 min. par une simple comparaison, on constate que cette durée d'établissement du régime devient quasi constante pour une fraction de fibre allant de 5 à 15%.

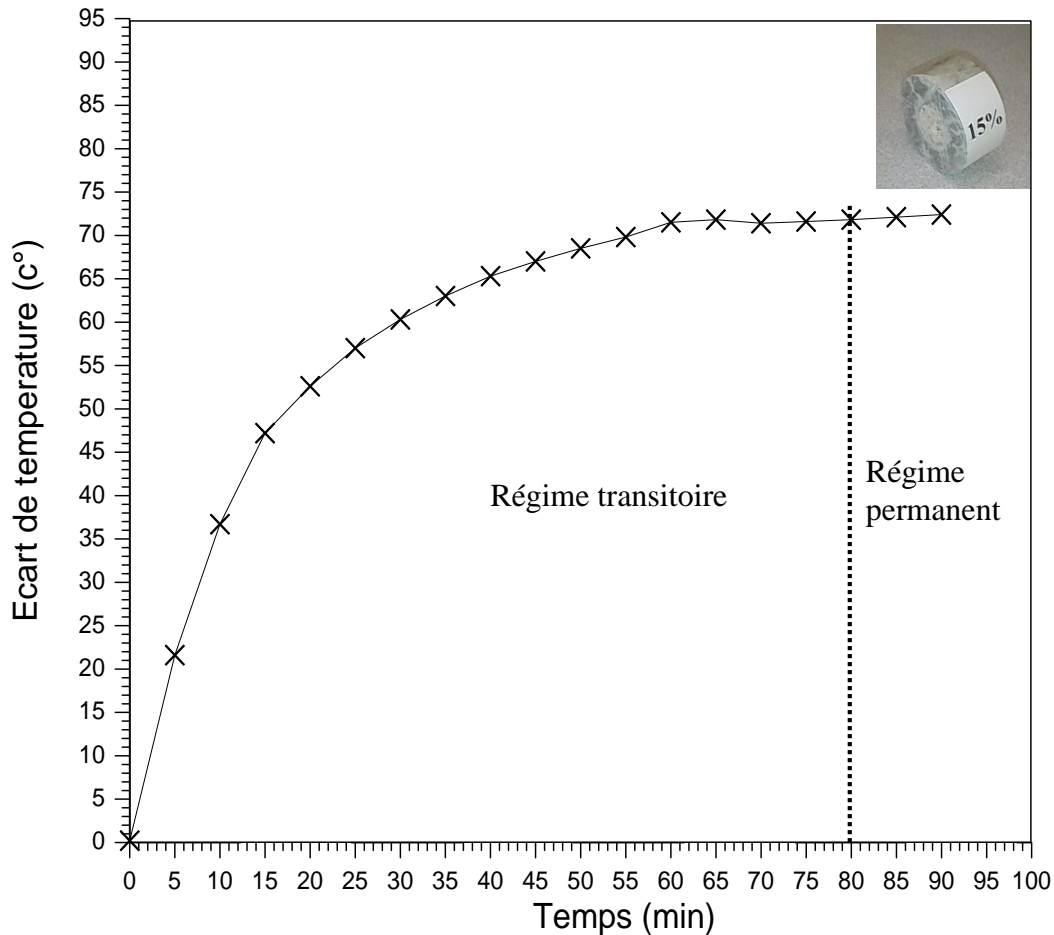


Figure.4.16 : Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 15 % fibre végétale).

La conductivité thermique de à cet échantillon a été déterminé en utilisant l'expression (4.5).
Le calcul a donné une valeur de :

$$K_E = 0.483 W / m.K$$

4.4.5.Échantillon composite plâtre /20 %fibre :

L'échantillon composite plâtre/ 20% fibre a une masse de 16.8 g donnant une masse volumique de 1174 kg/m^3 .



Figure.4.17 : Echantillon du composite plâtre / 20% fibre végétale.



Figure.4.18 : Mise en place de l'échantillon 20 % fibres sur l'unité WL370.

De même pour cet échantillon, le régime permanent est atteint après la même durée d'établissement pour les autres échantillons qui vaut 80 minutes. La conductivité thermique déterminée est de :

$$K_E = 0.46 W / m.K$$

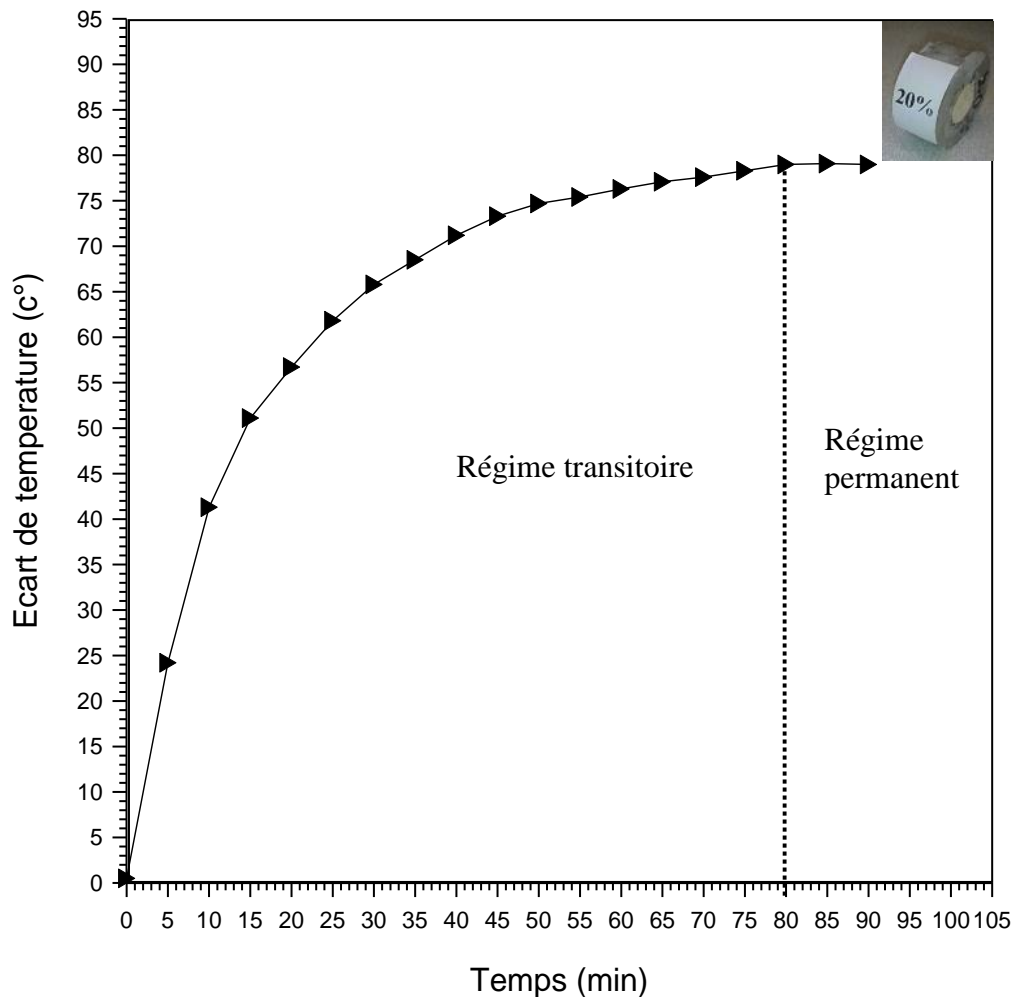


Figure.4.19 : Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 20 % fibre végétale).

4.4.5.Échantillon composite plâtre /25 %fibre :

Cet échantillon est le dernier dans la série d'expérimentation, il a une masse de 15.3 g donnant une masse volumique de 1040 kg/m^3 .



Figure.4.20 : Echantillon du composite plâtre / 25% fibre végétale.



Figure.4.21 : Mise en place de l'échantillon 25 % fibres sur l'unité WL370.

La conductivité thermique évaluée après l'établissement du régime permanent est de :

$$K_E = 0.42 \text{ W / m.K}$$

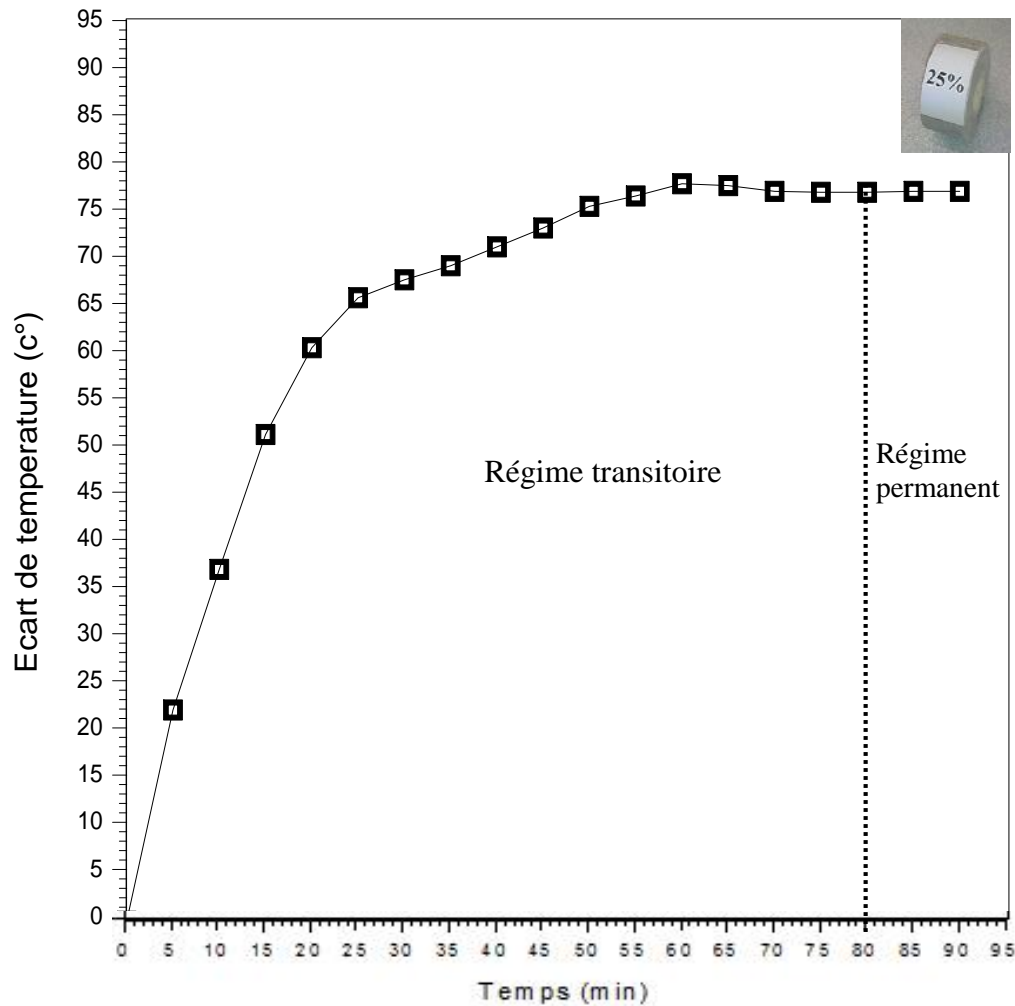


Figure.4.22 : Variation de l'écart de température en fonction du temps (Échantillon 25 % fibre végétale).

4.5. Effet de la fraction des fibres sur la conductivité thermique :

En récapitulant les résultats obtenus à travers les différents échantillons, il apparaît clairement (Figure.4.23) que l'augmentation de la fraction des fibres végétales du petit pois dans le composite plâtre/fibres, engendre une diminution sensible de la conductivité thermique du composite.

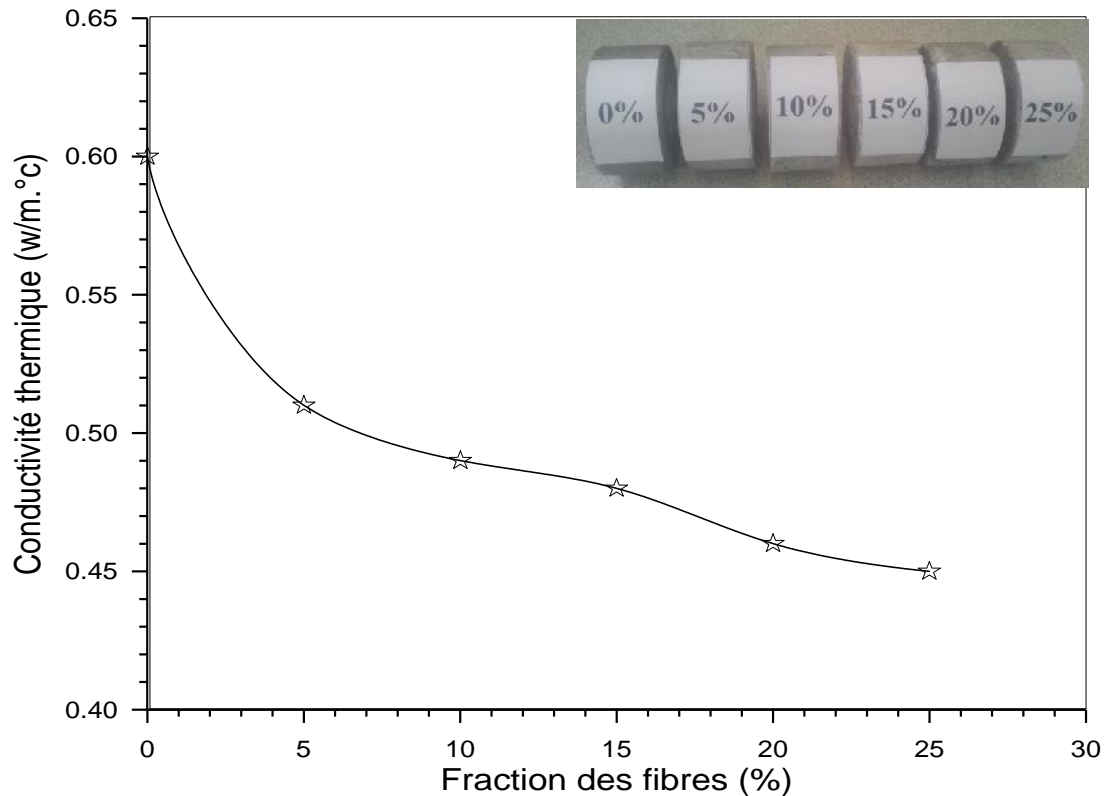


Figure.4.23 : Effet de la fraction des fibres sur la conductivité thermique du composite.

On constate qu'un passage de 0% à 5% de fibre dans le composite est accompagné d'une chute de la conductivité thermique de l'ordre de 15%. Cette chute reflète une amélioration du pouvoir d'isolation du composite. Dans la fourchette des fractions allant de 5% à 25%, une chute de la conductivité thermique d'environ 10% est enregistrée. Alors le passage de 0% à 25% de la fraction massique des fibres végétales provoque une diminution de 25% de la conductivité thermique du plâtre sans fibres.

4.6. Effet de la fraction des fibres sur masse volumique :

La masse volumique est une caractéristique de grande utilité dans le domaine de construction car, un matériau plus léger ayant de bonnes performances thermiques et mécaniques est sérieusement recherché par les constructeurs. Le composite plâtre/fibre végétale tel que présenté dans cette étude a fait l'objet de calcul de sa masse volumique pour toutes les fractions de fibres. Les résultats affichés au cours de cette démarche expérimentale ont été représentés graphiquement sur la figure.4.24.

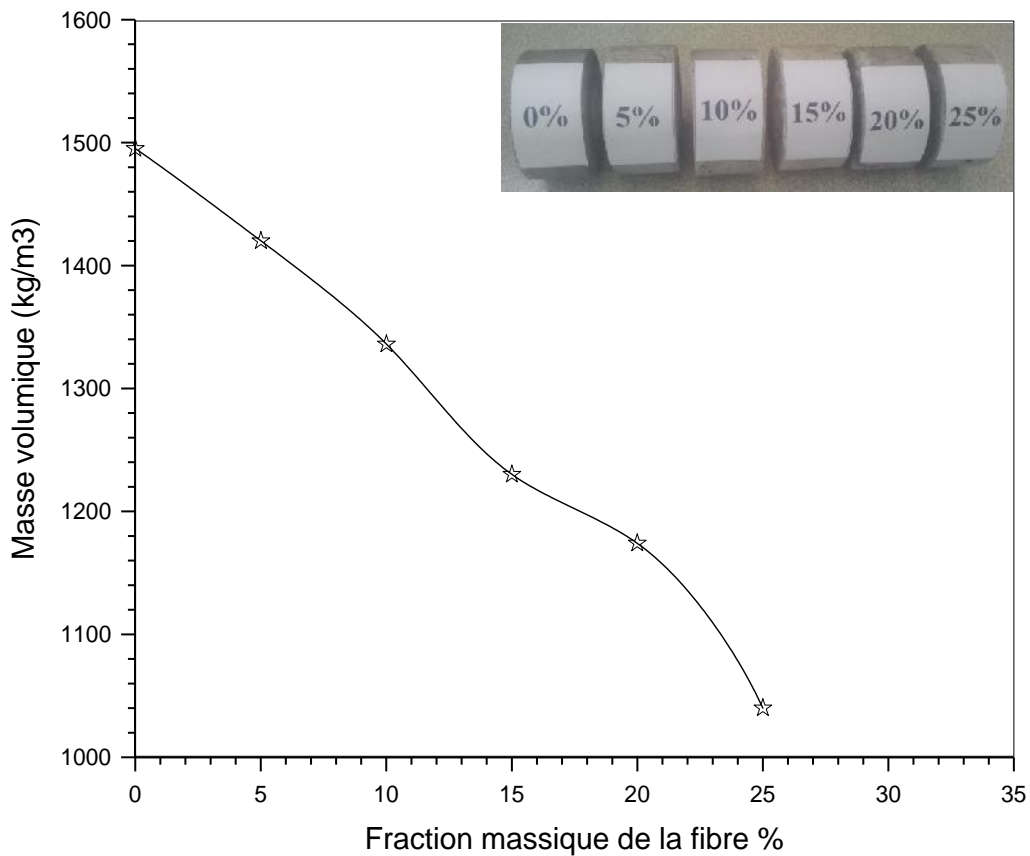


Figure.4.24 : Effet de la fraction des fibres sur la masse volumique du composite.

On constate qu'en augmentant la fraction des fibres végétales du petit pois dans le composite, sa masse volumique diminue. Le passage de 0% fibres à 25% engendre une diminution de la masse volumique de l'ordre de 31%. Le taux de diminution de la masse volumique est équivalent à 1.24% pour une augmentation de la fraction des fibres de 1%.

Conclusion

A travers les résultats obtenus à l'issue de cette étude expérimentale, qui a été consacrée à la mise au point d'un nouveau matériau composite à base de fibre végétale, plusieurs conclusions ont été tirées et affichées. En premier, il est utile de noter que, la première partie du projet relative à la préparation de l'échantillon composite nous a permis, de prendre connaissance du protocole de mise en œuvre ainsi que le respect des paramètres opérationnels lors du processus de préparation. De plus, le processus de séchage de différents échantillons est de grande importance car, il assure non seulement la bonne cohésion structurale de la matrice mais aussi l'élimination quasi-totale de l'adjuvant (eau) existant dans la pâte primaire avant séchage.

L'une des premières conclusions à afficher est liée au comportement thermique des échantillons composites. Ce comportement vis-à-vis au temps d'établissement du régime permanent sous un flux thermique constant se présente comme suit :

- ✚ Le temps d'établissement du plâtre sans fibres est inférieur à ce enregistré pour l'ensemble d'échantillons.
- ✚ Ce temps d'établissement devient quasi-constant pour les échantillons composites quel que soit la valeur de la fraction massique des fibres.

La masse volumique du composite plâtre/fibre végétale diminue avec l'augmentation de la fraction massique des fibres enregistrant une diminution de 30% pour une fraction de 25%. Ce résultat est très intéressant car, il vérifie la condition d'allègement des matériaux de construction afin de réduire les charges statiques que subissent les structures. Alors le composite plâtre/fibre végétale est plus léger que le plâtre sans fibres.

Du point de vue thermique, l'étude a abouti à un résultat très concluant et promoteur au même temps. Ce résultat est la conductivité thermique du matériau composite étudié et qui présente une diminution sensible de l'ordre de 26% pour une fraction massique de fibres de 25%. De plus, il est à signaler que lors, du passage de 0% fibres au 5% fibre, une chute de la conductivité thermique du composite de 15% est enregistrée. Ce ci peut être expliqué par le fait du passage d'une structure monophasique (plâtre sans fibres) à une structure bi-phasique (composite plâtre/fibres).

Il est constaté qu'à travers les résultats de ce travail, le composite plâtre/fibre végétale de la gousse du petit pois présente une meilleure qualité d'isolation associée à sa faible masse volumique. Ces deux caractéristiques font de ce composite un substitut potentiel des matériaux isolants classiques.

Conclusion et perspectives

Perspectives

A travers les étapes du déroulement de ce travail ainsi que les résultats affichés à l'issue de ce projet, il apparaît clairement que nombreux points restent à étudier afin de mieux cerner les différents comportements du composite mis au point. Parmi ces comportements qui nécessitent une étude on cite ; le comportement au feu (point d'inflammabilité), la perméabilité à la vapeur d'eau (porosité), le comportement à l'humidité, la stabilité dans le temps (l'isotropie), l'isolation acoustique ainsi que le comportement mécanique.

Une utilisation à une échelle réduite de ce composite dans différents milieux climatique (chaud, froid, humide, sec.....) est souhaitée afin de vérifier sa faisabilité et son efficacité comme matériaux d'isolation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : Fabien Betene Ebanda, thèse de doctorat Université de Douala, Cameroun 2012, « étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales ». UMR 6602 <NNT : 2012 clf 22298>.

[2] : Camille Magniont, thèse de doctorat, L'Université Toulouse III - Paul Sabatier 2010, «Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agro ressources».

[3] : Benseghira Elmouatez Billah, mémoire de fin d'études université kasdi merbah - Ouargla-2014, «Etude de l'isolation thermique d'un local situé dans la région de Ouargla (sud -est de l'Algérie) ».

[4] : Pierre-Alexandre Briemel, Projet de Fin d'études, INSA de Strasbourg, spécialité Génie Civil 2013, «Simulation numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone».

[5] : Camille Magniont, « Communication Valorisation de granulats végétaux pour la Formulation d'éco- matériaux de construction», Université de Toulouse, F-31 077 Toulouse Cedex 04, France, camille.magniont@insa-toulouse.fr .

[6] : Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement de la Haute-Garonne, L'isolation - Les isolants d'origine végétale et animale, www.caue31.org .

[7] : Nicolas Dujardin. « Un matériau bio source de choix : les fibres naturelles. Caractérisations et applications». 25^{emes} Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question, Feb 2014, Créteil, France. JSE-2014 (01).

[8] : Vi Vi Do Thi . «Matériaux composites a fibres naturelles / polymère biodégradables ou non». Université de Grenoble, 2011. Français. <NNT : 2011GRENA012>.

[9] : Véronique Cerezo . «Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique»- L'institut national des sciences appliquées de Lyon.2005ISAL0037