

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



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master professionnel en Génie
Mécanique, Spécialité : Énergétique
Option : froid, chauffage et climatisation

Thème :

**Etude et réalisation d'un isolant à base de
matériaux biosourcés**

Encadré par :

Mr. Makhlouf Said

Réalisé par :

Mr. Ouarab Yanis Mehdi

Mr. Bellal Nabil

Année universitaire 2020/2021

REMERCEMENTS

On tient à exprimer notre profonde gratitude à Mr S. MAKHLOUF Professeur à l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, qui a suivi et encadré ce travail avec intérêt, disponibilité et compétence.

On remercie vivement les membres jury d'avoir accepté de juger ce travail.

On voudrait également exprimer toute notre reconnaissance à tous les membres du laboratoire de génie civil.

Nous remercions également à tous les fonctionnaires de l'atelier du département de génie mécanique à l'UMMTO pour leurs accueils dans leur laboratoire et pour leurs aides.

On tient à remercier Mr Hamid, Ingénieur de laboratoire de génie mécanique Tizi-Ouzou.

DÉDICACES

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience d'avoir pu terminer mes études.

A la mémoire de ma grand-mère

Merci pour ton courage et pour tes sacrifices. Tu nous manque.

A ma chère et tendre mère

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon cher père

A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ;
Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi

A mes frères et à ma sœur

En témoignage de mon profond amour et respect, je
souhaite toutes les réussites et le bien-être de
chacun de vous.

A une personne chère à moi

A-T, merci d'être là avec moi pendant les moments
les plus difficiles et de m'avoir accompagnée
durant cette épreuve, je te souhaite tout le bonheur
et les meilleurs succès.

Nabil

DÉDICACES

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience d'avoir pu terminer mes études

A la mémoire de mon grand-père

Merci pour tes sacrifices. Tu nous manque.

A ma chère et tendre mère

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrêmeamour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon cher père

A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect.

A mes sœurs Ania et lyna

A qui je souhaite toutes les réussites et le bien-être.

A mon frère Samy

En témoignage de mon profond amour et respect, à qui je souhaite le succès et le bonheur.

A ma chère grand-mère

Dieu la garde pour nous.

A mes deux cher oncles Said et Omar ainsi leurs femmes Dyhia et Angelique

Merci pour votre aide.

A mes amis

A tous mes ami(e)s, Rabah, Hamid, Salim, Gaya, Ramzi, howasse, kouceila, Tarik, Moumouh, Farid, Hakim, Mélissa, Sarah, Narimane, Farida, Radia, Nabila, Yasmine, Mina. Manal .

Yanis

Sommaire

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

Chapitre I : Généralités sur l'isolation thermique

I. Introduction.....	3
I.1 L'isolation thermique.....	3
I.2 Isolants thermiques	3
I.3 Types d'isolants	4
I.3.1 Les isolants synthétiques.....	4
I.3.2 Les isolants en fibres minérales	5
I.3.3 Les isolants en fibres végétales.....	5
I.3.4 Les isolants d'origine animale	7
I.4 Propriétés d'un isolant	8
I.4.1 La capacité thermique d'un isolant	8
I.4.2 La masse volumique	8
I.4.3 L'inertie thermique d'un isolant	8
I.4.4 La capacité hygrothermique	8
I.4.5 Le déphasage thermique	9
I.4.6 La conductivité thermique.....	9
I.5 Méthode de mesure de la conductivité thermique.....	10
I.5.1 Les méthodes en régime stationnaire	11
I.5.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée [5].	11
I.5.2 Les méthodes non stationnaires	13
I.5.2.1 Méthode du fil chaud [6].....	13
I.6 La résistance thermique	14
I.6.1 Transfert de chaleur par conduction.....	15
I.6.2 Transfert de chaleur par convection.....	15

Sommaire

I.6.3 Transfert par rayonnement	16
I.7 Techniques d'isolation thermique	17
I.7.1 L'isolation intérieure	17
I.7.2 L'isolation extérieure	18
I.7.3 L'isolation répartie	19
I.8 Comportement des parois du bâtiment	20
I.8.1 Comportement hydrique	20
I.8.2 Comportement thermique	21

Chapitre II : Généralités sur les matériaux biosourcé

II.1 Qu'est-ce qu'un matériau biosourcé ?	22
II.2. Utilisation de la biomasse à travers l'histoire	22
II.3. Cinq origines de la biomasse	25
II.4. Usage des matériaux biosourcés	26
II.5. Cycle de vie des matériaux biosourcés	27
II.6. Les différents acteurs au sein du cycle de vie d'un matériau biosourcé	28
II.7. Les préjugés autour des matériaux biosourcés	28
II.8. Pourquoi le biosourcé ?	30
II.9. Quels sont les matériaux biosourcés utilisés dans le bâtiment ?	31
II.10. Les grandes familles de matériaux biosourcés : avantage aux isolants	32
II.11. Les avantages des matériaux biosourcés	34

Sommaire

Chapitre III : propriétés physico-chimiques des matériaux de base.

III.1 Introduction.....	35
III.2 Définition d'un polymère.....	35
III.3 Rappels sur la structure des protéines	35
III.3.1 Constitution des protéines.....	35
III.3.2 La conformation des protéines.....	36
III.3.2.1 La structure primaire.....	36
III.3.2.2 La structure secondaire.....	36
III.3.2.3 La structure tertiaire.....	38
III.3.2.4 La structure quaternaire.....	38
III.4 Les types de protéine.....	38
III.4.1 La protéine globulaire.....	39
III.4.2 La protéine fibreuse.....	39
III.5 Présentation de la kératine.....	39
III.5.1 Définition de la kératine.....	39
III.5.2 Histoire de la kératine.....	40
III.5.3 Les ressources de la kératine.....	41
III.5.4 Type de kératine.....	41
III.6 La laine de mouton.....	42
III.6.1 La kératine de laine.....	42
III.6.2 Structure et morphologie de la laine.....	42
III.6.2.1 La cuticule.....	43

Sommaire

III.6.2.2 Le cortex.....	43
III.6.2.3 La moelle.....	44
III.6.3 Les propriétés physiques de la laine.....	44
III.6.4 Composition chimique de la laine.....	45
III.7 Les plumes de dinde	45
III.7.1 Production mondiale de la volaille.....	45
III.7.2 Production de la volaille en Algérie.....	46
III.7.3 Définition d'une plume	48
III.7.4 Couleurs des plumes.....	48
III.7.5 Types de plumes.....	48
III.7.6 La structure des plumes.....	50
III.7.7 Propriétés des plumes.....	51
III.7.8 Effets de la température et de l'humidité.....	54
III.7.9 Propriétés physiques des plumes	54
III.7.10 Les propriétés mécaniques.....	55
III.7.11 Les propriétés chimiques de la kératine des plumes.....	56
III.7.11.1 Composition chimique de la kératine des plumes.....	57
III.7.11.2 Composition en acides aminés de la kératine des plumes.....	57
III.8 La courge de Luffa.....	59
III.8.1 Définition de Luffa Cylindrica.....	59
III.8.2 Information descriptive.....	60
III.8.3 Croissance de la Luffa.....	60
III.8.4 Croissance en Architecture de l'éponge.....	61

Sommaire

III.8.5 Propriétés chimiques.....	62
III.8.6 Type de Luffa.....	62
III.8.7 Utilisation de la Luffa dans différents domaines.....	64
III.8.7.1 Utilisation domestique.....	64
III.8.7.2 Utilisation pharmaceutique.....	64
III.8.7.3 Utilisation médicale et biologique.....	65
III.8.7.4 Autres utilisation.....	65
III.8.8 Choix de la Luffa cylindrica comme matière première.....	66
III.8.8.1 Cellulose.....	66
III.8.8.2 Hémicelluloses.....	67
III.8.8.3 Lignine.....	68
III.9 La lavande.....	69
III.9.1 Définition de la lavande.....	69
III.9.2 La paille de lavande comme isolant thermique	70
III.9.3 Les performances de la paille de lavande en isolation	70
III.9.4 La pose de la paille de lavande en isolation par l'extérieur	71

Chapitre IV : Elaboration et interprétations des résultats.

IV.1 Traitement des matériaux étudiés.....	72
IV.1.1 Traitements des plumes de dindes.....	72
IV.1.2 Traitement de la lavande	75
IV.1.3 Traitements de la courge du luffa	76
IV.2 Réalisation des plaques d'isolants thermique a base des matériaux biosourcés	76
IV.2.1 Conception et fabrication du moule.....	76

Sommaire

IV.2.2 Le riz comme colle biosourcés	77
IV.2.2.1 Mortier au riz gluant	78
IV.2.2.2 Composition de mortier	79
IV.2.2.3 Caractéristiques du mortier au riz gluant..	79
IV.2.2.4 Conclusion	81
IV.2.3 L'amidon de la pomme de terre comme colle naturelle	82
IV.3 Les plaques d'isolants réalisées en utilisant la patte de riz	82
IV.3.1 Les fibres de lavande avec la patte de riz	82
IV.3.2 Fibres de plumes de dindes avec la patte de riz	84
IV.4 Les fibres de luffa et la pâte de pomme de terre pour réaliser une plaque d'isolant	86
IV.5 Calcul des forces de pression exercée sur chaque plaque.	90
IV.6 perte de masse de chaque plaque avant et après le séchage	93
IV.7 : les fibres de plumes de dindes avec la résine acrylique	94
IV.7.1 : Définition de la résine acrylique	94
IV.7.2 : Réalisation de la plaque, moulage et démoulage.	94
IV.8 : L'enveloppement des plaques sous vide	96
IV.9 : CT mètre...	98
IV.9.1 : Description de l'appareil.....	98
IV.9.1 : Méthode d'essai	99
IV.9.2 : Equation donnant la conductivité thermique...	100
IV.9.2 : Calcul de la conductivité thermique de chaque plaque	101
IV.10 : Conclusion	105
Conclusion générale	106

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur l'isolation thermique

Figure.I.1 : Laine de bois	6
Figure.I.2: bois en vrac.....	6
Figure.I.3: Liège	6
Figure.I.4: Chanvre	7
Figure.I.5: panneau de laine de mouton	7
Figure.I.6: Laine de mouton en vrac.	7
Figure.I.7: Principe de la plaque chaude gardée	12
Figure.I.8: Mini-plaque chaude avec un flux mètre	13
Figure.I.9 :Dispositif expérimental du fil chaud	14
Figure.I.10: trois modes de transferts de chaleur	17
Figure.I.11:Isolation par l'intérieur	18
Figure.I.12: Isolation par l'extérieur	19

Chapitre II : Généralités sur les matériaux biosourcés

Figure II.1 : Les différents matériaux de la biomasse	22
Figure II.2: Hutte en paille et branches au japon	23
Figure II.3 : Hutte en peaux de bêtes	23
Figure II.4: Vestiges d'une maison en pierre	23
Figure II.5: La maison de Saint-Justen torchis.....	23
Figure II.6 : Panorama de 14 pays sélectionnés dans le cadre de l'étude Bio Word Ressource Benchmark.....	24
Figure II.7: Projet « In-Vivo » avec une bio-façade de 900 m ²	25
Figure II.8 : Les principaux matériaux de construction biosourcés	26

Liste des figures

Figure II.9 : le cycle de vie des matériaux biosourcés	27
Figure II.10 : Les intervenants au sein du cycle de vie d'un matériau biosourcé	28
Figure II.11 : Pont routier en bambou, Indonésie	29
Figure II.12 : maquette avant et après 30 mn du déclenchement de feu	30

Chapitre III : Les propriétés physico-chimiques des matériaux de base

Figure III.1: formation des liaisons peptidiques.....	35
Figure III.2: Structure primaire d'une protéine	36
Figure III.3: Représentation schématique d'une hélice α	37
Figure III.4 : Représentation schématique d'un Feuillet β	37
Figure III.5 : Représentation schématique d'une structure tertiaire	38
Figure III.6 : Représentation schématique d'une structure quaternaire	38
Figure III.7 : structure de la kératine alpha	42
Figure III.8: Structure d'une fibre de laine	42
Figure III.9: Représentation schématique d'une micro fibrille entourée d'une matrice	44
Figure III.10 : différents types de plumes	49
Figure III.11 : Structure détaillée d'une plume... ..	50
Figure III.12: Image ESEM montrant les structures tertiaires des plumes (les barbules) qui sont attachées aux barbes	51
Figure III.13 : Coupe transversale d'une barbe obtenue par ESM	52
Figure III.14 : Surface des barbes présentant une structure fibrillaire dépourvue d'écailles obtenue par ESM.	52
Figure III.15 : Fil tissé d'un mélange de barbes et de coton.	53
Figure III.16 : : Image ESM des barbes de plume et du coton	53

Liste des figures

Figure III.17 : La kératine β de la plume	57
Figure III.18. <i>Luffa cylindrica</i> , (a) jeune fruit, (b) fruit mature et sec	59
Figure III.19. <i>Luffa cylindrica</i> (a), grains de la <i>Luffa cylindrica</i> (b)	60
Figure III.20. Quatre parties montrant l'architecture de l'épongede Luffat et encourager les fruits à durcir au loin.	61
FigureIII.21. Fruit et grain de <i>Luffa Operculata</i> Cogn	63
Figure III.22. Fruit de <i>Luffa Echinata</i> Roxb	64
FigureIII.23. Structure de la cellulose	67
FigureIII.24. Structured e l'hémicellulose.	68
FigureIII.25. Structure de lignine	68
Figure III.26 : la lavande dans la nature	69
Figure III.27: les défèrent type de lavande	69
FigureIII.28 : l'isolation extérieure des murs et toiture avec du la paille de lavande.	71

Chapitre IV : Elaboration et interprétation des résultats

Figure IV-1 : Traitement des fibres traites avec des détergents et de l'eau chaude	73
Figure IV-2 : Nettoyage des fibres avec de l'eau et à l'aide d'un filtre	74
Figure IV-3 : Résultat final après le nettoyage et le séchage.	74
Figure IV- 4 : Lavande exposée au soleil.....	75
Figure IV- 5 : Récupération des fibres du la lavande après le séchage.....	75
Figure IV-6 : Eponge de courge luffa découpé en morceaux.....	76
Figure IV-7 : Un moule en verre pour la réalisation des plaques de dimension (40 x 30 x 1,2 cm).....	77
Figure IV-8 : La muraille de chine.	78

Liste des figures

Figure IV-9 : une partie de la muraille de chine.	78
Figure IV-10 : Vue microscopique du mortier au riz gluant.....	80
Figure IV-11 : (a) Mortier non organique, (b) mortier au riz gluant.	81
Figure IV-12 : Une couche de la patte de riz d'une épaisseur 0.4 cm	83
Figure IV-13 : Une couche de fibres de lavande rajoutée directement sur la patte d'une épaisseur d'environ 0.8 cm.	83
Figure IV-14 : Une couche de la patte de riz injectée à l'aide d'un outil sur les fibres de lavande.	84
Figure IV-15 : Mettre le couvert de moule.	84
Figure IV-16 : Notre moule prêt à l'utilisation.	85
Figure IV-17 : 1ère Couche de patte de riz d'une épaisseur de 0.4 cm.	85
Figure IV-18 : Deuxième couche constituée de fibres de dindes.	85
Figure IV-19 : Pâte de riz injectée sur les fibres à l'aide d'un outil.	86
Figure IV-20 : Préparation du moule et des fibres de luffa en plaques.	86
Figure IV-21 : La pâte de pomme de terre est ajoutée comme une première couche d'une épaisseur de 0.4 cm	87
Figure IV-22 : Des plaques de fibres de luffa rajoutées sur la pâte	87
Figure IV-23 : A l'aide d'un outil, on rajoute une deuxième couche de pâte de faible épaisseur.	88
Figure IV-24 : Une seconde couche de fibres de luffa est rajoutée dans le moule	88
Figure IV-25 : Enfin, une dernière couche est ajoutée sur les fibres avant de fermer le moule par son couvert.	89
Figures IV-26 : Les moules remplis subissent une compression à l'aide des éprouvettes en béton.	89

Liste des figures

Figure IV-27 : La plaque constituée de fibres de lavande et la pâte de riz après le démoulage	90
Figure IV-28 : La plaque fabriquée avec les fibres de dindes et la pâte de riz après le démoulage	91
Figure IV-29 : La plaque fabriquée avec les fibres de luffa et la pâte de pomme de terre après le démoulage.	91
Figure IV-30 : Séchage des moules dans l'étuve.	92
Figure IV.31 : la balance électronique utilisée pour mesurer les poids des plaques.	93
Figure IV .32 : première couche de la résine.	94
Figure IV .33 : première couche de fibre de plumes de dinde.	95
Figure IV.34 : deuxième couche de la résine.	95
Figure IV.35 : Les moules remplis subissent une compression à l'aide des éprouvettes en béton	96
Figure IV.36 : la plaque de fibre de plume de dinde avec la résine après le démoulage.	96
Figure IV.37 : une plaque d'isolant enveloppée d'aluminium.	97
Figure IV.38 : création d'une enveloppe d'aluminium à l'aide d'une soudeuse.	97
Figure IV.39 : l'aspiration de l'air qui se trouve à l'intérieur de l'enveloppe à l'aide d'une pompe à vide.	98
Figure IV.32 : Photo de CT Mètre.	101

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur l'isolation thermique

Tableau I.1: Conductivité thermique de quelques isolants	9
--	---

Chapitre III : Propriétés physico-chimiques des matériaux de base

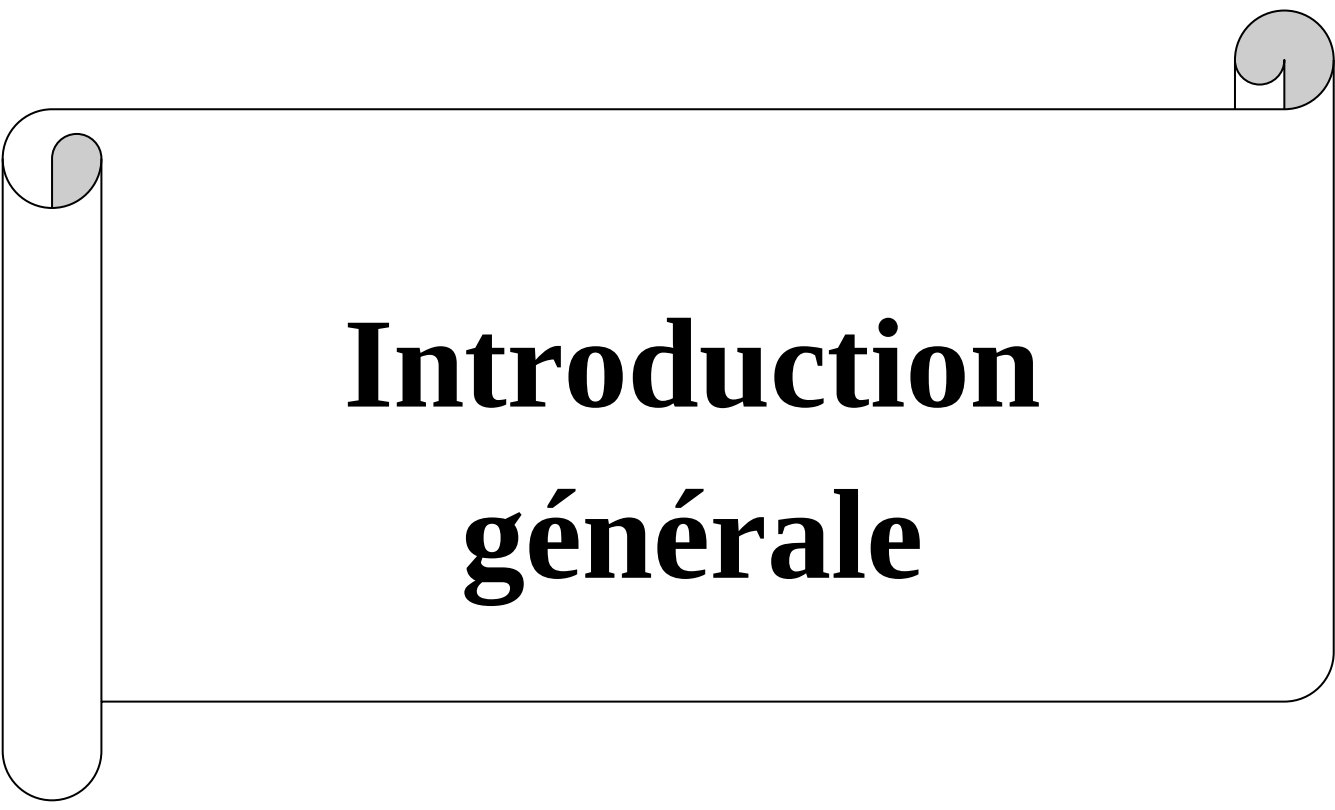
Tableau III.1: Production du poulet estimée en 2012	48
Tableau III.2 . Nombre de têtes de poulets dans les différents pays du grand Maghreb, de 2001 à 2007, selon les données statistiques de la FAO, 2007 (Nouad, 2011)	49
Tableau III.3 : Les propriétés physiques des plumes	57
Tableau III.4 : Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de dindes comparées à celles de poulets et de laine	58
Tableau III.5 : Teneur de la plume en azote, soufre et cendre (minéraux)	60
Tableau III.6: Composition en acides aminés ($\mu\text{mole/g}$) des différentes parties de la plume .	61

Chapitre IV : Elaboration et interprétations des résultats

Tableau IV-1: Composition du mortier de la muraille.	87
Tableau IV-2: Composition chimique clinker type Portland.	87
Tableau IV 3: Résistance à la compression à 28 jours du mortier en fonction de la proportion de riz gluant.	88
Tableau IV.4 : Différents poids de chaque plaque.	102

Nomenclature

Symboles latines	Désignation	Unité
R	Résistance thermique [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	$[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$
e	Epaisseur	[m]
T	Température	$[\text{C}^\circ]$ ou [K]
h	Coefficient d'échange par convection	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$
S	Surface	$[\text{m}^2]$
m	Le poid	[kg]
F	La force	[N]
P	La préssion	[Pa]
g	La gravité	$[\text{N}/\text{kg}]$
Symboles grecque	Désignation	Unité
λ	Conductivité thermique	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ρ	Masse volumique	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
Φ	Flux de chaleur	[W]

A decorative border resembling a scroll, with a light gray fill and a dark gray outline. It features rounded corners and a vertical strip on the left side. The text is centered within the main rectangular area of the scroll.

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur du bâtiment réputé grand consommateur d'énergie (presque la moitié de la consommation mondiale globale) est en outre, responsable de 25 % des émissions de gaz à effet de serre [1]. La réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des thermiciens du bâtiment qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale.

Pour atteindre ces objectifs, il faut intégrer des solutions passives qui ont été développées en augmentant fortement l'isolation des différentes composantes de l'enveloppe pour réduire au maximum les déperditions de chaleur vers l'extérieur.

Il est connu qu'une bonne partie des déperditions de chaleur du bâtiment se faisant par les murs, les matériaux isolants ont pour rôle de ralentir le transfert de chaleur à travers l'enveloppe. La qualité de l'isolant à prévoir dépend de sa conductivité thermique faible et du climat, de l'exposition des murs mais également des matériaux utilisés pour la construction. Le choix d'un matériau utilisé comme isolant dépend naturellement de sa disponibilité et de son coût.

La filière des matériaux biosourcés a été identifiée par de nombreux Ministères d'Écologie comme l'une des filières vertes ayant un potentiel de développement économique élevé pour l'avenir, car elle représente d'excellentes performances thermiques, cela notamment en raison de son rôle pour diminuer notre consommation de matières premières d'origine fossile, limiter les émissions de gaz à effet de serre et créer de nouvelles filières économiques. Le recours à des matériaux biosourcés s'inscrit donc parfaitement dans une démarche de développement durable.

Notre travail consiste à étudier et réaliser de nouveaux isolants à base des matériaux biosourcés.

Ce travail est structuré de la manière suivante :

- ✓ Le premier chapitre de ce travail est consacré aux généralités sur l'isolation thermique.
- ✓ Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les matériaux biosourcés.
- ✓ Le troisième chapitre est consacré à l'étude des propriétés physico-chimiques

Introduction générale

des matériaux de base.

- ✓ Le quatrième chapitre expose les divers matériels et les méthodes utilisées pour la réalisation des plaques d'isolant à base de matériaux biosourcés, ensuite l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus au cours des essais thermiques.
- ✓ Enfin, nous terminons la présentation de notre mémoire par une conclusion générale et les perspectives qu'offre cette étude.

A decorative frame resembling a scroll, with a light gray background and a dark gray border. The frame has rounded corners and a vertical strip on the left side. The title is centered within the frame.

Généralités sur l'isolation thermique

I. Introduction

L'isolation thermique est un des investissements d'économie d'énergie des plus rentables, notamment pour une construction neuve et peut être considérée comme un paramètre pour les économies d'énergie avec la plus longue durée de vie.

L'isolation thermique est obtenue par l'utilisation des matériaux spéciaux qui ont des propriétés thermiques et mécaniques comme la résistance mécanique, la tenue en température, la légèreté et la non hygroscopicité.

I.1 L'isolation thermique

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. On retrouve de l'isolation thermique dans : le bâtiment (maintien d'une température de confort à l'intérieur des habitations), l'industrie, l'automobile, le textile...etc.

Le but de l'isolation thermique est de réduire les échanges de chaleur entre un milieu froid et un milieu chaud. Elle peut avoir pour but de garder la chaleur présente dans un volume comme pour une maison, elle peut aussi avoir pour but de garder le froid dans un volume comme dans le cas d'un réfrigérateur. Cela passe par l'interposition d'un système isolant entre le milieu chaud et le milieu froid. Il s'agit le plus souvent de matériaux choisis à cet effet, que l'on appelle généralement des isolants thermiques. Il peut aussi s'agir de flux d'air entre ces deux milieux.

L'isolation est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations d'énergie, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

I.2 Isolants thermiques

Un isolant est un corps ou un matériau qui ne conduit pas la chaleur, il a une masse volumique très faible du fait de sa structure poreuse. Tous les matériaux constitués de cellules emprisonnant de l'air immobile seront d'excellents isolants, c'est le cas du polyuréthane, le polystyrène expansé, les plumes [1]. Thermiquement, un isolant est un matériau qui a une faible conductivité thermique, c'est-à-dire un matériau capable d'opposer

au flux thermique qui le traverse, une grande résistance thermique en conduction.

I.3 Types d'isolants

On peut différencier les isolants thermiques les uns des autres par de nombreux paramètres. On distingue alors, les isolants naturels et les isolants synthétiques. Il existe trois groupes d'isolants thermiques :

I.3.1 Les isolants synthétiques

Ce sont des isolants modernes issus de la pétrochimie (à base de produits pétroliers), comme :

- **Le polyuréthane :** La fabrication des isolants en polyuréthane est effectuée à partir de moussage d'un composé de polyols. Les isolants en polyuréthane ont une conductivité thermique qui varie de 0,021 à 0,028 W/m.K suivant la technique de production et les types de parements utilisés. Outre les usages classiques en bâtiment, les polyuréthanes sont particulièrement appropriés pour les applications qui nécessitent un comportement à l'eau à long terme. Les panneaux de polyuréthane sont utilisés en isolation de chapes ou en isolation extérieure des murs. Ce type d'isolant est également utilisé pour l'isolation sous les dalles, sous chape flottante ou pour améliorer les performances d'une isolation de parois verticales derrière une contre cloison. Pour construire ou rénover, le polyuréthane est efficace. En mousse projetée, il permet d'isoler des parties difficiles d'accès. Autre avantage majeur, le polyuréthane est totalement imperméable. Il n'est donc pas nécessaire de poser un pare-vapeur, le polyuréthane joue lui-même ce rôle [1].
- **Le polystyrène :** Le polystyrène est issu de la pétrochimie. Il est obtenu par polymérisation du styrène. La fabrication du polystyrène expansé est effectuée par expansion à la vapeur d'eau des billes de polystyrène. Il se présente sous différentes qualités :
 - ✓ Le polystyrène expansé est principalement utilisé en panneaux d'isolation intérieure et extérieure et en vrac ; le polystyrène expansé peut aussi être utilisé comme emballage alimentaire.
 - ✓ Le polystyrène extrudé qui est particulièrement adapté pour les applications qui nécessitent une très forte résistance mécanique aux charges ou pour les applications qui nécessitent un comportement à l'eau à long terme (dallages industriels, terrasses circulables,). Cet isolant est commercialisé sous la forme de panneaux [1].

I.3.2 Les isolants en fibres minérales

- **Laine de roche** : C'est un matériau isolant fabriqué à partir d'un matériau naturel issu de l'activité volcanique. La conductivité thermique des laines de roche varie de 0,042 à 0,033 W/m.K. La laine de roche est un isolant non hydrophile, ce qui signifie que lorsqu'une laine de roche est mouillée, il suffit de la laisser sécher, sans ne la manipuler ni la comprimer. Lorsqu'elle retrouve son épaisseur, elle recouvre ses caractéristiques de conductivité thermique. Le conditionnement peut prendre diverses formes : rouleaux, panneaux rigides, coquilles (calorifugeage) et flocons (épandage mécanique ou manuel). La laine de roche, incombustible, est particulièrement adaptée à des applications nécessitant une forte résistance mécanique [2].
- **Laine de verre** : C'est un matériau isolant fabriqué à partir de produit naturel (sable). On l'utilise dans le bâtiment pour l'isolation thermique et l'isolation phonique ou encore comme absorbant pour la correction acoustique ou dans la protection contre les incendies. La conductivité thermique des laines de verre varie de 0,030 à 0,040 W/m.K. Pour son usage dans le bâtiment, la laine de verre est classée non hydrophile. Le conditionnement de la laine de verre prend la forme de rouleaux, panneaux ou flocons. Sa structure poreuse et élastique permet d'affaiblir la transmission des bruits aériens, de chocs et d'assurer la correction acoustique à l'intérieure des locaux. La réaction au feu est performante puisque les laines minérales sont incombustibles par nature [2].

I.3.3 Les isolants en fibres végétales

- **Fibres de bois** : Les isolants à base de fibres de bois sont fabriqués à partir de longs copeaux de bois issus d'un processus de rabotage, liés par un liant minéral et moulés à leur épaisseur finale par procédé humide. Le liant minéral utilisé à leur fabrication peut être un matériau comme le ciment ou des combinaisons de ciment et de chaux, de la magnésite ou encore du plâtre. Ils ont disponible sous forme de panneaux ou plaques rectangulaires rigides. La résistance à la compression de ces plaques ou panneaux en fait des produits généralement utilisés dans des applications du bâtiment nécessitant une résistance mécanique.
Leur coefficient de conductivité thermique varie de 0,041 à 0,050 W/m.K selon la masse volumique de produit choisi. Il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas d'humidité au sein des laines de bois. Toute retenue d'humidité est susceptible d'engendrer une dégradation de la performance thermique [2].

**Figure I-1** : Laine de bois**Figure I-2:** bois en vrac

- **Liège expansé** : Matériau naturel, l'utilisation de l'écorce du chêne liège dans l'habitat est ancienne : la décoration des murs et sols, l'isolation et la correction acoustique, l'isolation thermique. La récolte de l'écorce de liège ne peut être faite que tous les 9 ans (temps nécessaire à la reconstitution de l'écorce). Le liège décoratif étant utilisé en épaisseurs relativement faibles (tissu mural ou dalles de 2,5 à 15 mm), il ne peut constituer un isolant thermique suffisant. Il faut alors se tourner vers le liège manufacturé aggloméré ou expansé pour pouvoir obtenir une isolation thermique suffisante.

Proposé sous forme de granulés ou de panneaux, la conductivité thermique déclarée du liège varie de 0,038 à 0,043 W/m.K. Le liège expansé en panneaux est utilisé dans l'habitat pour l'isolation tant en murs qu'en toitures ; sa bonne résistance à la compression lui permet également d'être utilisé en application nécessitant de fortes résistances mécanique (dalle, toiture-terrasse). Il est naturellement imputrescible et possède une bonne stabilité dans le temps [2].

**Figure I-3:** Liège

- **Chanvre** : il se présente en rouleaux souples et en panneaux semi-rigide [1].



Figure I-4 : Chanvre

I.3.4 Les isolants d'origine animale

- **Laine de mouton** : elle se présente sous forme de rouleaux, en panneaux semi-rigides, en Écheveaux et en feutres.



Figure I-5: panneau de laine



Figure I-6 :Laine de mouton en vrac

- **Plumes** : elles se présentent en rouleaux et en panneaux semi-rigides [1]

I.4 Propriétés d'un isolant**I.4.1 La capacité thermique massique**

C'est la capacité du matériau à emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. Elle caractérise la quantité de chaleur à 1kg de matériau pour élever sa température de 1°C. Elle est exprimée en J/[kg.K].

I.4.2 La masse volumique

La masse volumique ou densité d'un matériau est exprimée en kg/m³. Il s'agit de la masse du matériau par unité de volume. D'une manière générale, les matériaux apportant de l'inertie possèdent une forte masse volumique.

I.4.3 L'inertie thermique d'un isolant

On a l'habitude de présenter l'inertie thermique d'un corps comme étant sa capacité à emmagasiner de la chaleur pour la restituer ensuite progressivement. Plus un matériau est lourd et compact, plus il a une inertie thermique importante. Ainsi, une maison en parpaing a une inertie thermique importante alors qu'une maison à ossature à bois n'en a quasiment aucune. Toute paroi va amortir et déphaser le flux de chaleur induit par les sollicitations extérieures (température, ensoleillement) [2]. L'amortissement et le déphasage sont d'autant plus marqués que la masse surfacique de la paroi est importante (forte inertie thermique).

Si l'inertie d'une construction est faible, la température intérieure va suivre de près les variations de la température extérieure. Conséquence : la température intérieure en été risque d'être élevée pendant la journée. En hiver, la température intérieure risque d'être basse la nuit.

Au contraire, si l'inertie est importante, elle peut être utile en été : la température intérieure va rester à une température plus fraîche que celle de l'extérieure va être à une température plus élevée que celle de l'extérieure la nuit. L'effet d'inertie peut être détruit par des revêtements muraux ou de sol (moquette, plafond acoustique, isolation placée côté intérieur... etc.).

I.4.4 La capacité hygrothermique

En complément de l'inertie thermique, certains matériaux peuvent apporter une plus-value dans la régulation de la température et de l'humidité des locaux, grâce à leur capacité hygrothermique. Encore peu caractérisée, cette notion est particulièrement présente dans le cadre des matériaux biosourcés qui agissent comme de véritables matériaux à changement de phase. En attendant les résultats des études en cours sur ce sujet, les fiches de ce guide présentent pour chaque matériau leur niveau estimé de capacité hygrothermique.

I.4.5 Le déphasage thermique

Le déphasage thermique définit le temps que met un front de chaleur pour traverser une épaisseur donnée de matériau. Cette notion dynamique dépend également principalement de la masse volumique et de la capacité thermique massique du matériau. La prise en compte déphasage thermique est notamment utile en été pour déclarer au cœur de la nuit plus fraîche la pénétration de la chaleur reçue par les parois extérieures durant la journée.

I.4.6 La conductivité thermique

La conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Elle est symbolisée par la lettre grecque λ (lambda). La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur associé à cette grandeur. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur.

Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par Kelvin (W/m.K).

La conductivité thermique dépend principalement de :

- La nature du matériau
- La température du matériau

Quand la température augmente, un isolant perd de sa capacité d'isolation et, à l'inverse, un conducteur perd de sa capacité de conduction.

Mais d'autres paramètres peuvent être influents également sur ce paramètre ; on peut citer :

- L'humidité du matériau (l'humidité fait accroître la valeur de la conductivité)
- La pression intervient également.

Les valeurs de la conductivité thermique de quelques isolants sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau I-1 : Conductivité thermique de quelques isolants [1]

Matériaux	Densité kg/m ³	Conductivité thermique W/m ² .°C	Capacité thermique Wh/m ³ .°C	Epaisseur hiver en cm	Epaisseur été en cm ¹
Laine de bois	160	0,050	90	23	20
Laine de bois	55	0,040	31	18	31
Laine de bois	40	0,040	23	18	36
Ouate de cellulose (insufflée)	60	0,038	31	17	30
Ouate de cellulose (panneaux)	85	0,040	44	18	26
Paille de lavande broyée	110	0,055	50	25	29
Chênevotte	90	0,055	48	25	29
Liège expansé (vrac)	60	0,045	31	20	33
Perlite	80	0,050	22	23	41
Vermiculite	100	0,075	96	34	24
Polyuréthane rigide	30	0,030	12	14	43
Coton	20	0,040	6	18	71
Laine de mouton	10	0,040	5	18	78
Laines de verre	15	0,040	5	18	78
Laines de roche	40	0,045	34	20	32
Polystyrène	7	0,035	3	16	94
Fibres polyester	15	0,045	2	20	130
Structure					
Brique alvéolaire	750	0,125	210	56	21
Bois lourd (chêne, mélèze)	600	0,210	315	95	22
Bois léger (résineux, feuillus)	300	0,120	158	54	24
Béton cellulaire	400	0,147	96	66	34
Paille	80	0,070	31	32	41

I.5 Méthodes de mesure de la conductivité thermique

Des avancées importantes sont apparues récemment dans le domaine des techniques expérimentales de mesure de la conductivité thermique. Pour accéder à cette mesure, il est généralement nécessaire de recourir à des techniques d'excitation, fondées sur la méthodologie suivante. Une des faces (parfois tout l'échantillon) de l'échantillon à étudier est soumise à un flux thermique d'une durée dépendant de la nature du milieu étudié. Un suivi de l'évolution de la température en fonction du temps permet alors de déduire la conductivité thermique. La relation liant la variation de la température et l'évolution du temps dépend du modèle thermique utilisé pour identifier cette dernière [3].

Le choix d'une méthode de mesure de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau-précision se pose de manière précise, de nombreux paramètres sont à prendre en compte comme:

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire ou quasi établi.
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique,)
- Les dimensions et les rapports de dimension.
- La simplicité de la méthode.
- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres.

Une distinction entre différentes méthodes s'appuie sur la définition du régime thermique temporel du milieu. Ainsi nous pouvons faire référence à deux classes :

Les mesures stationnaires et non stationnaires.

I.5.1 Les méthodes en régime stationnaire

Ces méthodes sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants [4]. Elles consistent à supposer le milieu en équilibre thermique, et soumis à un flux stationnaire en fonction du temps. Le principe de mesure repose sur l'exploitation des mesures de la température en divers points du milieu, ainsi en s'appuyant sur la loi de Fourier et les conditions aux limites nous pouvons déterminer les grandeurs physiques du milieu.

Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes : la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode de la barre, la méthode des boîtes et la méthode du flux radial.

I.5.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée [5]

C'est une expérience en régime permanent (ISO 8302) où l'on impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel, et on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une plaque de faible épaisseur par rapport aux dimensions traverses de l'échantillon. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure I.7.

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que :

$$T_1 - T_2 = R \cdot \phi \quad (I.1)$$

Où : $R = \frac{e}{\lambda}$

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants.

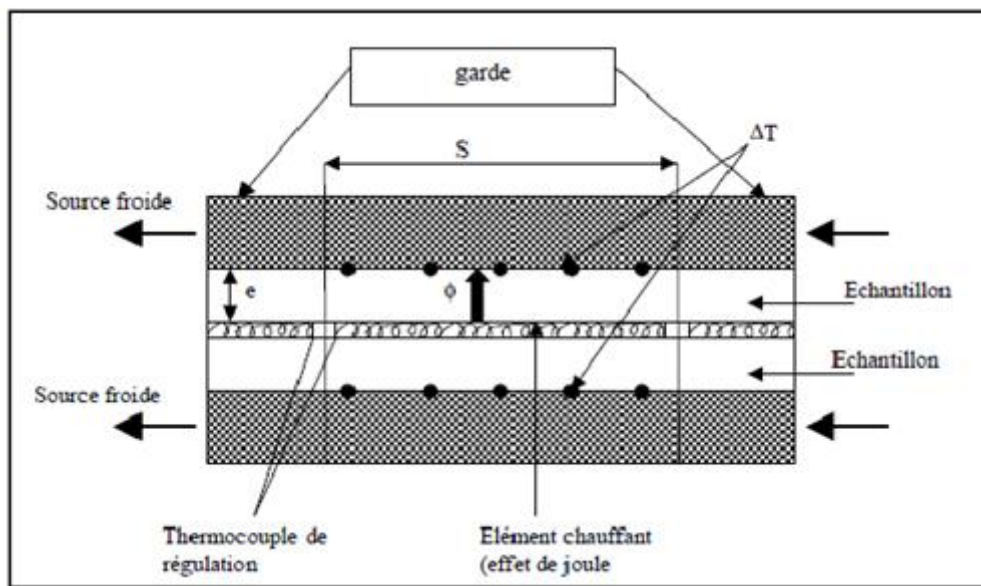


Figure I-7 : Principe de la plaque chaude gardée[5]

Une autre extension de cette méthode a été développée, et qui fait appel à l'utilisation de mesures du flux unidirectionnel par deux fluxmètres. La figure I.8 montre en exemple des mesures du flux traversant l'échantillon donné par la moyenne du flux entrant et sortant.

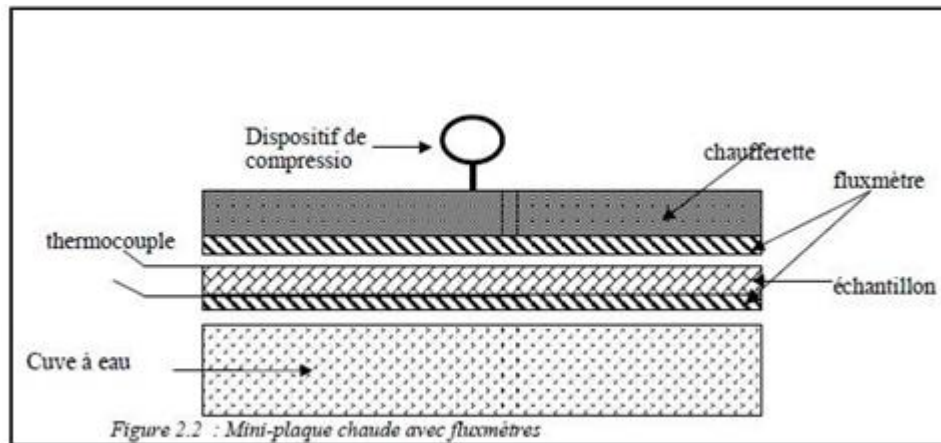


Figure I-8 : Mini-plaque chaude avec un flux mètre [5]

I.5.2 Les méthodes non stationnaires

Le champ de leur application est très vaste, grâce à plusieurs avantages : mesures directes des paramètres thermo physiques du milieu, la durée d'excitation thermique est courte et elles sont faciles à mettre en œuvre. Les mesures de la conductivité thermique par les méthodes dites non stationnaires consistent à exploiter des signaux de températures répartis dans un milieu en régime transitoire. Le principe de mesure s'appuie sur un modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées.

De nombreuses méthodes non stationnaires ont vu le jour pour les mesures de la conductivité thermique, nous pouvons citer : la méthode fil chaud, à plan chaud, à ruban chaud, à pastille chaude et HotDisk.

I.5.2.1 Méthode du fil chaud [6]

Sa rapidité, sa facilité de mise en œuvre et son coût peu élevé en font d'elle la méthode de caractérisation la plus connue et la plus utilisée par le monde professionnel. Le principe expérimental est particulièrement simple : on place un fil métallique entre deux blocs du matériau à étudier pour les matériaux solides et dans une enceinte fermée pour les gaz et les liquides. Le fil est relié à une alimentation électrique qui lui fournit un échelon de puissance.

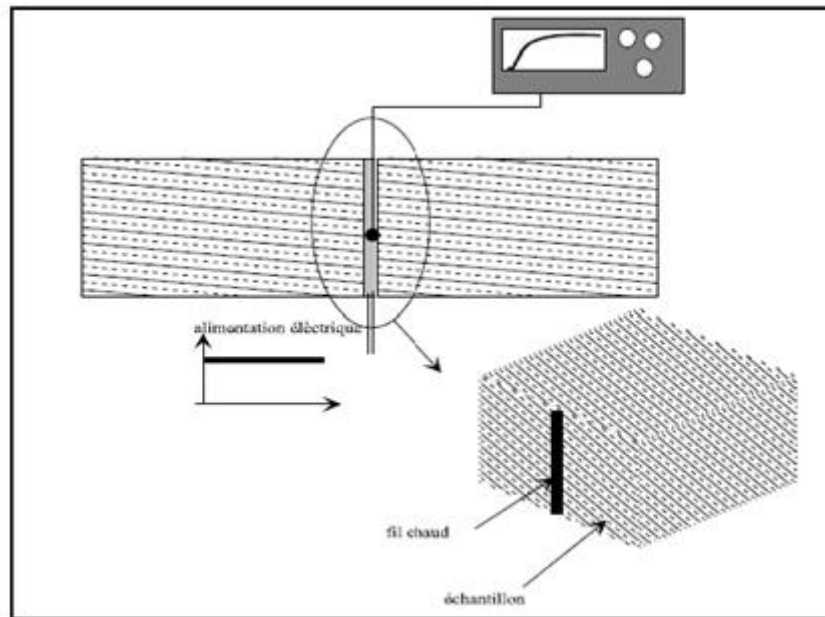


Figure I-9 :Dispositif expérimental du fil chaud [6]

Dans le cadre d'une modélisation simple du phénomène, on considère un fil infiniment long produisant une densité source de chaleur radiale, appliquée à l'instant initial.

On suppose que l'énergie est dissipée uniquement par conduction. L'échantillon est de dimensions infinies et ses propriétés thermo physiques sont constantes. L'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques s'écrit :

$$\left(\frac{\partial T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \right) \quad (\text{I.2})$$

I.6 La résistance thermique

Sur le plan thermique, une paroi est caractérisée par sa résistance thermique R qui quantifie la capacité de la paroi à s'opposer aux échanges thermiques. En effet, la résistance thermique est d'autant plus élevée que l'isolation est plus efficace. A la différence du coefficient de conductivité (λ), qui caractérise intrinsèquement un matériau, la résistance thermique est significative pour les parois car elle tient compte de leurs géométries. Elle est définie par la relation suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{I. 3})$$

Avec :

e : épaisseur de la paroi (m)

λ : la conductivité thermique (W/m.K)

R : la résistance thermique ($\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$)

Selon le type de transfert thermique, on a :

- la résistance thermique de conduction en conduction thermique.
- la résistance thermique de convection en convection thermique.
- la résistance thermique de rayonnement en rayonnement thermique.

Nous rappelons succinctement les modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement), dans ce qui suit séparément. Il faut noter que ces modes sont en général inter-dépendants et qu'ils se présentent simultanément dans les problèmes pratiques.

I.6.1 Transfert de chaleur par conduction

Le phénomène de la conduction de la chaleur existe dans tous les corps, solides ou fluides. C'est un transfert par contact sans mouvement de matière. Il correspond à un accroissement de l'énergie de vibration du réseau cristallin pour les solides, et à une transmission d'énergie cinétique opérée par les chocs entre les molécules pour les fluides.

Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier énonçant que « le flux surfacique est proportionnel au gradient de température », ce qui se traduit pour un matériau isotrope homogène par la relation :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{I.4})$$

Avec ;

Φ : densité de flux de chaleur (W/m^2)

λ : conductivité thermique du matériau considéré ($\text{W}/\text{m.K}$)

I.6.2 Transfert de chaleur par convection

La convection est un transfert de chaleur se produisant dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert a lieu au sein des fluides ou entre un solide et un fluide. Dans le domaine du bâtiment en particulier, on distingue deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée.

- La convection naturelle recouvre les écoulements des fluides interstitiels, induit par les variations de masse volumique dues aux différences de température.
- La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure d'origine mécanique (pompe, mise en pression, ventilateur, etc.).

- La convection mixte mêle de manière équivalente les deux modes de convection précédemment cités. La convection est un phénomène très complexe où la thermique et la mécanique des fluides sont couplées.

Dans le cas d'un transfert entre un solide et un fluide, le flux thermique échangé entre la surface et le fluide en mouvement est donné par la loi de Newton :

$$\Phi = h S (T_c - T_f) \quad (I.5)$$

Où:

Φ : Flux thermique traversant la paroi (W)

T_c : Température de la paroi chaude (°C ou K)

T_f : Température du fluide loin de la paroi (°C ou K)

S : Surface d'échange (m²)

h : Coefficient d'échange par convection (W/ m².K)

I.6.3 Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps séparés par du vide ou par un milieu transparent par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel solide ou fluide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu, la convection et la conduction sont également présentes, il reste négligeable tant que la température du solide se trouve en dessous de 200 °C.

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont le siège de transferts thermiques complexes dus au couplage conduction- convection- rayonnement.

Dans la structure du bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligée. De même, au voisinage de la température ambiante, les parts de rayonnement et de transfert de masse ne seront pas également prises en compte.

L'intensité du rayonnement thermique provenant d'une surface dépend non seulement de la température de cette surface, mais aussi de son émissivité, cette intensité est donnée par l'équation suivante :

$$M = \varepsilon \sigma (T^4) \quad (I.6)$$

Où

ε : est l'émissivité de la surface.

σ : est la constante de Stephan Boltzmann est vaut de $5,67.10^{-8} \text{ W. m}^{-2}.\text{K}^{-4}$.

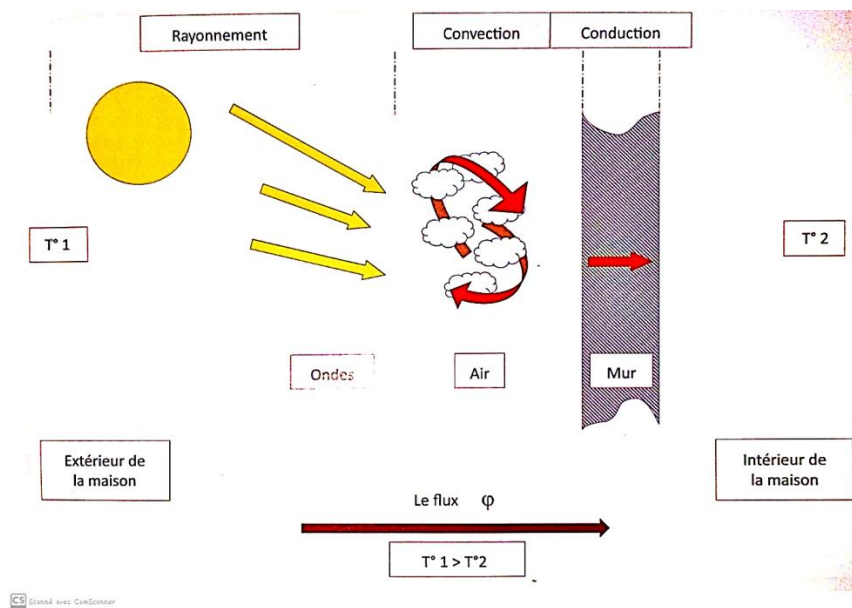


Figure I-10 :Trois modes de transmission de chaleur[7]

I.7 Techniques d'isolation thermique

Il existe trois techniques de mise en œuvre de l'isolation thermique : l'isolation intérieure, l'isolation extérieure et l'isolation répartie.

I.7.1 L'isolation intérieure

L'isolation intérieure est la solution la plus répandue, surtout en rénovation. Elle est d'un coût raisonnable et relativement simple à mettre en œuvre (à la portée de tout bon bricoleur). La pose des éléments isolants est réalisée par l'intérieur de l'habitation au niveau des murs extérieurs, des combles et des sols. Cette solution présente de nombreux inconvénients :

- L'épaisseur des isolants peut diminuer sensiblement le volume habitable.
- L'inertie thermique du mur n'est pas mise à profit.
- Les ponts thermiques sont nombreux et difficiles, voire impossible à éliminer.
- Risques de condensation au cœur des parois.

En revanche, ce type d'isolation permet d'obtenir un habillage impeccable de la paroi intérieure, quel que soit l'état du mur d'origine.

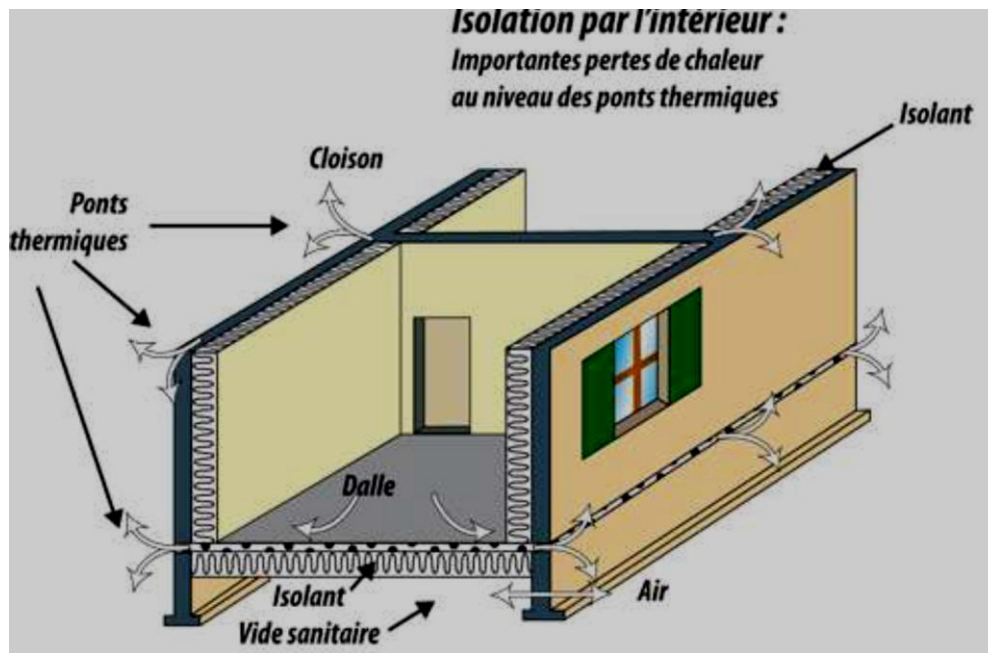


Figure I-11: Isolation par l'intérieur[8]

I.7.2 L'isolation extérieure

L'isolation extérieure est réalisée par un isolant posé sur tous les murs extérieurs, recouverts d'un enduit ou d'un bardage. La toiture peut également être isolée par le même procédé. La mise en œuvre d'une telle solution est délicate parce qu'il faut assurer l'étanchéité et installer un échafaudage : elle sera confiée de préférence à un professionnel.

Une telle solution est envisageable si le ravalement de l'habitation nécessite une réfection. Il en est de même pour la toiture, ce type d'isolation ne pouvant être réalisé sur une toiture existante, mais il est possible de la combiner avec une isolation des combles par l'intérieur, dès lors que l'on assure la continuité de l'isolation.

Ce procédé est de loin le plus performant puisqu'il supprime de fait pratiquement tous les ponts thermiques. Le confort intérieur est amélioré grâce à l'inertie thermique. La maçonnerie est protégée des intempéries et des variations de température, ce qui augmente sa pérennité.

Ses inconvénients sont :

- La fragilité accrue de la façade peut être considérée comme un inconvénient avec ce type d'isolation.
- L'entretien peut également être plus important, par exemple avec des bardeaux en bois.

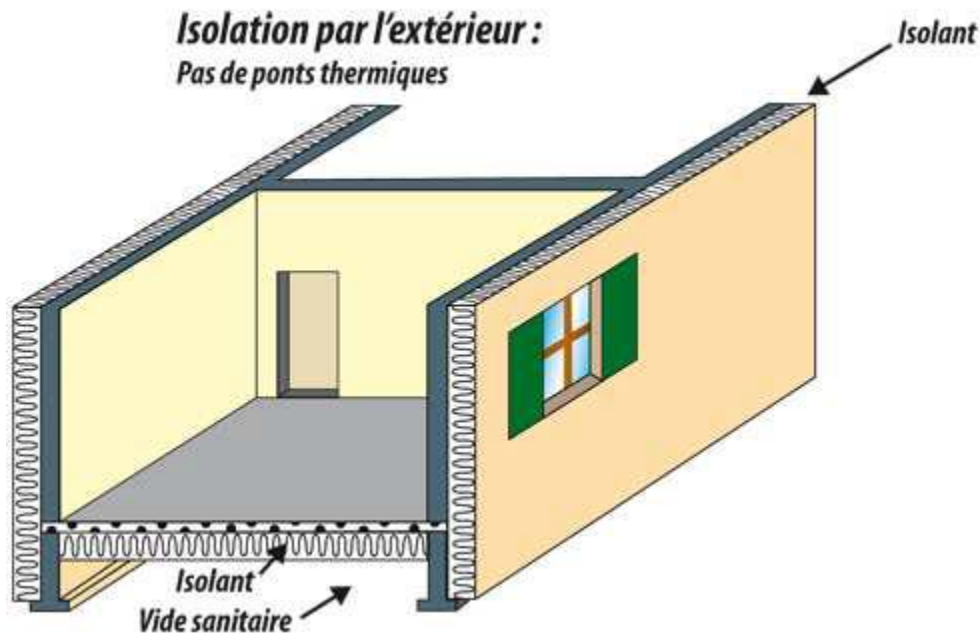


Figure I-12: Isolation par l'extérieur[8]

I.7.3 L'isolation répartie

L'isolation répartie concerne les matériaux de l'habitation. Elle comprend la construction des murs extérieurs en matériaux isolants (mono murs terre cuite, béton cellulaire, plâtre ou autre). L'isolation des combles est assurée de l'intérieur ou de l'extérieur, par contre celle des sols est en isolation intérieure.

L'isolation répartie peut être adoptée en rénovation en cas de création d'un niveau ou surélévation de la maison. Il existe différents types de produits correspondants à des techniques de pose différentes :

a. Les panneaux isolants simples

Ils sont protégés par une cloison de doublage (plaque de plâtre ou de gypse). Dans ce cas, l'isolant est le plus souvent collé au support, et lorsque ce support est trop irrégulier, il est préférable d'envisager des fixations mécaniques.

b. Les panneaux composites (ou complexes)

Ils sont constitués d'un parement en plâtre cartonné (qui évite la contre-cloison) et d'un isolant (généralement le polystyrène, le polyuréthane ou la laine minérale). Posés sur des cales

en bois, les panneaux sont fixés contre le mur, par collage (paroi sèche et plane) ou par vissage tasseaux.

c. Les panneaux sandwich

Ils sont constitués d'un isolant collé en usine entre deux plaques de plâtre. Plus rigides que les précédents du fait de leur double parement. Ils sont utilisés pour isoler des murs humides ou présentant des irrégularités importantes. Leur pose s'effectue par vissage sur des tasseaux, en ménageant une lame d'air de 3 cm environ.

d. Les enduits isolants et l'isolation projetée des solutions originales

C'est une solution intéressante en rénovation, un enduit isolant épais composé par exemple de chanvre /chaux, permet de respecter la perméance (capacité à laisser passer la vapeur d'eau) d'un mur en pierres, évite la sensation de paroi froide et permet de préserver l'harmonie architecturale de l'ancien (mur bicornue, pierre de taille etc...).

L'isolation projetée consiste à projeter un isolant (mousse polyuréthane, ouate de cellulose) directement sur les éléments à isoler ou dans des caissons. L'avantage réside dans une isolation parfaite sans possibilité de fuite thermique entre les différents panneaux.

I.8 Comportement des parois du bâtiment

La recherche des conditions de confort de l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois.

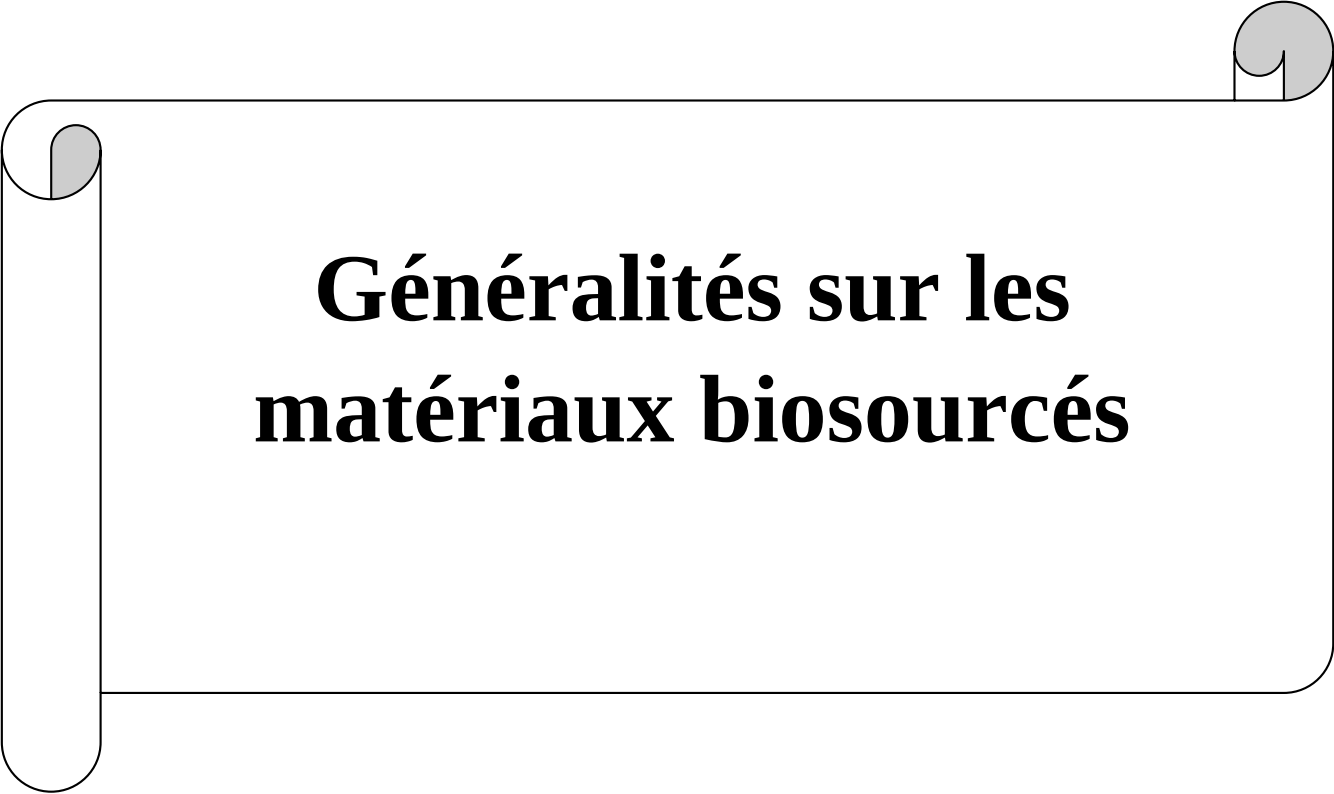
I.8.1 Comportement hydrique

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont des matériaux poreux, ils sont composés d'au moins deux phases ; la phase solide qui constitue le squelette du matériau, et les pores de dimensions variables. Ces derniers peuvent être ouverts (connectés à l'extérieur) ou fermés (entièrement entourés de la phase solide). Cette particularité les rend le siège de plusieurs phénomènes tels que la fixation et la migration de l'humidité, l'humidification, le changement de phase...etc.

I.8.2 Comportement thermique

Les échanges thermiques au sein des matériaux poreux sont des phénomènes de transfert d'énergie sous forme de chaleur. Ils sont régis par plusieurs phénomènes :

- Conduction dans la matrice solide, dans la phase liquide (généralement l'eau), dans la phase gazeuse contenue dans les pores ;
- Convection dans les pores,
- Rayonnement entre les parois des pores,
- Evaporation- condensation qui implique un transfert de chaleur par la chaleur latente sous l'effet d'un gradient de concentration de température,
- Diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black border. The scroll is partially unrolled, with the top corners showing the inner curve of the roll. The title is centered on the unrolled portion.

Généralités sur les matériaux biosourcés

II.1 Qu'est-ce qu'un matériau biosourcé ?

Les matériaux biosourcés sont des matériaux issus de la biomasse [1], constitués de la matière organique d'origine du vivant (biomasse végétale et animale) incluant les matières recyclées [2], pour en faire à la fin des produits aux gammes vérifiées, de plus en plus performants et compétitifs [3].

- **Notions indispensables**

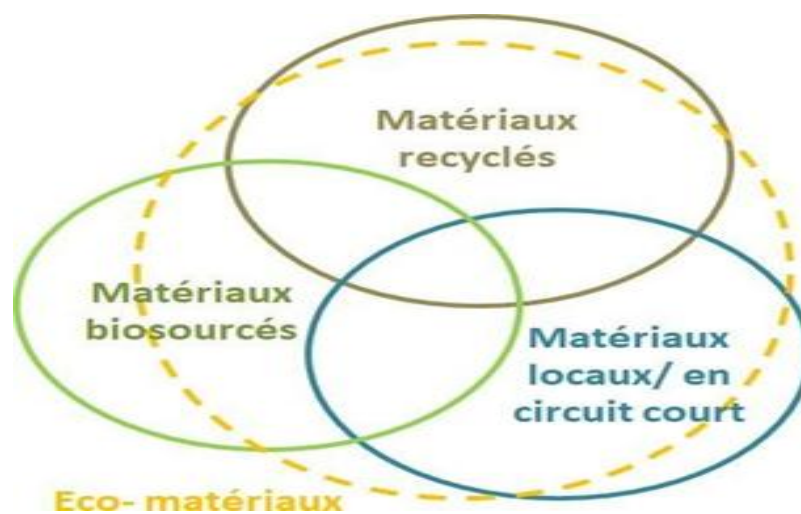


Figure II.1 : Les différents matériaux de la biomasse

a. Le matériau local

C'est un matériau dont la distance d'approvisionnement est faible, entre le lieu d'extraction ou de fabrication et le chantier.

b. Les matériaux en circuits courts

Ce sont des matériaux dont l'approvisionnement est direct, cela signifie qu'il y a peu ou pas d'intermédiaire entre le lieu d'extraction et le chantier.

c. Les matériaux recyclés

Transformés dans les unités de recyclage ou par des particuliers / artisans...etc.

II.2. Utilisation de la biomasse à travers l'histoire

La biomasse utilisée dans la construction ne date pas d'aujourd'hui, nous pouvons remonter jusqu'à la période paléolithique où dès lors que l'homme a eu besoin de se

protéger des contraintes environnementales, a construit des huttes réalisées à partir de peaux de bêtes, de pailles, de branches...etc.



Figure II.2 : Hutte en paille et branches au japon



Figure II.3: Hutte en peaux de bêtes

Avec l'avènement du néolithique apparaissent les premières réalisations en torchis à base de terre, fibres et branches végétales. Cependant, le végétal au fur et à mesure des siècles tend à se faire de plus en plus rare. Il est remplacé par des matériaux géosourcés (la pierre, l'argile et le bois) ; ce qui a permis de réaliser des édifices plus grands.



Figure II.4: Vestiges d'une maison en pierre



Figure II.5: La maison néolithique de Saint-Just

La biomasse est présente dans le bâti vernaculaire, ces deux notions entretiennent donc des liens étroits qui se conjuguent dans une architecture qui s'intègre aux spécificités des territoires (ressources, climat, organisation sociale et culture ...).

Relégués au rang de solution du passé, les matériaux issus de la biomasse ont été ignorés par l'industrialisation et la standardisation du secteur de la construction. Après les

chocs pétroliers des années 70/80, on verra peu à peu leur réapparition suite à la sensibilisation du monde aux questions environnementales où on éprouve un besoin de retour au naturel et à la durabilité.

Aujourd'hui, on travaille sur l'amélioration des performances de ces matériaux biosourcés lever les limites et les obstacles rencontrés dans le domaine du bâtiment.

- **Etude Bio World Resource Benchmark**

Dans le cadre des initiatives de recherche sur les potentiels offerts par la biomasse dans le secteur de la construction, une étude a été menée par l'école des Arts et Métiers en France en 2015[4].

Cette étude s'appuie sur un panel de quinze pays répartis sur les différents continents et sélectionnés à partir d'un ensemble de critères : situation géographique et climatique, utilisation des terres, démographie et prévisions d'évolution, niveau économique, consommation d'énergie et production de CO2/Hab.

Cinq pays ont fait l'objet de recherches plus approfondies : la France, le Royaume-Uni, la Colombie, le Sénégal et le Vietnam.

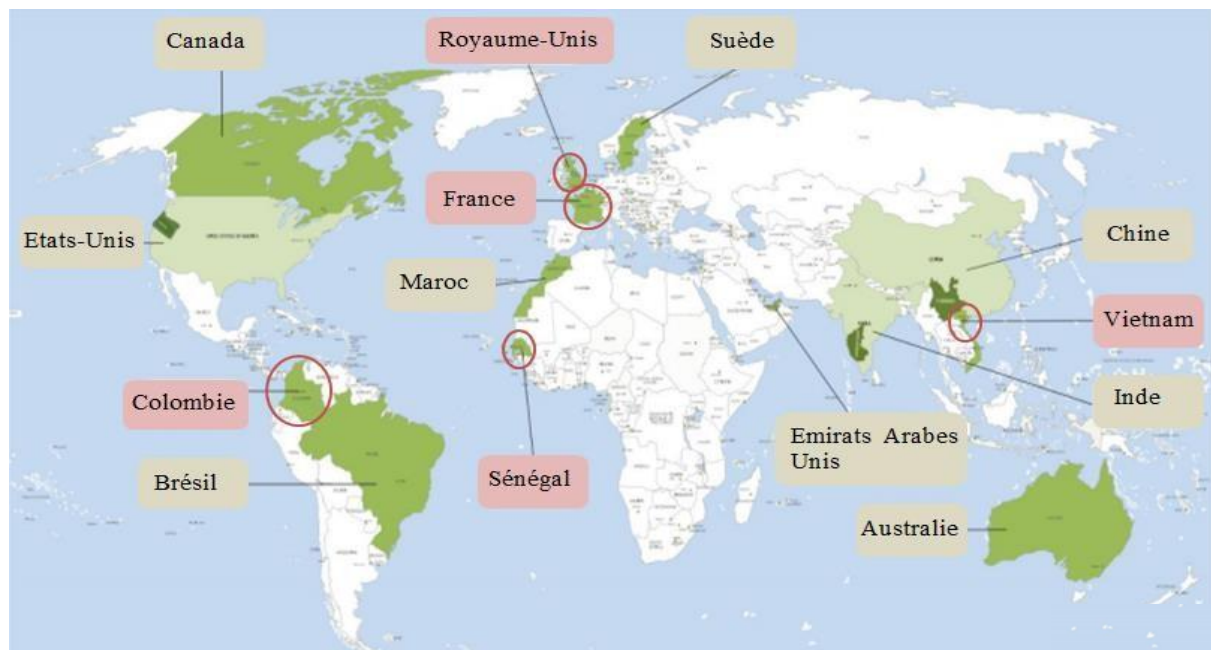


Figure II.6: Panorama de 14 pays sélectionnés dans le cadre de l'étude Bio Word Ressource Benchmark

L'objectif de cette étude était d'avoir une première idée sur les ressources disponibles, les principaux matériaux utilisés, la maturité des filières, le niveau de soutien apporté par les politiques publiques, les exemples de constructions (modernes, vernaculaires) utilisant des matériaux biosourcés, les projets en cours ou à venir.

II.3. Cinq origines de la biomasse

- a- **Sylviculture** : La forêt est considérée comme source principale des matériaux de construction biosourcés, elle couvre environ 30% de la planète. Il reste essentiel de respecter les pratiques de la gestion responsable et durable de cette dernière.
- b- **Agriculture** : Les surfaces agricoles sont variables d'un territoire à un autre. Cela dépend des rendements et des ressources en eau.
- c- **Aquaculture** : Les matières issues de cette filière (précisément algues) sont rarement utilisées dans la construction, exceptée dans certains cas où ils utilisent des savoir-faire vernaculaires ou des innovations expérimentales (voir l'exemple ci-dessous).

Exemple : Il s'agit d'une bio-façade qui produit des micro-algues sur les parois du bâtiment, elle permet :

- D'améliorer la qualité de l'air et de réduire l'impact carbone grâce aux algues qui se nourrissent de CO₂.
- D'économiser l'énergie. Elle agit comme une serre en accumulant l'énergie solaire et crée un tampon thermique qui améliore l'isolation du bâtiment.



Figure II.7: Projet « In-Vivo » avec une bio-façade de 900[5]

- a- **Le recyclage** : Il offre à certaines matières biosourcées une deuxième vie. Ces matières s'intègrent dans le concept d'économie circulaire et sont parfois produites par des entreprises (associations, coopératives, fondations ...) issues de l'économie sociale et solidaire.
- b- **Écosystèmes naturels** : Ils présentent une ressource aussi importante que la forêt ou l'agriculture, une exploitation maîtrisée pourrait fournir des quantités conséquentes de matières premières. Exemple : Au Maroc, une exploitation raisonnée des alfatières (3.2 millions d'hectares) pourrait produire un million de tonnes de fibres par an [6].

Ces filières se répartissent selon trois grandes familles : animale, végétale et recyclée.

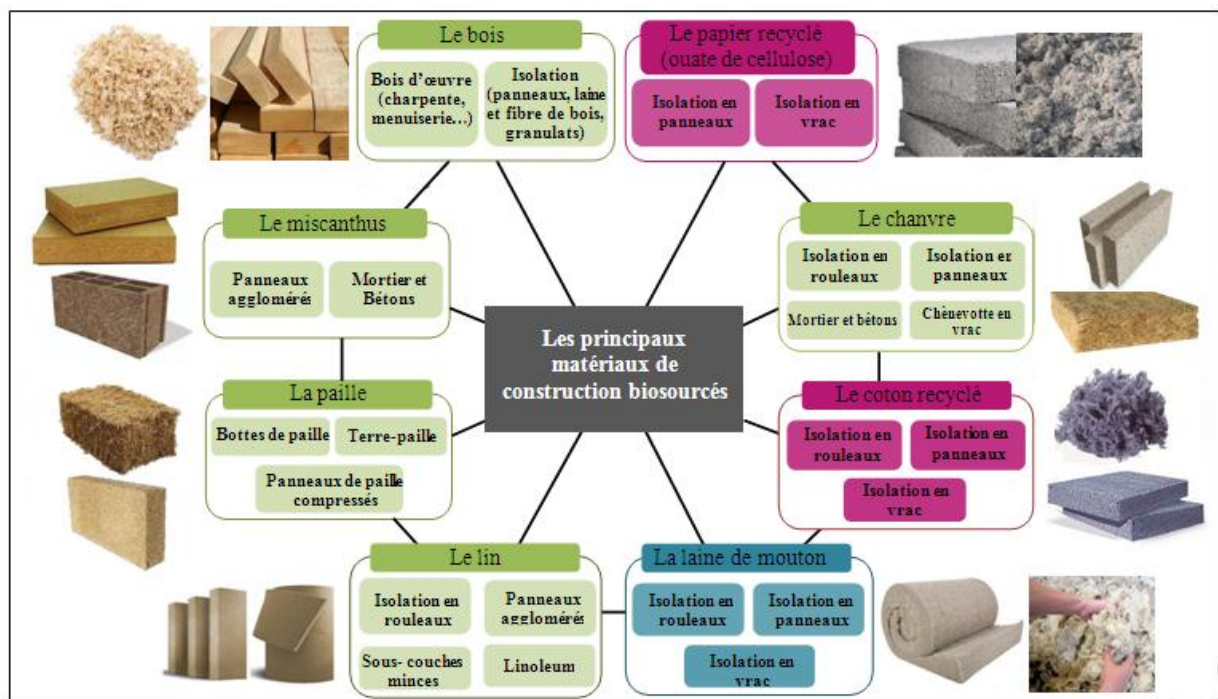


Figure II.8 : Les principaux matériaux de construction biosourcés [6]

II.4. Usage des matériaux biosourcés

D'après le Ministre de l'écologie [7] : « les matériaux biosourcés couvrent une large gamme de produits, qui sont utilisés en tant que » :

- a- **Gros œuvre** : superstructure et charpente
- b- **Second œuvre** : Isolant, mortier, menuiserie, cloisons intérieures

et structures nonportantes, revêtements de sol.

- c- **D'autres matériaux** de revêtement et d'aménagement intérieurs ou extérieurs : matériaux composites, éléments acoustiques, peintures, enduits, liants et adjuvants.

II.5. Cycle de vie des matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés captent le carbone nécessaire à leur croissance et contribuent ainsi à la diminution de gaz à effet de serre. Ils apportent un bénéfice sur le changement climatique, en tant que puits de carbone.

Durant tout leur cycle de vie, ces matériaux réduisent l'énergie grise qui est la quantité d'énergie dépensée durant toute la vie du produit.

A la fin de leur cycle de vie, ils sont soit réemployés, recyclés ou compostés. Ce qui les inscrit dans une logique d'économie circulaire.

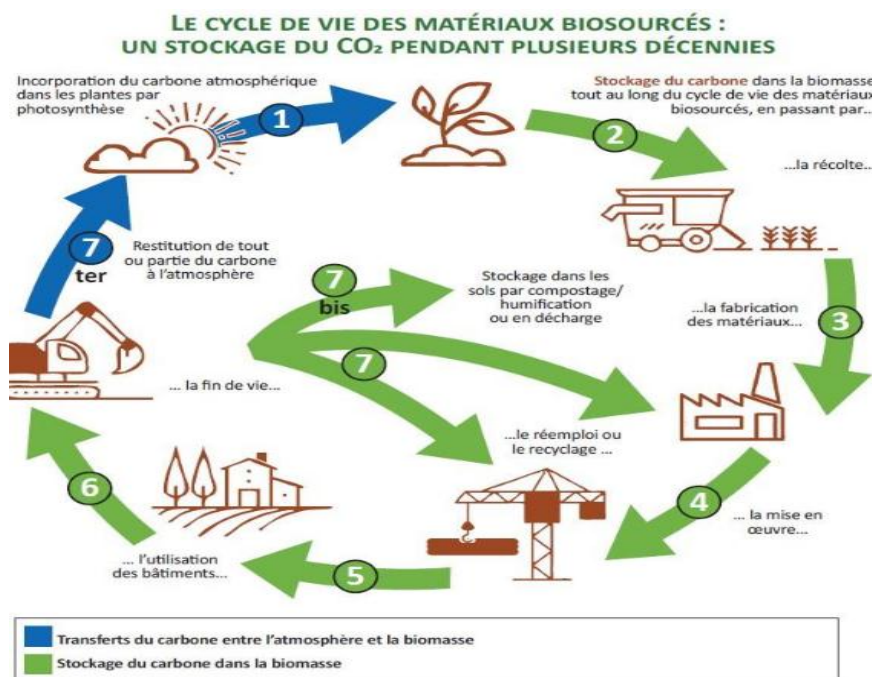


Figure II.9 : Le cycle de vie des matériaux biosourcés[8]

II.6. Les différents acteurs au sein du cycle de vie d'un matériau biosourcé

La mise en place d'une filière biosourcée fait intervenir plusieurs secteurs hétérogènes (voir figure II.9) Les différents acteurs travaillent ensemble pour développer, faire évoluer et généraliser les différentes filières biosourcées.

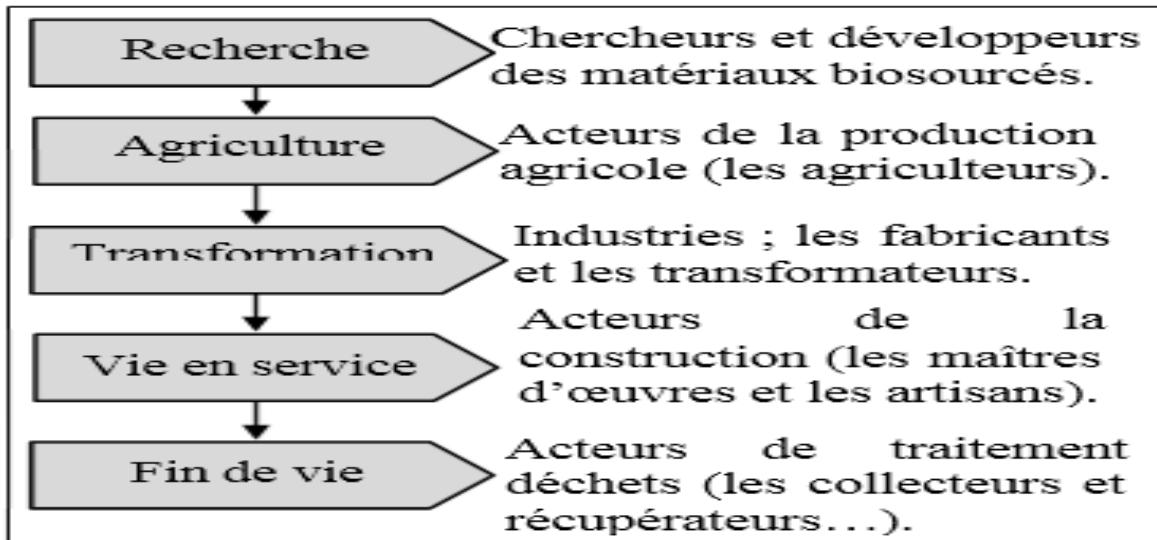


Figure II.10 : Les intervenants au sein du cycle de vie d'un matériau biosourcé

II.7. Les préjugés autour des matériaux biosourcés

a- Le Manque de connaissance

Ces derniers temps, une dynamique de recherche et développement s'est lancée en faveur des matériaux biosourcés. Des formations sont disponibles pour approfondir les connaissances des autres (découvrir le matériau, ses qualités, assurer une mise en œuvre adéquate). Exemple : BIOMOOC [7], formation en ligne développée par Karibati et Ville & Aménagement Durable.

b- La solidité

Dans l'imaginaire collectif, les matériaux biosourcés ne tiennent pas debout et pourtant plusieurs matériaux ont fait preuve de leur solidité dans le domaine de la construction tels que le bois et le bambou appelé acier vert. Exemple : Pont routier avec structure et couverture en bambou, Indonésie, 2017.



Figure II.11 : Pont routier en bambou, Indonésie

c- Les matériaux biosourcés est plus cher

L'utilisation de matériaux biosourcés n'est pas forcément plus chère que l'utilisation de matériaux conventionnels vu qu'ils sont souvent locaux et apportant des performances énergétiques très intéressantes. Ils peuvent par conséquent procurer des économies à long terme.

d- L'inquiétude face aux insectes et rongeurs

Les matériaux biosourcés étant issus de la biomasse, ils sont de ce fait propices à la présence d'insectes. Afin d'éviter cela, il est nécessaire d'effectuer des traitements spécifiques (traitement insecticide anti-termites).

Pour les rongeurs où la nature des matériaux n'est pas importante, ils peuvent être présents.

Pour éliminer leurs intrusions, il faut installer des grilles anti-rongeur et éviter toute cavité.

e- La sécurité incendie

Malgré qu'ils soient constitués de fibres végétales, les matériaux biosourcés ont des capacités thermiques importantes avec une densité relativement forte. Par conséquent, la capacité de combustion est réduite par manque d'air. Actuellement, des essais au feu sont nombreux pour lever les freins vis-à-vis de ces produits.

Citons l'exemple de l'école Boulodrome à Issy-les-Moulineaux construite en 2011.

Afin de valider le degré coupe-feu qui doit être en 30 mn en EPR (établissement recevant de

publique), un essai en feu sur une maquette en bois et paille d'une grandeur réelle de deux étages a été fait.

Le test a été réalisé avec succès et la façade est parfaitement conforme aux exigences de résistance à l'incendie.



Figure II.12 : Maquette avant et après 30 mn du déclenchement de feu

II.8. Pourquoi le biosourcé ?

Les matériaux biosourcés répondent de manière fiable et concrète à certains enjeux environnementaux et sociétaux forts [10].

a) Une réponse à l'enjeu climatique

Fabriqués à partir d'une ressource végétale issue de la photosynthèse, les matériaux biosourcés permettent de capter le CO₂ atmosphérique responsable de l'effet de serre, et de le stocker dans un produit à durée de vie longue, tels que ceux mis en œuvre dans le bâtiment. Ainsi la charpente de la cathédrale Notre-Dame de Paris stocke du CO₂ depuis 600 ans.

A cet égard, les problématiques actuelles du réchauffement climatique nécessitent à

court terme des réponses pérennes à l'impératif de stockage du carbone, problématiques auxquelles répondent, dans la durée, les caractéristiques de durabilité et de quantité des matériaux du bâtiment.

b) Une réponse à l'enjeu de l'épuisement des ressources naturelles

Ressource fondée sur l'énergie solaire, le biosourcé est un matériau renouvelable s'il s'inscrit dans une démarche durable de renouvellement de la ressource. Ainsi, une telle démarche implique une gestion durable de la forêt pour le bois, par exemple hors bois d'œuvre, 230 000 tonnes de matériaux biosourcés sont mises en œuvre dans la construction, ce qui représente moins de 1% de la biomasse produite sur le territoire français.

c) Une réponse à l'enjeu énergétique

Contrairement aux procédés nécessitant des cuissons à haute température, les biosourcés sont peu énergivores. Ainsi, l'emploi de matériaux biosourcés permet actuellement d'économiser environ 347 GW/h d'énergie, soit la production annuelle d'une centrale à charbon.

d) Une réponse à l'enjeu sanitaire

Les produits biosourcés se révèlent généralement bien classés en matière d'émissions ayant un impact sur la qualité de l'air intérieur.

e) Une réponse à l'enjeu de la rénovation de l'existant

Les matériaux biosourcés présentent des caractéristiques semblables à celles des matériaux employés dans les bâtiments d'avant 1945 : porosité, perméabilité à la vapeur d'eau...etc. Ils peuvent donc être mis en œuvre dans la rénovation de ce type de bâtiments et améliorer leur performance thermique sans créer de sinistralité.

II.9. Quels sont les matériaux biosourcés utilisés dans le bâtiment ?

✓ Quelques bioressources

Potentiellement, toutes les ressources biosourcées pourraient être utilisées dans le

bâtiment et dans la construction, à condition de subir quelques transformations qui leur permettront de respecter les cadres réglementaires et normatifs du secteur. Il en va ainsi, par exemple, des fans de carottes, des carapaces de crevettes, en cours d'évaluation.

Les transformations de bio ressources permettent d'obtenir différentes catégories de matières premières: granulats végétaux pouvant par la suite être utilisés dans la fabrication de béton ; fibres, pailles, matières végétales recyclées, balles utilisées comme isolants ; huiles végétales.

II.10. Les grandes familles de matériaux biosourcés : avantage aux isolants

a- Le bois d'œuvre

Matériau biosourcé le plus ancien (structure, menuiserie, parquet...), le bois d'œuvre est employé en menuiserie et en éléments de structures. Cette famille de produits biosourcés entre dans le cadre normatif et réglementaire, puisque certains font l'objet de Documents Techniques Unifiés (DTU) du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, France).

b- Les isolants

Les isolants rigides sont principalement constitués de fibres de bois, en isolation par l'intérieur (ITI) aussi bien qu'en isolation par l'extérieur (ITE), tant sous bardage que sous enduit, utilisés sur les chantiers et sous avis technique du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

Les isolants semi-rigides se présentent sous forme de panneaux ou de rouleaux, avec des caractéristiques et des mises en œuvre proches des laines minérales (murs, toiture, cloisons, sols). Ce sont les isolants les plus utilisés, car leur mise en œuvre est proche de celle d'une laine minérale, et ne demandent donc pas de savoir-faire spécifique.

Les isolants en vrac sont composés de ouate de cellulose, de fibres de bois ou de chanvre et peuvent être mis en œuvre par soufflage, par projection humide ou par insufflation.

Ils sont intégrés dans un cadre normatif classique, et leurs fabricants sont représentés par deux organisations professionnelles : l'Association des industriels de la

construction biosourcée (AICB) et le Syndicat européen des industriels de la ouate de cellulose (ECIMA, European Cellulose Insulation Manufacturers Association). Avec 18 millions de mètres carrés mis en œuvre chaque année, les isolants constituent le principal marché des biosourcés, en croissance de plus de 10 % par an.

c- Les bétons biosourcés

Il s'agit de l'association d'un granulats biosourcé de bois, de chanvre ou de lin avec. Des développements de bétons à base de colza, de tournesol ou de maïs sont en projet. Ces bétons ne sont généralement pas porteurs, car cela impliquerait une augmentation de la quantité de liant, au détriment de leur pouvoir isolant qui constitue leur qualité essentielle. Ils peuvent être mis en œuvre directement sur le chantier ou préfabriqués en blocs maçonnés ou emboîtés.

Les bétons de chanvre sont régis par des règles professionnelles et des ATEX ou des Avis techniques (ATEC) existent pour certains produits préfabriqués. Notons que la ressource chanvre, en France, représente aujourd'hui entre 12 000 à 17 000 hectares, pour environ 2 000 logements neufs par an. Ce marché se développe fortement autour de la préfabrication.

d- La construction paille

Il s'agit d'une technique de construction à part entière, qui recouvre plusieurs méthodes constructives : remplissage de parois en ossature bois, paille porteuse, ITE en bottes de paille...

La construction classique en ossature est, pour sa part, soumise au cadre normatif des règles professionnelles portées par le Réseau français de la construction paille (RFCP) depuis de nombreuses années, la première maison en paille moderne (toujours habitée) ayant été construite dans les années 1920 à Montargis.

e- Les produits de finition biosourcés

Parmi les produits de finition biosourcés, on retrouve les grands classiques tels que le linoléum (fabriqué à partir d'huile de lin et de farine de bois), mais également des nouveautés en développement telles que les peintures à base d'algues.

Il convient, pour terminer ce panorama des matériaux biosourcés, de retenir que leur diversité leur permet de figurer à toutes les étapes de la construction, depuis le gros

œuvre jusqu'aux finitions, sur toutes les typologies de bâtiments.

II.11. Les avantages des matériaux biosourcés

- ✓ Ils sont issus de sources renouvelables disponibles localement.
- ✓ Présentent une faible empreinte carbone.
- ✓ Réduisent la consommation d'énergie, par conséquent, la facture économique.
- ✓ Redynamisent les territoires fragilisés notamment ruraux par la création de filières économiques locales.
- ✓ Contribuent au développement de l'économie circulaire.
- ✓ Ils ont un fort potentiel d'innovations.
- ✓ Assurent une qualité sanitaire (inertie thermique, hygrothermique) et environnementale.
- ✓ Ils se présentent sous différentes formes et procurent une diversité d'utilisation.
- ✓ Ils créent une esthétique qui répond à la tendance actuelle de « reconnecter l'homme avec la nature ».

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a grey shaded area at the top-left and top-right corners respectively.

Les propriétés physico- chimiques des matériaux de base

III.1 Introduction

Tous les secteurs de l'activité humaine les matériaux constituent le support essentiel pour la fabrication des objets indispensables à l'homme. Les matériaux peuvent être classés en trois catégories selon leur composition, leur microstructure ou leurs propriétés : ce sont les métaux et leurs alliages, les céramiques et les verres, ensuite les polymères qui sont dans l'ensemble relativement récents. Ces matériaux peuvent être d'origine biologique (les protéines, la kératine, la cellulose, l'hémoglobine, l'ADN et l'ARN ou d'origine synthétique (le polyéthylène, le nylon et le polyester...).

Dans ce chapitre nous présenterons des rappels sur les protéines, ensuite nous nous intéresserons à la représentation de la matière kératinique de différentes ressources que nous allons étudier (la laine de mouton, les plumes de dindes) ainsi que leurs propriétés physico chimiques.

III.2 Définition d'un polymère

Les polymères sont des matériaux composés de très longues chaînes (macromolécules), elles-même formées de molécules élémentaires (Unité monomères) assemblées entre elles par des liaisons chimiques covalentes. Leur « squelette » est constitué d'atomes de carbone [1].

III.3 Rappels sur la structure des protéines

III.3.1 Constitution des protéines

Les protéines sont des polymères organiques résultant de la condensation d'acides aminés liés entre eux par des liaisons peptidiques (figure III-1). Elles résultent de la combinaison entre le groupement carboxyle (COOH) d'un acide aminé et le groupement amine (NH₂) de l'autre, avec perte d'une molécule de H₂O [2].

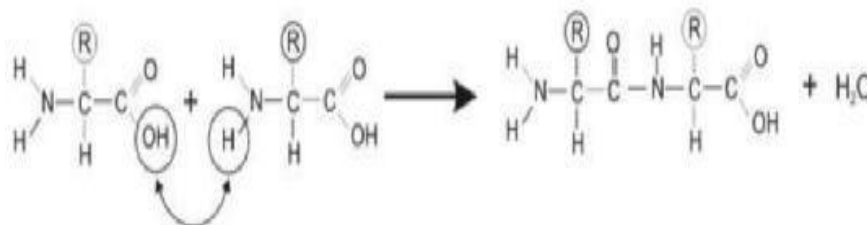


Figure III.1 : Formation des liaisons peptidiques [2]

III.3.2 La conformation des protéines

Les protéines présentent plusieurs structures différentes :

III.3.2.1 La structure primaire

Elle correspond à l'enchaînement des acides aminés liés par des liaisons peptidiques (figure : III-2). A partir de cette structure primaire, les propriétés chimiques des groupements latéraux (acide ou basique, chargé ou neutre, polaire ou apolaire, hydrophobe ou hydrophile) interviennent dans l'organisation de la structure macromoléculaire [3,4].

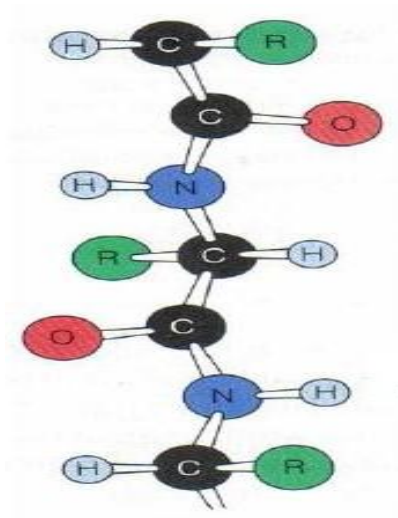


Figure III.2: Structure primaire d'une protéine [3]

III.3.2.2 La structure secondaire

Cette structure est produite par des liaisons entre les résidus des acides aminés et conduisant à deux types plus importants, l'hélice α et le feuillet β [3].

a. L'hélice α

Dans une hélice α , la structure primaire s'enroule sur elle-même puis elle se stabilise par des liaisons hydrogènes entre le groupement carbonyle ($C=O$) et le groupement amide ($N-H$) (Figure III-3).

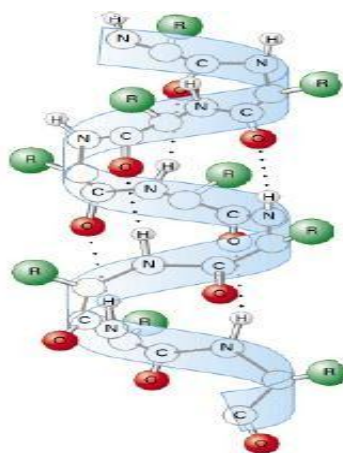


Figure III.3: Représentation schématique d'une hélice α [4]

Dans ces liaisons hydrogène, la distance entre l'atome N et l'atome O est de 2,86 Å. De plus, les liaisons hydrogène sont quasiment toutes parallèles à l'axe de l'hélice (figure III-3) [4].

b. Le feuillet β

Le feuillet β est autre structure secondaire où les chaînes primaires ne s'enroulent pas mais il se forme des liaisons hydrogène entre les chaînes voisines disposées parallèlement les unes par rapport aux autres et l'ensemble forme un feuillet plissé (Figure III-4).

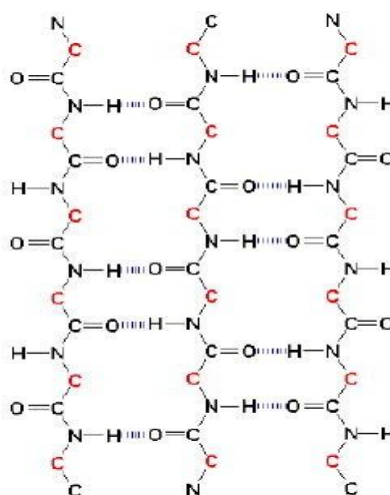


Figure III.4 : Représentation schématique d'un Feuillet β [4]

III.3.2.3 La structure tertiaire

La structure présente à la fois une hélice α et des feuillets β [6].

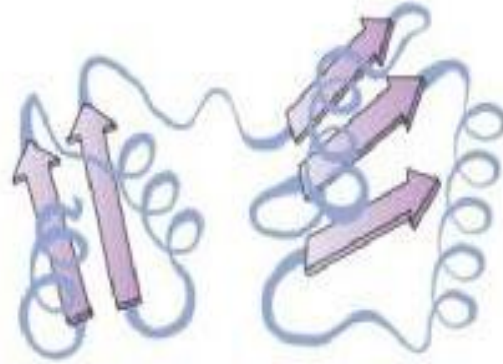


Figure III.5 : Représentation schématique d'une structure tertiaire [6]

III.3.2.4 La structure quaternaire

C'est l'association d'éléments de structure tertiaire. La kératine se trouve dans ce dernier cas qui est classée parmi les protéines fibreuses [6].

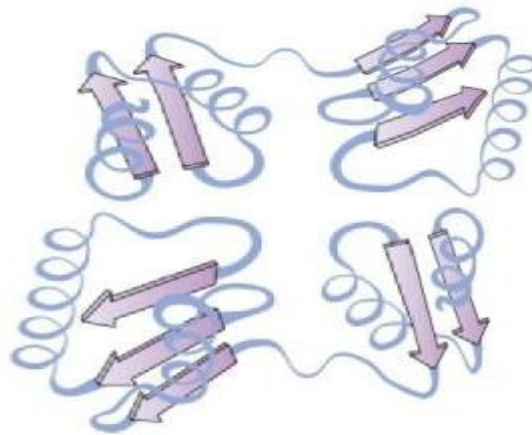


Figure III.6 : Représentation schématique d'une structure quaternaire [6]

III.4 Les types de protéine

On classe les protéines en deux catégories suivant leur forme générale : la protéine globulaire et la protéine fibreuse.

III.4.1 La protéine globulaire

Les protéines globulaires sont formées des chaînes enroulées sur elles-mêmes engendrant des formes sphériques ou ellipsoïdales.

III.4.2 La protéine fibreuse

Les protéines fibreuses sont appelées protéines structurelles car elles constituent le matériau principal de construction chez les vertébrés. Elles sont insolubles dans l'eau et sont d'une grande stabilité et avec une bonne résistance à la traction.

Les principales protéines fibreuses sont :

- Le collagène (que l'on trouve dans les tendons et les os)
- La kératine (que l'on trouve dans les ongles, les cheveux, les plumes, la laine...etc.)

III.5 Présentation de la kératine

III.5.1 Définition de la kératine

Les kératines représentent une famille de protéines fibreuses produites dans certaines cellules épithéliales des vertébrés supérieurs (reptiles, oiseaux et mammifères). Elles forment la plus grande partie des couches cornées de l'épiderme. On trouve deux sortes de la kératine : il s'agit de la kératine molle et de la kératine dure. Le premier type de kératine se rencontre dans les couches superficielles de la peau, et le second, on ne le trouve que dans les ongles, les plumes, la laine, les poils, les griffes et les cheveux [6,7].

Les chimistes distinguent deux types de kératine, alpha et bêta kératines [6,11] :

- La kératine alpha à une forme en hélice, on la retrouve généralement chez les mammifères.
- La kératine à une forme en feuillet β , présente chez les oiseaux et les reptiles, la masse moléculaire environ 40-50 kDa [6,11].
- Le rôle de la kératine est d'assurer une protection de l'animal (ou de l'homme) contre son environnement naturel. C'est pour quoi elle montre une grande résistance aux attaques chimiques et enzymatiques. Cette résistance est due à sa forte teneur en cystéine, un acide aminé soufré qui est à l'origine de la formation de ponts disulfure (cystine) qui créent un réseau tridimensionnel compact engendrant une grande stabilité.

La kératine est sensible à l'humidité, elle a une capacité d'absorber de grandes quantités d'eau sans dissoudre. C'est la raison pour laquelle on lui trouve un grand nombre d'applications, notamment dans le domaine des capteurs d'humidité. Ajouté à cela le fait que la kératine est un matériau isolant. La kératine est caractérisée par la capacité de fixation des particules volatiles pour la filtration de l'air. Toutes ces propriétés font de la kératine une protéine fibreuse particulière [7, 9, 10, 12, 13].

III.5.2 Histoire de la kératine

Le mot « kératine » est apparu dans la littérature aux environs 1850. La kératine vient du mot « Kera » en grec qui signifie une corne. A cette époque les scientifiques ont trouvé que la kératine ne se manifeste pas comme d'autres protéines. Toutes les méthodes utilisées pour dissoudre les protéines n'influencent pas pour solubiliser la kératine.

L'insolubilité de kératine est restée un grand problème jusqu'à 1905 où John Hoffmeir [8] a décrit un processus pour extraire des kératines à partir de cornes d'animaux en utilisant la chaux.

Après une bonne période, les scientifiques ont compris que les méthodes chimiques comme l'oxydation et la réduction sont efficaces pour extraire la kératine des cornes et des sabots d'animaux et par la suite sur la laine et les cheveux humains et l'obtenir sous forme d'une poudre pour des produits de beauté [8].

Pendant les années 20, des recherches sont effectuées pour bien comprendre la structure complexe de kératine et sa fonction comme une protéine. Ensuite, en 1934 ils ont publié un article contenant les différents types de kératine et déterminé ainsi la masse molaire [8].

Juste après la 2^{ème} guerre mondiale, un projet de recherche industriel a été basé sur la chimie des fibres de chevaux et de la laine. On a ensuite connu la commercialisation des fibres synthétiques telles que le nylon et le polyester. On a alors compris que ces fibres se composent d'une cuticule externe et d'un cortex.

Actuellement la solubilité, la purification et la caractérisation de la kératine sont bien maîtrisées. Ainsi ces propriétés physicochimiques et mécaniques ont été déterminées.

Les scientifiques ont considéré les fibres de cheveux et les fibres de la laine comme une source renouvelable [8].

III.5.3 Les ressources de la kératine

Les matières d'origine kératinique sont la laine, les cheveux, les plumes, les cornes, les sabots d'animaux...etc. Les différences existant entre ces matières se situent essentiellement au niveau de leur composition en acides aminés. Les explications qui viennent montrent que les propriétés morphologiques et physico-chimiques sont presque identiques.

III.5.4 Type de kératine

Il y a deux types de kératines : l'alpha-kératine, ou α -kératine, présente chez les mammifères notamment, dont l'humain, et la bêta-kératine, ou β -kératine, que l'on retrouve chez les reptiles et les oiseaux. Ces deux types de kératines ne présentent clairement pas d'homologie de séquence [15].

a. La bêta-kératine

Notée β -kératine, est un énantiomère de l'alpha-kératine. Elle est, par sa structure, plus rigide que cette dernière. On ne trouve cette kératine que chez les reptiles et donc également les oiseaux. La beta-kératine imprègne le stratum corneum de la peau des reptiles, la rendant imperméable et résistante aux attaques de l'extérieur, la beta-kératine est plus résistante que l'alpha-kératine

b. L'alpha-kératine

Les α -kératines recouvrent l'épiderme et forment les ongles des primates, les griffes des autres animaux et les cheveux ; ces derniers sont très riches en hélice alpha.

Ce sont de longs segments de 311-314 acides aminés en hélice α entourées d'extrémité N- et C- terminales non hélicoïdales. La structure primaire des régions en hélice est constituée de répétition de sept résidus (a-b-c-d-e-f-g) n, ou a et d sont polaires (favorise les interactions entre plusieurs chaînes). Il n'y a pas de proline mais une grande richesse en cystéine. Ces protéines sont rigides, offrent une grande résistance à l'étirement.

Les acides stabilisant l'hélice alpha sont la leucine, le phénylamine et le tryptophane grâce à leurs interactions hydrophobes.

Les acides aminés déstabilisant l'hélice alpha sont les diacides et les dibasiques à cause de leurs charges ainsi que la valine, l'isoleucine et la thréonine qui sont substituées en beta. Il y a également la proline qui va carrément entraîner une rupture de l'hélice à cause de sa chaîne latérale cyclisée.

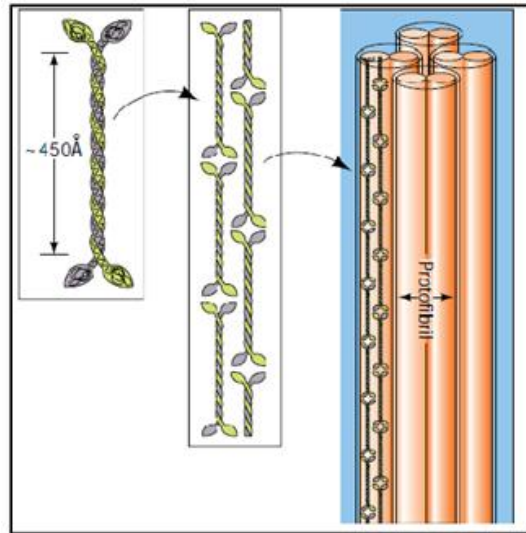


Figure III.7 : structure de la kératine alpha [15]

III.6 La laine de mouton

III.6.1 La kératine de laine

La laine fait partie de la famille des fibres protéiques. Elle est composée d'environ 97% de kératine, les 3% restants étant des lipides (2%) et des sels minéraux (1%). Elle est donc considérée comme une protéine fibreuse [6].

III.6.2 Structure et morphologie de la laine

Une fibre de la laine comporte presque la même structure que les cheveux. Elle est constituée de trois types de cellules (figure III-8).

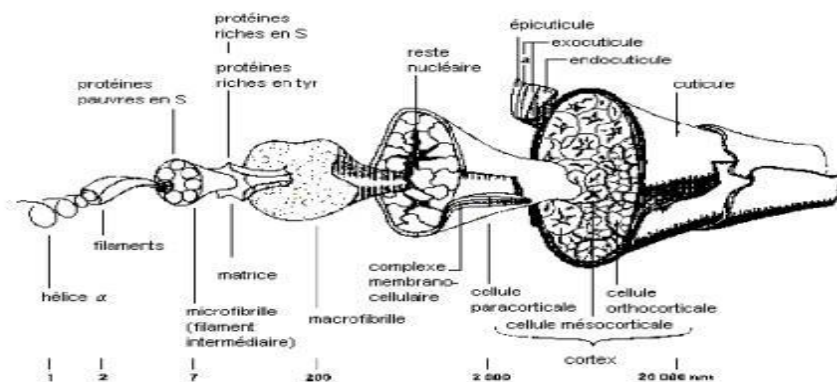


Figure III.8: Structure d'une fibre de laine [6]

III.6.2.1 La cuticule

La cuticule compte environ 10% de la masse totale de la fibre de laine. Ces cellules sont en forme d'écaille à la surface de la fibre et chaque cellule cuticulaire est composée de trois couches ayant des teneurs en cystine différentes [6, 7, 16].

a. L'épi cuticule

Elle contient des acides gras qui recouvrent toute la surface de la membrane. C'est la partie responsable de son caractère hydrophobe marqué. En plus, c'est cette partie externe qui lui confère sa résistance aux agressions chimiques et environnementales [6, 7, 16].

b. L'exo cuticule

Elle représente près de 60% de la cuticule. Elle est résistante à de nombreux traitements enzymatiques et chimiques car elle contient une forte concentration de cystéine entre les quelles se forment des ponts disulfures assurant le maintien de la structure.

c. L'end cuticule

C'est la partie interne de la cuticule. Elle est sensible aux attaques enzymatiques car elle présente une faible teneur en soufre. Les cellules cuticulaires ont une structure amorphe.

III.6.2.2 Le cortex

Il représente la plus grande partie de la fibre (environ 86,6% de la fibre). Le cortex est responsable de la majorité des caractéristiques mécaniques de la fibre comme l'élasticité. Il se divise en deux types de cellules, le para et l'ortho-cortex qui diffèrent par leur composition notamment leur teneur en cystine.

Le para cortex se trouve toujours à l'intérieur du mouvement de la fibre et l'ortho cortex à l'extérieur. Ainsi, l'ortho-cortex présente une structure en réseau élaborée ; ce qui permet aux liquides de mieux pénétrer [6, 7, 16].

Ces cellules corticales sont constituées de 5 à 8 macro fibrilles, elles-mêmes composées de

500 à 800 filaments intermédiaires de kératine appelés micro fibrilles. Une microfibre contient des protofibrilles qui sont constituées de protofilaments. Ces dernières sont constituées de deux chaînes polypeptides de kératine (hélice α) enroulées en spirale [6].

La matrice est un matériau protéique d'une structure amorphe moins organisée que celle des micro fibrilles qu'elle recouvre. La matrice est riche en glycine (Gly), tyrosine (Tyr) et en cystéine (Cys), formant des ponts disulfures (figure-8). Cette matrice apparaît plus présente dans les cellules du para cortex que dans celles de l'ortho cortex. Ceci explique que l'ortho cortex, qui contient moins de protéines riches en ponts disulfures qui maintiennent la structure, soit plus accessible aux traitements enzymatiques et chimiques [6].

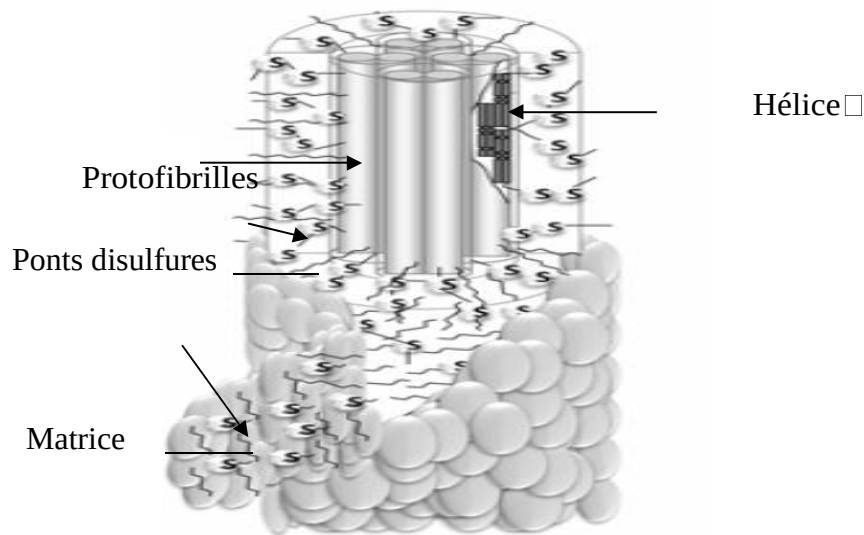


Figure III.9 : Représentation schématique d'une micro fibrille entourée d'une matrice [17]

Un composé important dans la structure de la fibre de laine est le complexe cellulaire membranaire (CMC) qui joue le rôle de liant entre les cellules du cortex, les cellules de la cuticule ainsi qu'entre ces deux types de cellules bien que celui-ci compte pour moins de 5% de la masse totale d'une fibre.

III.6.2.3 La moelle

La moelle sert à remplir l'espace vide de la fibre.

III.6.3 Les propriétés physiques de la laine

La laine pure présente des caractéristiques physiques intéressantes [6, 7] :

- ✓ Densité de la laine : 20kg/m^3 .
- ✓ C'est un très bon isolant thermique qui présente une très bonne tenue au feu : en effet, la laine pure brûle sans flamme à partir de 560°C sans dégager de gaz toxiques.
- ✓ Il résiste à la combustion, il contient une quantité élevée d'azote et de soufre qui retarde les flammes.
- ✓ Conductivité thermique de la laine pure : 0.035W/m.K .
- ✓ La laine pure est très fortement hygroscopique. Cela signifie qu'elle peut absorber et relâcher l'eau à concurrence de 33% de son poids (i.e. 1 kg de laine absorbe jusqu'à 330 millilitres d'eau).
- ✓ La laine est un matériau qui fonctionne comme un parfait isolant pour le bruit avec sa capacité d'atténuer et d'absorber les sons, aussi bien pour les hautes que les basses fréquences. La structure complexe de la laine agit comme "un piège à ondes".

III.6.4 Composition chimique de la laine

L'analyse élémentaire de la laine lavée et séchée donne les résultats suivants : Carbone 50%, Hydrogène 7%, Oxygène 22%, Azote 17%, Soufre 3.5%, Cendres 0.5% [6].

III.7 Les plumes de dinde

III.7.1 Production mondiale de la volaille

La production et la consommation de la volaille dans le monde ont connu un développement important au cours des 30 dernières années. En effet, la chair de volaille est la deuxième viande la plus consommée au monde, avec une production en croissance permanente, qui a atteint 91,6 et 101 millions de tonnes en 2009 et 2011, respectivement. Le poulet prédomine la production mondiale de la volaille (85 % de la production totale), suivi de la dinde, le canard, les pintades, les autruches et les pigeons. Les États-Unis et la Chine sont les premiers pays producteurs du poulet, suivi du Brésil, les 27 pays de l'Union Européenne (UE), l'Inde et la Russie, comme indiqué dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Production du poulet estimée en 2012

Pays	Production du poulet (millions de tonnes)
USA	19.8
Chine	18.5
Brésil	13.1
UE27	12.2
Inde	2.5
Russie	3.3
Monde	104.5

III.7.2 Production de la volaille en Algérie

La filière avicole en Algérie, dans la période 1962-1969, était essentiellement fermière sans organisation particulière et n'occupait qu'une place très modeste dans la structure de la ration alimentaire de l'Algérien. L'Algérie a opté, par la suite, pour la mise en place d'un circuit avicole moderne, à travers les différents plans de développement. En effet, trois périodes différentes, d'un point de vue organisationnel, sont distinguées, en l'occurrence: la période 1969-1979 qui constitue l'amorce du programme de développement des productions animales, dont l'aviculture ; la période 1980-1984 qui a vu la mise en place d'un programme spécial pour l'aviculture, qui est «le plan avicole», visant une réorganisation du secteur avicole et La période 1985-1989 qui constitue une continuité du plan précédant avec une augmentation des objectifs de consommation (Djerou, 2006).

Ces dernières années, la filière avicole algérienne a atteint un stade de développement appréciable dans l'économie agricole. Les productions ont atteint ainsi les 253.000 tonnes selon les statistiques de la FAO de 2011 .

L'Algérie figure dans les premières places dans l'élevage des poulets parmi les pays de la région du Grand Maghreb (tableau III.2). En fait, l'Algérie représente 20 à 35% du cheptel de volaille de la région selon les espèces, avec un nombre de têtes de poulets qui a atteint 124 millions en 2007. Par ailleurs, l'Algérie a été classée ces dernières années, en

deuxième position derrière le Maroc, avec un nombre de têtes de poulets atteignant 140 millions, représentant ainsi 34,71% du cheptel de la région .

Tableau III.2. Nombre de têtes de poulets dans les différents pays du grand Maghreb, de 2001 à 2007, selon les données statistiques de la FAO, 2007 .

Cheptel poulets– production annuelle (Nombre de têtes)							
(x1000)	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Algérie	110 000	120 000	125 000	125 000	125 000	125 000	124 000
Libye	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000
Maroc	137 000	137 000	137 000	137 000	137 000	140 000	140 000
Mauritanie	4100	4200	4200	4200	4200	4200	4200
Tunisie	61 417	62 000	62 000	64 000	64 000	62 000	64 000
Total	337 517	348 200	353 200	355 200	355 200	356 200	357 200
%Algérie	32.59%	34.46%	35.39%	35.19%	35.19%	35.09%	34.17%

L'analyse des données du tableau ci-dessus montre que la production et l'élevage de la volaille est tellement important en Algérie et dans tous les pays de grand Maghreb, ce qui génère de grandes quantités de déchets de plumes par an.

Leur valorisation est devenue un véritable souci prioritaire. Ces plumes, provenant de l'abattage de volaille, sont constituées de matière riche en protéines de nature kératinique. Leur décomposition dans la nature en aérobie provoque des dégagements de gaz nocifs et des odeurs nauséabondes. Ce qui peut causer de sérieux problèmes de pollution à l'environnement. Il est alors intéressant de rechercher une synergie technique et écologique pour une meilleure valorisation de ces déchets.

III.7.3 Définition d'une plume

Les oiseaux sont les seuls êtres à avoir des plumes. Tout à la fois légères, souples et robustes, les plumes sont d'une conception ingénieuse. Elle est bien sûr indispensable au vol, mais elle remplit aussi d'autres fonctions importantes comme celle de maintenir la température interne de l'oiseau. [18]

III.7.4 Couleurs des plumes

Chez les oiseaux, la couleur des plumes est donnée par une combinaison de couleurs pigmentaires et/ou de couleurs dites de structure.

La couleur pigmentaire comme son nom l'indique est due à des pigments, la mélanine principalement mais aussi des caroténoïdes. La couleur de structure ou couleur physique est donnée par des propriétés physiques de la plume qui modifient la lumière incidente (par la présence de structures particulières comme des cylindres de kératine par exemple présentes sur les barbes et les barbules des plumes).

III.7.5 Types de plumes

On trouve plusieurs types de plumes, les principales étant les plumes de contour, de couverture, les semi-plumes et le duvet.

Les plumes de couverture ou pennes sont les plumes visibles, elles donnent la forme aux ailes et au corps de l'animal. L'axe de ces plumes, la hampe, est divisé en une portion portant des vexilles, le rachis, et une portion nue et creuse, le Calamus dont l'extrémité proximale est implantée dans le follicule. Les vexilles sont un ensemble de réseaux de barbes. Les barbes forment un angle de 45° avec le rachis, elles se trouvent toutes dans le même plan. De ces barbes partent des barbules. Chez les plumes de contour les barbules d'une barbe s'agrippent aux barbules de la barbe voisine par un système de crochets. Les barbes et les barbules forment ainsi une hampe aplatie, lisse et imperméable. En lissant ses plumes l'oiseau reforme les liens entre les barbules.

Les plumes de contour regroupent : les rémiges sur les ailes (avec les rémiges primaires au nombre de 10 portées par la main et les rémiges secondaires également au nombre de 10 portées par l'avant-bras), les 12 rectrices de la queue, les plumes de couverture (petites plumes à la base des rémiges, des rectrices et autour du canal auriculaire externe) et les plumes couvrant le corps de l'oiseau.

Les semi-plumes ont un aspect pelucheux. Leur rachis est plus long que la plus longue de leur barbe. Elles n'ont pas de barbules. On les trouve en périphérie des ptérylies (plages particulièrement riches en follicules).[18]

Les plumes du duvet ou plumules présentent quant à elles un rachis plus court que la plus longue de ces barbes, ce rachis est même parfois inexistant. Les barbules des plumules sont dépourvues de crochets et se répartissent dans plusieurs plans.

Le duvet est caché sous les plumes de contour. Il intervient dans la régulation thermique et l'imperméabilité du plumage.

Chez les psittacidés, notamment chez les cacatoès, on trouve un duvet modifié dit poudreux. Ce sont de petites plumes à croissance continue dont l'extrémité se réduit en poudre ressemblant à du talc. La fonction exacte de cette poudre de particules kératine d'environ 1µm de diamètre est inconnue, mais elle aurait un rôle important dans l'entretien du plumage.

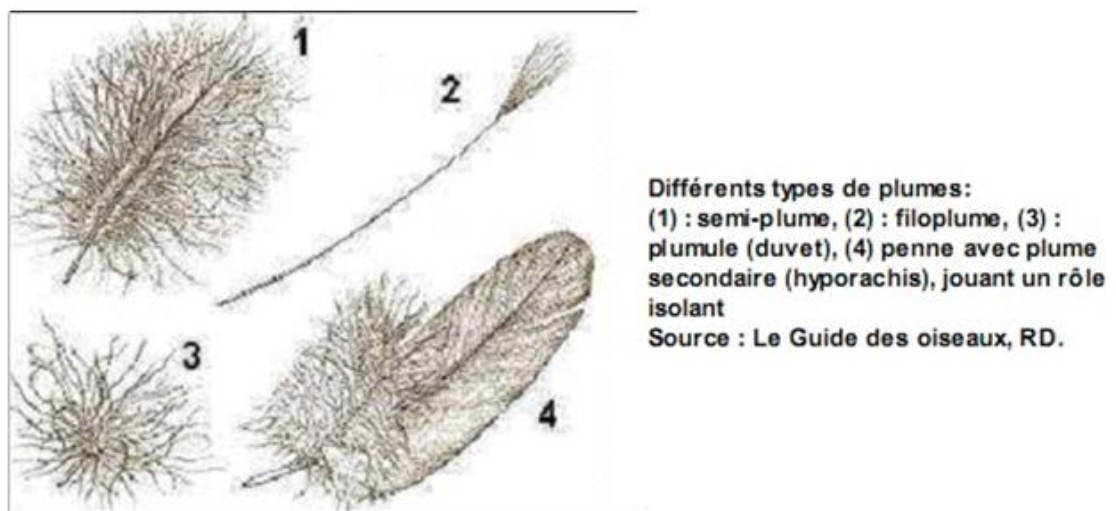


Figure III.10 : différents types de plumes [18]

On trouve ensuite d'autres types de plumes ayant une importance qualitative. Les filo plumes ont un axe long avec une touffe de barbes à l'extrémité (Figure III-10). On trouve au niveau de leur follicule des terminaisons nerveuses. Elles ont un rôle dans l'information sensorielle pour l'orientation des plumes de contour.

D'autres plumes à rôle sensoriel sont présentes au bord des paupières, des narines et du bec, ces plumes ne sont formées que d'une rachi

III.7.6 La structure des plumes

La plume est principalement composée de 3 parties distinctes :

- L'axe central de la plume, appelé rachis qui constitue la structure primaire.
- Les barbes, attachées au rachis constituent la structure secondaire.
- Les barbules attachées aux barbares (de manière similaire aux barbes attachées au rachis) constituent la structure tertiaire.

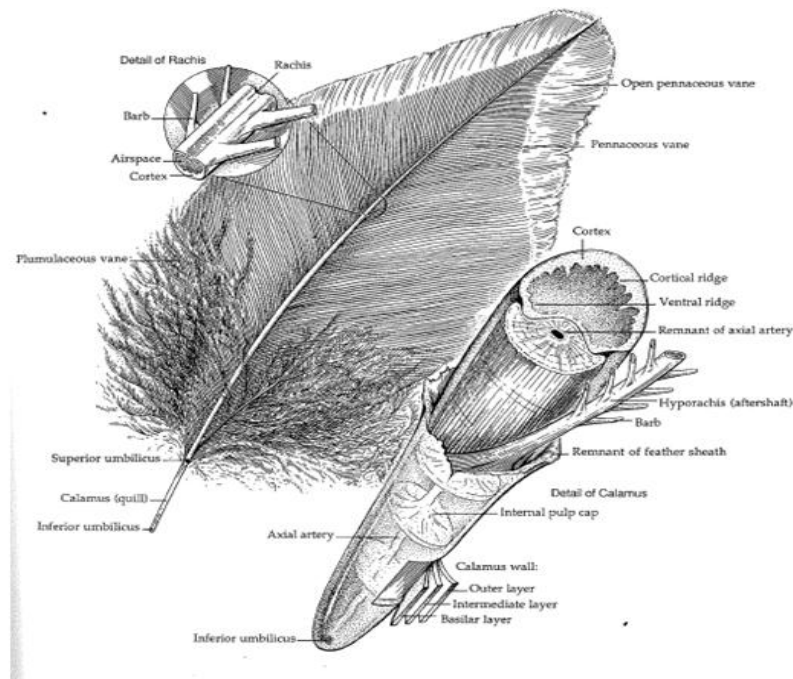


Figure III.11 : Structure détaillée d'une plume [18]

L'axe central de la plume (le rachis) est un cylindre distal plein creusé d'un sillon ventral et terminé à la base par le calamus, présente deux séries latérales de barbes dont l'arrangement rappelle un peigne. Chaque barbe porte à son tour une série de petites structures disposées de la même manière, les barbules. Ces éléments sont maintenus ensemble grâce à une myriade de minuscules crochets qui agrafent les barbules entre elles [18].

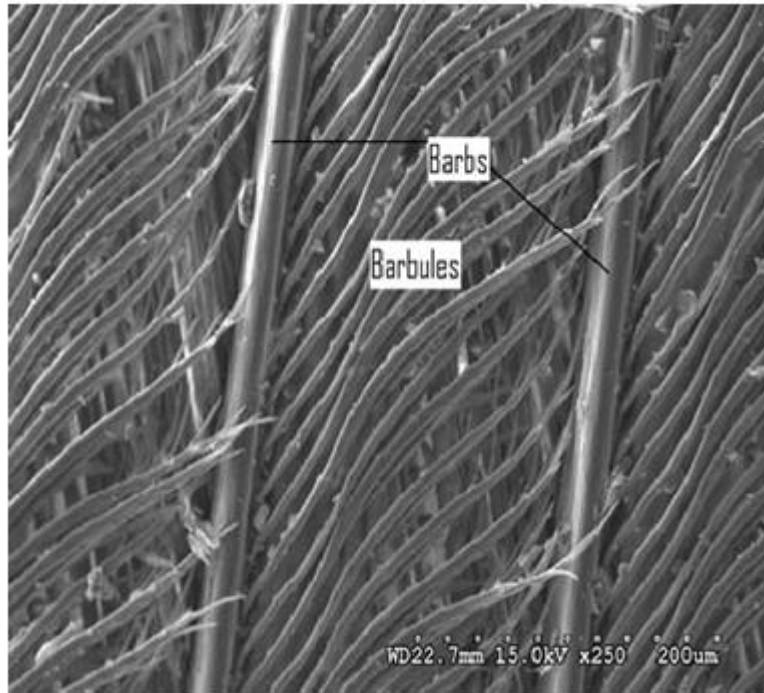


Figure III.12: Image ESEM montrant les structures tertiaires des plumes (les barbules) qui sont attachées aux barbes [18]

La plume provient d'une papille dermique comme le follicule d'un cheveu chez l'homme. L'ancienne plume doit d'abord tomber pour qu'une petite hampe, semblable à une paille, se mette à pousser. A l'intérieur de ce minuscule tuyau, les barbes et les barbules sont enroulés en spirale. La partie supérieure de la hampe se fend peu à peu, permettant à la plume de se déplier et de prendre forme progressivement.

III.7.7 Propriétés des plumes

Les plumes de dinde ont une structure et des propriétés uniques absentes dans n'importe quelle autre fibre naturelle ou synthétique.

Leur compressibilité, leur excellente élasticité, leur capacité d'amortir et d'atténuer le son, leur rétention de chaleur ainsi que leur faible densité de 0.8g/cm^3 , comparée à celle de fibres de cellulose ($1,5\text{ g/cm}^3$) et celle de la laine $1,3\text{ g/cm}^3$, font d'elles un excellent renfort pour les matériaux composites .

Bien qu'elles ne puissent pas être traitées comme les fibres protéiniques comme la laine ou la soie à cause de la complexité de leur structure, la structure secondaire représentée par les barbes a des propriétés lui permettant d'être très intéressante pour une utilisation comme fibre

protéinique naturelle [5].

Ces barbes ont une longueur, une résistance et une flexibilité qui leur permettent d'être utilisées comme fibres naturelles protéiques. De plus, elles ont une coupe transversale unique qui ne caractérise aucune autre fibre naturelle (laine ou soie). Les barbes sont en forme de nid d'abeilles avec des cellules creuses (cavités) sur une coupe transversale [18]

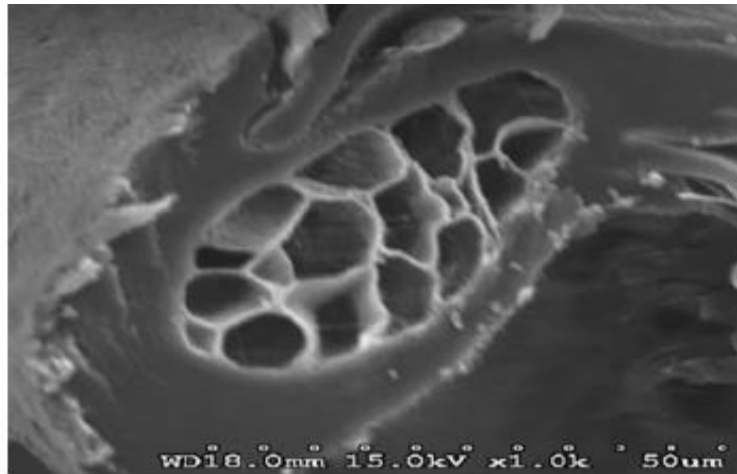


Figure III.13 : Coupe transversale d'une barbe obtenue par ESM [18]

Ces cavités sont efficaces dans l'isolation thermique ou phonique, ce qui permet aux barbes d'être utilisées pour des applications comme composites dans le domaine de l'automobile pour absorber le son. La structure en nid d'abeilles procure une résistance élevée à la compressibilité. La présence de cette structure permet aux barbes d'avoir un poids léger combiné à leur capacité isolante. Sur une coupe longitudinale, les barbes ont une surface fibrillaire mais sont dépourvues d'écailles présentes au niveau de la laine

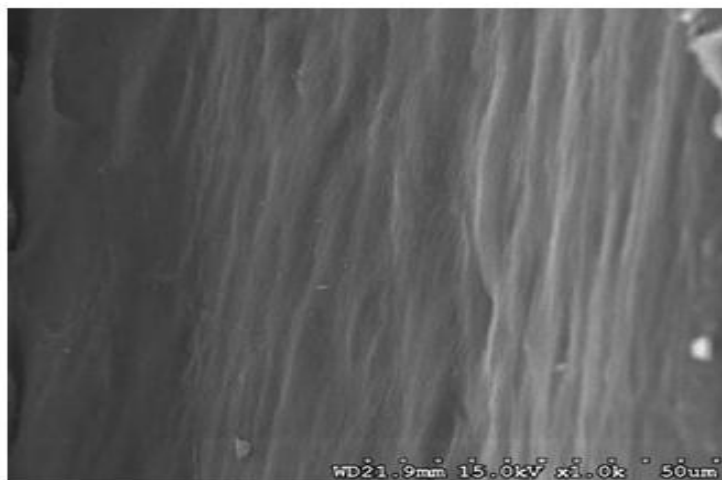


Figure III.14 : Surface des barbes présentant une structure fibrillaire dépourvue d'écailles obtenue par ESM[18]

La présence des barbules attachées aux barbes, permet de fournir une interaction unique avec d'autres fibres lorsque les barbes sont utilisées pour produire des fils hybrides. Les barbules peuvent aussi s'enchevêtrer avec d'autres fibres et améliorer les propriétés mécaniques des composites fibreux. Les barbes sont plus flexibles que le rachis et peuvent être tissées entre elles, ce qui confère aux fils une bonne cohésion et une durabilité élevée aux tissus fabriqués avec ce matériau.



Figure III.15 : Fil tissé d'un mélange de barbes et de coton

La figure ci-dessus montre un fil produit d'un mélange d'environ 70% de coton et 30% fibres de plumes de poulets. Les barbes sont entrelacées et tissées avec les fibres de coton. L'interaction structurelle des barbes, barbules et crochets avec d'autres fibres mélangées, procure un meilleur enchevêtrement et une bonne cohésion des fils

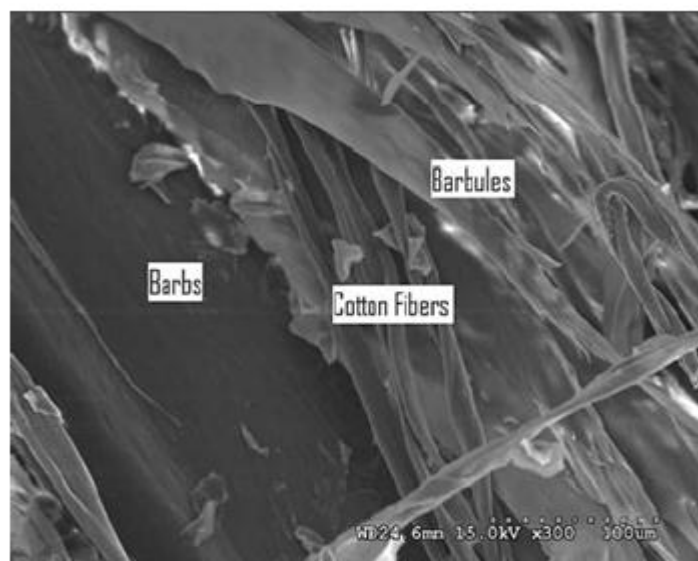


Figure III.16 : Image ESM des barbes de plume et du coton [18]

III.7.8 Effets de la température et de l'humidité

L'humidité affectera considérablement les plumes. Au-dessous d'une humidité relative de 35%, les plumes dessèchent rapidement. Elles deviennent tout à fait sèches et fragiles, et les bavures interrompent à la plus légère pression. Dans une ambiance à humidité élevée et prolongée, l'hydrolyse acide est accélérée et même les basses quantités d'acide se trouvant dans la plume causeront une décomposition de la plume.

La chaleur agit en tant que catalyseur dans beaucoup de réactions chimiques. Les températures élevées décomposent les plumes. En général, la température ambiante et les fluctuations quotidiennes ont moins d'effets négatifs sur les plumes que les changements saisonniers de l'humidité. On recommande de garder l'humidité et la température constantes aussi longtemps que possible [18]

III.7.9 Propriétés physiques des plumes

Certaines propriétés physiques sont reportées sur le tableau ci-dessous :

Tableau III.3 : Les propriétés physiques des plumes [18]

COMPOSITION	70 à 80% de plumes de volailles lavées, traitées à chaud pour être débarrassées des allergènes. Laine de mouton (5à10%) et fibres textiles Deliage (10 à 20%)
Utilisation	Polyvalente
Densité ⁽¹⁾	20 à 30%
Conductivité thermique ⁽²⁾	0.033 à 0.042
Comportement au feu ⁽³⁾	Difficilement inflammable
Perméabilité à la vapeur d'eau	Hydrophile (sans que cela nuise à Son pouvoir isolant)
Prédateurs	Non consommable, possibilité de nidification

Spécificités	Valorisation de sous-produits agricoles, hautes performances thermiques constantes quel que soit le taux d'humidité. Energie grise ⁽⁴⁾ : 55 kWh/m ³
Performances isolantes	Très bonne
Avantage	Abondante et facilement disponible
Inconvénient	Traitement contre les acariens ou autres.

- 1) Densités données à titre indicatif, pouvant varier suivant les fabricants et les mises en œuvre.
- 2) Coefficient lambda donne à titre indicatif. Plus le coefficient est grand, plus le matériau est conducteur. Plus il est petit, plus le matériau est isolant.
- 3) Selon les classements en vigueur.
- 4) L'énergie grise correspond à l'énergie de fabrication du produit et à son transport jusque sur le lieu de construction.

III.7.10 Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de dindes ont été comparées à celles de poulets et de laine ;

Tableau III.4 : Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de dindes comparées à celles de poulets et de laine [18]

Fibres	Finesse (denier)	Longueur (cm)	Résistance (g/den)	Gain d'humidité (%)	Allongement
Barbes de plumes de dindes (pennes)	142	5.2	0.83	-	7.96
Barbes de plumes de dindes (duvet)	55.2	4.1	0.36	-	16.42
Barbes de plumes de poulets	76	1.5–4.5	1.44±0.46	9.7	7.7 ± 0.85
laine	11	4.5–11.5	1.2–1.8	16	30–40

Les plumes de dindes ont des barbes d'une longueur en moyenne qui est de 5.2 cm et qui varie selon leur localisation le long du rachis. Cette longueur est plus grande comparativement à celle retrouvée dans les plumes de poulets et plus petite par rapport à celle de la laine ou du coton.

La finesse moyenne des barbes de plumes de dindes est similaire à la finesse des barbes de plumes de poulets, et plus grosse que celle de la laine.

La résistance des barbes de plumes de dindes est plus faible que celle des barbes de plumes de poulet et de laine.

Les fibres de toutes ces plumes ont un allongement plus court que celui de la laine.

Bien que les barbes de plumes de dindes soient plus épaisses que la laine, leur résistance et leur allongement, indiquent leurs propriétés mécaniques similaires à celles de la laine.

Cependant, la structure unique des barbes de plumes de dindes et leur faible densité, font d'elles des matériaux préférés pour plusieurs applications. Mélanger des fibres de faible densité à d'autres fibres naturelles à densité relativement élevée, crée des interactions leur conférant des propriétés mécaniques uniques.

III.7.11 Les propriétés chimiques de la kératine des plumes

La structure particulière de la kératine des plumes lui confère une stabilité mécanique élevée. Elle est composée d'un pourcentage élevé d'acides lysine, méthionine et tryptophane .

Elle est constituée dans sa structure de 40% de groupements chimiques hydrophiles et 60%hydrophobes.

La structure de la kératine α contient des liaisons hydrogène intramoléculaires entre l'amide et les groupements carbonyles dans le polypeptide. La kératine α contient des liaisons hydrogène inter chaines entre l'amide et les groupements carbonyles. Les hélices peuvent se compacter pour former des cristaux. La structure semi-cristalline des fibres de kératine aboutit à la formation d'un polymère.

La distance entre deux hélices α est de 0.3nm.

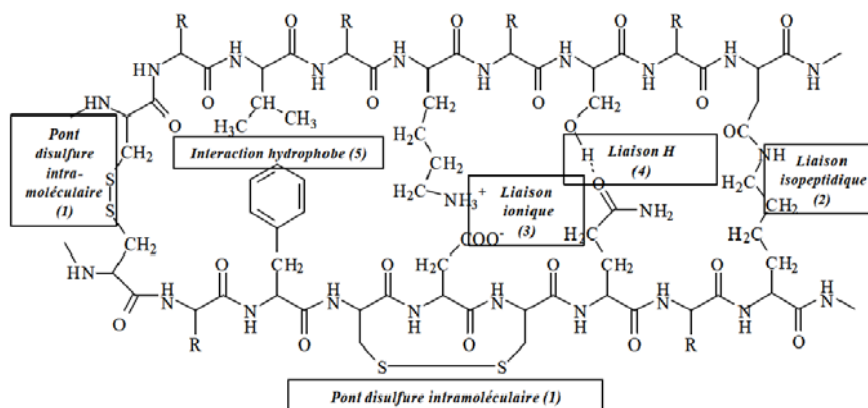


Figure III.17 : La kératine β de la plume [18]

III.7.11.1 Composition chimique de la kératine des plumes

Le tableau suivant représente la teneur en azote, soufre et cendre des différentes parties de la plume.

Tableau III.5 : Teneur de la plume en azote, soufre et cendre (minéraux) [18]

	N%	Soufre (S)%	Cendre (%)
Rachis	16,62	2,47	0,87
Calamus	16,40	2,32	0,8
Barbe	16,28	2,85	0,86
Medulla	16,36	2,40	0,77

III.7.11.2 Composition en acides aminés de la kératine des plumes

Les acides aminés, dont est constituée la kératine des différentes parties de la plume, sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.6: Composition en acides aminés ($\mu\text{mole/g}$) des différentes parties de la plume [18]

Acides aminés	Rachis	Calamus	Barbes	Medulla
Ala	840	729	446	655
Arg	370	371	384	389
Asp	547	534	519	537
Cystine	39	23	36	24
Cysteine	722	686	732	670
Glu	671	698	686	684

Gly	1326	1171	970	1156
His	23	20	17	24
Ile	308	280	383	313
Leu	802	664	605	720
Lys	62	52	71	65
Met	8	13	15	18
Phe	301	319	296	330
Pro	948	885	1056	891
Ser	1365	1299	1236	1363
Thr	401	345	437	366
Try	72	77	22	75
Tyr	139	143	118	147
Val	756	673	705	684

III.8 La courge de Luffa

III.8.1 Définition de *Luffa Cylindrica*

La *Luffa cylindrica* (syn *Luffa Aegyptica*) couramment appelée sponge gourd, smooth Loffa, loofah sponge, fait partie de la famille des cucurbitacées. C'est une vigne courante avec les feuilles arrondies et les fleurs jaunes. C'est une plante herbacée [19].



(a)



(b)

Figure III.18. *Luffa cylindrica*, (a) jeune fruit, (b) fruit mature et sec

La *Luffa* est généralement développée dans les zones tropiques et subtropiques comme plante cultivée en Asie, en Nord Afrique et en central et Amérique du Sud. L'éponge de *Luffa* principalement composée de cellulose 60%, d'hémicellulose 30% et de lignine 10%, c'est pourquoi elle s'appelle un matériau ligno-cellulosique. La couleur du fruit de *Luffa* à l'étape tendre est verte et jaune à la maturité. Les fruits sont lisses et cylindriques avec une chair blanche. La longueur du fruit est de 30 à 40 cm et contient de 50 à 60 graines [19].

III.8.2 Information descriptive

Il s'agit d'une plante annuelle, grimpante d'une hauteur arrivant jusqu'à 6 mètre et une largeur de 0,8 mètre. Les feuilles sont ovales, cordées, souvent plus larges que longues, palmées. Les fleurs, qu'elles soient mâles, ou femelles, sont d'une couleur jaune vive (figure III.19). Les fleurs femelles sont solitaires et les fruits sont cylindriques, arrondis, avec un dense réseau vasculaire dans la paroi. Les graines sont de couleur noire si le fruit est mature et de couleur blanc si le fruit est jeune et mesurent 0,5 à 1 centimètre de long. La Luffa est légèrement ailée [19].

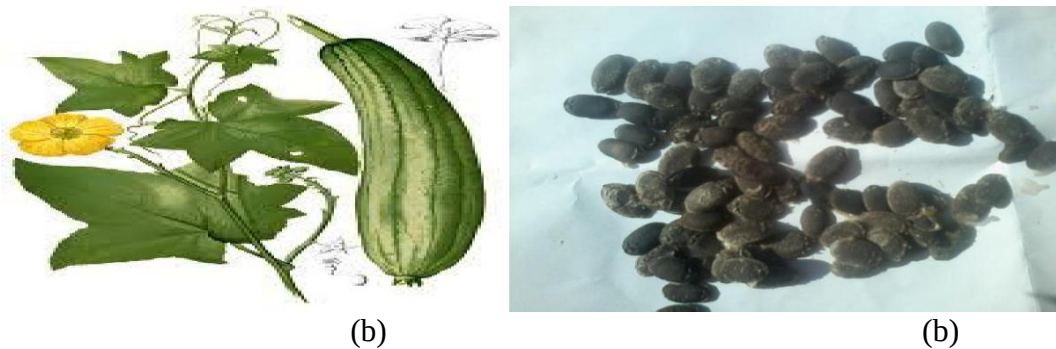


Figure III.19. Luffa cylindrica (a), grains de la Luffa cylindrica (b)

III.8.3 Croissance de la Luffa

La Luffa a besoin d'une saison de croissance très longue afin de mûrir dans les éponges sèches. La graine devrait être semée après que la terre soit complètement chaude au printemps. La Luffa s'accroît mieux en plein soleil en graines bien préparées. Elle a besoin de l'abondance d'humidité tout en accroissant. Elle préfère un pH environ de 6.0 à 6.8. L'eau excessive peut avoir comme conséquence une faiblesse de croissance et une maladie de racine.

III.8.4 Croissance en Architecture de l'éponge

Les fruits de la *Luffa cylindrica* possèdent un système vasculaire fibreux (éponges de Luffa). Les contrefiches de cette éponge naturelle sont caractérisées par une architecture microcellulaire avec les canaux microcreux continus (macropores avec le diamètre de 10-20 μm) qui forment les paquets vasculaires et rapportent un système hiérarchique multimodal de pores [19].

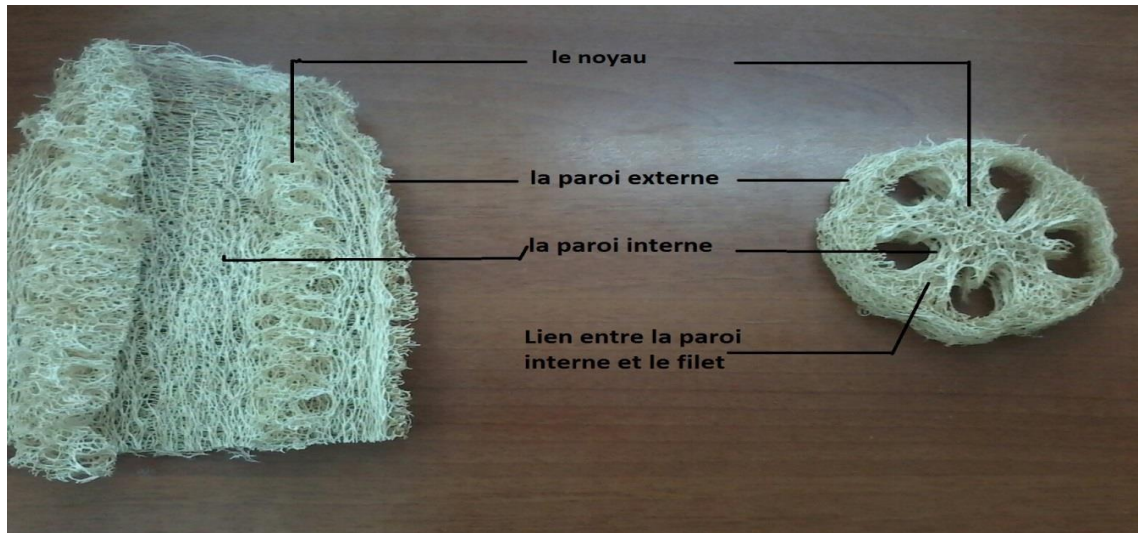


Figure III.20. Quatre parties montrant l'architecture de l'éponge de Luffa et encourager les fruits à durcir au loin [19]

Ce fruit admet plusieurs parties distinctes de l'intérieur vers l'extérieur (figure II.3) selon Zampieriet al. [19]:

- La partie centrale du fruit (core part) représente le noyau ou bien le filet;
 - La paroi interne (inner surface) et la paroi externe (outer surface) de l'éponge ;
- Une quantité importante de faisceaux vasculaires constitue le milieu (middle part) ou bien le lien entre la paroi interne et le noyau.

III.8.5 Propriétés chimiques

- Les fibres traitées avec la solution de NaOH permettent d'épurer la cellulose en enlevant les autres constituants présents telle que la lignine dans les fibres.
- Les acides chlorhydrique et phosphorique concentrés détruisent les fibres à température ambiante, et l'acide nitrique concentré transforme la cellulose en nitri-cellulose.
- Les Oxydants (agent de blanchiment, peroxyde d'hydrogène, EDTA, ...) à basse concentration, détruisent le colorant et élimine la lignine présente dans les fibres. À des concentrations élevées, ils dégradent les tissus des fibres de *Luffa cylindrica* [19].

III.8.6 Type de Luffa

La Luffa peut être classée en fonction de la forme et de la taille[19] :

- a. **Luffa acutangula Roxb. Pipangaille à côtes** : c'est une gourde anguleuse, originaire d'Asie (Chine - Inde) où elle est cultivée depuis l'antiquité. Elle se rencontre aussi en Afrique dans les zones des savanes. Les jeunes fruits à côtes longitudinales sont consommés et commercialisés sous le nom de gombos de Chine. Adultes ils sont amers. Ils contiennent des graines non ailées. Dans la pharmacopée asiatique ils sont utilisés comme purgatif et vomitif (graine et racine), diurétique (tige) et pour le traitement de la jaunisse.

- b. **Luffa cordifolia Blume**, synonyme *Thladiantha cordifolia* (Blume) Cogniaux, Luffa à feuilles cordées, originaire des forêts tempérées de l'Asie présente en Inde, au Népal, Birmanie, Thaïlande, Laos et Vietnam et en Chine.
- c. **Luffa operculata Cogn.**, synonyme *Luffa purgans* Mart, originaire d'Amérique du Sud (Brésil) en zone tropicale. La tige anguleuse peut atteindre trois mètres de haut. Ses larges feuilles en forme de rein ou de cœur ont de trois à cinq lobes et mesurent 10 ou 12 cm de long. Les fleurs axillaires jaune pâle sont monoïques et elles engendrent un fruit de la taille d'une prune, pointu comme un bec. Ce fruit gris ressemble à une courge, avec des nervures longitudinales pourvues de nombreux petits piquants. L'intérieur est pulpeux, avec un fin réseau de fibres et des graines aplaties de couleur brun clair (figure III.21). Elle est généralement utilisée dans la pharmacopée traditionnelle.



Figure III.21. Fruit et grain de *Luffa Operculata* Cogn

- d. *Luffa Echinata* Roxb originaire d'Asie. Elle contient de la silymarine, et plusieurs études ont été développées en Inde sur ses propriétés hépatoprotectrices (figure III.22).



Figure III.22. Fruit de *Luffa Echinata* Roxb

III.8.7 Utilisation de la Luffa dans différents domaines

L'utilisation de la Luffa comme plante industrielle a débuté au Japon entre 1890 et 1895, suite à la découverte de l'aptitude de la fibre, qui s'obtient à partir du fruit mur, à la fabrication des filtres pour moteur à vapeur et pour ceux à moteur diesel.

III.8.7.1 Utilisation domestique

Les jeunes fruits sont employés comme légume cru préparés comme la courge ou consommés comme des concombres

Une fois séparé de la peau, de la chair et des graines, le réseau de fibre après séchage peut être employé comme éponge de salle de bains, éponge de nettoyage de casserole, de vitre et de verre. La Luffa peut également être employée comme filtre et pour développer les produits chimiques purgatifs. Puisque la Luffa a un réseau compact des fibres étroites, son élasticité la rend utile pour beaucoup de produits comme des filtres, matériel d'emballage et les paniers [19].

III.8.7.2 Utilisation pharmaceutique

Dans les diverses pharmacopées traditionnelles brésilienne, les feuilles fraîches (en emplâtre) sont employées pour traiter les furoncles, pour traiter la rhinite, la sinusite, aménorrhée et l'hydropisie. Des essais cliniques ont été effectués en 1999, pour une utilisation en homéopathie (formule homéopathique en association avec d'autres composants) dans le traitement des sinusites aiguës [19].

III.8.7.3 Utilisation médicale et biologique

La plante est tonique, émétique et diurétique et utile dans le traitement de l'asthme et les maladies de peau. Elle est employée intérieurement pour le rhumatisme, mal de dos, l'hémorragie interne et les hémorroïdes. Les fibres de fruits secs sont employées en tant qu'éponges abrasives dans le soin de peau, pour enlever la peau morte d'où elle produit une lueur douce sur la peau. La circulation du sang que l'éponge induit sur la peau a été créditée comme soulagement pour les victimes rhumatismales et arthritiques [19]. Les fruits sont anthelminthiques, carminative, laxatifs, dépuratoires, émollient, expectorant et galactagogue et sont utiles dans la fièvre, la syphilis, les tumeurs, splenopathy et lèpre. Lavigne est développée plus généralement pour l'intérieur fibreux des fruits. Il a la propriété purgative et est employé pour l'hydropisie, la néphrite, la bronchite chronique et les plaintes de poumon. Il est également appliqué au corps dans l'ictèreputride [19].

III.8.7.4 Autres utilisation

- **Hamid Bou Saab** : a étudié les réactions de bioconversion éco-compatible de triterpénoïdes par des bactéries immobilisées sur *Luffa cylindrica*. Il a montré que l'immobilisation passive de biocatalyseurs au sein d'un support poreux (cas de *Luffa cylindrica*) peut favoriser l'interaction cellule-substrat lipophile et augmenter le taux de

Bioconversion sans utiliser des solvants et des produits chimiques de natures souvent toxiques, inflammables et explosives qui font perdre à la bioconversion son caractère de biotechnologie blanche. Il a aussi trouvé que le fruit sec de *Luffa cylindrica* est la matrice la plus performante. La topographie des fibres de *Luffa* et la présence de domaines hydrophiles (hémicellulose) et hydrophobes (lignine) favorisent l'adhésion de mycobactéries dont la paroi est à dominance hydrophobe. La grande surface massique et la structure poreuse de *Luffa cylindrica* ont permis de construire un réseau tridimensionnel de mycobactéries dans le milieu. L'interaction entre les particules de cholestérol et les cellules immobilisées est donc favorisée ce qui augmente le taux de bioconversion par le rapprochement substrat-cellules.

- **Niharika Mohanta et S.K. Acharya (2014)** : ont fait une recherche sur les propriétés mécaniques d'un composite hybride-époxyde renforcé par des fibres de *Luffa cylindrica*, ils ont observé que la résistance à la traction du composite s'avère maximum. **Ghali et al. (2011)**. ont étudié les effets du rapport de poids de fibre, de la structure et de la modification de fibre sur les propriétés mécaniques des composite *Luffa*-Polyester. Ils ont observé que la modification chimique de la fibre de luffa a augmenté le module de flexion. **Boynard et al.(2003)**. ont étudié l'effet de la fibre de la *Luffa cylindrica* traitée par des alcalins sur les propriétés mécaniques du composite *Luffa*-polyester. Ils ont observé l'amélioration de 14% de ces propriétés avec la fibre traitée.
- La *Luffa* a un bon caractère adsorbant ce qui permet son utilisation pour l'adsorption des métaux lourds et des colorants organiques.

III.8.8 Choix de la *Luffa cylindrica* comme matière première

La *Luffa cylindrica* se compose principalement de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine dont chacun de ces composants influencent son caractère adsorbant.

III.8.8.1 Cellulose

La structure de cellulose se compose de l'unité monomérique d'un b-D-glucopyranoseliéparlatringlerie1,4-glucosidic. La cellulose est un matériau biodégradable, renouvelable, peu couteux et de faible densité. C'est un homopolymère fortement fonctionnel, à chaînes linéaires, caractérisée par dehydrophobicité, dechiralité, et de sagraande capacité de modification chimique [19]. De plus, le réseau de *Luffa cylindrica* montre la structure microspongieuse contenant entre 200 et 500 fibres micro-cellulaires menant au volume accessible élevé [19] pour cela, en raison de son structure unique, la *Luffa Cylindrica* a été employécomme adsorbant efficace

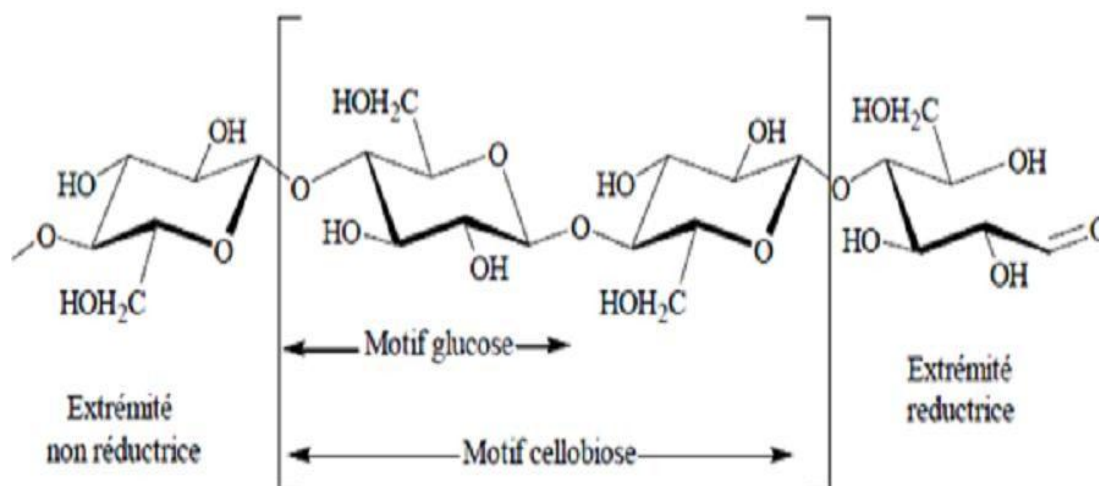


Figure III.23. Structure de la cellulose [19]

III.8.8.2 Hémicelluloses

Les hémicelluloses sont un des trois composants principaux de la biomasse lignocellulosique, représentant ~20-40 % de la biomasse en poids. Elles constituent un groupe de polysaccharides complexes qui se caractérisent par leur solubilité dans des solutions alcalines (par exemple KOH 1M) et leur insolubilité dans l'eau. Les hémicelluloses sont définies structurellement comme des polysaccharides dont le squelette est composé de résidus β -(1,4)-D-pyranose, où l'O4 est en position équatoriale. De courtes chaînes latérales sont fixées sur le squelette [19].

Au sein de la paroi cellulaire végétale, les hémicelluloses sont un groupe hétérogène de polymères branchés matriciels de relativement bas poids moléculaire qui sont associés à la cellulose et à d'autres polymères. Elles se lient étroitement à la surface des microfibrilles de cellulose et d'une microfibrille à l'autre, par liaison hydrogène, et dans ce sens sont des glycines assurant une réticulation.

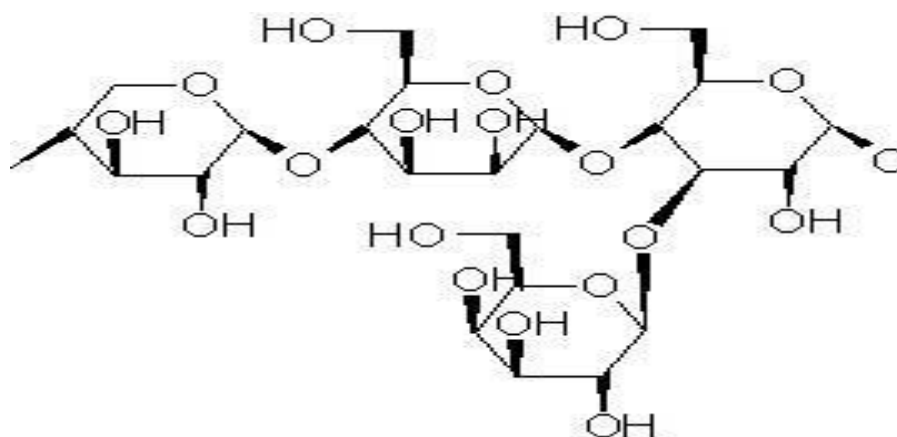


Figure III.24. Structure de l'hémicellulose [19]

III.8.8.3 Lignine

Groupe des substances végétales complexes, hautement polymérisées, imprégnant les parois celluloses des cellules des tissus lignifiés. La lignine se trouve principalement localisée dans les structures intercellulaires et fournit la cohésion aux matériaux ligneux. Elle leur confère une résistance mécanique accrue, mais limitant leur élasticité. La lignine représente environ 25 % du poids du bois sec et 10% de la composition de Luffa [19].

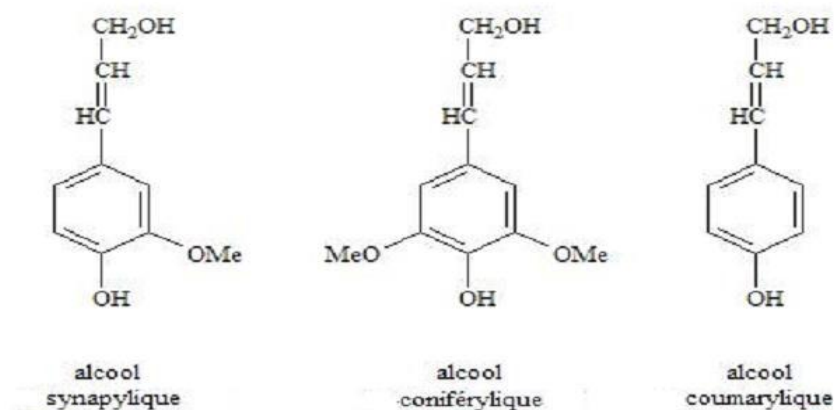


Figure III.25. Structure de lignine [19]

III.9 La lavande

III.9.1 Définition de la lavande

La lavande est un petit arbrisseau qui adopte la forme d'un buisson. De la famille des lamiacées comme le lamier blanc, cette plante originaire du pourtour méditerranéen (symbole de la haute Provence) pousse sur des sols calcaires secs et ensoleillés et peut atteindre 60 centimètres de haut. Les rameaux en sont dressés, très ramifiés et touffus, avec des feuilles étroites de couleur vert cendré. Les fleurs se regroupent dans un épi terminal et donnent à la lavande sa couleur caractéristique violette ou mauve et son parfum agréable[20].

Bien qu'utilisée depuis l'Antiquité, c'est au Moyen âge qu'on lui donne le nom commun de lavande. Cette dénomination provient très certainement du latin lavare (laver) car elle est à l'époque couramment employée pour laver le linge. En effet, son parfum a l'avantage d'éloigner les mythes et les parasites du linge mais la lavande a surtout des vertus antiseptiques et bactéricides. La lavande permet de débarrasser la peau des bactéries et microbes, donc de la « laver ».



Figure III.26 : la lavande dans la nature[20] **Figure III.27:** les différents types de lavande[20]

Les fleurs de lavande sont mises à sécher, puis réduites en poudre, elles sont utilisées en gélules ou en infusions. Distillées, elles fournissent une huile essentielle appelée essence de lavande. Celle-ci entre dans la composition de pommades, de crèmes, de gels ou d'eaux parfumées.

III.9.2 La paille de lavande comme isolant thermique

Ce matériau naturel qui peut être utilisé pour l'isolation des murs, sols, toitures et cloisons provient du broyage des gerbes ou du vert de la paille de lavande après distillation avec une masse volumique de $110.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ et une humidité de 1% .

Cette fibre végétale est très riche en silice (70%), ce qui lui confère une bonne carbonatation en présence de chaux aérienne. Elle comporte en outre encore 2 à 3% d'huile essentielle, qui constitue un répulsif naturel contre certains insectes. Sa fabrication ne produit ni produits toxiques et ne requiert pas de grandes dépenses énergétiques ; sa pose ne pollue pas non plus, ce qui en fait un matériau écologique.

III.9.3 Les performances de la paille de lavande en isolation

Utilisée en isolation, la paille de lavande présente de bonnes qualités thermiques, même si elles ne sont pas excellentes ; son coefficient de conductivité thermique varie entre 0,050 et 0,075 W/m.K en fonction de son conditionnement (vrac ou briques), chiffre à mettre en relation avec ceux du polyuréthane, entre 0,022 et 0,030 W/m.K. Mais elle présente bien d'autres atouts. une capacité thermique de 1449 (J/kg.k) et Le bilan carbone de fabrication est largement meilleur que bien d'autres isolants. En outre, elle est reconnue par la réglementation thermique 2012 (RT 2012), offrant d'indéniables qualités dans le cadre de travaux d'isolation thermique, tant en construction qu'en rénovation : il s'agit d'un très bon régulateur hygrothermique, d'un matériau isolant recyclable et écologique, qui procure par ailleurs un anti-champ magnétique et électrique grâce à la silice de la paille. S'adaptant au climat, elle régule la température aussi bien en hiver qu'en été.

La grande capacité thermique de ce matériaux (comparable en moyenne à celle des fibres de bois) lui permet de bien résister au feu, il est quasiment imputrescible grâce à sa forte teneur en silice, naturellement répulsif contre les insecte grâce aux huiles essentielles.

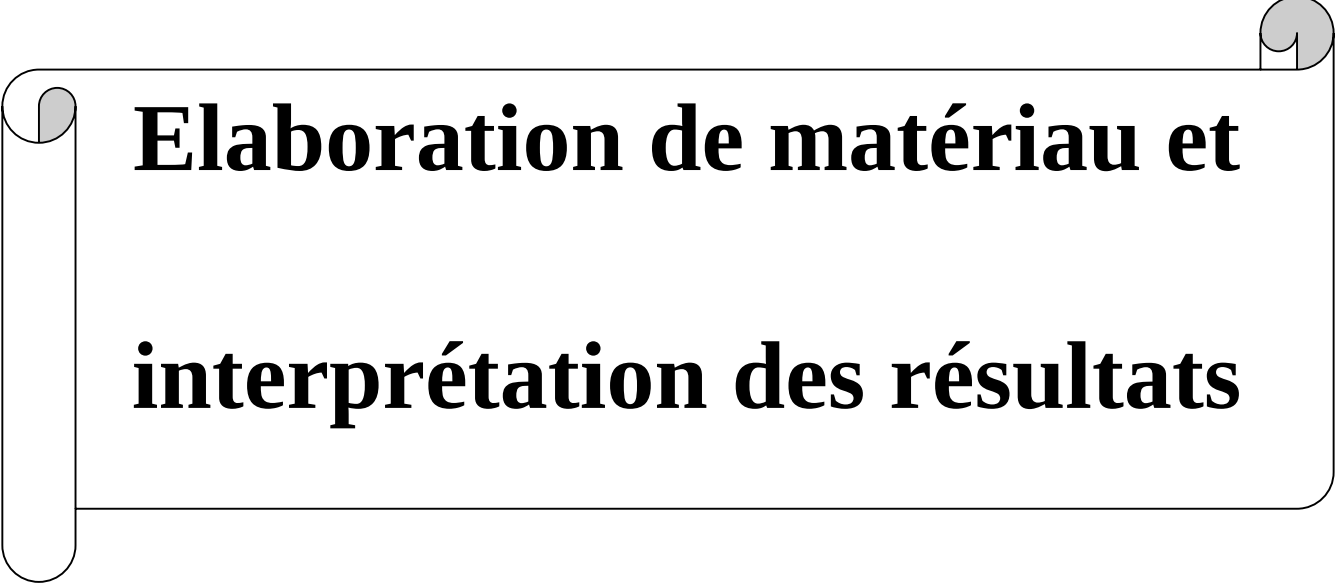
Une structure de paille de lavande en bloc permet d'éviter les ponts thermiques et régule l'humidité sans dégradation des performances thermique.

III.9.4 La pose de la paille de lavande en isolation par l'extérieur

Il est plutôt facile de poser de la paille de lavande pour isoler murs et toits par l'extérieur. Elle se présente en vrac, en botte ou en bloc prêt à l'emploi. Néanmoins, en raison de son caractère hautement inflammable, il ne faut pas la mettre en contact avec les conduits de cheminée et les fils électriques. Il est également utile de la protéger d'un parement. Il ne faut pas non plus l'exposer trop longtemps à l'eau, au risque de lui faire perdre ses capacités thermiques.



Figure III.28 : l'isolation extérieure des murs et toiture avec du la paille de lavande[21]

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black outline. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a darker gray shadow. The text is centered on the unrolled portion.

**Elaboration de matériau et
interprétation des résultats**

Notre travail est scindé en deux parties : la première partie est consacrée aux traitements des matériaux étudiés telles que les plumes de dindes, la courge de luffa et la plante de lavande. La seconde partie de ce travail est consacrée à la réalisation des moules de 30 cm x 30 cm x 1,2 cm et à la mesure de la conductivité thermique des composites élaborés avec des matériaux biosourcés.

IV.1 Traitement des matériaux étudiés

IV.1.1 Traitements des plumes de dinde

Dans toutes les opérations et les étapes de traitement de ces matières biosourcées, le respect des mesures de sécurité est indispensable afin de se protéger surtout contre les effets néfastes des détergents utilisés et de la saleté des plumes de dinde récupérées dans un abattoir de dindes de la Wilaya de Boumerdes. Pour cela, le port le masque et des gants est obligatoire.

Après un lavage au détergent puis un rinçage à l'eau en abondance, les plumes ont subi un séchage à l'air libre. A l'aide d'une paire de ciseaux, les barbes ont été séparées du rachis.

Les barbes récupérées ont ensuite subi un traitement mécanique par cardage afin de séparer les barbes qui sont liées par les barbules pour obtenir enfin des fibres utilisables.

La figure ci-dessous montre les différentes étapes du traitement mécanique subi par les plumes.



Figure IV-1 : Traitement des fibres avec des détergents et de l'eau chaude

Les fibres ont été laissées dans un bassin qui contient de l'eau chaude à une température de 70 °C et des produits détergents (eau de javel, savon) pour une période de 24 h.

Après ça, un nettoyage de fibres de plumes de dinde a été fait avec de l'eau en abondance et les fibres ont été séchées au soleil et à l'air libre pendant 48h, comme le montrent les figures ci-dessous :

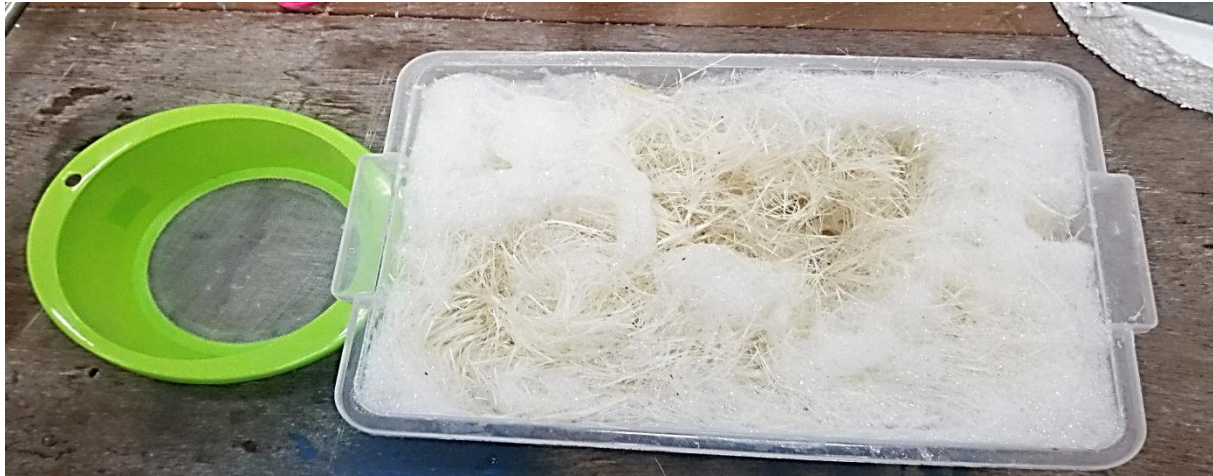


Figure IV-2 : Nettoyage des fibres avec de l'eau et à l'aide d'un filtre



Figure IV-3 : Résultat final après nettoyage à l'eau et séchage à l'air

IV.1.2 Traitement de la lavande

Après avoir récupéré une quantité importante de lavande dans la nature dans la région de Tizi-Ouzou, nous avons laissé cette plante à l'ambiance extérieure exposée au soleil et à l'air pour un séchage pendant une période de 20 jours. Ensuite, nous avons séparé les fibres des pailles de lavande, les différentes étapes sont montrées dans les figures ci-dessous :



Figure IV- 4 : Lavande exposée au soleil



Figure IV- 5 : Récupération des fibres de la lavande après le séchage

IV.1.3 Traitements de la courge du luffa

L'opération de découpage de l'éponge de luffa se trouvant sur le marché local en morceaux à l'aide des ciseaux est montrée dans la figure ci-dessous :



Figure IV-6 : Eponge de courge luffa découpé en morceaux

IV.2 Réalisation des plaques d'isolants thermique à base des matériaux biosourcés**IV.2.1 Conception et fabrication du moule**

Afin d'élaborer les composites, nous avons élaboré trois moules en verre. Le moule est constitué de deux plaques de dimensions ($400 \times 300 \times 4 \text{ mm}^3$) chacune et des barrettes de dimensions ($400 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$) et d'autres de dimensions ($300 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$) délimitant la plaque composite de dimensions ($300 \times 300 \times 4 \text{ mm}^3$).

Le choix de la dimension du moule est porté sur les besoins des essais de conductivité thermique réalisés sur un CT mètre dont la dimension des plaques chaude et froide est fixée à $300 \times 300 \text{ mm}^2$.

Des feuilles de cellophane sont appliquées sur les plaques en verre afin de faciliter le démoulage des plaques composites.

Les images ci-dessous montrent le moule prêt à l'utilisation :



Figure IV-7 : Un moule en verre pour la réalisation des plaques de dimension (40 x 30 x 1,2 cm)

Ce travail a été effectué au sein de laboratoire de Sciences des matériaux de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, dans le respect strict des mesures de sécurité et sanitaire afin de se protéger et de protéger le personnel et les étudiants qui travaillent à l'intérieur de ces locaux quotidiennement.

Pour cela, le port des gants et d'un masque est la première chose à faire avant d'entamer ce travail.

Pour réaliser ces plaques d'isolants à base des matériaux biosourcés constitués de la matière de base qui peut être des fibres de plumes de dindes ou fibres de lavande ou bien des fibres de courge de luffa, et d'une colle qui doit être naturelle. Le rôle de cette dernière est d'assurer une liaison entre les fibres et d'avoir une plaque rigide et prête à subir des tests et à l'exploitation dans l'isolation des parois du bâtiment après séchage et emballage avec des feuilles d'aluminium destiné à l'industrie alimentaire, cela pour éliminer échanges de chaleur (par convection, par conduction et par rayonnement).

IV.2.2 Le riz comme colle biosourcée

Le riz, aliment de base des chinois, a servi autrefois, sous sa forme gluante, pour la construction de remparts et pour reboucher les failles des murs de certaines vieilles bâtisses. La pâte de riz a également été utilisée dans la construction de la Grande muraille, il y a plus de 2 000 ans. Comme le montre des études d'une équipe de recherche qui travaille sur ce sujet [1].



Figure IV-8 : La muraille de chine [1]

IV.2.2.1 Mortier au riz gluant

Le mortier lie les pierres ou les briques les unes aux autres. Il assure la cohésion et la répartition des charges. Les mortiers à base de chaux et de sable sont utilisés en Chine depuis fort longtemps, certainement depuis le Xe siècle avant J.-C., souvent pour la construction de tombeaux. La composition des mortiers varie selon les régions et les époques; le riz gluant est entré dans l'élaboration du mortier de la Grande Muraille, lui conférant ainsi des qualités qui expliquent sa bonne conservation au regard de son âge.

Des équipes de recherche se sont penchées sur la tenue et la blancheur du mortier de la Grande Muraille. Des prélèvements de mortier ont été faits sur une portion de la muraille datant de 1372, située à Jia Yuguan, dans la province du Gansu. La méthode de la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier et la Diffraction aux Rayon-X ont pu mettre en évidence la présence d'amylopectine $((C_6H_{10}O_5)_n)$ et d'amylose dans le mortier, composants principaux de l'amidon du riz[1].



Figure IV-9 : une partie de la muraille de chine.

IV.2.2.2 Composition du mortier

Des tests effectués sur ce mortier de la muraille de Chine ont permis de déterminer sa composition décrite sur le tableau ci-dessous :

Tableau IV-1: Composition du mortier de la muraille [1]

Chaux CaO	Silice SiO ₂	Alumine Al ₂ O ₃	Oxyde de magnésium MgO	Dioxyde de soufre SO ₂	Dioxyde de titane TiO ₂	Oxyde ferrique Fe ₂ O ₃
83,23 %	8,07 %	5,52 %	0,00 %	1,34 %	0,10 %	1,44 %

Des résultats similaires ont été trouvés sur d'autres parties de la muraille. Le mortier était composé d'environ 3% de son poids en riz gluant.

En comparaison, la composition chimique moyenne d'un clinker de type Portland obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile est :

Tableau IV-2: Composition chimique clinker type Portland [1]

Chaux CaO	Silice SiO ₂	Alumine Al ₂ O ₃	Oxyde ferrique Fe ₂ O ₃
68 %	23 %	7 %	2 %

IV.2.2.3 Caractéristiques du mortier au riz gluant

Des équipes de recherche chinoises ont reproduit un mortier au riz gluant avec la même composition. Ils ont ensuite pu faire différents tests sur celui-ci afin de déterminer ses propriétés [1]

Le tableau ci-dessous résume les propriétés de ce mortier .

Tableau IV-3 : Résistance à la compression à 28 jours du mortier en fonction de la proportion de riz gluant [1]

Addition de riz	Absorption de l'eau	Résistance à la compression à 28 jours [MPa]
Sans	41 %	2,26
1 %	63 %	9,50
3 %	58 %	9,73
5 %	51 %	9,77

La résistance du mortier au riz gluant est bien plus élevée que celle du mortier sans ajout organique. À noter que le mortier sans riz a une composition bien différente des mortiers actuels. En France, les mortiers normalisés ont une résistance à la compression comprise entre 32,5 et 52,5 MPa. Un mortier moderne réalisé sans précaution aura une résistance en compression comprise entre 10 et 45 MPa suivant le pourcentage et le type de ciment utilisés [1].

Le mortier au riz gluant présente une microstructure homogène et très dense (figure IV-10). Ce qui est très différent des mortiers classiques qui ont une structure moins dense, et donc un plus fort passage d'air qui jouera un rôle important pour la carbonatation. On peut comparer les vues microscopiques d'un ciment non organique et organique (figure IV-11).

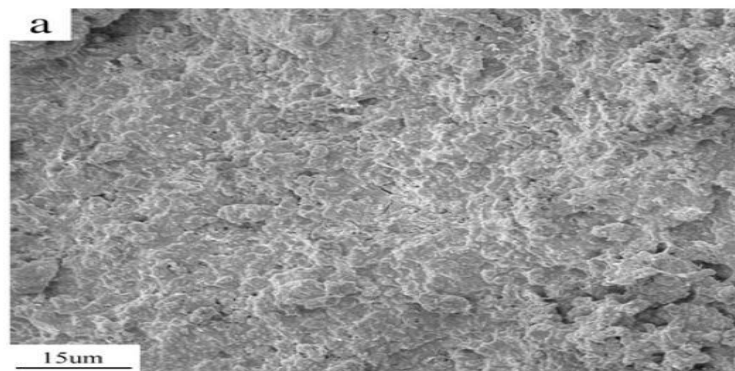


Figure IV-10 : Vue microscopique du mortier au riz gluant[1]

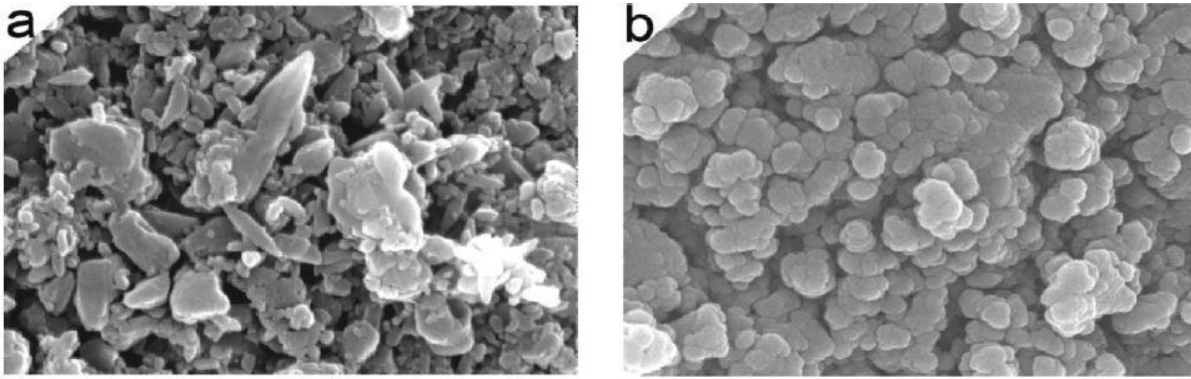


Figure IV-11 : (a) Mortier non organique, (b) mortier au riz gluant[1]

Il semble que le fait de rajouter du riz permette d'augmenter la formation de calcite. En effet, les molécules d'amidon permettent de limiter la croissance des cristaux de portlandite, et ainsi permettent à la calcite de mieux s'étendre et de limiter la carbonatation.

IV.2.2.4 Conclusion

Les équipes de recherche qualifient l'ajout d'élément organique à un élément minéral comme l'une des grandes innovations de l'époque. Les recherches actuelles sur les mélanges organique/minéral en matière de matériaux de construction ne sont donc pas une nouveauté !

Un nouveau matériau éco-conçu se doit de répondre au critère de durabilité.

D'après les recherches effectuées sur les monuments de Chine comportant du mortier au riz gluant, la plupart sont encore debout. Malgré les nombreux séismes de cette région du monde dont certains de fortes amplitudes, ces bâtiments présentent une bonne résistance grâce en particulier à la durabilité du mortier au riz gluant [1].

L'étude des techniques de construction de la Grande Muraille de Chine a permis de mettre en lumière un éco-matériau découvert il y a des milliers d'années et capable de concurrencer des matériaux classiques dans certains domaines de la construction. Il devrait donc être intéressant de se pencher sur la possibilité d'utiliser des bétons à liant amidon dans le domaine de la construction moderne.

Ce sont les résultats obtenus par cette équipe de recherche qui nous ont poussés à choisir la pâte de riz comme colle naturelle dans notre travail qui consiste à réaliser des plaques d'isolants à base des matériaux écologiques.

IV.2.3 L'amidon de la pomme de terre comme colle naturelle

La fécule de pomme de terre est l'amidon (appelé dans ce cas « fécule »), extrait des tubercules de pomme de terre.

L'extraction de la fécule donne lieu à une importante activité industrielle, la « féculerie ». Les pommes de terre sont écrasées, ce qui libère les grains d'amidons (amyloplastés). L'amidon est ensuite lavé et desséché sous forme d'une poudre blanche.

La fécule de pomme de terre a de multiples applications dans l'industrie, en particulier pour le couchage du papier. Elle sert également dans les domaines de la cosmétique, de l'industrie pharmaceutique, ainsi que comme additif alimentaire (épaississant, texturant, ...etc). D'autres sources d'amidon concurrencent la pomme de terre : l'amidon est en effet extrait industriellement également du maïs, du blé et des petits pois notamment.

La fécule de pomme de terre et ses dérivés ont de nombreuses applications alimentaires. On l'emploie également dans des applications techniques comme la colle à papier peint, les apprêts et enduits des tissus, le couchage et l'enduction du papier et comme adhésif dans la sacherie de papier et les rubans de papier gommé.

IV.3 Les plaques d'isolants réalisées en utilisant la pâte de riz

IV.3.1 Les fibres de lavande avec la pâte de riz

Les étapes de remplissage du moule élaboré afin de réaliser la première plaque à base de matériaux biosourcés sont montrées sur les images ci-dessous :



Figure IV-12 : Une couche de la paille de riz d'une épaisseur 0.4 cm



Figure IV-13 : Une couche de fibres de lavande rajoutée directement sur la paille d'une épaisseur d'environ 0.8 cm



Figure IV-14 : Une couche de la patte de riz injectée à l'aide d'un outil sur les fibres de lavande



Figure IV-15 : Mettre le couvert de moule

IV.3.2 Fibres de plumes de dindes avec la pâte de riz

La réalisation de la deuxième plaque est passée par des étapes similaires à celles de la première plaque, il n'y a que les fibres qui changent. Les images ci-dessous montrent comment on a procédé tout en respectant la chronologie des étapes :



Figure IV-16 : Le moule prêt à l'utilisation



Figure IV-17: 1^{ère} Couche de pâte de riz d'une épaisseur de 0.4 cm

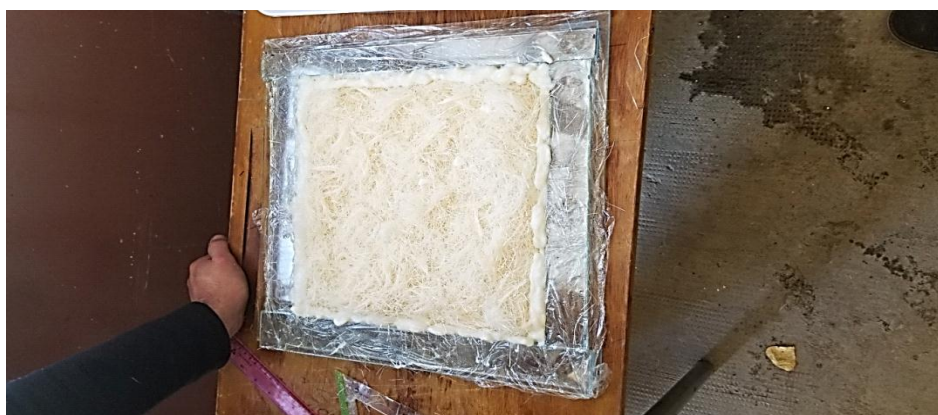


Figure IV-18 : Deuxième couche constituée de fibres de plumes de dindes



Figure IV-19 : Pâte de riz injectée sur les fibres à l'aide d'un outil

IV.4 Les fibres de la courge de luffa et la pâte de pomme de terre pour réaliser une plaque d'isolant

La troisième plaque est réalisée avec les fibres de la courge de luffa, présentées en deux couches, et nous avons utilisé la pâte de pomme de terre pour assurer la fixation des fibres et jouer le rôle d'une colle écologique. Les différentes étapes de manipulation sont résumées dans les figures ci-dessous :



Figure IV-20 : Préparation du moule et des fibres de la courge de luffa en plaques



Figure IV-21 : La pâte de pomme de terre est ajoutée comme une première couche d'une épaisseur de 0.4 cm



Figure IV-22 : Des plaques de fibres de la courge de luffa rajoutées sur la pâte



Figure IV-23 : A l'aide d'un outil, on rajoute une deuxième couche de pâte de faible épaisseur



Figure IV-24 : Une seconde couche de fibres de courge de luffa est rajoutée dans le moule



Figure IV-25 : Enfin, une dernière couche est ajoutée sur les fibres avant de fermer le moule par son couvert

Après le remplissage des moules par les matières, on pose le couvert sur chacun et ensuite on exerce une compression à l'aide des éprouvettes en béton comme les montrent les figures ci-dessous :



Figures IV-26 : Les moules remplis subissent une compression à l'aide des éprouvettes en béton

IV.5 Calcul des forces de pression exercées sur chaque plaque

La force de pression est calculée par l'équation suivante :

$$F \text{ (N)} = \text{le poids (kg)} / \text{la surface (m}^2\text{)} : P \text{ (Pa)} = m \times g / S \quad (\text{IV.1})$$

Plaque n° 01 : fibres de lavande avec la pâte de riz.

La force exercée représente le poids des éprouvettes :

$$F = 29.24 \times 9,81 = 286,8 \text{ N}$$

La pression exercée est $P = F/S = 286,8 / 0.09 = 3187 \text{ Pa}$

Plaque n° 02 : fibres de luffa avec la patte de la pomme de terre

$$P = 32 \times 9,81 / 0.09 = 3488 \text{ Pa}$$

Plaque n° 03 : fibres de plumes de dindes avec la pâte de riz

$$P = 84 \times 9,81 / 0.09 = 9156 \text{ Pa}$$

Après environ 15 jours, on a procédé au démoulage des plaques et par la suite on les a laissé sécher à l'extérieur du laboratoire pendant quelques heures exposées au soleil. Les résultats après le démoulage sont montrés dans les figures ci-dessous :



Figure IV-27 : La plaque constituée de fibres de lavande et la pâte de riz après le démoulage



Figure IV-28 : La plaque fabriquée avec les fibres de dindes et la pâte de riz après le démoulage



Figure IV-29 : La plaque fabriquée avec les fibres de luffa et la pâte de pomme de terre après le démoulage

L'étape qui suit le démoulage des plaques est le séchage de ces dernières. Le séchage est une opération qui a pour but d'éliminer par vaporisation l'eau qui imprègne un produit (liquide ou solide) afin de le transformer en produit solide sec dont l'humidité résiduelle est très faible. Cette étape est effectuée à l'aide d'une étuve qui est une enceinte pour le chauffage et le séchage à convection forcée. Elle possède un chauffage électrique avec une circulation d'air à convection forcée à ventilateur et elle est équipée d'un thermostat. (voir la figure IV-30) .



Figure IV-30 : Séchage des moules dans l'étuve

Le séchage des trois plaques obtenues est effectué en plusieurs étapes en augmentant la température jusqu'à une température maximale de 105 °C

Les étapes sont les suivantes :

- Étape 01 : laisser les plaques dans l'étuve à une température de 30 °C (température ambiante) pendant 72 heures.
- Étape 02 : augmenter la température de l'étuve de 15 °C pendant 8 heures .
- Étape 03 : augmenter la température de l'étuve pour atteindre une température de 60 °C pendant 12 heures.
- Étape 04 : augmenter la température de l'étuve à 75 °C pendant 8 heures.

- Étapes 05 : augmenter la température de l'étuve pour atteindre les 90 °C et cela pendant 12 heures.
- Étape 06 : c'est la dernière étape effectuée pour le séchage des plaques. On a augmenté la température jusqu'à 105 °C et cela pendant 24 heures, pour une vaporisation complète de l'eau résiduelle.

L'augmentation de la température de l'étuve par étape jusqu'à une température maximale de 105 °C a pour but d'assurer un séchage complet des plaques sans engendrer une déformation de la liaison chimique des matériaux constituant chaque plaque.

IV.6 Perte de masse de chaque plaque avant et après le séchage

Cette différence de poids de chaque plaque signifie la quantité d'eau extraite par vaporisation de l'eau dans l'étuve (le séchage). Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.4 : Différents poids pour chaque plaque.

	Avant le séchage (kg)	Après le séchage (kg)	La différence (kg)
Plaque n° 01	0.22	0.160	0.06
Plaque n° 02	0.43	0.160	0.27
Plaque n° 03	0.30	0.140	0.16

L'opération de la mesure des poids des plaques est effectuée à l'aide d'une balance électronique qui se trouve au niveau de laboratoire du département de Génie Civil.



Figure IV.31 : Balance électronique utilisée pour mesurer la perte de poids des plaques

IV.7 : Les fibres de plumes de dindes avec la résine acrylique

IV.7.1 : Définition de la résine acrylique

La résine acrylique est un matériau bien connu et utilisée depuis longtemps dans le domaine de l'orthopédie dentofaciale. Elle se présente le plus couramment sous la forme liquide-poudre, où la poudre est un polymère et le liquide un monomère. La résine « ortho » est composée de polyméthacrylate de méthyle.

Ses propriétés mécaniques sont bonnes : dureté et résistance à la traction de l'ordre de 60 MPa, module d'élasticité de 2.4 GPa. Cependant, sa résistance à l'aberration est faible.

La préparation s'effectue par le mélange de la poudre et du liquide. Mélangée au liquide la poudre donne une masse sableuse qui, quand la poudre a saturé le liquide, devient pâteuse : c'est la formation de la pâte, l'accès de liquide peut être éliminer à la flamme[2].

IV.7.2 : Réalisation de la plaque, moulage et démoulage

Les images ci-dessous montrent les différentes étapes :



Figure IV.32 : Première couche de la résine



Figure IV.33 : Première couche de fibres de plumes de dinde



Figure IV.34 : Deuxième couche de résine



Figure IV.35 : Les moules remplis subissent une compression à l'aide des éprouvettes en béton



Figure IV.36 : la plaque de fibres de plumes de dinde avec la résine après le démoulage

IV.8 : L'enveloppement des plaques sous vide

Les plaques d'isolants obtenus après le séchage sont enveloppées dans du papier aluminium utilisé dans l'industrie agroalimentaire.

Cette opération est effectuée en passant par plusieurs étapes et en utilisant plusieurs outils.

Les outils utilisés sont :

- Les ciseaux pour couper le papier aluminium.
- La soudeuse pour créer une enveloppe soudée aux extrémités de la plaque.

- La pompe à vide pour retirer l'air qui se trouve dans le composite.
- Une pipette et de scotch aluminium.

Les images ci-dessous montrent les étapes et les résultats obtenus :



Figure IV.37 : Plaque d'isolant enveloppée par la feuille d'aluminium



Figure IV.38 : Création d'une enveloppe en aluminium à l'aide d'une soudeuse



Figure IV.39 : l'aspiration de l'air qui se trouve dans le matériau à l'aide d'une pompe à vide

IV.9 : Le CT mètre, appareil de mesure de la conductivité thermique

IV.9.1 : Description de l'appareil

Une armoire à charnière en fibres de verre abrite les composants principaux de l'ensemble. La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide installée sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide d'eau à température stable de manière à ce que la plaque soit sensiblement isothermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en mV, proportionnellement à la différence de température sur ses deux surfaces.

Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée de manière électronique à une température de consigne et l'entrée de température est indiquée par un voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poigne à vis situé en haut de l'armoire.

Un indicateur à cadran permet de déterminer la hauteur de spécimen testé le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens d'une épaisseur jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (70 °C).

Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur.

IV.9.1 : Méthode d'essai

Les matériaux de construction et d'isolation les plus courants peuvent être testés dans le TCU 100, dans la mesure où une épaisseur adéquate est utilisée de manière à ce que la résistance thermique (R) soit entre 0,1 et 1,4 m².K/W.

En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue à cause du temps nécessaire pour obtenir des conditions de régime permanent.

Pour les spécimens d'une résistance inconnue ou d'une faible résistance thermique (soit $R < 0,8 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) les feuilles de caoutchouc ou silicone fournies avec l'appareil doivent être placées de chaque côté du spécimen et les constantes appropriées utilisées pour déterminer la valeur de λ .

Le but des feuilles de caoutchouc est d'éliminer les espaces d'air éventuels entre le spécimen et la plaque chaude et la plaque froide, et elle devrait par conséquent être utilisée pour tout spécimen qui n'a pas de surface lisse. La plage réglable de T_1 est de 0 à 70 °C. La plage réglable de T_3 est de 0 à 40 °C.

Cependant, ce ne sont que les plages qui peuvent être saisies dans le contrôleur, les valeurs réelles que l'on peut obtenir dépendront des conditions ambiantes et de l'utilisation ou non du refroidisseur ou de l'eau de secteur.

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% sans changer

À chaque fois dans le même sens (P.A. HILTON LTD, HEAT TECHNOLOGY DIVISION, TCU 100, NOV 94).

IV.9.2 : Equation donnant la conductivité thermique

$$\lambda = Is * [(K_1 + (K_2 * T)) + ((K_3 + (K_4 * T)) * HFM) + ((K_5 + (K_7 * T)) * HFM^2)]/dT \quad (IV.2)$$

- Calibration constants – without silicone Rubber Mats

$$K_1 = 88.1382 \quad K_4 = 0.8037$$

$$K_2 = -2.7829 \quad K_5 = 0.7954$$

$$K_3 = -21.3064 \quad K_6 = -0.0189$$

Avec :

λ est la conductivité thermique donnée en W/m. K

Is est l'épaisseur moyenne des plaques composites (m)

T_1 est la température de la plaque chaude (°C)

T_2 est la température de la plaque froide (°C)

T_3 est la température de réfrigérant (°C)

$T_4 = HFM$ (Heat Flownmeter Reading) sortie du débitmètre en (mV)

$Dt = T_1 - T_2$ est la différence de température (°C)

$\bar{T} = (T_1 + T_2)/2$ est la température moyenne (°C)



Figure IV.32 : Image du CT Mètre

IV.9.2 : Calcul de la conductivité thermique de chaque plaque

Méthode de mesure de l'épaisseur des plaques d'isolants

On tourne la roue à vis dans le sens des aiguilles d'une montre pour soulever l'ensemble de la plaque chaude. Elle doit être positionnée de manière à ce que la hauteur entre la barre de levage horizontale et le couvercle à vis soit supérieure à l'épaisseur du spécimen.

On ouvre le couvercle de la boîte et placez le spécimen sur la plaque froide en utilisant les tapis de caoutchouc en silicone. Fermez le couvercle et veillez à ce que les deux attaches à l'avant de la boîte soient bien fixées.

On tourne la roue à vis dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour abaisser l'ensemble de la plaque chaude sur le spécimen. La plaque chaude touchera le spécimen et au fur et à mesure que la poignée tourne, l'ensemble complet s'abaissera sur les quatre ressorts de support. La poignée doit être tournée jusqu'à ce que le voyant vert de position d'essai s'éteint pour indiquer que la pression correcte a été appliquée. Veuillez noter la nouvelle lecture du cadran.

Soustraire la lecture d'origine (avec échantillon) puis multipliez cette valeur par 2,5 mm (hauteur de pas de vis) pour obtenir l'épaisseur de l'échantillon testé.

Noter que l'épaisseur des tapis c'est : 83,8 mm

Plaque de polyuréthane :

- Epaisseur de la plaque :

$$92.64 - 83.8 = 8.84 \text{ (Tours)}$$

$$8.84 \times 2,5 = 22.1 \text{ mm}$$

- Epaisseur de la plaque est 22.1mm
- Température de la plaque chaude : 34.7 °C
- Température de la plaque froide : 15.8 °C
- HFM : 5.1 mV
- $T = T_1 + T_2 / 2 = 25.25 \text{ °C}$
- $\Delta T = T_1 - T_2 = 18.9 \text{ °C}$

Appliquant l'équation donnant la conductivité thermique :

$$\lambda = 0.0221 * [(88.1382 + (-2.7829 * 25.25)) + ((-21.3064 + (0.8037 * 25.25)) * 5.1) + ((0.7954 + (-0.0189 * 25.25)) * 5.1^2)] / 18.9$$

$$\lambda = 0.0245 \text{ W/m.°C}$$

Plaque de plumes de dinde avec la pâte de riz :

- Epaisseur de la plaque :

$$86,64 - 83,8 = 2,84 \text{ (Tours)}$$

$$2,84 \times 2,5 = 7,1 \text{ mm}$$

- Epaisseur de la plaque est de 7.1mm
- Température de la plaque chaude : 35.6 °C
- Température de la plaque froide : 16.1 °C

- HFM : 14.2 mV
- $T = T_1 + T_2 / 2 = 25.85 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $\Delta T = T_1 - T_2 = 19.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Appliquant l'équation donnant la conductivité thermique :

$$\lambda = 0.0071 * [(88.1382 + (-2.7829 * 25.85)) + ((-21.3064 + (0.8037 * 25.85)) * 14.2) + ((0.7954 + (-0.0189 * 25.85)) * 14.2^2)] / 19.5$$

$$\lambda = 0.02568 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

Plaque de lavande avec la pâte de riz :

- Epaisseur de la plaque :

$$86.76 - 83.8 = 2.96 \text{ (Tours)}$$

$$2.84 \times 2.5 = 7.4 \text{ mm}$$

- Epaisseur de la plaque est de 7.4 mm
- Température de la plaque chaude : 33.7 °C
- Température de la plaque froide : 16.6 °C
- HFM : 13.5 mV
- $T = T_1 + T_2 / 2 = 25.15 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $\Delta T = T_1 - T_2 = 17.1 \text{ } ^\circ\text{C}$

Appliquant l'équation donnant la conductivité thermique :

$$\lambda = 0.0074 * [(88.1382 + (-2.7829 * 25.15)) + ((-21.3064 + (0.8037 * 25.15)) * 17.1) + ((0.7954 + (-0.0189 * 25.15)) * 17.1^2)] / 17.1$$

$$\lambda = 0.02670 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

Plaque de courge de luffa avec la pâte de la pomme de terre :

- Epaisseur de la plaque :

$$88.70 - 83,8 = 4.9 \text{ (Tours)}$$

$$2,84 \times 2,5 = 12.25 \text{ mm}$$

- Epaisseur de la plaque est de 12.25mm
- Température de la plaque chaude : 30 °C
- Température de la plaque froide : 15.8 °C
- HFM : 7.5 mV
- $T = T_1 + T_2 / 2 = 22.9 \text{ °C}$
- $\Delta T = T_1 - T_2 = 14.2 \text{ °C}$

Appliquant l'équation donnant la conductivité thermique :

$$\lambda = 0.01225 * [(88.1382 + (-2.7829 * 22.9)) + ((-21.3064 + (0.8037 * 22.9)) * 7.5) + ((0.7954 + (-0.0189 * 22.9)) * 7.5^2)] / 14.2$$

$$\lambda = 0.01987 \text{ W/m.°C}$$

Plaque de plume de dinde avec la résine :

- Epaisseur de la plaque :

$$86.02 - 83,8 = 2,22 \text{ (Tours)}$$

$$2,22 \times 2,5 = 5.55 \text{ mm}$$

- Epaisseur de la plaque est de 5.55 mm
- Température de la plaque chaude : 30.2 °C

- Température de la plaque froide : 16.7 °C
- HFM : 11.2 mV
- $T = T_1 + T_2 / 2 = 23.45$ °C
- $\Delta T = T_1 - T_2 = 13.5$ °C

Appliquant l'équation donnant la conductivité thermique :

$$\lambda = 0.00555 * [(88.1382 + (-2.7829 * 23.45)) + ((-21.3064 + (0.8037 * 23.45)) * 11.2) + ((0.7954 + (-0.0189 * 23.45)) * 11.2^2)] / 13.5$$

$$\lambda = 0.015 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

Remarque

Dans les tests effectués dans le but de déduire la conductivité thermique des différentes plaques d'isolants élaborés à l'aide d'un CT mètre, on remarque que la conductivité thermique des plaques obtenus varie entre 0.015 et 0.027 W/m.°C, une conductivité thermique très faible. Ce qui montre que les plaques réalisées peuvent être utilisées comme des isolants efficaces et performants que l'on peut utiliser dans le bâtiment.

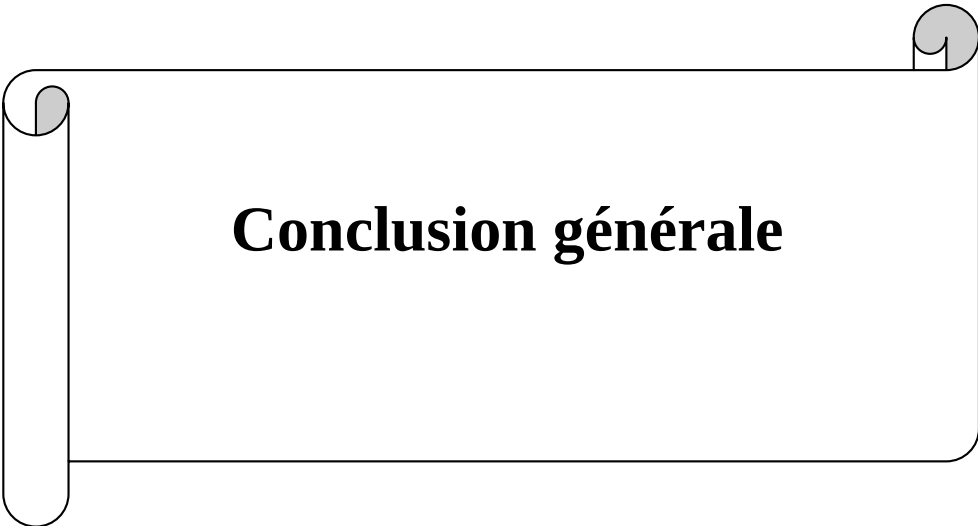
IV.10 Conclusion

Les matériaux biosourcés peuvent être une véritable alternative dans le domaine de l'isolation thermique dans le bâtiment pour remplacer les isolants déjà présents sur le marché (d'origine minérale et synthétique).

Les résultats obtenus dans cette expérience que nous avons effectuée dans le but d'étudier et de réaliser des plaques d'isolants à base des matériaux biosourcés montrent que ces derniers sont efficaces et performants avec une conductivité thermique très faible. Ces matériaux présentent aussi d'autres avantages que l'on ne trouve pas au sein des autres types d'isolants. On peut citer entre autre, la capacité hygrothermique élevée et son comportement au feu ainsi que sa légèreté.

Les plaques élaborées peuvent être optimisées pour réduire leur conductivité thermique, et cela en mettant ces plaques sous vide pour éliminer l'air qui s'y trouve à l'intérieur du matériau.

On constate que dans la nature il y a des matériaux qui se trouvent en abondance et qui peuvent être de véritables d'isolants thermiques, efficaces et performants, et qui peuvent servir d'alternative dans la transition énergétique et relever les défis de ce siècle en matière d'économie d'énergie et préservation des ressources en énergie fossile.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'impact du secteur du bâtiment et de la construction sur l'environnement est considérable, c'est le secteur le plus énergivore, il est également responsable de 25% des émissions de CO₂ en Europe et aux Etats Unis, soit 123 millions de tonnes de CO₂ par an.

Les matériaux utilisés dans le secteur du bâtiment représentent 15 à 20 % de l'empreinte carbone d'un bâtiment, une part qui est possible de réduire grâce à l'utilisation de matériaux biosourcés ou de recyclage. Ils peuvent être des alternatives idéales pour lutter contre le réchauffement climatique et limiter le recours aux ressources qui se font de plus en plus rares.

Dans tous les scénarios de transition énergétique, la sobriété dans les usages individuels et collectifs de l'énergie fait partie du mixe des solutions à mettre en œuvre. L'isolation thermique des bâtiments et plus particulièrement du bâti ancien apparaît alors comme une réponse particulièrement efficace pour réduire les consommations énergétiques, à côté des matériaux traditionnels que sont les laines de verre ou de roche, le polystyrène ou le polyuréthane, les isolants naturels ou biosourcés. Ces derniers sont de plus en plus utilisés (actuellement ils représentent entre 8 à 10% du marché des isolants) dans les parois de bâtiment.

Grace à leurs performances isolantes qui sont équivalents à celles que les isolant classiques, pour obtenir une même résistance thermique, comptez seulement quelques petits centimètres supplémentaires.

Notre travail consiste à étudier et à réaliser de nouveaux matériaux isolants à base de matériaux biosourcés. Aussi, notre travail s'inscrit dans une démarche écologique et de développement durable, qui a pour but de valoriser un déchet kératinique ou une autre ressource disponible.

Pour cela, on a utilisé les fibres de plumes de dinde et d'autres fibres végétales comme la courge de luffa et la lavande, ressources disponibles en abondance dans la nature et en plus renouvelables.

Les plaques de matériaux isolants réalisées sont utilisables pour l'isolation des murs, l'isolation des combles perdus et l'isolation des rampants de toiture.

Les résultats obtenus après les tests de conductivité thermique effectués à l'aide d'un CT Mètre montrent l'efficacité de ces matériaux comme isolants thermiques avec une conductivité thermique qui varie entre 0.015 et 0.027 W/m.°C .

Ces matériaux possèdent d'autres avantages, on peut citer :

- ✓ Bonnes performances thermique et acoustique.
- ✓ Contribution au confort thermique.
- ✓ Bonne régulation de l'humidité.
- ✓ Fumée non toxique en cas d'incendie.

Conclusion générale

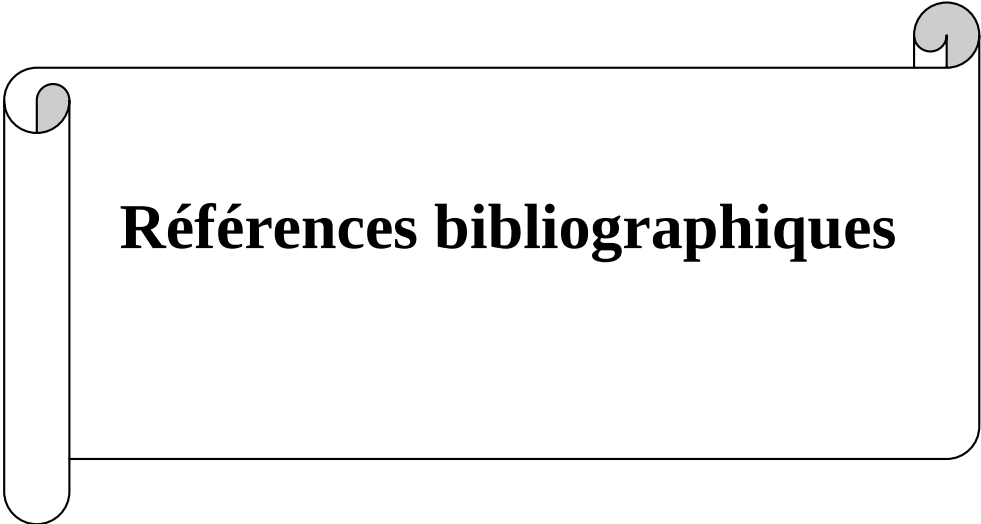
Pour une isolation thermique plus efficace dans le bâtiment en utilisant des matériaux biosourcés, l'amélioration de la résistance thermique de ces matériaux isolants est nécessaire. Cela peut être effectué en augmentant l'épaisseur de l'isolant et le retrait de l'air qui se trouve à l'intérieur des plaques d'isolants en utilisant une pompe à vide. En réduisant les deux modes de transfert de thermique (par convection et par conduction) du fait de la présence du vide, la résistance thermique s'améliore. Plus la résistance thermique du matériau est plus élevée, plus le matériau est isolant. La consommation énergétique dans le bâtiment se voit ainsi diminuer de manière significative et permet par la même occasion une réduction des gaz à effet de serre.

La performance thermique repose sur les phénomènes de transferts de vapeur et de changement de phase dans la paroi. Lorsque le changement de phase a lieu, l'énergie est absorbée ou dégagée par le matériau, ce qui permet d'amortir les variations de température et d'assurer le confort thermique du logement. Tous les isolants ne présentent pas les mêmes avantages en matière d'hydrothermie.

Les études actuellement disponibles démontrent les bonnes performances thermiques des parois intégrant un isolant biosourcé. Avec cet isolant hygrothermique efficace, les performances thermiques sont améliorées de près de 50%. Aussi, le confort thermique intérieur ressenti est amélioré de manière significative par une isolation à partir de matériaux biosourcés, la consommation énergétique globale est diminuée, car moins de chauffage est nécessaire pour assurer le confort thermique.

L'économie dans la consommation énergétique dans le bâtiment, et dans les différents secteurs d'activité est la seule et unique solution pour conserver les ressources fossiles et diminuer la pollution sur terre.

En fonction de la partie du domicile à isoler, les techniques et les matériaux varient. Les gouvernements encouragent les recherches et l'exploitation des matériaux issus du vivant, d'origine animale ou végétale dans les différents secteurs d'activité.



Références bibliographiques

Références Introduction Générale

- [1] <https://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie>.

Références Bibliographique Chapitre I

- [1] J. Poliva. 2001. Les isolants écologiques. Edition Terre Vivante.
- [2] Guide pour une construction Eco-énergétique en Algérie .Connaissance de base, page30-33
- [3] **MOHAMED FILALI**, (2006). These de doctorat, Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures, l'institut national polytechnique de Toulouse.
- [4] **E.Coment**, (2001). Contribution a la mise au point de techniques de mesures de propriétés thermophysiques par sondes à chocs, thèse de doctorat école supérieure d'arts et métiers.
- [5] **B.Martin**, **J.F.Durastanti**, **B.Peureux**, (1994). Méthode d'identification de la conductivité thermique des matériaux isolants, Entropie, vol 147, pp 47-52.
- [6] **Slimane MELKA**, (1996). Etude théorique et expérimentale des transferts thermiques dans les milieux poreux granulaires pour l'isolation thermique, These de doctorat, Ecole des mines de Paris.
- [7] <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=127178&demande=desc>.
- [8] <https://www.qualitel.org/particuliers/isolation/techniques-isolation/>.

Références Bibliographique Pour Chapitre II :

- [1] Label bâtiment biosourcé. Arrêté du 19 Avril 2012, art.1 (J.O.R.F 23 Décembre 2012) [en ligne], consulté le : 29 Mars 2020
- [2] Laure Mahous (s.d) Les matériaux biosourcés : un potentiel pour de nouveaux enjeux?. PDF [en ligne], consulté le: 01 Avril 2020. In :

<https://www.alec37.org/sites/default/files/ged/Techniques%20Collectivit%C3%A9s%2037%20n%C2%B014.pdf> .

[3] Y. HUSTACHE Les matériaux biosourcés.(s.d) KARIBATI [en ligne].Consulté le : 05 Avril 2020. In :<http://www.karibati.fr/materiaux-biosources/presentation/>.

[4] Une grande école qui forme des ingénieurs technologues pour l'industrie en France qui est soutenue par une agence novatrice dans la construction éco-durable (Campus de Cluny et Bio Buildt Concept), par l'ADEME qui est une agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie en France, par l'Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies d'Ile de France et par la DHUP qui est la direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages en France.

[5] <https://www.linkedin.com/pulse/de-la-chimie-verte-%C3%A0-bleue->

[6] BOYEUX B, (2016), Les matériaux de construction biosourcés. Fiche technique, consulté le:01Avril2020.In
:https://www.ifdd.francophonie.org/wpcontent/uploads/2019/12/702_FichePrismeATP4_Materiaux_Construction_Biosources-4.pdf

[7] Ministère de la Transition écologique et Solidaire (10 juillet 2017), « Les matériaux biosourcés dans la construction », vidéo YouTube, consulté le:29Avril2020.
<https://www.youtube.com/watch?v=WGmRHmHNdz4>

[8] <http://www.enviroboite.net/materiaux-biosources-et-analyse-du-cycle-de-vie>

[9] ADEME (s.d). MOOC Bâtiment Durable [En ligne]. Consulté le : 29 Avril 2020. In :

[10] Collège national des experts architectes français : C N E A F 163^{ème} TABLE RONDE
NATIONAL TECHNIQUE ET JURIDIQUE : Les Matériaux Biosourcés p4-p6

Références Bibliographique Pour Chapitre III :

[1] Abdoulaye SEYNI « Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage ».Thèse de Doctorat, l'université de Toulouse. 2008

- [2] Khalid RBII « Formation d'agrégats de hauts poids moléculaires dans la gélatine et comportement en solution aqueuse »Thèse de doctorat, université de Toulouse, p 17. 2010
- [3] Thorsten Dbenfeld « Etude de complexes protéiques non covalents par spectrométrie de masse FT-ICR ».Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique, pp 12-23. 2006.
- [4] Christian BIJANI, « Les lipoamino acides : des vecteurs d'absorption pour l'administration transmembranaire de biomolécules ». Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux1, pp 13-21. 2010.
- [5] Doris Tintar « Sciences et Génie des Matériaux « Etude de la dynamique de chaîne des protéines de la matrice extracellulaire par spectroscopies mécanique et diélectrique » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III.
- [6] JACQUES Christophe « Etude de la valorisation des déchets d'origines kératiniques par voie thermo-mécano-chimique en vue de l'obtention de filament continu : cas spécifique de la laine »Thèse de Doctorat, Université de Toulouse. P 15-30,184, 198. 2003.
- [7] Frédérique Salpin «Laine et Colorants : fixation, quantification et vieillissement. Etude par spectrométrie Raman». Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie P 7-16. 2008.
- [8] Jillian G. Rouse and Mark E. Van Dyke «A Review of Keratin-Based Biomaterials for Biomedical Applications». Université de Wake Forest, Winston-Salem, North Carolina, pp 1001,1003. 2010
- [9] Jeanette M. Cardamone, Alberto N, Rafael A. Garcia, andMila Aldema-Ramos «Characterizing Wool Keratin » Fats, Oils, and Animal Coproducts Research Unit, Wool Research, USDA ARS Eastern Regional Research Center,USDA ARS, 2009
- [10]Xiuling Fan. «Value added products from chicken feather fibers and protein. » Thèse de Doctorat, université de Auburn. pp 4-7. 2008.
- [11]Toshihiro Fujii, Daguang Li «Preparation and properties of protein films and particles from chicken feather». Université, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567, Japan .2008.
- [12]Xin J. H., K. Cheuk, and K. Qi† Walid A. Daoud, S. K. Leung, W. S. Tung, «Self-Cleaning Keratins » Université de la chine, p1. 2008.
- [13]Manoj A. Lazar, Jalil K. Tadvani, Wing Sze Tung, Lorena Lopez, Walid A. Daoud «Nanostructured thin films as functional coatings». Université de Australia, P2. 2009

- [14] Jinbo Yao, Ph. D., Yanbo Liu, Ph. D., Suoting Yang, Jianzhong Liu «Characterization of Secondary Structure Transformation of Stretched and Slenderized Wool Fibers with FTIR Spectra». Université de Tianjin, Chine.
- [15] Alibardi L, (2003). Adaptation to the land : The skin of reptiles in comparison to that of amphibians and endotherm amniotes. J. Exp. Zool. Part. B. Mol.Dev. Evol.298, 12-41.
- [16] Barba M. Martí A. Roddick-Lanzilotta A. Manich J. Carilla J. L. Parra L. Coderch «Effect of wool keratin proteins and peptides on hair water sorption kinetics»,2010
- [17] Maria Antoaneta Baias «Science and History Explored by Nuclear Magnetic Resonance».These de Doctorat , université de berichter, p 27. 2009
- [18] DJEFEL Dihia ,élaboration et étude d'un nouveau composite à fibres d'origine animale et à matrice organique ,mémoire de fin d'études ,faculté du génie de la construction, département génie mécanique, université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou ,p 45-54 , 2011.
- [19] BOUMAD Souad ,valorisation de la luffa brute et modifiées dans la rétention des colorants organique , mémoire fin d'études, faculté de technologie, département de génie des procédés ,université SAAD Dahleb Blida 01 ,p 8-16 ,2015 .
- [20] <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01304457/document>
- [21] <https://www.mon-isolation.pro/paille-de-lavande-isolation-exterieure>

Références Bibliographique Chapitre IV

- [1] 10571-la-grande-muraille-de-chine-plus-de-20-siecle-construction, ENSPS.
- Hélène HORSIN MOLINARO-XAVIER JOURRDAIN SYLVAIN LANGLOIS
- Édité le 18/01/2019. Page 19-20.
- [2] <https://www.metaltop.fr/content/457-definition-resine-acrylique>.