

République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement  
Technologique-Skikda



Département de Technologie  
Filière : Génie Mécanique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'enseignement du secondaire

### Option

Génie mécanique

### Thème

## Etude du comportement vibratoire d'un matériau composite

Présenté par :

Sakeur aya.

Bousslama aya.

Sous la direction du Dr. Saaidia Aziz

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Rôle
Laadaci Naouri	MCB	ENSET- Skikda	Président
Issasfa Brahim	MCB	ENSET- Skikda	Examineur
Saaidia Aziz	MCA	ENSET- Skikda	Encadreur

Année Universitaire : 2023/2024

## REMERCIEMENTS

**Tout d'abord nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous avons donné la volonté et le courage ce modeste travail.**

**Nous remercions vivement, Monsieur Aziz Saidia pour avoir assuré la direction de ce travail, et pour nous avoir apporté rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement.**

**Nos remerciements s'adressent également au Pr. Nouredine OUELAA, directeur du Laboratoire de Mécanique et structure (LMS) pour les facilités offertes dans le cadre du laboratoire et sa participation active à la réalisation de la partie expérimentale de ce travail.**

**Nous remercions également monsieur le président de jury Laadaci Naouri et l'examineur Monsieur Issasfa Brahim d'avoir acceptés d'examiner notre travail.**

**Nous remercions les enseignants de l'école Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda, et en particulier les enseignants de département de technologie.**

**Nous remercions chaleureusement toutes nos familles et particulièrement nos parents pour leur soutien et leurs encouragements.**

**Nos vifs remerciements s'adressent également à toute personne qui a contribué à notre formation ou participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.**

## *Dédicaces*

*{وما توفيقى إلا بالله}*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents qui m'ont permis d'être ce que je suis.*

*Tous mes chers frères ;*

*« Amir, Ayoub, Oussama, Adem »*

*Tous ma famille BOUORAMA et ZAOUI.*

*A ma binôme « APA », qui est devenue une amie chère et une collaboratrice talentueuse, merci pour  
notre collaboration fructueuse et notre amitié.*

*Toutes mes amies « Imane, Maroua, Asma, Alem ».*

*A toute personne m'ayant encouragé ou aidé au long de mes études.*

*B.aya*

## *Dédicace*

{وأخر دعوانهم أن الحمد لله رب العالمين}

*Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie.*

*À mon paradis ,à la prunelle de mes yeux à la source de ma joie et mon bonheur, ma moitié. Ce qui m'a soutenu toute ma vie . Je te remercie pour tout l'amour et le soutien que tu m'avais apportés tout au long de ma vie.*

### *Ma mère « FATMA »*

*À mon soutien dans ce monde, chaque mot semble bien faire pour exprimer l'amour profond et la gratitude infinie que j'ai pour toi, pour les innombrables sacrifices que tu as consentis pour mon éducation. Tu as été mon modèle d'honnêteté, de sérieux et de responsabilité. Ta présence incarne pour moi la quintessence de la persévérance. De la créativité et du dévouement sans borne.*

### *Mon père « ALI »*

*À mon chère frère « Houssein » et mes chères sœurs « Hour-Elhouda et Hadil »*

*Je dédie ce travail en reconnaissance de vos encouragements et de votre soutien tout au long de mes études. Votre présence et votre aide m'ont été précieuses à chaque étape de ce parcours.*

*Que Allah vous protège et vous offre la chance et le bonheur.*

### *À mes anges « Libane et Layane »*

*A ma binôme « AFA », qui est devenue une amie chère et une collaboratrice talentueuse, merci pour notre collaboration fructueuse et notre amitié.*

*À mon amie d'enfance qui m'a soutenu tout au long de mon parcours universitaire. A ma chère*

*« AFA »*

*A mes amis*

*Chaque moment passé avec vous est un trésor dont je suis reconnaissante. Merci d'être toujours là.*

SAFA

## **Résumé :**

Ce projet est concentré sur une étude expérimentale visant à analyser les modes de vibration d'un composite sandwich élaboré à partir de fibre de lin pour le renfort et de liège pour l'âme du sandwich. L'étude est aussi menée pour le renfort, l'âme et la peau en résine. L'objectif est de mesurer la réponse des structures en des points spécifiques, depuis l'extrémité libre jusqu'à proximité de la position de l'appareil de mesure dans le cas "encastré-encastré", et de mesurer à l'une des extrémités encastrées dans le cas "encastré-libre" lorsque celle-ci sont soumise à une excitation. la mesure de la réponse de les structures sont effectuées à l'aide d'un accéléromètre. Lesvaleurs des fréquences et les amortissements sont extraites à l'aide d'un logiciel qui s'appelé ME scope.

**Mots clés :** Composite sandwich, lin, liège, résine époxy, Analyse vibratoire.

**Abstract:**

This project focuses on an experimental study to analyze the vibration modes of a sandwich composite made from flax fiber for the reinforcement and cork for the sandwich core. The study also covers the reinforcement, the core and the resin skin. The aim is to measure the response of the structures at specific points, from the free end to close to the position of the measuring device in the “embedded-recessed” case, and to measure at one of the embedded ends in the “embedded-free” case when these are subjected to excitation. The response of the structures is measured using an accelerometer. The frequency values and damping are extracted using software called ME scope.

**Key Words:** Sandwich composite, linen, cork, epoxy resin, Vibration analysis.

## ملخص:

يركز هذا المشروع على دراسة تجريبية لتحليل أوضاع الاهتزاز لمركب 'سندويتش' مصنوع من ألياف الكتان للتقوية والفلين لقلب الساندويتش. يتم إجراء الدراسة أيضاً على التقوية واللب والجلد الراتنجي. والهدف من ذلك هو قياس استجابة الهياكل عند نقاط محددة، من الطرف الحر إلى قريب من موضع جهاز القياس في حالة "الدمج-الحر"، والقياس عند أحد الأطراف المدمجة في حالة "الدمجة-الدمجة" عند تعرضه للإثارة، ويتم قياس استجابة الهياكل باستخدام مقياس تسارع، ويتم استخراج قيم التردد والتخميد باستخدام برنامج يسمى ME scope.

**الكلمات المفتاحية:** مركب الساندويتش، الكتان، الفلين، راتنج الإيبوكسي ، تحليل الاهتزازات

# Sommaire du mémoire

Liste des figures

Tableaux des figures

Nomenclature

**Introduction générale**.....01

## **Chapitre I : Etude Bibliographique**

I.1 Introduction.....02

I.2 Définition d'un matériau composite.....02

I.3 Les constituants des matériaux composites.....02

I.4 L'architecture des matériaux composites .....03

I.4.1 Les composites à charges ponctuelles .....03

I.4.2 Les composites à fibres courtes .....03

I.4.3 Les composites stratifiés .....03

I.4.4 Les structures sandwiches .....04

I.4.4.1-Âmes .....04

I.4.4.2 -Les Peaux .....06

I.4.4.3 –Adhésifs .....06

I.5 Différentes Fibres Naturelles .....06

I.6 Présentations de quelques fibres végétales .....07

I.6.1 Jute.....07

I.6.2 Le chanvre .....08

I.6.3 Lin .....08

I.6.4 Abaca .....09

I.6.5Coton .....09

I.7 Composition Chimique des fibres végétales .....10

I.8 Extraction de la fibre.....10

I.9 Structure de la fibre végétale .....11

I.10 Propriétés physiques et textiles .....	12
I.11 Caractéristiques.....	12
I.12 La matrice.....	12
a) Résines thermodurcissables.....	13
b) Les résines époxydes.....	14
c ) Résines thermoplastiques .....	15
d) Résines thermostables .....	16
I.13 Les modes de production des composites .....	16
I.13.1 moulage en contact .....	16
I.13.2 Pulvériser .....	17
I.13.3 Moulage par transfert de résine .....	17
I.13.4 Infusion de résine .....	17
I.13.5 Injection.....	18
I.14 Les endommagements et les limites des composites .....	18
I.14.1 Le contact.....	18
a) La rupture des fibres.....	18
b) Dégradations physiques suite à des sollicitations non parallèles aux fibres.....	19
c) Endommagements au niveau des fibres.....	19
I.14.2 Endommagements au niveau des plis.....	20
I.14.3 Le manque de résine .....	21
I.15 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites .....	21
I.15.1 Avantage des matériaux composites .....	21
I.15.2 Inconvénients des matériaux composites .....	21

I.16 Utilisation des matériaux composites.....	22
I.17 Caractérisation des matériaux composites.....	22
• Analyse thermogravimétrique (TGA).....	22
• Analyse thermique différentielle (ATD).....	23
• Analyse mécanique dynamique (DMA).....	24
I.18 Caractérisation des composites en statique .....	24
I.19 Caractérisation des composites en fatigue.....	25
I.20 L'analyse de l'endommagement .....	26
I.21 Comportement en vibration des composites .....	28
I.21.1 L'amortissement en vibration .....	29
• Types d'amortissement.....	29
• Analyse de l'amortissement.....	29
I.21.2 Analyse vibratoire .....	29
I.21.2.1 Notion de base .....	29
I.21.2.1.1 Définition d'une vibration .....	29
I.21.2.1.2 Caractéristique d'un vibration .....	30
I.21.2.1.2.a L'Amplitude .....	30
I.21.2.1.2.b La fréquence .....	30
I.21.2.1.2.c Types des vibrations .....	30
✓ Vibrations forcées .....	30
✓ Vibrations auto excitées .....	31
I.21.3 Méthodes utilisées dans la littérature pour évaluer les amortissements modaux .....	31
I.21.3.1 Méthode du décrétement logarithmique.....	31
I.21.3.2 Méthode énergétique .....	32
I.21.3.3 Méthode du facteur d'amplification .....	32
I.21.3.4 Méthode 3dB.....	32
I.22 Mesure de l'amortissement à partir des vibrations d'une poutre .....	33

Conclusion.....	34
-----------------	----

## **Chapitre II : Matériel et Protocole**

II.1 Introduction .....	35
II.2 Présentation de la fibre de lin .....	35
II.2.1 La fibre de lin .....	35
II.2.2 La résine .....	35
II.2.3 Le liège .....	36
II.2.4 Elaboration des bio composites .....	36
II.2.5 Découpage des éprouvettes.....	37
II.3 Support de maintien des éprouvettes .....	38
II.3.1 Plateforme ou base du support .....	38
II.3.2 Appuis de maintien des éprouvettes .....	39
a) Appuis d'encastements.....	39
b) Appuis simples .....	39
c) Support final .....	39
II.4 Essais de vibration .....	40
a) Système de contrôle et de mesure .....	40
b) Analyseur Pulse B&K.....	41
c) Accéléromètre .....	42
d) Le marteau d'impact .....	42
II.5 Essais de vibration .....	43
II.6 Protocole expérimental .....	43
a) Montage encasté-encasté.....	43
b) Montage encasté-libre.....	44

## **Chapitre III : Résultats et discussion**

III.1 Introduction .....	45
III.2 Méthode d'analyse des résultats expérimentaux.....	46
III.3 Analyse et discussion des résultats .....	46

III.3.1 Comportement vibratoire du composite Lin/Epoxy .....	46
III.3.2 Comportement vibratoire du sandwich .....	51
III.3.3 Influence de la nature de la structure sur le mode vibratoire .....	52
III.4	
Conclusion .....	54

## Liste de Figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : Matrice et renfort d'un matériau composite.....	03
<b>Figure I.2</b> : Architectures courantes de matériaux composites .....	03
<b>Figure I.3</b> ; sandwich typique.....	04
<b>Figure I.4</b> : Différents types de l'âme, a) âme plein, b) âme creuse.....	05
<b>Figure I.5</b> : Différentes fibres naturelles : animales, végétales et minérales.....	07
<b>Figure I.6</b> : Fibre de jute.....	07
<b>Figure I.7</b> : Plante du chanvre.....	08
<b>Figure I.8</b> : Plante du lin.....	08
<b>Figure I.9</b> : Fibre des feuilles d'abaca.....	09
<b>Figure I.10</b> : Plante du Coton.....	09
<b>Figure I.11</b> :Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales.....	11
<b>Figure I.12</b> : Structure de la fibre végétale.....	11
<b>Figure I.13</b> : Différents types de matrices utilisées dans les composites.....	13
<b>Figure I.14</b> :Les thermodurcissable.....	14
<b>Figure I.15</b> : Les thermoplastiques.....	15
<b>Figure I.16</b> : Moulage au contact.....	16
<b>Figure I.17</b> :Moulage par transfert de résine.....	17
<b>Figure I.18</b> : Schéma du moulage par injection.....	18
<b>Figure I.19</b> : a)Rupture fibre en traction, b)Rupture fibre en compression.....	19
<b>Figure I.20</b> : Décohésion entre la fibre et la matrice.....	19
<b>Figure I.21</b> : Endommagements au plis.....	20
<b>Figure I.22</b> : Délaminage.....	20
<b>Figure I.23</b> : Le manque de résine.....	21
<b>Figure I.24</b> : Application des matériaux compositesà base de fibres naturelles.....	22
<b>Figure I.25</b> : Thermographe de la laine végétale L3 équilibre hygrothermique avec l'ambiance de la pièce (75 % - 20 °).....	23
<b>Figure I.26</b> : Pic ATD d'une réaction endothermique .....	23
<b>Figure I.27</b> : Analyse mécanique dynamique (DMA).....	24
<b>Figure I.28</b> : Machine d'essai de flexion.....	24
<b>Figure I.29</b> :Charge sinusoïdale pour les essais de fatigue.....	25
<b>Figure I.30</b> :Exemple de courbe de WÖHLER .....	26

<b>Figure I.31</b> : Courbe typique de dégradation de la rigidité pour une large gamme de Matériaux composites renforcés par des fibres.....	27
<b>Figure I.32</b> : Décroissance de la réponse d'un système pseudopériodique.....	31
<b>Figure I.33</b> : Méthode de détermination de l'amortissement à -3dB.....	33
<b>Chapitre II</b>	
<b>Figure II.1</b> : a) Plante de lin et b) Fibre de lin .....	35
<b>Figure II.2</b> : a) Résine et b) Durcisseur.....	36
<b>Figure II.3</b> : Plaque en liège.....	36
<b>Figure II.4</b> : Elaboration d'une plaque sandwich.....	37
<b>Figure II.5</b> : Éprouvettes obtenues après découpage .....	37
<b>Figure II.6</b> : Usinage de la plateforme .....	38
<b>Figure II.7</b> : a) Appui d'encastremets et b) perçage des trous.....	39
<b>Figure II.8</b> : Appuis simples .....	39
<b>Figure II.9</b> :Support de maintien avec appuis.....	40
<b>Figure II.10</b> : Banc d'essai de vibration .....	40
<b>Figure II.11</b> : Logiciel d'acquisition pulse.....	41
<b>Figure II.12</b> : Analyseur FFT.....	42
<b>Figure II.13</b> : Accéléromètre.....	42
<b>Figure II.14</b> : Marteau de choc.....	42
<b>Figure II.15</b> : Analyse vibratoire en montageencastéré-encastéré.....	44
<b>Figure II.16</b> : Analyse vibratoire en montageencastéré-libre.....	44
<b>Chapitre III</b>	
<b>Figure III.1</b> : Méthode de la bande passante,a) exemple typique d'un FRFet b) mesure à (-3dB).....	45
<b>Figure III.2</b> :Positions des points d'impact et de mesure sur une poutre.....	46
<b>Figure III.3</b> :Poutre enrésine excité « encastéré-encastéré »a) spectres de réponse et b)accélérations moyenne.....	47
<b>Figure III.4</b> :Propriétés dynamique de la résine « encastéré-encastéré ».....	48
<b>Figure III.5</b> :Résine excité « encastéré-libre »,a) spectres de réponse etb)accélérations Moyenne.....	48
<b>Figure III.6</b> :Propriétés dynamique de la résine « encastéré-libre ».....	49
<b>Figure III.7</b> :Lin/époxy excité « encastéré-encastéré ».....	50

<b>Figure III.8 :</b> Propriétés dynamique du Lin/époxy « encastré-encastré ».....	50
<b>Figure III.9 :</b> Sandwich excité « encastré-encastré ».....	51
<b>Figure III.10 :</b> Propriétés dynamique du Lin/époxy/Liège « encastré-encastré ».....	52
<b>Figure III.11 :</b> Sandwich excité « encastré-libre ».....	52
<b>Figure III.12 :</b> Variation de la fréquence de réponse pour les différents matériaux en configuration « encastré -encastré ».....	53
<b>Figure III.13 :</b> Variation du facteur d'amortissement pour les différent matériaux en configuration « encastré-libre ».....	54

## Liste des Tableaux :

<b>Tableau I.1</b> : Fractions massiques des constituants de différentes fibres végétales .....	10
<b>Tableau I.2</b> : Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	14
<b>Tableau II.1</b> : Dimensions des éprouvettes de traction selon la norme ASTM D 5083.....	38
<b>Tableau III.1</b> : Modes de vibration de la poutre en résine excité « encastré-encastré ».....	48
<b>Tableau III.2</b> : Modes de vibration de la poutre en résine excité « encastré-libre ».....	50
<b>Tableau III.3</b> : Modes de vibration de la poutre Lin/époxy excitée « encastré-encastré »....	51
<b>Tableau III.4</b> : Modes de vibration de la poutre sandwich excitée « encastré-encastré »....	52
<b>Tableau III.5</b> : Mode de vibration de la poutre sandwich excité « encastré-libre ».....	53
<b>Tableau III.6</b> : Fréquences propres des différents matériaux en configuration « encastré-encastré ».....	54
<b>Tableau III.7</b> : Amortissements des différents matériaux en configuration « encastré-encastré ».....	55

## Nomenclature :

$\eta_i$  : le facteur de perte.

$\delta$  : le décrement logarithmique.

Q : le facteur d'amplification dynamique.

$f_r$  : la fréquence de résonance.

U<sub>i</sub> : l'énergie élastique emmagasinée.

FRF : la Fonction de Réponse en Fréquence.

$\zeta$  : Coefficient d'amortissement modal.

# Introduction générale

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés, notamment dans différentes industries (automobile, transports, bâtiment et les travaux publics, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux), où ils offrent de nombreux avantages.

L'avantage principal qu'offrent ces matériaux pour l'industrie est leur faible poids pour d'excellentes qualités mécaniques.

La connaissance des propriétés de ces matériaux est indispensable à la conception, le dimensionnement et l'optimisation des systèmes mécaniques. De plus, ces propriétés offrent des indicateurs potentiels sur l'état du matériau en particulier son endommagement pendant toute sa durée de vie. La compréhension et l'étude du comportement vibratoire des systèmes se basent classiquement sur des approches mêlant essais expérimentaux, modélisation et simulation.

Cette étude s'intéresse à l'élaboration d'un matériau composite sandwich lin/époxy/liège, ainsi que son analyse vibratoire.

Le mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet d'une analyse bibliographique sur les matériaux composites, leurs composantes ainsi que les matériaux sandwichs et leurs constituants. Le comportement en statique, en fatigue cyclique et en vibration des matériaux composites stratifiés ainsi que les structures sandwichs sont exposés.

Le deuxième chapitre présente une étude expérimentale, le matériel et les techniques adoptées, le procédé de fabrication du matériau de l'étude et le support de maintien des éprouvettes à testées pour le déroulement des tests de vibration.

Le troisième chapitre expose les résultats du comportement vibratoire du matériau sandwich et leur constituant. Des essais d'analyse modale ont été menés dans deux configurations encasté/encasté et encasté/libre pour des poutres en résine pure, en liège, en composite stratifié et en sandwich. L'évolution des propriétés dynamiques ainsi que du facteur de perte en fonction de la fréquence est étudiée.

# **Chapitre I**

## **Recherche bibliographique**

### **I.1 Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude bibliographique sur les matériaux composites et leurs éléments constitutants (matrices, renfort) et les matériaux sandwichs et leurs constitutants.

De nos jours, plusieurs fibres naturelles qui ont déjà fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dirigés par des chercheurs ou des industriels pour mieux perfectionner ce domaine, vu leurs intérêts écologiques, économiques et mécaniques dans les différents domaines industriels, tels que l'industrie d'automobile... etc.

Nous allons donner aussi les modes de production des composites, les endommagements des composites et les vibrations qui peuvent être engendrées.

### **I.2 Définition d'un matériau composite:**

Un matériau composite c'est l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complètent et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

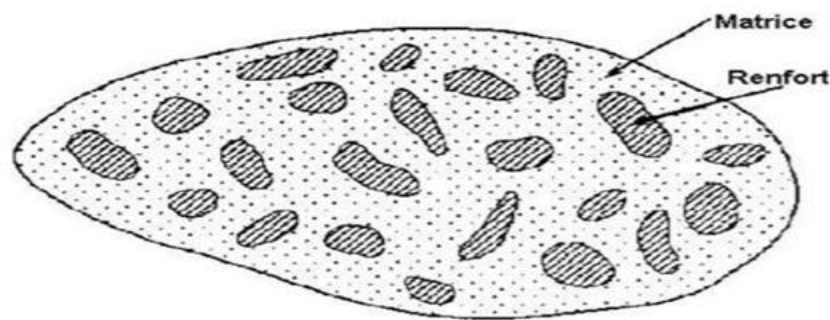
Un matériau composite constitué d'une matrice et d'un renfort constitué de fibres. La matrice est-elle même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine-charge se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [1].

### **I.3 Les constituants des matériaux composites :**

Les matériaux composites sont constitués principalement : (figure I.1)

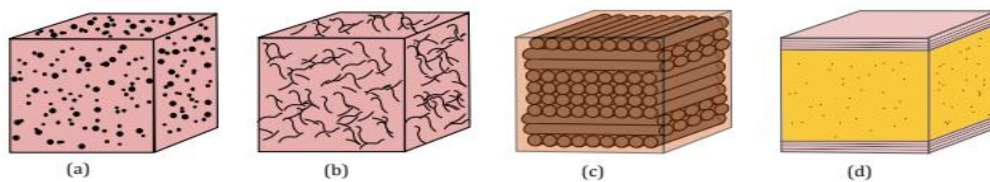
- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D'un renfort.
- D'une interface.



**Figure I.1 :** Matrice et renfort d'un matériau composite [1].

#### I.4 L'architecture des matériaux composites :

Selon le type de renforts et de matrices choisis, il est possible d'élaborer différentes architectures de composites aux performances très différentes et/ou de renforcer des orientations privilégiées en jouant sur l'orientation des fibres. (figure I.2)



**Figure I.2 :** Architectures courantes de matériaux composites: a) composite chargé, b) composite fibres courtes, c) composite stratifié à plis unidirectionnels et d) structure sandwich [2].

##### I.4.1 Les composites à charges ponctuelles :

Les charges et additifs ne sont pas réellement destinés à fournir de la résistance. Ils servent généralement à améliorer l'adhésion fibres-matrice ou à conférer au matériau composite des propriétés particulières (pigments de couleur, protecteurs UV...).

##### I.4.2 Les composites à fibres courtes :

Les matériaux composites à matrice polymère renforcées par des fibres synthétiques (verre, carbone, aramide) sont utilisés depuis de nombreuses années pour de multiples applications, notamment par l'industrie des transports. Leurs très bonnes propriétés spécifiques (rigidité et résistance rapportées à la masse) favorisent en effet l'allègement des structures, une problématique majeure dans le paysage industriel actuel. Parmi les matériaux composites, les structures sandwich composées d'une âme légère intercalée entre deux peaux rigides et résistantes possèdent des propriétés spécifiques en flexion extrêmement

intéressantes. Ces matériaux très utilisés peuvent aussi posséder d'autres fonctionnalités, telles que l'isolation thermique, l'amortissement des vibrations ou encore la protection contre les chocs.

### I.4.3 Les composites stratifiés :

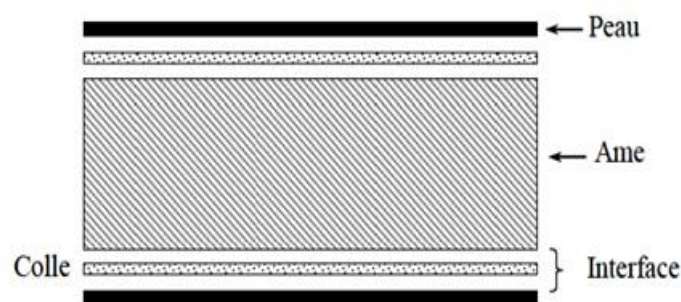
Un composite stratifié est un agencement de plusieurs couches les unes sur les autres, éventuellement avec des orientations différentes. On peut donc amplifier différentes directions en changeant l'ordre d'empilement. Des matériaux multidirectionnels peuvent être utilisés pour former des couches élémentaires, mais les stratifiés à couches unidirectionnelles présentent les propriétés mécaniques les plus élevées avec une teneur en fibres supérieure à 50 %. Les composites stratifiés sont largement utilisés pour fabriquer des pièces structurales [2].

### I.4.4 Les structures sandwiches :

Une plaque sandwich typique est représentée sur la (figure. I.2) est constitué :

- De deux peaux fines.
- D'une âme ou cœur.

Ces différentes couches sont liées par un film de colle cette liaison est couramment appelée l'interface [3].



**Figure I.3 :** Sandwich typique [3].

#### I.4.4.1-Âmes :

Le rôle principal de l'âme dans le matériau sandwich est de résister aux efforts de cisaillement. Par ailleurs, l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement. Dans les faits, c'est le constituant de l'âme qui permet de classer les différentes structures en matériau sandwich. Parmi les âmes les plus utilisées, citons celles en mousse, en nid d'abeilles et en bois de balsa. (figure I.4).

– **Les mousses**: ce sont les plus fréquemment utilisées, elles sont produites à partir de polychlorure de vinyle, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Elles sont thermo formables et permettent donc de réaliser des pièces de formes complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes, elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau. Néanmoins, leur point faible réside dans une faible résistance à l'impact.

– **Le bois** : il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. Le bois le plus utilisé comme matériau d'âme est le balsa. Les âmes en balsa ont été utilisées pour la première fois dans les années 1940 sur des hydravions. Le bois de balsa est aussi un isolant thermique mais pour conserver cette propriété, il doit être traité avec un produit hydrofuge puisqu'il est très hygroscopique.

– **Le nid d'abeilles** : l'âme en nid d'abeilles, connue sous le nom «Nida », est un matériau structural souple constitué de mailles hexagonales. Elle est réalisée à partir de différents matériaux comme par exemple le papier ou l'aluminium. Le Nida étant une structure anisotrope, ses propriétés varient selon le sens transversal ou longitudinal des alvéoles (taille de mailles). De plus, la taille de celles-ci, l'épaisseur des parois du Nida et la méthode de mise en œuvre sont des paramètres qui influencent la résistance au cisaillement transversal et longitudinal du Nida. Les variétés les plus courantes sont le Nomex et le Korex et sont fabriquées à partir du Kevlar[4].

La figure I.4 présente plusieurs types de l'âme.

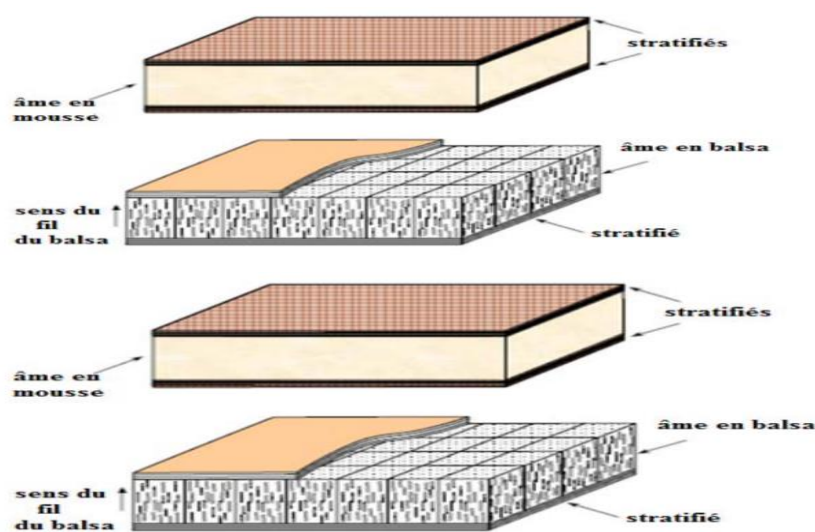


Figure I.4 : Différents types de l'âme, a) âme plein, b) âme creuse [5].

–**Le liège** : Le liège est un matériau naturel, renouvelable et durable qui a été utilisé depuis de nombreux siècles. Le liège est l'écorce du chêne (*Quercus suber* L) qui se récolte généralement tous les 9-12 ans, en fonction de la région de culture. *Quercus suber* L, est le nom botanique d'une croissance lente, le chêne à feuilles persistantes, qui ne s'épanouit que dans des régions spécifiques de la méditerranée occidentale. Cet arbre nécessite beaucoup de soleil et une combinaison très inhabituelle de faibles précipitations et de taux d'humidité relativement [6].

**I.4.4.2-Les Peaux** : Les peaux des sandwichs sont généralement constituées de fibres (mat ou tissu) enrobées d'une matrice à base de résine. Il existe plusieurs types des fibres parmi lesquelles on trouve : Les fibres de verre, Les fibres de Kevlar ou aramide, Les fibres de carbone...[4].

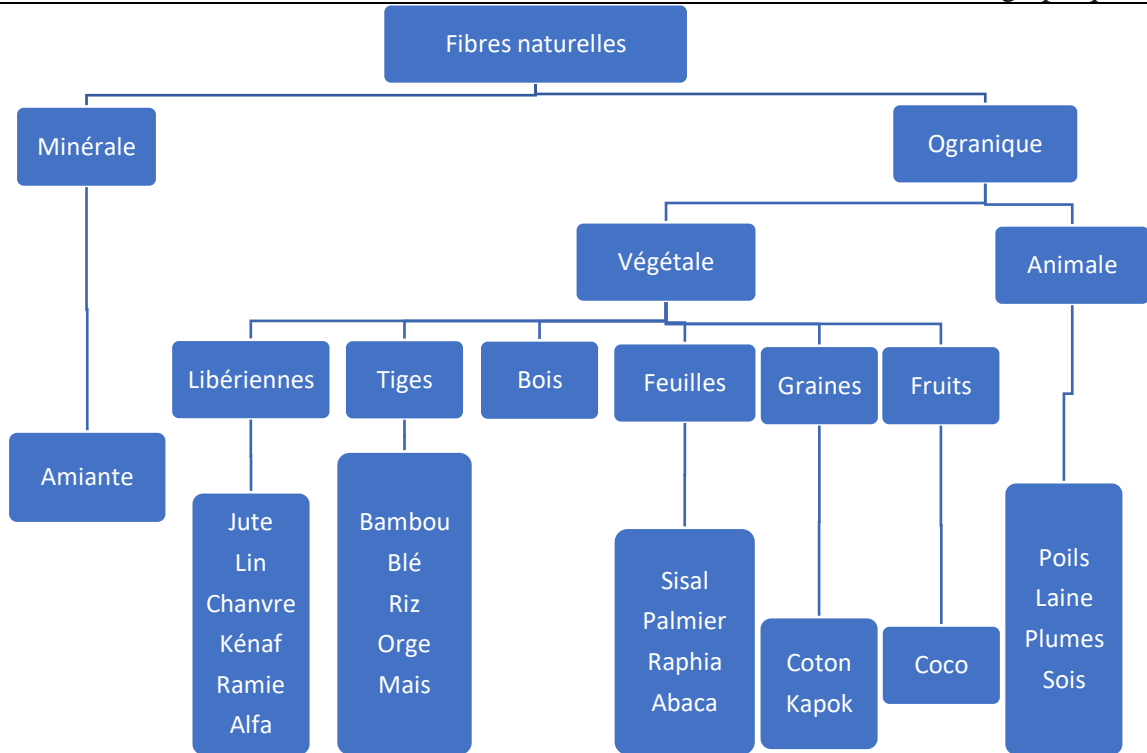
**I.4.4.3 –Adhésifs** : L'assemblage des peaux et de l'âme est réalisé par collage. Les adhésifs ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et à l'âme et de les protéger de l'environnement extérieur. Les adhésifs sont généralement des résines. Il existe différents types des résines : Les résines à base de polyester, les résines à base vinyle sers, les résines époxydes [4].

## **I.5 Différentes Fibres Naturelles :**

Les fibres naturelles sont classées en fonction de leur source : minerais, plantes ou animaux (figure I.5). La cellulose est le composant principal de toutes les fibres végétales, tandis que les fibres animales, telles que les cheveux, les plumes, les soies et la laine, sont constituées de protéines. Les fibres de plantes comprennent les graines, les fruits, le bois, les pailles, les fibres de filasses ou dures et autres fibres herbes.

Les principales catégories de fibres végétales comprennent :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute, kénaf, ramie...);
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier ;
- Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok .
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco .
- Fibres des tiges ou des troncs : paille de blé, de rizou autres cultures comme le bambou[7].



**Figure I.5:** Différentes fibres naturelles : animales, végétales et minérales [7].

## I.6 Présentations de quelques fibres végétales :

### I.6.1 Jute :

Extraite de la tige de plantes appartenant aux genres *Corchorus capsularis* et *Colitorius*, le jute est une fibre naturelle très résistante ; il arrive en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et d'utilisations. La fibre de jute est utilisée pour fabriquer des sacs d'emballage et de transport et fournit des moyens de subsistance à des millions de petits agriculteurs [8]. (Figure I.6 )



**Figure I.6 :** Fibre de jute [8].

**I.6.2 Le chanvre :**

Une fibre utilisée dans la fabrication de vêtements, de cordes et de papier. De plus en plus, cette fibre extrêmement résistante est utilisée dans la fabrication de matériaux de construction et de bioplastiques pour l'industrie automobile. Les progrès les plus récents dans la « cotonnalisation » pourraient permettre la promotion de vêtements de meilleure qualité [8]. (Figure I.7)



**Figure I.7 :** Plante du chanvre [8].

**I.6.3 Lin :**

Une fibre végétale qui est bien connue pour sa solidité. Il a été l'un des premiers à être récolté, filé et tissé pour la fabrication de vêtements. La fibre de lin est également utilisée pour produire des géotextiles isolants et anti-érosifs, des billets de banque et du papier à cigarette, des composants automobiles, où elle est ensuite combinée avec du polypropylène et d'autres fibres synthétiques [8]. (Figure I.8)



**Figure I.8 :** Le lin [8].

**I.6.4 Abaca :**

Une fibre qui est extraite des feuilles du bananier *Musa textilis*, qui est originaire des Philippines. Il est utilisé pour fabriquer des cordes pour bateaux et peut mesurer jusqu'à 3 mètres de long. La pâte de chanvre est aujourd'hui utilisée dans les sachets de thé, les enveloppes de saucisses, les billets de banque, les papiers à cigarettes et les papiers à lettres de haute qualité. Actuellement, il fait un bond dans l'industrie automobile [8]. (Figure I.9)



**Figure I.9 :** Fibre des feuilles d'abaca [8].

**I.6.5 Coton :**

Le coton, qui est composé de cellulose, est la fibre naturelle la plus couramment utilisée dans le monde. Il continue d'être le maître incontesté de l'industrie textile à l'échelle mondiale. Elle est la fibre naturelle la plus utilisée au monde en raison de ses qualités telles que la douceur, la "respirabilité" et la résistance. Il est utilisé dans la fabrication de toutes sortes de vêtements et de textiles pour la maison [8]. (Figure I.10)



**Figure I.10:** Plante du Coton [9].

**I.7 Composition Chimique des fibres végétales :**

La proportion de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine varie d'une espèce à une autre

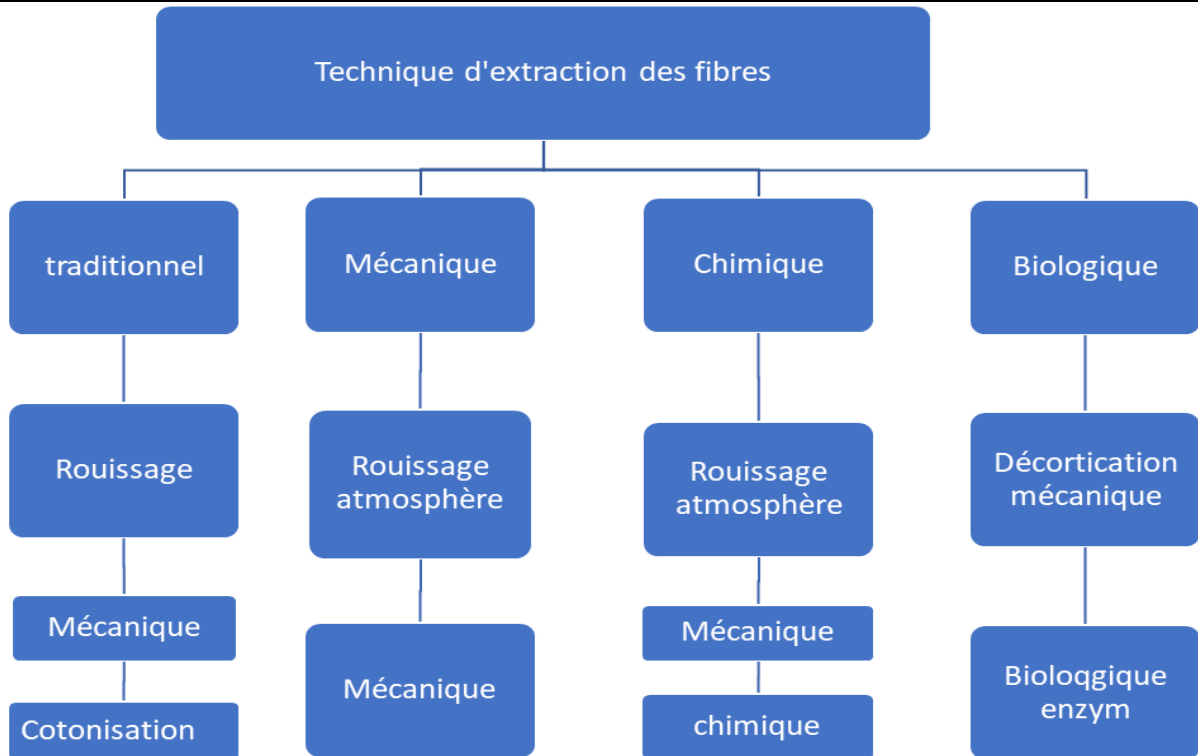
(Tableau I.1).

**Tableau I.1 :** Fractions massiques des constituants de différentes fibres végétales [10].

Type de fibre	Cellulose (%)	Lignine (%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Cendres (%)
Lin	71	2,2	18,6 - 22,6	2,3	-
Kenaf	31 – 57	15 – 19	21,5 - 23	-	2 – 5
Jute	45 - 71,5	12 – 26	13,6 - 21	0,2	0,5 - 2
Chanvre	57 – 77	3,7 - 13	14 - 22,4	0,9	0,8
Ramie	68,6 - 91	0,6 - 0,7	5 - 16,7	1,9	-
Abaca	56 - 63	7 – 9	15 - 17	-	3
Sisal	47 - 78	7 – 11	10 – 24	10	0,6 - 1

**I.8 Extraction de la fibre:**

Les fibres végétales sont extraites à partir des plantes par différentes techniques telles que : mécaniques, chimiques et biologiques (utilisation des bactéries) en fonction du type de plante à étudier. Ces méthodes d'extraction des fibres végétales généralement utilisées de nos jours sont regroupées dans le diagramme de la figure I.11 : [7].

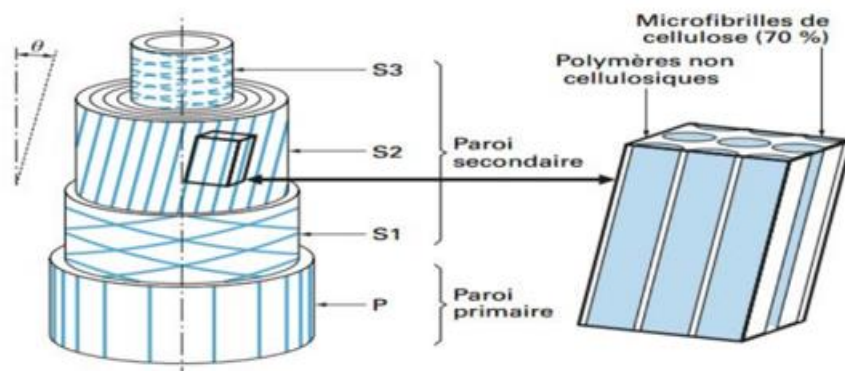


**Figure I.11** :Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales [7].

### I.9 Structure de la fibre végétale :

En raison de ses parois cylindriques et concentriques, la fibre végétale est considérée comme un matériau multicouche, La paroi comporte deux parties (figure I.12) :

- la paroi primaire : P .
- la paroi secondaire, qui est elle-même composée de 3 couches : S1, S2 et S3



**Figure I.12** :Structure de la fibre végétale [10].

**I.10 Propriétés physiques et textiles :**

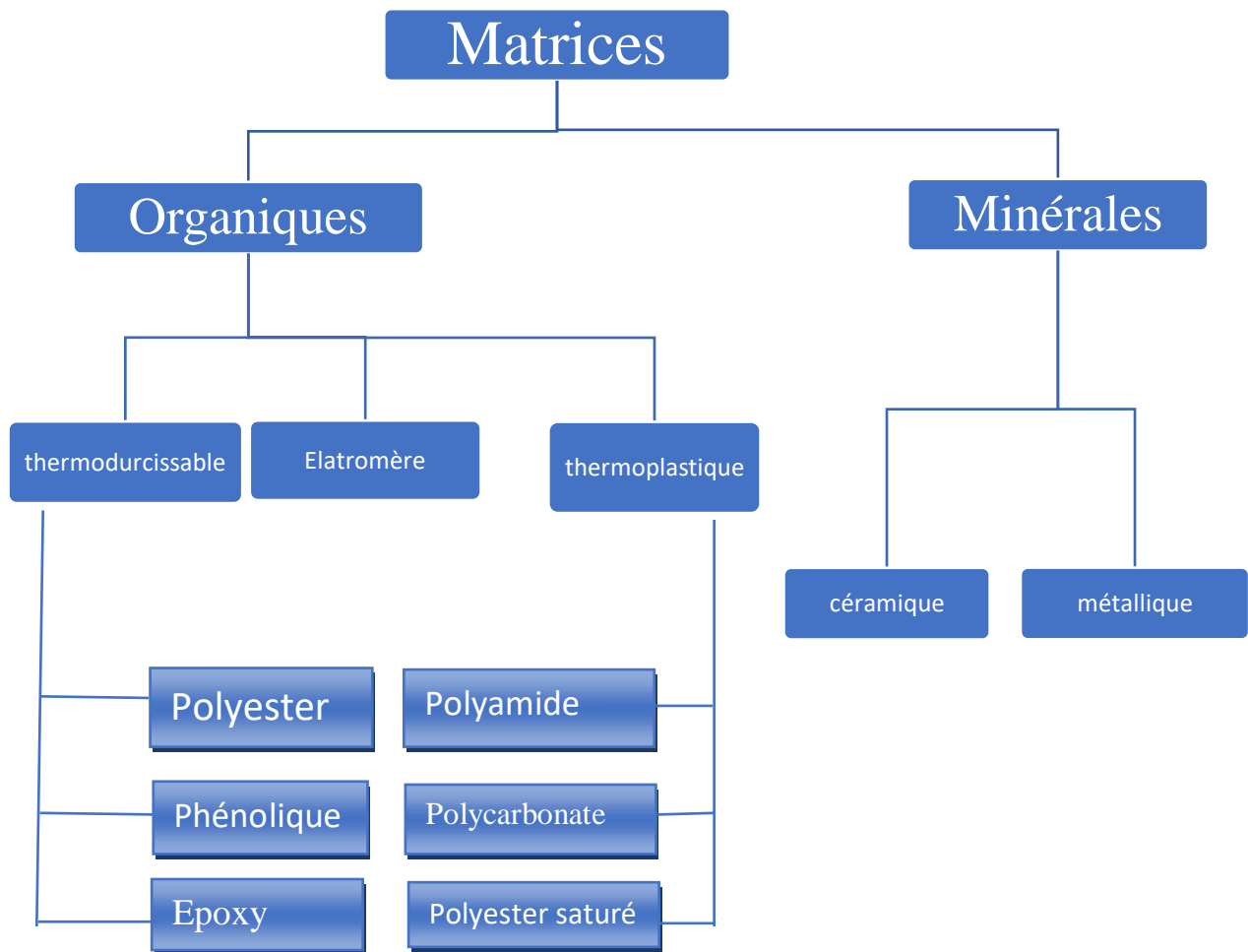
- Bonne résistance mécanique en raison d'une plus grande cristallinité des fibres et la disposition des microfibrilles dans l'axe de la fibre.
- Attaqué par les moisissures.
- Faible élasticité .
- Grande finesse : se froisse facilement.
- Fibre lourde qui donne du tombant au tissu.
- Jaunit à la lumière.
- Mauvais pouvoir adiabatique, moins bon que le coton. (Les rayons lumineux pénètrent facilement la matière).
- Moins bonne affinité tinctoriale que le coton car l'épaisseur des parois de la fibre empêche une bonne pénétration du colorant.
- Bon pouvoir absorbant[11].

**I.11 Caractéristiques :**

- Sa qualité de fibre naturelle en fait une étoffe anallergique, isolante et lui donne la propriété d'être un régulateur thermique (isolant l'hiver, respirant l'été).
- Résistante à la lumière et à l'eau, elle peut s'utiliser dans des pièces humides (salle de bains) ou s'exporter à l'extérieur de la maison (« lin outdoor » dans coussins, housses de fauteuil, nappes de terrasse).
- Mélangée à d'autres fibres, elle se prête à des textures variées (stretch avec élasthane, transparence du « lin dévoré » avec viscose et polyester, « maille de lin » souvent associée à de la laine) [11].

**I.12 La matrice :**

Les matrices servent principalement à lier les fibres, à transférer les contraintes du matériau aux fibres, à les protéger contre les agressions extérieures et à donner au matériau sa forme finale. Les résines peuvent être organiques (thermoplastiques ou thermodurcissables, élastomères) ou minérales (métalliques, céramique) (Figure I.13) [11].



**Figure I.13:** Différents types de matrices utilisées dans les composites [11].

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques :

**a) Résines thermodurcissables :**

Les thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques (traitement thermique ou physico-chimique). Et thermomécaniques élevées, ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage. Puis, elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. (Figure I.14).

Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I.2 :[11].

**Tableau I.2:** Caractéristiques des résines thermodurcissables.

Résines	T <sub>f</sub> (°C)	ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	R ε <sub>t</sub> %	R σ <sub>t</sub> (MPa)	R σ <sub>c</sub> (MPa)	E(GPa)
Polyesters	60à100	1140	2 à 5	50à85	90à200	2.8à3.6
Phénoliques	120	1200	2.5	40	250	3à5
Epoxyde	290	1100à1500	2à5	60 à80	250	3à5



**Figure I.14 :** Les thermodurcissables [12].

### b) Les résines époxydes :

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

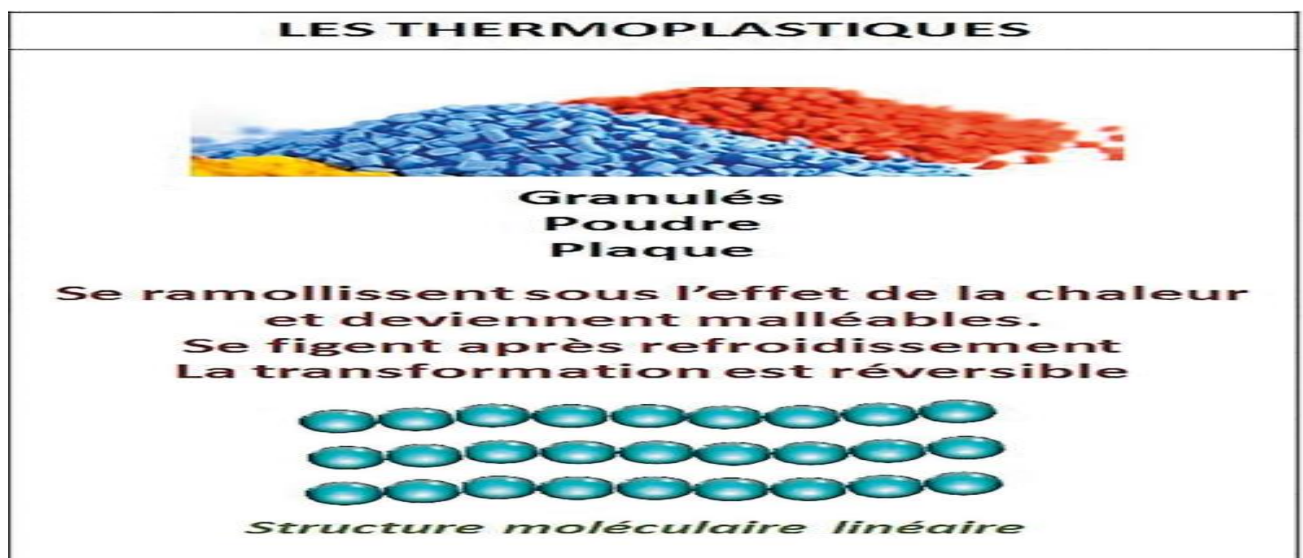
Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- Masse volumique 1100 à 1500 kg/m<sup>3</sup>.
- Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa.
- Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 Mpa.
- Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa.
- Allongement à la rupture 2 à 5 %.
- Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa[11].

**c ) Résines thermoplastiques :**

Les résines thermoplastiques font partie d'une grande famille. Nous pouvons les subdiviser en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères).

Les premiers sont mis en œuvre par injection afin d'obtenir des objets moulés ou par extrusion pour obtenir : des films, des plaques, des tubes, etc., les seconds sont généralement mis en œuvre par injection. On distingue parmi les résines thermoplastiques : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, etc., c'est dans leur faible coût que réside l'intérêt des résines thermoplastiques lié à des propriétés mécaniques et thermomécanique faibles. Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres. Cependant ils ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures[13]. (Figure I.15)



**Figure I.15:** Les thermoplastiques[12].

**d) Résines thermostables :**

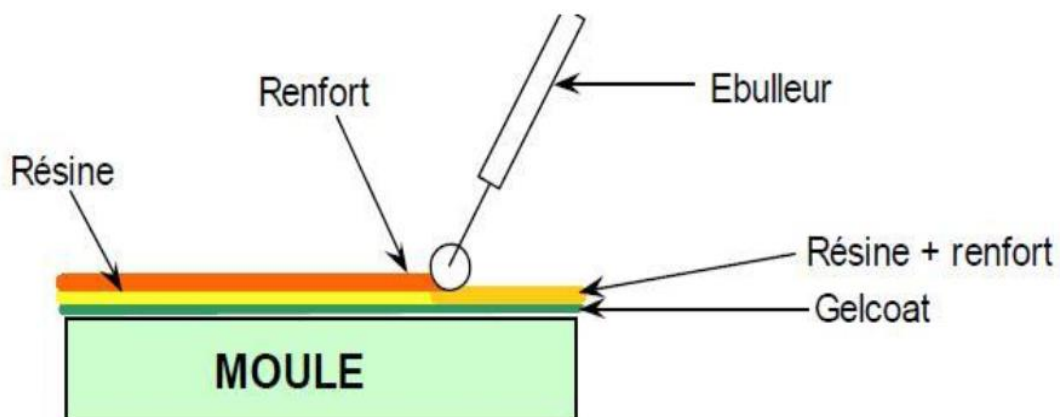
Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques[11].

**I.13 Les modes de production des composites :**

La fabrication des matériaux composites peut se faire de différentes manières, selon le type de matrice utilisée, le type et l'architecture de renfort, et les attentes concernant la pièce finale. Cette partie présente les procédés de fabrication les plus utilisés :

**I.13.1 Moulage en contact :**

Cette méthode consiste à réussir l'application dans un moule d'argent : un agent de démoulage (stick ou film), une application de gel-coat pour la zone externe, et des coussinets de matières réactives sur le tapis (antiadhésif), en tissu ou en fibres. coupés et imprégnés de résines. Ces opérations sont réalisées à l'aide de différents types de brosses et de racles de débouillage. Il est peut-être possible de découvrir le succès d'un plus grand nombre de fibres imprégnées jusqu'à ce que la réparation la plus importante soit effectuée (Figure I.16) [14].



**Figure I.16 :** Moulage au contact [14].

### I.13.2 Pulvériser :

Le procédé consiste à retirer par pulvérisation simultanément dans le moule, la fibre coupée et imprégnée. La fibre est installée selon un processus général de panneaux de fibres de 30 mm de long. 33 M.Baiardo, E.Zini, M. Scandola, Optimisation du procédé de dépôt humide/sac sous vide pour la fabrication de composites époxy en fibre de carbone avec une fraction de fibres élevée et une faible teneur en vides, Composites, Volume 20, Numéro 5 [14].

### I.13.3 Moulage par transfert de résine :

Ce process consiste à placer dans un moule fermé les renforts fibreux de type mat, tissés 2D et 3D ou multiaxiaux et préformes. On injecte ensuite la résine dans le moule par un ou plusieurs points en fonction de la taille de la pièce à réaliser (Figure I.17) [14].

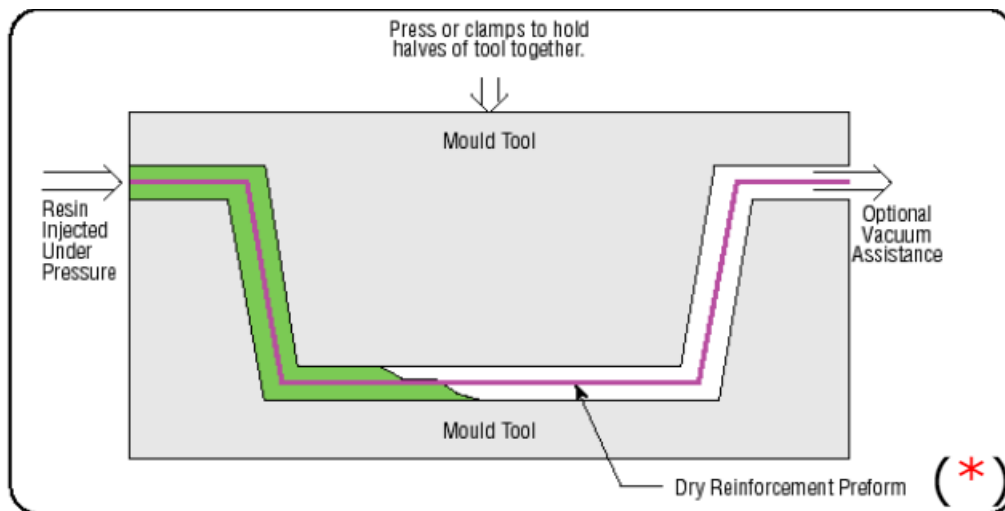


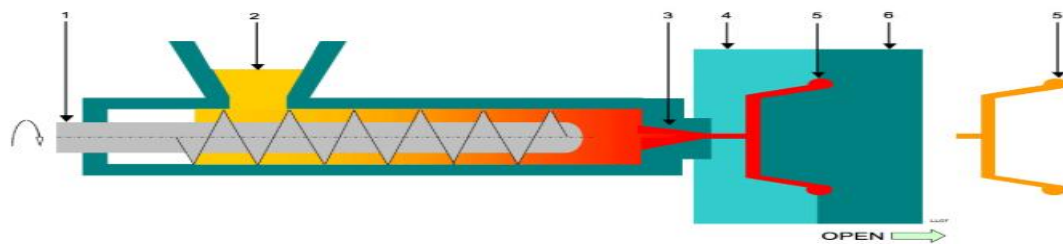
Figure I.17 :Moulage par transfert de résine [14].

### I.13.4 Infusion de résine :

La résine imprègne les fibres par aspiration et vide partiel et dans un moule constitué d'un moule rigide recouvert d'un film. La pression exercée par le film comprime les fibres et la résine. Durant ce processus vous pouvez ajouter un chiffon, un filet pour mieux répartir la résine et un marqueur pour absorber l'excédent de résine. Ce procédé inclut tous les tissus pouvant être utilisés en RTM, qu'il s'agisse de matelas à fibres continues, de tissus, de tissus multiaxiaux, de tissus 3D, de sandwichs et de préformes [14].

### I.13.5 Injection:

La matière thermoplastique sous forme de granulés de plusieurs millimètres est ramollie et dosée à l'aide d'une vis avant la phase d'injection dans le moule. La contreforme exerce alors une pression sur la matière. Ce procédé peut également être utilisé pour les élastomères et les alliages à bas point de fusion. Les fibres sont mélangées à l'entrée avec des granulés thermoplastiques ou des pellets de résine thermoplastique (granulés) déjà fabriqués à partir des fibres mélangées (Figure I.18) [14].



**Figure I.18 :** Schéma du moulage par injection [14].

### I.14 Les endommagements et les limites des composites :

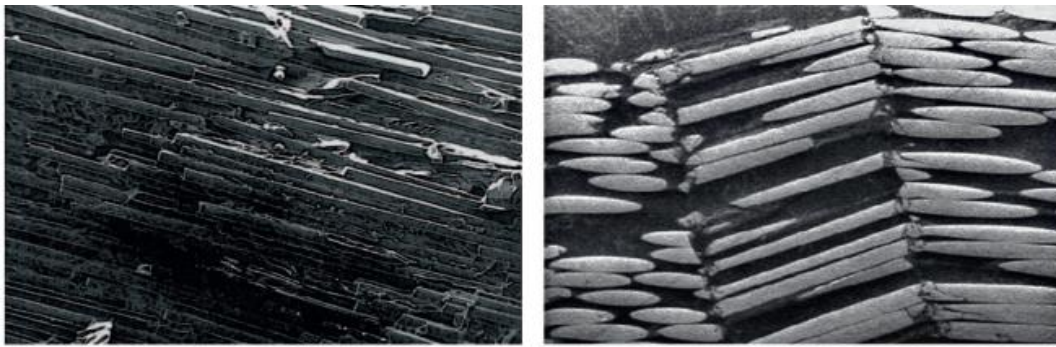
Les principales dégradations des matériaux composites proviennent des actions mécaniques qu'ils subissent. En effet, le réseau d'interfaces structurées des stratifiés (surtout à fibre longue) est particulièrement exposé aux dégradations car ces interfaces sont situées entre des constituants ayant des propriétés mécaniques différentes.

Lors de contraintes, les endommagements ont ainsi tendance à suivre ce réseau de fibres. Des phénomènes différents peuvent aussi se produire dans les plis de ce réseau en fonction du sens de sollicitation de l'effort : parallèle aux fibres ou non [15].

#### I.14.1 Le contact :

**a) La rupture des fibres :** La rupture des fibres survient par la force d'un impact ou par un effort conséquent. Chaque fibre se brise une à une face à ces efforts. Le stratifié perd très rapidement l'essentiel de sa rigidité dans la direction concernée (Figure I.19)

[15].



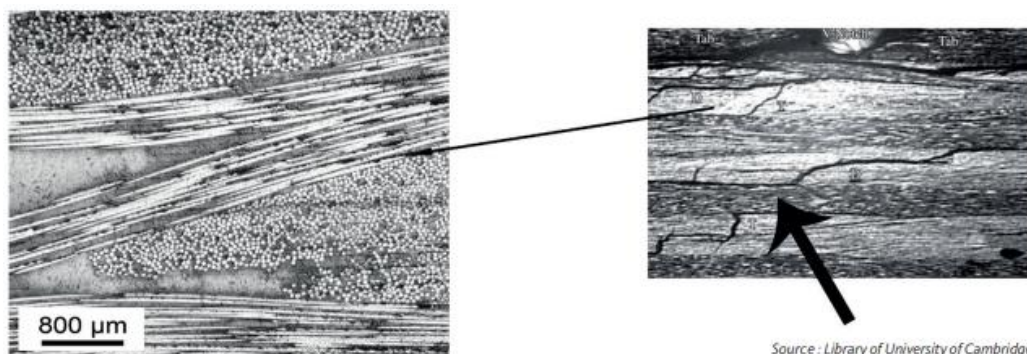
**Figure I.19** : a)Rupture fibre en traction ,b)Rupture fibre en compression.

**b) Dégradations physiques suite à des sollicitations non parallèles aux fibres :**

Ces dégradations peuvent apparaître dans un premier temps suite à des sollicitations perpendiculaires ou de cisaillement mais s'accroissent progressivement avec l'intensité de la contrainte. Ces phénomènes peuvent être localisés au niveau des fibres ou au niveau des plis [15].

**c) Endommagements au niveau des fibres :**

Ils sont presque indétectables, mais ne posent pas de réels problèmes sauf si les contraintes continuent à augmenter. Des phénomènes plus graves pourront apparaître. Suite à une trop forte sollicitation, les constituants matrice et fibre se désolidarisent (Figure I.20), lesquelles désolidarisations sont facilitées par des concentrations de contrainte affectant l'interface. Ce défaut va s'accroître progressivement sans pour autant ruiner le matériau. On parle alors de phénomène diffus. Il s'agit de minuscules fissures parallèles au plan du stratifié. Plus l'angle de croisement des plis est important, plus ces microfissures seront nombreuses [15].

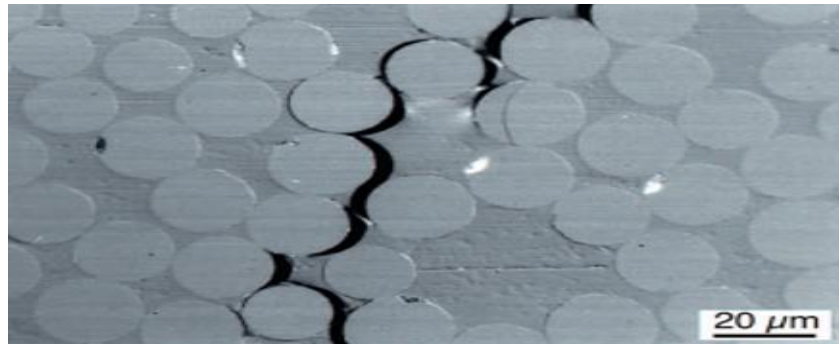


Source : Library of University of Cambridge

**Figure I.20** :Décohésion entre la fibre et la matrice [15].

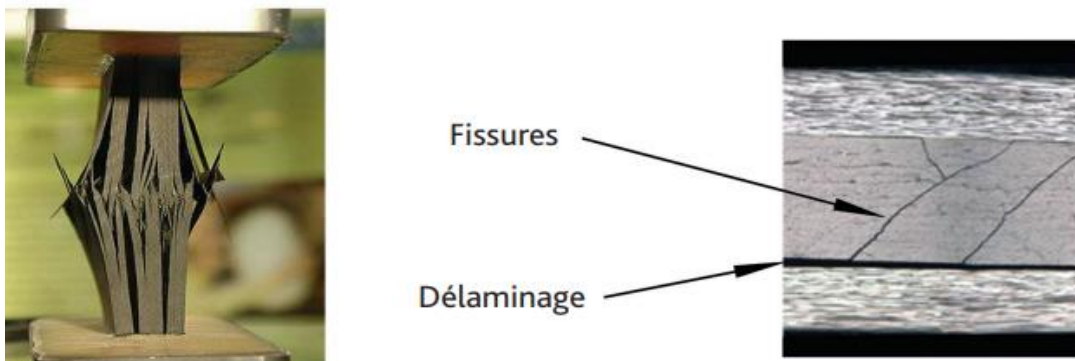
### I.14.2 Endommagements au niveau des plis :

Le phénomène des micro fissures, vu précédemment, peut croître sous l'effet de trop fortes pressions et provoquer ainsi des dégradations plus étendues. (Figure I.21)



**Figure I.21:**Endommagements au plis [15].

Ce phénomène est très fréquent aux plis à  $90^\circ$  (plis perpendiculaires au chargement) d'où le nom de fissuration transverse. Tant que les plis à  $0^\circ$  restent intacts, le stratifié continue à supporter la charge. Mais le plus souvent une redistribution du phénomène vers les plis encore intacts mène inexorablement à la ruine du matériau.

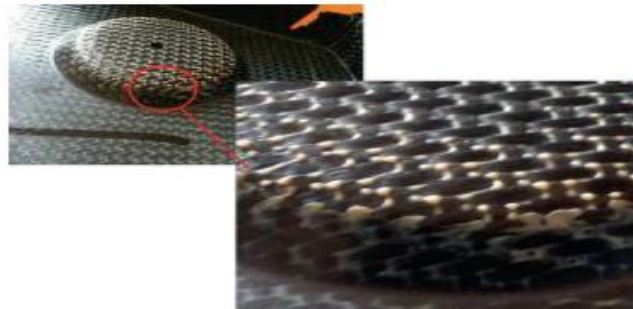


**Figure I.22 :**Délaminage [15].

Les fissures transverses ont tendance à poursuivre leur chemin jusqu'à chaque changement de plis et c'est à cette jonction que le décollement entre les plis opère : c'est le délaminage. Ce décollement important est accéléré par le microdélaminage, lequel peut fragiliser les interfaces (Figure I.22) [15].

### **I.14.3 Le manque de résine :**

Le manque de résine ou « fibre sèche » est une zone qui laisse apparaître les fibres du composite à l'air libre. Un excès de résine peut en être aussi la cause. En effet, la résine mise en surabondance peut fluer et se concentrer sur une autre zone provoquant un manque au départ de ce glissement (Figure I.23) [15].



**Figure I.23 :**Le manque de résine.

### **I.15 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites :**

#### **I.15.1 Avantages des matériaux composites :**

- Bon rapport résistance/poids.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone) [16].

#### **I.15.2 Inconvénients des matériaux composites :**

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques .
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries [16].

### **I.16 Utilisation des matériaux composites :**

Les matériaux composites de hautes performances sont principalement utilisés en : (Figure I.24)

- Automobile (toit, habitacle, coques de voitures de course...);
- Energies renouvelables (pales d'éoliennes, supports de panneaux solaires...);
- Constructions civiles (toiture, cloisons, canalisation...);
- Constructions nautiques (coques de bateaux...);
- Aéronautique ;
- Electricité et électronique (circuits imprimés à base de fibres) ;
- Sport et loisir (raquette de tennis, cadre de vélo, canne à pêche...);
- Matériel médical (prothèses dentaires, chaises roulantes...) [17].



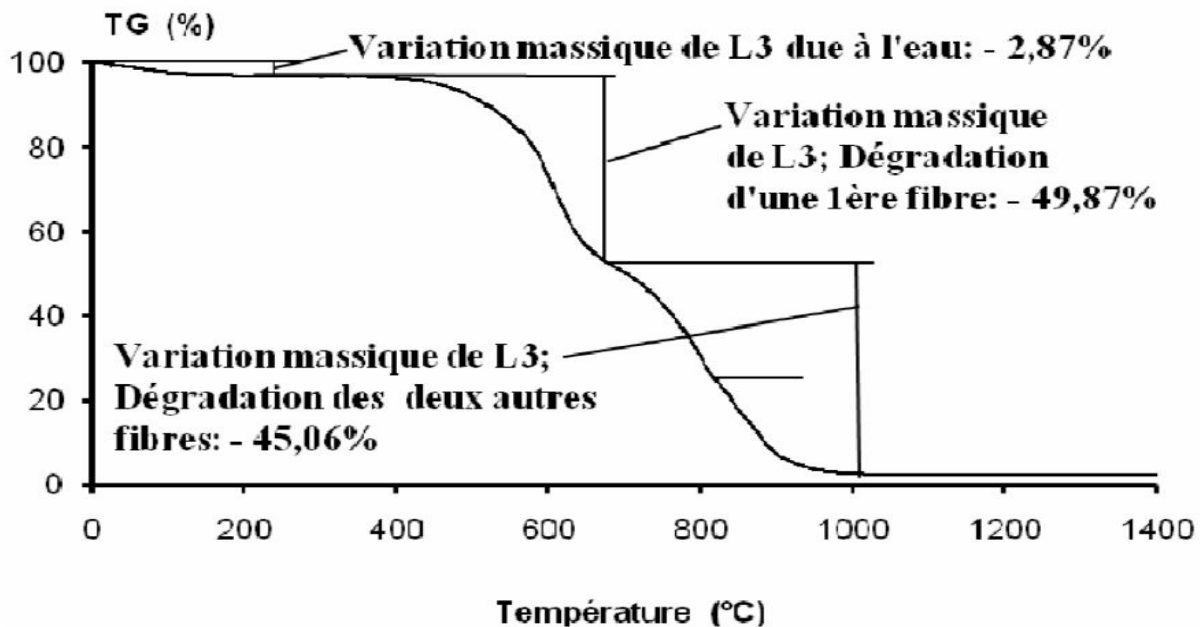
**Figure I.24 :** Application des matériaux composites à base de fibres naturelles [7].

### I.17 Caractérisation des matériaux composites:

La caractérisation des matériaux composites est essentielle pour comprendre leurs propriétés et leur comportement dans différentes conditions. Voici quelques techniques couramment utilisées pour caractériser les matériaux composites :

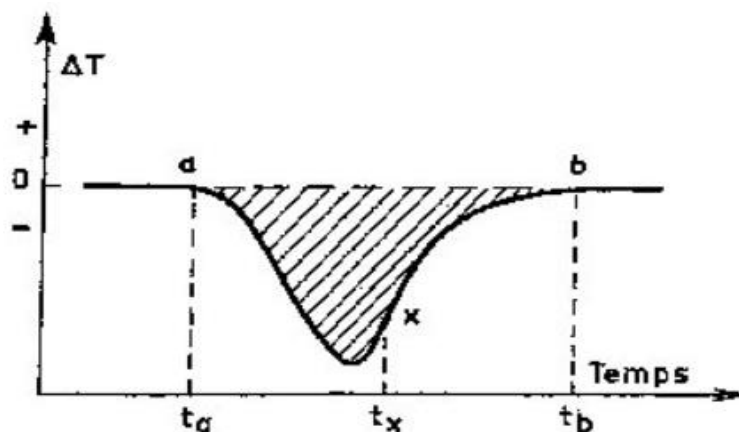
- **Analyse thermogravimétrique (TGA) :** La TGA est une technique utilisée pour étudier la décomposition thermique des matériaux composites. Elle permet de déterminer la

composition des matériaux, la stabilité thermique, ainsi que la quantité de matrice et de renforts. Les essais d'ATG ont été effectués avec un appareil Perkin Elmer Pyris-1 (Etats-Unis) sous flux d'air jusqu'à 700°C avec une rampe de 10°C/min [18]. (Figure I.25)



**Figure I.25 :** Thermogramme de la laine végétale L3 équilibre hygrothermique avec l'ambiance de la pièce (75 % - 20 °C) [19].

- **Analyse thermique différentielle (ATD) :** L'ATD est une technique qui mesure les variations de température d'un matériau par rapport à une référence lorsqu'il est soumis à un chauffage ou à un refroidissement contrôlé. Elle peut être utilisée pour étudier les transitions de phase, la cristallinité et les propriétés thermiques des matériaux composites [20]. (Figure I.26)



**Figure I.26:** Pic ATD d'une réaction endothermique [21].

- **Analyse mécanique dynamique (DMA) :** La DMA est une technique utilisée pour étudier les propriétés mécaniques des matériaux composites, telles que la rigidité, la résistance et la viscoélasticité, en fonction de la température, de la fréquence et de l'amplitude des contraintes appliquées [22]. (Figure I.27)

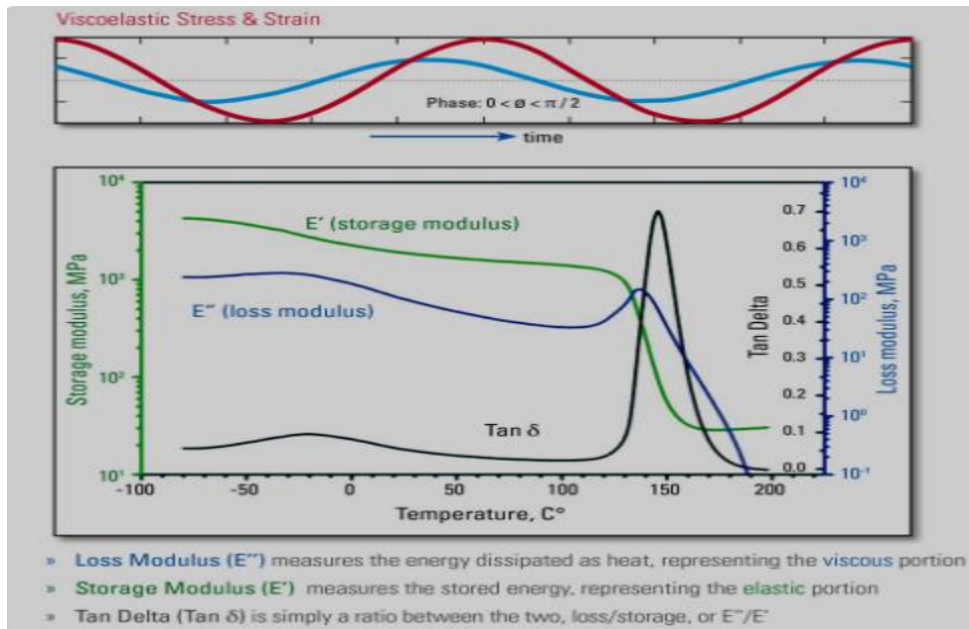


Figure I.27 : Analyse mécanique dynamique (DMA) [23].

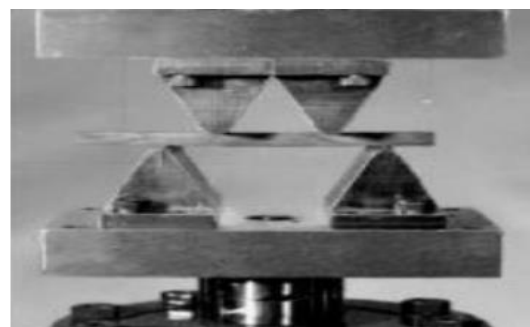
### I.18 Caractérisation des composites en statique :

Les essais de flexion sont les plus employés pour déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux composites. Généralement on choisit l'essai de flexion pour sa simplicité et Parce qu'il permet un arrangement de traction/compression et des contraintes de cisaillement Dans des proportions variables[24].

Il y a deux types d'essai de flexion : - Flexion 3 points – Flexion 4 point (figure I.28) [24].



a) Flexion 3 points.



b) Flexion 4 points.

Figure I.28 :Machine d'essai de flexion [24].

### I.19 Caractérisation des composites en fatigue :

On observe souvent le phénomène de fatigue dans de nombreux secteurs industriels qui impliquent des sollicitations régulières. Wöhler a mené les premières études fondamentales du phénomène de fatigue sur les métaux. [25] (figure I.30)

En général, on effectue un test de fatigue en utilisant un chargement sinusoïdal. (figure I.29) De cette manière, on peut décrire l'état de chargement de fatigue en utilisant des paramètres tels que ceux indiqués dans la figure 2.4, en spécifiant le niveau de chargement maximal et minimal. On peut facilement évaluer les autres paramètres, comme la contrainte moyenne, la variation de la contrainte, l'amplitude, le rapport de chargement et le niveau de chargement. [25]

On peut réaliser des tests de fatigue en flexion, en compression, en traction, en torsion ou en cisaillement. Ces essais peuvent varier en fonction de faibles sollicitations mais à des fréquences élevées (fatigue vibratoire) et aussi à faibles fréquences mais à fortes sollicitations (la fatigue plastique ou oligocyclique). [25]

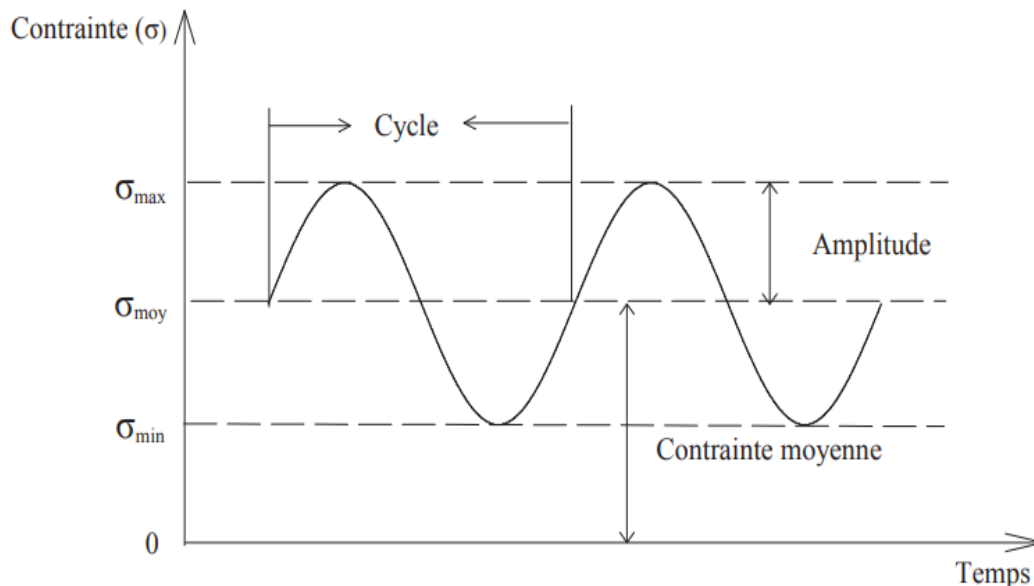
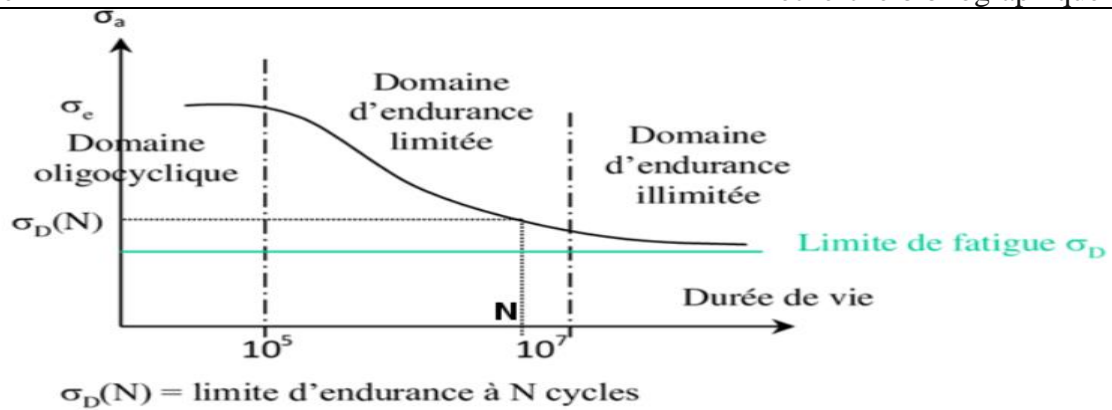


Figure I.29 : Charge sinusoïdale pour les essais de fatigue [25].



**FigureI.30** : Exemple de courbe de WÖHLER [26].

### I.20 L'analyse de l'endommagement :

Plusieurs chercheurs ont étudié l'endommagement des structures sandwichs. Les propriétés critiques de ces structures varient en fonction de leurs domaines d'application.

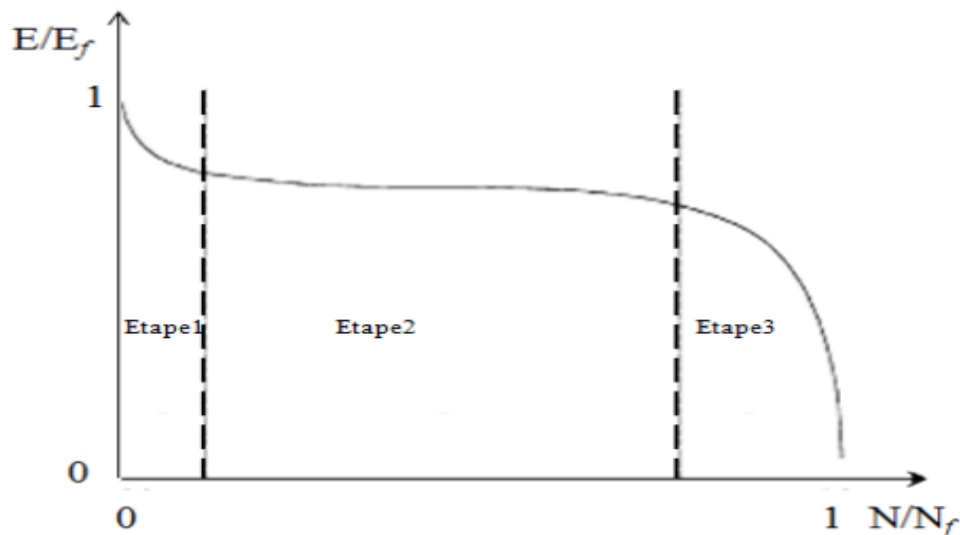
Smith et Shivakumar [27], [28] ont étudiés les essais de rupture en mode I dans les poutres des sandwichs fissurés (CSB) Ils se sont intéressés par la ténacité de la structure sandwichs.

Ils ont utilisé la poutre sandwich fissurée (CSB : Cracked Sandwich Beam) lors des essais pour évaluer cinq types de sandwichs fabriqués par moulage par transfert de résine sous vide (VARTM : Vacuum Assisted Resin Transfer Molding). Quatre de ces sandwichs étaient constitués de peaux en verre-E/vinylester et un de peaux en carbone/époxy, avec des cœurs en PVC de différentes densités. Des essais de rupture ont été réalisés sur des éprouvettes CSB présentant des tailles de fissures variées. Ils ont observé que la ténacité à la rupture augmentait avec la densité du cœur mais ne dépendait pas du type de matériau des peaux.

Mamalis et al [29] ont étudié la rupture des panneaux sandwichs soumis à la compression latérale. Ils ont effectué plusieurs essais sur huit modèles de structures sandwich, différenciés par quatre types de mousse polymérique pour le cœur (PMI, deux qualités de PVC linéaires, et polyuréthane) et deux types de peaux stratifiées en fibres de verre/résine d'acrylique. Sous compression latérale, ces sandwichs ont subi des dommages selon trois modes différents, dont deux sont instables. Le premier mode implique le flambage global de la colonne et la rupture du cœur par cisaillement. Le deuxième mode se caractérise par la rupture du sandwich avec délaminage des peaux et flambage dans la direction opposée. Le troisième mode, quant à lui, est progressivement stable. La rupture en premier mode est le scénar-

rio d'effondrement le plus probable, tandis que le troisième mode est le moins fréquent. Les propriétés et la résistance du cœur en mousse sont les facteurs déterminants des modes de rupture sous compression latérale. Dans le troisième mode, le cœur en mousse présente la plus grande densité, le module d'élasticité le plus élevé, la résistance au cisaillement la plus forte, et le plus grand allongement à la rupture, par rapport aux autres modes. Ce mode est également le plus efficace en termes d'absorption d'énergie comparé aux deux autres.

Reifsnider et al[30] ont mené les premières études sur la dégradation de la rigidité par fatigue des composites. Ils ont décrit de manière générale l'évolution de l'endommagement en décomposant la variation de la rigidité en fonction du nombre de cycles en trois zones distinctes présentée dans la figure I.31 :



**Figure I.31** : Courbe typique de dégradation de la rigidité pour une large gamme de matériaux composites renforcés par des fibres [31].

La première zone se caractérise par une réduction rapide de la rigidité dès les premiers cycles, marquée par l'apparition de microfissures. La deuxième zone, la plus étendue, présente une diminution progressive de la rigidité, correspondant au développement continu des microfissures. Enfin, la troisième zone montre une forte diminution de la rigidité, marquée par la rupture des fibres, ce qui entraîne la défaillance de l'éprouvette.

Dody[33] explique que les trois zones distinctes de la courbe sont dues à la multiplication des fissures matricielles lors de la première phase, à la propagation et à l'accumulation de ces fissures lors de la deuxième phase, et à la rupture des fibres dans la troisième phase.

Davis et al [34] ont étudiés la compression après la résistance à l'impact des panneaux composites sandwichs. Ils ont élaboré deux types de panneaux sandwichs avec des peaux en carbone/époxy et un cœur en nid d'abeille en aluminium. Le premier type se compose de deux peaux épaisses et d'un cœur mince, tandis que le deuxième type se compose de deux peaux fines et d'un cœur épais. Ces panneaux ont été soumis à des impacts à faible vitesse, puis les panneaux endommagés ont été testés pour leur résistance à la compression.

### **I.21 Comportement en vibration des composites :**

Il n'est pas suffisant de connaître les propriétés statiques et de fatigue. Les propriétés dynamiques des composites dans les hautes technologies requièrent des renseignements supplémentaires. Nous exposons dans ce paragraphe une analyse globale des recherches menées dans la littérature sur le comportement vibratoire des matériaux composites. Nous avons examiné les propriétés de vibration, telles que la fréquence de résonance  $f$  et l'amortissement modal  $\eta$ . Effectivement, l'amortissement et la variation fréquente pourraient être utilisés comme des indicateurs de dommages afin de surveiller la santé des matériaux composites. La méthode de l'analyse modale expérimentale est à la fois efficace et rapide, utilisant des ressources modestes. Grâce à cette technique, il est possible d'évaluer les caractéristiques dynamiques d'un système mécanique en se basant sur ses fréquences de résonance. Ce processus offre la possibilité de décrire la structure composite en utilisant ses propres caractéristiques dynamiques.

Les méthodes vibratoires sont basées sur la mise en résonance d'un échantillon par une force oscillante. La résonance est repérée par le maximum de l'amplitude des vibrations induites dans le système et/ou le déphasage entre l'excitation et la fonction de réponse fréquentielle du système. La valeur de la fréquence de résonance dépend des propriétés mécaniques du matériau[25].

Pintelon et al[35] ont présenté une méthode pour identifier le module élastique de matériaux viscoélastiques homogènes en utilisant les vibrations longitudinales et transverses.

Gasparetto et al et de Liao et al [35,36] ont utilisé des techniques expérimentales pour caractériser les propriétés d'un matériau viscoélastique. À titre d'exemple, nous pouvons men-

tionner les travaux d'Assarar, qui a développé une méthode de vibration pour déterminer les caractéristiques dynamiques des matériaux composites stratifiés et sandwichs. Les résultats obtenus expérimentalement ont été comparés à ceux issus d'une modélisation utilisant la méthode des éléments finis.

### **I.21.1 L'amortissement en vibration :**

L'amortissement en vibration est un aspect crucial du comportement dynamique des systèmes mécaniques. Il se réfère à la capacité d'un système à dissiper l'énergie vibratoire et à revenir à son état d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation.

De nombreux chercheurs ont réalisé de nombreuses expériences dans ce domaine afin de déterminer le comportement de différents véhicules, mais cet aspect manque encore de précisions. Duc et al[37] ont testé plusieurs composites renforcés uni directionnellement (UD) en utilisant des vibrations libres sur des poutres en configuration encastree-libre. Ils ont démontré que le remplacement du renfort unidirectionnel en verre ou en carbone par un renfort en fibre de lin améliore l'amortissement du composite testé de 133% et 200%, respectivement. Prabhakaran et al[38] ont démontré que le composite à fibres de lin possède un pouvoir d'amortissement supérieur de 51,03% à celui du composite à fibres de verre, avec un gain de masse de 33,33%. Ils ont également observé que l'absorption sonore du composite à fibres de lin dépasse celle du composite à fibres de verre de 21,41% pour les hautes fréquences (supérieures à 2000 Hz), et de 25% pour les basses fréquences (inférieures à 100 Hz). Tous ces avantages, combinés à une faible masse, le rendent de plus en plus compétitif.

En conclusion, les travaux de recherche mentionnés ci-dessus montrent que les propriétés mécaniques des composites à fibres végétales sont très intéressantes.

### **I.21.2 Analyse vibratoire :**

#### **I.21.2.1 Notion de base :**

##### **I.21.2.1.1 Définition d'une vibration :**

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. Une vibration est généralement traduite par :

- Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre
- Une vitesse : variation du déplacement par rapport au temps ;

- Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps [39].

### **I.21.2.1.2 Caractéristique d'un vibration :**

#### **I.21.2.1.2.a L'Amplitude :**

L'amplitude du mouvement oscillatoire est appelée la valeur de ses écarts par rapport à la position d'équilibre. La complexité du signal découle de cette définition générale oscillations réelles conduisent à la détermination de différentes tailles d'amplitude :

L'Amplitude crête (AC) : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

L'Amplitude crête à crête (ACC) : Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée amplitude double. Il est noté que :  $ACC = 2AC$  [39].

#### **I.21.2.1.2.b La fréquence :**

Un objet vibrant effectue un va-et-vient de part et d'autre de sa position fixe normale. Un cycle complet de vibration est produit lorsque l'objet se déplace d'une position extrême à l'autre position extrême, puis revient au point de départ. Le nombre de cycles effectués par un objet vibrant pendant une seconde est appelé sa fréquence. L'unité de fréquence est l'hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde [39].

#### **I.21.2.1.2.c Types des vibrations :**

##### ✓ **Vibrations forcées :**

Elles apparaissent sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- La variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe interrompue ou une surépaisseur variable.
- Les effets dynamiques provoqués par un mauvais équilibrage des masses en mouvement.
- La précision insuffisante des guidages et des organes de transmission [40].

##### ✓ **Vibrations auto excitées :**

Les causes essentielles des vibrations auto excitées, qui sont bien plus fréquentes que les vibrations forcées, sont à rechercher dans le phénomène de coupe proprement dit ce sont :

- La variation de la force de frottement du copeau sur l'outil et de l'outil sur la pièce.
- L'écaillage irrégulier de la couche enlevée à travers son épaisseur.
- Les variations dimensionnelles de l'arête rapportée modifiant en cours d'usinage l'angle de coupe[40].

### I.21.3 Méthodes utilisées dans la littérature pour évaluer les amortissements modaux :

Il existe différentes méthodes pour identifier ces coefficients d'atténuation. Nous trouvons ci-dessous les méthodes couramment utilisées pour les identifier [41] :

#### I.21.3.1 Méthode du décrement logarithmique:

Il s'agit d'évaluer la décroissance logarithmique de la réponse du système temporelle. L'amortissement peut s'exprimer en fonction du décrement logarithmique selon la relation suivante:

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{x_n}{x_{n+m}} \quad (\text{I.1})$$

Où le décrement logarithmique  $\delta$ , calculé sur  $m$  pseudo-périodes et à partir du  $n$ ème extremum. (Figure I.32)

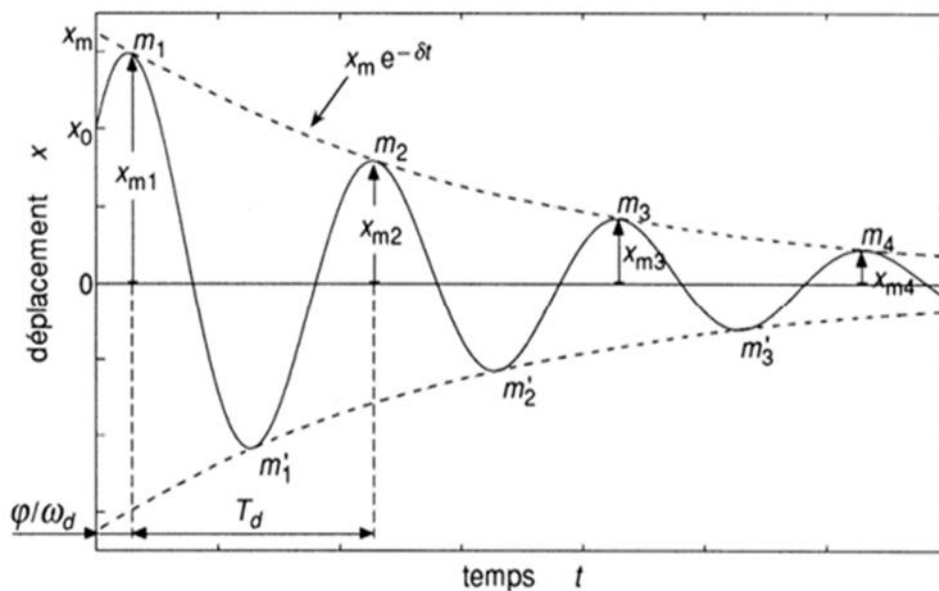


Figure I.32: Décroissance de la réponse d'un système pseudopériodique.

#### I.21.3.2 Méthode énergétique :

L'évaluation de l'amortissement d'un système ne se limite pas aux méthodes traditionnelles. Une approche novatrice, introduite par Ungar et Kewin, propose de quantifier l'amortissement en s'appuyant sur la dissipation d'énergie au cours du mouvement. Cette approche, basée sur l'énergie dissipée et emmagasinée par chaque élément de la structure, offre une perspective plus précise et détaillée du comportement vibratoire D'où la relation :

$$\eta = \frac{\sum_{i=0}^n n_i u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \quad (\text{I.2})$$

Où n est le nombre d'éléments de la structure et  $U_i$  est l'énergie élastique emmagasinée dans l'élément i de la structure.

### I.21.3.3 Méthode du facteur d'amplification :

Il est possible de déterminer le facteur de perte d'un système à partir de sa courbe de réponse en fréquence. En effet, le facteur de perte est relié au facteur d'amplification dynamique Q par la relation suivante :

$$Q = \sqrt{\frac{1+\eta^2}{n}} \quad (\text{I.3})$$

Le facteur d'amplification est le rapport entre l'amplitude à la résonance  $A_{\max}$  et l'amplitude statique  $A_0$ .

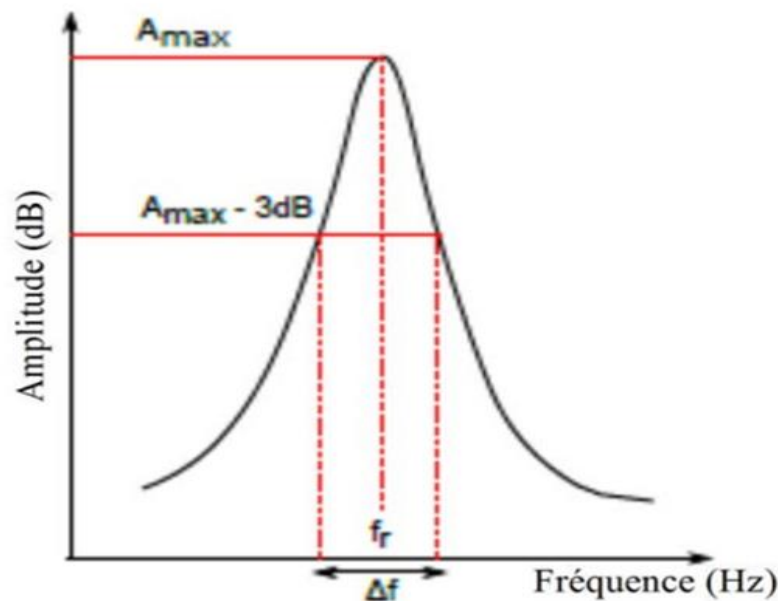
### I.21.3.4 Méthode 3dB:

La détermination de l'amortissement basée sur cette méthode courbe de fonction de réponse en fréquence. Le facteur de perte dépend en réalité de dépend en réalité de la bande passante de fréquence, qui est mesurée à -3 dB du pic de fréquence.

Le facteur bande passante de fréquence, qui est mesurée à -3 dB du pic de fréquence. On peut ainsi déduire le facteur de perte comme suit:

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (\text{I.4})$$

Où  $f_r$  est la fréquence de résonance,  $f_1$  et  $f_2$  sont les fréquences correspondant aux deux points se trouvant à -3dB du pic de résonance. (Figure I.33)



**Figure I.33:** Méthode de détermination de l'amortissement à  $-3\text{dB}$ .

## I.22 Mesure de l'amortissement à partir des vibrations d'une poutre :

L'étude modale expérimentale d'une poutre constitue une méthode efficace pour repérer ses caractéristiques dynamiques. Son objectif est d'éveiller la poutre et de mesurer sa réaction vibratoire. Il existe deux types d'excitation fréquemment employés : Émotion à l'idée d'un pot vibrant : Le pot qui vibre produit une force sinusoïdale avec une amplitude et une fréquence réglées. Un marteau D'impact est employé afin de produire une force impulsive à un point spécifique de la poutre. On peut mesurer la réaction vibratoire de la poutre en un seul point ou en plusieurs points en utilisant des accéléromètres. On peut effectuer deux types d'analyses en se basant sur la réponse mesurée : Analyse du temps : Les modes de vibration de la poutre et leurs fréquences naturelles peuvent être identifiés grâce à l'analyse de la variation temporelle de la réponse. Pour visualiser l'amplitude de la réponse de la poutre en fonction de la fréquence d'excitation, il est possible d'analyser la Fonction de Réponse en Fréquence (FRF). Ensuite, on peut extraire les caractéristiques dynamiques de la poutre de la FRF, telles que : Les oscillations naturelles : Les pics de la FRF sont les facteurs d'amortissement qui correspondent à ces pics. Le niveau de dissipation d'énergie dans la poutre est indiqué, ainsi que les modes de vibration. La forme de la poutre est décrite lorsque celle-ci vibre à une fréquence naturelle. L'analyse modale expérimentale est une méthode couramment employée afin de : étudier les matériaux et les structures, identifier les caractéris-

tiques dynamiques des systèmes, identifier les imperfections des structures et élaborer des structures plus résistantes aux vibrations [42].

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des fibres végétales employées comme charge ou renfort dans un matériau composite. Le but de cette partie est d'indiquer les différents types des matériaux composites à fibre naturelles et leurs divers domaines d'applications les principales conclusions peuvent être dégagées :

- Du point de vue écologique, les fibres végétales peuvent substituer certaines fibres synthétiques
- Plusieurs fibres naturelles sont présentées avec leurs caractéristiques mécaniques, leurs avantages et inconvénients ;
- Il y a beaucoup méthodes expérimentales pour identifier les coefficients d'amortissement à partir de l'analyse modale.

# **Chapitre II**

## **Matériels et Protocol expérimental**

## II.1 Introduction :

Ce chapitre expose les différents procédés de fabrication des plaques composites et sandwichs réalisés dans cette étude, et décrit aussi le protocole expérimental et les démarches adoptés pour identifier les fréquences propres et les amortissements modaux des matériaux élaborés.

## II.2 Présentation des matériaux de l'étude :

### II.2.1 La fibre de lin :

Le matériau de base utilisé dans ce travail est le « **Lin** », appelé aussi *Linum usitatissimum* L (figure II.1.a), le lin cultivé est une plante annuelle de la famille des linacées cultivées principalement pour ses fibres, mais aussi pour ses grains oléagineux [41]. Le lin ne produit pas de déchets, toute la plante est utilisée. La graine est pressée pour faire de l'huile, base des peintures ou des résines. Les tourteaux, riches en anti-cholestérol, seront consommés par les animaux. Les fibres longues sont exploitées dans l'industrie textile et les fibres courtes partent essentiellement en papeterie (65%) ou en débouchés techniques comme renfort de différents matériaux comme des tableaux de bords de voitures. La paille sert à 80% pour la confection de panneaux agglomérés, à 15% pour la litière des chevaux et le reste au paillage écologique des massifs pour limiter le développement des mauvaises herbes [42].

La fibre de lin utilisée dans cette étude est fournie par l'usine de fabrication de cordes et de câbles en fibres naturelles de BLIDA (figure II.1.b).



**Figure II.1 :a)** Plante de lin et **b)** Fibre de lin.

### II.2.2 La résine :

La matrice utilisée est une résine MEDAPOXY STR associée au durcisseur HY951 de proportion en masse de 60/40 ont été utilisés dans ce travail. Ces deux éléments sont commercialisés par la société GRANITEX Alger [43]. Cette résine est non cristallisante et durcit à température ambiante. En plus d'avoir un fort pouvoir mouillant et dé bullant, elle assure une excellente adhésion avec le renfort qu'elle imprègne facilement. Sa réticulation se fait après 14 jours à température ambiante (20-25°C). Selon le fournisseur, on peut réduire la durée de polymérisation puisque le cycle de cuisson préconisé est de 24h à une température de 40°C ou de 8h à 60°C, après un délai d'attente de 12h à 20°C avant cuisson.



**Figure II.2 :a) Résine et b) Durcisseur.**

### II.2.3 Le liège :

Le liège utilisé est un liège aggloméré de 10mm d'épaisseur (Figure II.3), celui-ci est fourni par l'usine de traitement du liège de COLLO-SKIKDA



**Figure II.3 : Plaque en liège.**

### II.2.4 Elaboration des bio-composites :

Le composite étudié est un sandwich constitué des peaux de lin, l'âme de liège et une résine époxyde. Les sandwichs sont élaborés sous forme de plaques de dimensions 330x330 mm<sup>2</sup> par la technique du moulage en sac, alors que les plaques en résine seule sont élaborées

par coulée dans un moule en verre de 280x280 mm<sup>2</sup>. Les sandwichs sont imprégnés à température ambiante, la résine est catalysée et durcie dans des proportions de 60 et 40 % en masse. L'ensemble reste dans le moule pendant 24 heures afin d'avoir une solidification totale de la résine. Ensuite, les plaques obtenues sont laissées à l'air libre pendant 7 jours.

Les étapes de préparation d'une plaque sandwich consistent à déposer un tissu d'arrachage sur un moule préparé préalablement, suivi par le dépôt du premier pli en tissu de fibres, ensuite l'étalement de la résine sur toute la surface du pli par un pinceau, l'opération de dépôt de pli et du liège et de leur étalement de résine est répété pour tous les constituants de la plaque. Enfin un tissu d'arrachage et un tissu absorbant sont déposés pour absorber l'excès de résine. Avant de faire fonctionner la pompe à vide, le moule est fermé par un film en plastique transparent collé sur le pourtour de la plaque par une bande adhésive pour assurer son étanchéité. La dépression créée par la pompe est de l'ordre 30 bars pendant 6 heures (jusqu'à la polymérisation de la plaque), cette dépression exerce une force de compression sur la plaque, ce qui permet de densifier la plaque et de dégager les bulles d'airs emprisonnées dans le moule (figure II.4). La plaque ainsi démoulée après 6 heures, est laissée à température ambiante pendant 15 jours afin d'avoir une polymérisation complète. En fin Les plaques composites sont découpées.



**Figure II.4 :** Elaboration d'une plaque sandwich.

### **II.2.5 Découpage des éprouvettes :**

Les plaques sandwichs et les plaques de résine sont découpées en éprouvettes à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté selon la norme ASTM D5083 [44], équivalente aux normes ISO 527-4 et AFNOR 57.701.



**Figure II.5 :** Éprouvettes obtenues après découpage.

**Tableau II.1.** Dimensions des éprouvettes de traction selon la norme ASTM D 5083.

Désignation	Dimension [mm]
$F$ : longueur totale minimal	250
$h$ : épaisseur des éprouvettes	2 à 14
$b$ : largeur de la partie calibrée	25 ou $50 \pm 0,5$
$L_0$ : longueur de référence	$100 \pm 0,5$
$E$ : distance entre les mors	$170 \pm 0,5$
$D$ : distance entre talons	$150 \pm 0,5$
$T$ : longueur minimal des talons	50

### II.3 Support de maintien des éprouvettes :

Pour le bon déroulement des essais de vibration, ces derniers nécessitent la réalisation d'un support de maintien des éprouvettes à étudier pour différentes configuration à s'avoir, encastré- encastré et libre-libre.

La matière choisie pour la réalisation du support est l'acier vue sa disponibilité et sont prix d'achat sur le marché Algérien.

Avant de commencer le processus de fabrication, la matière est découpée selon un dessin de définition prés réalisé pour chaque élément constituant le support.

#### II.3.1 Plateforme ou base du support :

Les éléments constituant le support sont réalisés sur une fraiseuse universelle pour les opérations de surfacage, et une perceuse à colonne pour les opérations de perçage.

La plateforme est réalisée en une seule pièce, 300mm de longueur, 100mm de largeur et 10mm épaisseur en dimensions, afin d'avoir une rigidité suffisante pour supporter les appuis et l'éprouvette à étudier.



**Figure II.6 :** Usinage de la plateforme.

### II.3.2 Appuis de maintien des éprouvettes :

Les appuis de maintien des éprouvettes sont réalisés en dimensions de 50 mm x 50mm et d'une hauteur de 65mm. Deux types d'appui sont utilisés dans ce travail, appui pour encastrement et appui simple.

#### a) Appuis d'encastements :

Les appuis pour la réalisation des essais en configuration d'encastements (Encastré-Encastré) sont représentés sur la figure II.7.



**Figure II.7 :** a) Appui d'encastements et b) perçage des trous.

#### b) Appuis simples :

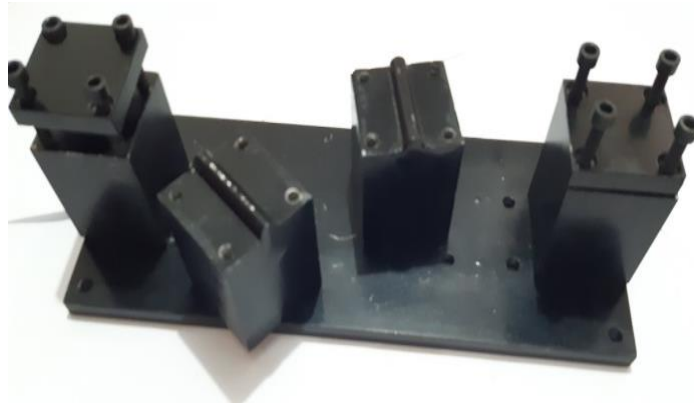
La figure II.8 présente les appuis simples réalisés pour le cas des essais en configuration (libre-libre).



**Figure II.8 :** Appuis simples.

**c) Support final :**

Après la réalisation des appuis, ces derniers sont fixés à l'aide des vis de fixation sur la plateforme pour former le support final.



**Figure II.9 :** Support de maintien avec appuis.

**II.3.Essais de vibration :**

Les essais de vibration sont réalisés au laboratoire de recherche de mécanique et structure (LMS) de l'Université de Guelma, en utilisant un analyseur dynamique de vibrations Pulse LAN-XI. Le banc d'essai se compose d'un système de contrôle et de mesure, d'un marteau de choc pour l'excitation manuelle des structures et un accéléromètre piézoélectrique. (figure II.10)

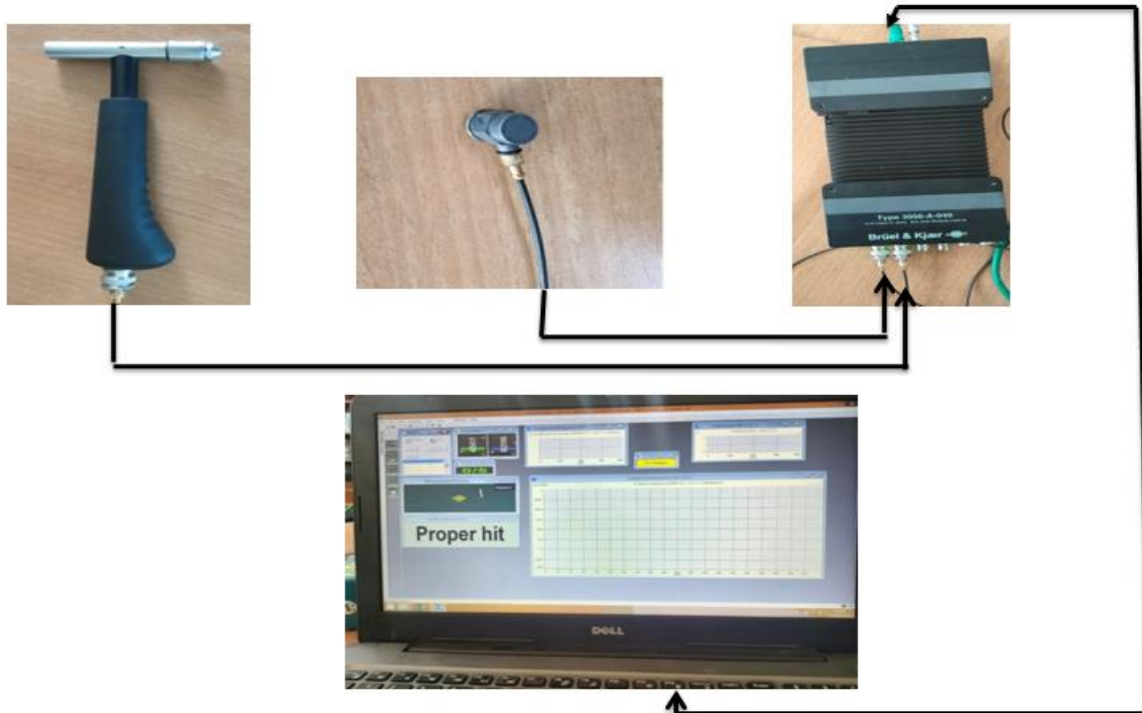


Figure II.10 : Banc d'essai de vibration.

a) Système de contrôle et de mesure :

Le banc d'essai est piloté par le logiciel d'acquisition et de traitement Pulse Labshop version 25.1.1.198, dont les outils d'analyse standards sont: analyse FFT, analyse CPB en temps réel, analyse 1/n octave, analyse d'ordre, analyse d'enveloppe et analyse cepstrale.

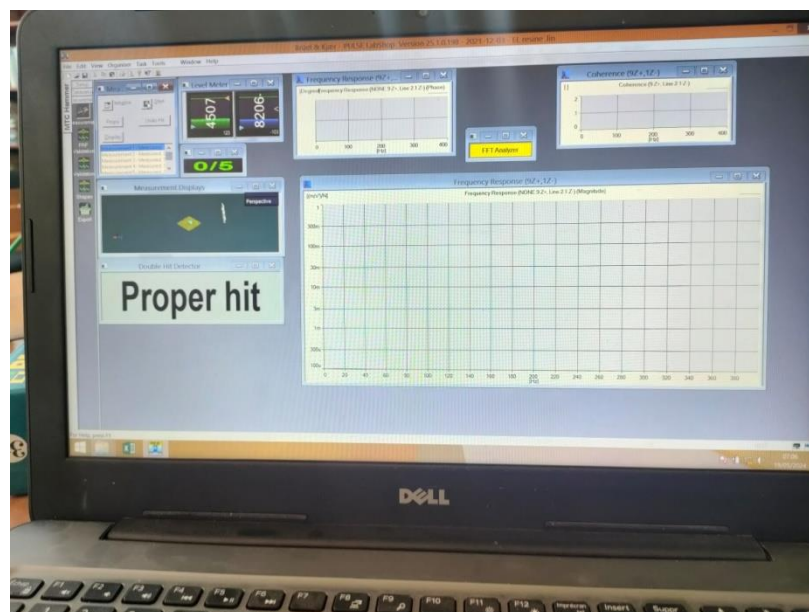


Figure II.11 : Logiciel d'acquisition pulse.

**b) Analyseur Pulse B&K :**

L'Analyseur Pulse B&K est un système multi-analyseur de type 3056-A-040, de marque Brüel & Kjær à 4 entrées /2 sorties. Tous les canaux d'entrées et de sorties ont une plage de fréquences de DC à 51,2 kHz. Cet analyseur fonctionne aussi bien comme un système de test avec un seul module, ou comme une partie d'un grand système de mesure LAN-XI. La combinaison des canaux d'entrées et de sorties fait de lui l'un des modules d'acquisition de données les plus polyvalents disponibles, tandis que les panneaux avant interchangeables assurent la flexibilité à utiliser une grande variété de capteurs.

**• Caractéristiques technique**

- 4 canaux d'entrées ;
- 2 canaux de sorties du générateur ;
- Gamme de fréquence de 0 à 51.2KHz ;
- Support transducteurs TEDS (Transducer-Electronic Data Sheet);
- Panneaux avant interchangeables.



**Figure II.12 :** Analyseur FFT.

**c) Accéléromètre :**

Le banc d'essai utilise un accéléromètre (capteur) piézoélectrique de type **Brüel & Kjær 4333 B001 30642**, avec une masse de 2,4g.



**Figure II.13 :** Accéléromètre.

**d) Le marteau d'impact :**

Le marteau utilisé pour l'excitation des structures est marteau de choc de marque **Brüel & Kjær**, de types 8206-001. Ce marteau comprend trois caractéristiques essentielles, dont la forme de l'impulsion (amplitude) est déterminée par la pointe d'impact, la durée ainsi que la capacité de l'excitation.



**Figure II.14:** Marteau de choc.

**II.4 Tests de vibration :**

Les tests expérimentaux de vibration ont été réalisés en analyse modale. Ces tests ont été effectués sur des éprouvettes sandwichs et de ses constituants à s'avoir les peaux stratifiées en fibres de lin, l'âme en liège et la résine seule dans le cas de la flexion. Deux types de montages ont été utilisés, les poutres étant encasturé-encasturé (E-E) et encasturé - libre (E-L). Avant les tests, toutes les éprouvettes ont été tracées sur toute la longueur à étudier, afin de repérer la coordonnée de l'impact et celle du point de mesure. Ces points doivent être choisis de telle sorte que ni le point de mesure, ni le point d'impact ne soient sur un nœud de vibration.

Il est à noter que les tests pour le cas du montage libre-libre (L-L) ou appui- appui, aussi bien que pour l'éprouvette en liège et dans toutes les configurations (montages) n'ont pas été réalisés. Pour ces cas l'analyseur n'a affiché aucun signal et les essais ont été abandonnés.

**II.5 Protocol expérimental :**

L'analyse modale utilise la méthode de résonance pour caractériser le comportement vibratoire des matériaux de l'étude. Les montages et le dispositif expérimental sont présentés dans les figures (II.15 et II.16). L'analyse modale expérimentale des vibrations avec excitation par un marteau présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre. Un marteau de choc est utilisé pour générer une force impulsive à un point précis de la poutre. La réponse vibratoire de la poutre peut être mesurée en un point ou en plusieurs points à l'aide d'un accéléromètre. L'accéléromètre est de sensibilité de fréquence allant jusqu'à 1000 Hz. Une carte GPIB permet de contrôler l'analyseur de réseaux et d'y commander les fréquences,

l'amplitude, le nombre de courbes...etc., via une interface. Les données sont enregistrées et affichées en temps réel. La même procédure expérimentale est ainsi répétée sur toutes les éprouvettes en sandwich, stratifié et résine. Toutes les éprouvettes sont excitées avec une amplitude d'excitation égale à 380 Hz. Cette amplitude donne l'amplitude d'excitation dans le domaine linéaire suite à de nombreux tests de vibrations.

**a) Montage encastré-encastré :**

L'éprouvette étant en configuration encastré - encastré. Les deux extrémités de l'éprouvette sont encastrées sur le support par des cales de serrage sur une longueur de 50 mm chacune. L'analyse modale a été effectuée sur une longueur restante égale à 150mm (figure II.15) de telle sorte que les points de mesure sont loin du point d'excitation. Il est à signaler que pour chaque point l'analyse est répétée cinq fois afin de faciliter l'identification des modes propres. Le même test est répété pour tous les matériaux de l'étude.



**Figure II.15:** Analyse vibratoire en montage encastré-encastré.

**b) Montage encastré-libre :**

L'éprouvette est montée en configuration encastré - libre. Une extrémité de l'éprouvette est encastrée sur le support par la cale de serrage sur la longueur de 50 mm et l'autre extrémité reste libre. L'analyse modale a été effectuée sur une longueur restante égale à 200mm (figure II.16). Un seul point a été analysé pour cette configuration.



**Figure II.16:** Analyse vibratoire en montage encasté-libre.

# **Chapitre III**

## **Résultats et Discussion**

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux réalisés au laboratoire de mécanique et structure (LMS) de l'université 08mai1945 de Guelma. Le comportement en vibration des poutres sandwichs et leurs constituants (peaux en fibres de lin, âme en liège et la résine époxyde) ont été étudiées via une analyse modale à fin de connaître leurs fréquences propres et les facteurs d'amortissement dans le cas des configurations « encastré-encastré » et « encastré-libre ».

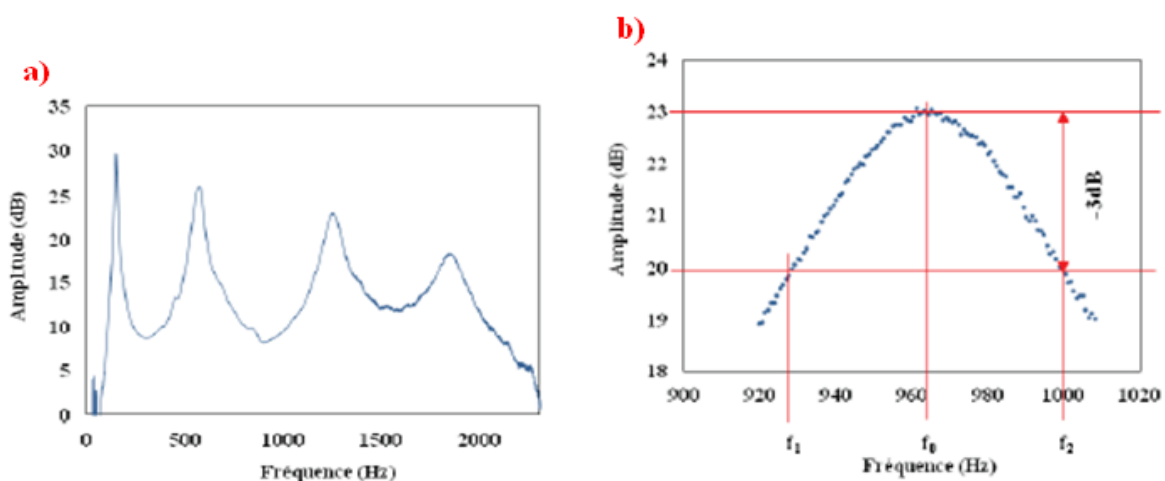
### III.2 Méthode d'analyse des résultats expérimentaux :

Des essais de vibration en configurations encastré/encastré et encastré/libre ont été réalisés avec le dispositif présenté sur la figure III.1. Différentes catégories d'éprouvettes ont été préparées et analysées. Pour chaque éprouvette testée, la fonction de réponse en fréquence (FRF) a été déterminé via un algorithme d'optimisation ME' Scope, utilisé sur les accélérimètres moyennes.

Afin d'évaluer les propriétés d'amortissement de ces matériaux, le facteur d'amortissement et les fréquences propres ont été calculé par la méthode de la bande passante connue sous la dénomination de la méthode à (-3 dB) [45]. Cette méthode consiste à isoler chaque pic de résonance de la FRF représentant l'amplitude en fonction de la fréquence. Par la suite, chaque pic de résonance permet de déterminer la fréquence de résonance propre  $f_n$  du mode  $n$  et de calculer son coefficient d'amortissement correspondant  $\eta_n$  (Eq.III.1).

$$\eta_n = \frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$$

III.1



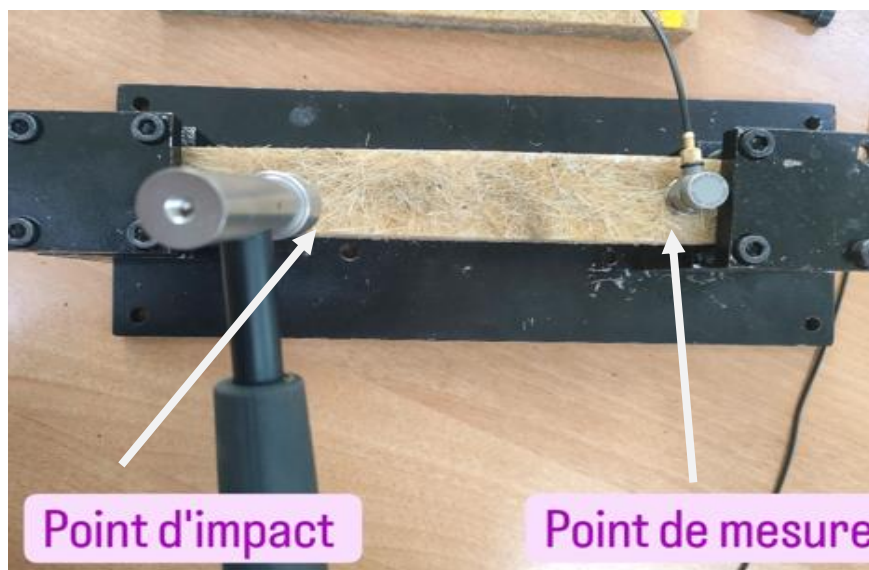
**Figure III.1:** Méthode de la bande passante, a) exemple typique d'un FRF  
Et b) mesure à (-3dB).

### III.3 Analyse et discussion des résultats :

L'étude modale expérimentale des poutres en flexion a été effectuée en utilisant une méthode d'excitation par impact au marteau (marteau de choc) figure (III.2). Les fréquences propres et les amortissements des différents modes propres des échantillons sont déterminés sous l'influence d'une valeur fixe de fréquence d'excitation [380HZ].

Trois emplacements d'impact ont été sélectionnés pour mener l'analyse modale pour le cas « encastré-encastré » et un seul point d'impact pour le cas « encastré-libre ».

Des relevés de mesures en différents points ont été effectués afin d'être certain de ne pas oublier des fréquences propres.



**Figure III.2 :** Positions des points d'impact et de mesure sur une poutre.

Pour chaque point d'impact, une moyenne de cinq accélérations correspondant à cinq coups d'excitations par marteau a été calculée (figures III.3a et III.5c). Les moyennes des accélérations pour chaque point sont présentées dans les figures (III.3b et III.5d). De plus, les fréquences propres et les amortissements des différents modes des échantillons sont déterminés via un algorithme d'optimisation ME scoop, utilisé sur les accélérations moyennes.

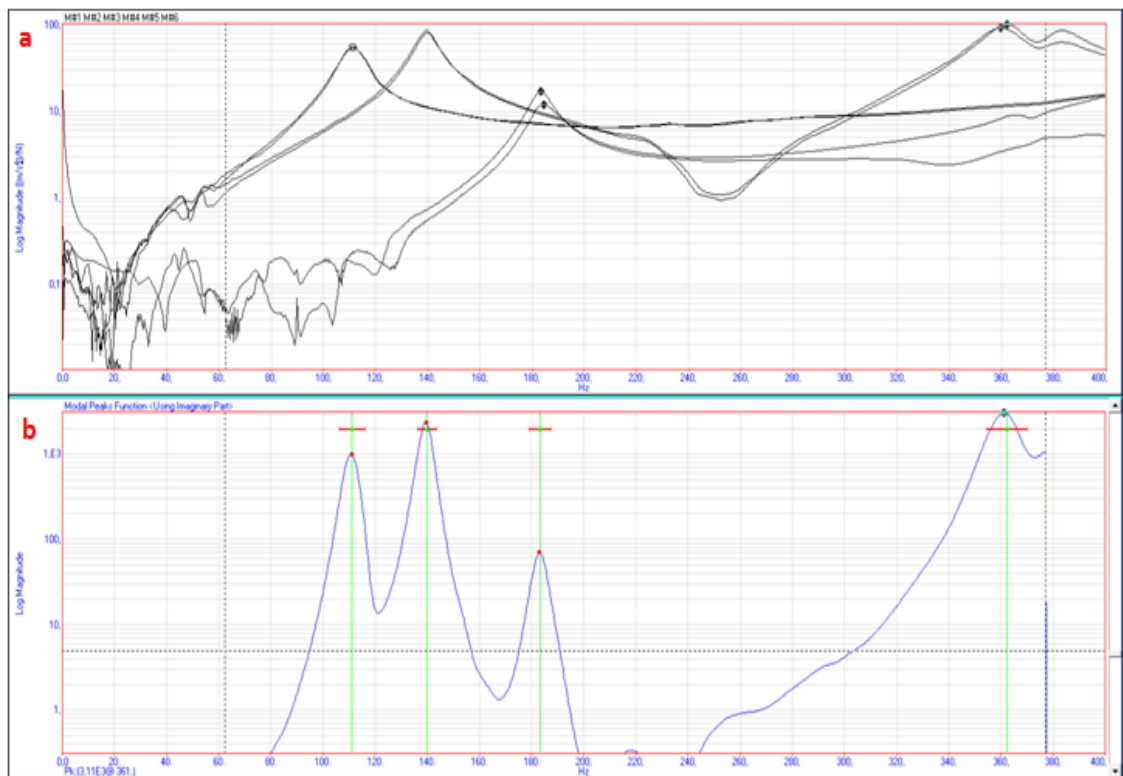
#### III.3.1 Comportement vibratoire du composite Lin/Epoxy :

Afin de comprendre le comportement vibratoire des constituants du matériau sandwich, les peaux sandwichs sont assimilées à un composite stratifié Lin/Epoxy. Ce composite est formé par deux plis en tissu de lin bidirectionnel a été ensuite analysé en

vibration. Une éprouvette de résine époxyde a d'abord été testée afin d'analyser le comportement vibratoire de la résine pure.

La figure III.3 présente les spectres de réponse à une excitation impulsionnelle de l'éprouvette en résine dans le cas « encastrement-encastrement ». Ces réponses font apparaître quatre pics correspondant aux fréquences propres de vibrations.

Le tableau III.1 donne les fréquences propres et amortissements des différents modes propres de la poutre en résine encastrement-encastrement. La valeur des amortissements modaux identifiés montre que cette structure est peu résonnante.

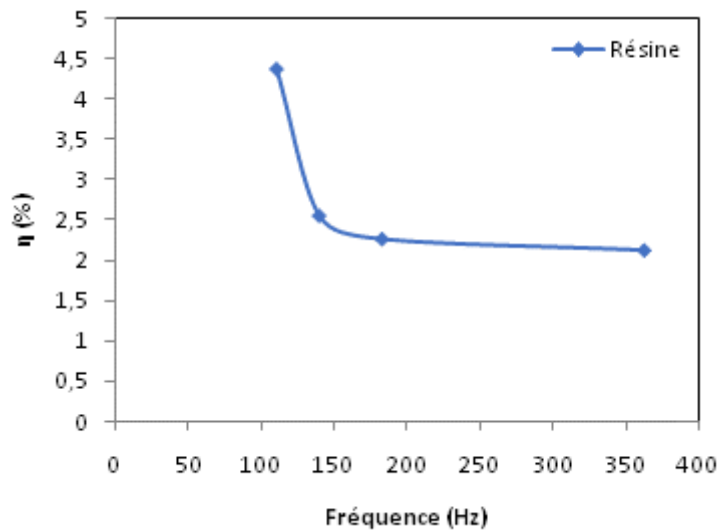


**Figure III.3:** Poutre en résine excitée « encastrement-encastrement » a) spectres de réponse et b) accélérations moyennes.

**Tableau III.1 :** Modes de vibration de la poutre en résine excitée « encastrement-encastrement ».

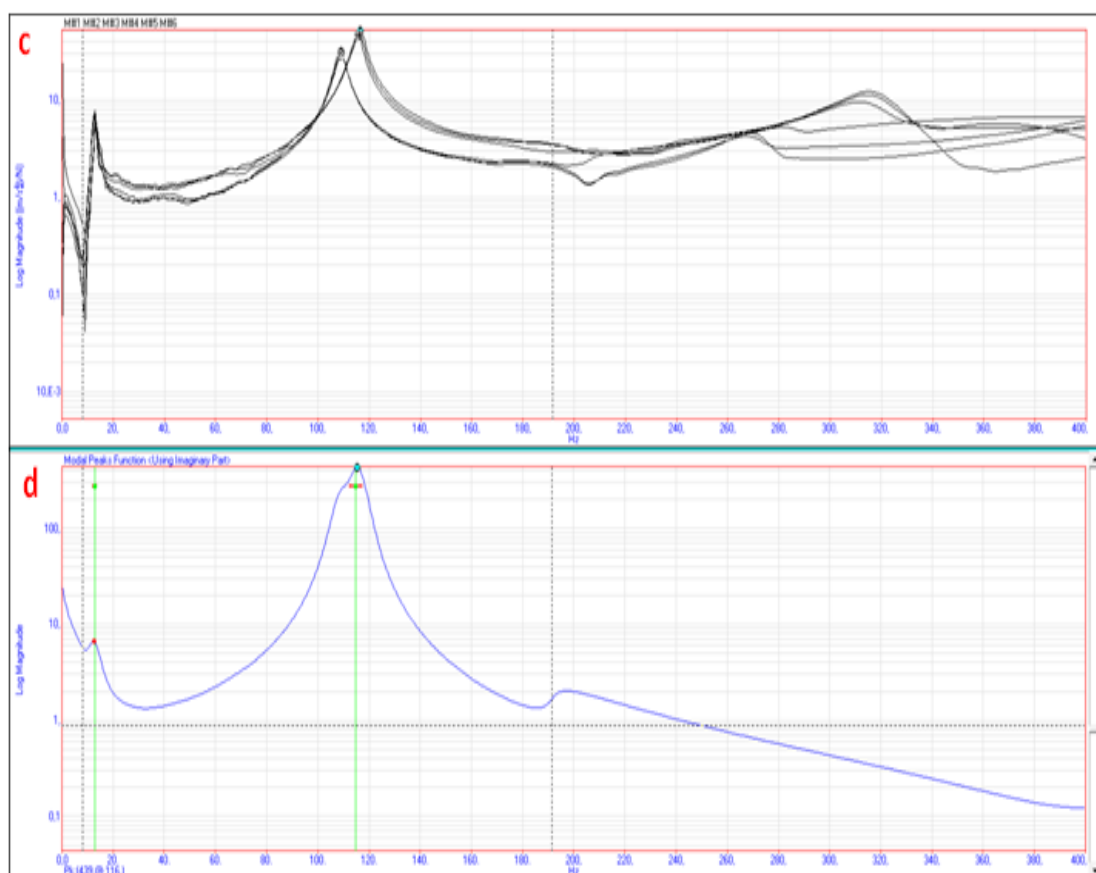
Mode	1	2	3	4
Fréquence (Hz)	111	140	183	362
Amortissement modal(%)	4,37	2,55	2,26	2,12

La figure III.4 présente l'évolution du facteur de perte en fonction de la fréquence. On constate que l'amortissement, initialement élevé (4,37%) décroît ensuite rapidement pour atteindre une valeur quasi asymptotique d'environ 2,12% pour les fréquences élevées.



**Figure III.4:** Propriétés dynamique de la résine « encasté-encasté ».

La même poutre en résine est étudiée en montage « encastre-libre », un seul point d’excitation a été utilisée où on voit l’apparition de deux pic de vibration (figure III.5).



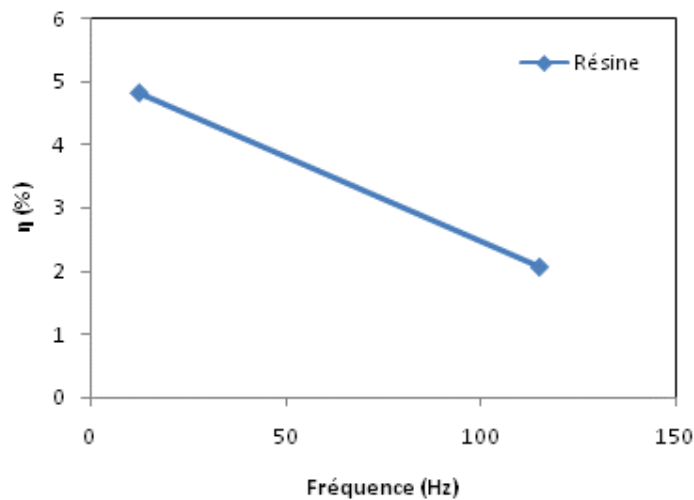
**Figure III.5:** Résine excité « encasté-libre », a) spectres de réponse et b) accélérations moyenne.

La fréquence propre et l’amortissement correspondants aux modes propres de la poutre en résine encastée-libre sont donnés par le tableau III.2.

**Tableau III.2 :** Modes de vibration de la poutre en résine excité « encastré-libre ».

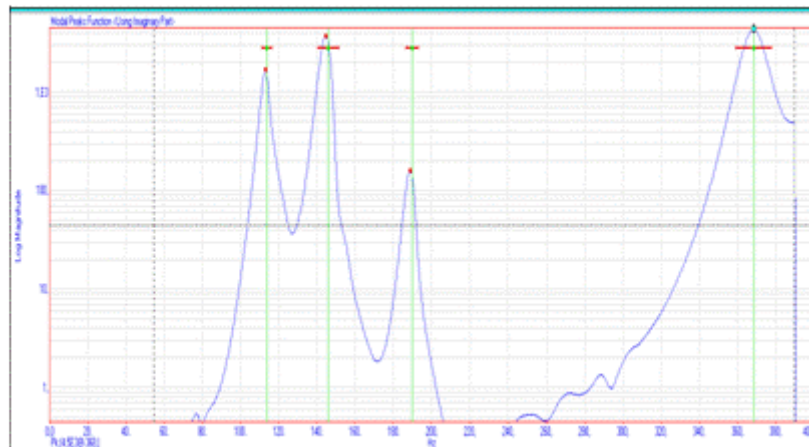
Mode	1	2
Fréquence (Hz)	12,7	115
Amortissement modal	4,81	2,06

L'évolution du facteur de perte en fonction de la fréquence (figure III.6), montre que l'amortissement, initialement élevé (4,81%) décroît ensuite rapidement pour atteindre une valeur de 2,06 % pour la fréquence supérieure qui est 115 Hz.

**Figure III.6 :** Propriétés dynamique de la résine « encastré-libre ».

La figure III.7 présente le spectre des fréquences propres du composite Lin/époxy en montage « encastré-libre » pour les quatre premiers modes de vibration. Les valeurs expérimentales ont été obtenues en moyennant les résultats d'au moins cinq essais. On remarque que le comportement viscoélastique des éprouvettes est différent de celui de la résine pure et que les fréquences varient entre 114 et 368Hz.

La fréquence propre et l'amortissement correspondants aux modes propres de la poutre en composite Lin/époxy sont illustrés dans le tableau III.2.

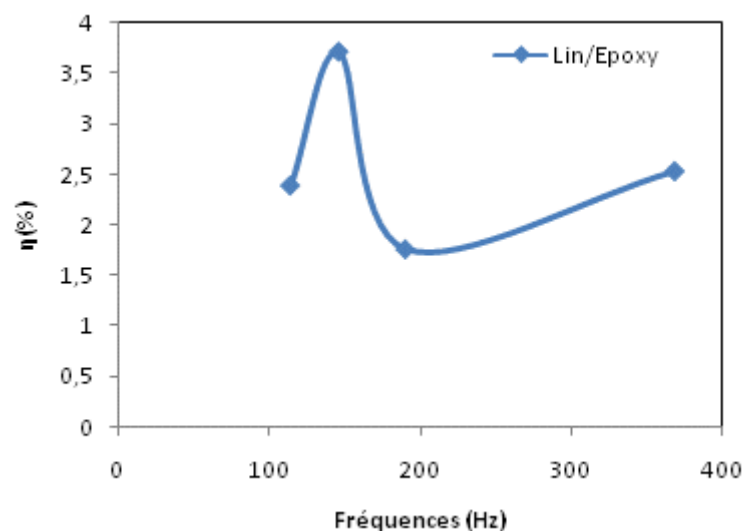


**Figure III.7:**Lin/époxy excité « encastré-encastré ».

**Tableau III.3 :** Modes de vibration de la poutre Lin/époxy excitée « encastré-encastré ».

Mode	1	2	3	4
Fréquence (Hz)	114	146	190	368
Amortissement modal(%)	2,39	3,71	1,76	2,53

La figure III.8 illustre l'évolution du facteur de perte en fonction de la fréquence pour le composite Lin/époxy en configuration « encastré-encastré ». On remarque variation aléatoire du facteur de perte en fonction de la fréquence, et que l'amortissement prend une valeur maximale de 3,71% pour le deuxième mode puis décroît ensuite rapidement pour atteindre une valeur basse de 1,76% pour le troisième mode.



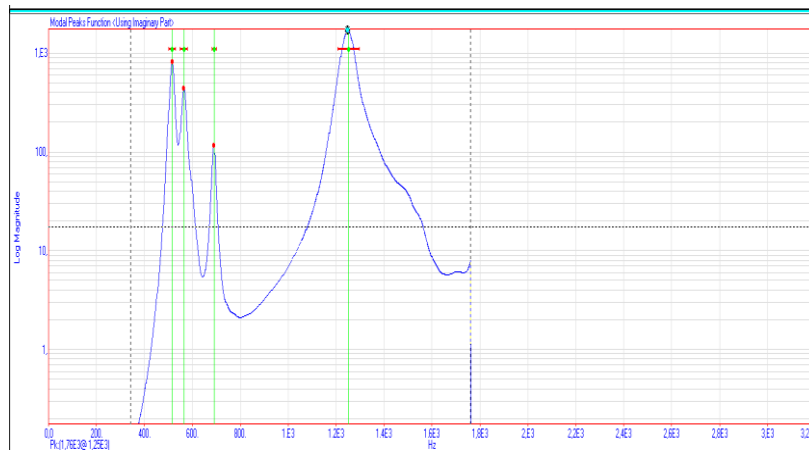
**Figure III.8:**Propriétés dynamique du Lin/époxy « encastré-encastré ».

### III.3.2 Comportement vibratoire du sandwich :

Le comportement vibratoire en flexion d'une poutre sandwich Lin/Epoxy/Liège a été étudiée en configuration « encastre-encasté » et « encastre-libre ».

Le spectre de réponse de l'éprouvette sandwich dans le cas « encastre-encasté » est obtenues en moyennant les résultats d'au moins cinq essais (figure III.9). L'apparaître de quatre pics correspondant aux fréquences propres de vibrations, qui varient entre 515 et 1253Hz.

Les fréquences propres et amortissements des différents modes propres de la poutre sandwich encastée-encastée sont donnés par le tableau III.4.

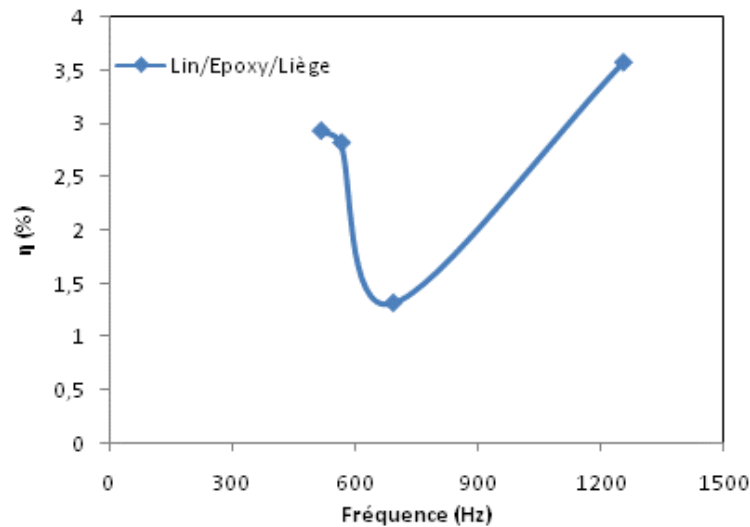


**Figure III.9:**Sandwich excité « encasté-encasté ».

**Tableau III.4 :** Modes de vibration de la poutre sandwich excitée « encasté-encasté ».

Mode	1	2	3	4
Fréquence (Hz)	515	565	691	1253
Amortissement modal(%)	2,93	2,82	1,32	3,57

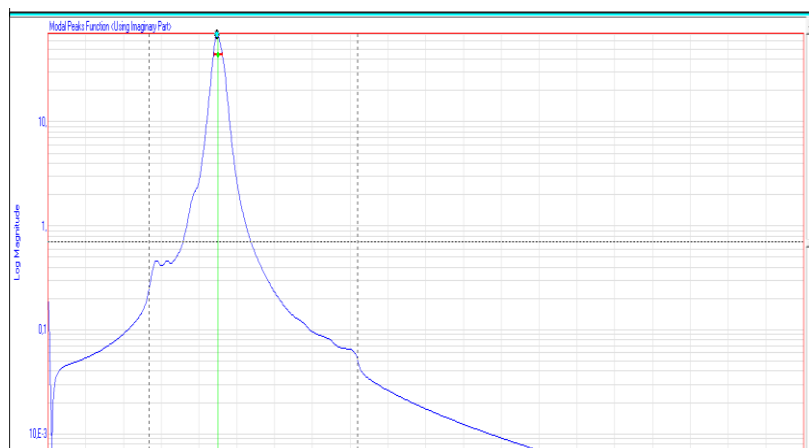
L'évolution du facteur de perte en fonction de la fréquence pour le sandwich Lin/époxy en configuration « encasté-encasté » est illustré par la figure III.10. Le comportement est presque similaire que celui du composite Lin/époxy, l'amortissement prend une valeur minimale de 1,32% pour le troisième mode puis augmente pour atteindre une haute valeur de 3,57% pour le quatrième mode.



**Figure III.10:** Propriétés dynamique du Lin/époxy/Liège « encastré-encastré ».

La même poutre sandwich est étudiée en montage « encastré-libre », un seul point d'excitation a été utilisé où on voit l'apparition d'un seul pic de vibration (figure III.11).

Le pic représente le mode 1 est correspondant à la fréquence propres de vibrations qui est 90,1Hz et un amortissement de 2,51% (tableau II.5).



**Figure III.11:** Sandwich excité « encastré-libre ».

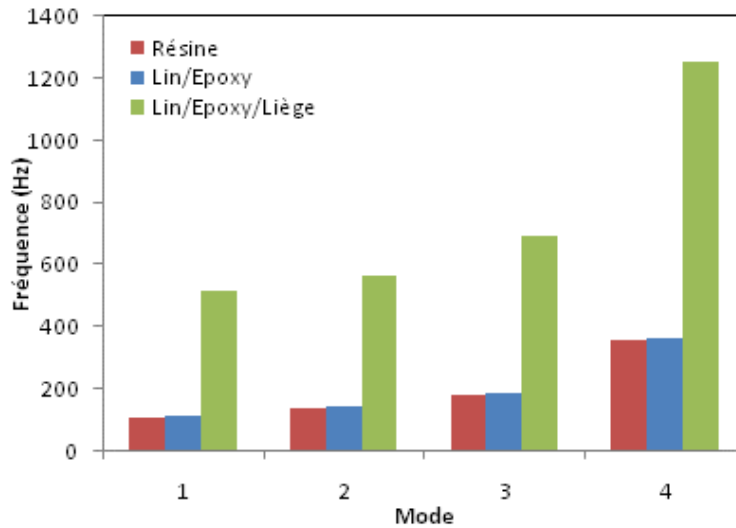
**Tableau III.5 :** Mode de vibration de la poutre sandwich excité « encastré-libre ».

Mode	1
Fréquence (Hz)	90,1
Amortissement modal	2,51

### III.3.3 Influence de la nature de la structure sur le mode vibratoire :

La figure III.12 montre la variation des fréquences propres obtenues des éprouvettes étudiées en montage encastré-encastré. On remarque que les fréquences de réponse

augmentent avec l'augmentation de la rigidité du matériau, les fréquences du sandwich Lin/Epoxy/Liège sont supérieures à celles du composite Lin/Epoxy et de la résine seule, pour les quatre pics. Les valeurs de ces fréquences sont enregistrées dans le tableau III.6.

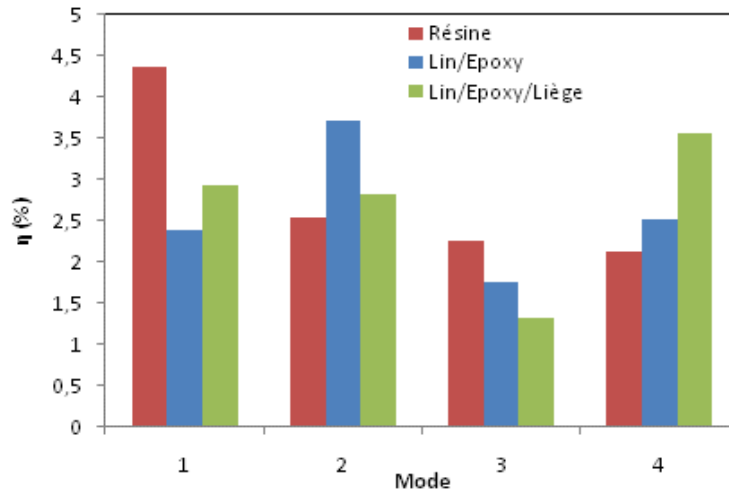


**Figure III.12:** Variation de la fréquence de réponse pour les différents matériaux en configuration « encasté-encasté ».

**Tableau III.6:** Fréquences propres des différents matériaux en configuration « encasté-encasté ».

Mode	Fréquence(Hz)		
	Lin/Epoxy	Résine	Lin/Epoxy/Liège
1	114	111	515
2	146	140	565
3	190	183	691
4	368	362	1253

La figure III.13 illustre la variation du facteur de perte des éprouvettes étudiées en montage encasté-encasté. On constate que pour les quatre pics le coefficient d'amortissement varie aléatoirement pour les différents matériaux étudiés, et les valeurs des différents modes sont enregistrées dans le tableau III.7.



**Figure III.13:** Variation du facteur d'amortissement pour les différents matériaux en configuration « encastré-libre ».

**Tableau III.7:** Amortissements des différents matériaux en configuration « encastré-libre ».

Mode	Amortissement (%)		
	Lin/Epoxy	Résine	Lin/Epoxy/Liège
1	2.39	4.34	2.93
2	3.71	2.55	2.82
3	1.76	2.66	1.32
4	2.53	2.12	3.57

#### III.4 Conclusion :

Le comportement dynamique de la structure sandwich et de ses constituants est évalué dans le cas des vibrations en flexion des poutres. Les fréquences propres et les amortissements ont été déduits des essais par une méthode de fonction de réponse (FTF) en fréquence à une excitation par impact.

Les courbes des fonctions réponses en fréquences font apparaître des pics qui correspondent à la résonance de la poutre sandwich. Ces pics de résonance sont décalés vers les valeurs supérieures pour le cas du sandwich par rapport à ces constituants. Ce décalage est dû à l'augmentation de la rigidité en flexion de la poutre sandwich et il est beaucoup plus important lorsque la fréquence de résonance augmente. Plus la dureté est élevée, plus les valeurs des fréquences et de l'amortissement sont élevées.

# Conclusion générale

# Conclusion Générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude porte sur l'analyse du comportement vibratoire d'un matériau composite sandwich et leurs constituants.

Dans un premier temps, en se basant sur une analyse bibliographique, les différents constituants du sandwich ont été sélectionnés. Une résine époxyde a été associée à des fibres de lin et à une âme en liège afin de réaliser une structure possédant des propriétés spécifiques élevées. Le procédé de moulage par la technique du sac par l'imprégnation de la résine liquide en proportions a permis de réaliser des composites stratifiés ainsi que du sandwich. Dans un second temps, la réalisation d'un support de maintien des éprouvettes pour deux configurations « encastré-encastré » et « encastré-libre » visant à faciliter les essais de vibration.

Enfin, une étude du comportement vibratoire du sandwich et de ces constituants a été réalisée. L'analyse modale expérimentale au marteau de choc a été présentée afin d'identifier les fréquences propres et amortissements modaux. Le composite Lin/Epoxy a révélé une capacité à dissiper l'énergie de vibration. Par conséquent, la structure sandwich Lin/Epoxy/liège a montré des propriétés d'amortissement supérieures aux poutres étudiées.

## Références :

- [1] Belghamri A, Ben khoukha M, « Comportement vibratoire des matériaux composites », mémoire master, université KasdiMerbah Ouargla, année 2018, p 3.
- [2] Arthur M, « Elaboration et caractérisation d'une structure composite sandwich à base de constituants naturels », thèse doctorat, université du Maine, année 2016, p14-15.
- [3] Bouali Kh, Guergour Kh, « Estimation des fréquences de vibration des plaques sandwichs en matériau hétérogène », université Ibn Khaldoun de Tiaret faculté des sciences appliquées, 2021– 2022, p 5.
- [4] Moustapha I, « Analyse expérimentale et par élément finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés », Université du Maine, 2013, p 6.
- [5] Chemami A, « Etude de la performance des matériaux composites sandwichs application en fatigue », université Badji Mokhtar Annaba, année 2012, p 9.
- [6] Zemour B, Boulemlakher F, « Exploration des propriétés mécaniques du liège local », université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique, juin 2019, p 3.
- [7] Saadia A, « Etude de l'influence de la résine polyester sur le comportement mécanique du composite à renfort en fibre de jute », thèse doctorat, année 2018, p 6 -12, p 26 - 27.
- [8] Belhadj A, Mokhtar Bennaceur H, « Etude et comparaisons de l'endommagement d'un composite unidirectionnel à des différents types de fibres naturelles », université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, année 2020, p 14-17.
- [9] <https://www.modeintextile.fr/premier-coton-de-france-cultive/>, 05/06/2024, 18 :28.
- [10] Bakhouch S, Mayout F, « Matériaux bio-composites à matrice bio-polymère renforcés par des fibres végétales : Relation structure – propriétés », université A. Mirade Bejaia, année 2020, p 13, p16.
- [11] Berkhou R, Soufi S, « Elaboration et Caractérisation d'un Bio-composite à Base de PEHD Recyclé et de la Fibre de Lin », mémoire master, université 08 mai 1945 Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie des Procédés, juillet 2019, p 15-17, p28.
- [12] Moumen T, polycopie de cours les composites, spécialité master I chimie des matériaux Université Ibn khaldoun –Tiaret, P 8-9.

- [13] Kharoubi M, « Etude du comportement mécanique de matériaux composites sous chargement cyclique et dynamique », université 08 mai 1945 Guelma département de génie mécanique, thèse de doctorat, Octobre 2009, p 11.
- [14] Jean-Marie Berthelot 5<sup>ème</sup> édition, « Comportement mécaniques et analyses des structures ».
- [15] Dossier pédagogique, « Les matériaux composites », dossier créé avec la collaboration de Marc Marzano - Action Composite Pascal Celle – GNFA 2014.
- [16] El Gharbi, A, « Analyse du comportement dynamique des plaques stratifiées rectangulaires minces symétriques en matériaux composites », université Mohamed Khider Biskra, année 2010, p 4.
- [17] Belhenini S, Matériaux Composites, Responsable de l'équipe de formation "Construction Mécanique", université Belhadj-Bouchaib d'Ain Témouchent, 2022/2023, p7.
- [18] Latasoccalingame, « Etude des scénarios de fin de vie des biocomposites Vieillessement et transformation de bio-composites PP/farine de bois et PLA/fibres de lin », de Montpellier 2, l'école doctorale Sciences des Procédés – Sciences des Aliments (SP-SA) et de l'unité de recherche C2MA – Ecole des Mines d'Alès.
- [19] Achchaq F, « Analyse thermogravimétrique appliquée aux matériaux isolants fibreux », université de Picardie Jules Verne 33, rue Saint Leu – 80039 Amiens Cedex, année 2008.
- [20] Abidi S, « Influence de la micro-nanostructure sur les transferts moléculaires, électroniques et thermiques », thèse doctorat, Université de Toulon Matériaux composites à haute tenue thermique, 18 juin 2014, P 49.
- [21] Y Lakhdar, « Etude de la Stabilité et de la Dégradation de Polymères et Mélanges de Polymères à Base de Styrène », doctorat en sciences : Chimie, université Mohamed Khider – Biskra, année 2015, p55.
- [22] Adoté Sitou Blivi, « Effet de taille dans les polymères nano renforcés : caractérisation multi-échelles et modélisation », thèse de doctorat, 11 juillet 2018, P 9.
- [23] Article : les trois principales exigences des systèmes pour des essais DMA précis (MTS)
- [24] Khelifa N, « Comportement en Fatigue et Endommagement des Composites Stratifiés », thèse doctorat, université Badji Mokhtar Annaba, Année 2016, p 28.
- [25] Hammami M, « Comportement mécanique et vibratoire des composites stratifiés sains et en dommages par délaminage », université de Sfax (Tunisie), année 2016.
- [26] L'essai de fatigue 'Centre de vérifications de Metz'.
- [27] Sezgin FE, 2008, « Mechanical behavior and molding of honeycomb laminated Fiber/polymer sandwich structures, these de doctorat, Université Urla-Izmir, Turkey.

- [28] Smith SA Shivakumar KN, « Modified Mode-I Cracked Sandwich Beam (CSB) Fracture Test », 42nd Structures, structural Dynamics and Material Conference, April 16-19: 1221-1232.
- [29] Mamalis AG Manolakos DE Ioannidis MB Papapostolou DP 2005, « On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: experimental », *Composite Structures* 71: 246–257.
- [30] K L Reifsnider, K Schulte, J C Duke, « Long-Term Fatigue Behavior of Composite Materials », *Long-Term Behavior of Composites*, ASTM STP, Philadelphia, p 136-159.
- [31] M Dody, « Modélisation des caractéristiques mécaniques et études expérimentales de l'endommagement d'un composite », université de Franche-Comté, Besançon, 1985.
- [32] Davies GAO, Hitchings D, Besant T, Clarke A, Morgan C, « Compression after impact strength of composite sandwich panels », *Composite Structures*, année 2004.
- [33] R Pintelon, P Guillaume, S Vanlanduit, D Belder, Y Rolain, « Identification of Young's modulus from broadband modal analysis experiments », *Mechanical systems and signal processing*, 18, 699-726, année 2003.
- [34] Gasparetto A, Giovagnoni M, « An experimental technique for complete dynamic characterization of a viscoelastic material », *Journal of sound and vibration*, 272, 1013- 1032, année 2003.
- [35] Y Liao, V Wells, « Estimation of complex modulus using wave coefficients », *Journal of Sound and Vibration*, 295, 165-193, année 2006.
- [36] Duc F, Bourban P, Manson J, « The role of twist and crimp on the vibration behaviour of flax fiber composites », *Composites Science and Technology* 2014; 102: 94-99.
- [37] Prabhakaran, S, Krishnaraj, V, Senthilkumar, M, Zitoun R, « Sound and Vibration Damping Properties of Flax Fiber Reinforced Composites », *Procedia Engineering* 2014; 97: 573-581.
- [38] Debbah Y, Université des Frères Mentouri Constantine Institut des Sciences et Techniques Appliquées, Cours de : Meca 06- mécanique de vibration.
- [39] Souab A, « Etude de l'usinage des matériaux composite par analyse vibratoire », Université Badji Mokhtar Annaba, année 2017-2018, p 17.
- [40] Cheour Kh, « Analyse du comportement en vibration des matériaux composites à fibres végétales », université de Reims, année 2017, p 42-44.
- [41] Kouahlia I, conception, « Elaboration et caractérisation d'un nouveau bio composite à renfort végétal », université de 20 aout 1955 Skikda faculté de technologie, juin 2018.
- [42] Anne Hallonet, Développement et Caractérisation d'un Matériau Composite à Base de

Fibres de Lin, Application au Renforcement de Structures en Béton par Collage Externe, Thèse de Doctorat de L'université de Lyon, 08/07/2016.

[43] A. Belaadi, M. Boumaaza, S. Amroune, M. Bouchak, Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06217-6>.

[44] Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens, ASTM, D 5083 – 02.

[45] Essassi K, Rebiere J, L El Mahi, A Ben Souf, M. A Bouguecha, A, & Haddar, M. Dynamic characterization of a bio-based sandwich with auxetic core: Experimental and numerical study. *International Journal of Applied Mechanics*, 11(02), 1950016, (2019).