

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département de génie mécanique**  
Laboratoire Génie Mécanique et Développement

Mémoire de Master en construction mécanique "solides"

***Analyse modale expérimentale des poutres composites sandwichs  
à base de fibre naturelle***

HACHICHI Younes

Sous la direction de M. Saïd RECHAK      Professeur

Présenté et soutenu publiquement le : 04/07/2017

**Composition du jury :**

Président	M. Arezki SAMAILI	Professeur	ENP Alger
Promoteur	M. Saïd RECHAK	Professeur	ENP Alger
Examineur	M. Mohammed BENBRAIKA	MA.A	ENP Alger

ENP 2017



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département de génie mécanique**  
Laboratoire Génie Mécanique et Développement

Mémoire de Master en construction mécanique "solides"

***Analyse modale expérimentale des poutres composites sandwichs  
à base de fibre naturelle***

HACHICHI Younes

Sous la direction de M. Saïd RECHAK      Professeur

Présenté et soutenue publiquement le : 04/07/2017

**Composition du jury :**

Président	M. Arezki SAMAILI	Professeur	ENP Alger
Promoteur	M. Saïd RECHAK	Professeur	ENP Alger
Examineur	M. Mohammed BENBRAIKA	MA.A	ENP Alger

ENP 2017

# *Dédicaces*

*Avec une immense joie et un énorme plaisir, je dédie ce modeste travail à  
mes très chers :*

*A la prunelle de mes yeux, celle qui m'a mis au monde et m'a donné tout  
l'amour et la tendresse: ma maman.*

*Au merveilleux homme qui m'a tout donné: mon père.*

*A mon frère Wassim et ma sœur Siham, qui ont toujours été là pour  
moi.*

*A mes professeurs qui par leur patience et leurs conseils ont fait de moi ce  
futur ingénieur.*

*A mes amis et camarades.*

*Je ne saurais jamais témoigner de la chance que j'ai de vous avoir, tous  
dans ma vie.*

*Merci*

*Hachichi Pounes.*

# Remerciements

Tout d'abord je remercie "Allah" le tout puissant qui m'a donné la volonté, le courage et surtout la patience afin de réaliser ce modeste travail.

Je remercie vivement, monsieur le professeur et chef du département de génie mécanique Saïd **REFOUK** d'avoir assuré la direction de ce travail, et nous avoir apporté rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement.

Je remercie également monsieur le président du jury Mr Arezki Smaili et mon examinateur monsieur Mohammed Benbraïka d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je veux aussi adresser mes sincères remerciements à monsieur Djamel Eddine **KARF** pour son précieuse aide et son rôle primordial dans la partie expérimentale de ce travail.

Je remercie encore les enseignants de l'école nationale polytechnique d'Alger et en particulier les enseignants du département de génie mécanique.

Mes vifs remerciements s'adressent également à toute personne qui a contribué à ma formation ou participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

## ملخص:

يشمل هذا المشروع دراسة تجريبية لتحليل التواتري للبنية المجسدة ذات الهيكل المركب من نوع "سندويتش" التي تعتمد على الاليف النباتية. هاته الدراسة تعتمد على قياس الجواب التواتري في الجهة الحرة. الجواب التواتري من المحتمل ان يتشكل عن طريق جهاز قياس التسارع او جهاز قياس الاهتزازات. الخصائص التواترية تقاس بالإجابة اللحظية او عن طريق الدالة التواترية الجوابية.

## الكلمات المفتاحية :

التحليل التواتري ، سندويتش ، الاليف النباتية ، الجواب التواتري ، الدالة التواترية الجوابية.

## Abstract:

This master project consists of an experimental study of the modal analysis of the composite sandwich developed with fiber of palm tree date palm designed as skins and Kornav conceived as soul of the sandwich. The study is dedicated to the measure of the answer of the free extremity when the beam is subjected to an excitement and embedded at the other end. The measure of the answer of the structure can be made locally, by means of an accelerometer or of a vibrometer laser mono-point. The modal properties of the beam can be measured by means of the temporal answer, or by the function of answer frequency, which presents the moderate answer according to the frequency.

## Key Words:

Modal analysis, composite sandwich, natural fibers, function of answer frequency.

## Résumé:

Ce travail porte sur l'étude expérimentale d'analyse modale du composite sandwich élaboré à base de fibre de palmier dattier conçu comme peau et du Kornav conçu comme âme du sandwich. L'étude est consacrée à la mesure de la réponse de l'extrémité libre lorsque la poutre est soumise à une excitation et encastrée à l'autre extrémité. La mesure de la réponse de la structure peut s'effectuer localement, au moyen d'un accéléromètre ou d'un vibromètre laser mono-point. Les propriétés modales de la poutre peuvent être mesurées au moyen de la réponse temporelle, ou par la fonction de réponse en fréquence (FRF) obtenue, qui présente la réponse mesurée (déplacement, vitesse ou encore accélération) en fonction de la fréquence.

## Mots clés :

Analyse modale, composite sandwich, fibres naturelles, fonction de réponse en fréquence.

## Table des matières :

Liste des figures	
Nomenclature	
<b>Introduction générale et état de l'art</b> .....	10
<b>Chapitre 1 : Élaboration du matériau sandwich et préparation des éprouvettes</b> .....	12
1.1 Fibres de palmier dattier.....	12
1.1.1 Extraction et préparation des fibres.....	12
1.1.2 Traitement des fibres.....	13
1.2 Collecte et production de Pétiole (Kornav).....	15
1.3 Elaboration du sandwich.....	16
1.3.1 Elaboration de la peau du sandwich (stratifiés).....	16
1.3.2 Réalisation de l'âme du sandwich.....	18
1.4 Conclusion.....	20
<b>Chapitre 2: Analyse modale expérimentale des poutres composites sandwiches</b>	
<b>à base de fibre naturelle</b> .....	22
2.1 Composites bio sourcés et vibrations : revue de la littérature.....	22
2.2 Analyse modale expérimentale des poutres.....	23
2.3 Mesure de l'amortissement par la méthode de la bande passante à -3 dB.....	24
2.4 Mesure de l'amortissement par la méthode de Circle Fitting.....	25
2.5 Etude expérimentale du comportement vibratoire des constituants.....	25
2.5.1 Protocole expérimental.....	25
2.5.2 Comportement vibratoire des composites Fibre de palmier dattier/Epoxy.....	27
2.5.3 Comportement vibratoire de l'âme en Korvav.....	29
2.6 Comportement vibratoire des poutres sandwiches.....	31
2.6.1 Influence de l'épaisseur de l'âme.....	31
2.6.2 Influence de la densité de l'âme.....	32
2.7 Performances des matériaux étudiés.....	33
2.7.1 Comparaison des propriétés.....	33
2.8 Conclusion.....	34
<b>Conclusion générale</b> .....	35
Bibliographie .....	36

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Tronc d'arbre de dattier montrant les fibres de surface de dattier.....	13
<b>Figure 1.2</b> : Les fibres de surface de palmier dattier à l'état brute.....	13
<b>Figure 1.3</b> : Les fibres de surface de palmier dattier après défilage en différents calibres selon leurs diamètres .....	13
<b>Figure 1.4</b> : Traitement des fibres avec une solution alcaline NaOH.....	14
<b>Figure 1.5</b> : Séchage des fibres après traitement à l'air libre.....	14
<b>Figure 1.6</b> : (a) étuve électrique de $T_{max} = 1200^{\circ}C$ ; (b) fibres séchées dans une étuve.....	15
<b>Figure 1.7</b> : Pétiole de palmier dattier.....	15
<b>Figure 1.8</b> : Produits résidu du broyage après tamisage avec deux dimensions,(a) calibre 1;(b) calibre 2.....	16
<b>Figure 1.9</b> : (a) Schéma représentatif des stratifiés avec l'orientation des fibres ; (b) Stratifié au cours d'élaboration ; (c) Stratifié fini de quatre couches $[0/90]_2$ .....	16
<b>Figure 1.10</b> : Principe du moulage par compression à froid.....	17
<b>Figure 1.11</b> : (a) (b) mise en œuvre du stratifié méthode de compression à froid; (c) Stratifié fini (Epoxy/fibre de palmier).....	17
<b>Figure 1.12</b> : Produit final de la mousse du sandwich.....	18
<b>Figure 1.13</b> : (a) Peau inférieure du sandwich ; (b) Âme en mousse ; (c) Peau supérieure du sandwich.....	19
<b>Figure 1.14</b> : Schéma représentatif de la structure sandwich.....	19
<b>Figure 1.15</b> : Panneau sandwich élaboré avec les peaux stratifiées en fibre de palmier dattier et âme en mousse en Kornav.....	19
<b>Figure 1.16</b> : Les éprouvettes découpées selon la norme ASTM D-2990 ( $200mm \times 25mm \times 12mm$ ).....	19
<b>Figure 2.1</b> : Exemple de FRF d'une poutre sandwich.(a) Diagramme et Bode et (b) représentation du mode 2 dans le plan de Nyquist.....	24
<b>Figure 2.2</b> : Illustration de la méthode de bande passante à -3dB sur un pic de résonance.....	24
<b>Figure 2.3</b> : Paramètres du cercle d'interpolation pour la méthode de Circle-Fitting.....	25
<b>Figure 2.4</b> : Dispositif expérimental d'analyse modale.....	26
<b>Figure 2.5</b> : Propriétés dynamiques de la résine Epoxy.....	27
<b>Figure 2.6</b> : Propriétés dynamiques de la GreenPoxy56.....	27
<b>Figure 2.7</b> : Propriétés dynamiques des composites unidirectionnels. (a) facteurs de perte ; (b) modules d'Young.....	28

<b>Figure 2.8</b> : Propriétés dynamiques du Kornav en flexion.....	29
<b>Figure 2.9</b> : Configuration sandwich pour l'essai VBT.....	30
<b>Figure 2.10</b> : Propriétés dynamiques de l'âme en Kornav en cisaillement.....	31
<b>Figure 2.11</b> : Influence de l'épaisseur de l'âme sur l'amortissement des poutres sandwichs.....	32
<b>Figure 2.12</b> : Influence de la masse volumique de l'âme sur l'amortissement des poutres sandwichs.....	33
<b>Figure 2.13</b> : Comparaison des propriétés vibratoires des éco-composites avec des matériaux équivalents non-biosourcés :(a) stratifiés; (b) sandwichs.....	34

## Nomenclature.

$V_{fk}$ : Fraction volumique du Kornav.

$V_{m_r}$ : Fraction volumique du Résine Epoxy.

$f_r^i$ : La fréquence de résonance du mode  $i$ .

$\xi_i$ : Coefficient d'amortissement modal.

$\eta_i$ : Facteur de perte associé au mode  $i$ .

$\Delta_f$ : Largeur de la bande passante.

$\omega_r^i$ : Pulsation de résonance du mode considéré  $i$ .

FRF: Fonction de réponse en fréquence.

$e_a$ : Epaisseur de l'âme.

$\rho_a$ : Masse volumique du Kornav.

VBT: Vibration Beam Technique.

$\eta_a$ : L'amortissement en cisaillement de l'âme.

$G_a$ : Module de cisaillement de l'âme.

$\rho_p$ : Masses volumiques des peaux.

$E$ : Module d'Young des peaux.

$f_n$ : Fréquence de résonance du mode  $n$  des peaux.

$f_s$ : Fréquence de résonance du sandwich.

$e_p$ : Epaisseur des peaux.

$l$ : Longueur totale de la poutre.

$\eta_s$ : Facteur de perte de la poutre sandwich.

$C_n$ : Coefficient dépendant du mode  $n$  considéré.

***INTRODUCTION GENERALE ET  
ETAT DE L'ART***

### INTRODUCTION GENERALE ET ETAT DE L'ART :

Depuis plusieurs décennies, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés par les industriels du transport pour permettre l'allègement des structures avec une perte minimale de propriétés mécaniques. 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. Toutefois, l'augmentation de la rigidité spécifique de ces matériaux peut poser certains problèmes vibratoires. Les structures deviennent en effet plus résonantes. Certains de ces problèmes peuvent être résolus par l'ajout local d'une masse pour décaler les fréquences de résonance hors des plages de sollicitation des structures, mais une telle solution est contradictoire avec les objectifs initiaux de réduction de masse. De ce fait, des "patches" localement amortissants peuvent être insérés dans les structures au niveau des zones sensibles. Ceux-ci peuvent fonctionner soit de manière passive, en utilisant par exemple des matériaux viscoélastiques dissipant l'énergie vibratoire, soit de manière active. On trouve en effet de nombreuses solutions et études utilisant par exemple des piézoélectriques comme capteurs/actionneurs, capables de rigidifier localement la structure si elle approche d'une certaine fréquence et réduisant ainsi les problèmes de résonance. Pourtant, ces solutions "intelligentes" restent coûteuses et complexifient la fabrication des matériaux. De plus, la part croissante de matériaux composites, souvent assemblés par collage, réduit le nombre de liaisons mécaniques (rivets, boulons) qui dissipaient jusqu'alors une certaine quantité de l'énergie vibratoire par effet de structure.

Progressivement, les composites renforcés de fibres naturelles apparaissent comme une alternative intéressante à certains types de composites courants, offrant de nouvelles perspectives pour répondre aux exigences réglementaires et aux contraintes normatives de plus en plus sévères sur le plan écologique. En effet, certaines fibres végétales présentent des propriétés mécaniques ramenées à la masse volumique proches de celles des fibres de verre. De plus, dans un contexte de développement durable, la valorisation de ressources naturelles locales et renouvelables, comme des fibres agrosourcées, permet de diminuer l'impact environnemental des composites en réduisant par exemple la quantité d'énergie de production requise. De surcroît, l'amélioration de la fin de vie de ces matériaux est envisageable, en proposant par exemple des solutions recyclables ou biodégradables. Malgré ces avantages, de nombreuses questions restent posées quant à la possibilité d'utiliser ce type de composites à une plus grande échelle. Certaines problématiques liées à la compréhension de différents aspects de leur comportement ainsi qu'à leur durabilité doivent en effet être résolues.

# ***CHAPITRE 1***

***Élaboration du matériau sandwich et  
préparation des éprouvettes***

## Chapitre 1: Élaboration du matériau sandwich et préparation des éprouvettes

### Introduction :

L'exploitation des palmiers dattiers produit annuellement une quantité importante de bois, estimée à environ 250000 tonnes pour l'Algérie seulement et presque 2 millions de tonnes mondialement [2]. Ces parties renouvelables de l'arbre sont actuellement très peu exploitées. Ce type de matériau est ainsi actuellement envisagé comme matériau de renfort pour les composites pouvant être utilisé dans plusieurs domaines.

Le palmier dattier a une structure fibreuse, l'incorporation des fibres dans les résines participe à la fois à l'amélioration des propriétés mécaniques et physiques. Cependant, le vrai rôle des fibres est qu'elles agissent sur la matrice de deux manières, la première consiste à la limitation et au contrôle des fissures, en essayant de stopper leur influence, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance, et la deuxième c'est la transformation du matériau d'un comportement fragile à un comportement ductile se traduisant par un retard dans l'apparition des fissures

Plusieurs chercheurs soutiennent l'idée que les fibres ont une influence sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des composites par le biais de nombreux paramètres parmi lesquelles on trouve : la forme et l'état de surface des fibres, la longueur ( $l_f$ ) et le diamètre ( $d_f$ ), l'élanement ou le rapport  $l_f/d_f$ , la nature des fibres, la rigidité des fibres, le taux de fibres incorporées et la distribution et l'orientation des fibres au sein de la matrice.[1]

Dans le but d'améliorer les performances mécaniques des différents matériaux composites, plusieurs travaux ont été effectués. L'un de ces axes de recherches récents est la mise au point d'un matériau composite à base de fibres. La maîtrise du comportement de ce nouveau matériau composite nécessite une multitude d'essais expérimentaux qui demandent parfois l'adaptation des méthodes d'essais classiques aux conditions nouvelles. En effet, l'incorporation des fibres dans la matrice du polymère à différents pourcentages et différentes longueurs change le comportement de cette dernière, ce qui complique souvent le déroulement de quelques essais classiques.

Dans ce qui suit nous allons exposer la production des fibres partons de la sélection-défilage et finissons par le traitement des fibres. Par la suite on passe à la méthode d'élaboration du composite sandwich par le biais de la méthode de moulage par compression à froid.

### 1.1 Fibres de palmier dattier :

#### 1.1.1 Extraction et préparation des fibres :

En premier lieu, notre étude s'intéresse aux fibres extraites de la surface du tronc de palmier dattier. Ces dernières, ont été collectées à partir de palmiers dattiers de la région du Sahara Algérien de même source.

Les fibres rassemblées sont nettoyées utilisant l'eau pour que n'importe quelle poussière ou impuretés soient enlevés. Alors ils sont immergés dans l'eau qui est à température ambiante pendant un jour pour qu'ils deviennent flexibles et pour faciliter le défibrage.

Les fibres sont séparées en fibres individuelles dans de l'eau. Les fibres individuelles sont bien lavées dans de l'eau une deuxième fois pour enlever les impuretés restantes et la couche de lignine qui entourent la fibre et qui gênent l'adhérence. Ensuite, elles sont coupées aux longueurs voulues.

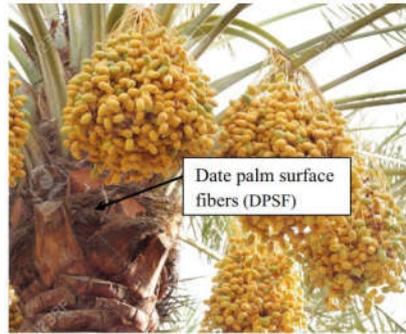


Figure 1.1 : Tronc d'arbre de dattier montrant les fibres de surface de dattier. [3]

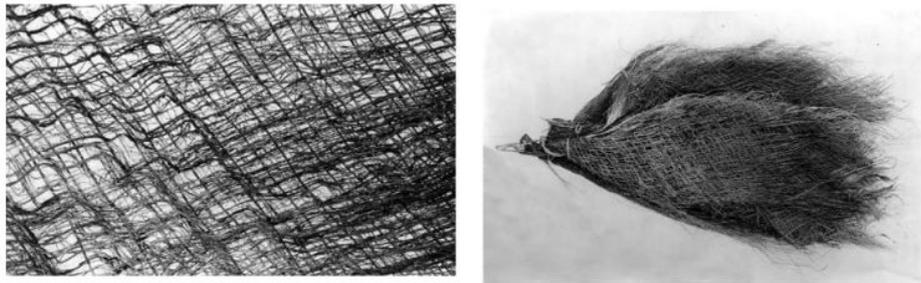


Figure 1.2 : Les fibres de surface de palmier dattier à l'état brute. [3]



Figure 1.3 : Les fibres de surface de palmier dattier après défibrage en différents calibres selon leurs diamètres.

## 1.1.2 Traitement des fibres :

### 1.1.2.1 Traitement Alcalin :

Pour l'incorporation dans des composites à base de polymères, généralement les fibres doivent subir un traitement alcalin.

Ce traitement a pour but d'améliorer les caractéristiques adhésives de la surface des fibres en éliminant les impuretés naturelles et artificielles ainsi qu'une partie des hémicelluloses qui influe sur les propriétés d'absorption notamment celle de l'humidité. En effet, la réduction des hémicelluloses dans ces fibres réduit la capacité d'absorption d'eau dans la fibre. [4,5].

Le traitement alcalin est décrit chimiquement par l'équation suivante (1.1):

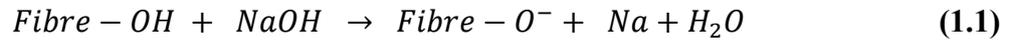


Figure 1.4 : Traitement des fibres avec une solution alcaline NaOH.

#### 1.1.2.2 Séchage des fibres :

Après le traitement chimique des fibres par la soude (3% et 6%), elles sont séchées à l'air libre pendant 24 heures puis dans une étuve à 100°C pendant 90 minutes jusqu'à ce que toute l'eau s'évapore, laissant un échantillon cohérent séché.



Figure 1.5 : Séchage des fibres après traitement à l'air libre.



(a)

(b)

Figure 1.6 : (a) étuve électrique de  $T_{\max} = 1200^{\circ}\text{C}$ ; (b) fibres séchées dans une étuve.

Après séchage les fibres sont bien "isolées" pour éviter l'humidification.

## 1.2 Collecte et production de Pétiole (Kornav) :

Les régions du sud Algérien disposent de ressources végétales abondantes, mais peu exploitées et présentant de bonnes caractéristiques physiques et mécaniques tel que les pétioles et les déchets cellulosiques du palmier dattier produits abondamment lors des travaux d'entretien annuels.

Comme déjà cité dans le "paragraphe 1.1", l'âme de la structure sandwich va être à base de poudre du pétiole.

On collecte alors le pétiole à partir des travaux d'entretien que subit l'arbre de palmier dattier qui va être ensuite découpé et broyé.

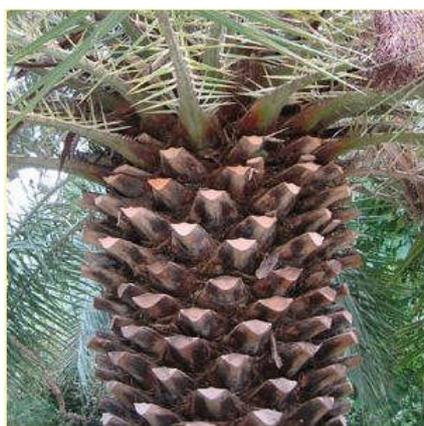


Figure 1.7: Pétiole de palmier dattier.

Après le découpage de pétiole en petit morceau, on procède au broyage en utilisant un broyeur électrique " 220-240 V, 50/60 Hz et 200W " pour extraire le produit résidu qui va être par la suite trié en deux différents calibres.

- le 1<sup>er</sup> calibre  $\leq 500 \mu\text{m}$
- le 2<sup>ème</sup> calibre  $\leq 1\text{mm}$

La figure 1.8 montre le produit résidu après tamisage avec les deux dimensions.



Figure 1.8: Produits résidu du broyage après tamisage avec deux dimensions, (a) calibre 1; (b) calibre 2.

### 1.3 Elaboration du sandwich :

#### 1.3.1 Elaboration de la peau du sandwich (stratifiés) :

La première étape de réalisation d'un panneau sandwich est de mettre en œuvre les peaux de ce dernier. Pour cela on réalise un tissu de stratifié à base des fibres de palmier dattier de quatre empilements avec deux orientations différentes  $[0/90]_2$  comme montré dans la figure suivante :

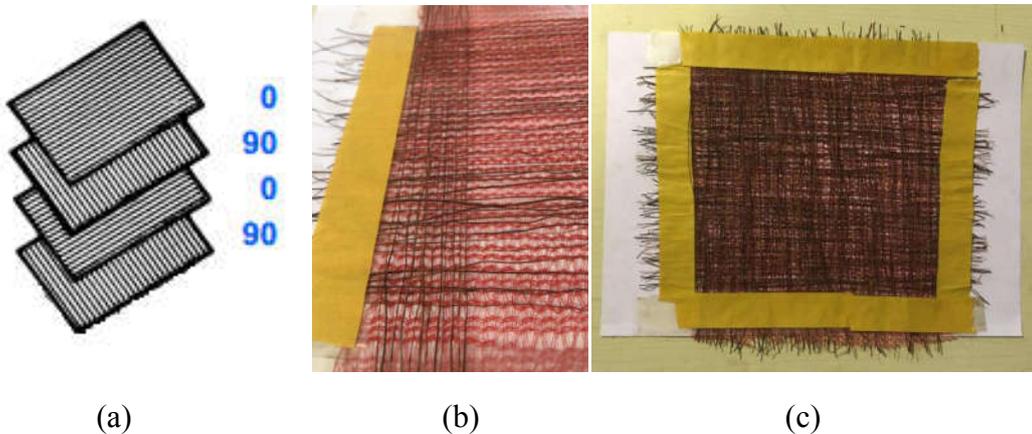


Figure 1.9 : (a) Schéma représentatif des stratifiés avec l'orientation des fibres ; (b) Stratifié au cours d'élaboration ; (c) Stratifié fini de quatre couches  $[0/90]_2$

Une fois la réalisation du tissu fini, on procède à la mise en forme du stratifié en utilisant la méthode du moulage par compression à froid.

##### 1.3.1.1 Méthode de moulage par compression à froid :

Le moulage est effectué à basse pression ( $< 5$  bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent.

Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud.[7]

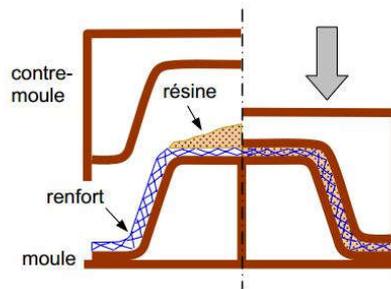


Figure 1.10 : Principe du moulage par compression à froid. [7]

### 1.3.1.2 Mise en œuvre expérimentale du stratifié (Fibres de palmier/Epoxy) :

A ce stade, on veut obtenir un stratifié d'une épaisseur finale de 3mm. Donc on réalise un moule de 3mm de profondeur pour satisfaire cette contrainte. Par la suite, on met notre tissu de quatre plis de fibre de palmier dattier dans le moule et on procède au moulage du mélange résine époxy/durcisseur (52%).

Enfin, on dépose le contre moule et on applique une pression importante afin d'obtenir un stratifié bien fini et prêt à être collé avec l'âme du sandwich.

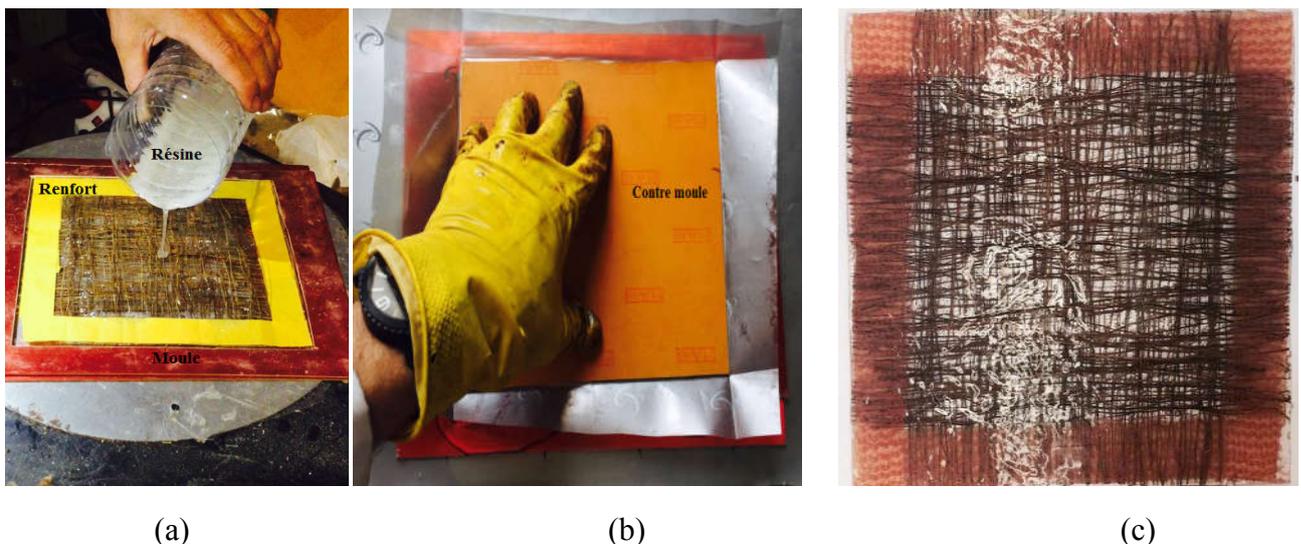


Figure 1.11 : (a) (b) mise en œuvre du stratifié méthode de compression à froid; (c) Stratifié fini (Epoxy/fibre de palmier).

### 1.3.2 Réalisation de l'âme du sandwich :

La deuxième étape de réalisation d'un panneau sandwich est d'élaborer l'âme du sandwich c'est à dire le mélange Kornav/résine qui sera mis entre les deux peaux stratifiées dans structure finale du sandwich.

Mode d'emploi :

Afin d'avoir des résultats multiples et pouvoir les comparer, on procède à élaborer deux type d'âme selon leur composition.

1. La fraction volumique du Kornav est de  $V_{f_k} = 55\%$  et  $V_{m_r} = 45\%$  de résine époxy.
2. La fraction volumique du Kornav est de  $V_{f_k} = 60\%$  et  $V_{m_r} = 40\%$  de résine époxy.

On mélange la poudre broyée du Kornav qui est considérée comme renfort avec la résine époxy comme matrice et par la suite on coule le mélange dans un moule de 6 mm d'épaisseur et enfin, on dépose le contre moule et on applique une pression afin d'obtenir une mousse bien finie et prêt à être collé avec les deux peaux du sandwich.



Figure 1.12 : Produit final de la mousse du sandwich.

### 1.3.3 Collage peaux/mousse du sandwich :

La dernière étape de réalisation d'un panneau sandwich consiste à coller les deux peaux du stratifiées avec la mousse élaborée à l'aide de la résine époxy.



(a)

(b)

(c)

Figure 1.13 : (a) Peau inférieure du sandwich ; (b) Âme en mousse ; (c) Peau supérieure du sandwich.

Après  $24h$ , temps requis pour le séchage total de la résine, on obtient le panneau composite en structure sandwich prêt à être découpé en éprouvettes selon les normes ASTM [6] pour passer à la phase de caractérisation.

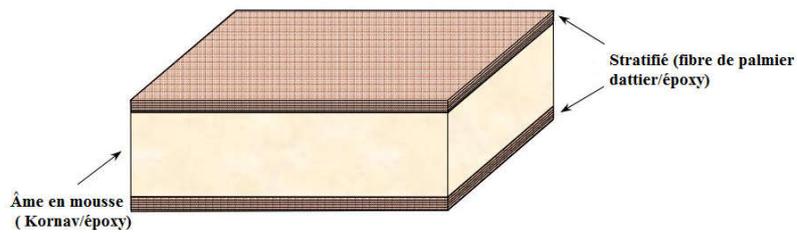


Figure 1.14 : Schéma représentatif de la structure sandwich. [7]



Figure 1.15 : Panneau sandwich élaboré avec les peaux stratifiées en fibre de palmier dattier et âme en mousse en Kornav.

Le panneau sandwich élaboré sera découpé en plusieurs éprouvettes, cette découpe sera faite selon la norme ASTM D-2990[6]. Les éprouvettes ont une longueur de  $200\text{ mm}$ ,  $25\text{ mm}$  de largeur et  $12\text{ mm}$  d'épaisseur.

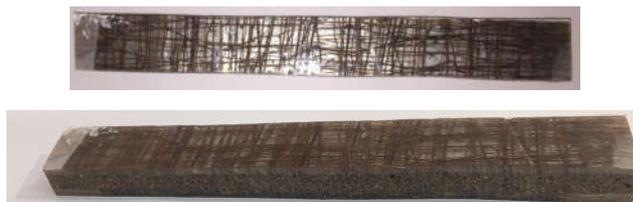


Figure 1.16: Les éprouvettes découpées selon la norme ASTM D-2990 ( $200\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ).

#### 1.4 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre présente et illustre les différentes étapes d'élaboration des panneaux composite en structure sandwich et préparation des éprouvettes. L'objectif est de se familiariser avec toutes les méthodes et techniques d'élaboration utilisées.

Tout d'abord, les différentes causes et avantages qui ont permis le choix des constituants du sandwich sont illustrés. Par la suite on s'est orienté vers la réalisation d'une structure à âme en mousse de pétiole de palmier dattier ("Kornav" appellation locale) et à peaux en composite à matrice de résine époxy renforcée par des fibres de palmier dattier. Les éprouvettes de l'âme du sandwich élaborées en premier lieu ont pu être testées en traction afin de tirer leurs différentes caractéristiques. Le procédé de moulage par compression à froid de résine liquide a ainsi pu être utilisé pour la mise en œuvre des stratifiés et l'âme en mousse de la structures composites et sandwichs. La dernière partie est consacrée au collage des peaux avec la mousse et le découpage selon la norme ASTM [6] afin de caractériser notre matériau par différentes essais mécaniques.

# ***CHAPITRE 2***

***Analyse modale expérimentale des  
poutres composites sandwichs à base  
de fibre naturelle.***

## **Chapitre 2: Analyse modale expérimentale des poutres composites sandwichs à base naturelle**

### **2.1 Composites bio sourcés et vibrations : revue de la littérature:**

L'augmentation de la capacité intrinsèque des matériaux à dissiper l'énergie vibratoire s'avère particulièrement intéressante. A ce niveau, les composites bio-sourcés semblent être de bons candidats. De nombreuses études ont en effet mis en évidence les bonnes propriétés vibratoires de ces matériaux, et notamment leur capacité à dissiper l'énergie de vibration. En comparant des plaques Verre/Epoxy et Lin/Epoxy de même épaisseur, Prabhakaran et al. [8] ont par exemple montré que le composite renforcé de fibres de lin permet d'améliorer le coefficient d'amortissement de plus de 50% tout en permettant un gain de masse de 33%. Concernant les propriétés acoustiques, les auteurs montrent que le coefficient d'absorption est augmenté de l'ordre de 20% à 1000 Hz. Duc et al. [9] ont aussi testé différents composites à fibre de verre, carbone et lin, associés à différentes matrices thermodurcissables et thermoplastiques. Les auteurs ont, entre autre, montré que les composites à fibres de lin présentent un facteur de perte plus élevé que les composites carbone ou verre, malgré des propriétés mécaniques plus faibles. D'autre part, les résultats obtenus montrent que l'utilisation de matrices thermoplastiques permet d'accroître encore les propriétés d'amortissement des composites. En effet, les polymères thermoplastiques présentent un comportement viscoélastique beaucoup plus marqué que les thermodurcissables. Les mêmes auteurs ont mis en évidence différents paramètres influençant la capacité d'amortissement des vibrations des composites renforcés de fibres végétales [10], notamment la qualité de l'imprégnation des fibres, le taux de porosité, la qualité de l'interface fibre/matrice. Ils ont aussi démontré que la quantité de fils et la torsion des fibres composant ces fils, jouaient un rôle important du fait des frottements engendrés. A une échelle inférieure, la microstructure même des fibres végétales peut, très certainement, expliquer les propriétés d'amortissement vibratoires supérieures. Toutefois, les études à l'échelle des fibres qui permettraient de comprendre en détail les mécanismes dissipatifs en jeu sont quasiment inexistantes.

Mounier et al. [11] développent actuellement une méthode destinée à effectuer des analyses modales à l'échelle des fibres élémentaires de lin. Néanmoins, on peut formuler certaines hypothèses pour expliquer les propriétés d'amortissement des composites renforcés de fibres végétales. En effet, les fibres naturelles sont composées de différents polymères tels que l'hémicellulose, la cellulose, ou encore la lignine, pouvant intrinsèquement dissiper de l'énergie par amortissement visqueux. D'autre part, la structure multicouche des fibres végétales et la présence de microfibrilles de cellulose orientées peuvent permettre la dissipation d'une certaine quantité d'énergie par frottement.

Ainsi, les composites renforcés de fibres végétales permettent d'obtenir de bonnes propriétés d'amortissement vibratoire. De ce fait, de nombreuses études ont été réalisées sur des composites hybrides [8,12–15], mêlant par exemple fibres de carbone et fibres de lin, pour atteindre un meilleur compromis entre les performances mécaniques et les propriétés vibratoires. En effet, ces études concluent que les composites hybrides possèdent des propriétés d'amortissement intermédiaires entre les mêmes composites à fibres totalement

synthétiques et totalement végétales. Dans ce contexte, on peut s'attendre à ce que les structures sandwichs Fibre de palmier dattier/Epoxy/Kornav présentent de bonnes propriétés d'amortissement vibratoire. L'utilisation des fibres de palmier dattier associées à une matrice thermoplastique laisse présager des peaux composites particulièrement amortissants.

Cette étude propose de situer les performances de cet éco-composite par rapport à des solutions existantes, et de comprendre l'influence des différents constituants sur la réponse globale de la structure.

## **2.2 Analyse modale expérimentale des poutres :**

Usuellement, l'analyse modale de poutres s'effectue en mesurant la réponse de l'extrémité libre lorsque la poutre est soumise à une excitation. Comme explicité dans le paragraphe précédent, on peut étudier le comportement de la poutre en vibrations forcées, en imposant par exemple une certaine fréquence fixe ou en balayant une plage de fréquences à l'aide d'un pot vibrant sur lequel la poutre est fixée. On peut aussi étudier son comportement en vibrations libres en imposant une excitation ponctuelle de type impact, à l'aide d'un marteau de choc. Par la suite, la mesure de la réponse de la structure peut s'effectuer localement, au moyen d'un accéléromètre ou d'un vibromètre laser mono-point. Il est aussi possible d'obtenir des mesures de champs en mesurant les réponses de la structure en une multitude de points, ou encore en utilisant des méthodes optiques permettant d'avoir une vision d'ensemble des déplacements de la structure.

Par la suite, les propriétés modales de la poutre peuvent être mesurées au moyen de la réponse temporelle, ou par la fonction de réponse en fréquence (FRF) obtenue, qui présente la réponse mesurée (déplacement, vitesse ou encore accélération) en fonction de la fréquence. On peut trouver différentes représentations d'une FRF, les plus connues étant les diagrammes de Bode, présentant l'évolution du module ou de l'amplitude, ainsi que de la phase en fonction de la fréquence, ou celle de Nyquist, présentant l'évolution de la partie imaginaire du signal complexe en fonction de sa partie réelle. Dans un diagramme de Bode, les modes de résonance correspondent aux pics observables sur le diagramme amplitude-fréquence, ainsi qu'à une phase égale à  $\pi/2$ . Dans le plan de Nyquist, la FRF prend une allure circulaire au voisinage des résonances. Ces deux types de représentation sont illustrés sur la figure 2.1. Il existe différentes méthodes pour mesurer les propriétés modales à partir de la FRF obtenue. La section suivante en présente deux couramment utilisées. [21]

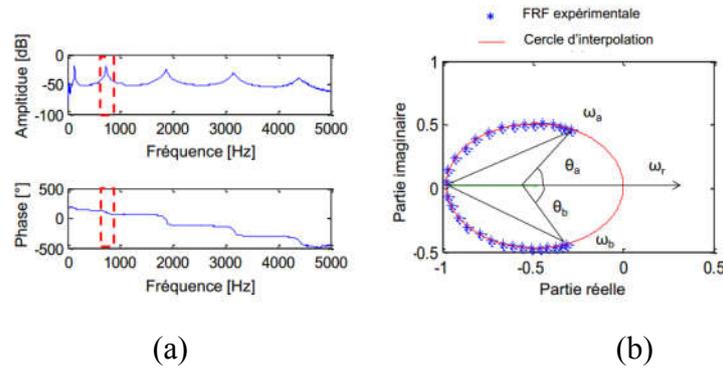


Figure 2.1: Exemple de FRF d'une poutre sandwich. (a) Diagramme et Bode et (b) représentation du mode 2 dans le plan de Nyquist. [21]

### 2.3 Mesure de l'amortissement par la méthode de la bande passante à -3 dB :

La méthode de la bande passante à -3 dB [137] est couramment employée pour sa simplicité d'utilisation. Elle consiste à analyser chaque pic de résonance de la FRF dans une représentation amplitude-fréquence. La fréquence de résonance  $f_r^i$  du mode  $i$  correspond à la fréquence pour laquelle l'amplitude de la réponse est maximale. Par la suite, le coefficient d'amortissement modal  $\xi_i$  (ou encore le facteur de perte  $\eta_i$ ) associé à ce mode  $i$  peut être calculé par :

$$\eta_i = 2\xi_i = \frac{\Delta f}{f_r^i} \quad (1)$$

où  $\Delta f$  correspond à la largeur de la bande passante mesurée à -3dB par rapport à l'amplitude maximale du pic considéré. Ces caractéristiques sont présentées dans la figure 2.2. Il est à noter que plus la structure ou le matériau testé est résonant, plus la résolution de mesure doit être importante pour pouvoir mesurer précisément  $\Delta f$ , notamment pour les premiers modes. Pour plus de précision, il est possible d'utiliser des fonctions d'interpolation des pics. [21]

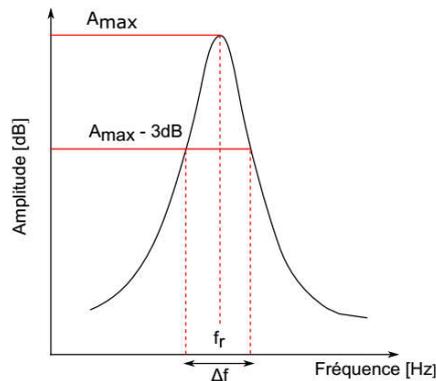


Figure 2.2: Illustration de la méthode de bande passante à -3dB sur un pic de résonance. [21]

Cette méthode, simple d'utilisation, néglige néanmoins une partie de l'information contenue dans le signal de réponse de la structure, puisque seules les données d'amplitude sont considérées, mais pas celles de la phase. Cette méthode s'avère peu robuste pour certains matériaux présentant par exemple une viscoélasticité importante.

#### 2.4 Mesure de l'amortissement par la méthode de Circle Fitting :

Une méthode plus robuste consiste à projeter la FRF dans le plan de Nyquist. Chaque mode est alors considéré séparément. Au voisinage de la résonance, les modes prennent une allure circulaire. Les méthodes dites de "Circle Fitting" [16] consistent alors à trouver les caractéristiques du cercle interpolant au mieux la FRF expérimentale. Ce cercle est illustré sur la figure 2.3. L'interpolation est généralement optimisée au moyen d'algorithmes, en utilisant par exemple la méthode des moindres carrés.

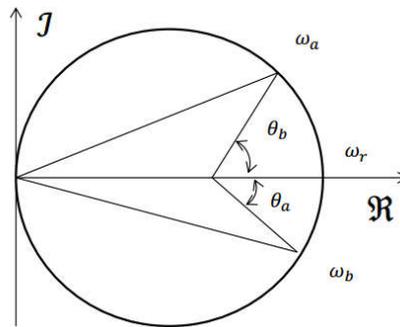


Figure 2.3: Paramètres du cercle d'interpolation pour la méthode de Circle-Fitting.[21]

Les propriétés du cercle permettent alors de mesurer directement la pulsation de résonance  $\omega_r^i$  du mode considéré ainsi que son facteur de perte  $\eta_i$  par :

$$\eta_i = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{\omega_r^i (\omega_a \tan \frac{\theta_a}{2} + \omega_b \tan \frac{\theta_b}{2})} \quad (2)$$

#### 2.5 Etude expérimentale du comportement vibratoire des constituants :

Le comportement vibratoire des composites sandwichs a été étudié. Des essais de vibration libre ont été réalisés sur diverses configurations d'éprouvettes sandwichs, afin de mesurer les différentes fréquences de résonance des modes de flexion, ainsi que les amortissements modaux.

##### 2.5.1 Protocole expérimental :

Les essais d'analyse modale ont été réalisés selon la norme ASTM-E756. Les comportements vibratoires des sandwichs ont été étudiés, dans le but de comprendre leur participation et leur influence sur l'amortissement global des structures. Tout d'abord, seules les peaux en composite fibre de palmier dattier/Epoxy ont été testées. Différentes configurations de poutres ( $200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ) ont ainsi été considérées. Afin d'étudier l'influence de l'orientation des fibres sur l'amortissement des composites, trois types d'éprouvettes constituées de quatre plis unidirectionnels ont été préparés avec des

fibres orientées à  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , notées respectivement UD-0 et UD-90. Par la suite, deux autres types de stratifiés croisés ont été analysés, dans des configurations à  $[0/90]_s$ , afin d'étudier l'influence de la séquence d'empilement sur la réponse des composites. Ces différentes poutres composites ont été testées en configuration encastrée-libre au moyen du dispositif expérimental présenté en figure 2.4. L'analyse modale s'effectue en encastrant une longueur de  $30\text{ mm}$  de la poutre au moyen d'un support rigide en acier. L'excitation est réalisée au moyen d'un marteau d'impact (PCB084A14) à proximité de l'encastrement, afin d'exciter une bande plus large de fréquence. La vitesse de déplacement de l'extrémité libre est ensuite mesurée au moyen d'un vibromètre laser (OFV 303 Sensor Head). Les signaux sont enregistrés au moyen d'un boîtier d'acquisition et traités par la suite par le logiciel MESCOP.

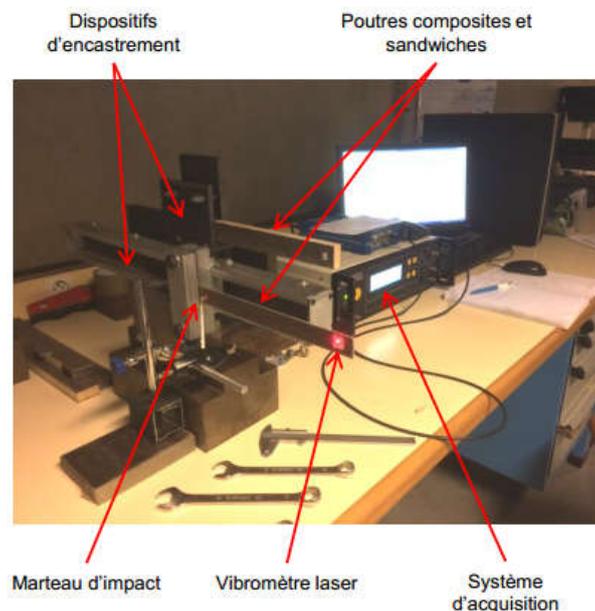


Figure 2.4: Dispositif expérimental d'analyse modale.

De plus, le comportement vibratoire du Kornav a été étudié. Des poutres ( $200\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ) ont été testées en vibration libre dans les mêmes configurations et avec le dispositif expérimental décrit précédemment. Afin d'éviter d'endommager le Kornav lors de l'encastrement, des talons métalliques ont été ajoutés aux poutres. D'autre part, afin d'étudier l'amortissement en cisaillement de l'âme, des essais VBT (Vibration Beam Technique) ont été réalisés. Ces essais seront décrits dans les paragraphes suivants. Ces analyses expérimentales ont été effectuées à température et à humidité ambiantes (non contrôlées). Compte tenu de l'utilisation de matériaux viscoélastiques potentiellement sensibles à l'humidité, cet aspect expérimental pourrait être à l'origine d'une partie de la dispersion des résultats obtenus.

Enfin, les amortissements modaux de différentes poutres sandwichs ( $200\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 6$ ), pour différentes épaisseurs de l'âme  $ea$ , ont été mesurés au moyen du dispositif présenté en figure 2.4. Une séquence d'empilement de type  $[0/90]_s$  a été utilisée pour les peaux. Les caractéristiques de l'âme en Kornav ont ensuite été modifiées pour

étudier, d'une part l'influence de l'épaisseur de l'âme  $ea$  et d'autre part la masse volumique du Kornav ( $\rho_a$ ). Pour tous les matériaux testés, chaque essai a été répété plusieurs fois et les cinq meilleures acquisitions ont été retenues et moyennées pour tracer la FRF finale. De plus, pour prendre en compte la variabilité des propriétés des différents constituants, un minimum de six poutres a été testé dans les différentes configurations de composites et de Kornav. Compte tenu de la quantité de travail nécessaire à la préparation des éprouvettes sandwichs, trois poutres de chaque configuration ont été testées.

Pour chaque poutre testée, la fonction de réponse en fréquence (FRF) a été analysée au moyen d'une routine automatisée développée sous MATLAB. Dans un premier temps, les fréquences des modes de résonance ont été déterminées. Par la suite, la FRF a été projetée au voisinage de chaque pic de résonance dans le plan de Nyquist, et interpolée par un cercle dont les paramètres ont été mesurés afin d'en déduire les amortissements modaux, comme représenté sur la figure 2.1.

### 2.5.2 Comportement vibratoire des composites Fibre de palmier dattier/Epoxy :

Cette section présente l'étude du comportement vibratoire des composites Fibre de palmier dattier/Epoxy. Des éprouvettes de résine Epoxy ont d'abord été testées afin d'analyser le comportement vibratoire de la résine pure. Enfin, des composites unidirectionnels UD-0 et UD-90 ont été testés afin de mesurer l'influence de l'orientation des fibres sur l'amortissement.

#### 2.5.2.1 Comportement de la résine Epoxy :

Les résultats obtenus pour les différentes éprouvettes de résine pure sont présentés sur la figure 2.5. Les évolutions du facteur de perte ainsi que du module d'Young en fonction de la fréquence sont présentées. On constate que l'amortissement, initialement élevé (6%) décroît ensuite rapidement pour atteindre une valeur quasi asymptotique d'environ 3% pour les fréquences élevées. D'autre part, le module d'Young augmente d'un peu plus de 12% sur l'ensemble de la plage fréquentielle étudiée. En très basse fréquence, la valeur mesurée est de 3.3 GPa. Les propriétés dynamiques de la résine Epoxy peuvent être comparées à celles de la résine GreenPoxy56 (bio-sourcés à 56%), présentée en figure 2.6 et mesurée à titre de comparaison.

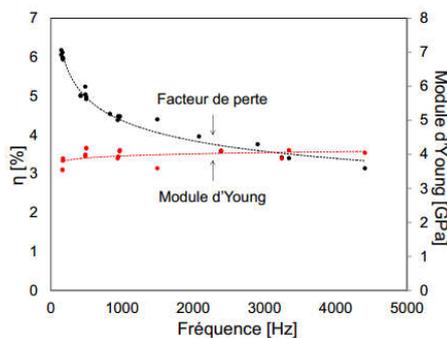


Figure 2.5: Propriétés dynamiques de la résine Epoxy.[21]

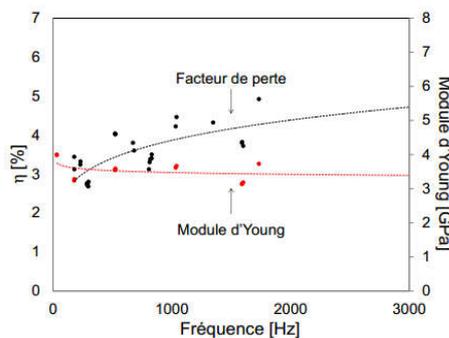


Figure 2.6: Propriétés dynamiques de la GreenPoxy56.[21]

Si les valeurs des modules d'Young restent tout à fait comparables pour ces deux résines, leurs facteurs de perte apparaissent relativement différents, avec des évolutions opposées en fonction de la fréquence. Les différences des microstructures entre ces deux polymères, l'un thermoplastique et l'autre thermodurcissable, sont très certainement à l'origine de ces différences de propriétés dynamiques. En effet, l'amortissement viscoélastique des polymères est un phénomène fortement lié à leur microstructure [17].

L'organisation et la mobilité des chaînes moléculaires, très différentes dans les cas des matrices thermoplastiques et thermodurcissables, jouent un rôle essentiel dans les mécanismes intrinsèques de dissipation de l'énergie vibratoire.

### 2.5.2.2 Comportement unidirectionnels des fibres de palmier dattier :

La figure 2.7 présente les propriétés dynamiques des poutres composites à fibres unidirectionnelles. On remarque que le comportement viscoélastique des éprouvettes UD-45 et UD-90 est très proche de celui de la résine pure. En effet, les fibres orientées à 90° et 45° ne sont pas (ou peu) sollicitées du fait des déformations en flexion. Le comportement viscoélastique de la matrice est donc prépondérant. Par conséquent, on retrouve pour les composites UD-90 et UD-45 un facteur de perte proche de 6% pour les basses fréquences. Celui-ci diminue ensuite rapidement avec la fréquence jusqu'à se stabiliser autour de 3,5%. Les modules d'Young de ces deux types de composites augmentent légèrement avec la fréquence. De plus, leurs valeurs à très basse fréquence correspondent bien à celles mesurées lors des essais quasi-statiques. Enfin, les composites UD-0 montrent un comportement moins dépendant de la fréquence. Le facteur de perte, initialement proche de 2%, subit une légère diminution avec l'augmentation de la fréquence, mais se stabilise rapidement autour d'une valeur de 1.8%. Le module d'Young mesuré reste très proche de sa valeur statique d'environ 24 GPa. Du fait de l'orientation des fibres, la matrice est en effet beaucoup moins sollicitée dans cette configuration.

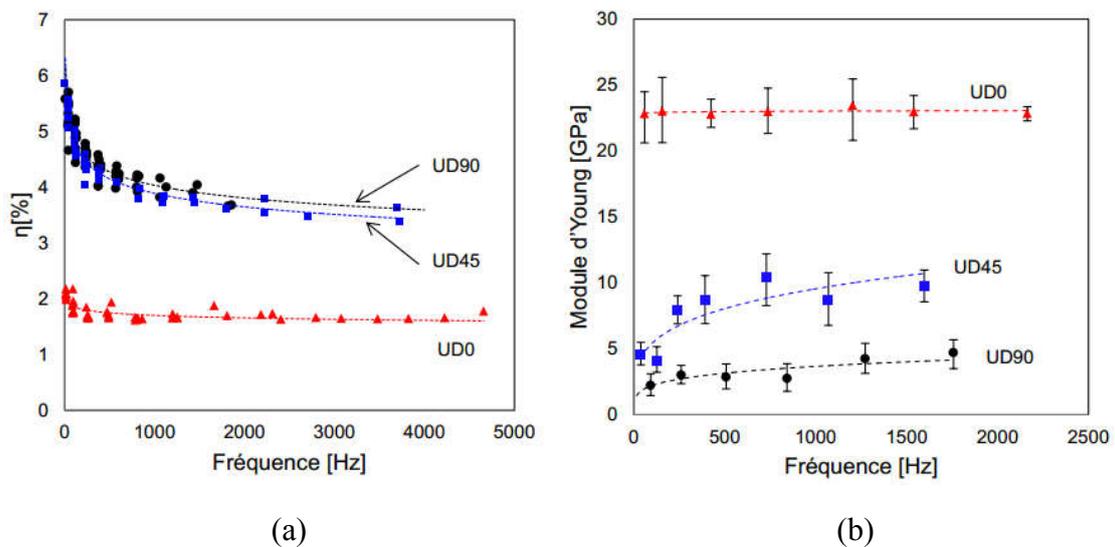


Figure 2.7: Propriétés dynamiques des composites unidirectionnels. (a) facteurs de perte ; (b) modules d'Young.[21]

### 2.5.3 Comportement vibratoire de l'âme en Korvav :

De manière analogue, les propriétés vibratoires de l'âme en Kornav ont été étudiées. Deux types d'essais ont été réalisés afin d'analyser le comportement de l'âme en flexion et en cisaillement.

#### 2.5.3.1 Vibrations en flexion :

Dans un premier temps, des poutres en Kornav ont été testées en vibration en flexion avec le même protocole que celui utilisé pour les peaux composites. Les résultats obtenus sont présentés en figure 2.8. On remarque un comportement relativement indépendant de la fréquence. Le facteur de perte est d'environ 2%, et le module d'Young se situe entre 60 MPa et 80 MPa. Toutefois, on constate une variabilité assez importante (de l'ordre de 20%) des mesures. Cette dispersion des résultats peut s'expliquer en partie par les variabilités locales de propriétés mécaniques dans les poutres.

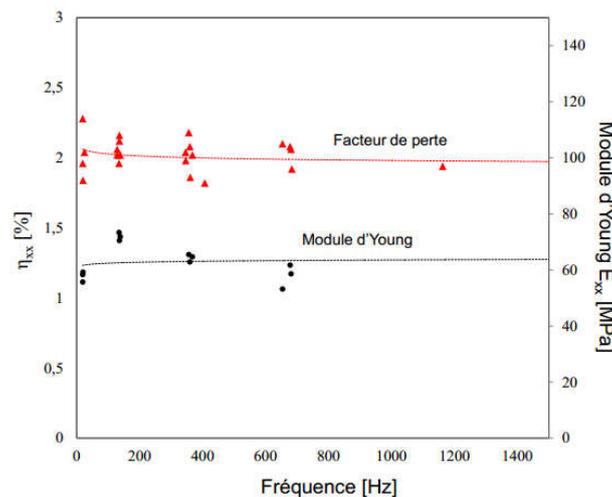


Figure 2.8: Propriétés dynamiques du Kornav en flexion.[21]

#### 2.5.3.2 Essais VBT :

L'âme d'une poutre sandwich soumise à des déformations de flexion subit peu d'efforts de traction/compression, mais plutôt des efforts de cisaillement. Par conséquent, une étude du comportement en cisaillement du Kornav paraît légitime. Pour ce faire, la méthode VBT décrite dans la norme ASTM E-756 a été utilisée. Cette méthode consiste à analyser la réponse vibratoire d'une structure sandwich composée d'une âme, en l'occurrence le Kornav et de deux peaux rigides métalliques. L'assemblage est effectué par collage au moyen d'une colle structurale. L'épaisseur de l'interface peau/âme a été maintenue inférieure à 0,2 mm afin de minimiser son influence sur l'amortissement global tout en garantissant l'assemblage mécanique. Cette configuration est présentée en figure 2.9.

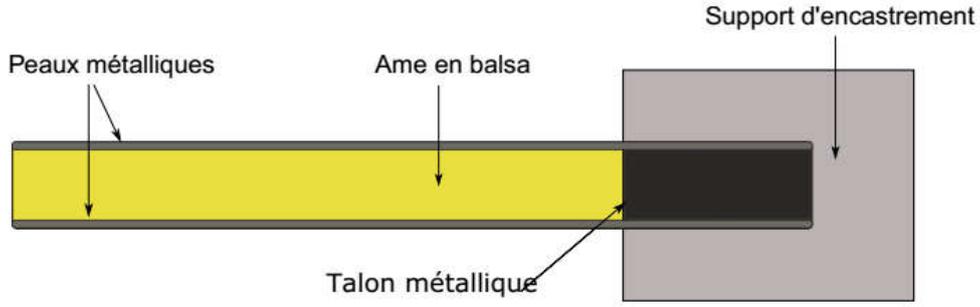


Figure 2.9: Configuration sandwich pour l'essai VBT.

A partir des fréquences de résonance et des facteurs d'amortissement modaux des sandwichs et des peaux seules, il est alors possible d'en déduire l'amortissement en cisaillement de l'âme  $\eta_a$  et son module de cisaillement  $G_a$  par :

$$\eta_a = \frac{A\eta_s}{((A-B-2(A-B)^2-2(A\eta_s)^2)} \quad (3)$$

$$G_a = ((A-B-2(A-B)^2-2(A\eta_s)^2) \left( \frac{(2\pi C_n E e_p e_a)/l^2}{((1-2A+2B)^2+4(A\eta_s)^2)} \right) \quad (4)$$

avec :

$$A = \frac{f_s^2}{f_n^2} \left( 2 + \frac{D e_a}{e_p} \right) \left( \frac{B}{2} \right) \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{6 \left( 1 + \frac{e_a}{e_p} \right)^2}$$

où  $D = \rho_a/\rho_p$ ,  $\rho_a$  et  $\rho_p$  étant respectivement les masses volumiques de l'âme et des peaux,  $E$  le module d'Young des peaux,  $f_n$  la fréquence de résonance du mode  $n$  des peaux,  $f_s$  la fréquence de résonance du sandwich,  $e_a$  et  $e_p$  respectivement les épaisseurs de l'âme et des peaux,  $l$  la longueur totale de la poutre,  $\eta_s$  le facteur de perte de la poutre sandwich et  $C_n$  un coefficient dépendant du mode  $n$  considéré.

Cette théorie basée sur les équations de Ross-Kervin-Ungar (RKU) a été établie en utilisant une représentation sinusoïdale des déformées modales des poutres sandwichs. Cette approximation est acceptable uniquement pour les modes élevés. Par conséquent, le premier mode de flexion des sandwichs est la plupart du temps ignoré. D'autre part, les poutres testées doivent vérifier la condition suivante :

$$\left( \frac{f_s}{f_n} \right)^2 \left( 2 + D \frac{e_a}{e_p} \right) \geq 2.01 \quad (6)$$

Dans ces conditions, l'amortissement des peaux métalliques peut être considéré comme négligeable.

Ainsi, les essais VBT ont permis de mesurer les propriétés dynamiques en cisaillement de l'âme en Kornav. Les résultats sont présentés en figure 2.10, qui donne l'évolution du module de cisaillement et du facteur de perte en fonction de la fréquence. On remarque alors un comportement très dépendant de la fréquence. L'amortissement de l'âme, initialement proche de 6%, décroît ensuite rapidement jusqu'à une valeur proche de 3%. Le module de cisaillement en basses fréquences est d'environ 130 MPa, ce qui est proche de la valeur du module donné par le fournisseur pour une densité de  $125 \text{ kg.m}^{-3}$ . Cette valeur augmente ensuite rapidement avec la fréquence.

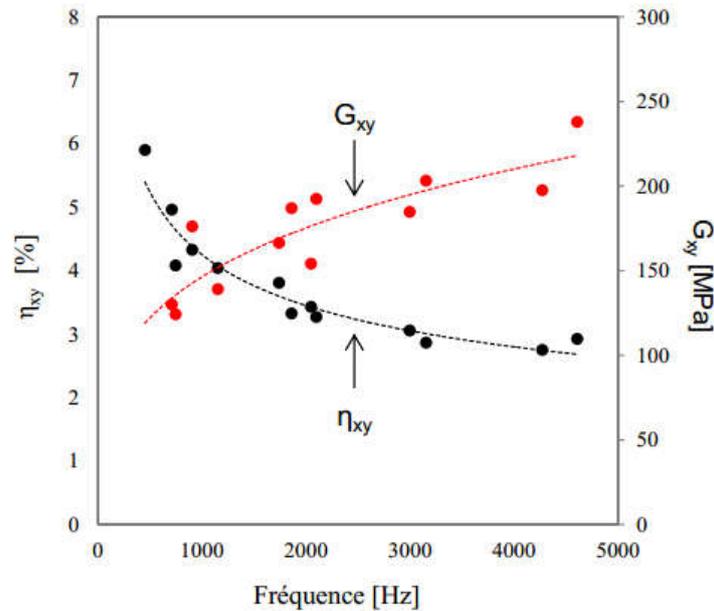


Figure 2.10: Propriétés dynamiques de l'âme en Kornav en cisaillement.[21]

## 2.6 Comportement vibratoire des poutres sandwichs :

Le comportement vibratoire en flexion des poutres sandwichs Fibre de palmier dattier/Epoxy/Kornav a été étudié. Différentes épaisseurs et masses volumiques de l'âme ont été utilisées afin d'étudier leurs influences sur la réponse globale de la structure, notamment son amortissement.

### 2.6.1 Influence de l'épaisseur de l'âme :

Dans un premier temps, l'influence de l'épaisseur de l'âme sur l'amortissement des poutres sandwichs a été étudiée. Quatre types de poutre avec des épaisseurs d'âme  $e_a$  de 6.4 mm, 12.7 mm, 15.9 mm et 19.1 mm ont été testées. Les résultats sont présentés en figure 2.11. Pour plus de lisibilité, seules les valeurs moyennes des résultats pour chaque mode ont été présentées. Des barres d'erreur verticales et horizontales indiquent les écarts types obtenus en fréquence et en amortissement. Cette variabilité peut s'expliquer d'une part par les incertitudes de mesure, mais aussi par les différences de propriétés mécaniques des matériaux et notamment de l'âme en Kornav. Toutefois, on constate que plus l'épaisseur de l'âme est importante, plus l'amortissement global des sandwichs est élevé. D'autre part, les poutres les plus épaisses présentent un comportement viscoélastique

beaucoup plus marqué. Ce comportement peut s'expliquer par une sollicitation plus importante de l'âme en cisaillement du fait de la diminution de l'élanement des poutres. Les variations locales des propriétés mécaniques du Kornav peuvent ainsi expliquer une partie de la dispersion observée à l'échelle des poutres sandwichs, plus importante pour les valeurs de fréquence élevées.

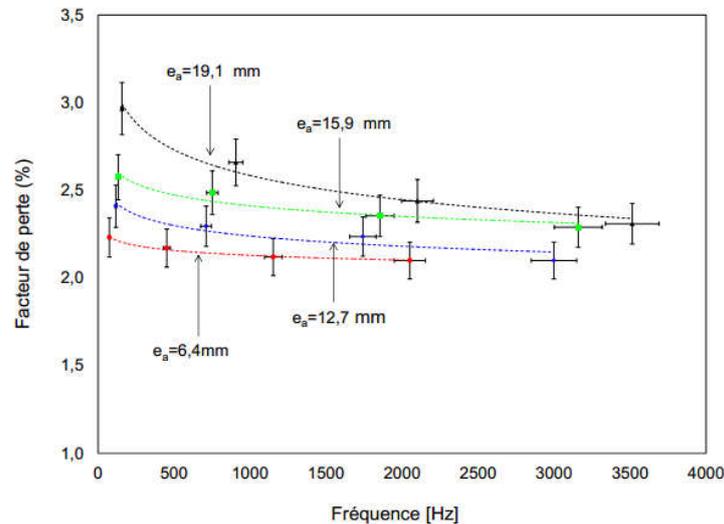


Figure 2.11: Influence de l'épaisseur de l'âme sur l'amortissement des poutres sandwichs. [21]

### 2.6.2 Influence de la densité de l'âme :

L'influence de la masse volumique de l'âme sur l'amortissement des sandwichs a été mesurée. Deux types d'âme en Kornav de 12,7 mm d'épaisseur et de densité  $100 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $150 \text{ kg.m}^{-3}$  ont été utilisés, pour des sandwichs ayant des peaux en configuration [0/90]<sub>s</sub>. Les résultats obtenus sont présentés en figure 2.12 qui donne l'évolution du facteur de perte en fonction de la fréquence pour ces deux configurations. Si les résultats apparaissent relativement dispersés (jusqu'à 15 % d'écart relatif), on peut néanmoins remarquer que le facteur de perte du sandwich augmente avec la masse volumique de l'âme. Un constat similaire a été réalisé par Assarar et al. [19] concernant des sandwichs à âme en mousse. Pour les matériaux bois, Bremaud et al. [18] observent également la même influence de la masse volumique.

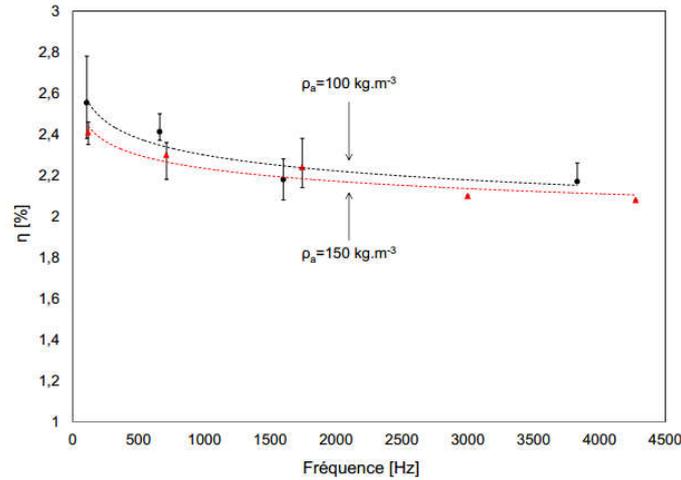


Figure 2.12: Influence de la masse volumique de l'âme sur l'amortissement des poutres sandwichs.

Ces résultats peuvent être expliqués à l'échelle de la microstructure. Plus le Kornav est dense, plus les cellules quasi hexagonales qui le composent sont petites. Par conséquent, la quantité d'air piégé dans les cellules internes est moins élevée, diminuant ainsi l'amortissement par compression/décompression. D'autre part, la diminution de taille des pores et des trachéides implique une moindre quantité de résine Epoxy piégée dans l'âme lors de la mise en œuvre, limitant ainsi sa contribution viscoélastique dans l'amortissement global des poutres sandwichs.

## 2.7 Performances des matériaux étudiés :

Cette section propose de comparer les propriétés vibratoires des éco-composites Fibre de palmier dattier/Epoxy et des sandwichs Fibre de palmier dattier/Epoxy/Kornav à des matériaux plus classiques afin de situer leurs performances.

### 2.7.1 Comparaison des propriétés :

Les résultats expérimentaux obtenus précédemment ont été comparés aux propriétés de composites Verre/Epoxy et de structures sandwichs constituées de peaux en composite Verre/Epoxy et d'une âme en mousse PVC. Ces résultats ont été obtenus par Idrisse [20] au moyen d'analyses modales réalisées dans les mêmes configurations expérimentales que celles utilisées dans cette étude. Les composites étudiés étaient constitués d'une séquence d'empilement à  $[0_2/90_2]_s$ , pour une épaisseur d'environ 1,8 mm, avec un taux volumique de fibres proche de 50%. L'âme des sandwichs en PVC à cellules fermées présentait une épaisseur de 20 mm et une masse volumique de  $100 \text{ kg.m}^{-3}$ . Les composites ont été comparés aux stratifiés Fibre de palmier dattier/Epoxy de configuration  $[0/90]_s$  et les sandwichs aux structures Fibre de palmier dattier/Epoxy/Kornav. Ainsi, les matériaux comparés sont géométriquement proches. Quelques différences existent néanmoins au niveau du taux de fibres des composites et de la masse volumique de l'âme. La figure 2.13 présente la comparaison des propriétés vibratoires.

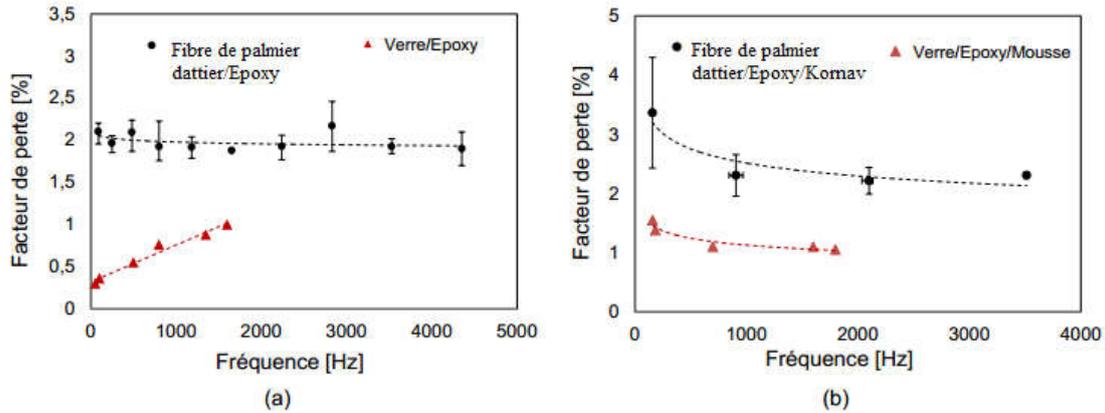


Figure 2.13: Comparaison des propriétés vibratoires des éco-composites avec des matériaux équivalents non-biosourcés :(a) stratifiés; (b) sandwichs.[21]

On remarque sur la figure 2.13.a que l'éco-composite présente un amortissement globalement supérieur au composite Verre/Epoxy. Les évolutions en fonction de la fréquence sont opposées, du fait de la contribution de matrice Epoxy présentant elle-même d'un comportements en fonction de la fréquence très différents. De plus, la figure 2.13.b montre que l'éco-composite sandwich est globalement plus amortissant que la structure sandwich Verre/Mousse/Epoxy.

## 2.8 Conclusion :

Ce chapitre présente l'analyse du comportement vibratoire de la structure sandwich et de ses constituants. Dans un premier temps, des essais expérimentaux d'analyse modale ont été réalisés sur les peaux composites, sur l'âme en Kornav ainsi que sur la structure complète afin de déterminer leurs propriétés dynamiques (fréquences et amortissements modaux). Des propriétés mécaniques dépendantes de la fréquence ont été mises en évidence et décrites par des fonctions d'interpolation des résultats expérimentaux. De plus, différentes configurations de poutres sandwichs ont été testées afin de mettre en évidence l'influence de l'épaisseur et de la densité de l'âme en Kornav sur les fréquences de résonance et l'amortissement global. Une bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux a été obtenue. Les peaux composites dissipent une plus grande quantité d'énergie à faibles fréquences, alors que pour les fréquences plus élevées, c'est l'âme en Kornav qui contribue le plus à l'amortissement global. Ainsi, on peut envisager l'utilisation de ce modèle pour réaliser des études paramétriques permettant par exemple, de dimensionner les structures sandwichs pour optimiser les ratios amortissement/performance mécanique et/ou amortissement/masse pour des fréquences que l'on souhaite atténuer.

### **Conclusion générale :**

Selon les objectifs visés relatifs à la mise en valeur des fibres de palmiers, un nouveau composite sandwich conçu, et totalement élaboré à base de produits de palmiers dattier. L'élaboration consistait en :

- Production de la fibre du palmier dattier.
- Traitement chimique de la fibre.
- Sélection de la résine utilisée (G 50).
- Elaboration des stratifiées (peaux de la structure sandwich) : fibres de palmier dattier/époxy par le principe du moulage par compression à froid.
- Production et broyage du pétiole du palmier dattier « Kornav ».
- Réalisation de l'âme du sandwich : « Kornav »/ époxy par le principe du moulage par compression à froid.
- Elaboration finale du composite sandwich par le procédé de collage des stratifiés à base des fibres et de l'âme à base du « Kornav ».

La caractérisation mécanique des composites sandwichs a été effectuée par une analyse dynamique où le concepts expérimentale est présenté. Les fréquences et déformées modales sont calculées. Une bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux a été obtenue. Les peaux composites dissipent une plus grande quantité d'énergie à faibles fréquences, alors que pour les fréquences plus élevées, c'est l'âme en Kornav qui contribue le plus à l'amortissement global. Ainsi, on peut envisager l'utilisation de ce modèle pour réaliser des études paramétriques permettant par exemple, de dimensionner les structures sandwichs pour optimiser les ratios amortissement/performance mécanique et/ou amortissement/masse pour des fréquences que l'on souhaite atténuer.

En perspective, on croit que notre étude servira de base à des projets complémentaires ayant les mêmes objectifs : VALORISATION DE LA FIBRE DE PALMIER DATTIER.

### Bibliographie :

- [1]: Belferrag, A. (2016). Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [2]: B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, Renewable materials to reduce heat loss : characterization of date palm wood, *Energy and Buildings*, 43 (2011), 491-497.
- [3]: Ali, M. E., & Alabdulkarem, A. (2017). On thermal characteristics and microstructure of a new insulation material extracted from date palm trees surface fibers. *Construction and Building Materials*, 138, 276-284.
- [4]: Hamada, H., Ikuta, N., Nishida, N., Maekawa, Z. Effect of interfacial silane network structure on interfacial strength in glass fibre composites, *Composites*, 1994, v.25, p.512.
- [5]: Taha, I., Steuernagel, L., Ziegmann, G. Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.669 684.
- [6]: ASTM D-618-05. Standard practice for conditioning plastics for testing. ASTM annual book of standards, vol. 08.01. Philadelphia (PA): ASTM International; 2005.
- [7]: Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures, 4eme édition; Jean-Marie Berthelot. Edition VII.
- [8]: S. Prabhakaran, V. Krishnaraj, M. Senthil, and R. Zitoune. Sound and Vibration Damping Properties of Flax Fiber Reinforced Composites. *Procedia Engineering*, 97 :573–581, 2014. (Cité pages 149 et 150.)
- [9]: F. Duc, P.E. Bourban, C.J.G. Plummer, and J.E. Mnson. Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites. *Composite Part A*, 64 :115–123, 2014. (Cité page 149.)
- [10]: F. Duc, P.E. Bourban, and J.E. Manson. The role of twist and crimp on the vibration behaviour of flax fibre composites. *Composite Science and Technology*, 102 :94–99, 2014. (Cité page 149.)
- [11]: Denis Mounier, Christophe Poilane, Haithem Khelfa, and Pascal Picart. Subgigahertz laser resonant ultrasound spectroscopy for the evaluation of elastic properties of micrometric fibers. *Ultrasonics*, 54(1) :259–267, 2014. (Cité page 150.)
- [12]: Mustapha Assarar, Wajdi Zouari, Hamid Sabhi, Rezak Ayad, and Jean-marie Berthelot. Evaluation of the damping of hybrid carbon flax reinforced composites. *Composite Structures*, 132 :148–154, 2015. (Cité page 150.)
- [13]: Simone D. Altilia, Teodoro Valente, Carlo Santulli, Fabrizio Sarasini, Jacopo Tirill, Fabienne Touchard, Laurence Chocinski-Arnault, David Mellier, Luca Lampani, and Paolo Gaudenzi. Damage tolerance of carbon / flax hybrid composites subjected to low velocity impact. *Composite Part B*, 91 :144–153, 2016.
- [14]: Jeff Flynn, Ali Amiri, and Chad Ulven. Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance. *Materials and Design*, 102 :21–29, 2016. (Cité page 150.)
- [15]: Marie Joo Le Guen, Roger H. Newman, Alan Fernyhough, Grant W. Emms, and Mark P. Staiger. The damping e modulus relationship in fl ax e carbon fibre hybrid composites. *Composites Part B*, 89 :27–33, 2016. (Cité page 150.)

## **Bibliographie**

---

- [16]: C. W. De Silva. Vibration : Fundamentals and Practice. Crc press. edition, 2006. (Cité pages 151 et 152.)
- [17]: Jean-Sébastien Dupuy. Identification des propriétés mécaniques de matériaux composites par analyse vibratoire. PhD thesis, Université Montpellier II, 2009. (Cité page 156.)
- [18]: Iris. Brémaud. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones : Biological and cultural diversity. Journal of Acoustic Society of America, 1 :807–818, 2012. (Cité page 162.)
- [19]: Mustapha Assarar. Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs. PhD thesis, Université du Maine, 2007. (Cité pages 117, 124, 128, 162, 193 et 198.)
- [20]: Moustapha Idriss. Analyse expérimentale et par éléments finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés. PhD thesis, Université du Maine, 2013. (Cité pages 117, 124, 163 et 193.)
- [21]: Monti, A. (2016). Élaboration et caractérisation mécanique d'une structure composite sandwich à base de constituants naturels (Doctoral dissertation, Université du Maine)