



## Deliverable n°4.2.1

### TECHNICAL REPORT ON VIBRATION PERFORMANCE

03/2022

University of Portsmouth



European Regional Development Fund



**WP T4: Production of a natural biaxial fabric and integration of its composites  
in a sailboat hydrofoil**

**Act 2: Analysis of the influence of flax fibres on the vibration behaviour of the  
composite material**

**(Deliverable 1: Technical report on vibration performance)**

**Vibration damping behaviour of flax fibre reinforced epoxy and its carbon  
fibre hybrid composites: experimental investigation and numerical analysis**

**Moumita Sit, Saeid Dashatan, Jérémy Millot, Zhongyi Zhang, Erwan Grossmann, Hom N  
Dhakal**

**School of Mechanical and Design Engineering**

**University of Portsmouth, Portsmouth UK**





## Abstract

Ce lot de travaux techniques a étudié les propriétés d'amortissement des vibrations des composites époxy renforcés de fibres de lin et de ses composites hybrides carbone/lin. Des stratifiés composites hybrides lin et lin/carbone ont été fabriqués par Kairos, le partenaire principal du WP T4 avec différentes orientations de couches de renforcement. Les propriétés dynamiques ont ensuite été déterminées à partir des mesures de vibration des éprouvettes de test de faisceau et de l'agitateur Derritron VP85. La réponse en fréquence d'un échantillon a été mesurée et la réponse à la résonance a été utilisée pour estimer la fréquence naturelle et le facteur de perte d'amortissement. Des expériences ont ensuite été menées sur une gamme d'échantillons avec différentes géométries et couches de fibres. Des estimations numériques de la réponse, et en particulier des fréquences propres, ont été faites à l'aide de la solution analytique du cantilever Euler-Bernoulli Beam et de l'analyse modale en modélisation par éléments finis dans le logiciel Abaqus. Dans les résultats analytiques, tous les paramètres du faisceau, tels que le module d'élasticité et la densité, sont extraits des propriétés nominales du matériau pour les lamelles individuelles à partir d'un drapage spécifique pour chaque spécimen. Les résultats expérimentaux ont montré que parmi les composites composites et hybrides testés, le taux d'amortissement le plus élevé était celui des composites lin-époxy où les tissus de lin étaient placés dans les couches externes des composites. Les résultats expérimentaux ont montré un bon accord avec les résultats numériques confirmant la précision des résultats. Les résultats de ce travail indiquent que les composites renforcés de fibres de lin pourraient être un matériau commercialement viable pour les applications où des excitations vibratoires sont soumises dans leurs conditions de service et où un amortissement vibratoire élevé est requis.

**Mots-clés:** Fibre de lin; Composites biosourcés ; Amortissement des vibrations ; Modélisation numérique.



## Table des matières

Abstract.....	3
Liste des figures .....	5
Liste des Tables .....	7
1 Introduction .....	8
2 Procédure expérimentale .....	11
2.1 Système d'agitation.....	11
2.2 Capteurs.....	12
2.3 Matières.....	13
3 Théorie .....	18
4 Résultats et Discussion.....	21
4.1 Résultats d'étalonnage et paramètres d'entrée .....	21
4.2 Poutre en alliage d'aluminium comme matériau de référence : Cas 1 .....	22
4.3 Poutre en alliage d'aluminium comme matériau de référence : Cas 2 .....	26
4.4 Poutre en alliage d'aluminium comme matériau de référence : Cas 3 .....	31
4.5 Essai sur poutre époxy hybride lin/carbone .....	34
4.6 Essai sur poutre composite lin/époxy 1 : Cas 1.....	39
4.7 Essai sur poutre composite lin/époxy 1 : Cas 2.....	43
4.8 Essai sur poutre composite lin/époxy 2 : Cas 1.....	48
4.9 Essai sur poutre composite lin/époxy 2 : Cas 2.....	51
4.10 Essai sur poutres composites hybrides lin/carbone (2ème lot d'échantillons) .....	56
5 Conclusions .....	61
References .....	62
Appendix A:.....	64
Appendix B: .....	66
Appendix C: .....	72



## Liste des figures

Figure 1. (a) B&K accelerometer type 4507; (b) B&K accelerometer type 4517	11
Figure 2. Experimental setup for vibration test (a) with B&K accelerometer type 4507; (b) with B&K accelerometer type 4517	11
Figure 3. Infusion of the hybrid carbon-flax samples at Kairos' workshop	13
Figure 4. The 3 dB method diagram for calculating the damping factor Q	17
Figure 5. Experimental setup for aluminium alloy beam with B&K accelerometer type 4507 (a) top view; (b) side view	19
Figure 6. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1000 Hz)	20
Figure 7. Transfer function for swept sine signal (a) 10 Hz to 50 Hz; (b) 100 Hz to 200 Hz; (c) 400 Hz to 500 Hz	21
Figure 8. Experimental setup for aluminium alloy beam with B&K accelerometer type 4517 at the tip	23
Figure 9. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1200 Hz)	23
Figure 10. Transfer function for swept sine signal (a) 20 Hz to 30 Hz; (b) 165 Hz to 185 Hz; (c) 500 Hz to 520 Hz; (d) 990 Hz to 1020 Hz	26
Figure 11. Experimental setup for aluminium alloy beam with B&K accelerometer type 4517 near the clamped end	28
Figure 12. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1200 Hz)	28
Figure 13. Transfer function for swept sine signal (a) 25 Hz to 35 Hz; (b) 175 Hz to 195 Hz; (c) 495 Hz to 520 Hz; (d) 950 Hz to 1010 Hz	31
Figure 14. Experimental setup for flax/carbon hybrid epoxy beam (a) top view; (b) side view	32
Figure 15. Transfer function for swept sine signal (100 Hz to 3000 Hz)	32
Figure 16. Transfer function for swept sine signal (a) 120 Hz to 150 Hz; (b) 840 Hz to 900 Hz; (c) 950 Hz to 1030 Hz; (d) 2400 Hz to 2560 Hz	34
Figure 17. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 1: Case 1	35
Figure 18. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1000 Hz)	36
Figure 19. Transfer function for swept sine signal (a) 15 Hz to 25 Hz; (b) 130 Hz to 150 Hz; (c) 360 Hz to 400 Hz; (d) 700 Hz to 740 Hz; (e) 750 Hz to 830 Hz	38
Figure 20. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 1: Case 2	39
Figure 21. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1000 Hz)	40
Figure 22. Transfer function for swept sine signal (a) 16 Hz to 26 Hz; (b) 130 Hz to 150 Hz; (c) 360 Hz to 390 Hz; (d) 680 Hz to 750 Hz; (e) 750 Hz to 830 Hz	42
Figure 23. First three frequencies of vibration for flax/epoxy composite (beam 1) calculated by Abaqus FEM	43
Figure 24. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 2: Case 1	44
Figure 25. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1500 Hz)	45



Figure 26. Transfer function for swept sine signal (a) 45 Hz to 65 Hz; (b) 950 Hz to 1090 Hz; (c) 360 Hz to 400 Hz	46
Figure 27. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 2: Case 2	47
Figure 28. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1500 Hz	48
Figure 29. Transfer function for swept sine signal (a) 50 Hz to 70 Hz; (b) 360 Hz to 400 Hz; (c) 950 Hz to 1050 Hz; (d) 1250 Hz to 1350 Hz	50
Figure 30. First three frequencies of vibration for flax/epoxy composite (beam 2) calculated by Abaqus FEM	51
Figure 31. Experimental setup for 2 <sup>nd</sup> phase of tests	52
Figure 32. Comparison of damping ratio and loss factor for different samples	55



Liste des Tables

Table 1.	Mass and geometry of test samples used in first phase	13
Table 2.	Mass and geometry of test samples used in second phase	14
Table 3.	Properties of individual lamina	16
Table 4.	Calculation of Young’s modulus of aluminium alloy using B&K accelerometer type 4507	22
Table 5.	Calculation of Young’s modulus of aluminium alloy using B&K accelerometer type 4517	27
Table 6.	Numerical result for the aluminium alloy cantilever beam	27
Table 7.	Resonance frequencies of different laminates obtained from experiment and numerical analysis	53
Table 8.	Damping ratios and loss factor calculated by 3dB method for different laminates	54





## 1 Introduction

L'introduction des composites de fibres végétales naturelles (NPFC) au cours des dix dernières années a suscité un intérêt considérable dans les applications d'ingénierie clés telles que les industries de l'automobile, de la marine et de la construction. En plus d'être durables et biodégradables, les NPFC offrent plusieurs avantages tels qu'un faible coût, un poids léger, une faible densité, une résistance spécifique élevée et une faible abrasivité par rapport à leurs homologues conventionnels tels que les composites renforcés de fibres de verre et de carbone. De plus, la propriété d'amortissement inhérente aux fibres végétales libériennes naturelles (lin, chanvre, jute et kénaf) est un facteur important dans le contrôle de la réponse de résonance et contribue par conséquent à prolonger leur durée de vie sous des charges cycliques et d'impact.

Cependant, l'application des NPFC dans les composants structuraux nécessite une compréhension approfondie de leurs propriétés matérielles et de leurs performances mécaniques. Bien qu'un certain nombre de rapports sur la technique de fabrication et les performances mécaniques des composites renforcés de fibres de lin soient disponibles dans la littérature publiée, seules quelques enquêtes peuvent être observées concernant les performances d'amortissement des vibrations. Dans ce rapport, les fréquences naturelles et les propriétés d'amortissement des vibrations des biocomposites renforcés de fibres de lin et des composites hybrides renforcés de fibres de lin et de carbone sont étudiées et caractérisées expérimentalement et numériquement..

De nombreuses structures d'ingénierie en composites, y compris les équipements militaires, les automobiles, les avions, les coques de bateaux, les pales d'éoliennes et les engins spatiaux, rencontrent des amplitudes vibratoires au cours de leur durée de vie. Par exemple, la fatigue provoquée par les vibrations conduit souvent à l'initiation de microfissures dans ces structures, qui se propagent rapidement, entraînant par conséquent une rupture prématurée [1]. Par conséquent, il est nécessaire de prêter attention aux propriétés d'absorption acoustique et aux comportements d'amortissement des vibrations des structures composites soumises à divers scénarios d'excitation, afin de réduire l'effet des vibrations et du bruit. À l'heure actuelle, les méthodes courantes de l'état de l'art consistent à améliorer les performances d'amortissement des structures tout en conservant les autres fonctions structurelles primaires. Au cours des deux dernières décennies, il y a eu une





demande croissante pour des matériaux plus respectueux de l'environnement [2]. Malgré leur résistance à la traction et leur rigidité élevées, les composites renforcés de fibres de carbone et de verre ont un faible coefficient d'amortissement [3–5]. Les fibres végétales naturelles telles que le chanvre et le lin, en revanche, ont une résistance à la traction inférieure à celle des fibres synthétiques telles que le verre et le carbone [6–8], mais ont des propriétés d'amortissement beaucoup plus élevées [5,9] en raison de leur structure morphologique creuse. capable de dissiper une énergie élevée. En raison de ces caractéristiques inhérentes, les NPFC ont le potentiel de surmonter certains problèmes critiques, tels que les propriétés d'amortissement des vibrations qui ne peuvent pas être traitées par les matériaux composites conventionnels dans les structures d'ingénierie. Ce fait conduit à l'idée de développer de nouveaux composites hybrides, où les fibres de lin naturelles peuvent être combinées avec des fibres de carbone pour produire des fonctionnalités nouvelles et avancées dans les structures [10]. En particulier, les fibres végétales naturelles telles que le lin présentent certains avantages clés par rapport aux fibres synthétiques, notamment la réduction des problèmes de santé au travail dans la fabrication, des coûts plus faibles, un impact environnemental potentiellement plus faible et des propriétés mécaniques spécifiques relativement bonnes [11-13].

Les principaux objectifs de cette étude sont d'évaluer le comportement d'amortissement vibratoire des composites époxy à base de fibres de lin et de son système hybride de carbone en utilisant des approches expérimentales et numériques. Pour cela, le test de vibration sinusoïdale étagée des poutres en porte-à-faux hybrides de lin et de carbone a été étudié à l'aide d'un système d'agitation électrodynamique capable d'identifier les principales réponses en fréquence du système d'agitation et d'identifier les principaux modes et caractéristiques d'amortissement d'une poutre. À des fins d'étalonnage, un faisceau d'aluminium a été utilisé afin d'identifier une large gamme de fréquences de résonance depuis les basses, par ex. 10 Hz à élevé, par ex. 1000 Hz, plage de fréquence due aux modes propres du faisceau utilisé. Le protocole d'essai identifié à partir de l'étude préliminaire sur la poutre en aluminium a été appliqué aux éprouvettes composites en fibres naturelles de diverses compositions et formes géométriques.

Afin de comparer et de valider les résultats expérimentaux, une solution analytique basée sur la théorie du faisceau d'Euler-Bernoulli a été utilisée. En plus de la solution



analytique, le logiciel d'analyse par éléments finis (FEA) d'analyse modale Abaqus est utilisé pour le calcul des trois premières fréquences propres des faisceaux. Les détails de la méthode analytique sont fournis dans les sections des sections suivantes.

## 2 Procédure expérimentale

Les fréquences et les taux d'amortissement ont été mesurés à l'aide de la méthode du faisceau en porte-à-faux de vibration, avec un agitateur Derritron VP85.

### 2.1 Système d'agitation

Le système de secouage électromagnétique Derritron Electronics (type VP85) est alimenté par un amplificateur de puissance DataPhysics DSA5-1K avec une puissance maximale de 1000W et est contrôlé par un module de contrôle et d'acquisition de données DataPhysics Abacus et Quattro. L'agitateur est capable d'un déplacement crête à crête de 2,54 cm entre 5 et 10 Hz donnant lieu à une accélération maximale de 1 g à 5 Hz à 4,5 g à 10 Hz ; elle est limitée par une vitesse maximale de 0,76 m/s entre 10 et 120 Hz donnant lieu à une accélération maximale de 4,5 g à 10 Hz à 55 g à 120 Hz ; de 120 Hz à 3000 Hz, le système est limité par l'accélération maximale de 55g. L'estimation ci-dessus est basée sur une masse mobile d'environ 6,15 kg. Au fur et à mesure que les masses en mouvement augmentent, l'accélération maximale atteinte à des fréquences supérieures à 120 Hz sera réduite en conséquence.

En raison des caractéristiques de l'agitateur ci-dessus, pour les tests de balayage sinusoïdal, de sinus étagé et de vibration aléatoire à large bande, le système de contrôle de l'agitateur nécessite beaucoup moins d'efforts pour égaliser et reproduire le signal souhaité sur l'armature mobile à des fréquences supérieures à environ 120 Hz. Le système nécessitera environ 10 à 30 s pour des fréquences particulières dans la plage de fréquences inférieures de 10 à 120 Hz. par exemple, une onde sinusoïdale à 21 Hz a une erreur d'amplitude de 7 à 8 %, alors que cette erreur n'est que de 1 à 5 % à d'autres fréquences entre 10 et 30 Hz. Cependant, il est tout à fait possible de contourner ces « points de fréquence caractéristiques du shaker » - appelons-les « spots du shaker ». Pour ce faire, nous avons proposé :

- 1) Une fois l'éprouvette montée sur la plate-forme mobile de l'agitateur (armature), nous exécutons un large test sinusoïdal étagé dans la plage de 10 à 1 000 Hz et de 1 000 à 2 500 Hz pour identifier l'un des « points de l'agitateur » et les principaux modes de le spécimen. Dans ce cas, nous utilisons un pas de fréquence linéaire grossier d'environ 0,5-1 Hz pour la plage 10-1 000 Hz et de 2 Hz pour la plage 1 000-2 500 Hz..



- 2) Décomposez les bandes de fréquences de test en morceaux beaucoup plus petits en fonction a) des "points de l'agitateur" à l'aide de l'accélération d'entrée mesurée au centre de la plate-forme mobile de l'agitateur - entrée, et b) des principaux modes naturels de l'échantillon à l'aide de l'accélération mesurée à l'extrémité mobile de la poutre en porte-à-faux de l'échantillon - sortie. Si l'échantillon d'essai a une fréquence naturelle proche des «points de l'agitateur», pour réduire l'erreur d'amplitude autour des points de l'agitateur, un réglage de «délai d'attente» accru est essayé. Cela donne généralement des résultats satisfaisants avec des erreurs de magnitude de 10 %, mais avec un temps de test accru
- 3) Exécutez les tests avec les multiples bandes avec une résolution de fréquence différente pour vérifier qu'il y a un nombre suffisant de points de données pour chaque résonance afin d'estimer le facteur d'amortissement ou de perte en utilisant soit la méthode de la bande passante à demi-puissance, soit l'ajustement du cercle SDOF de chacun graphique de Nyquist du mode.

Un mobilisateur DataPhysics avec mode sinusoïdal étagé a été utilisé pour la génération de signaux, l'acquisition et l'analyse de données. Deux accéléromètres ont été utilisés. Un accéléromètre était fixé sur la pointe mobile du faisceau pour mesurer la réponse dynamique du faisceau composite. Un autre accéléromètre était fixé sur l'agitateur pour contrôler et obtenir une accélération constante (0,5 g) de l'agitateur.

## 2.2 Capteurs

Deux types d'accéléromètres ont été utilisés pour enregistrer la réponse de l'échantillon.

1. Type ICP B&K 4507 B : Initialement, les deux accéléromètres (échantillon et agitateur) étaient de type ICP B&K 4507 B 006 (Figure 1a). Cet accéléromètre pèse 4,8 g. Cependant, la masse de cet accéléromètre était plus élevée que la masse de l'échantillon, ce qui affectait la propriété d'amortissement et le module de Young de l'échantillon..
2. Type B&K 4517 : L'accéléromètre fixé à l'échantillon a été changé et un accéléromètre B&K 4517 de type ICP (Figure 1b) a été utilisé à la place. Cet accéléromètre pèse 0,6 g, ce qui est beaucoup plus léger que le précédent et améliore le résultat expérimental.



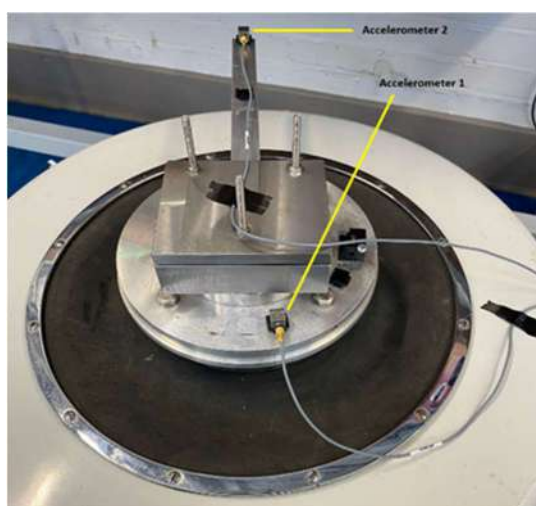
(a)



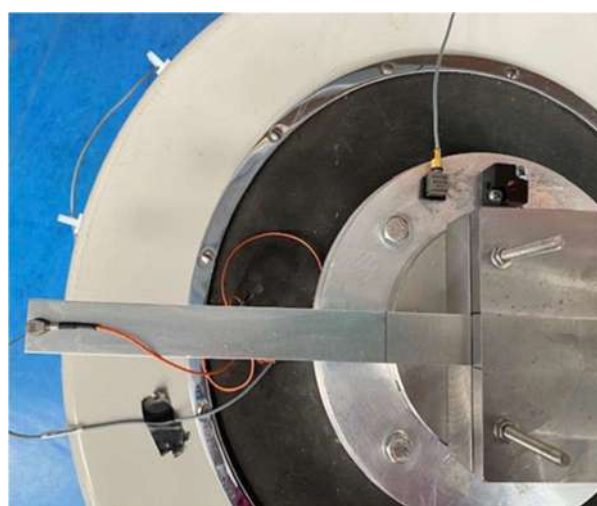
(b)

**Figure 1. (a) B&K accelerometer type 4507; (b) B&K accelerometer type 4517**

L'ensemble des montages expérimentaux est représenté sur la figure 2.



(a)



(b)

**Figure 2. Experimental setup for vibration test (a) with B&K accelerometer type 4507; (b) with B&K accelerometer type 4517**

### 2.3 Matières

L'objectif est d'insérer des fibres de lin dans une poutre en fibre de carbone principalement unidirectionnelle et de trouver un bon compromis entre l'absorption des vibrations et la perte de propriétés mécaniques. Un ensemble de onze lots d'échantillons a été conçu et réalisé afin de tester l'influence de deux paramètres : l'architecture de la toile de lin et la position de la toile de lin dans le drapage. En effet ces paramètres ont été identifiés dans



[14-15] comme influents sur l'amortissement des vibrations.

Trois architectures de toile de lin sont testées :

\*Unidirectionnel ('UD') avec toutes les fibres dans la même direction. Le nom commercial est "FlaxTape" du fournisseur EcoTechnilin. \*Équilibré ("EQ") avec toutes les fibres à 0/90° de la direction du tissu, 300 g/m². Le nom commercial est « Amplitex » du fournisseur Bcomp.

\*Biaxial ('BX') avec toutes les fibres à  $\pm 45^\circ$  de direction du tissu, 312 g/m². Ce tissu a été développé lors du projet FLOWER avec le fournisseur Depestele.

Trois positions de lin dans le drapage ont été testées : couche extérieure « N » ; extérieur mais une couche « N-1 » et extérieur mais deux couches « N-2 ». En étiquetant 'C' un pli de carbone et 'F' un pli de lin, cela donne alors 'CCCC' pour la configuration 'N' et 'CFCC' pour la configuration 'N-2'.

Deux poutres supplémentaires ont été fabriquées pour référence d'une poutre uniquement en carbone\* et d'une poutre uniquement en lin (\*pour pouvoir la comparer avec d'autres poutres, il y a effectivement du lin dans le noyau).

Afin de pouvoir comparer les essais de vibration entre tous les échantillons, il a été décidé d'essayer de maintenir une géométrie et des caractéristiques mécaniques similaires entre tous les échantillons. Par conséquent, les échantillons sont conçus pour avoir une épaisseur, une longueur et une rigidité en flexion similaires.

Maintenir une rigidité en flexion avec la même épaisseur tout en ajoutant un pli plus faible à l'extérieur (lin vs carbone) est un défi. Pour ce faire, les échantillons sont des échantillons sandwich, et pour compenser la réduction de rigidité d'une couche extérieure de lin, des plis de carbone supplémentaires sont ajoutés vers le plan de symétrie du sandwich. Mais pour conserver la même épaisseur de sandwich, le noyau doit réduire en épaisseur à partir de la même épaisseur de ces plis de carbone supplémentaires. Afin d'éviter l'usinage CNC de l'âme pour enlever des dixièmes de millimètres, l'âme est constituée de plusieurs plis fins de lin. L'hypothèse est que ces nappes sont proches de l'axe neutre, donc elles ne percevront que des déformations infimes et n'affecteront pas l'amortissement.





Ces poutres ont été fabriquées par procédé d'infusion sous vide dans un environnement à température et humidité d'air contrôlées. Les tissus de lin ont été séchés avant drapage, la résine (Sicommin Infugreen 810 + SD 8824 durcisseur bio-époxy) était à température ambiante avant infusion. Tous les échantillons ont été perfusés en même temps les uns à côté des autres, comme illustré à la figure 3.

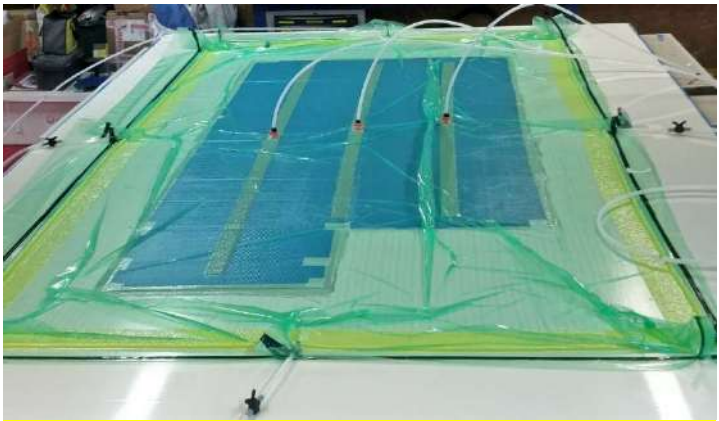


Figure 3 – Infusion of the hybrid carbon-flax samples at Kairos’ workshop.

Mesurer l'amortissement des vibrations n'est pas une tâche aisée, de nombreux paramètres influencent les résultats, et les valeurs mesurées sont assez petites donc sensibles au bruit. Ainsi, avant de tester ces poutres composites complexes en sandwich lin-carbone, une poutre en alliage d'aluminium plus simple (nuance 6082 T6) a été utilisée comme matériau de référence pour identifier les protocoles d'essai et les paramètres. Le même protocole a été utilisé pour le reste des matériaux. Les matériaux utilisés dans les première et deuxième phases des expériences sont répertoriés dans le tableau 1 et le tableau 2, respectivement. La composition détaillée des échantillons est donnée en annexe A.

Table 1. Mass and geometry of test samples used in first phase

Material	Mass (gm)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
1. Aluminium alloy Grade 6082 T6	20.18	240 Free length: 200 Root length: 40	21	1.45
2. Carbon-flax epoxy hybrid composite	35.04	240 Free length: 180 Root length: 60	20	5.20





<b>3. Flax/epoxy composite (beam 1)</b>	17.30	251 Free length: 200 Root length: 51	19	3.00
<b>4. Flax/epoxy composite (beam 2)</b>	11.6	168 Free length: 117 Root length: 51	19	3



Table 2. Mass and geometry of test samples used in second phase

Material	Fibre layup/stacking sequence	Length (mm)	Mass (gm)	Plate Thickness (mm)	Width (mm)
A1	CCCFC UD	Total length: 530 Free length: 450 Root length: 80	42.6	5.98	10.35
A4			41.6	5.87	10.35
B2	CCCCF 90		45.9	6.14	11.7
B3			43.5	6.02	11.3
C1	CCCCF UD		43.3	5.33	11.43
C4			43.4	5.4	11.43
D1	CCCCF 45		43	5.7	11.4
D3			44.2	5.74	11.5
E2	CCCFC 45		40.63	6.02	9.83
E3			40.58	6.15	9.84
F2	CCFCC 90		41.5	6.3	9.83
F4			40.76	6.2	9.83
G1	CCFCC 45		41.6	6.37	9.72
G3			41.4	6.34	9.75
H3	CCFCC UD		36.8	5.41	9.83
H4			38.3	5.6	9.7
I3	CCCFC 90		40.8	6.15	9.81
I4			40.1	5.9	9.79
Y1	Reference flax	Total length: 340	31.3	7.3	11.35
Y2		Free length: 290	31.7	7.3	11.45
Y3		Root length: 50	30.97	7.2	11.28
Y4			31.6	7.26	11.47
Z1	Reference carbon	Total length: 580	42.8	5.78	9.62
Z3		Free length: 490	43	5.76	9.62
Z4		Root length: 90	42	5.72	9.62

### 3 Théorie

Les fréquences propres d'une poutre en porte-à-faux peuvent être calculées à partir de l'équation (1):

$$f_n = \frac{k_n^2}{2\pi L^2} \left( \frac{EI}{\rho A} \right)^{1/2} \quad (1)$$

où,

E: module of elasticity

I: second moment of area

$\rho$ : density

A: cross-section area

L: beam free length

L'indice n fait référence au numéro de mode et en utilisant la solution aux valeurs propres, les trois premiers modes peuvent être calculés sont:

$$k_1 = 1.875, k_2 = 4.694, k_3 = 7.855$$

En utilisant la théorie classique des stratifiés (CLT), le module de Young effectif du stratifié,  $E_x$ , peut être calculé comme l'équation (2):

$$E_x = \frac{(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)}{tA_{22}} \quad (2)$$

où, les composantes de  $A_{ij}$  dans l'équation (2) peuvent être calculées à partir de:

$$A_{ij} = \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_k) \quad (3)$$

où, les  $\bar{Q}_{ij}$  sont les composantes de la matrice de rigidité laminaire transformée. Les composants de la matrice de rigidité de la lame  $Q_{ij}$  peuvent être calculés en utilisant les propriétés matérielles de chaque lame comme équation (4):

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4)$$



$$Q_{11} = \frac{v_{12}E_1}{1 - v_{12}v_{21}}$$

$$Q_{11} = \frac{E_2}{1 - v_{12}v_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Pour les résultats analytiques, le module d'Young effectif pour chaque échantillon est calculé à partir des propriétés du matériau fournies. Ensuite, connaissant d'autres propriétés et paramètres tels que la densité et les dimensions de l'échantillon, les fréquences naturelles dans les trois premiers modes de vibration peuvent être calculées et comparées aux résultats expérimentaux. Les propriétés laminaires fournies par Kairos sont présentées dans le tableau 3.

*Table 3. properties of individual lamina*

Material	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	v <sub>12</sub>	Thickness (mm)	C <sub>55</sub> (GPa)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>UD Carbone (300g)</b>	112.22	5.54	0.352	0.357	5.321	1469.20
<b>UD Flax (200g)</b>	19.96	4.42	0.320	0.360	2.470	1298.80
<b>UD FlaxTape (110g)</b>	26.25	4.42	0.320	0.194	2.138	1298.80
<b>UD FlaxTape (70g)</b>	26.25	4.42	0.320	0.124	2.138	1298.80
<b>FLAX équilibré</b>	12.19	12.19	0.116	0.541	2.470	1298.80
<b>FLAX +/- 45°</b>	7.27	7.27	0.473	0.541	5.463	1298.80

Les propriétés dynamiques correspondant au 2e pic de résonance ont été déterminées à l'aide de la méthode de bande passante de 3 dB (fréquence de coupure), également connue sous le nom de méthode de bande passante à demi-puissance, comme illustré à la figure 4. Dans une FRF, l'amortissement est proportionnel à la largeur de le pic de résonance autour de la fréquence centrale du pic. Le facteur d'amortissement (Q<sub>n</sub>) est trouvé par l'équation (5):

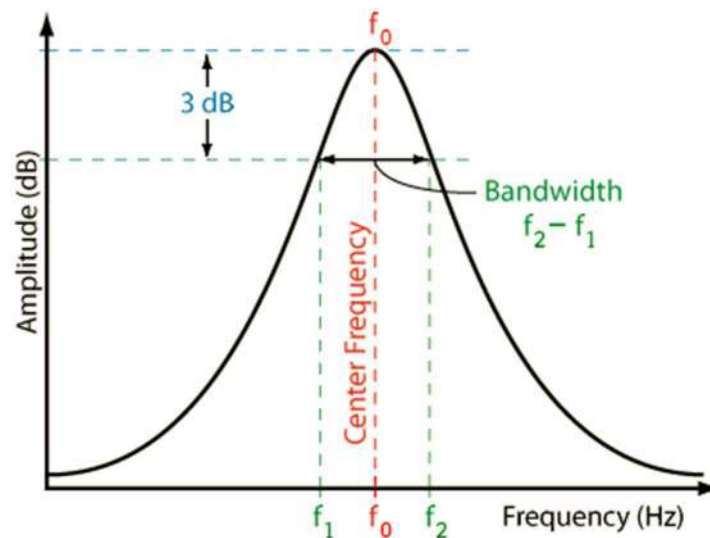
$$Q_n = f_0 / (f_2 - f_1) \quad (5)$$

où:

$f_0$  = frequency of resonant peak in Hertz

$f_2$  = frequency value, in Hertz, 3 dB down from peak value, higher than  $f_0$

$f_1$  = frequency value, in Hertz, 3 dB down from peak value, lower than  $f_0$



**Figure 4. The 3 dB method diagram for calculating the damping factor  $Q$**

La relation entre le facteur d'amortissement ( $Q$ ), le rapport d'amortissement ( $\zeta$ ) et le facteur de perte ( $\eta$ ) est donnée dans l'équation (6):

$$\eta_n = \frac{1}{Q_n} = 2 \cdot \zeta_n = \frac{\Delta f_{3dB}}{f_n} \quad (6)$$

où  $n$  = numéro de mode, les points de demi-puissance sont utilisés pour déterminer le taux d'amortissement.



## 4 Résultats et Discussion

Pour assurer la précision et la sensibilité des capteurs, les accéléromètres ont été calibrés avant de mener les expériences.

### 4.1 Résultats d'étalonnage et paramètres d'entrée

Les sorties pour l'étalonnage de chaque capteur et les paramètres d'entrée sont présentés comme suit:

#### Channel 1:

===== Measurement =====

Fspan : 240.0 Hz  
Same as Test : Off  
Lines : 800  
Number of Averages : 10  
Tolerance : 10.00%  
Freq Mode : Value

===== Calibrator =====

Number of Cal Chans : 1  
Freq : 159.2 Hz  
Cal Level : 1.000 g (RMS)

===== Channels =====

Ch#	EU	Ref (mV/EU)	Cal (mV/EU)	%Chg
1	g	500.3	<b>532.8</b>	6.49

#### Channel 2:

===== Measurement =====

Fspan : 240.0 Hz  
Same as Test : Off  
Lines : 800  
Number of Averages : 10  
Tolerance : 10.00%  
Freq Mode : Value

===== Calibrator =====

Number of Cal Chans : 1  
Freq : 159.2 Hz  
Cal Level : 1.000 g (RMS)

===== Channels =====

Ch#	EU	Ref (mV/EU)	Cal (mV/EU)	%Chg
2	g	482.1	<b>519.5</b>	7.76

Input Channels

C	Nam	Couplin	Range(eu	mV/e	e	Seria	Pt/Di	Windo
h	e	g	)	u	u	l	r	w
1	I1	ICP	18.77	532.8	g	N/A	0:-Z	Flattop
2	I2	ICP	19.25	519.5	g	N/A	0:-Z	Flattop

4.2 Poutre en alliage d'aluminium comme matériau de référence : Cas 1

L'expérience a été menée sur la poutre en alliage d'aluminium avec les deux accéléromètres de type B&K accéléromètre 4507 (Figure 5). L'accéléromètre sur l'échantillon a été placé sur la pointe du faisceau pour mesurer la réponse dynamique du faisceau. Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1000 Hz avec 2000 points de données (distribution linéaire). La fonction de transfert est présentée à la figure 6. Suite au balayage complet, afin de mesurer les fréquences de résonance avec plus de précision, plusieurs balayages ont été effectués autour de la plage de chaque fréquence de résonance avec 200 points de données. Le module de Young de l'alliage d'aluminium est calculé selon la norme ASTM E756 et présenté dans le tableau 4.

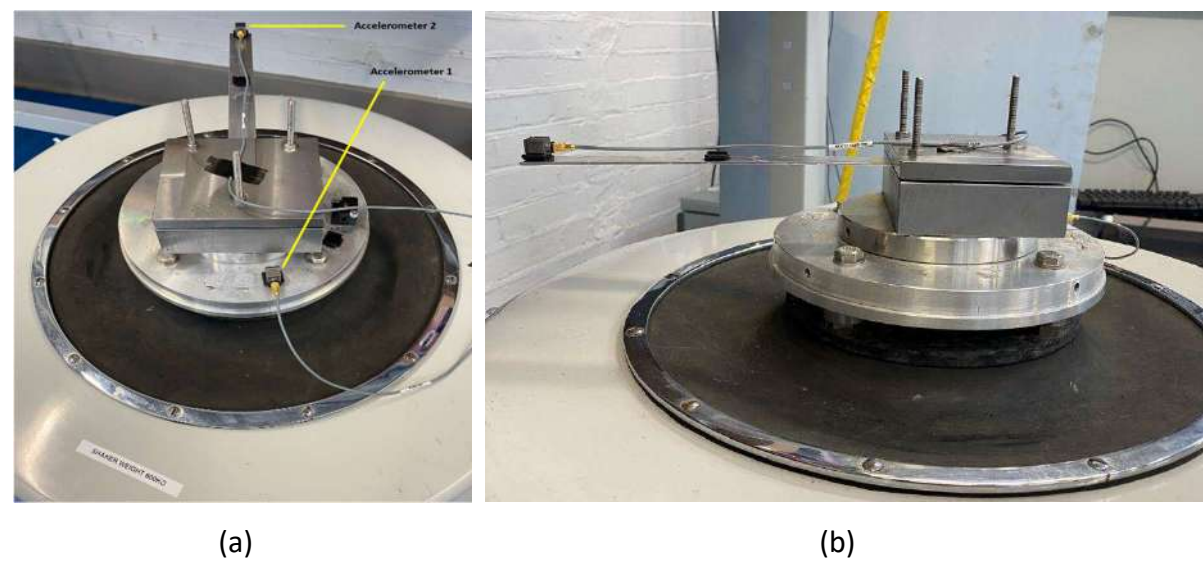
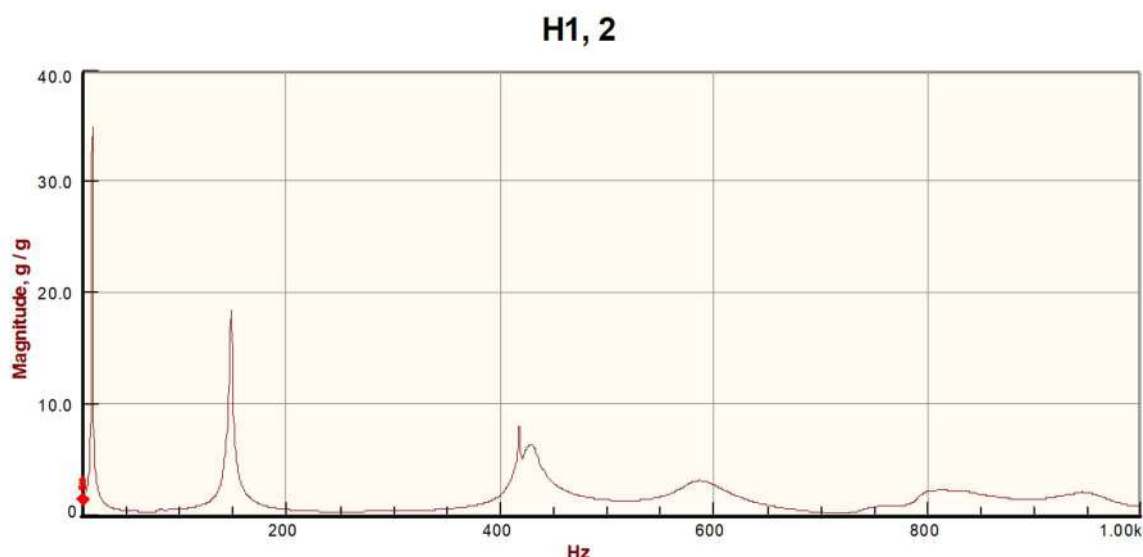


Figure 5. Experimental setup for aluminium alloy beam with B&K accelerometer type 4507 (a) top view; (b) side view



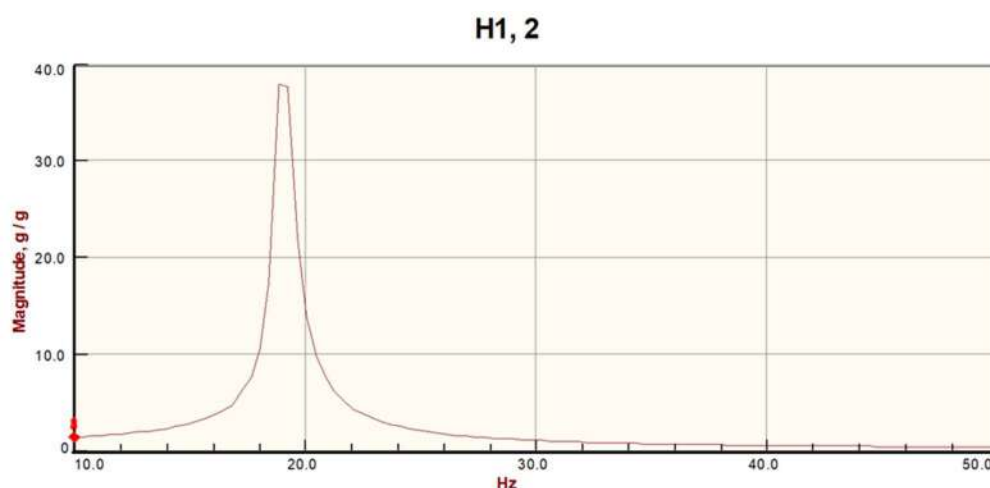


**Figure 6. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1000 Hz)**

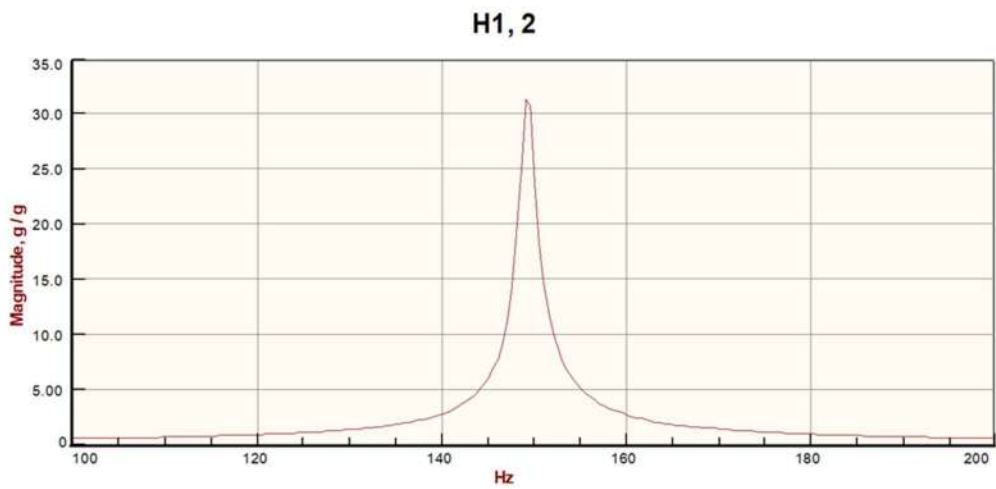
On observe sur la figure 6 que les fréquences de résonance se produisent à 19,4 Hz, 149 Hz et 429 Hz.

Afin de mesurer plus précisément les fréquences de résonance, plusieurs balayages ont été effectués pour la gamme de fréquences suivante : 10-50 Hz ; 100-200 Hz, 400-500 Hz

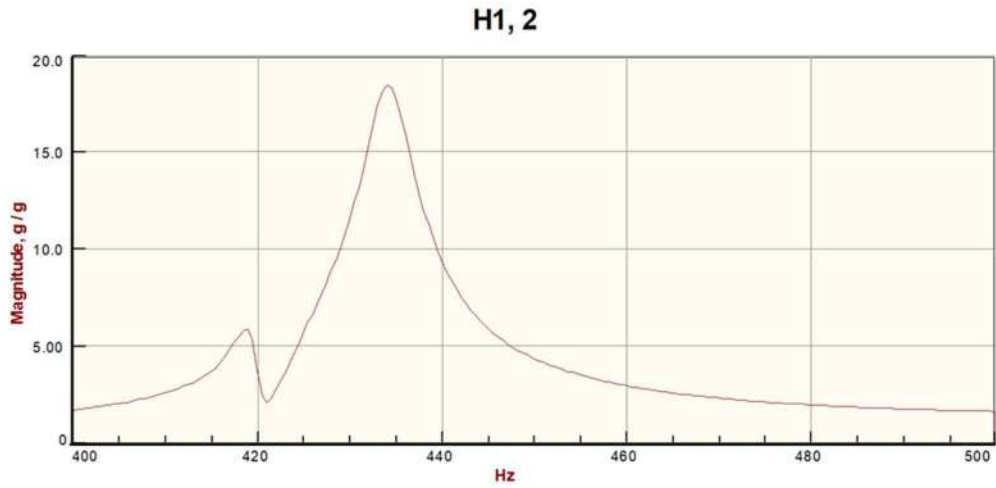
Les fonctions de transfert pour les gammes de fréquences 10-50 Hz, 100-200 Hz et 400-500 Hz sont présentées respectivement dans les figures 7(a)-6(c). Les fréquences de résonance sont identifiées à 18,9 Hz, 149 Hz et 434 Hz respectivement.



(a)



(b)



(c)

**Figure 7. Transfer function for swept sine signal (a) 10 Hz to 50 Hz; (b) 100 Hz to 200 Hz; (c) 400 Hz to 500 Hz**

On observe d'après le tableau 4 que le module d'Young de l'alliage d'aluminium s'écarte de 33% de celui de la valeur théorique. La raison probable de l'erreur était supposée être la masse de l'accéléromètre. Afin de minimiser l'effet de la masse de l'accéléromètre, un accéléromètre plus léger (accéléromètre B&K type 4517) a été utilisé.

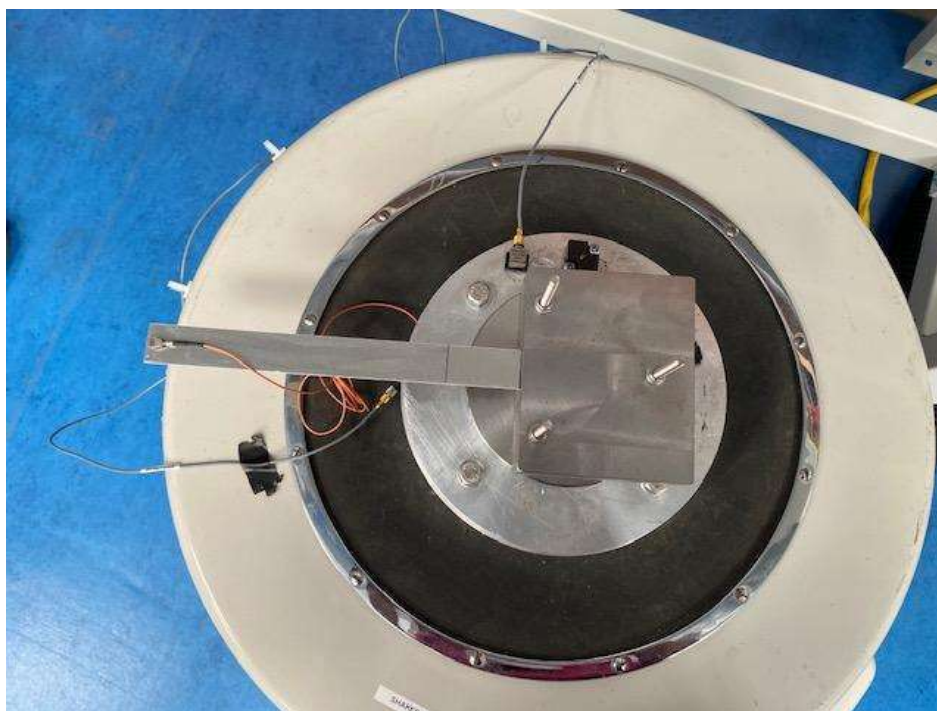


Table 4. Calculation of Young’s modulus of aluminium alloy using B&K accelerometer type 4507

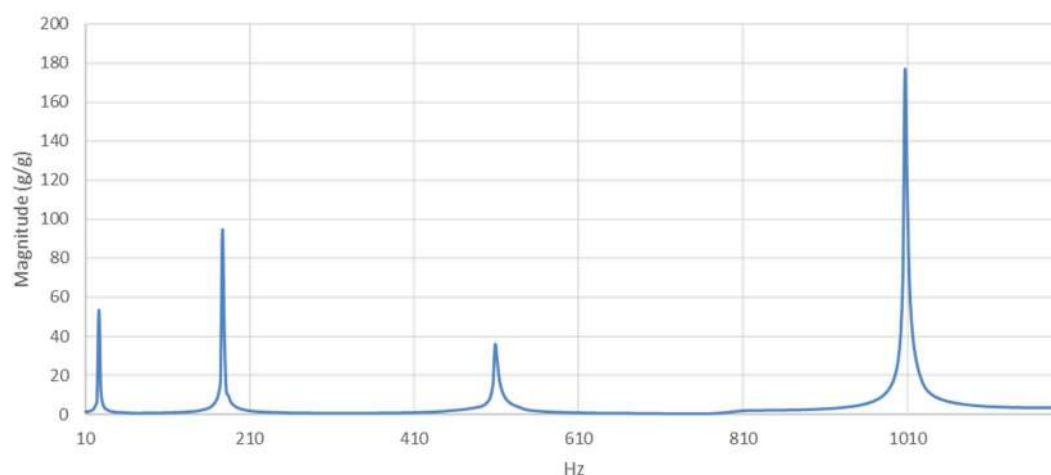
ASTM E756 - Aluminum sample									
	unit	values				average	standard dev.	average (n>1)	standard dev. (n>1)
rho	kg/m3	2700	-	-	-	-	-		
l	m	0,2	-	-	-	-	-		
H	m	1,45E-03	-	-	-	-	-		
fn	Hz	26,075	141,67	434,3	866,75	-	-		
Cn	-	0,55959	3,5069	9,8194	19,242	-	-		
E	MPa	53535	40238	48232	50028	48008	4875	46166	4255
E theory	MPa	69000	69000	69000	69000	69000	nc		
(E-Eth)/Eth	%	-22%	-42%	-30%	-27%	-30%		<b>-33%</b>	6%
η (-3dB meth)	%	2,5%	1,6%	1,5%	1,3%	1,7%	0,5%	1,4%	0,1%

### 4.3 Poutre en alliage d'aluminium comme matériau de référence : Cas 2

L'expérience du cas 2 a été menée sur la même poutre en alliage d'aluminium que celle utilisée pour le cas 1. Un accéléromètre B&K de type 4517 a été fixé à l'extrémité de la poutre en porte-à-faux pour mesurer la réponse dynamique de la poutre et un accéléromètre B&K de type 4507 a été monté sur l'agitateur. pour contrôler l'accélération de l'agitateur comme illustré à la figure 8. Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1200 Hz avec 500 points de données (distribution linéaire) et la fonction de transfert est présentée à la figure 9.



**Figure 8. Experimental setup for aluminium alloy beam with B&K accelerometer type 4517 at the tip**



**Figure 9. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1200 Hz)**

Les fréquences de résonance sont identifiées à 26,7 Hz, 177 Hz, 508 Hz et 1010 Hz, comme illustré à la Figure 9.

Après le balayage à gamme complète, afin de mesurer plus précisément les fréquences naturelles et les taux d'amortissement, trois balayages ont été effectués autour de la plage de chaque fréquence naturelle. Les gammes de fréquences suivantes ont été prises en compte pour le signal sinusoïdal balayé et les fonctions de transfert correspondantes sont présentées respectivement dans les figures 10(a)-9(d) :

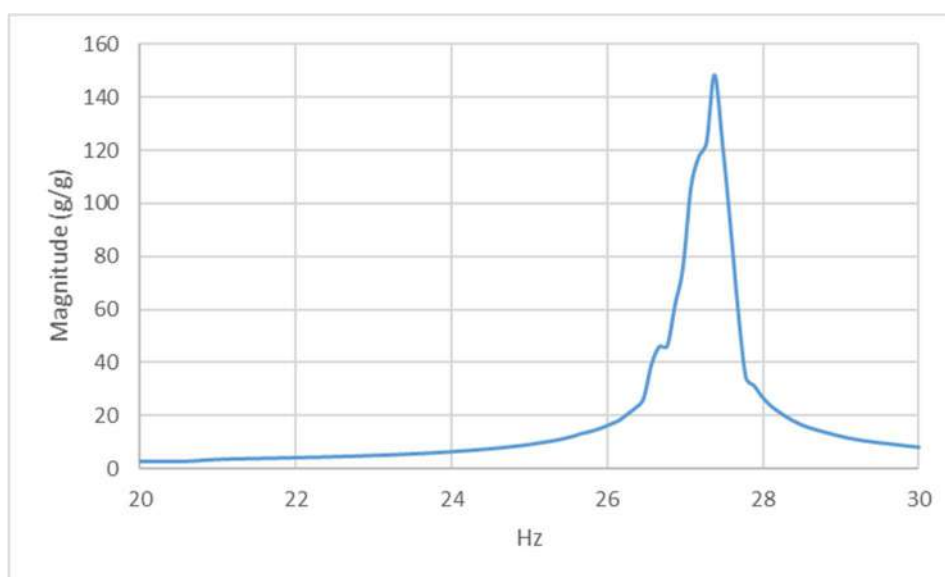
20-30 Hz avec 100 points de données linéaires

165-185 Hz avec 100 points de données linéaires

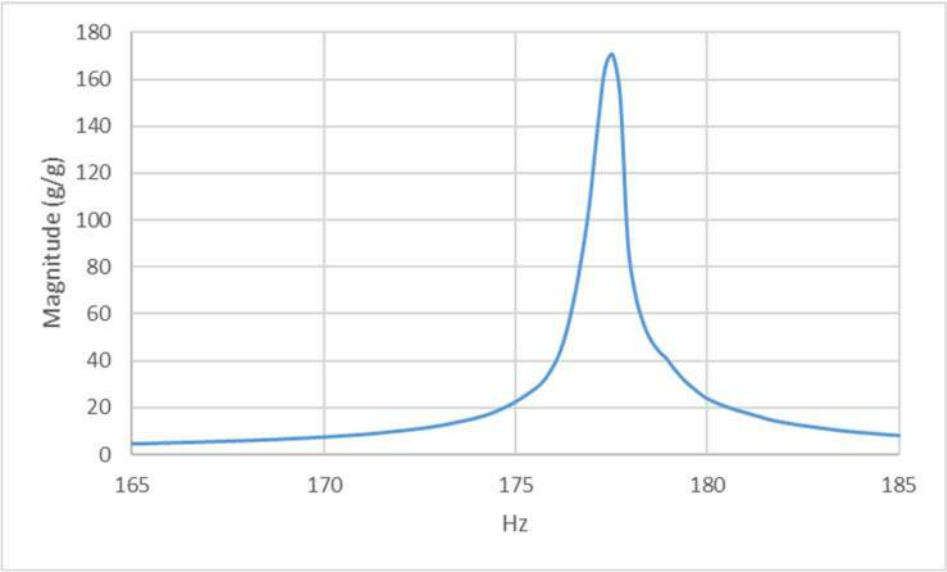
500-520 Hz avec 100 points de données linéaires

990-1020 Hz avec 100 points de données linéaires

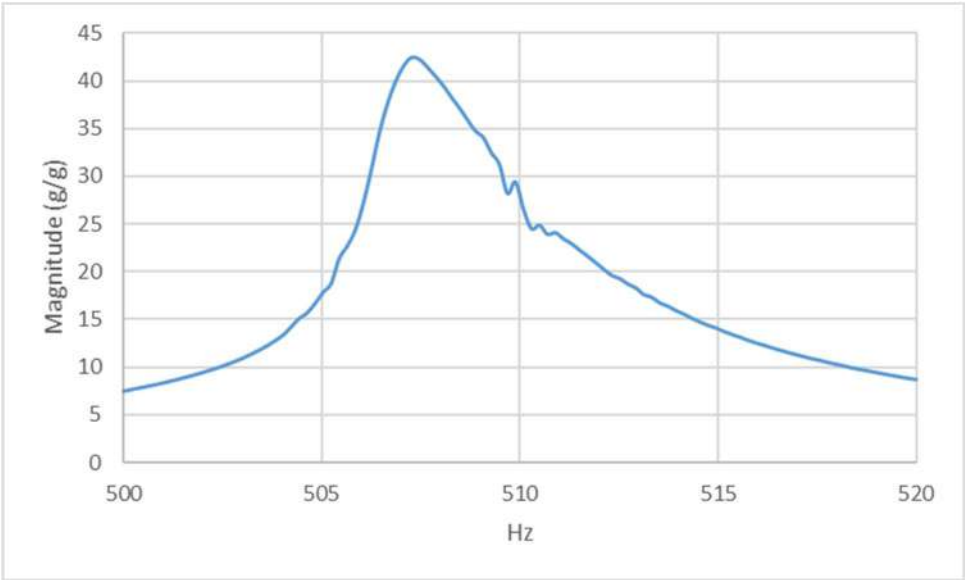
Les fréquences de résonance sont identifiées à 27,4 Hz, 178 Hz, 507 Hz et 1010 Hz respectivement.



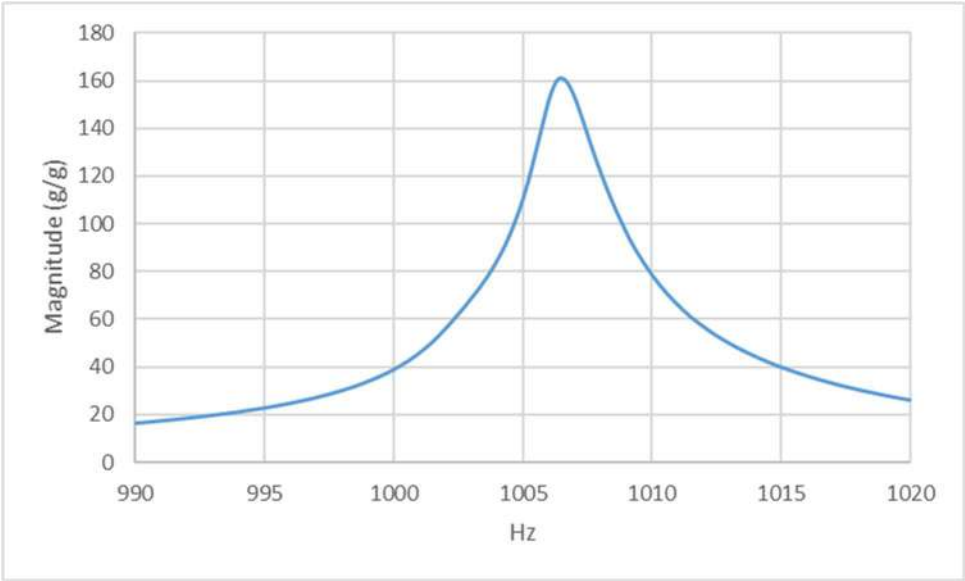
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 10. Transfer function for swept sine signal (a) 20 Hz to 30 Hz; (b) 165 Hz to 185 Hz; (c) 500 Hz to 520 Hz; (d) 990 Hz to 1020 Hz**

Le calcul du module de Young est présenté dans le tableau 5. Les fréquences de résonance obtenues à partir de la modélisation numérique sont présentées dans le tableau 6 et comparées aux valeurs expérimentales. On observe d'après le tableau 5 que le module d'Young de l'alliage d'aluminium s'écarte de 1 % de la valeur théorique. L'amélioration du calcul du module de Young signifie l'effet de la masse de l'accéléromètre sur le résultat expérimental. Il est évident que la masse ajoutée de l'accéléromètre peut être négligée pour l'accéléromètre plus léger.

Le tableau 6 montre clairement que les fréquences de résonance expérimentales concordent bien avec les fréquences de résonance obtenues à partir de la modélisation numérique avec un écart moyen de 0,5 %.



Table 5. Calculation of Young's modulus of aluminium alloy using B&amp;K accelerometer type 4517

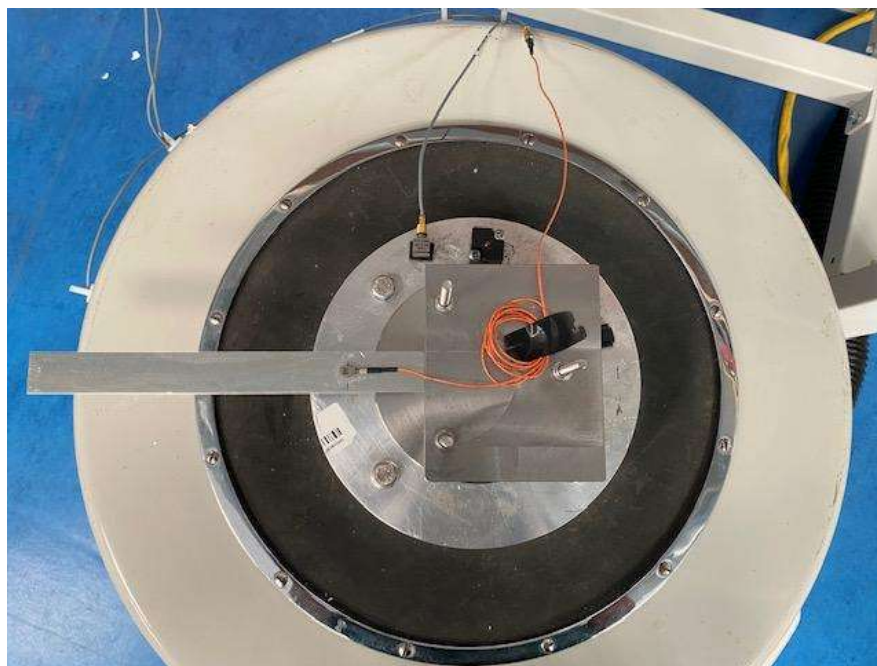
ASTM E756 - Aluminum sample									
Parameter	unit	values				average	std	average (n>1)	std (n>1)
Rho ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>	2887	-	-	-	-	-		
l	m	0,2	-	-	-	-	-		
H	m	1,45E-03	-	-	-	-	-		
fn	Hz	27,4	177,5	507,3	1006,5	-	-		
Cn	-	0,55959	3,5069	9,8194	19,242	-	-		
E	MPa	63093	67525	70373	72132	68281	3417	70010	1898
E theory	MPa	69000	69000	69000	69000	69000			
(E-Eth)/Eth	%	-9%	-2%	2%	5%	-1.0%		1.5%	3%
$\eta$	%	1,7%	0,5%	0,7%	0,3%	0,8%	0,5%	0,5%	0,1%
$\eta$ theory*	%	0,197	0,079	0,057	-				

Table 6. Numerical result for the aluminium alloy cantilever beam

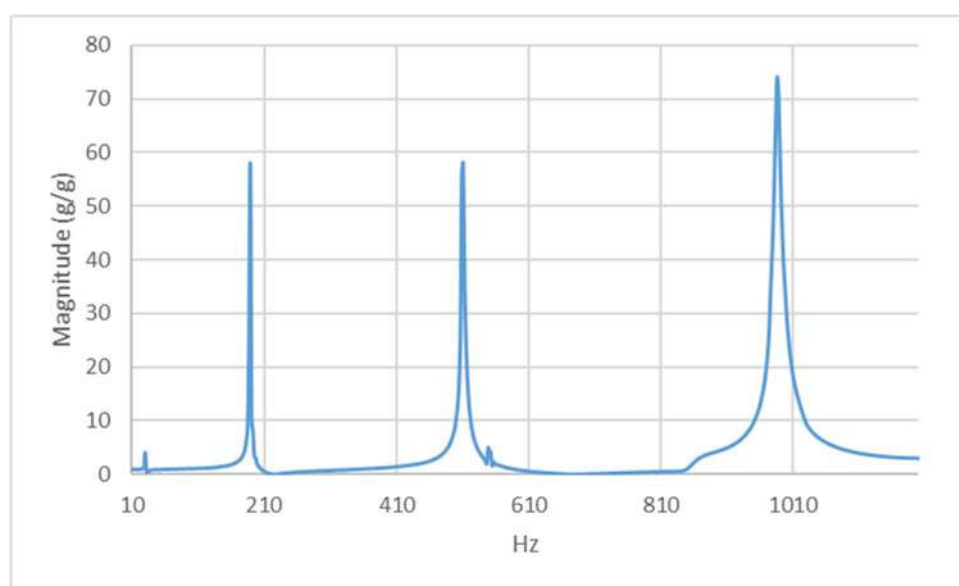
Frequency FEA (Hz)	27,9	173,5	502,4	1018,2
Frequency shaker (Hz)	27,4	177,5	507,3	1006,5
diff with shaker (%)	1,8%	-2,3%	-1,0%	0,0
FRF (dB)	57,0	75,6	70,7	40,0
Damping factor (Q)	1450	5115	4963	-
Loss factor FEA (eta)	0,07%	0,02%	0,02%	-
Loss factor shaker (eta)	1,70%	0,47%	0,65%	0,32%
diff with shaker (%)	-96%	-96%	-97%	-
Damping ratio (zeta)	0,03%	0,01%	0,01%	-

#### 4.4 Poutre en alliage d'aluminium comme matériau de référence : Cas 3

Cette expérience a également été menée sur la même poutre en porte-à-faux en alliage d'aluminium avec l'accéléromètre le plus léger placé à une distance de 0,8 l (160 mm) de l'extrémité serrée, comme illustré à la figure 11. Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1200 Hz avec 600 points de données (distribution linéaire) et la fonction de transfert est présentée dans la Figure 12.



*Figure 11. Experimental setup for aluminium alloy beam with B&K accelerometer type 4517 near the clamped end*



**Figure 12. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1200 Hz)**

Les pics de résonance sont observés à 29,9 Hz, 189 Hz, 511 Hz et 985 Hz.

Afin de mesurer les fréquences de résonance avec plus de précision, plusieurs balayages ont été effectués autour de la plage de chaque fréquence de résonance pour la plage de fréquences suivante :

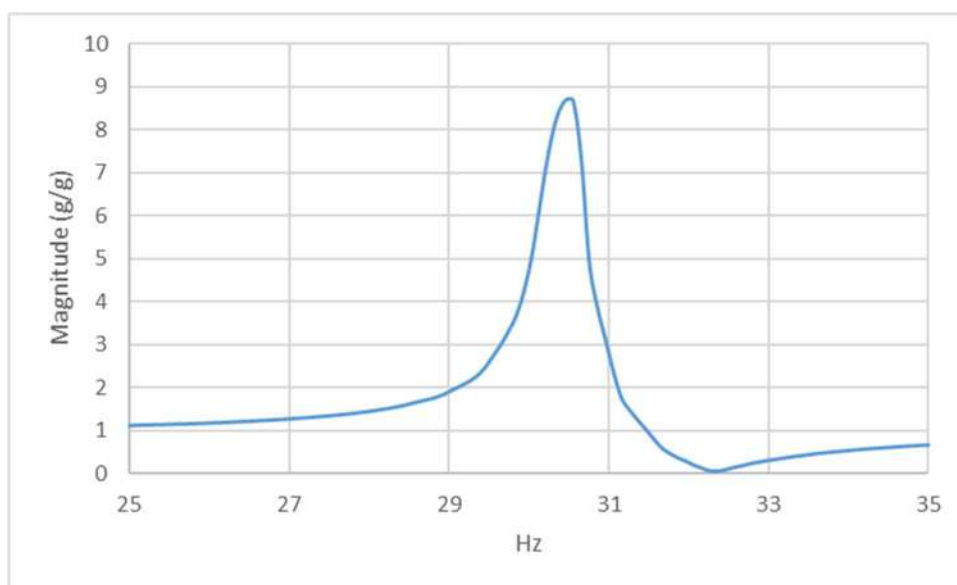
25-35 Hz avec 100 points de données linéaires

175-195 Hz avec 100 points de données linéaires

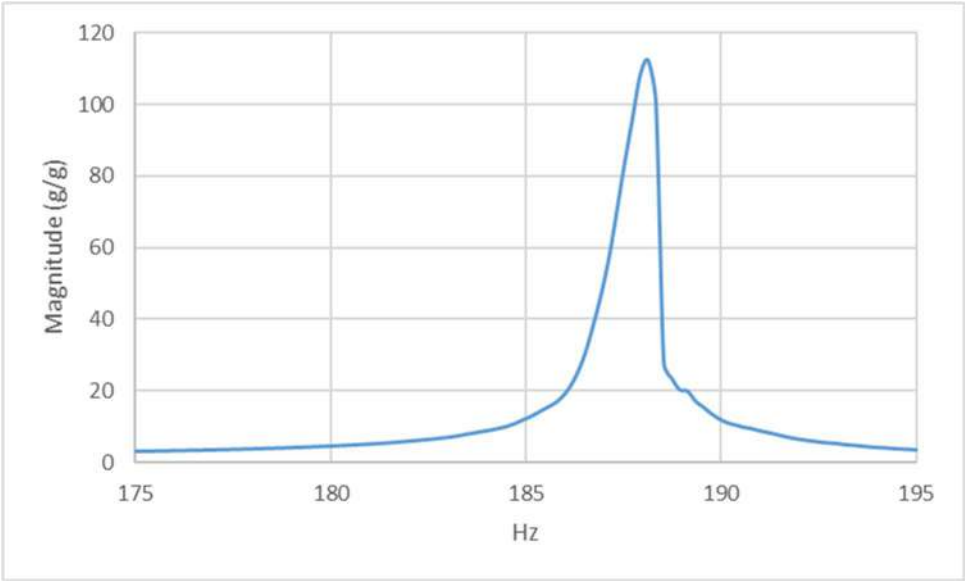
495-520 Hz avec 125 points de données linéaires

950-1010 Hz avec 200 points de données linéaires

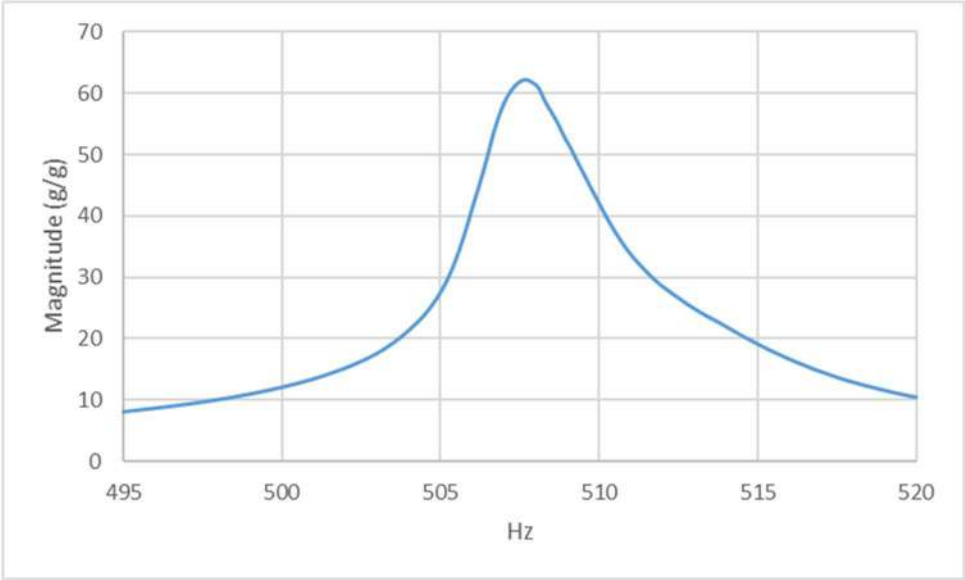
Les fonctions de transfert correspondantes sont présentées dans les Figures 13(a)-12(d) respectivement. Les fréquences de résonance sont identifiées à 30,6 Hz, 188 Hz, 508 Hz et 984 Hz.



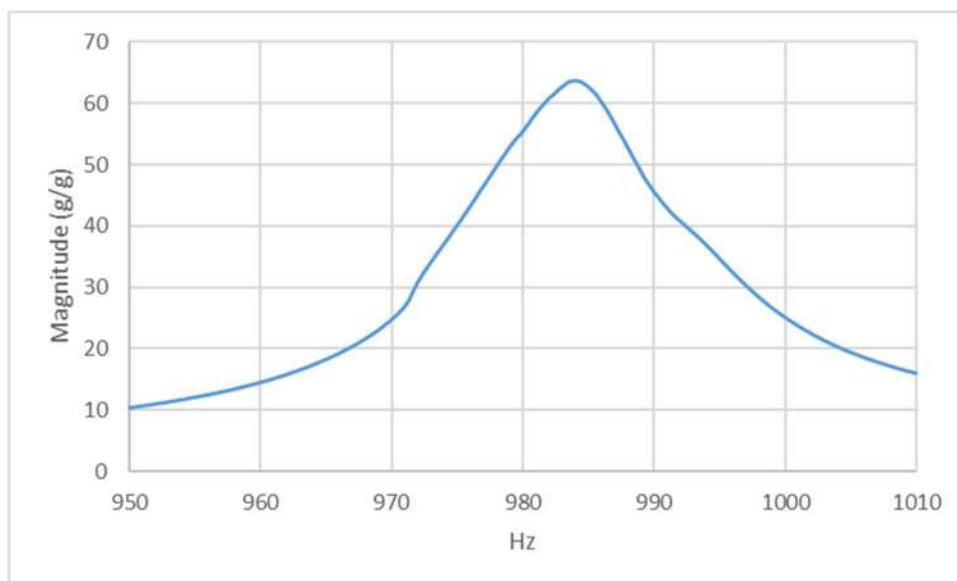
(a)



(b)



(c)

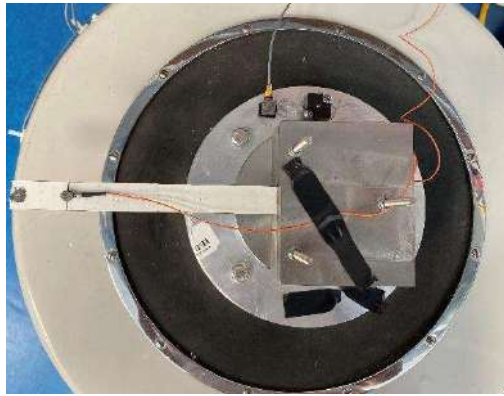


(d)

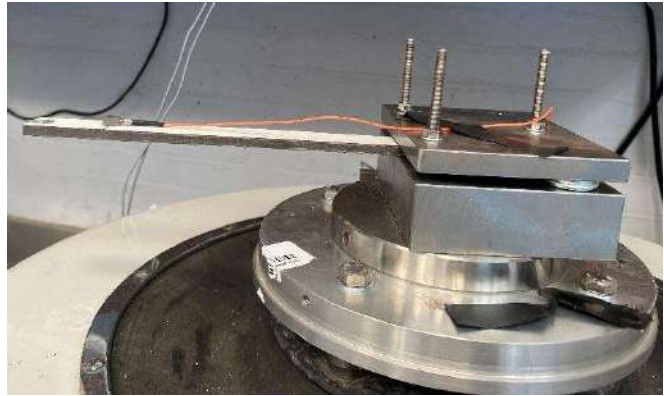
**Figure 13. Transfer function for swept sine signal (a) 25 Hz to 35 Hz; (b) 175 Hz to 195 Hz; (c) 495 Hz to 520 Hz; (d) 950 Hz to 1010 Hz**

#### 4.5 Essai sur poutre époxy hybride lin/carbone

Cet essai a été réalisé sur la poutre composite hybride lin/fibre de carbone. Le stratifié a de la fibre de lin sur les couches extérieures et de la fibre de carbone dans les couches intérieures. L'expérience d'amortissement a été menée conformément à la norme ASTM E756 en utilisant un agitateur électrodynamique. L'échantillon (comme mentionné dans le tableau 1 a été fixé à l'agitateur à l'aide de deux blocs d'acier montés sur l'agitateur comme illustré à la figure 14. Cela a effectivement transformé l'échantillon en une poutre en porte-à-faux ; l'échantillon était libre de vibrer naturellement à une extrémité et verrouillé complètement à l'autre extrémité. Un capteur (accéléromètre B&K type 4517) a été fixé à l'échantillon à une distance de 0,8 l (144 mm) de l'extrémité fixée pour mesurer la réponse dynamique du faisceau. Un autre capteur (accéléromètre B&K type 4507) a été monté pour l'agitateur pour contrôler l'excitation de l'agitateur.



(a)



(b)

**Figure 14. Experimental setup for flax/carbon hybrid epoxy beam (a) top view; (b) side view**

Le signal de vibration a été balayé de 100 Hz à 3000 Hz avec 1500 points de données linéaires. La fonction de transfert est présentée à la figure 15. Les fréquences de résonance sont identifiées à 135 Hz, 870 Hz, 986 Hz et 2480 Hz.

Pour mesurer plus précisément les fréquences de résonance et les taux d'amortissement, plusieurs balayages ont été effectués autour de la plage de chaque fréquence naturelle pour la plage de fréquences suivante :

120-150 Hz avec 300 points de données avec fréquence de résonance identifiée à 134 Hz

840-900 Hz avec 300 points de données avec fréquence de résonance identifiée à 870 Hz

950-1030 Hz avec 400 points de données avec une fréquence de résonance identifiée à 986 Hz

2400-2560 Hz avec 800 points de données avec fréquence de résonance identifiée à 2485 Hz

Les fonctions de transfert sont présentées dans les figures 16(a)-15(d) respectivement.

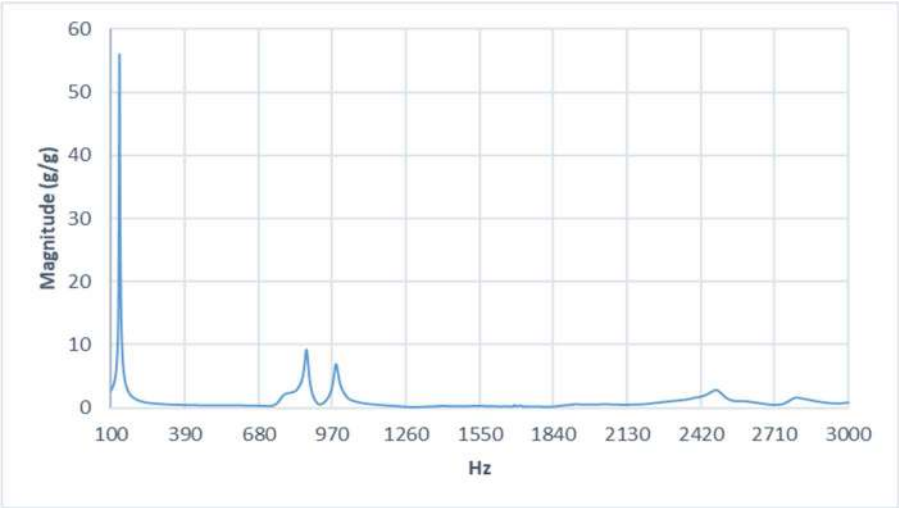
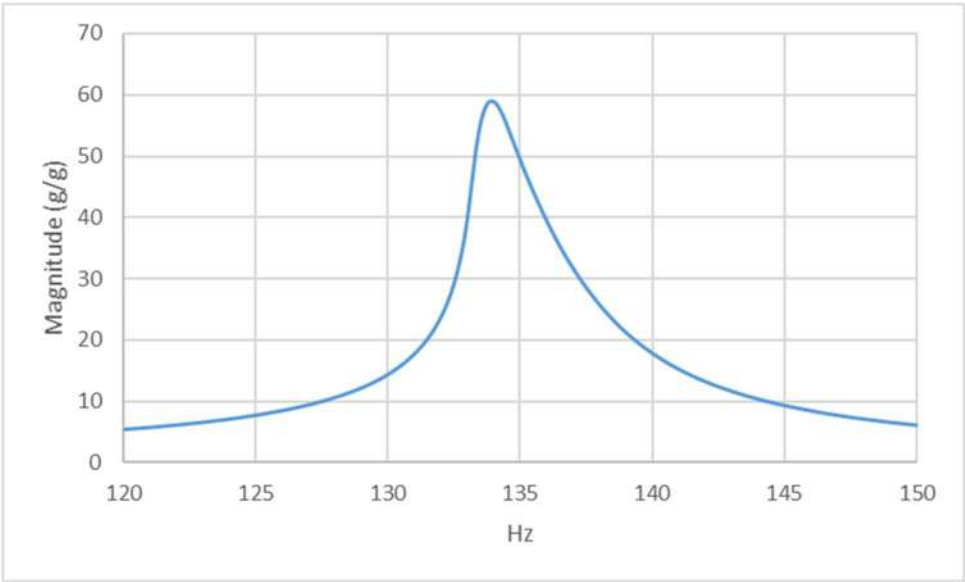
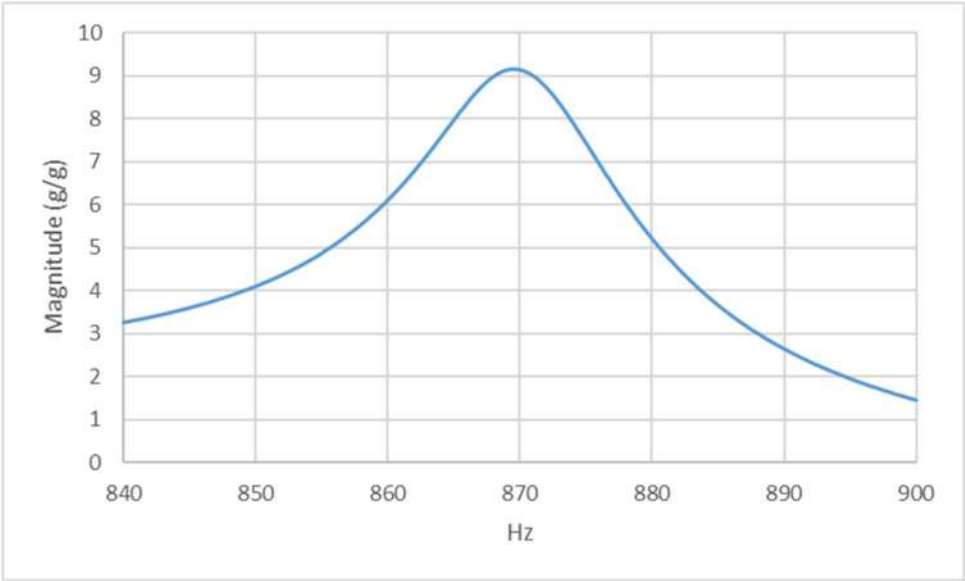


Figure 15. Transfer function for swept sine signal (100 Hz to 3000 Hz)

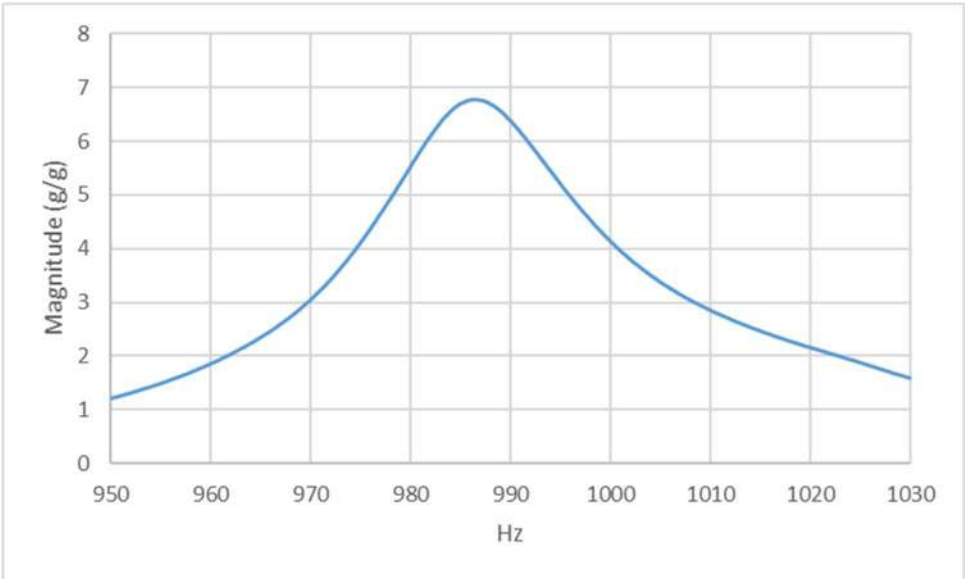


(a)

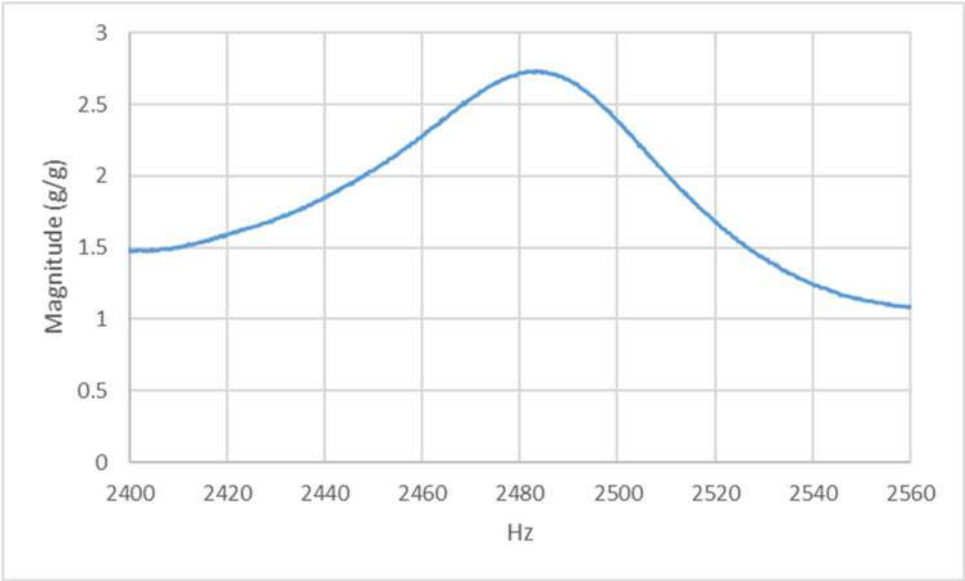




(b)



(c)

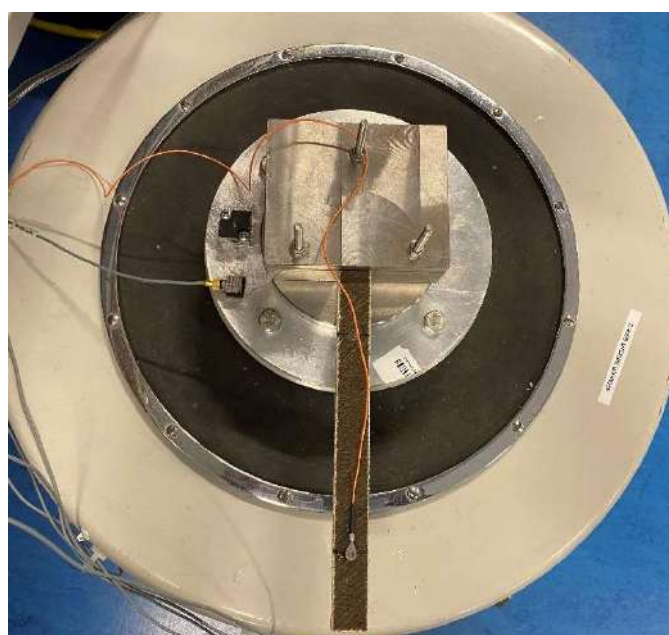


(d)

**Figure 16. Transfer function for swept sine signal (a) 120 Hz to 150 Hz; (b) 840 Hz to 900 Hz; (c) 950 Hz to 1030 Hz; (d) 2400 Hz to 2560 Hz**

#### 4.6 Essai sur poutre composite lin/époxy 1 : Cas 1

Ce test a été effectué sur la poutre composite lin/époxy 1. L'échantillon (tel que décrit dans le tableau 1) a été fixé à l'agitateur à l'aide de deux blocs d'acier montés sur l'agitateur, comme illustré à la figure 17. Cela a effectivement transformé l'échantillon en une poutre en porte-à-faux ; l'échantillon était libre de vibrer naturellement à une extrémité et complètement verrouillé à l'autre extrémité. Un capteur (accéléromètre B&K type 4517) a été fixé à l'échantillon à une distance de 0,8 l (160 mm) de l'extrémité fixée pour mesurer la réponse dynamique du faisceau. Un autre capteur (accéléromètre B&K type 4507) a été monté sur l'agitateur pour contrôler l'excitation de l'agitateur.



**Figure 17. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 1: Case 1**

Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1000 Hz avec 500 points de données (distribution linéaire). La fonction de transfert est présentée sur la figure 18. Les fréquences de résonance sont identifiées à 19,9 Hz, 137 Hz, 379 Hz, 722 Hz et 780 Hz. Après le balayage à gamme complète, afin de mesurer les fréquences de résonance avec plus de précision, plusieurs balayages ont été effectués autour de la gamme de chaque fréquence de résonance. Les gammes de fréquence sont les suivantes : 15-25 Hz (200 points de données), 130-150 Hz (200 points de données), 360-400 Hz (200 points de données), 700-740 Hz (160 points de données) et 750- 830 Hz (320 points de données) avec des fréquences de résonance à 20,1 Hz, 138 Hz, 381 Hz, 726 Hz et 784 Hz respectivement. Les fonctions de transfert sont présentées dans la Figure 19(a)-18 (e).

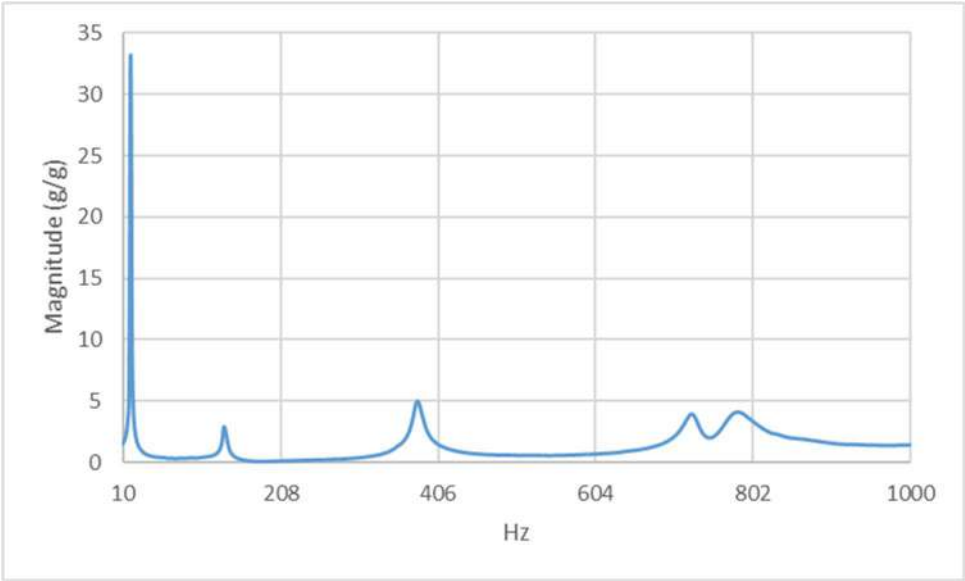
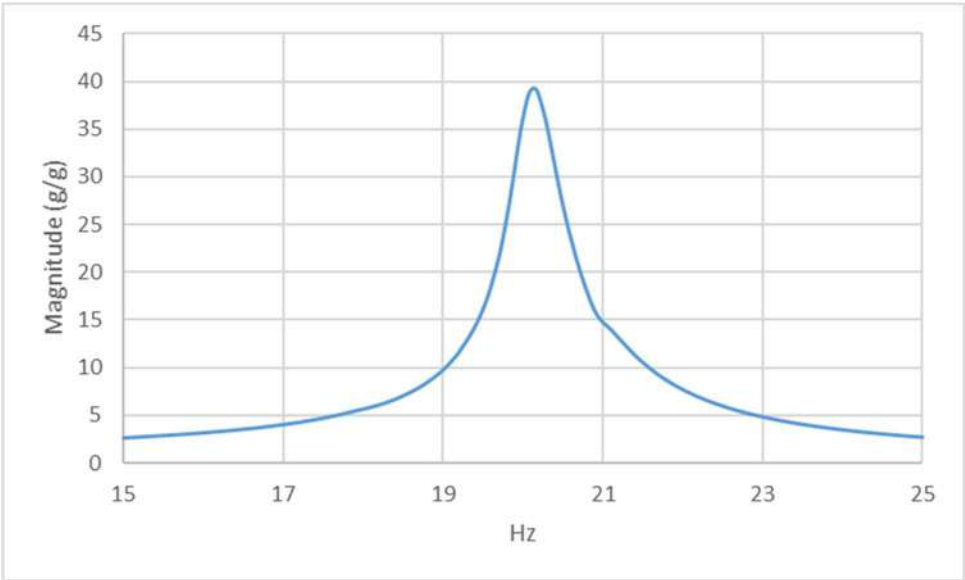
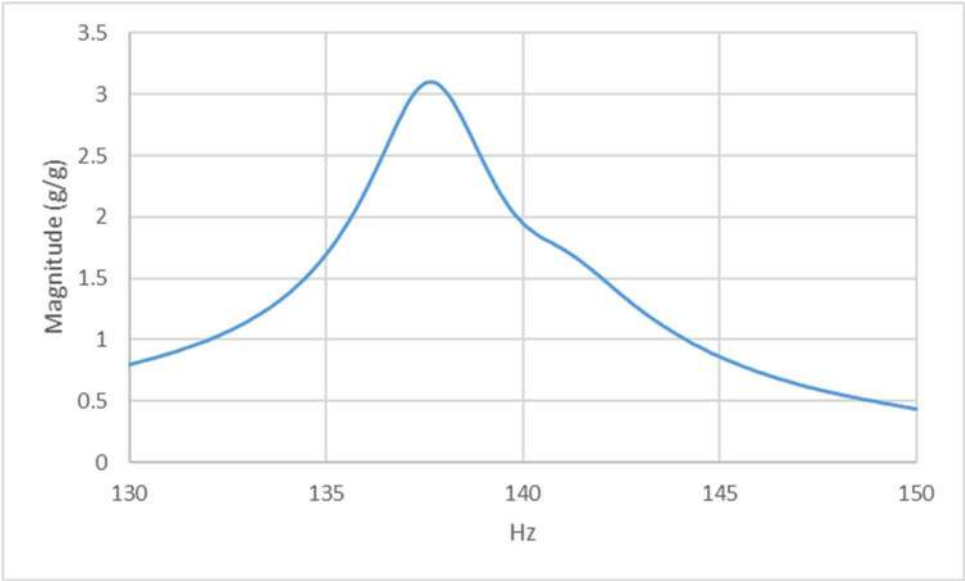


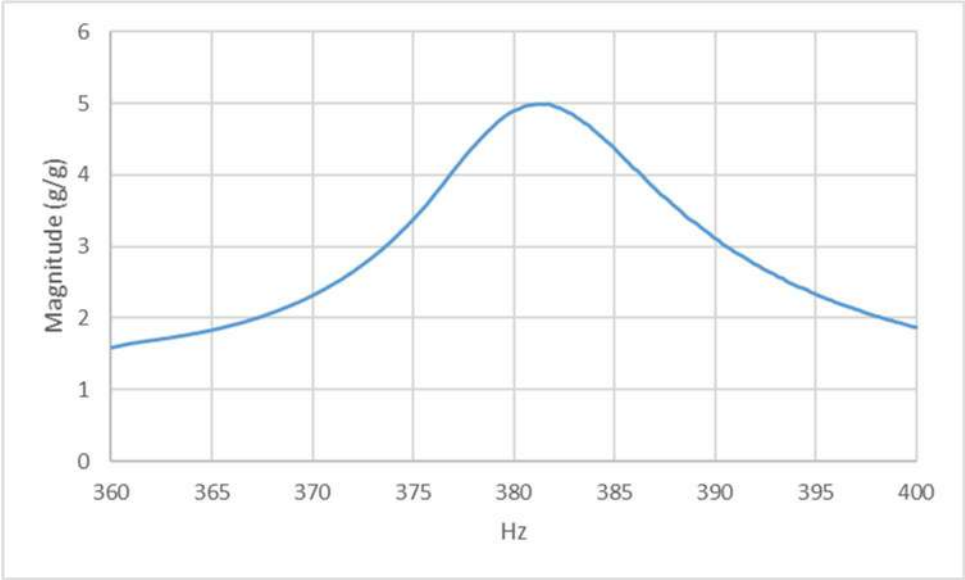
Figure 18. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1000 Hz)



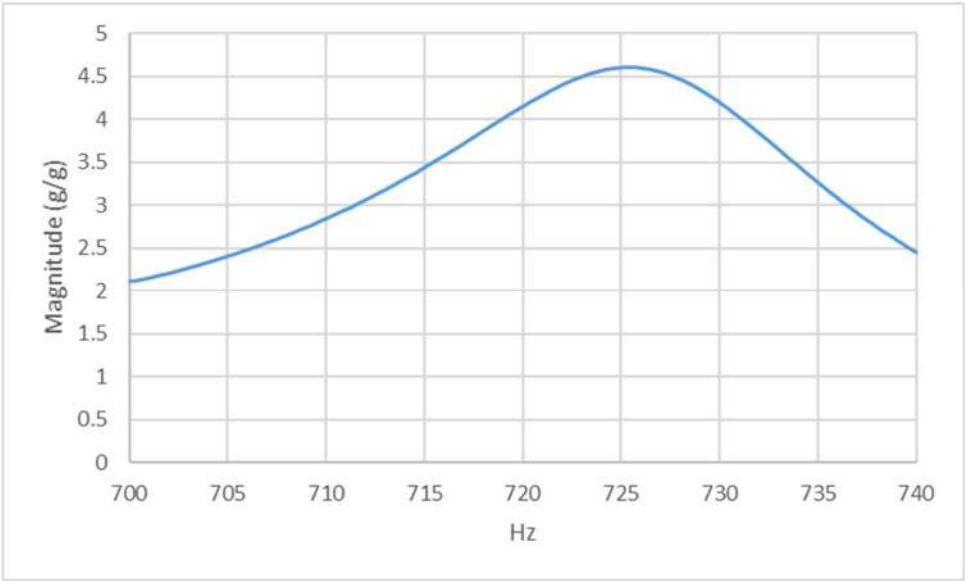
(a)



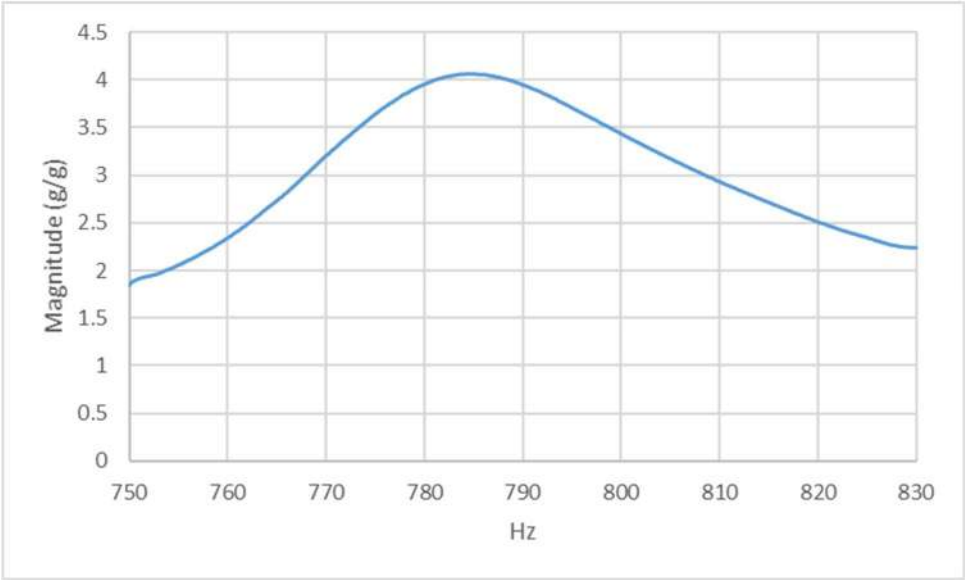
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 19. Transfer function for swept sine signal (a) 15 Hz to 25 Hz; (b) 130 Hz to 150 Hz; (c) 360 Hz to 400 Hz; (d) 700 Hz to 740 Hz; (e) 750 Hz to 830 Hz

#### 4.7 Essai sur poutre composite lin/époxy 1 : Cas 2

Ce test a été réalisé sur la poutre composite lin/époxy 1. L'accéléromètre a été fixé à l'éprouvette à une distance de 0,2 l (40 mm) de l'extrémité fixée pour mesurer la réponse dynamique de la poutre comme illustré à la Figure 20. Un autre capteur a été monté à l'agitateur pour contrôler l'excitation de l'agitateur.

Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1000 Hz avec 500 points de données (distribution linéaire). La fonction de transfert est présentée sur la figure 21. Les fréquences de résonance sont identifiées à 21,9 Hz, 137 Hz, 375 Hz, 714 Hz et 790 Hz. Après le balayage à gamme complète, afin de mesurer les fréquences de résonance avec plus de précision, plusieurs balayages ont été effectués autour de la gamme de chaque fréquence de résonance. Les plages de fréquences sont les suivantes : 16-26 Hz (200 points de données), 130-150 Hz (200 points de données), 360-390 Hz (150 points de données), 680-750 Hz (280 points de données) et 750- 830 Hz (320 points de données) avec des fréquences de résonance à 21,9 Hz, 137 Hz, 376 Hz, 714 Hz et 788 Hz respectivement. Les fonctions de transfert sont présentées dans la Figure 22(a)-21 (e).

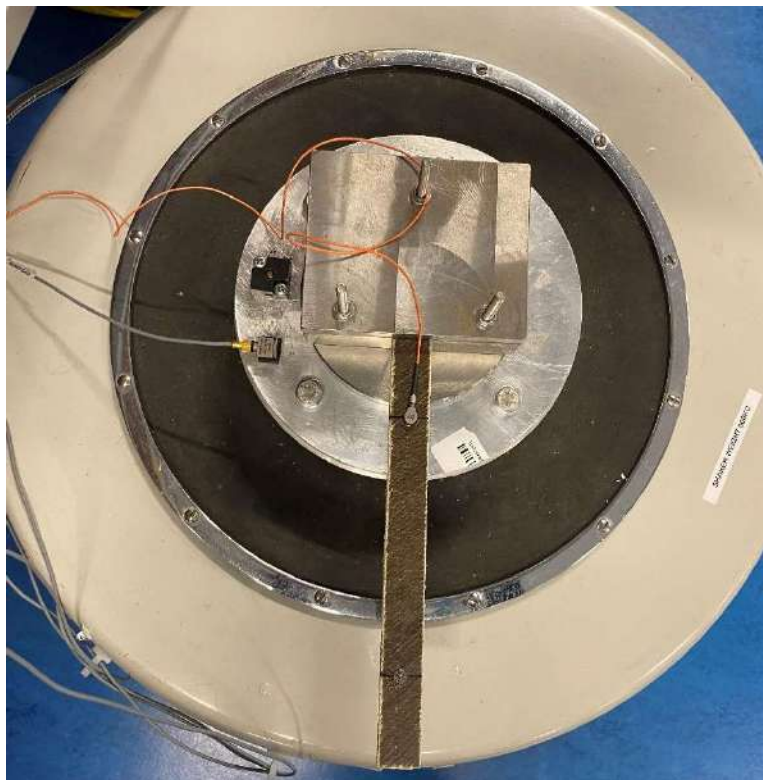


Figure 20. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 1: Case 2



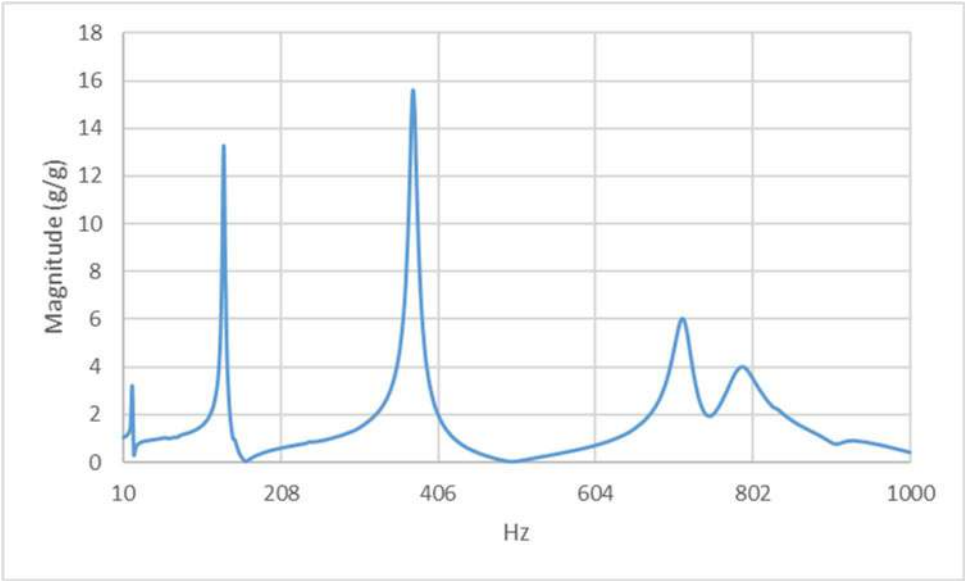
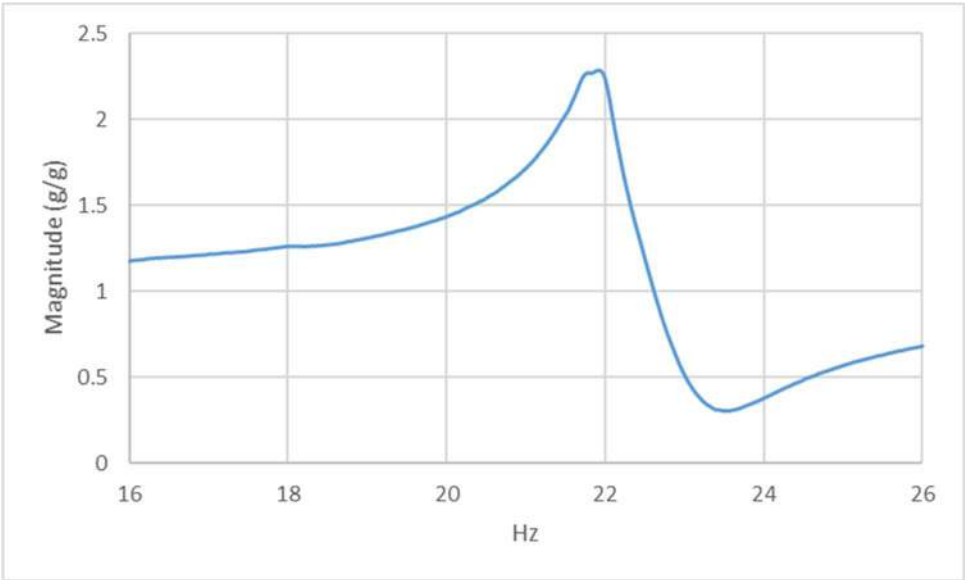
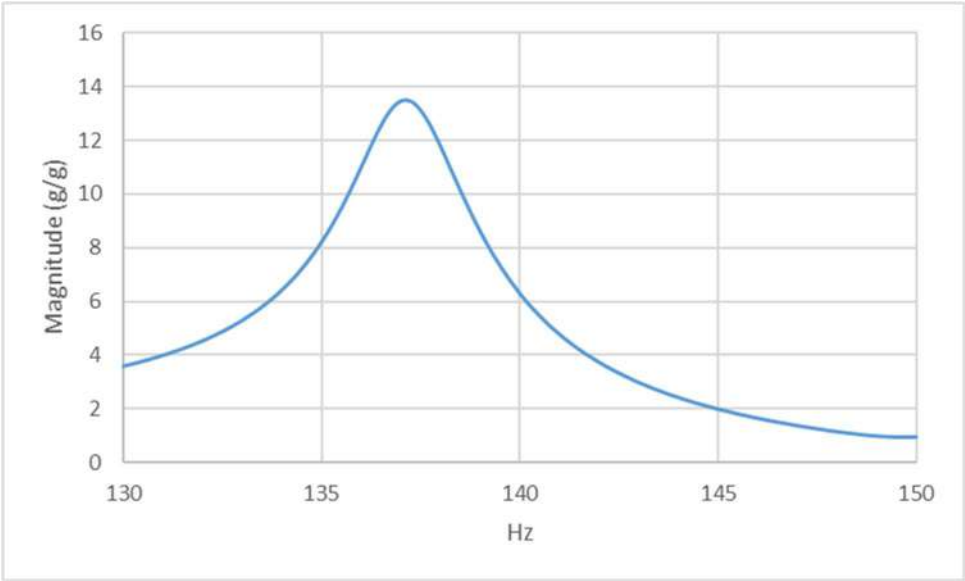


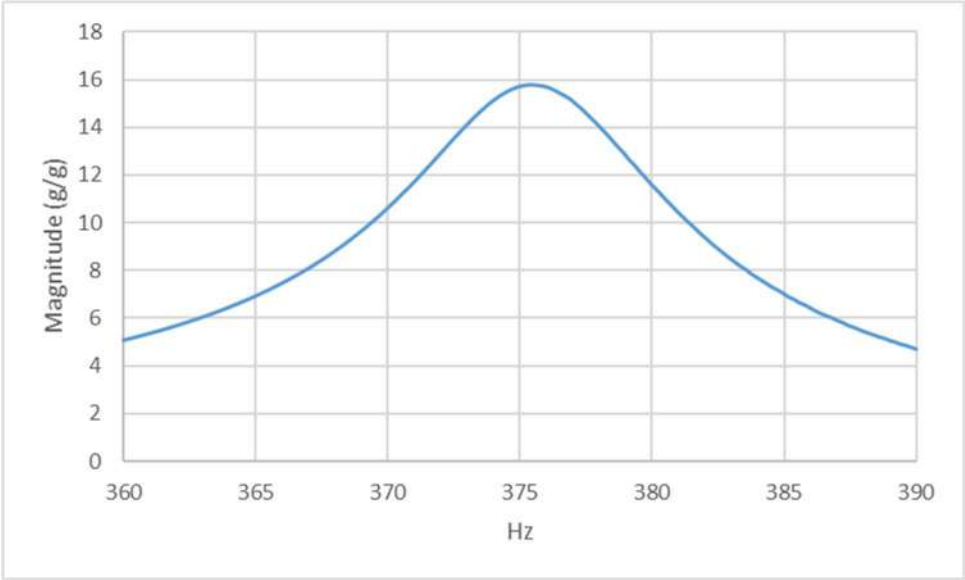
Figure 21. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1000 Hz)



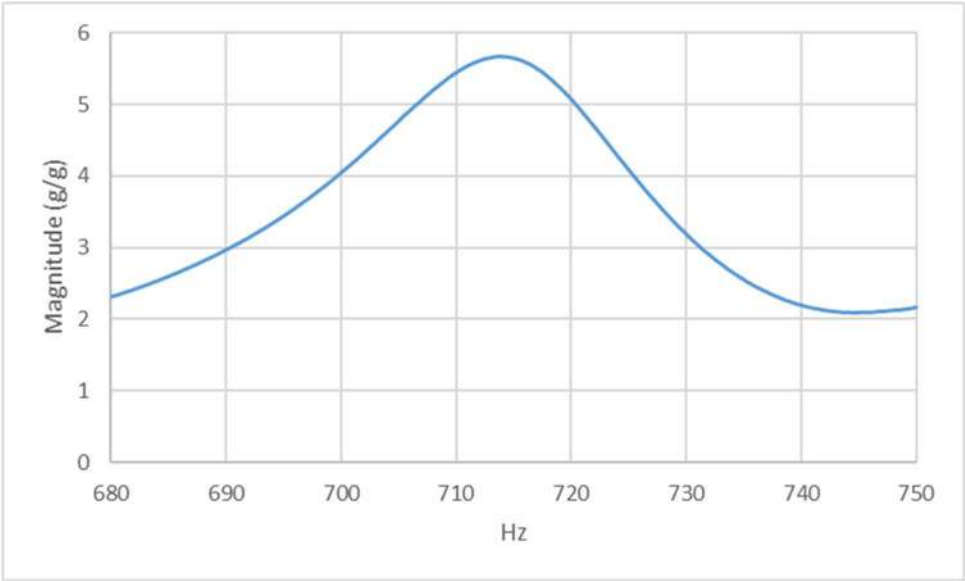
(a)



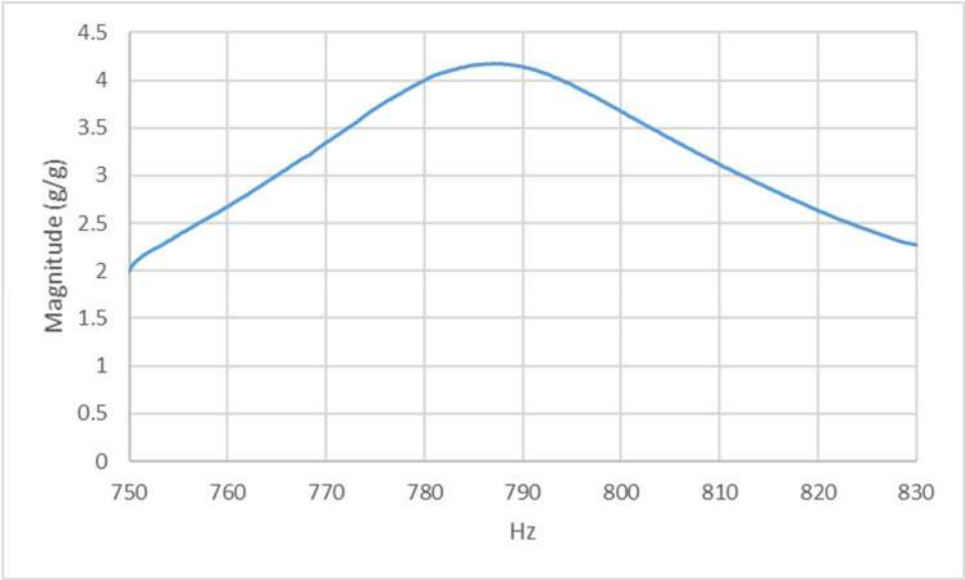
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 22. Transfer function for swept sine signal (a) 16 Hz to 26 Hz; (b) 130 Hz to 150 Hz; (c) 360 Hz to 390 Hz; (d) 680 Hz to 750 Hz; (e) 750 Hz to 830 Hz



The mode shapes obtained from FEM are presented in Figure 23.

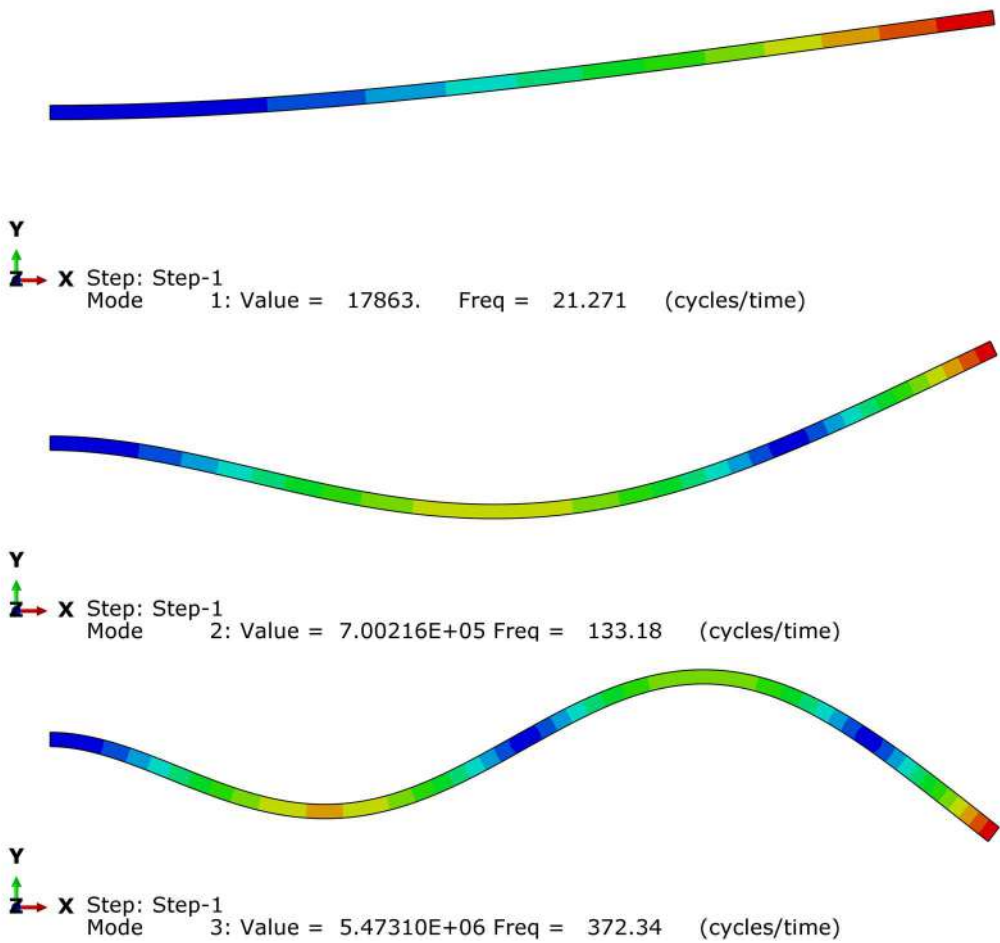
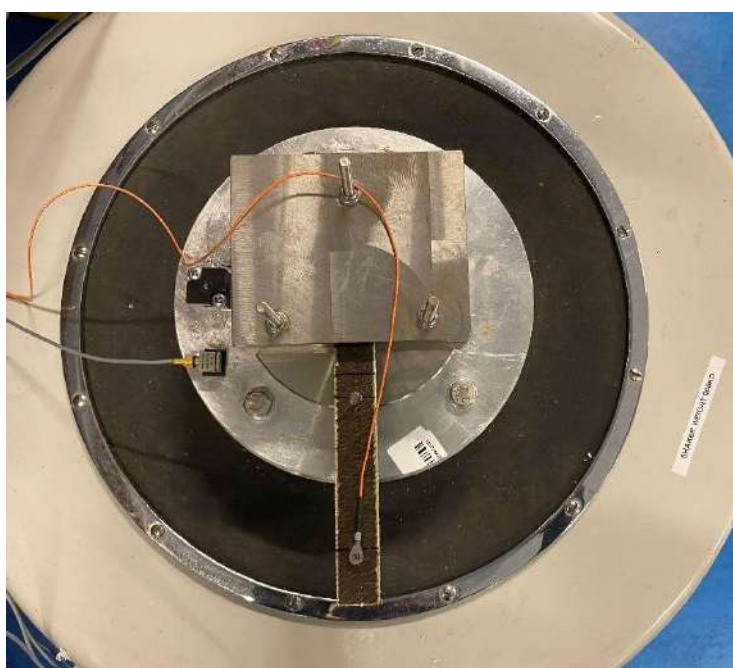


Figure 23. First three frequencies of vibration for flax/epoxy composite (beam 1) calculated by Abaqus FEM

#### 4.8 Essai sur poutre composite lin/époxy 2 : Cas 1

Cet essai a été réalisé sur la poutre composite lin/époxy 2. L'éprouvette (comme mentionné dans le tableau 1) a été fixée à l'agitateur à l'aide de deux blocs d'acier montés sur l'agitateur, comme illustré à la figure 24. Cela a effectivement fait de l'éprouvette une poutre en porte-à-faux ; l'échantillon était libre de vibrer naturellement à une extrémité et complètement verrouillé à l'autre extrémité. Un capteur (accéléromètre B&K type 4517) a été fixé à l'échantillon à une distance de 0,8 l (93,6 mm) de l'extrémité fixée pour mesurer la réponse dynamique du faisceau. Un autre capteur (accéléromètre B&K type 4507) a été monté sur l'agitateur pour contrôler l'excitation de l'agitateur.



**Figure 24. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 2: Case 1**

Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1500 Hz avec 750 points de données (distribution linéaire). La fonction de transfert est présentée sur la figure 25. Les fréquences de résonance sont identifiées à 55,8 Hz, 1020 Hz et 1310 Hz. Après le balayage à gamme complète, afin de mesurer les fréquences de résonance avec plus de précision, plusieurs balayages ont été effectués autour de la gamme de chaque fréquence de résonance. Les plages de fréquences sont les suivantes : 45-65 Hz (200 points de données), 950-1 090 Hz (500 points de données) et 1 240-1 380 Hz (500 points de données) avec des fréquences de résonance à 56,4 Hz, 1 021 Hz et 1 310 Hz respectivement. Les fonctions de transfert sont présentées dans la Figure 26(a)-25 (c).

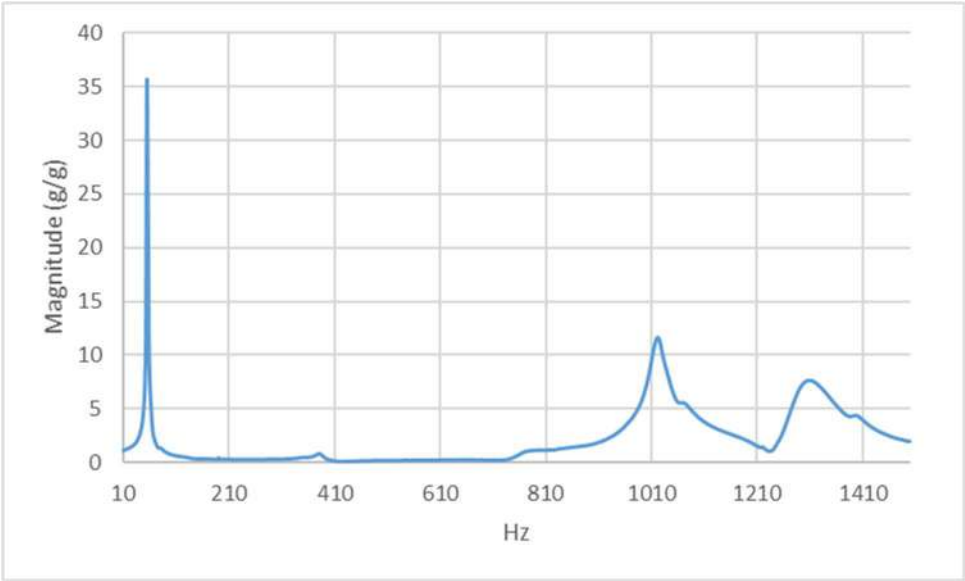
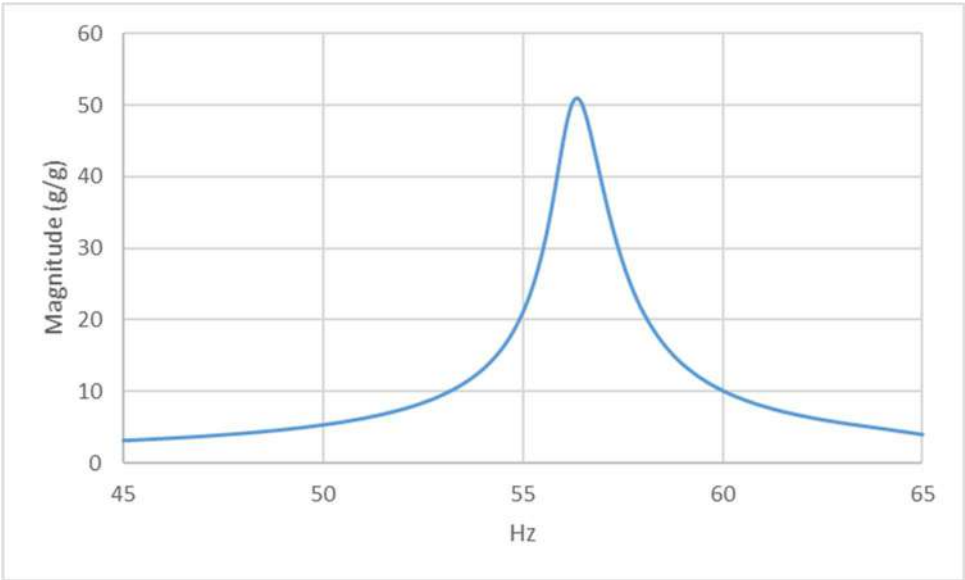
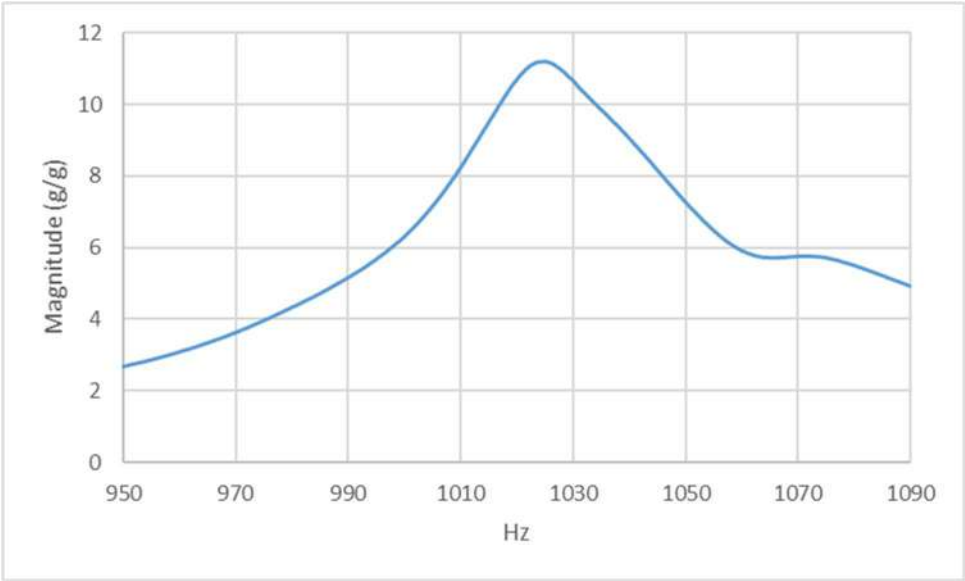


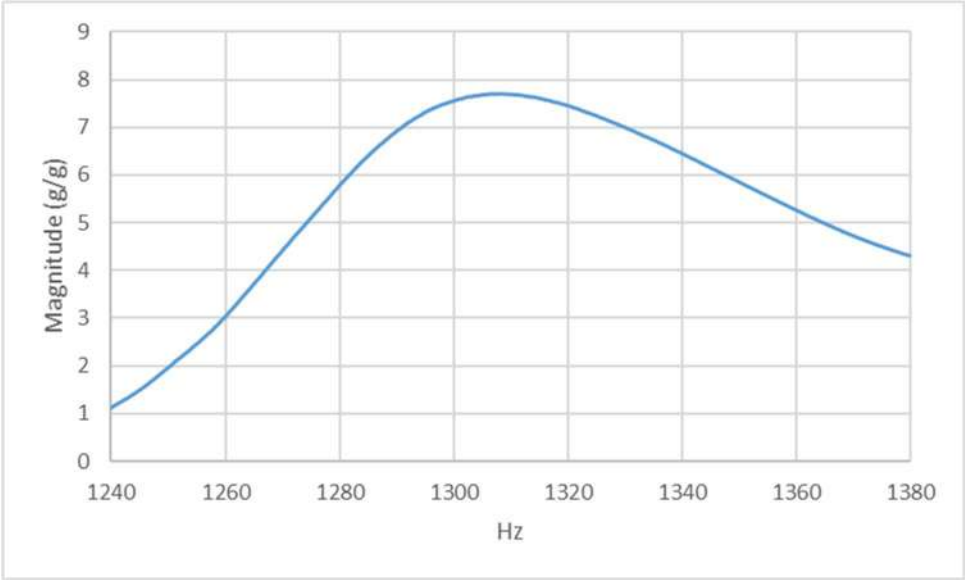
Figure 25. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1500 Hz)



(a)



(b)



(c)

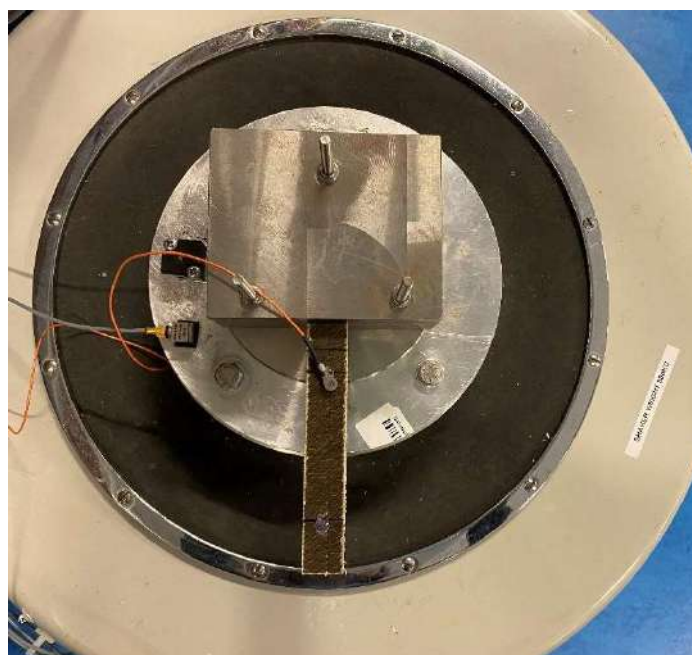
Figure 26. Transfer function for swept sine signal (a) 45 Hz to 65 Hz; (b) 950 Hz to 1090 Hz; (c) 360 Hz to 400 Hz



#### 4.9 Essai sur poutre composite lin/époxy 2 : Cas 2

Ce test a été réalisé sur la poutre composite lin/époxy 2. L'accéléromètre a été fixé à l'échantillon à une distance de 0,2 l (23,4 mm) de l'extrémité fixée pour mesurer la réponse dynamique de la poutre comme illustré à la figure 27. Un autre capteur a été monté à l'agitateur pour contrôler l'excitation de l'agitateur.

Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1500 Hz avec 750 points de données (distribution linéaire). La fonction de transfert est présentée à la Figure 28. Les fréquences de résonance sont identifiées à 61,7 Hz, 378 Hz, 993 Hz et 1300 Hz. Après le balayage à gamme complète, afin de mesurer les fréquences de résonance avec plus de précision, plusieurs balayages ont été effectués autour de la gamme de chaque fréquence de résonance. Les gammes de fréquences sont les suivantes : 50-70 Hz (200 points de données), 360-400 Hz (200 points de données), 950-1 050 Hz (400 points de données) et 1 250-1 350 Hz (400 points de données) avec des fréquences de résonance à 62,9 Hz, 377 Hz, 995 Hz et 1300 Hz respectivement. Les fonctions de transfert sont présentées dans la Figure 29(a)-28 (d).



*Figure 27. Experimental setup for flax/epoxy composite beam 2: Case 2*

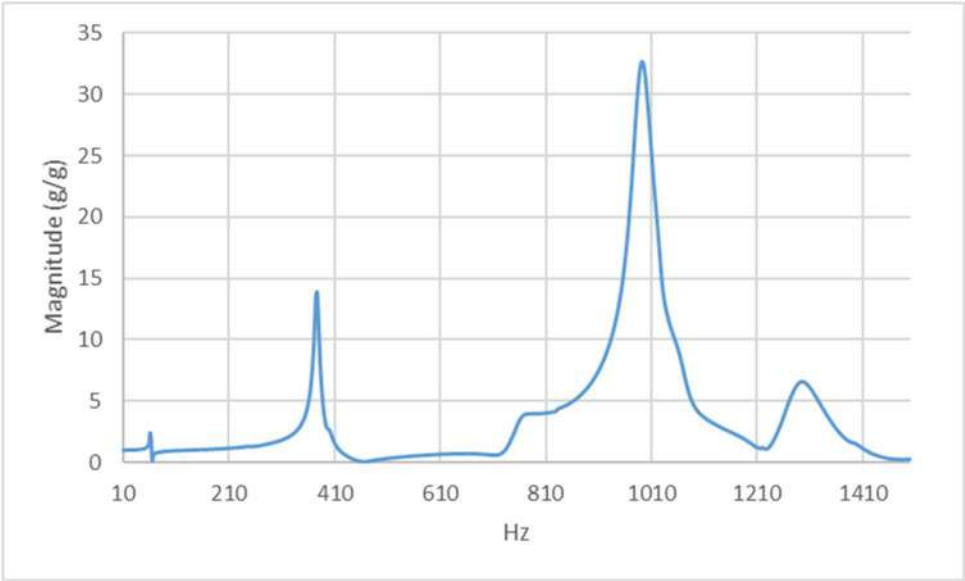
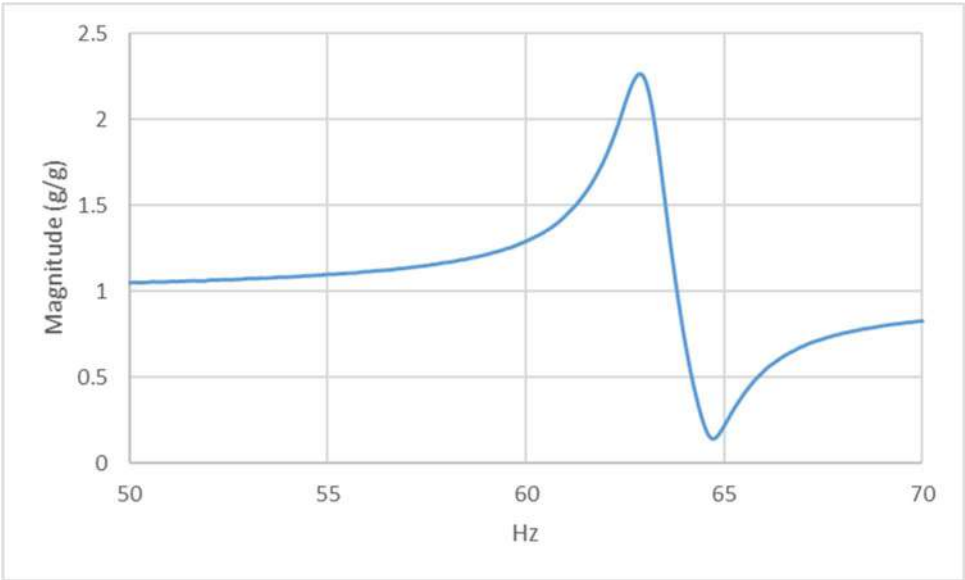
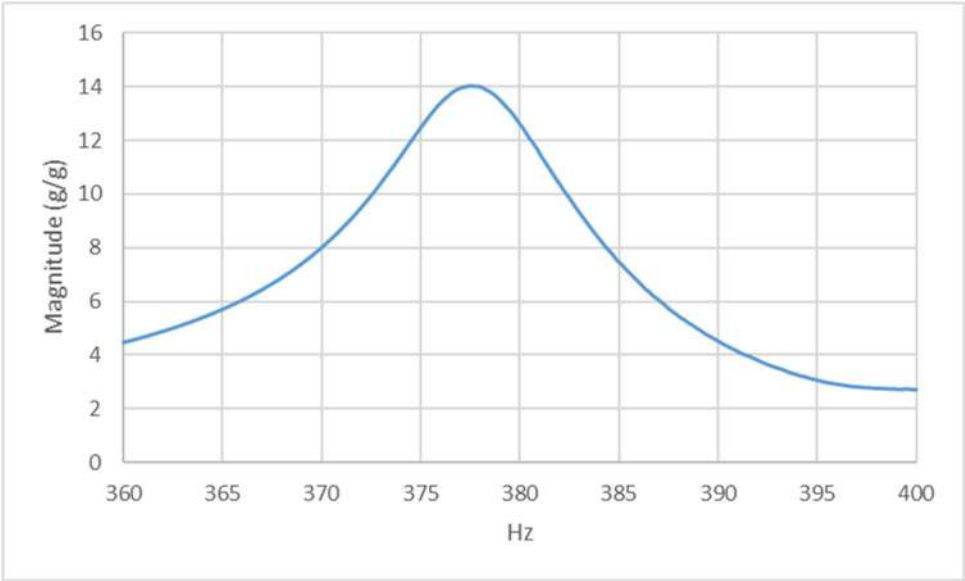


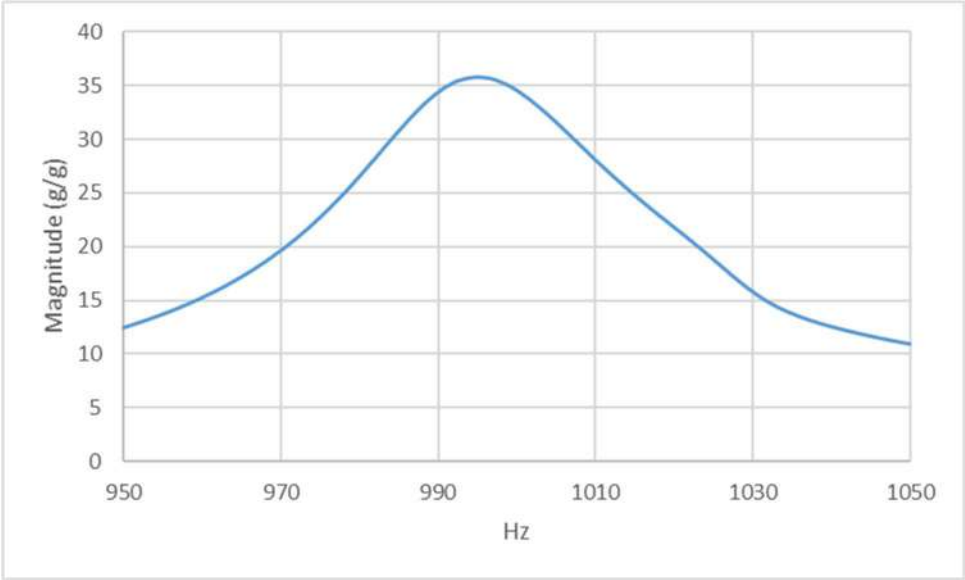
Figure 28. Transfer function for swept sine signal (10 Hz to 1500 Hz)



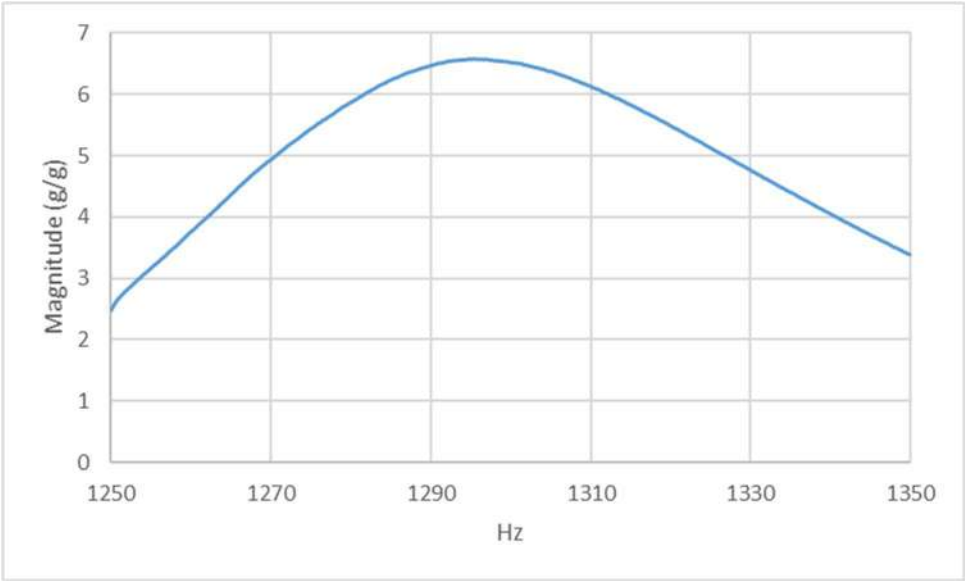
(a)



(b)



(c)

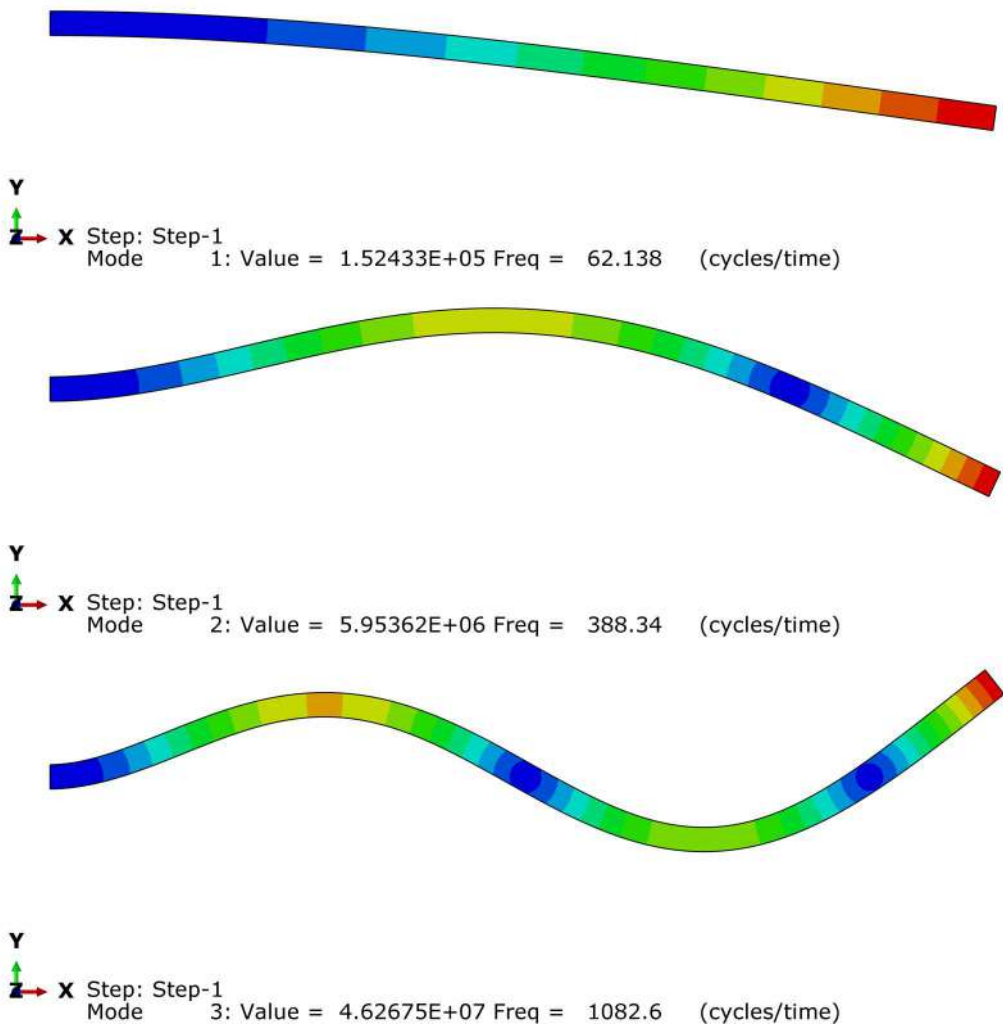


(d)

**Figure 29. Transfer function for swept sine signal (a) 50 Hz to 70 Hz; (b) 360 Hz to 400 Hz; (c) 950 Hz to 1050 Hz; (d) 1250 Hz to 1350 Hz**



The mode shapes obtained from FEM are presented in Figure 30.

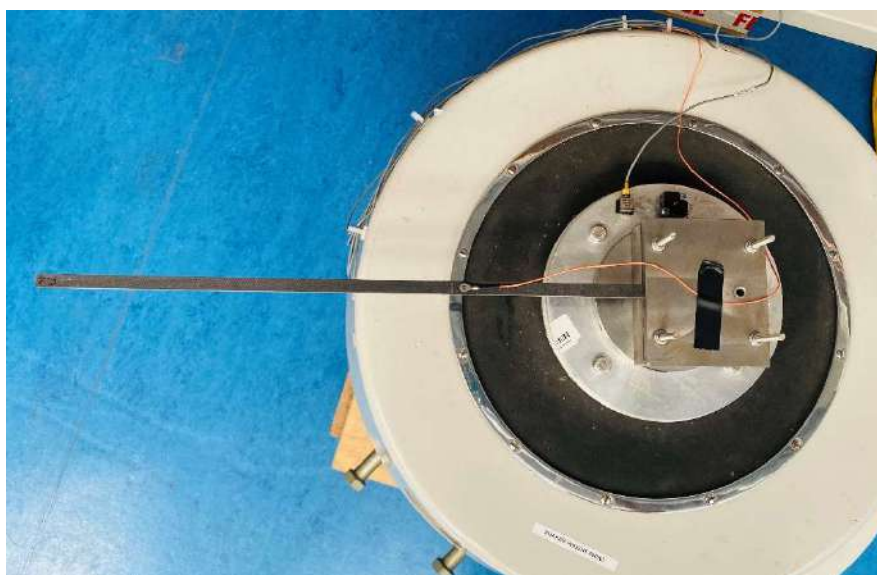


**Figure 30. First three frequencies of vibration for flax/epoxy composite (beam 2) calculated by Abaqus FEM**

#### 4.10 Essai sur poutres composites hybrides lin/carbone (2ème lot d'échantillons)

Ces ensembles d'expériences ont été menés sur les poutres composites hybrides lin-carbone/époxy avec 11 schémas de drapage de fibres différents. Les neuf premières configurations sont étiquetées par ordre alphabétique de A à I. En outre, les configurations Y et Z sont suggérées comme types d'échantillons de référence. Les couches de chaque spécimen sont présentées en détail à l'annexe A.

Les paramètres détaillés des matériaux sont répertoriés dans le tableau 7. L'accéléromètre a été fixé aux spécimens à une distance de 0,3 l de l'extrémité serrée pour mesurer la réponse dynamique du faisceau, comme illustré à la figure 31. Un autre capteur a été monté sur l'agitateur pour contrôler l'excitation de l'agitateur.



*Figure 31. Experimental setup for 2<sup>nd</sup> phase of tests*

Le signal de vibration a été balayé de 10 à 1000 Hz avec 400 points de données (distribution linéaire). La fonction de transfert typique pour les échantillons de chaque groupe est présentée à l'annexe B. Suite au balayage complet, afin de mesurer les fréquences de résonance avec plus de précision, plusieurs balayages ont été effectués autour de la plage de chaque fréquence de résonance. Les fréquences de résonance sont présentées dans le tableau 6 et comparées à celles obtenues à partir de solutions analytiques et numériques. Les formes de mode pour les premières fréquences de résonance de chaque groupe d'échantillons obtenus à partir de FEM sont présentées en annexe C.



**Table 7. Resonance frequencies of different laminates obtained from experiment and numerical analysis**

Sample	Resonance frequency (Hz)								
	Experimental			Analytical			FEA		
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
A1	32.2	200	545	32.4	203	569	32	200	561
A4	31.7	195	528						
B2	30.4	186	502	32.9	206	579	33.2	208	582
B3	29.5	183	499						
C1	26.4	163	447	34.7	217	609	34	213	596
C4	26.5	163	446						
D1	27.4	168	453	30.5	191	535	30.2	189	529
D3	28.8	176	475						
E2	31.9	197	531	31.1	195	546	30.4	190	532
E3	31.9	197	531						
F2	34.3	211	569	31.2	196	547	30.5	191	534
F4	33.8	208	559						
G1	33.7	204	556	33.2	208	583	32.7	204	572
G3	33.5	209	567						
H3	30.4	189	517	32.0	200	562	31.3	195	548
H4	31.9	198	539						
I3	32.3	199	539	32.6	204	572	31.8	199	556
I4	31.9	198	536						
Y1	49.9	316	863	55.3	336	970	57.9	361	1008
Y2	51.4	317	863						
Y3	48.8	305	860						
Y4	49.6	314	860						
Z1	32.3	197	530	26.5	166	465	25.5	160	447
Z3	31.2	193	525						
Z4	31.5	193	524						

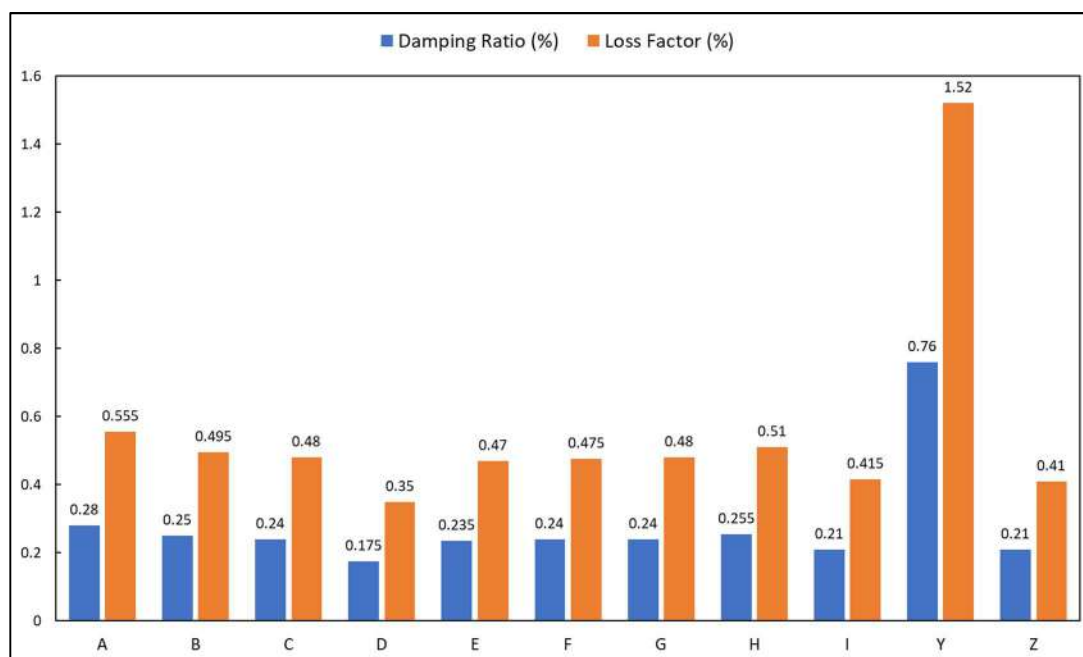




The damping ratio and the loss factor obtained from the experiment are presented in Table 8. A comparison of the same is also presented in Figure 32.

**Table 8. Damping ratios and loss factor calculated by 3dB method for different laminates**

Sample	Damping ratio (%)	Loss factor (%)
A1	0.28	0.55
A4	0.28	0.56
B2	0.25	0.50
B3	0.25	0.49
C1	0.24	0.48
C4	0.24	0.48
D1	0.18	0.36
D3	0.17	0.34
E2	0.25	0.50
E3	0.22	0.44
F2	0.24	0.47
F4	0.24	0.48
G1	0.24	0.48
G3	0.24	0.48
H3	0.26	0.52
H4	0.25	0.50
I3	0.21	0.41
I4	0.21	0.42
Y1	0.75	1.50
Y2	0.77	1.54
Y3	—	—
Y4	0.76	1.52
Z1	0.20	0.40
Z3	0.21	0.41
Z4	0.21	0.41



**Figure 32. Comparison of damping ratio and loss factor for different samples (for configuration details, refer to Appendix A)**

On observe à partir des résultats expérimentaux que la fréquence fondamentale du matériau composite hybride lin/carbone est supérieure à celle du stratifié composite lin/époxy. La présence de fibre de carbone dans le composite hybride augmente la rigidité du stratifié qui à son tour augmente la fréquence fondamentale.

De l'étude paramétrique, menée à la section 4.10, on observe que les fréquences de résonance obtenues à partir des expériences sont en bon accord avec celles obtenues à partir de la solution numérique. On peut observer à partir du tableau 7 que l'échantillon de lin de référence (Y) a le taux d'amortissement le plus élevé qui peut être attribué aux propriétés d'amortissement plus élevées de la fibre de lin en raison de sa structure morphologique. Cependant, étant donné que le nombre et la position des plis de carbone et des plis de lin (à la fois UD et non UD) varient de manière incohérente dans les stratifiés, faire une comparaison globale de l'effet de chaque paramètre (position et nombre de couches de lin) sur le comportement vibratoire des échantillons ne donne pas de remarques concluantes significatives.

D'autre part, en divisant les échantillons en différents groupes en fonction de la position, du nombre et de l'orientation des couches de lin et de carbone, on peut obtenir des



observations intéressantes. Une comparaison entre le taux d'amortissement des échantillons A, C et H montre que l'augmentation du nombre de couches de lin améliore les propriétés d'amortissement du stratifié. Le taux d'amortissement est augmenté pour une orientation unidirectionnelle de la fibre de lin (échantillon A) de 33,33 % à partir d'une orientation à 90° de la fibre de lin (échantillon I) et de 27,27 % à partir d'une orientation de +/- 45° (échantillon E) de la fibre de lin. Il ressort également de la comparaison des échantillons F et G que l'orientation de la fibre de lin ne semble pas affecter les propriétés d'amortissement si le nombre et la position des couches sont maintenus constants. La comparaison entre les échantillons B et F montre que la position de la couche de lin joue un rôle important dans le comportement d'amortissement des stratifiés. Placer le pli de lin dans la couche extérieure (échantillon B) augmente le taux d'amortissement de 4,2 %, malgré le fait qu'il y a plus de couches de lin dans l'échantillon F. Cependant, la tendance similaire n'est pas suivie par la couche de lin avec +/- Orienté à 45°. On observe à partir de la comparaison des échantillons D, E et G que le taux d'amortissement est moindre pour l'échantillon D où le pli de lin (+/- 45°) est placé sur la couche supérieure du stratifié.

Les caractéristiques dynamiques indiquent que les composites de fibres de lin peuvent être appliqués avec succès sur la gamme de fréquences basses et plus larges. Une augmentation significative de l'amortissement est possible dans les composites à base de fibres de lin par rapport aux matériaux composites plus répandus, par exemple les composites époxy renforcés de fibre de verre ou de carbone.

L'incorporation de fibres de lin dans la matrice polymère offre un amortissement considérable avec une rigidité raisonnable. Ainsi, ceux-ci en font un excellent candidat pour les applications structurelles légères. Des applications potentielles peuvent être envisagées dans des domaines où un amortissement important est requis, par exemple, les automobiles, les intérieurs d'avions, les pièces de machines, les articles de sport et les instruments de musique. Les avantages d'avoir des facteurs de perte élevés avec des composites légers renforcés de fibres de lin sont une durée de vie prolongée des pièces composites, une réduction du bruit et des vibrations, une réduction de l'effet de la charge dynamique sur la réponse structurelle et une diminution du poids. Par conséquent, si certaines exigences structurelles (par exemple, une rigidité élevée ou une résistance aux chocs et un



amortissement élevés) doivent être satisfaites, les composites de fibres de lin peuvent être un candidat viable.

Un bon accord global entre les solutions expérimentales et analytiques est apprécié pour la plupart des types d'échantillons. Cependant, une différence est détectable, en particulier pour les spécimens C et Z. Une des raisons de ces différences peut être due au rapport épaisseur / largeur élevé des spécimens, ce qui rend la théorie d'Euler-Bernoulli moins précise..

## 5 Conclusions

Le présent travail a étudié les effets des orientations des fibres et de l'hybridation des fibres de carbone sur le comportement d'amortissement des vibrations de différents types de composite époxy renforcé de fibres de lin et de ses stratifiés hybrides en fibres de carbone fournis par le partenaire industriel Kairos. Les essais expérimentaux ont d'abord été réalisés afin de déterminer la fréquence propre et les taux d'amortissement. Ensuite, des estimations numériques de la réponse, et en particulier des fréquences propres, ont été faites à l'aide d'un modèle d'éléments finis. La modélisation numérique a montré un bon accord avec les résultats expérimentaux. L'analyse par éléments finis a fourni des résultats détaillés sur l'influence couche par couche sur la fréquence naturelle globale des composites étudiés. Il a été observé que le composite avec une couche externe placée en fibre de lin offrait le taux d'amortissement le plus élevé, sauf pour les stratifiés avec une orientation  $\pm 45^\circ$ . Cela indique que les composites époxy de lin offrent de meilleures performances en termes de meilleure réaction d'amortissement par rapport aux composites hybrides fibre de carbone/lin. Ceci est attribué à la capacité de dissipation d'énergie de la fibre de lin en raison de ses caractéristiques morphologiques. Les résultats suggèrent que le renforcement des fibres de lin dans la matrice polymère offre des propriétés d'amortissement considérables avec une rigidité acceptable.



## References

1. James J. Sargianis, Hyung-Ick Kim, Erik Andres, JonghwanSuhr. Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites. *Composite Structures*, 2013(96): 538–544.
2. Dakai Chen, Jing Li, JieRen, Study on sound absorption property of ramie fiber reinforced poly(L-lactic acid) composites: Morphology and properties, *Composites: Part A* 41 (2010) 1012–1018.
3. Rueppel, M.; Rion, J.; Dransfeld, C.; Fischer, C.; Masania, K. Damping of carbon fibre and flax fibre angle-ply composite laminates. *Compos. Sci. Technol.* 2017, 146, 1–9.
4. Le Guen, M.J.; Newman, R.H.; Fernyhough, A.; Emms, G.W.; Staiger, M.P. The damping-modulus relationship in flax/carbon fibre hybrid composites. *Compos. B* 2016, 89, 27–33.
5. Vanwalleghem, J.; de Baere, I.; Huysman, S.; Lapeire, L.; Verbeken, K.; Nila, A.; Vanlanduit, S.; Loccufier, M.; van Paepegem, W. Effective use of transient vibration damping results for non-destructive measurements of fibre-matrix adhesion of fibre-reinforced flax and carbon composites. *Polym. Test.* 2016, 55, 269–277.
6. Dhakal, H.; Zhang, Z.; Guthrie, R.; MacMullen, J.; Bennett, N. Development of flax/carbon fibre hybrid composites for enhanced properties. *Carbohydr. Polym.* 2013, 96, 1–8.
7. Flynn, J.; Amiri, A.; Ulven, C. Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance. *Mater. Des.* 2016, 102, 21–29.
8. Bos, H.; van Den Oever, M.J.; Peters, O. Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites. *J. Mater. Sci.* 2002, 37, 1683–1692.
9. Berthelot, J.; Sefrani, Y. Damping analysis of unidirectional glass and Kevlar fibre composites. *Compos. Sci. Technol.* 2004, 64, 1261–1278.
10. Mahmoudi, S.; Kervoelen, A.; Robin, G.; Duigou, L.; Daya, E.; Cadou, J. Experimental and numerical investigation of the damping of flax/epoxy composite plates. *Compos. Struct.* 2019, 208, 426–433.



11. Cheour, K.; Assarar, M.; Scida, D.; Ayad, R.; Gong, X. Effect of stacking sequences on the mechanical and damping properties of flax glass fiber hybrid. *J. Renew. Mater.* 2019, 7, 877–889.
12. Cheung, H.; Ho, M.; Lau, K.; Cardona, F.; Hui, D. Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. *Compos. B* 2009, 40, 655–663.
13. Nabi Saheb, D.; Jog, J.P. Natural fiber polymer composites: A review. *Adv. Polym. Technol.* 1999, 18, 351–363.
14. Assarar, M., Zouari, W., Sabhi, H., Ayad, R., & Berthelot, J. M. (2015). Evaluation of the damping of hybrid carbon–flax reinforced composites. *Composite Structures*, 132, 148-154.
15. Mahmoudi, S., Kervoelen, A., Robin, G., Duigou, L., Daya, E., & Cadou, J. (2019). Experimental and numerical investigation of the damping of flax–epoxy composite plates. *Composite Structures*, 208, 426-433.



## Appendix A:

Dans ces figures, la couche pour la moitié du stratifié est montrée, où le nombre "1" est représentatif de la couche supérieure.

1	UD Carbone (300g)
2	UD Flax (200g)
3	UD FlaxTape (110g)
4	UD Carbone (300g)
5	UD Carbone (300g)
6	UD Carbone (300g)
7	UD Flax (200g)
8	UD Flax (200g)
9	UD FlaxTape (70g)
10	UD FlaxTape (70g)

CCCCL UD – A

1	FLAX équilibré
2	UD Carbone (300g)
3	UD Carbone (300g)
4	UD Carbone (300g)
5	UD Carbone (300g)
6	UD Flax (200g)
7	UD Flax (200g)
8	UD FlaxTape (110g)
9	UD FlaxTape (110g)

CCCCL 90 – B

1	UD Flax (200g)
2	UD FlaxTape (110g)
3	UD Carbone (300g)
4	UD Carbone (300g)
5	UD Carbone (300g)
6	UD Carbone (300g)
7	UD Carbone (300g)
8	UD Carbone (300g)
9	UD Carbone (300g)

CCCCL UD – C

1	FLAX +/- 45°
2	UD Carbone (300g)
3	UD Carbone (300g)
4	UD Carbone (300g)
5	UD Carbone (300g)
6	UD Carbone (300g)
7	UD Flax (200g)
8	UD FlaxTape (110g)
9	UD FlaxTape (110g)

CCCCL 45 – D

1	UD Carbone (300g)
2	FLAX +/- 45°
3	UD Carbone (300g)
4	UD Carbone (300g)
5	UD Carbone (300g)
6	UD Flax (200g)
7	UD Flax (200g)
8	UD FlaxTape (110g)
9	UD FlaxTape (70g)

CCCLC 45 – E

1	UD Carbone (300g)
2	UD Carbone (300g)
3	FLAX équilibré
4	UD Carbone (300g)
5	UD Flax (200g)
6	UD Flax (200g)
7	UD Flax (200g)
8	UD FlaxTape (110g)
9	UD FlaxTape (70g)

CCLCC 90 – F

1	UD Carbone (300g)
2	UD Carbone (300g)
3	FLAX +/- 45°
4	UD Carbone (300g)
5	UD FlaxTape (70g)
6	UD FlaxTape (110g)
7	UD Flax (200g)
8	UD Flax (200g)
9	UD Flax (200g)

CCLCC 45 – G

1	UD Carbone (300g)
2	UD Carbone (300g)
3	UD Flax (200g)
4	UD FlaxTape (110g)
5	UD Carbone (300g)
6	UD Carbone (300g)
7	UD Carbone (300g)
8	UD FlaxTape (110g)
9	UD Flax (200g)

CCLCC UD – H

1	UD Carbone (300g)
2	FLAX équilibré
3	UD Carbone (300g)
4	UD Carbone (300g)
5	UD Carbone (300g)
6	UD Flax (200g)
7	UD Flax (200g)
8	UD Flax (200g)

CCCCLC 90 – I





1	UD Flax (200g)
2	UD Flax (200g)
3	UD Flax (200g)
4	UD Flax (200g)
5	UD Flax (200g)
6	UD Flax (200g)
7	UD Flax (200g)
8	UD Flax (200g)
9	UD FlaxTape (70g)

Reference Flax – Y

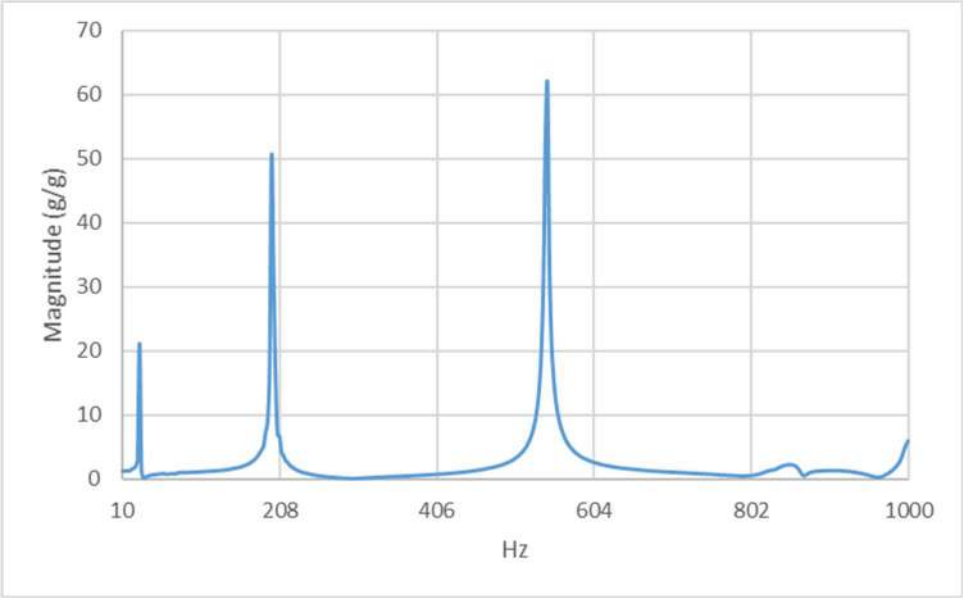
1	UD Carbone (300g)
2	UD Carbone (300g)
3	UD Carbone (300g)
4	UD Carbone (300g)
5	UD FlaxTape (70g)
6	UD Flax (200g)
7	UD Flax (200g)
8	UD Flax (200g)
9	UD Flax (200g)

Reference Carbon – Z

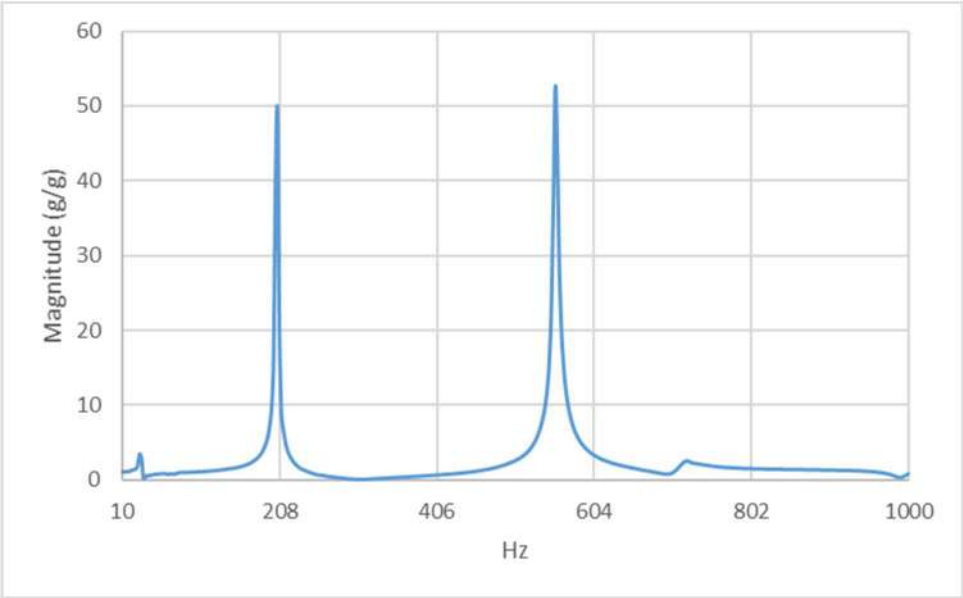


**Appendix B:**

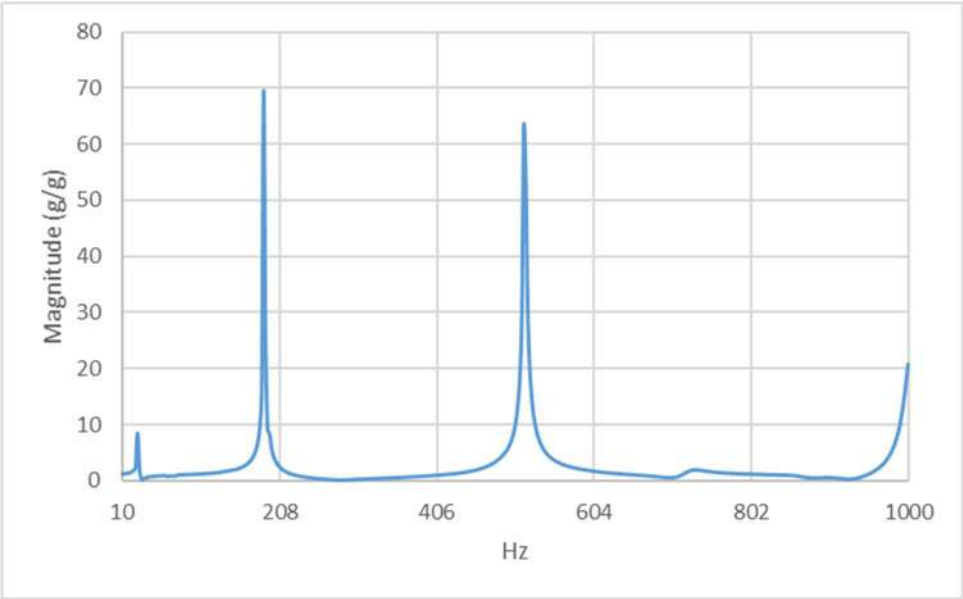
Les figures suivantes représentent le FRF typique des échantillons composites époxy lin/carbone de chaque groupe.



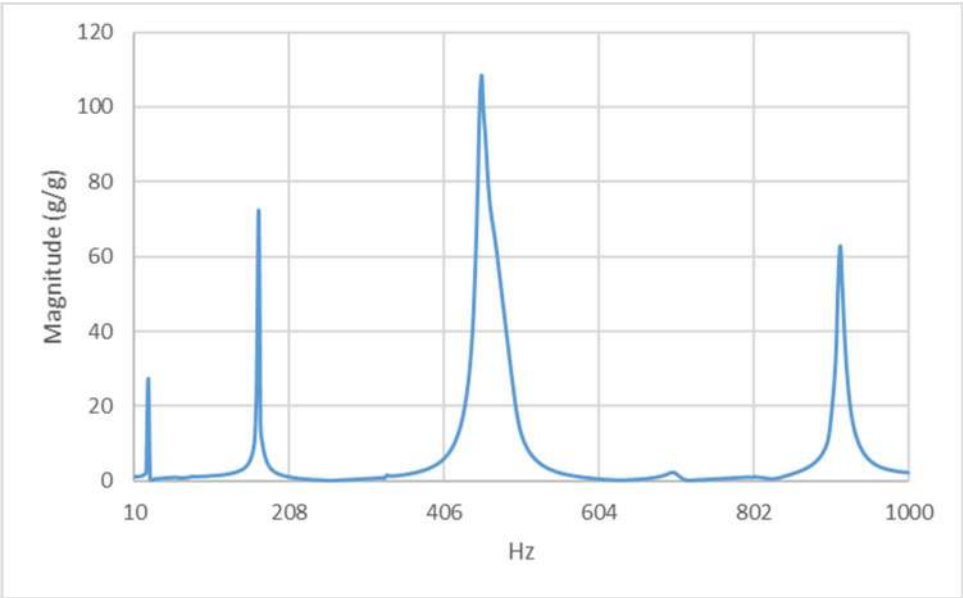
CCCLC UD – A



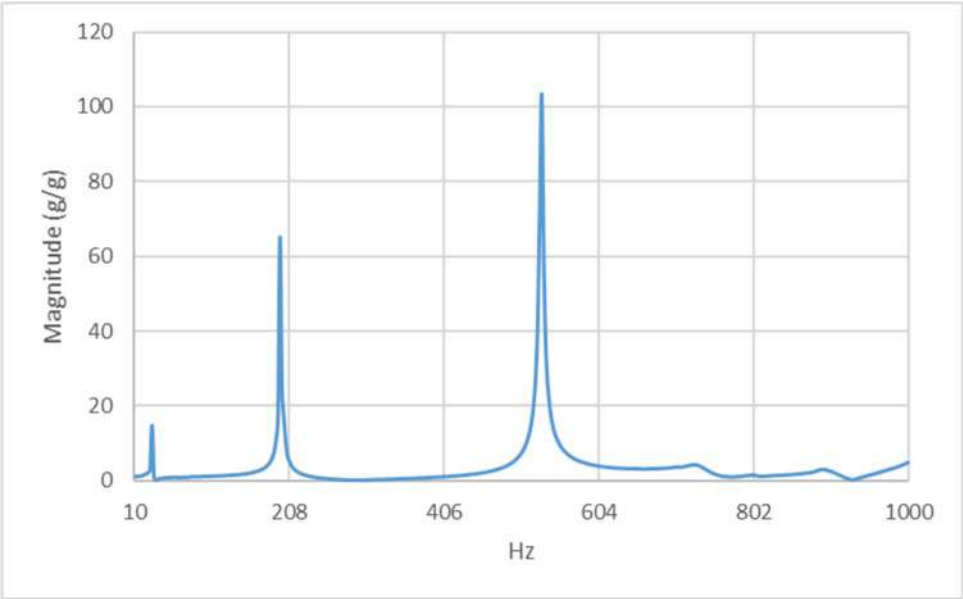
CCCCL 90 – B



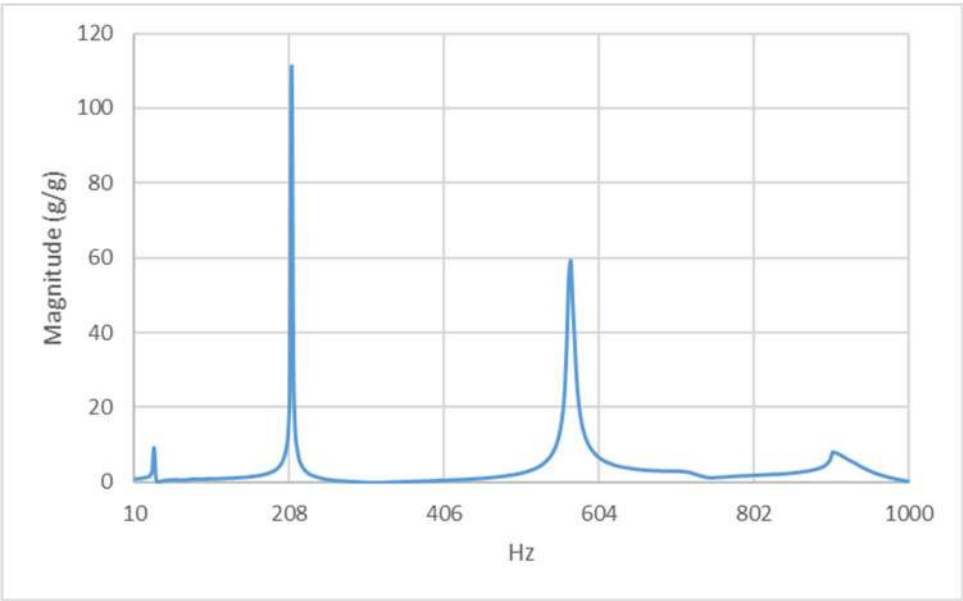
CCCCL UD – C



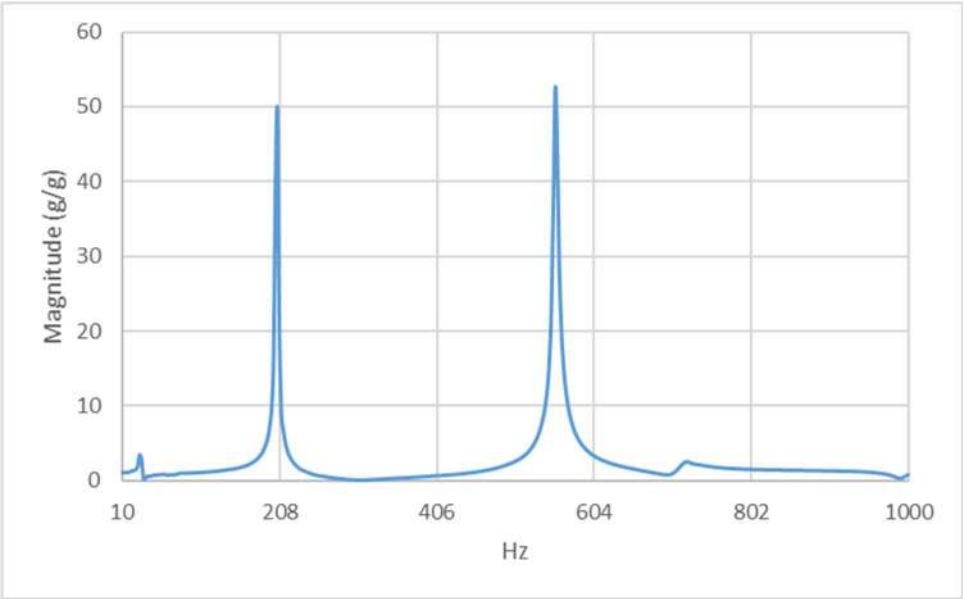
CCCCL 45 – D



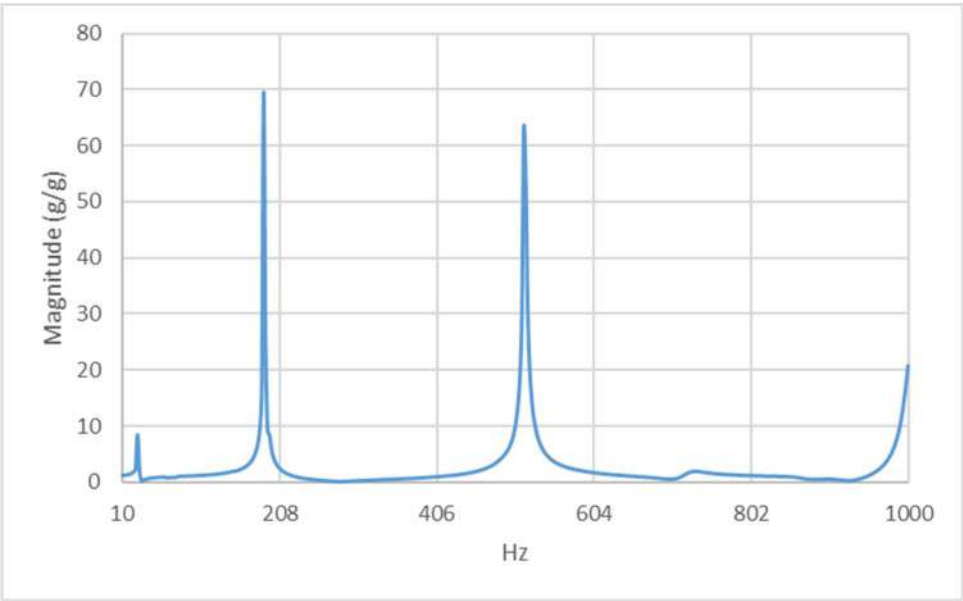
CCCLC 45 – E



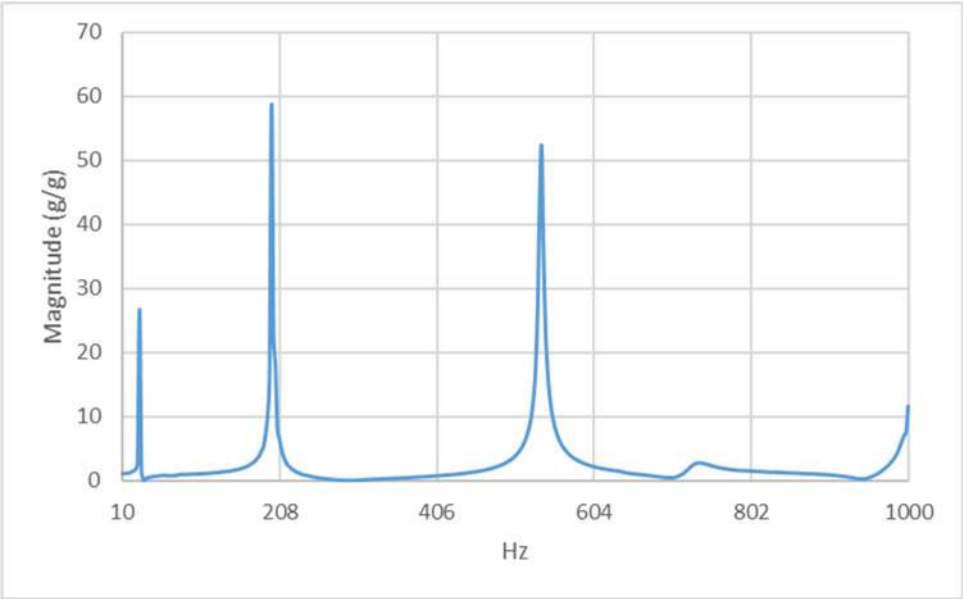
CCLCC 90 – F



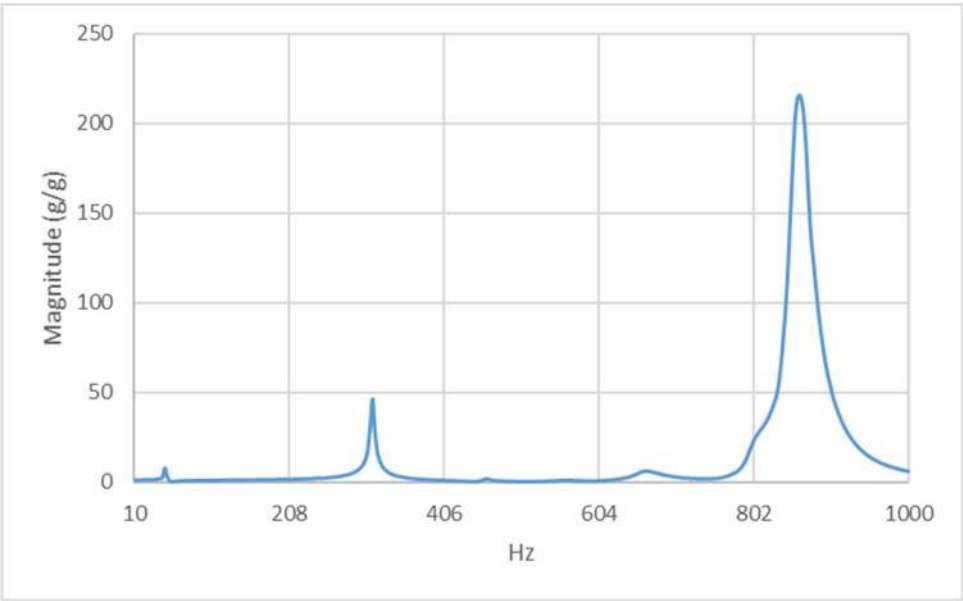
CCLCC 45 – G



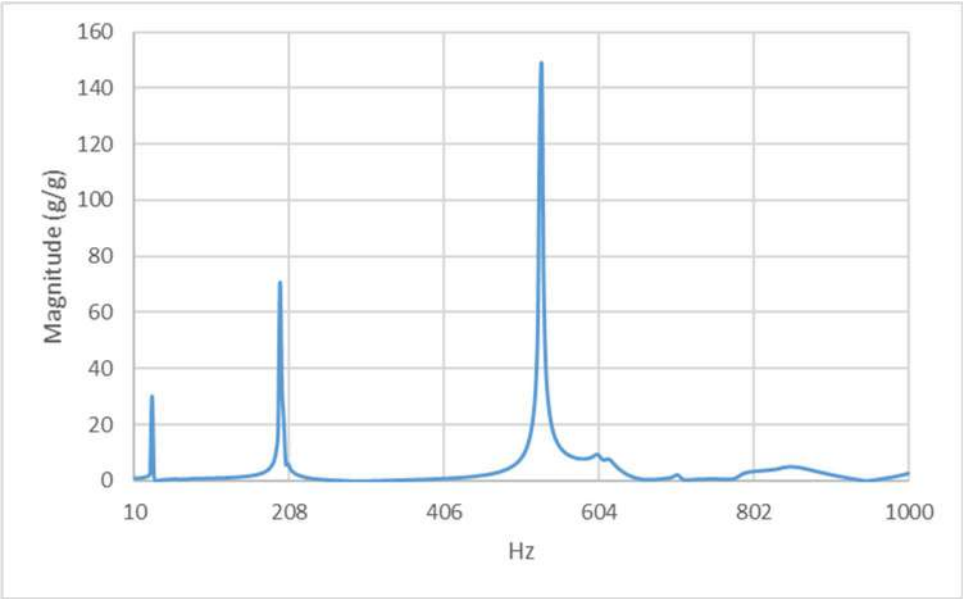
CCLCC UD – H



CCCLC 90 – I



Reference Flax – Y



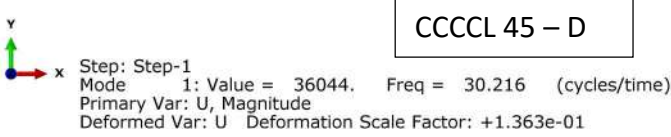
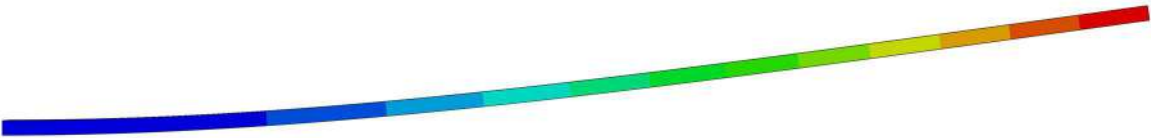
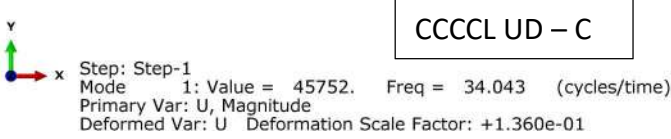
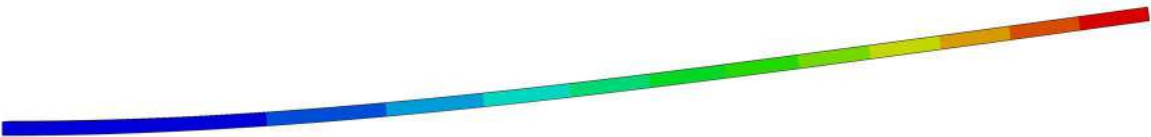
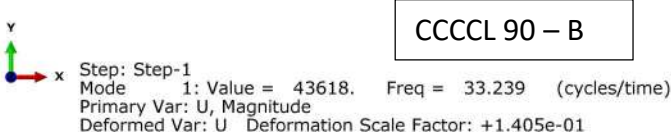
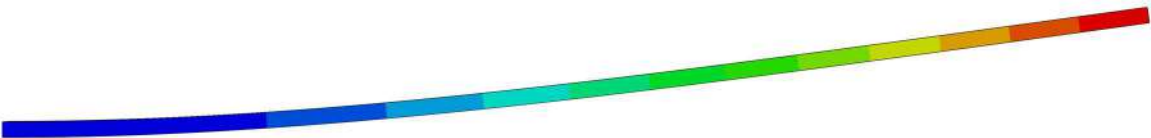
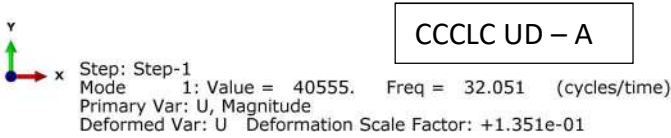
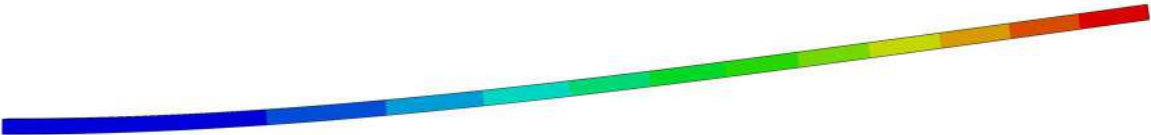
Reference Carbon – Z

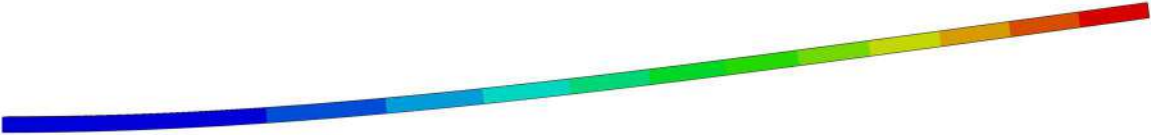




Appendix C:

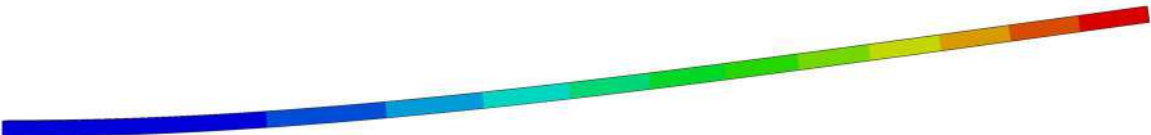
Résultats aux éléments finis pour la première fréquence propre des poutres composites hybrides lin/carbone (2e lot d'échantillons):





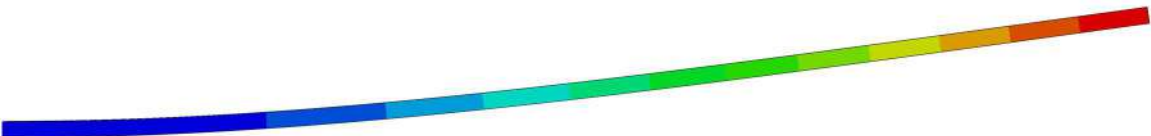
CCCLC 45 – E

Step: Step-1  
Mode 1: Value = 36562. Freq = 30.432 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.314e-01



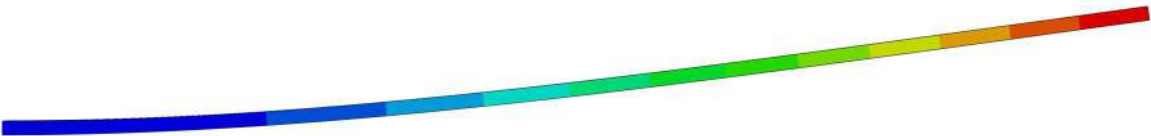
CCLCC 90 – F

Step: Step-1  
Mode 1: Value = 36687. Freq = 30.484 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.335e-01



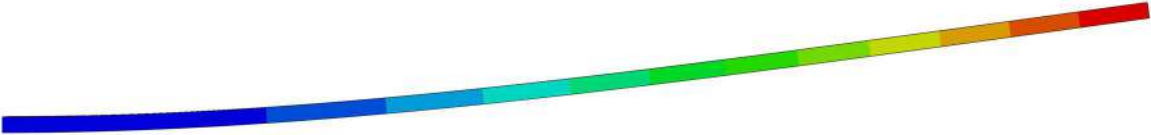
CCLCC 45 – G

Step: Step-1  
Mode 1: Value = 42268. Freq = 32.721 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.336e-01



CCLCC UD – H

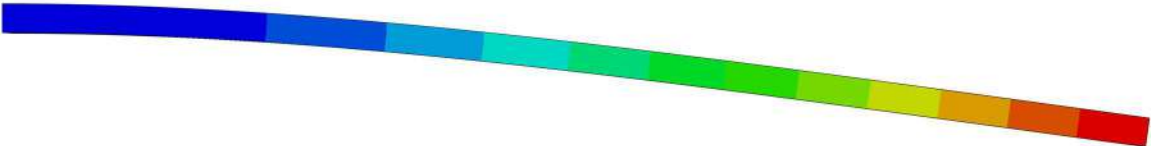
Step: Step-1  
Mode 1: Value = 38663. Freq = 31.294 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.263e-01



CCCLC 90 – I



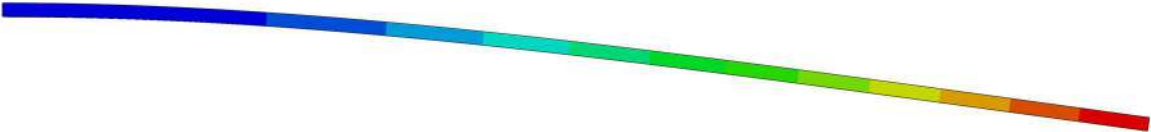
Step: Step-1  
Mode 1: Value = 39930. Freq = 31.803 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.333e-01



Reference Flax – Y



Step: Step-1  
Mode 1: Value = 1.32268E+05 Freq = 57.883 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +7.508e-02



Reference Carbon – Z



Step: Step-1  
Mode 1: Value = 25776. Freq = 25.552 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.481e-01