

17/531.631

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master

Présenté par : YEKHLEF ALA EDDINE

Option : Maintenance Industrielle

=====
Evolution de l'amortissement des composites stratifiés endommagés par vibrations linéaires
=====

Sous la Direction de :

Dr. KHAROUBI MOUNIR

Année universitaire 2012/2013

Table des matières

Chapitre 1 : Généralités et recherche bibliographique.

1312890

1. INTRODUCTION GENERALE.....	04
1.1. Définitions générales	04
1.2. Caractéristiques générales.....	04
1.3. Classification des matériaux composite.....	04
1.3.1. <i>Classification suivant la forme des constituants</i>	05
1.3.2. <i>Classification suivant la nature des constituants</i>	05
1.4. Mécanismes de rupture dans les matériaux composites.....	05
2. TRAVAUX DANS LE DOMAINE.....	05

Chapitre 2 : Partie expérimentale

1. MATERIAUX ETUDIES.....	16
2. ANALYSE MODALE EXPERIMENTALE.....	16
2.1 DISPOSITIFS D'ESSAIS	16
2.2 METHODES D'ANALYSE DES RESULTATS	17
3. EFFET DU POIDS DE CAPTEUR.....	18
4. EFFET DE L'ENDOMMAGEMENT.....	19
5. AMORTISSEMENT	21
5.1. LES DIFFERENTS TYPES D'AMORTISSEMENT	21
5.1.1 L'AMORTISSEMENT INTERNE	21
5.1.2 L'AMORTISSEMENT STRUCTURAL	22
5.1.3 L'AMORTISSEMENT PAR FLUIDES.....	23
6. MESURE DE L'AMORTISSEMENT.....	23
6.1 METHODE DE DECREMENT LOGARITHMIQUE.....	24
6.2 METHODE DE BOUCLE HYSTERESIS.....	24
6.3 EVOLUTION DE L'AMORTISSEMENT	24

Table des matières

7. CONCLUSIONS..... 27

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 28

1. INTRODUCTION GENERALE

Dans les domaines industriels de pointe (aéronautique, nucléaire, etc.), l'évaluation de l'endommagement des matériaux est un point clé pour la maîtrise de la durabilité et de la fiabilité des pièces et matériaux en service.

Le comportement à la rupture des matériaux dépend de la présence de fissures internes et superficielles, et des conditions de leur propagation. Une fissure, présente dans un matériau, ne se propage de façon catastrophique sous l'effet d'une contrainte appliquée que si l'accroissement de sa longueur entraîne une diminution de l'énergie totale du système.

En général, Il existe plusieurs techniques de l'évaluation de l'endommagement des matériaux composites parmi ces méthodes :

- Emission acoustique
- Tomographie X
- Vibrations linéaires.

Face à l'utilisation accrue des matériaux composites, il est indispensable d'avoir des indicateurs sensibles à la présence de l'endommagement afin de prévenir leurs ruines.

1.1 DEFINITIONS GENERALES

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. (2)

1.2 CARACTERISTIQUES GENERALES

En générale un matériau composite est caractérisé par une ou plusieurs phases discontinues distribuées de façon uniforme dans une phase continue. Dans la majorité des cas, on trouve la phase discontinue sous forme de particules ou de fibres appelées "renfort ou matériau renforçant" ayant des propriétés mécaniques plus élevées que celles de la phase continue, qu'on trouve sous forme de résine (polyester, époxyde, etc.), La phase continue est appelée matrice figure 1. (4)

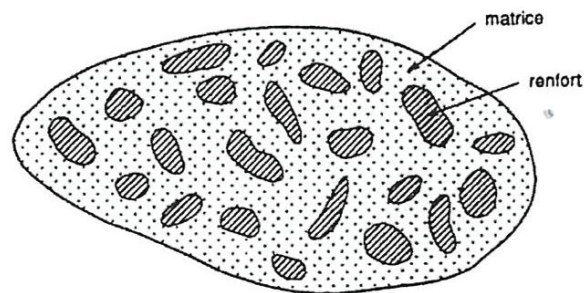


Figure 1. Matériau composite(4)

1.3 CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITE

La classification des matériaux composites se fait selon la forme et la nature des constituants de ces matériaux.

Classification suivant la forme des constituants

Suivant la forme des constituants, les composites sont classés en deux classes :

a) Les matériaux composites à fibres : les propriétés mécanique de composites sont modifiable et modulable selon la variation de :

- la nature des constatations
- la proposition des constituants
- L'orientation des fibres

b) Les matériaux composites à particules : les particules sont utilisées pour réduire le cout du matériau, l'utilisation de ce type de matériau est limitée.

Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés, en matériaux composites à matrice organique, métallique ou minérale.

1.4 MÉCANISMES DE RUPTURE DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant dans un matériau une "discontinuité" locale de matière appelée *fissure*. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de microfissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut. On parlera de *microfissuration*. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique (plusieurs fois celle des constituants), à partir des microfissures existantes. On parlera également de *microfissuration*. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique.

Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- La rupture des fibres,
- La rupture transverse de la matrice,
- La rupture longitudinale de la matrice
- La rupture de l'interface fibre-matrice

2. TRAVAUX DANS LE DOMAINE

Sefrani Y [1] : Les auteurs ont étudié l'effet de la température sur la rigidité et l'amortissement de matériaux composites renforcés par des fibres de verre. Les propriétés sont mesurées à partir des vibrations en flexion de poutres encastrée-libre. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que les propriétés dynamiques sont sensiblement conservées jusqu'au voisinage de la température de transition vitreuse, où l'amortissement croît rapidement dans un faible intervalle de température.

L'étude expérimentale a été réalisée sur des matériaux composites à fibres de verre, de grande diffusion. Les matériaux ont été fabriqués à partir de la résine époxyde SR 1500, associée au durcisseur SD 2505. Le renfort est constitué de fibres de verre se présentant sous forme d'un tissu unidirectionnel VEX 300. La matrice et le tissu sont distribués par la société SICOMIN. La mise en œuvre a été effectuée par voie humide, suivi d'une polymérisation sous vide (dépression de 70 kPa) par la technique du sac, durant 8 heures à température ambiante.

La figure 2 présente les résultats expérimentaux obtenus à température ambiante et les résultats théoriques,

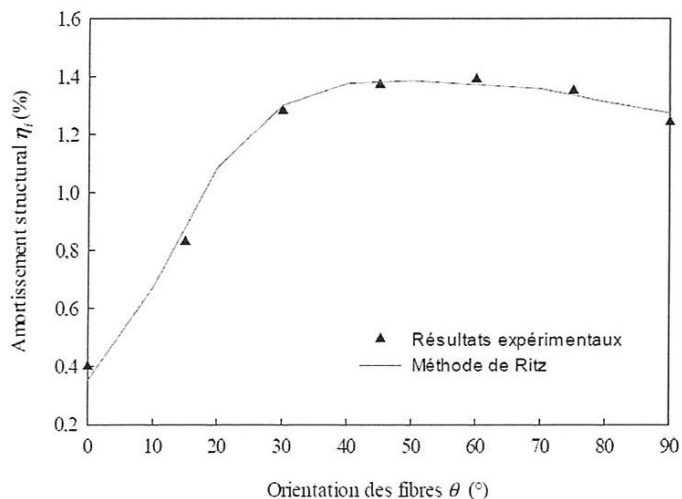


Figure 2. Évaluation de l’amortissement en fonction de l’orientation des fibres par la méthode de Ritz, dans le cas de la flexion de poutres de composites à fibres de verre.

La variation de la rigidité en fonction de l’orientation des fibres, pour une température donnée, peut être évaluée, comme à température ambiante, Cette relation nécessite de connaître le module longitudinal pour une orientation de 0° des fibres, le module transverse pour une orientation de 90° des fibres et le module de cisaillement longitudinal.

L’amortissement en fonction de l’orientation des fibres, pour une température donnée, peut être évalué à l’aide de la méthode de Ritz. Cette évaluation nécessite de connaître les amortissements structuraux. La figure 3 compare les résultats obtenus.

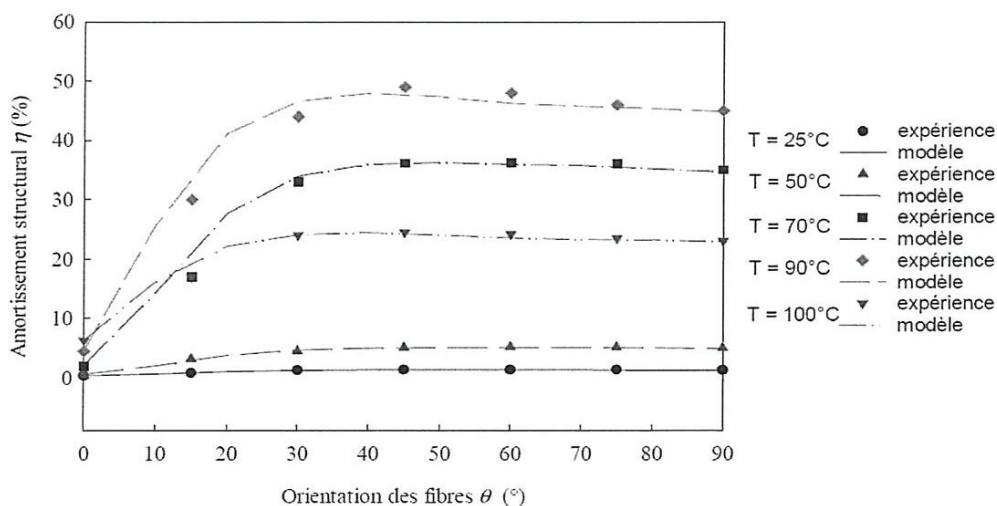


Figure 3. Évaluation de l’amortissement par la méthode de Ritz en fonction de l’orientation des fibres, pour une fréquence de 50 Hz, dans le cas de composites à fibres de verre

Ce travail a été consacré à l'étude de l'effet de la température sur les propriétés d'amortissement des matériaux composites unidirectionnel à fibres de verre. L'amortissement de la matrice croît d'abord progressivement avec la température, plus rapidement pour atteindre un maximum au voisinage de la température de transition vitreuse.

M. Assarar [2] : L'analyse modale expérimentale des vibrations avec excitation par impact présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre. La Figure 5 montre le dispositif expérimental utilisé pour l'étude des vibrations des poutres en configuration encastrée-libre. La structure est excitée en un point à l'aide d'un marteau d' choc et la réponse est détectée en un autre point de la structure à l'aide d'un vibromètre laser Polytec.

Les signaux d'excitation de la plaque et de sortie du vibromètre laser sont ensuite numérisés et traités par un analyseur dynamique de signaux développé par la société SigLab. L'analyse de ces courbes de réponse a été ensuite effectuée par ajustement par une méthode des moindres carrés à l'aide du module d'optimisation du logiciel Matlab. L'ajustement des courbes de réponse expérimentale permet donc d'obtenir les valeurs des fréquences propres f_i et du facteur de perte η_i de chaque mode. L'étude expérimentale a été effectuée sur différents types de sandwichs, constitués de mousse en PVC pour l'âme et de stratifiés à fibres de verre pour les peaux. La mise en œuvre des sandwichs est réalisée par moulage sous vide. Des essais de vibration en flexion ont été menés sur des poutres de largeur égale à 40mm et pour des longueurs égales à 300, 350, 400 et 450 mm

L'influence de la masse volumique de l'âme sur l'amortissement du sandwich est illustrée par l'étude de plusieurs sandwichs dont les peaux sont des stratifiés croisés avec une épaisseur de 1 mm et des âmes de différentes masses volumiques : 60, 80 et 200 kg/m³. L'amortissement du sandwich diminue lorsque la masse volumique de l'âme augmente. L'influence de l'épaisseur de l'âme sur l'amortissement du sandwich est illustrée par l'étude de plusieurs sandwichs dont les peaux sont des stratifiés croisés avec une épaisseur de 1 mm et une âme de masse volumique de 60 kg/m³ dont l'épaisseur varie de 3,5 à 30 mm.

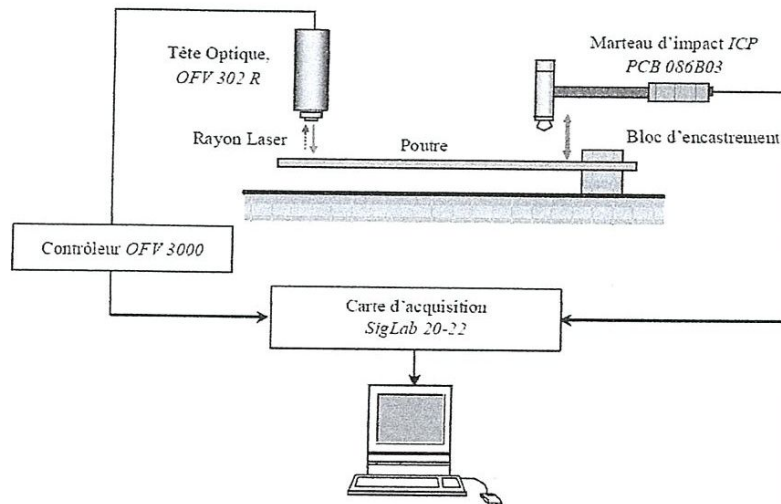


Figure 4. Dispositif expérimental dans le cas d'une excitation par impact

L'amortissement augmente en fonction de la fréquence, alors que l'amortissement diminue pour une épaisseur de l'âme supérieure ou égale à 10 mm figure 5.

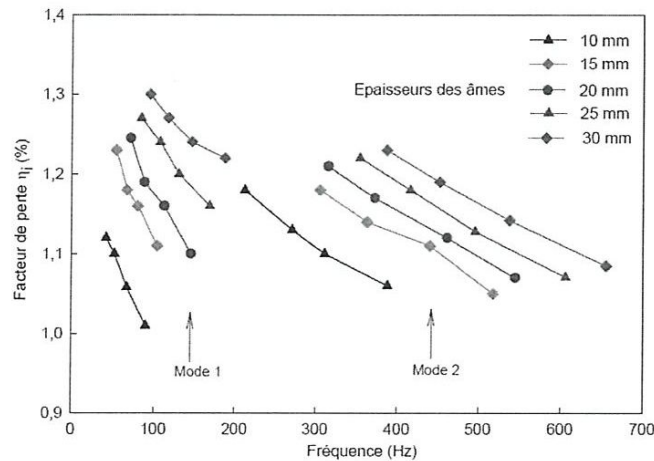


Figure 5. Évaluation de l'amortissement en fonction de la fréquence pour plusieurs épaisseurs de l'âme inférieure à 10 mm

Ces deux comportements sont associés à l'évolution et à la distribution des énergies dissipées dans les peaux et dans l'âme en fonction de l'épaisseur de l'âme

Dans cette étude une procédure expérimentale est mise en place, pour évaluer l'amortissement des matériaux sandwich. L'analyse expérimentale est effectuée en utilisant la technique d'excitation impulsionnelle sur une poutre en flexion, encadrée à une extrémité et l'autre est libre. Les énergies de déformation associées aux amortissements des constituants a permis ensuite de déterminer l'amortissement global de la structure considérée.

La confrontation des résultats expérimentaux et ceux obtenus par l'analyse d'éléments finis sont en bonne accord. Dans le but d'identifier l'influence des caractéristiques des constituants du matériau sandwich sur l'amortissement, une étude paramétrique par éléments finis a été effectuée. L'analyse des résultats de cette étude a montré que les principaux facteurs influant sur les valeurs de l'amortissement du matériau sandwich sont : la fréquence des vibrations, le module de cisaillement de l'âme, l'épaisseur de l'âme, la distribution des énergies emmagasinées dans l'âme et dans les peaux

Berthelot. J M [3] : L'évaluation expérimentale de l'amortissement a été réalisée sur des poutres de longueurs différentes: 160, 180 et 200 mm de façon à avoir une variation de la valeur de la fréquence. Poutres ont une largeur nominale de 20 mm et une épaisseur nominale de 2,4 mm. Les figures 6 et 7 montrent les résultats expérimentaux obtenus pour l'amortissement dans le cas de composites à fibres de verre et composites en fibres de kevlar, respectivement. Les résultats sont présentés pour les trois premiers modes de flexion et pour les différentes longueurs des poutres. Pour une fibre donnée d'orientation, on constate une augmentation de l'amortissement lorsque la fréquence augmente.

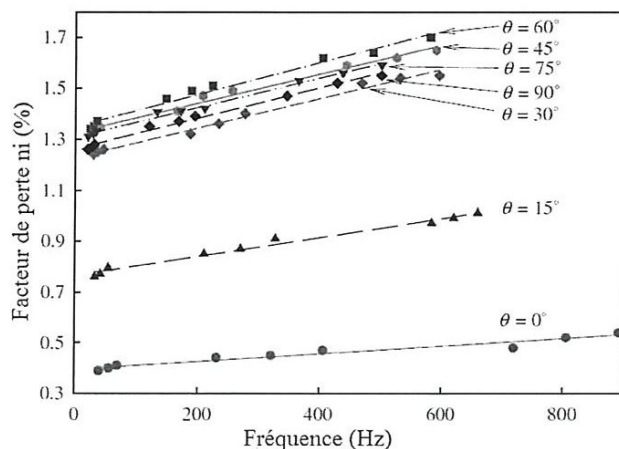


Figure 6. Les résultats expérimentaux obtenus pour l'amortissement en fonction de la fréquence des orientations de fibres différentes, dans le cas de fibres de verre composites

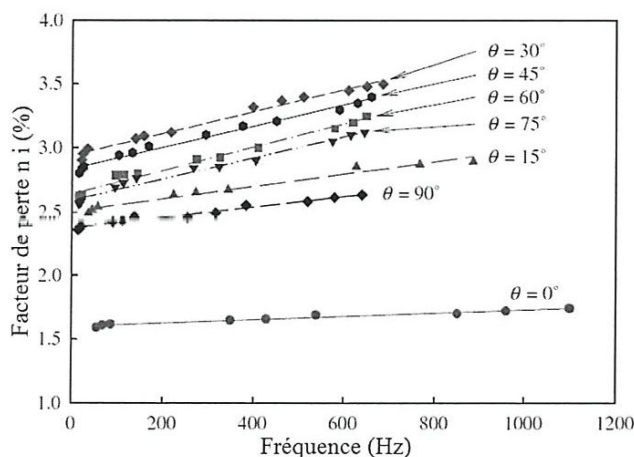


Figure 7. Les résultats expérimentaux pour l'amortissement en fonction de la fréquence des orientations de fibres différentes, dans le cas de fibres de Kevlar composites

Les valeurs de l'amortissement lorsque la bande de fréquence est comprise entre 50 à 600 Hz sont rapportés dans le tableau 1 pour les composites en fibre de verre et les composites à fibres de Kevlar. L'augmentation de l'amortissement est la même pour (21% à 27%) pour les différentes orientations des fibres, dans le cas des composites à fibres de verre, quand l'augmentation dépend de l'orientation des fibres dans le cas de composites à fibre de Kevlar les valeurs sont comprises entre 5% à 18%.

Tableau 1. Variation de l'amortissement (%) dans la gamme de fréquences (50-600 Hz)

L'orientation de fibres (degrés)	0	15	30	45	60	75	90
Composites en fibre de verre	21	24	26	23	26	23	27
Composites en fibres de Kevlar	5.4	10.2	16.5	17	18.3	18	11.6

Les variations du facteur de perte en fonction de l'orientation des fibres sont données dans Les Figure 8 et 9, respectivement, pour les trois fréquences 50, 300 et 600 Hz. Les résultats expérimentaux montrent que l'amortissement est maximal à une orientation des fibres d'environ 60° pour les matériaux composites en fibres de verre, où un maximum est observé pour une orientation d'environ 30° des fibres dans le cas des composites Kevlar.

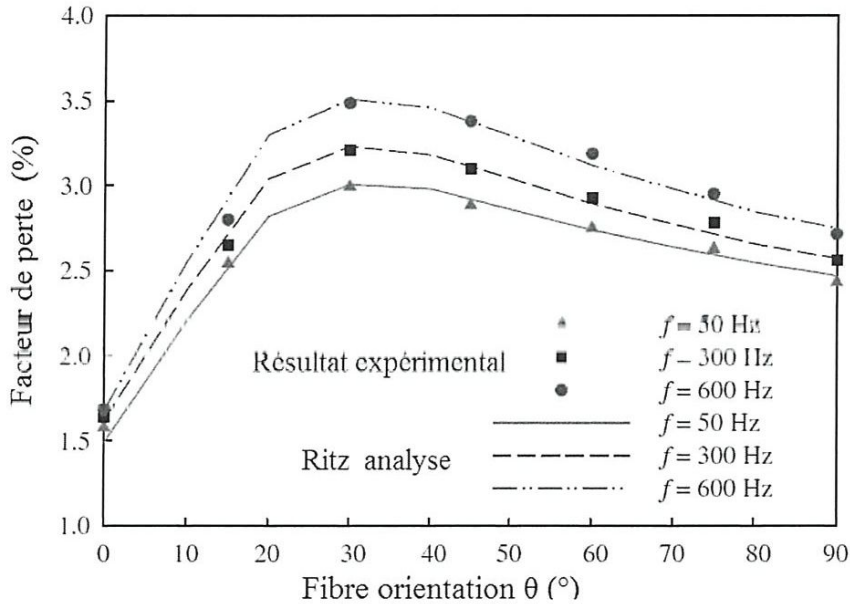


Figure 8. Variation de l'amortissement en fonction de l'orientation des fibres, à l'cas de composites à fibres de verre.

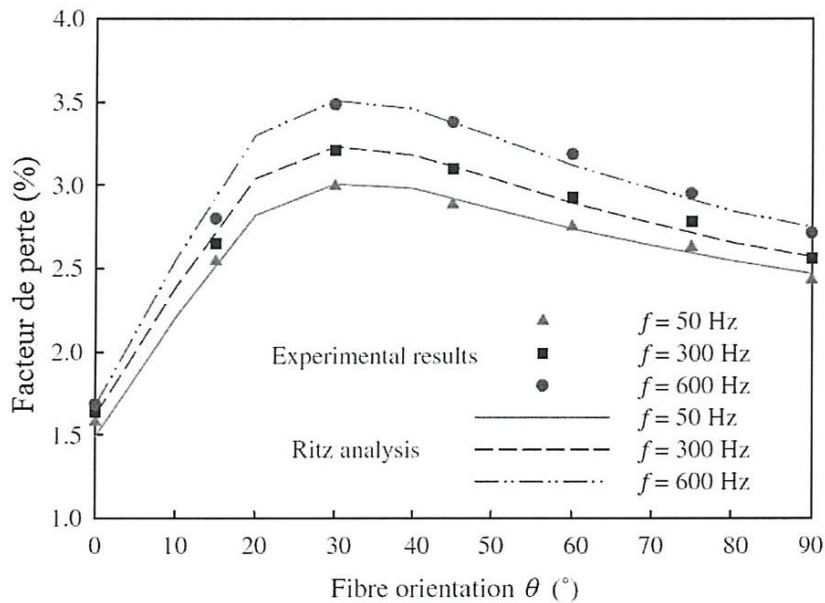


Figure 9. Variation de l'amortissement en fonction de l'orientation des fibres, à l'cas des composites à fibres de Kevlar

L'amortissement des composites est déterminé expérimentalement pour le cas de poutres encastrés- libres excitée par impulsion. L'amortissement est déterminé en faisant un lissage de FFT en utilisant un programme sous MATLAB.

Les paramètres d'amortissement ont été mesurés dans le cas des poutres composites unidirectionnelles de fibres de verre et composites en fibres de Kevlar en fonction de l'orientation des fibres. Les résultats expérimentaux obtenus pour les facteurs de perte des matériaux unidirectionnels montrent une augmentation significative de l'amortissement du matériau avec la fréquence. L'influence de la largeur des poutres a été étudiée par la méthode de Ritz et les résultats obtenus montrent que pour une poutre de longueur donnée l'amortissement de la poutre dépend du rapport de la longueur sur la largeur de cette dernière.

C. Kyriazoglou [4] : la Mesure de (SDC Capacité Spécifique D'amortissement) est une méthode utile pour la détection des dommages potentiels. Le travail présenté dans ce papier consiste à mesurer et l'analyser par SDC des poutres composites en flexion. Les poutres ont été testées, avant et après l'introduction des dommages en utilisant un chargement quasi-statique ou de fatigue. Les poutres sont mises en vibration en flexion dans les conditions libre-libre dans leur première mode de vibration de résonance, comme le montre la figure 10. Deux fils minces sont utilisés pour soutenir la poutre au niveau des nœuds. La position nodale peut être prédite à l'aide de l'analyse des formes des modes et peut être confirmée expérimentalement par l'observation directe de la vibration. Les petits aimants en fer à cheval sont fixés par collage aux extrémités de la poutre. La vibration est entraînée par deux bobines statiques connectées en série, qui sont disposées de telle sorte que les aimants vibrent dans leurs champs magnétiques. L'énergie d'entrée de la poutre vibrante est calculée à partir du courant circulant dans les bobines et la fréquence de la résonance du mode fondamental correspondant, au déplacement maximal de résonance au centre de la poutre, le déplacement est mesuré à l'aide d'un laser.

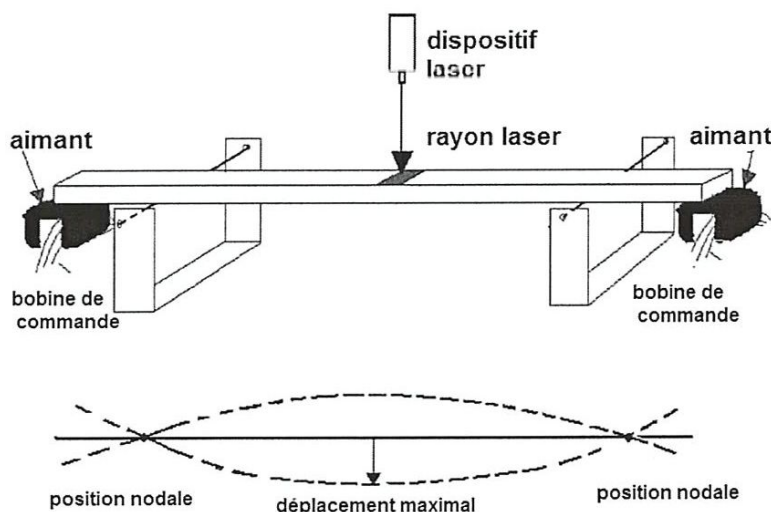


Figure 10. Mesure des propriétés dynamiques.

Les matériaux testés sont des composites renforcés par des fibres verre (GFRP) et de fibre de carbone (CFRP), pour (GFRP) la matrice est constituée de : résine époxy (stor stag), durcisseur MNA et un accélérateur K61B. Le renfort est du verre E continu de masse volumique $2,56 \text{ g/cm}^3$, et du tissu de verre ($0/90^\circ$) satin à 8 maille de masse surfacique 297 g/mm^2 , pour le (CFRP) la matrice est une résine époxy (vontico M7750), et les fibres sont du tissu de carbone (T300) ($0/90^\circ$) satin à 5 maille.

Les premiers essais et les analyses ont été effectuées sur des stratifiées renforcé de fibres de verre continus croisés. Des fissures ont été introduites dans la couche transversale à l'aide de chargement quasi-statique en traction. Les fissures s'étendent à travers la largeur et l'épaisseur du pli et la densité des fissures est proportionnelle à la déformation. Ces fissures sont clairement visibles dans ce stratifié transparent. Un exemple de ce dommage est montré dans la Figure 11.

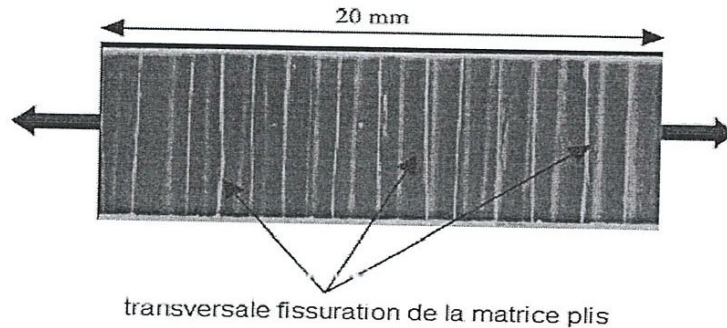


Figure 11. Vue en plan montrant la fissuration transversale dans les 90 plis de GFRP [90/0] s stratifié.

Par exemple pour GFRP : stratifiés croisés unidirectionnelle, les endommagements de ces poutres sont sous forme de fissures transversales dans les plis à 90, les fissures dans les couches transversales La dégradation de la rigidité globale de la poutre et de la SDC ont plus important lorsqu'ils sont dans les couches extérieures de la poutre (Figure 12 a et b),

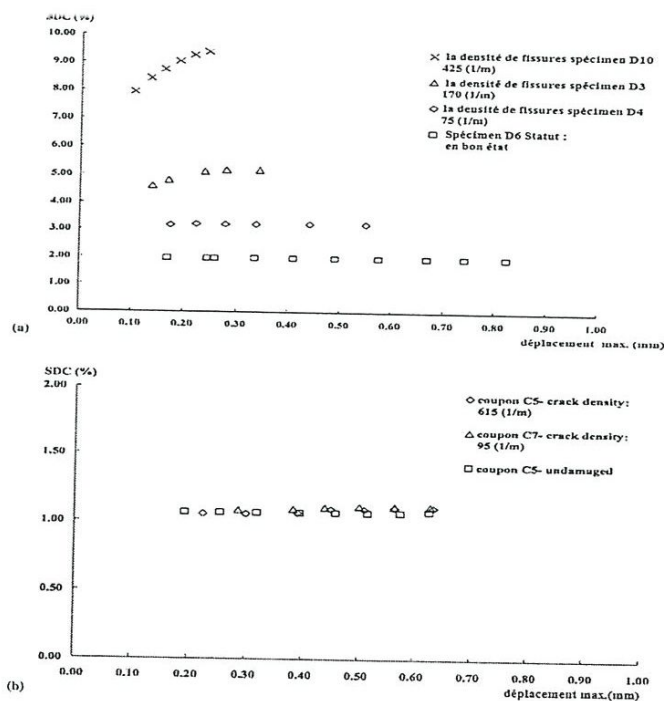


Figure 12. Variation de la capacité spécifique d'amortissement avec une amplitude maximale de vibration continue pour GFRP, avec fissure transversale différente densité: (a) [90/0] s stratifiés; (b) [0/90] s stratifiés.

L'interprétation des résultats pour les matériaux tissés déduites des résultats des stratifiés croisés où les fissures ont été bien caractérisés. Ces résultats montrent que, après initiation des dommages en utilisant des chargements quasi-statique pour les stratifiés GFRP tissés, les dommages se produisent dans les couches extérieures la ruine; cependant, pour les stratifiés CFRP tissés, après initiation des dommages en utilisant des chargements en fatigue, les dommages s'accumulent dans la partie extérieure des plis jusqu'à la rupture.

Les résultats indiquent que les propriétés d'amortissement sont sensibles à la présence de fissures et appuient fortement le concept de surveiller les changements dans les valeurs de la SDC dans le but de détecter des dommages succès préliminaire.

Madi B.[5] : Ce travail avait pour but le suivi de l'endommagement des matériaux composites par vibration linéaires, les matériaux étudié sont fabriqués par moulage sous vide au Laboratoire d'Acoustique de l'université du Maine, Le Mans, France, formés par un empilement de 8 plis, le renfort est un verre unidirectionnel UDV de masse surfacique 300 (g/m²), de résine époxyde SR 1500 / SD 2505. Les constituants sont fabriqués par la société SICOMIN, Les plis sont stratifiés et imprégnés à température ambiante, placé sous vide à dépression de 30 KPa pendant 8 heures entre le moule et le contre moule suivie d'une polymérisation de 8 heures à 80°C dans un four électrique. Les découpes dans les sens longitudinaux ont conduit à quatre séquences d'empilements reportées sur le tableau.

Tableau 2. Matériaux Etudié

Désignation des matériaux	Séquence d'empilement
U	[(0)] ₈
C2	[(0/90) ₂] _s

Les essais sont effectués sur une machine de type ZWICK équipée d'une cellule de charge de 5KG et pilotée par ordinateur

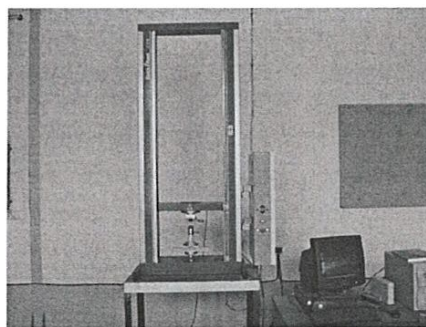
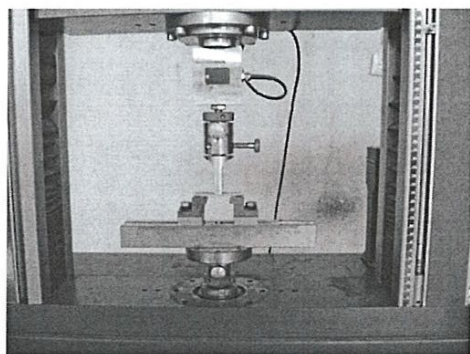


Figure 13. Principe d'essai de flexion 3 points statique

Les courbes de comportement mécanique charge-déplacement obtenues en flexion 3 points statique pour les deux types de matériaux sont représentées sur les figures 14 et 15

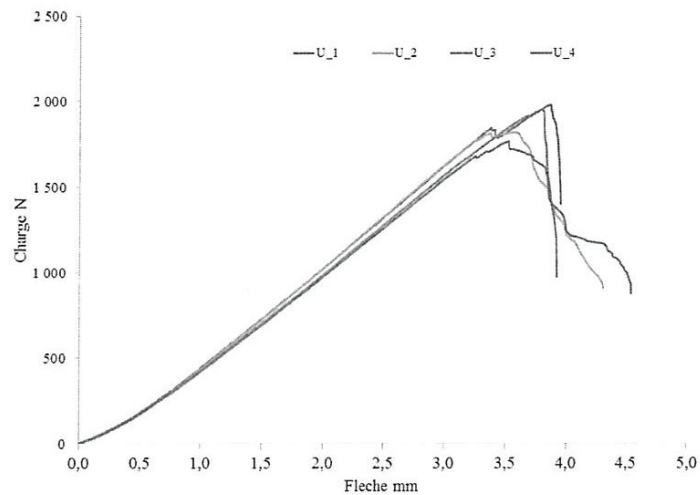


Figure 14. Courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique ;
Matériau U

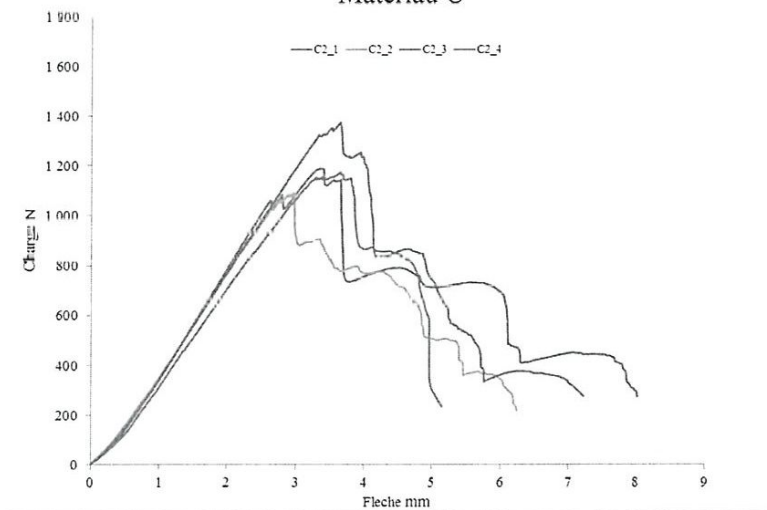


Figure 15. Courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique,
Matériau C2

L'analyse expérimental a été effectuée dans le cas de flexion des poutres stratifiées, les poutres étant appuie-appuie .elle sont graduées afin de repérer la cordonnée de l'impact et celle du point de mesure Figure 16 .les poutre sont excitées en un point d'abscisse x_1 et la réponse est relevée en un point d'abscisse x . Ces points doivent être choisis de telle sorte que ni le point de mesure, ni le point d'impact ne soient sur un nœud de vibration.

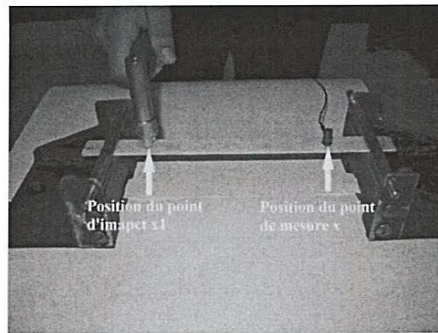
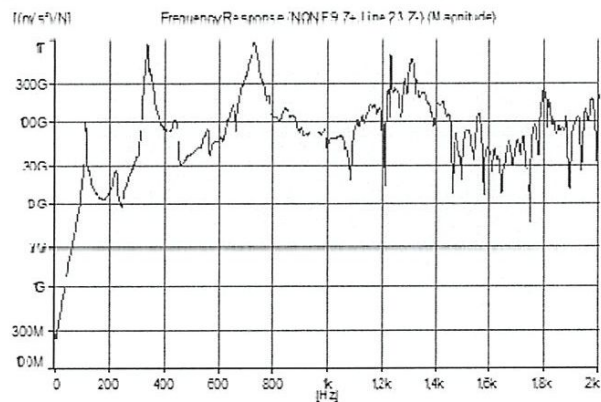


Figure 16. Points d'impact et de mesure sur une poutre

Les essais de vibration sont effectués en flexion sur des poutres stratifiées de longueurs de 215 mm. la figure 17;représentent la réponse en vibration libre en fonction de la fréquence des poutres en composite stratifier saines et endommagées.



a) Eprouvette U_7

La Figure 17. Réponse en fréquence, appuie – appuie, matériau U

Le Tableau 3 montre les fréquences propres déterminées pour les 5 premiers modes pour les matériaux sains et endommagés.

Le Tableau 3. Variation des fréquences propres Matériaux

Mode	Eprouvette U_7	Eprouvette U_8	Eprouvette U_9	Moyenne
Mode 1(Hz)	108.1	115	138.8	120,64
Mode2 (Hz)	333.8	368.1	405	368,97
Mode3(Hz)	728.1	641.3	767.5	712,3
Mode 4(Hz)	1306	1232	1424	1320,67
Mode 5(Hz)	1562	1688	1699	1649,67

Les fréquences propres déterminées pour les deux matériaux sains sont reportées sur le tableau 3, une certaine dispersion des résultats; dû à la nature des matériaux composites (mode de fabrication manuel) et à la difficulté d'avoir les mêmes conditions de serrage au niveau des appuis

1. MATERIAUX ETUDIES

Nous avons étudié deux types de matériaux composites fabriqués par R.T.M au Laboratoire Roberval de Polymères et Composites de l'Université de Technologie de Compiègne France, sont formés par un empilement de 30 plis, renforcés par des fibres de verre et d'une matrice polymère, les séquences d'empilement des deux matériaux sont $[-60/-30/0]_{10}$ et $[-30/0/30]_{10}$. La figure 1 présente les matériaux étudiés.

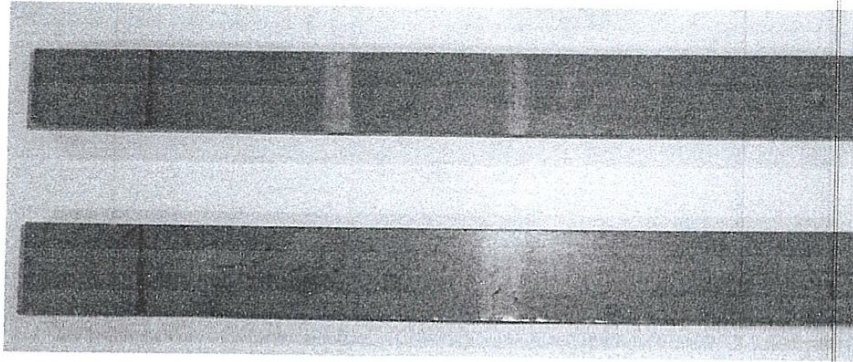


Figure 1. Poutre composite stratifié

2. ANALYSE MODALE EXPERIMENTALE

2.1 DISPOSITIFS D'ESSAIS

L'analyse modale expérimentale des vibrations avec excitation par impact présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre. La figure 2 montre le montage d'une éprouvette sur le dispositif expérimental utilisé pour l'étude des vibrations des poutres. Pour la condition limite encasturé - libre, le serrage de la poutre sur le banc d'essai ce fait à l'aide d'une clé dynamométrique, le couple du serrage est égale à 15Nm.

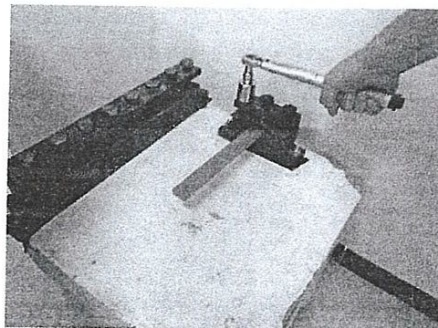
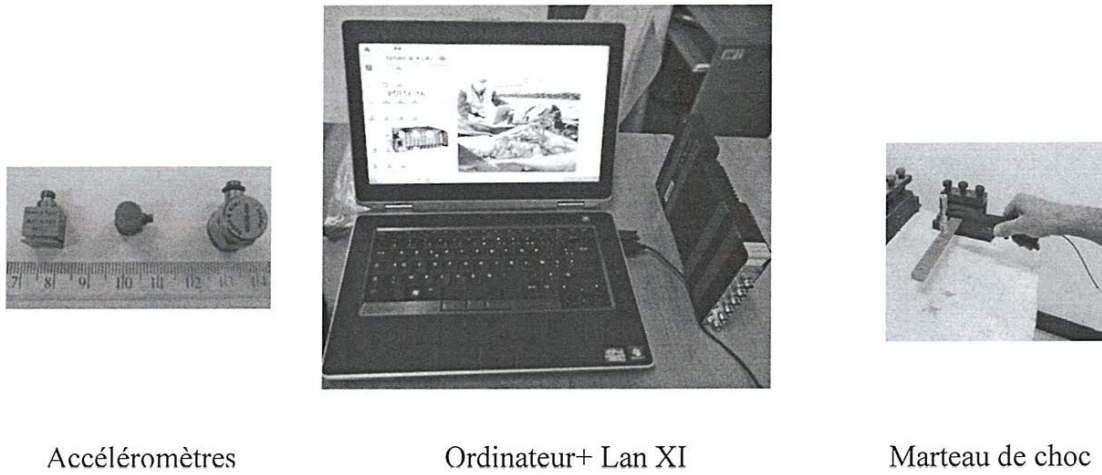


Figure 2. Montage de l'éprouvette sur le banc d'essai

La structure est excitée en un point à l'aide d'un marteau d'impact et la réponse est détectée en un autre point de la structure à l'aide de plusieurs accéléromètres Bruel & Kjaer de différent poids (capteur 1 type 4393 de 2.4 g, capteur 2 type 4507-B004 de 4.6 g et le capteur 3 type 4513B-001 de 10 g). Les signaux d'excitations de la poutre et de sortie de l'accéléromètre sont ensuite numérisés et traités par un analyseur dynamique de signaux Pulse LAN XI. Ce système effectue l'acquisition des signaux et le contrôle des conditions d'acquisition (sensibilité, bande passante, conditions de déclenchement, etc.). Il effectue

également le traitement des signaux (transformée de Fourier, réponse en fréquence, etc.). Les signaux et les traitements associés peuvent être ensuite sauvegardés, pour des post-traitements.



Accéléromètres

Ordinateur+ Lan XI

Marteau de choc

Figure 3 Dispositif expérimental cas d'une excitation par impact

2.2 METHODES D'ANALYSE DES RESULTATS

L'analyse expérimentale a été effectuée dans le cas de la flexion de poutres stratifiées, les poutres étant encastres libres. Elles sont graduées afin de repérer la coordonnée de l'impact et celle du point de mesure figure 4. Les poutres sont excitées en un point d'abscisse x_1 et la réponse est relevée en un point d'abscisse x . Ces points doivent être choisis de telle sorte que ni le point de mesure, ni le point d'impact ne soient sur un nœud de vibration. Générer l'impact en une position proche de l'un des appuis présente l'avantage d'être certain qu'une gamme importante de modes soit excitée sans risquer de se situer sur un nœud de vibration, et ceci avec une grande qualité de signal d'impact. Nous avons effectué des relevés de mesures en différents points afin d'être certains de ne pas oublier des fréquences propres.

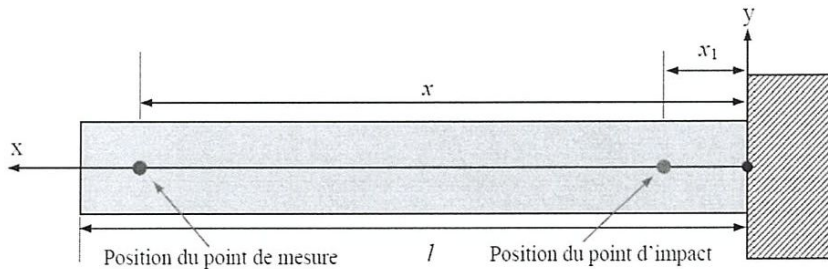


Figure4. Points d'impact et de mesure sur une poutre.

La figure 5 présente un exemple de réponse en fréquence, encastre libre, excitée par impact.

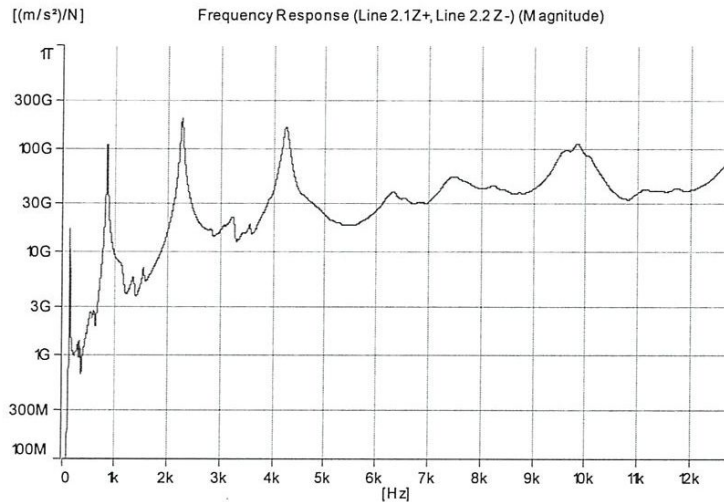


Figure 5. Réponse en fréquence pour une poutre encasturé-libre

Les essais de vibration sont effectués en flexion sur des poutres stratifiées dont les dimensions sont reportées sur le tableau 1.

Tableau 1. Dimensions des poutres

Matériau	longueurs	largeur	épaisseur
$[-30/0/30]_{10}$	214,6	23.6	12.2
$[-60/-30/0]_{10}$	214.6	27.2	12.2

3. EFFET DU POIDS DE CAPTEUR

Pour voir l'effet du capteur poids sur la réponse en fréquences nous avons utilisés simultanément 3 capteurs B&K de poids différent (2.4 ,4.6 et 10 g), les résultats des mesures sont présentés sur les tableaux 2 et 3, ils montrent la variation des fréquences propres en fonction du poids des capteurs pour les deux poutres stratifier $[-60/-30/0]_{10}$ et $[-30/0/30]_{10}$

Tableau 2. Fréquences en fonction du poids du capteur Poutre $[-30/0/30]_{10}$

Modes	Poutre $[-30/0/30]_{10}$		
	Cap 1	Cap 2	Cap 3
Mode 1	128	125	117
Mode 2	825	814	775
Mode 3	2250	2240	2020
Mode 4	4220	4170	4490
Mode 5	7500	7290	7340
Mode 6	9830	9960	9570

L'effet de la masse du capteur est constaté pour les fréquences inférieures à 2000 Hz, où les fréquences des modes diminuent lorsque le poids du capteur augmente pour les trois premiers modes. Le comportement de la structure est dominé par la masse alors que au-delà de cette fréquence c'est la raideur la structure qui devient prépondérante et on observent une tendance inverse.

Tableau 3. Fréquences en fonction du poids du capteur Poutre [-60/-30/0]₁₀

Modes	Poutre [-60/-30/0] ₁₀		
	Cap 1	Cap 2	Cap 3
Mode 1	140	136	113
Mode 2	894	872	807
Mode 3	2420	2410	2750
Mode 4	4460	4520	4850
Mode 5	7310	7410	7340
Mode 6	10300	10300	10300

Le même phénomène est observé pour le deuxième matériau une diminution des fréquences des deux premier modes, une augmentation du troisième et quatrième mode et une quasi stabilité pour le cinquième et le sixième mode.

Pour une meilleure appréciation de l'influence du poids du capteur sur les valeurs des fréquences propres, nous avons reporté sur la figure 6 l'évolution des fréquences propres normalisées pour chaque mode en fonction du capteur utilisé.

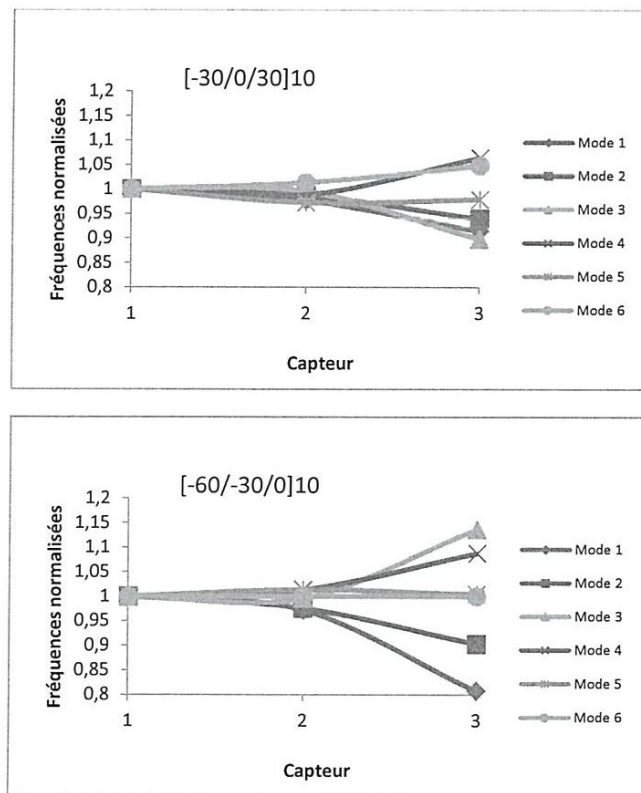


Figure 6. Fréquences propres normalisées

L'effet de poids du capteur est plus remarquable sur les faibles fréquences alors que c'est la raideur la structure qui devient prépondérante pour les fréquences élevées.

4. EFFET DE L'ENDOMMAGEMENT

Les réponses en fréquences des poutres saines sont déterminées en utilisant le capteur 1, les poutres sont endommagées (figures 7) dans l'épaisseur par perçage à l'aide d'un foret de diamètre 3 mm, ensuite les poutres sont fixés sur le banc d'essai en respectant les mêmes

conditions aux limites encastré-libre et en gardant le même couple de serrage 15m.N, enfin ils sont testés en vibration pour déterminer les nouvelles réponses en fréquences.



Figure 7. Poutre endommagé

La superposition des réponses en fréquences des poutres saines et endommagés montre que les pics de résonances se décalent vers les basses fréquences, figure 8. Ce décalage est le résultat la perte de rigidité des poutres.

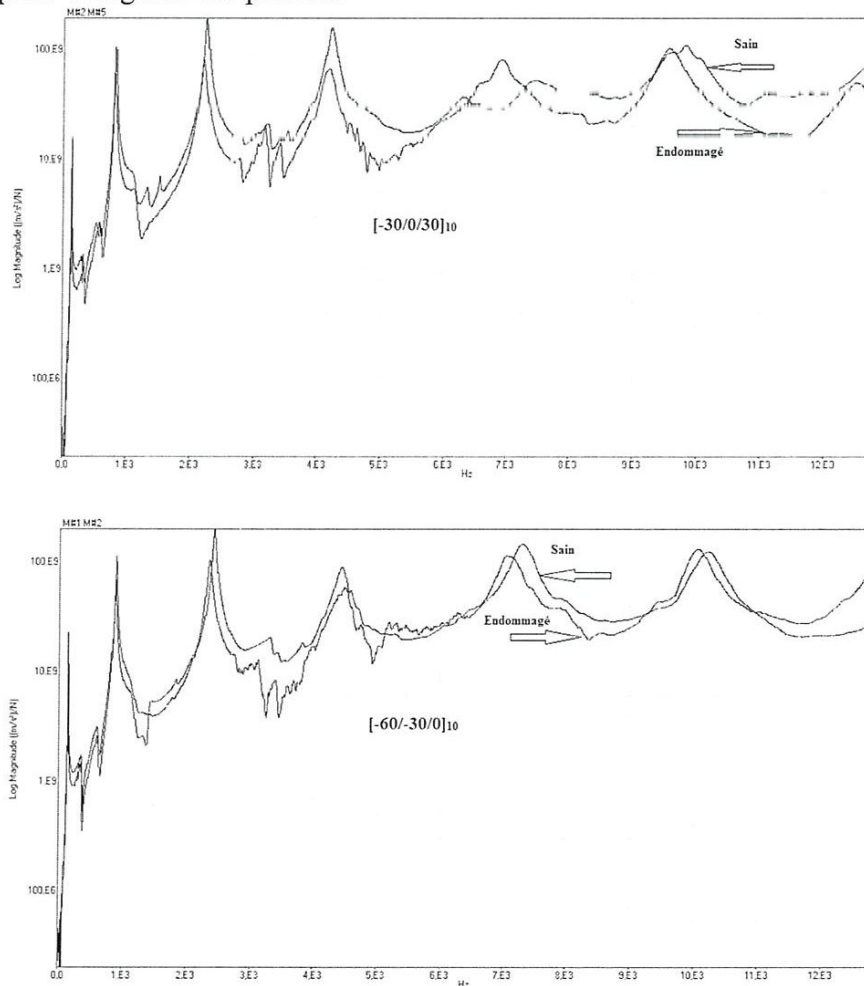


Figure 8. Réponses en fréquences des poutres saines et endommagés

Le décalage fréquentiel est plus important pour les modes de rang plus élevés tableau 4 et 5 est vari d'un matériau à l'autre, Ce phénomène peut être expliqué par la diminution de la rigidité en flexion du stratifiée considéré [6].

Tableau 4. Variation des fréquences propres matériau [-30/0/30]₁₀

Modes	[-30/0/30] ₁₀		
	Sain	Endommagé	Δf
Mode 1	128	127	1
Mode 2	825	816	9
Mode 3	2250	2200	50
Mode 4	4220	4160	60
Mode 5	7500	6920	580
Mode 6	9830	9560	270

Tableau 5. Variation des fréquences propres matériau [-60/-30/0]₁₀

Modes	[-60/-30/0] ₁₀		
	sain	Endommagé	Δf
Mode 1	140	137	3
Mode 2	894	881	13
Mode 3	2420	2350	70
Mode 4	4460	4450	10
Mode 5	7310	7060	250
Mode 6	10300	10100	200

Les courbes expérimentales réponses en fréquences font apparaître des pics correspondants aux fréquences de résonances des poutres. Nous constatons que lorsque le matériau est endommagé les pics de résonances se décalent vers les basses fréquences. L'endommagement du matériau diminue la rigidité en flexion et donc ses fréquences de résonance.

5. AMORTISSEMENT

5.1 LES DIFFERENTS TYPES D'AMORTISSEMENT :

Plusieurs types d'amortissement sont originellement présents dans un système mécanique. Si le niveau d'amortissement qui est disponible de cette manière n'est pas suffisant pour le bon fonctionnement du système, alors des dispositifs d'amortissement extérieurs peuvent être ajoutés lors de la conception initiale ou lors de la modification de la conception ultérieure du système. Les trois principaux mécanismes d'amortissement connus sont :

- L'amortissement interne (de matériel).
- L'amortissement structural (au niveau des joints et des interfaces).
- L'amortissement fluide (par interactions fluide-structure).

5.1.1 L'AMORTISSEMENT INTERNE :

L'amortissement interne des matériaux provient de la dissipation d'énergie associée à des défauts de microstructure, tels que les joints de grains et les impuretés; effets thermo élastiques causés par les gradients de température locaux résultant des contraintes non uniformes, comme dans une poutre vibrante, les effets des courants de Foucault dans les matériaux ferromagnétiques; mouvement des différents éléments constituant des métaux et le

mouvement de la chaîne dans les polymères. Plusieurs modèles ont été utilisés pour représenter la dissipation d'énergie causée par divers amortissements. Deux types généraux d'amortissements internes peuvent être identifiés: l'amortissement viscoélastiques et l'amortissement hystérétique.

5.1.2 L'AMORTISSEMENT STRUCTURAL :

L'amortissement structural est le résultat de la dissipation d'énergie mécanique par frottements dus aux mouvements entre les différentes composantes d'un système mécanique. Le comportement de dissipation d'énergie dépend des détails du système mécanique particulier. Par conséquent, il est extrêmement difficile d'élaborer un modèle généralisé d'analyse qui peut décrire d'une manière générale l'amortissement structural. La dissipation d'énergie causée par le frottement est généralement représentée par un modèle de frottement de Coulomb.

La dissipation d'énergie pendant un cycle de déformation du volume unitaire d'une éprouvette est donnée par

$$D = \oint \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

D : La dissipation d'énergie

$$\sigma_0 = E^*(\omega)\varepsilon_0 = (E'(\omega) + iE''(\omega))\varepsilon_0 \quad (2)$$

Module d'Young du matériau s'écrit

$$E^* = E' + iE'' \quad (3)$$

E^* : Module global

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega) \quad (4)$$

E' : Module réelle

$$E'(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos\delta \quad (5)$$

E'' : Module de perte

$$E''(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin\delta \quad (6)$$

Le facteur de perte $\tan\delta$ est le rapport élastique et de perte

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'} \quad (7)$$

Dans le cas de variation harmonique de σ et ε la relation unidirectionnelle (2) devient

$$\sigma = E'\varepsilon + \frac{E''}{|\omega|} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

D'après $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$ et (3) L'équation (1) devient

$$D = \pi\eta E' \varepsilon_0^2 \quad (9)$$

L'énergie maximum stockée $U = E' \varepsilon_0^2 / 2$ est une mesure importante des capacités d'amortissement du matériau

$$\eta = D / 2\pi U \quad (10)$$

5.1.3 L'AMORTISSEMENT PAR FLUIDES :

L'amortissement par fluide est généré par la traînée (résistance) visqueuse produite par les effets de l'interaction de la couche limite à l'interface fluide-structure, et par la traînée de pression produite par des effets de turbulence d'écoulement résultant au couplage de différents matériaux.

En résumé, l'amortissement interne (original dans le matériau) est le résultat de la dissipation de l'énergie mécanique dans le matériau en raison de divers processus microscopiques et macroscopiques. L'amortissement structural est causé par la dissipation de l'énergie mécanique obtenue à partir de mouvements relatifs entre les différents éléments dans une structure mécanique qui présente des points communs de contact, des joints ou des supports. L'amortissement fluide provient de la dissipation de l'énergie mécanique obtenue à partir des forces de traînée (résistance) et les interactions dynamiques associées quand le système mécanique ou l'une de ses composants se déplacer dans un fluide.

Deux grands types d'amortisseurs externes peuvent être ajoutés à un système mécanique dans le but d'améliorer ses caractéristiques de dissipation d'énergie. Ils sont les suivants:

- Les amortisseurs passifs : sont des dispositifs qui dissipent l'énergie par une sorte de mouvement, sans avoir besoin d'une alimentation externe.
- Les amortisseurs actifs : ont des motorisations qui ont besoin de sources externes d'énergie. Ils sont commandés de manière à contrôler le mouvement du système qui a besoin d'amortissement.

6. MESURE DE L'AMORTISSEMENT :

Certaines structures ont besoin de posséder suffisamment d'amortissement pour que leur réponse à des excitations internes soit contrôlée: par exemple, les machines-outils doivent avoir des amortissements adéquats pour que la réponse à des excitations internes qui se produisent lors de l'usinage soit amortie de sorte que l'outil de coupe génère un bon état de surface et précis pendant des vitesses de coupe élevées. D'autres structures telles que des cheminées et des ponts doit posséder aussi des amortissements pour que leur réponse à des excitations externes ne provoquent pas de contraintes dynamiques importantes susceptibles de provoquer une défaillance dans la structure. Les amortissements doivent être aussi considérés dans les automobiles, les bâtiments, les navires etc. pour que la transmission du bruit soit amortie.

L'amortissement peut être représenté par différents paramètres (tels que la capacité d'amortissement spécifique, facteur de perte, facteur Q, et le rapport d'amortissement) et des modèles (comme visqueux, hystérétique, structurel ou fluide). Il existe deux façons par lesquelles les mesures d'amortissement peuvent être formulées, l'utilisation d'un enregistrement du temps de réponse et en utilisant une fonction de réponse en fréquence du système pour estimer la mesure de l'amortissement.

6.1 METHODE DE DECREMENT LOGARITHMIQUE :

C'est peut-être la méthode de réponse temporelle la plus populaire qui est utilisée pour mesurer l'amortissement. Lorsque le système oscillant avec amortissement visqueux est excité par une excitation initiale, la réponse prend une forme décroissante dans le temps.

En physique, le terme décrement logarithmique désigne la mesure logarithmique de la décroissance périodique d'une grandeur pseudo-oscillatoire. Elle est définie comme le logarithme du rapport d'une grandeur à une date t sur la même grandeur à la date $(t + T)$, T représentant la pseudo-période de la grandeur. Le décrement logarithmique est donc une grandeur sans dimension

Soit une grandeur $x(t)$ quelconque dont l'évolution au cours du temps est donnée par :

$$x(t) = x_m \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) f(t) \quad (11)$$

Où T est la pseudo période du système. Si on appelle D le décrement logarithmique de x on a par définition :

$$D + \ln\left[\frac{x(t)}{x(t+T)}\right] = \ln\left[\frac{f(t)}{f(t+T)}\right] \quad (12)$$

Notamment si le régime est pseudo-oscillatoire, alors $f(t)$ peut se mettre sous la forme $f(t) = e^{-t/\tau}$ et on a :

$$D = \frac{T}{\tau} \quad (13)$$

Où τ est généralement appelé temps de relaxation ou constante de temps du système.

6.2 METHODE DE BOUCLE HYSTERESIS:

Pour un système amorti, le cycle de la force en fonction du déplacement produit un cycle d'hystérésis. En fonction des caractéristiques élastiques et inertielles du matériau et d'autres conditions, la forme de la boucle d'hystérésis change. Mais le travail effectué par

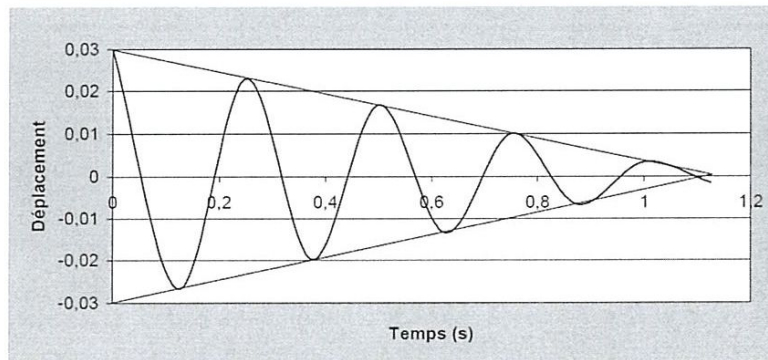


Figure 9. Amortissement hystérétique

L'enveloppe de la courbe temporelle en vibration libre est donc une droite. A chaque cycle la perte d'amplitude par amortissement hystérétique est donc de $1-\pi\eta$. Le facteur de perte, lorsque il est faible, peut être approximé d'après le décrement logarithmique, comme

$$\eta = \frac{1}{\pi n} \ln\left(\frac{x_i}{x_{i+n}}\right) \quad (14)$$

6.3 ÉVALUATION DE L'AMORTISSEMENT

L'évaluation de l'endommagement est réalisée à l'aide du logiciel ME'scopVES version 3.1, il utilise la méthode de la bande passante à - 3 dB où.

$$\frac{A_{max}}{\sqrt{2}} = -3\text{dB} \quad (15)$$

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (16)$$

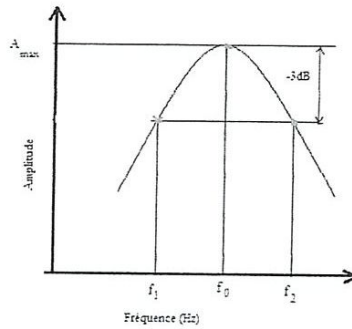


Figure 10. Méthode de la bande passante à-3dB

Les résultats sont présentés sur les figures 12 et 13 pour les matériaux sains.

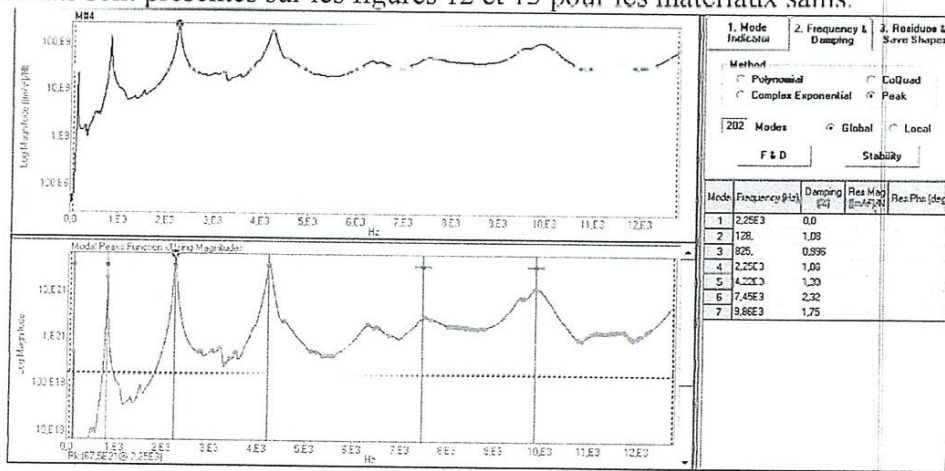


Figure 12. Amortissements du matériau [-30/0/30]₁₀

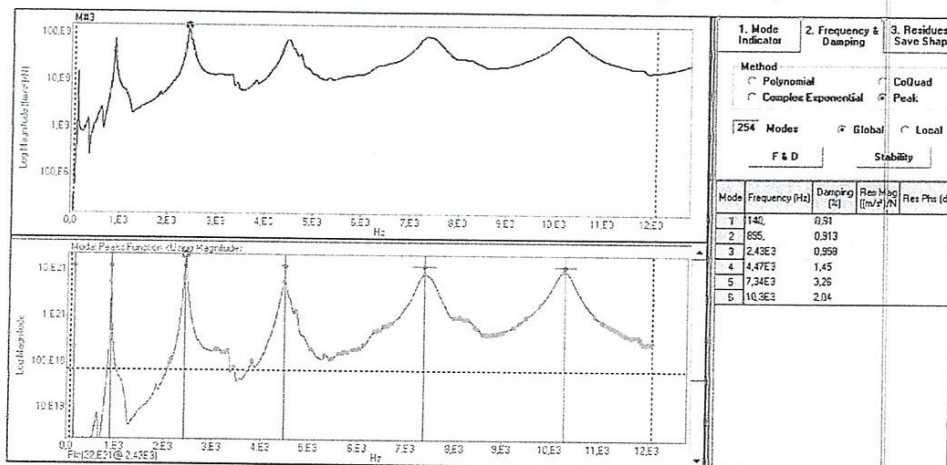


Figure 13 Amortissements du matériau [-60/-30/0]₁₀

De même Les résultats des matériaux endommagés sont représentés sur les figures 13 et 14.

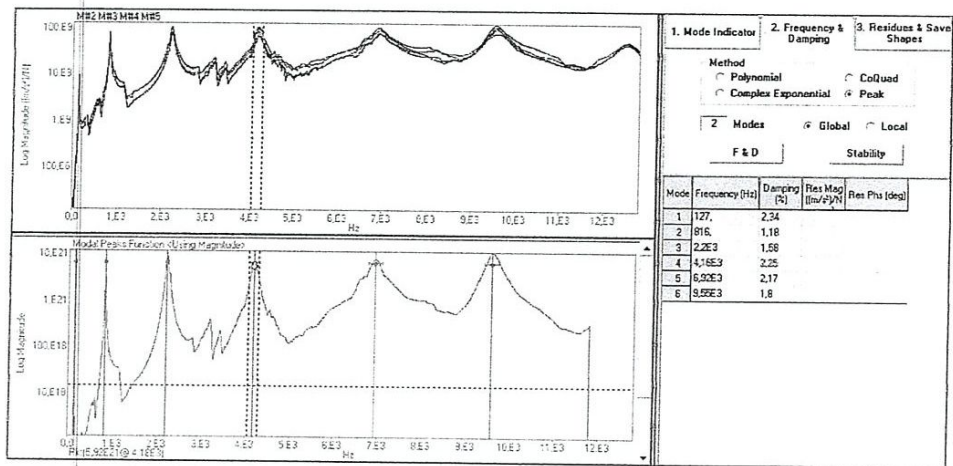


Figure 14. Amortissements du matériau endommagé [-30/0/30]₁₀

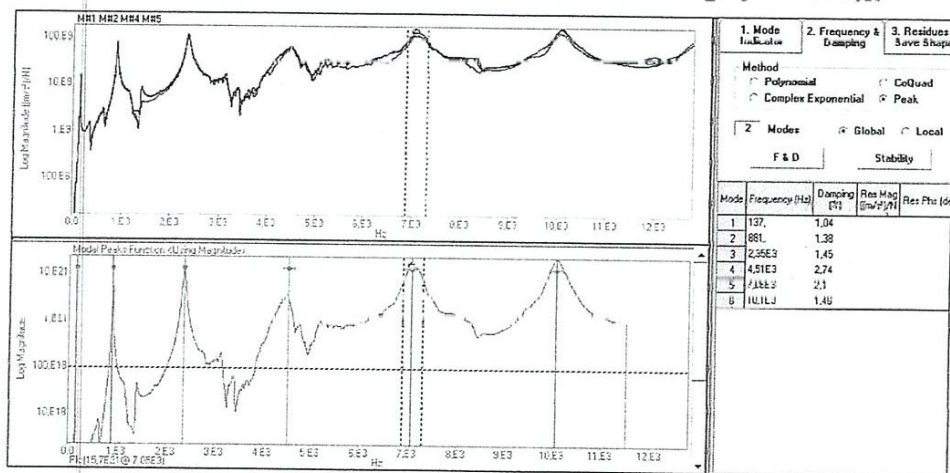


Figure 15. Amortissements du matériau endommagé [-60/-30/0]₁₀

Le dépouillement des courbes pour le même matériau sain et endommagé sont présentés sur le tableau 6.

Tableau 6 .Evolution de l'amortissement en fonction du dommage

Modes	[-30/0/30] ₁₀		[-60/-30/0] ₁₀	
	sain	Endommagé	sain	Endommagé
Mode 1	1.08	2.34	0.91	1.04
Mode 2	0.996	1.18	0.913	1.38
Mode 3	1.06	1.58	0.958	1.45
Mode 4	1.39	2.25	1.45	2.74
Mode 5	2.32	2.17	3.26	2.10
Mode 6	1.75	1.80	2.04	1.46

Les résultats obtenus font apparaître que l'amortissement des matériaux endommagé croit dans le cas général sauf pour le mode 5 pour les deux matériaux et le mode 6 pour [-60/-30/0]₁₀. Cette croissance est provoqué par la dissipation d'énergie associée aux défauts.

7. CONCLUSIONS

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de mettre en évidence les potentialités des méthodes d'évaluation non destructive en vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des composites stratifiés en service. Les courbes expérimentales réponses en fréquences font apparaître des pics correspondants aux fréquences de résonances des poutres. Nous constatons que l'effet de poids du capteur est plus remarquable sur les faibles fréquences alors que c'est la raideur la structure qui devient prépondérante pour les fréquences élevées, l'introduction d'un endommagement entraîne un décalage des pics de résonances vers les basses fréquences résultat de la perte de rigidité en flexion et une augmentation de l'amortissement. Cette étude a montré la possibilité d'utiliser les vibrations linéaires comme outil de contrôle de santé des matériaux composites en service.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Y. Sefrani, J-M Berthelot** “Effet de la température sur l’amortissement des matériaux composites unidirectionnels” 17ème Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes , France
- [2] **M. Assarar, A. El Mahi & J.-M. Berthelot,**“ Analyse de l’amortissement des composites sandwichs” JNC 16, 2009, Toulouse : France.
- [3] **J-M. Berthelot,** “Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz methode”, Composite Structures P186-200, 2005
- [4] **C. Kyriazogloua, B.H. Le Pageb, F.J. Guilda,**“Vibration damping for crack detection in composite laminates” Composites Part A: applied sciences and manufacturing,P 945 953, 2004
- [5] **B. Madi,** “suivi de l’endommagement des matériaux composites par vibrations linéaires”, mémoire de Master, juin 12, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [6] **M Kharoubi,** “étude du comportement mécanique de matériaux composites sous chargement cyclique et dynamique ” thèse de doctorat, 2009, Université 08 Mai 1945 Guelma.