

M/531.605

Université 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 : MADI BILAL

Option : Maintenance Industrielle

=====

SUIVI DE L'ENDOMMAGEMENT DES MATERIAUX
COMPOSITES PAR VIBRATIONS LINEAIRES

=====

Sous la Direction de :

Dr. KHAROUBI MOUNIR

Année universitaire 2011/2012

Table des matières

Chapitre 1 : Généralités et recherche bibliographique	
1. INTRODUCTION GENERALE.....	01
1.1. Définitions générales	01
1.2. Caractéristiques générales.....	01
1.3. Classification des matériaux composite.....	02
1.3.1. <i>Classification suivant la forme des constituants</i>	02
1.3.2. <i>Classification suivant la nature des constituants</i>	02
1.4. Mécanismes de rupture dans les matériaux composites.....	02
2. TRAVAUX DANS LE DOMAINE.....	03
3. PROBLEMATIQUE.....	13
Chapitre 2 : Partie expérimentale	
1. MATERIAUX ETUDIES.....	14
2. ESSAIS DE FLEXIONS 3 POINT STATIQUE.....	14
2.1 Préparation des éprouvettes.....	14
3. RESULTATS OBTENUS.....	15
4. ANALYSE DES RESULTATS.....	16
5. ANALYSE MODALE EXPERIMENTALE.....	17
5.1. Dispositifs d'essais.....	17
5.2. Méthodes d'analyse des résultats.....	18
5.3 Analyse du comportement vibratoire.....	19
6. CONCLUSIONS.....	23
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	24



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 Définitions Générales

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 [1].

1.2. Caractéristiques Générales

En général 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) [2].

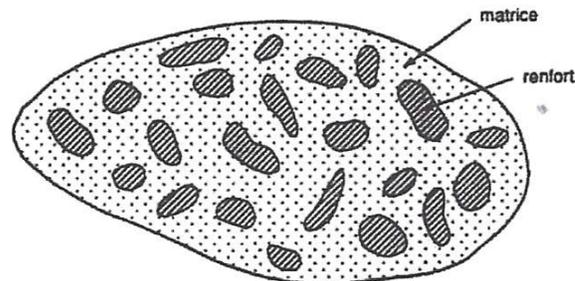


Figure 1: Matériau composite [2].

1.3. Classification des matériaux composites

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

1.3.1. 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 mécaniques des composites sont modifiable et modulable selon la variation de :

- La nature des constituants
- La proportion des constituants
- L'orientation des fibres

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

1.3.2. 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 parle 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 [3].

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

White C. et al. [4], ont étudiés la détection des dommages dans les matériaux en utilisant des techniques de réponse en fréquence pour le développement d'une technique de surveillance de santé structurale (SHM : Structural Health Monitoring) ; la technologie peut être appliquée à la réparation des composites collés, le collage est parfaitement adapté pour réparer les structures de matériaux composite. Les joints collés présentent une grande résistance à la fatigue, peuvent soutenir des charges plus grandes et sont plus légers que les interfaces mécaniques.

Malheureusement, ces avantages sont perdus lors de la recherche pour les dommages. En conséquence, l'assurance de la qualité est souvent réalisée grâce à une gestion rigoureuse du processus de collage. Néanmoins, il est difficile de prévoir les dommages, les auteurs mènent une étude sur l'évaluation de la réponse en fréquence pour la détection du décollement dans le domaine aérospatial. Deux différents types de régimes de réparation couramment utilisé pour les structures aérospatiales sont décrites. La première technique est la réparation doubleur externe et la deuxième est la réparation écharpe. Cette dernière technique est utilisé au affleurement de surface est nécessaire pour assurer l'aérodynamique et la furtivité. Des transducteurs piézoélectriques ont été utilisés pour exciter les structures et pour mesurer leur réponse aux vibrations, les spécimens testés ont été conçus pour être montés avec des boulons en un alliage rigide. Les boulons ont été sélectionnés plutôt que de rivets pour faciliter le montage et le démontage des spécimens provenant de la base ainsi permettant différentes conditions aux limites en modifiant le couple de serrage. Cinq essais à la fois sont réalisés sur les deux échantillons (endommagés et intacts) dans chaque réparation de configuration pour tester la répétabilité avec différentes conditions aux limites, les **tableaux 1 et 2** montrent les résultats obtenus dans chaque cas des réparations.

Les résultats pour la réparation doubleur externe sont représentés dans le **tableau 1** :

Tableau 1 Fréquences naturelles pour la réparation doubleur externe [4].

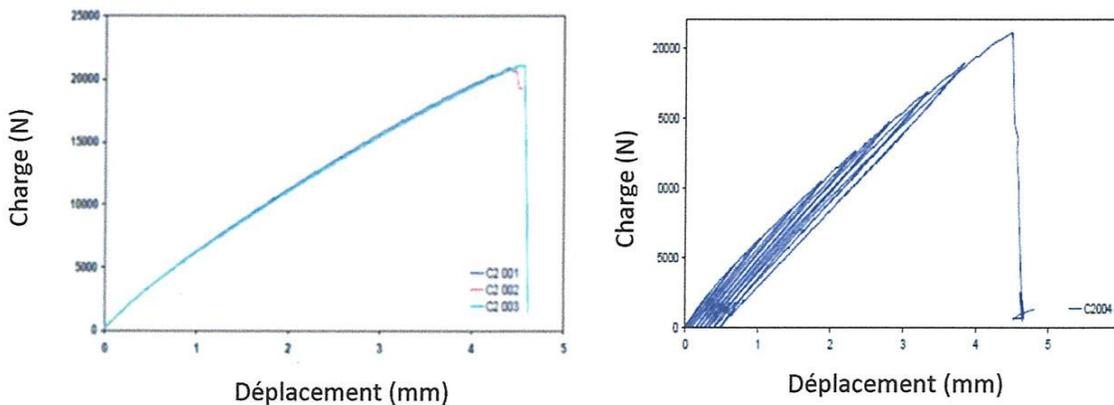
les conditions aux limites	Contrôle de la fréquence naturelle (Hz)	fréquences naturelles endommagées (Hz)	Réduction (Hz)
libre - libre	156	144	12 (7.7%)
	319	300	16 (6 %)
	506	494	12 (2.4%)
	763	719	44 (5.8%)
	956	925	31 (3.2%)
fixe - fixe	1025	988	37 (3.6%)
	1269	1213	56 (4.4%)

Les résultats pour réparation écharpe (Scarf repair) sont représentés dans le **tableau 2** :

Tableau 2 : Fréquences naturelles pour la réparation écharpe (Scarf repair) [4].

les conditions aux limites	Contrôle de la fréquence naturelle (Hz)	fréquences naturelles endommagées (Hz)	Réduction (Hz)
libre - libre	613	594	19 (3.1%)
	994	975	19 (1.9 %)
	1725	1594	131 (7.6%)
	2281	2144	137 (6%)
	4888	4844	44 (0.9%)
fixe - fixe	450	444	6 (1.6%)
	606	588	18 (3%)
	956	913	43 (4.5%)
	1894	1839	56 (3%)
	2000	1900	100 (5%)
	2388	2288	100 (4.2%)
	3263	3113	150 (4.6%)

Kharoubi M. et al. [5], ont mené une étude sur le Suivi de l'endommagement de composites stratifiés chargés par **émission acoustique** et par **analyse vibratoire**. Par la mise au point de démarches permettant de donner des indications précises sur le dommage des composites stratifiés. Les échantillons utilisés sont testés en traction statique et cyclique ; les éprouvettes subissent un chargement croissant par palier de 10 % de la charge statique à la rupture, pour chaque palier un déchargement est appliqué jusqu'à la valeur zéro, seul le dernier cycle est maintenu jusqu'à rupture. Les courbes de comportement mécanique en charge - décharge sont représentées sur la **figure 2**.



a) charge déplacement

b) charge - décharge déplacement

Figure 2 : Courbes de comportement en traction [5].

La technique d'émission acoustique a permis de détecter les endommagements, les résultats des deux cas sont indiqués dans les **tableaux 3 et 4**. Les données sont ensuite traitées à l'aide du logiciel NOESIS.

Tableau 3 : Correspondance des modes d'endommagement à la classification des signaux acoustiques, cas de la traction statique [5].

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 1	Classe 2	Classe 0
Nombre de coups cumulés	> 6 E+5	1,0 E+5	1,8 E+5
Log Energie (aJ)	1-900	100-5000	1000-50000
Amplitude (dB)	40-90	65-90	> 90

Tableau 4 : Correspondance des modes d'endommagement à la classification des signaux acoustiques, cas de la traction cyclique [5].

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 0	Classe 1
Nombre de coups cumulés	9,0 E+5	1,5 E+5	2,2 E+5
Log Energie (aJ)	1-1000	100-2000	1000-50 000
Amplitude (dB)	40-100	55-100	78-100

La deuxième démarche est une application des vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des composites stratifiés chargés. L'analyse expérimentale a été effectuée dans le cas de la flexion de poutres stratifiées, les poutres étant encastées à une extrémité et libre à l'autre. La **figure 3** donne un exemple de la transformée de Fourier de la réponse à une excitation impulsionnelle. Cette réponse fait apparaître les pics correspondant aux fréquences propres de vibration.

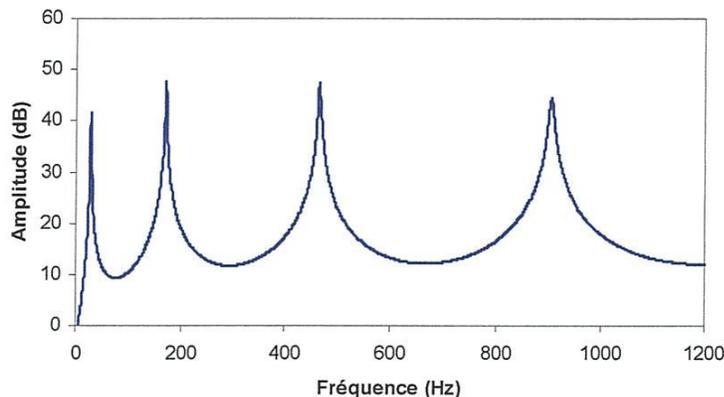


Figure 3: Exemple de réponse en fréquence, encastree - libre, excitée par impact [5].

La **figure 4** représente la réponse en vibration libre en fonction de la fréquence d'une poutre en composite stratifiée saine et endommagée sollicitée à différents niveaux de chargement. Les essais de vibration sont effectués en flexion sur des poutres stratifiées de longueurs 200 mm. Différents niveaux de chargement ont été étudiés : 20 (%), 40 (%), 60 (%) et 80 (%).

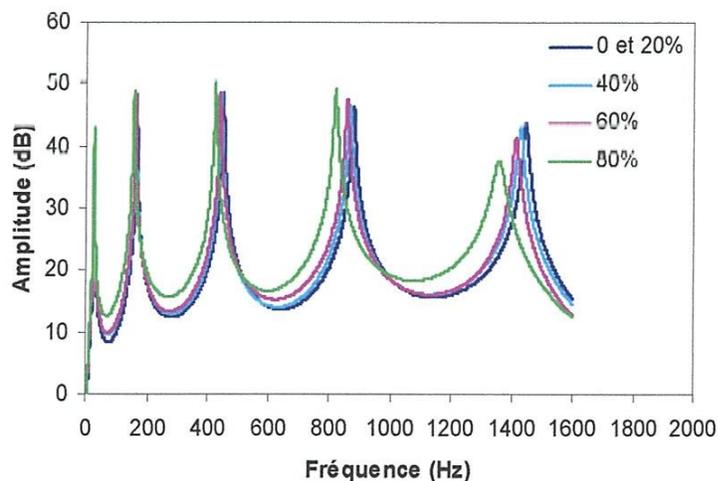


Figure 4 : Réponse en fréquence d'une poutre stratifiée pour différents niveaux de chargement [5].

Les courbes expérimentales font apparaître des pics correspondants aux fréquences de résonance de la poutre. Lorsque le niveau de chargement augmente, les pics de résonances se décalent vers les basses fréquences cela est due à la perte de rigidité de la poutre. Le décalage fréquentiel est plus important pour les modes de rang plus élevés, lié à la perte de rigidité plus importante sur ces derniers. La **figure 5** : réponse en fréquence pour le troisième mode illustre ce décalage.

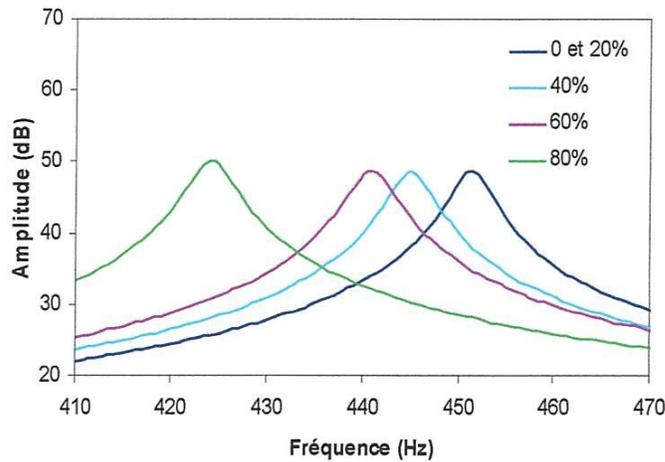


Figure 5 : Courbes de réponse en fréquence d'une poutre stratifiée au troisième mode [5].

Les fréquences propres déterminées pour différents niveaux de chargement sont reportées sur le **tableau 5** :

Tableau 5 : Variation des fréquences propres en fonction du niveau de chargement [5].

Niveau de charge (%)	0 (%)	20 (%)	40 (%)	60 (%)	80 (%)
Mode 1 (Hz)	28	28	27	27	26
Mode 2 (Hz)	165	165	163	162	155
Mode 3 (Hz)	451	451	445	443	424
Mode 4 (Hz)	880	880	868	860	822
Mode 5 (Hz)	1445	1445	1430	1415	1360

L'étude a démontré que les dommages affectent les valeurs des fréquences propres L'analyse de ces résultats montre que la fréquence diminue lorsque le niveau de chargement augmente. Ce décalage s'explique par le fait que la rigidité en flexion du stratifié diminue lorsque le niveau de chargement augmente

Ouahabi A. et al. [6], a étudié la détection de fissures de respiration de fatigue par excitation harmonique et analyse temps-fréquence. L'objectif de cette étude est de développer des techniques de surveillance efficaces pour détecter des dommages structuraux quand ils se produisent. De nombreuses études se sont basées sur le fait que les fréquences naturelles doivent baisser lorsque la structure présente un affaiblissement. L'approche modale ne fonctionne que lorsque la fissure reste ouverte, et le comportement vibratoire dans ce cas peut être considéré linéaire.

La première démarche consiste à appliqué des essais de compression et traction sur quatre poutre dont trois fissurées avec différentes profondeurs (10.4%, 13.6% et 14.4% de la hauteur de la poutre) et une poutre intacte. Pour chaque poutre, la rigidité a été mesurée statiquement dans les directions de traction et de compression en augmentant la charge ; la **figure 6** représente cette variation de la rigidité des poutres.

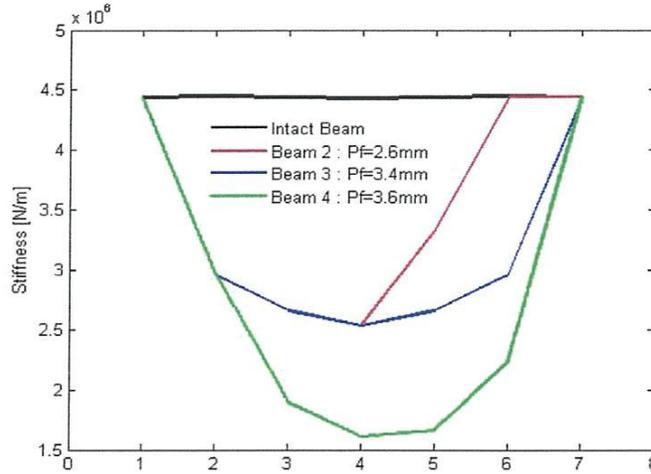


Figure 6 : Variation de la rigidité des poutres [6].

Puis des essais de fatigue ont été effectués sur trois poutres pour créer des fissures de fatigue ; la quatrième a été maintenue intacte. Les paramètres modaux ont été mesurés pour chaque poutre fissurée. La fissure de chaque poutre a été numériquement modélisée par la méthode des éléments finis en utilisant des éléments de contact et la figure 7 montre l'effet de la fissure (poutre 4 : 14.4%) sur les fréquences naturelles comparées avec celles de la poutre intacte

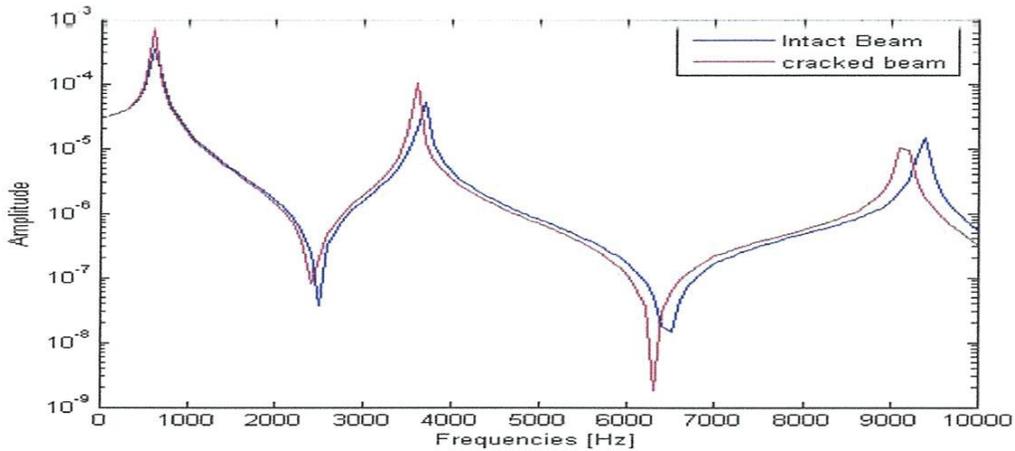


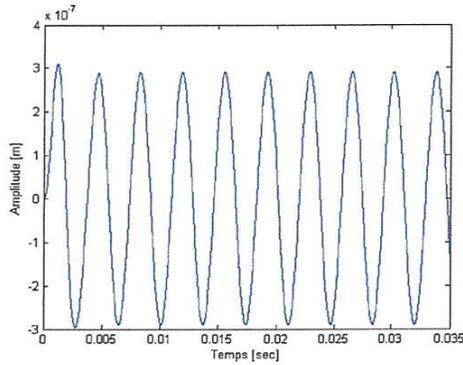
Figure 7 : Réponse harmonique de la poutre fissurée comparée à celle intacte [6].

La comparaison de ces fréquences naturelles numériques avec des mesures expérimentales montre une bonne concordance (tableau 6):

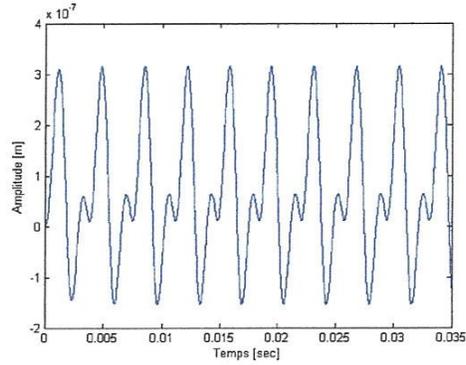
Tableau 6 : Fréquences naturelles expérimentales (Hz) [6].

Poutre intacte (0 mm)	Poutre 2 (2.60 mm) 10.4 (%)	Poutre 3 (3.40 mm) 13.6 (%)	Poutre 4 (3.60 mm) 14.4 (%)
594	578	569	541
3180	3100	3045	3020
8170	7940	7918	7910

La **figure 8** montre la différence de réponse en fréquence entre poutre intacte et poutre fissurée dans le domaine temporel



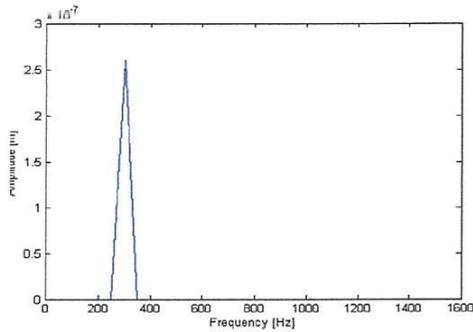
a) Poutre intacte



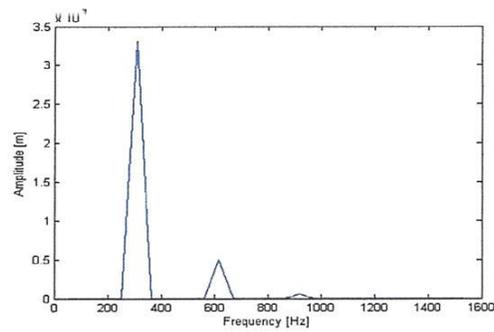
b) Poutre fissurée

Figure 8: Réponse temporelle de la poutre [6]

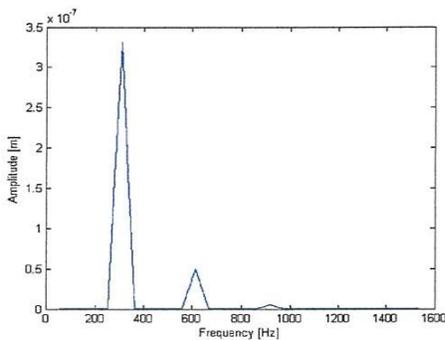
Ensuite, la réponse temporelle est converti en réponse fréquentielle par application de la transformée de Fourier (FFT : Fast Fourier Transformor). La **figure 9** montre les réponses fréquentielles des différentes poutres.



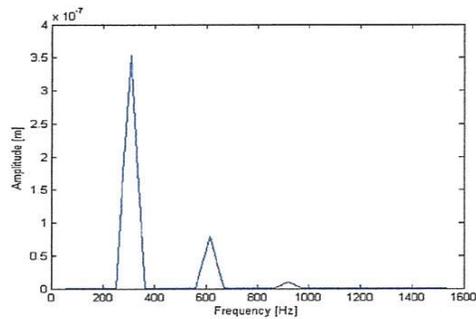
a) Poutre intacte



b) Poutre 2 (10.4%)



c) Poutre 3 (13.64%)



d) Poutre 4 (14.4%)

Figure 9 : Réponses fréquentielles des poutres [6].

Tandis que la deuxième démarche a été appliquée sur des plaques composites intactes et plaques délaminées. Les fréquences naturelles pour la plaque intacte ont été calculées à : 116.3 (Hz), 196.6 (Hz), 273.9 (Hz), 332.4 (Hz) et 342.4 (Hz). La **figure 10** montres la réponse temporelle de la plaque intacte et celle délaminée pour une excitation égale à la mi-fréquence de résonance.

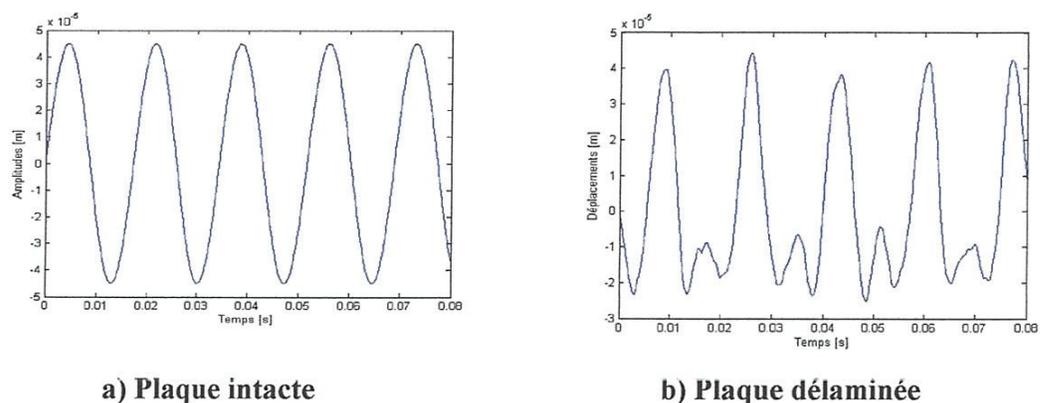


Figure 10 : Réponse temporelle de la plaque intacte et de la plaque délaminée pour une excitation égale à la mi-fréquence de résonance [6]

Elle est ensuite converti en domaine fréquentielle par application de la transformée de Fourier (FFT). Une analyse du spectre fréquentiel (**figure 11**) indique que la deuxième harmonique de la fréquence d'excitation est amplifiée due à sa coïncidence avec la fréquence naturelle. Cette présence des harmoniques avec des amplitudes élevées permet l'identification des dommages dans la plaque due à la non linéarité de la rigidité.

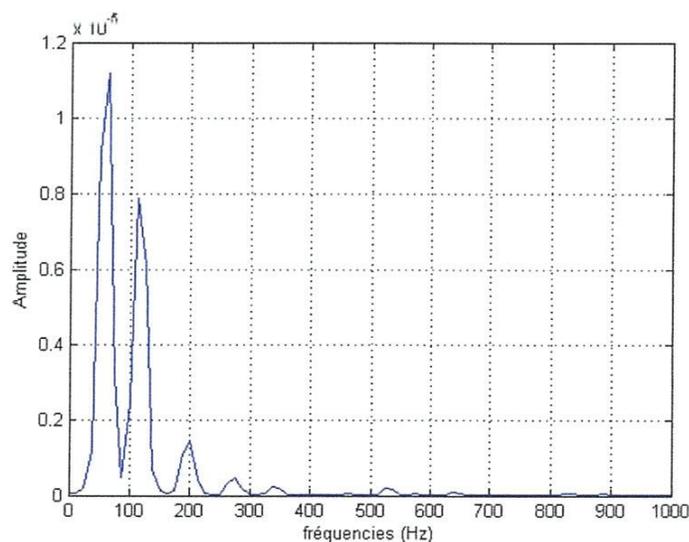
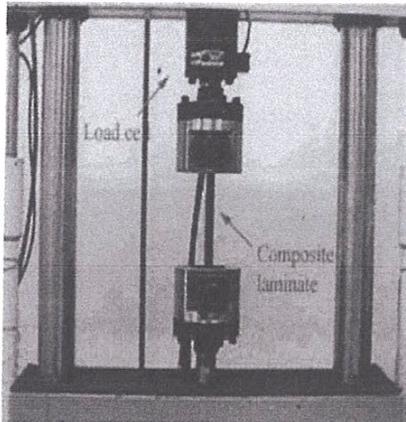


Figure 11 : Spectre fréquentiel de la plaque composite délaminée [6].

Kim H.-Y. [7], a essayé d'établir une méthode vibratoire pour l'identification des dommages des matériaux composites renforcés de fibres stratifiées et leur construction en sandwich. Cette méthode vibratoire connue sous le nom d'*identification des dommages structuraux par analyse vibratoire* repose sur l'exploitation des fonctions de réponse en fréquence (FRFs : Frequency Response Functions) d'une structure endommagée.

Afin de vérifier l'efficacité de la méthode vibratoire adoptée pour l'identification des dommages par analyse de la réponse fréquentielle obtenus, des essais de fatigue suivi d'une analyse vibratoire ont été réalisés sur des composites stratifiés et des poutres sandwich à nid d'abeille fabriqué en avance. Le dispositif expérimental comporte une machine de test de fatigue axial (**figure 12.a**). En premier lieu, les essais de fatigue ont été effectués pour déterminer les pertes de la rigidité des composites stratifiés sous chargement de fatigue. Ensuite, les essais de vibration (**figure 12.b**) ont été réalisés afin d'obtenir les fréquences naturelles des composites stratifiés en porte à faux sur des éprouvettes testées en fatigue.



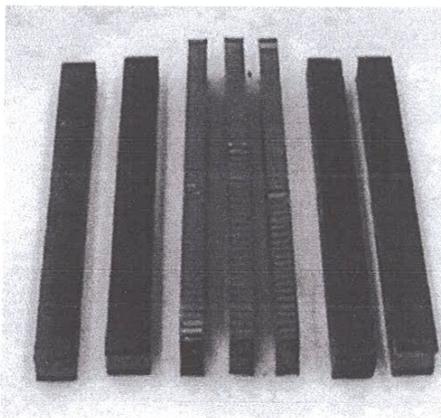
a) test de fatigue axial



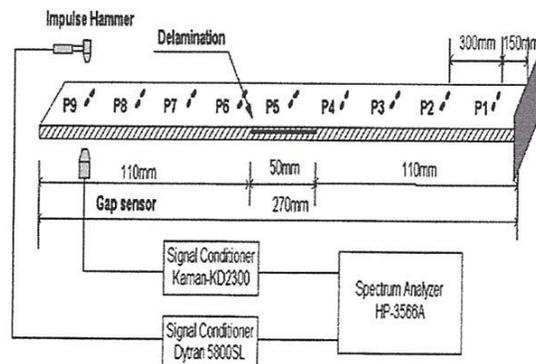
b) test de vibration

Figure 12 : Photos du dispositif expérimental [7].

La **figure 13.a** montre un ensemble de poutres sandwich à nid d'abeille utilisées comme éprouvettes d'essais pour la vérification expérimentale de la méthode d'identification des dommages par analyse vibratoire. Ces éprouvettes sont testées expérimentalement comme le montre la **figure 13.b** selon les conditions aux limites encastées - libre. L'essai consiste à exciter la poutre par un marteau de choc et l'analyse des différents spectres de la réponse en vibration de la poutre excitée en utilisant un analyseur de spectres relié avec un ordinateur après réception des données par l'intermédiaire d'un capteur (généralement un accéléromètre).



a) Poutres sandwich à nid d'abeille



(b) Experimental configuration

b) configuration expérimentale

Figure 13 : Photos des poutres sandwich à nid d'abeille et configuration expérimentale pour le test de vibration [7].

L'application de la méthode vibratoire (*on-line*) d'identification des dommages développés par H. - Y. Kim, en utilisant les **FRF** résiduelles (*la différence entre FRF intactes et FRF endommagées*) des structures endommagées fournit des informations précises et directes sur les dommages dans ces structures. Dans cette méthode, les FRF mesurées en fonction des quantités physiques telles que la perte de la rigidité due à la charge de fatigue ou du délaminage; leurs changements impliquent des changements détectables dans les modes et les propriétés des systèmes dynamiques.

Diaz Valdes et al. [8], ont étudiés l'effet du délaminage sur les fréquences modales des poutres composites stratifiées comme une première étape pour le développement d'un système de surveillance continu et fiable. Pour cela, ils ont utilisés une nouvelle méthode connue sous le nom de *spectroscopie de résonance ultrasonore*. Cette méthode a pour but d'étudier les spectres obtenus par résonance mécanique forcée d'échantillons à l'aide d'excitation de fréquence balayée.

L'idée d'utiliser les essais de vibration en tant que base pour la détection des dommages dans les stratifiés composites n'est pas nouvelle. Néanmoins, la plupart des travaux expérimentaux sur la détection des dommages en utilisant l'analyse des vibrations dans la littérature explorent habituellement le comportement dynamique des structures sur les modes de vibration associés à de faibles fréquences naturelles. Dans cet article, les fréquences de résonance sont déterminées en corrélant maximale la sortie du capteur à l'échelle de fréquence tout en balayant la gamme de fréquences d'intérêt, étant donné que l'amplitude maximale de vibration se produit à la résonance. Puis le spectre de résonance de l'échantillon est analysé pour déduire la présence d'endommagement en le comparant au spectre de référence de la structure intacte. Le nombre de pics dans une bande de fréquences, leur position, et leur forme ont été utilisés comme critères de détection de défaut. La variation de la fréquence a été obtenue en utilisant la technique de balayage de fréquence rapide, un signal sinusoïdal avec une variation linéaire de la fréquence avec le temps a été utilisé

Afin de réaliser leur idée, ils ont utilisé un dispositif expérimental composé d'une poutre stratifiée encastré-libre. Deux éléments piézo-électriques collés aux surfaces supérieure et inférieure de la poutre sont exploités comme actionneur et capteur, respectivement connectés à un système d'excitation, de réception et d'amplification (**figure 14**).

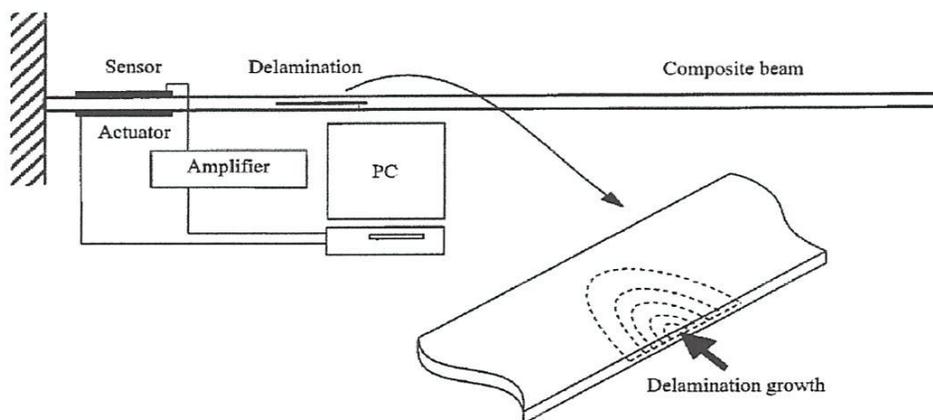


Figure 14 : Dispositif expérimental [8].

La **figure 15** montre la progression de la zone endommagée mesurée par *ultrasons C-scans*.

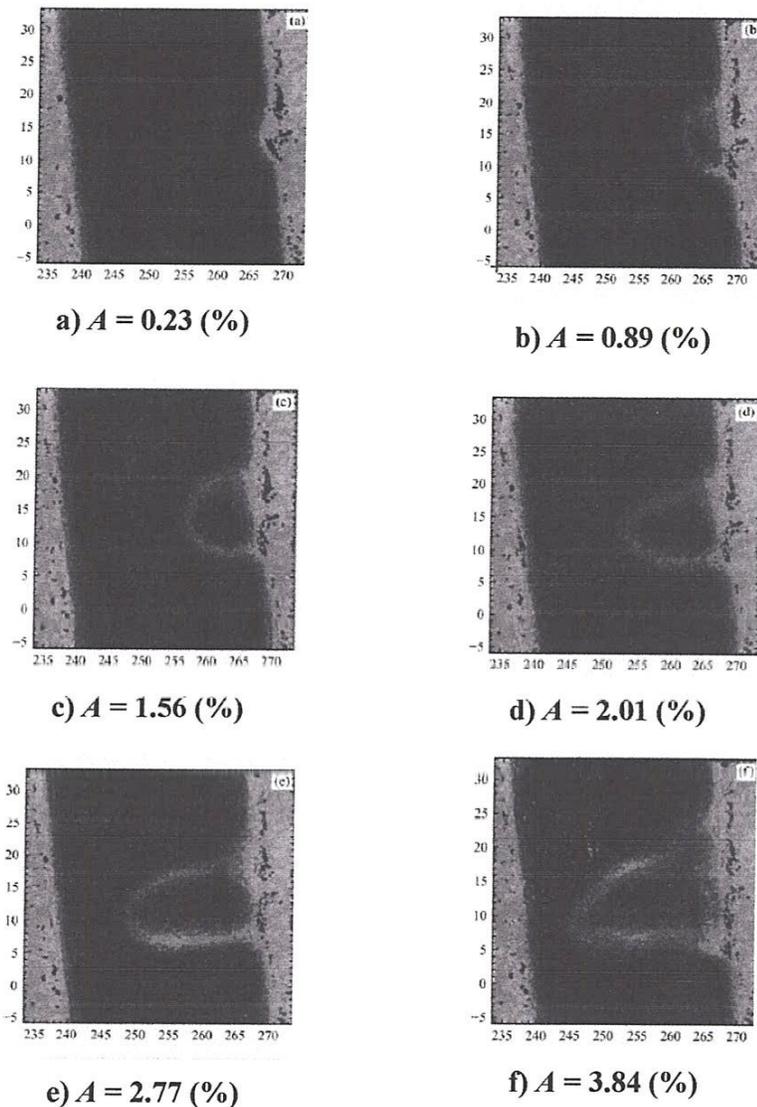


Figure 15 : délaminage à différents stages d'endommagement (% A_{tot}) [8].

La procédure d'inspection dans le domaine temporel a démontré l'efficacité de la méthode utilisée pour les mesures de fréquence modale. Cette technique utilise la fréquence comme un paramètre connu à laquelle la réponse du capteur (tension) est liée, elle simplifie le traitement et l'analyse du signal et élimine les problèmes de fréquence généralement rencontrés dans le traitement du signal avec des mesures de réponse en fréquence de la fonction.

3. PROBLEMATIQUE

Face à l'utilisation accrue des matériaux composites, il est indispensable de définir des indicateurs sensibles à la présence de l'endommagement afin de prévenir leurs ruines par une méthode d'évaluation par vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement de composites stratifiés chargés.

Les éprouvettes saines sont testés en vibrations linéaires puis endommagées mécaniquement sous sollicitations mécaniques en flexion 3 points statiques par paliers.

1. MATERIAUX ETUDIÉS

Les matériaux 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 1 : Matériaux étudiés.

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

2. ESSAIS DE FLEXION 3 POINTS STATIQUE

2.1 Préparation des éprouvettes

Des éprouvettes parallélépipédiques figure 1 ont été découpées à l'aide d'une tronçonneuse disque diamanté à partir de plaques de 300 x 300 mm² de dimensions, $L = 20h$, $l = 16h$ et $b = 15$ mm selon la norme AFNOR NF T 57-105, où L , l , b et h sont respectivement la longueur totale, la longueur entre appuis, la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette. Le tableau résume les épaisseurs des éprouvettes utilisées.

Tableau 2: Epaisseurs des éprouvettes utilisées

Eprouvettes	h [mm] ; U ; [(0)] ₈	h [mm] ; C2 ; [(0/90) ₂] _s
1	2.36	2.43
2	2.40	2.38
3	2.36	2.38
4	2.31	2.35

La figure 1 représente le principe d'essai : l'éprouvette est posée sur deux tiges cylindriques de cinq millimètres de rayon de panne inférieure, la charge est appliquée au milieu l'éprouvette à l'aide de la panne supérieure

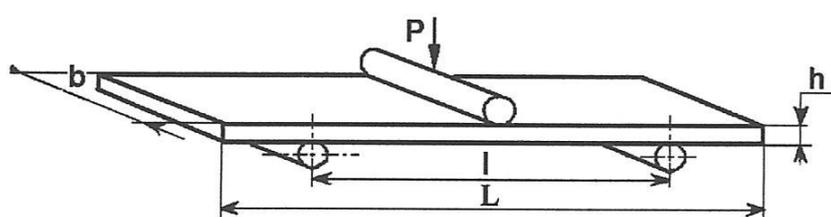


Figure 1: Forme et dimensions des éprouvettes de flexion 3 points statique

3 .RESULTATS OBTENUS

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

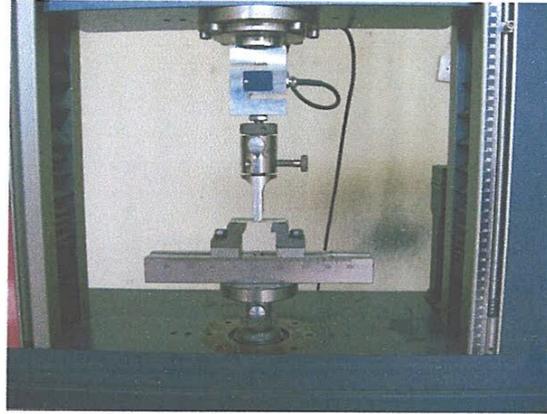
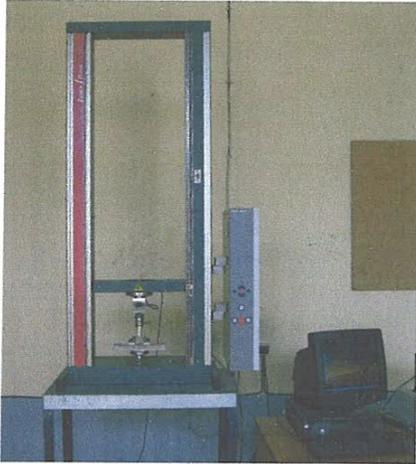


Figure 2 : Machine d'essai

Les courbes de comportement mécanique charge-déplacement obtenues en flexion 3 points statique pour les deux types de matériaux sont représentées sur les figures 3 et 4

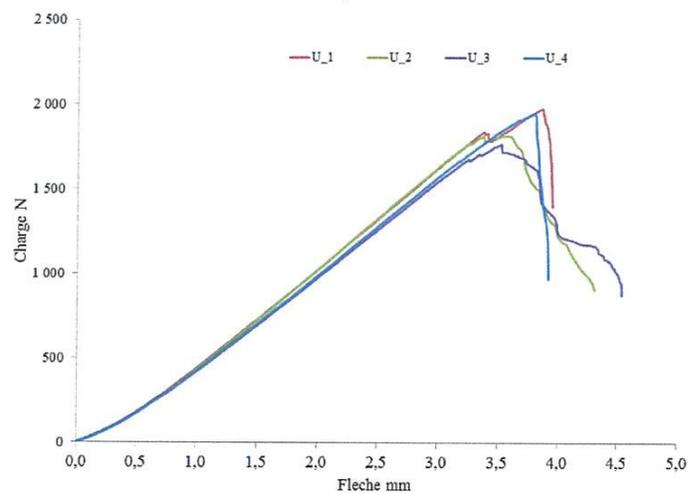


Figure 3 : courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique ; Matériau U

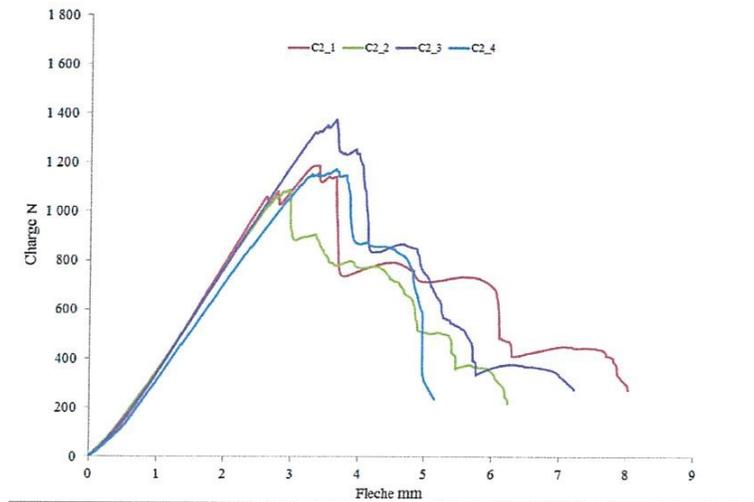


Figure 4 : courbes de comportement expérimental charge-déplacement en flexion 3 points statique, Matériau C2

4. ANALYSE DES RESULTATS

Le calcul des caractéristiques mécaniques en flexion 3 points statiques est basé sur les relations (1) pour les contraintes de flexion σ_f et (2) pour les valeurs du module de Young en flexion E_f .

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

Ou :

F : est la charge en newtons [N]

L : est la portée en millimètres [mm]

b : est la largeur en millimètres de l'éprouvette

h : est l'épaisseur en millimètres de l'éprouvette

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (2)$$

σ_{f2} et σ_{f1} : contraintes de flexion mesurées aux flèches s_2 et s_1 ,

ε_{f2} et ε_{f1} : respectivement les déformations en flexion à 0.0025 et 0.005 correspondant au flèches s_2 et s_1 tel que.

$$S_i = \frac{\varepsilon_{fi} l^2}{6h} ; (i=1 ; 2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{fi} = \frac{6hS_i}{l^2} \quad (4)$$

Les modules d'élasticités calculés en flexion et les charges maximales en flexion sont reportés sur le tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés

	Matériaux C2 ;[(0/90)2]s				Matériaux U ;[(0)]s			
	F _{max} [N]	F _{moy} [N]	E _f [MPa]	E _{f,moy} [MPa]	F _{max} [N]	F _{moy} [N]	E _f [MPa]	E _{f,moy} [MPa]
1	1187.3	1205.03	11398.13	12351.51	1979.80	1879	15528.52	15310.5
2	1090.51		13760.78		1817.83		15407.11	
3	1373,56		13321.23		1768.91		15839.29	
4	1172.34		10925,918		1949.48		14467.08	

5. ANALYSE MODALE EXPERIMENTALE

5.1 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 5 montre le dispositif expérimental utilisé pour l'étude de vibrations des poutres en configuration appuie- appuie. 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 d'un accéléromètre Bruel & Kjaer de 2.4 gramme de type 4393. 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.

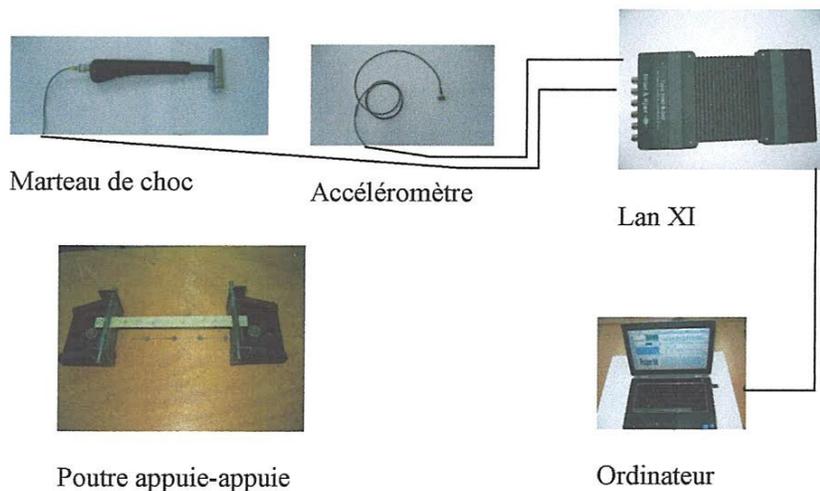


Figure 5 : Dispositif expérimental cas d'une excitation par impact

5.2 Méthodes d'analyse des résultats

L'analyse expérimentale a été effectuée dans le cas de la flexion de poutres stratifiées, les poutres étant appuie-appuie. Elles sont graduées afin de repérer la coordonnée de l'impact et celle du point de mesure figure 6. 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.

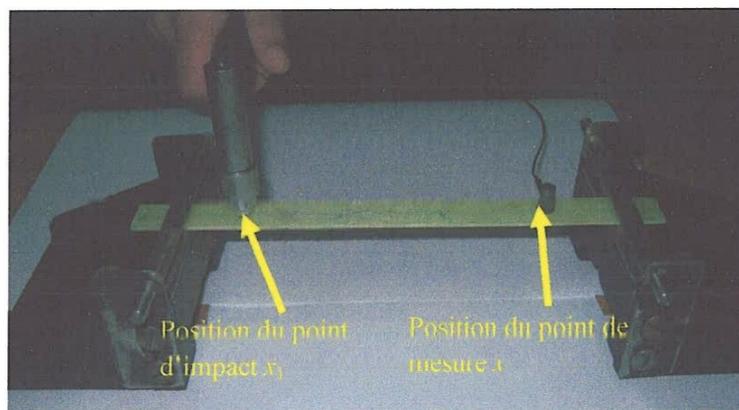


Figure 6 : Points d'impact et de mesure sur une poutre.

La figure 7 donne un exemple de la réponse à une excitation impulsionnelle. Cette réponse fait apparaître les pics correspondant aux fréquences propres de vibration.

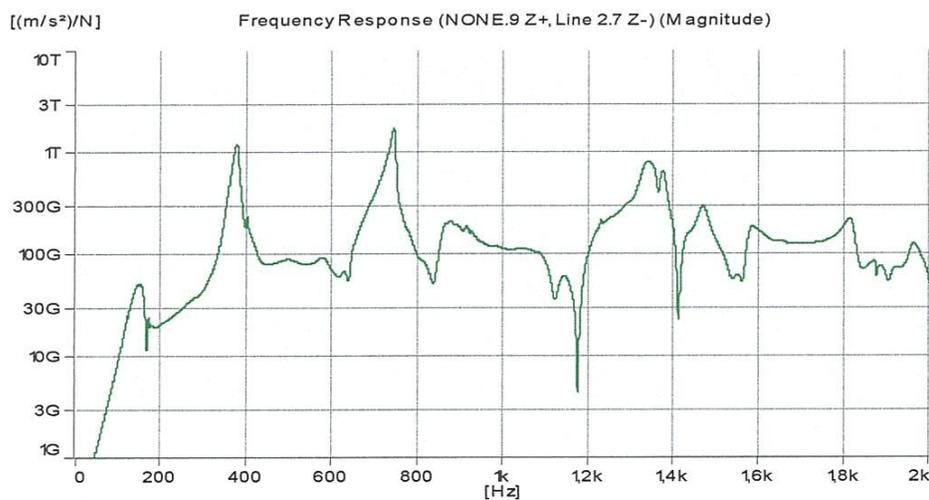
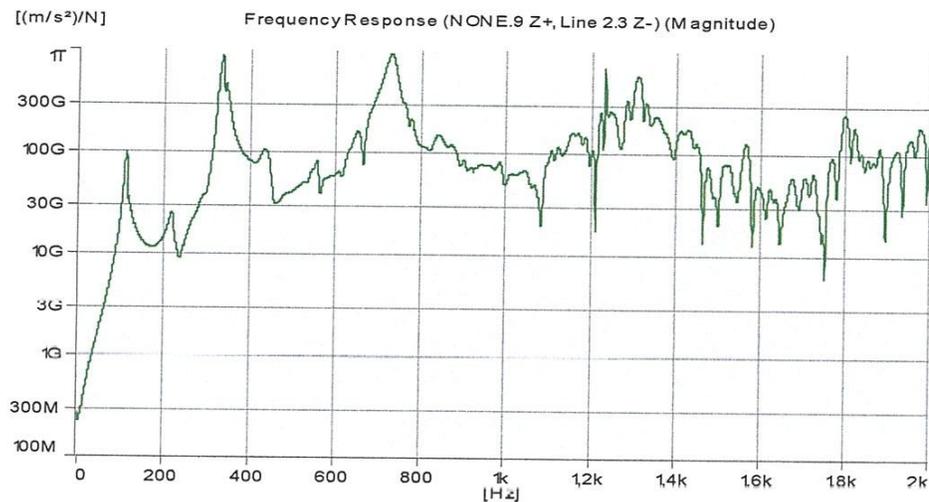


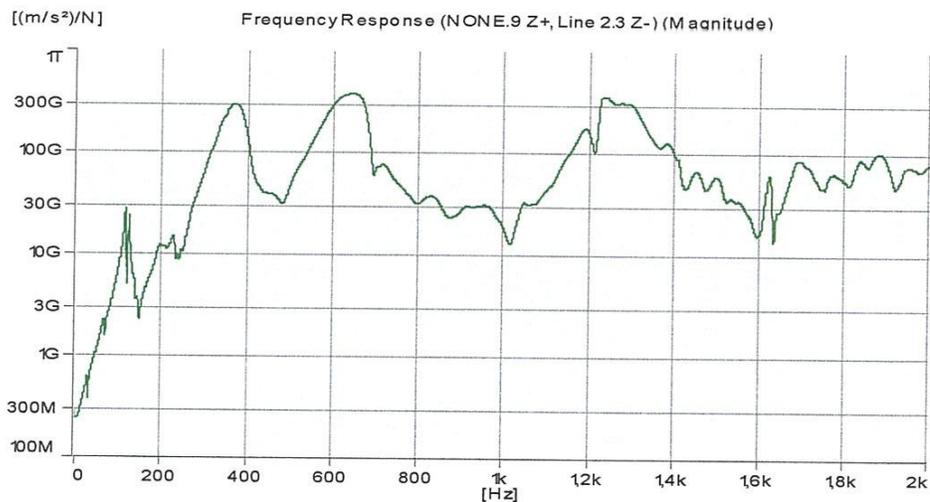
Figure 7 : Exemple de réponse en fréquence, appuie - appuie, excitée par impact

5.3 Analyse du comportement vibratoire

Les essais de vibration sont effectués en flexion sur des poutres stratifiées de longueurs 215 mm. La figure 8 ; 9 et 10 représentent la réponse en vibration libre en fonction de la fréquence des poutres en composite stratifiées saines et endommagées. Les courbes expérimentales font apparaître des pics correspondant aux fréquences de résonance de la poutre. Nous observons un décalage vers les basses fréquences pour les poutres endommagées cela est due à la perte de rigidité de la poutre.

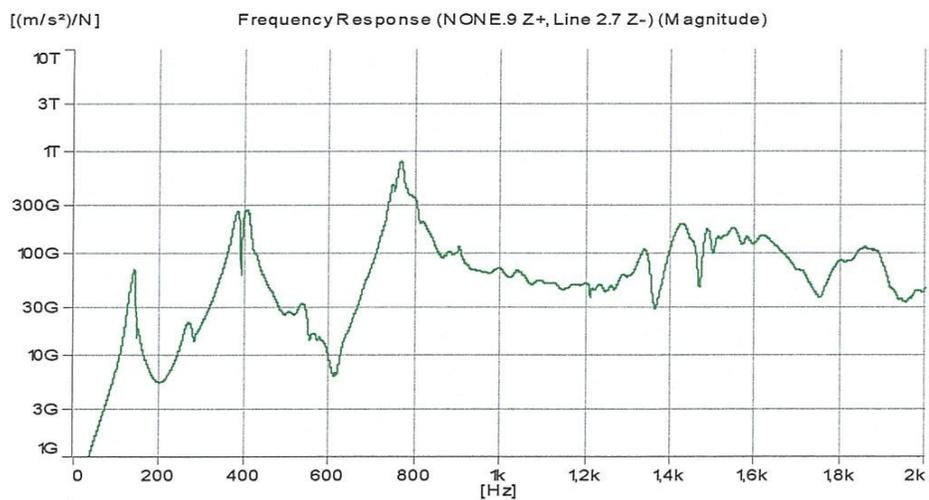


a) Eprouvette U_7



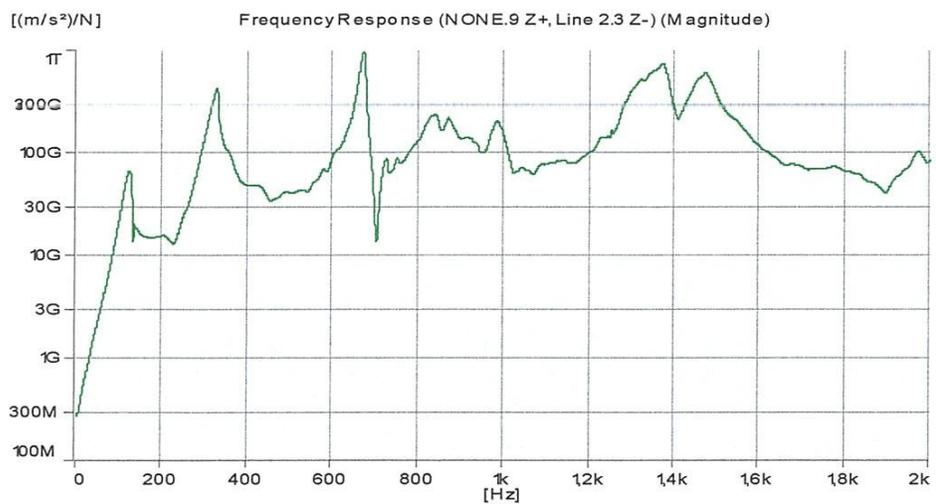
b) Eprouvette U_8

Chapitre 2 : Partie expérimentale

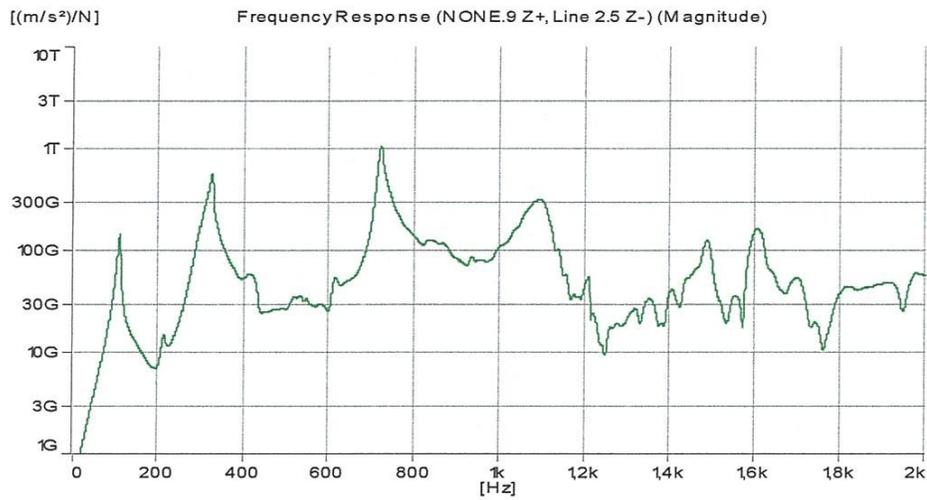


C) Eprouvette U_9

Figure 8 : Réponse en fréquence, appuie – appuie, matériau U

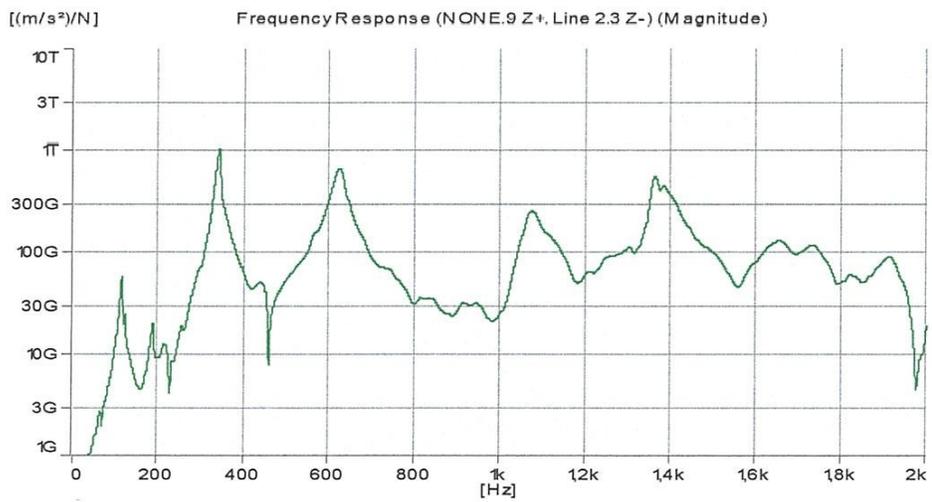


a) Eprouvette C2_9

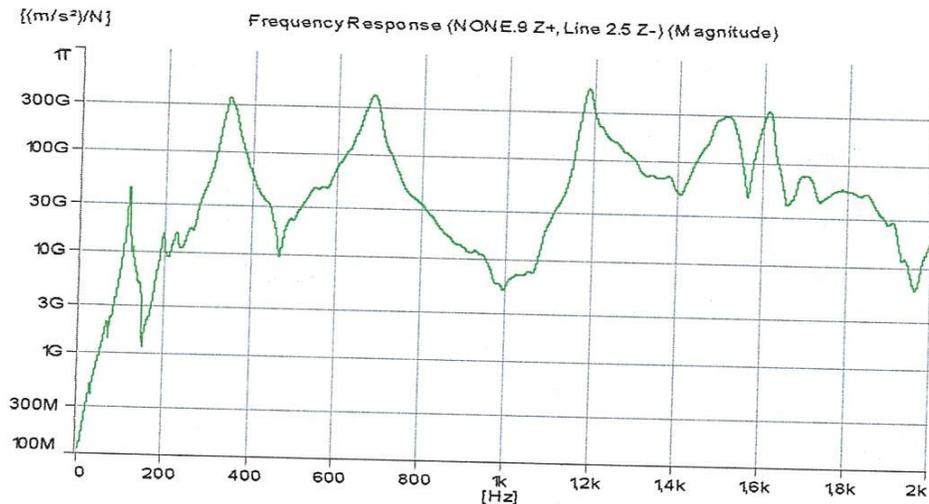


b) Epreuve C2_10

Figure 9 : Réponse en fréquence, appuie – appuie, matériau C2



a) Epreuve C2_9 endommagé



b) Epreuve U_7 endommagé

Figure 10 : Courbes de réponse en fréquence pour les deux matériaux endommagés

Les tableaux 4 et 5 et 6 montrent les fréquences propres déterminées pour les premiers modes pour les matériaux sains et endommagés.

Les fréquences propres déterminées pour les deux matériaux sains sont reportées sur les tableaux 4 et 5. On a observé une certaine dispersion des résultats; qui est 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.

Pour le matériau U en mode 1 la fréquence de résonance varie de 108 à 138 Hz ; en mode 2 la fréquence passe 333 à 405 Hz ; en mode 3 elle est comprise entre 641 et 767 Hz, pour le mode 4 entre 1232 et 1424 Hz et enfin la fréquence du mode 5 passe de 1562 à 1699 Hz;

Tableau 4 : Variation des fréquences propres Matériaux U

Mode	Epreuve U_7	Epreuve U_8	Epreuve U_9	Moyenne
Mode 1(Hz)	108.1	115	138.8	120,64
Mode 2 (Hz)	333.8	368.1	405	368,97
Mode 3 (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

Pour le matériau C2 en mode 1 la fréquence de résonance varie de 98 à 121 Hz ; en mode 2 et 3 la fréquence et respectivement de l'ordre de 327 et 637 Hz ; en mode 4 elle est comprise entre 985 et 1125 Hz et la fréquence du mode 5 est de 1369 Hz.

Tableau 5 : Variation des fréquences propres Matériaux C2

Mode	Eprouvette C2_9	Eprouvette C2_10	Moyenne
Mode 1(Hz)	121.9	98.75	110,325
Mode 2(Hz)	327.5	326.9	327,2
Mode 3(Hz)	673.1	672.5	672,8
Mode 4(Hz)	985	1125	1055
Mode 5(Hz)	1369	---	

Sur le tableau 6 nous présentons les résultats de deux poutres qui ont été endommagé par flexion, puis teste en vibration. Les valeurs des fréquences de résonances des poutres endommagé diminués par rapport celles des poutres saines. Il ressort de ces résultats que l'endommagement entraîne une diminution de la fréquence de chaque mode [02]. Ce décalage s'explique par le fait que les rigidités en flexion des stratifiés endommagées diminuent.

Tableau 6 : Variation des fréquences propres les matériaux U ; C2 Endommagés

Mode	Eprouvette U_7 Endommagé	Eprouvette C2_9 Endommagé
Mode 1(Hz)	113.1	115
Mode 2(Hz)	343.1	341.3
Mode 3(Hz)	681	622.5
Mode 4(Hz)	1189	1073
Mode 5(Hz)	1608	1362

6. CONCLUSIONS

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de mettre en évidence les potentialités des méthodes d'évaluation non destructives en vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des composites stratifiés en service. Nous avons observé une certaine dispersion des résultats dû au mode de fabrication des matériaux composites et aux conditions d'essai appuie- appuie. Les courbes expérimentales réponses en fréquences font apparaître des pics correspondants aux fréquences de résonances des poutres. Nous constatons que l'introduction d'un endommagement entraîne un décalage des pics de résonances vers les basses fréquences résultat de la perte de rigidité en flexion. 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] **F. Bourouis**, étude du comportement mécanique de structures sandwiches a différents matériaux de revêtements. Mémoire de magister, Université Mentouri–Constantine-Algérie, 2003.
- [2] **M. Kharoubi**, Contribution à l'étude expérimentale et numérique de stratifiés croisés a renfort unidirectionnel. Mémoire de magister, université de Guelma Algérie, 2002
- [3] **Jean-Marie Berthelot**, dynamics of Composite Materials and Structures New York, in 1999 page 224.
- [4] **C. White, H. C.H. Li a, B. Whittingham, I. Herszberg et A. P. Mouritz**, Damage detection in repairs using frequency response techniques. Composite Structures, 87 175–181, 2009.
- [5] **M. Kharoubi, L. Fatmi, A. El Mahi et N. Ouclou**, Suivi de l'endommagement de composites stratifiés chargés par émission acoustique et par analyse vibratoire. Congrès Algérien de Mécanique 14-17 novembre 2011, Guelma - Algérie
- [6] **A. Ouahabi, M. Thomas et A. A. Lakis**, Détection de fissures de respiration de fatigue par excitation harmonique et analyse temps-fréquence. Proceeding of the 24 Seminar on Machinery Vibration, Canadian Machinery Vibration Association, ISBN 2-921145-61-8, Montreal, Paper B8, pp 460- 472, 2006.
- [7] **H.-Y. Kim**, Vibration-based damage identification using reconstructed FRFS in composite structures. Journal of Sound and Vibration, 259(5), 1131–1146, 2003.
- [8] **S. H. DIAZ VALDES et C. SOUTIS**, Delamination detection in composite laminates from variation of their modal characteristics. Journal of sound and vibration, 228 (1) pp1-9, 1999.