

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE 08 MAI 45 GUELMA
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

THESE DE DOCTORAT

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat



Spécialité : **Mécanique**

Par

KHAROUBI Mounir

Thème

**ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE
DE MATERIAUX COMPOSITES SOUS
CHARGEMENT CYCLIQUE ET DYNAMIQUE**

Présenté devant le jury

Président :	Chaoui Kamel	Pr. Université d'Annaba
Rapporteur :	Fatmi Louendi	Pr. Université de Guelma
Co-Rapporteur :	El Mahi Abderrahim	Pr. Université du Maine
Examineurs :	Tebbikh Hicham	Pr. Université de Guelma
Examineurs :	Ouelaa Nouredine	Pr. Université de Guelma
Examineurs :	Amrane Mohamed Nadir	M.C Université de Biskra

Octobre 2009

**UNIVERSITÉ 08 MAI 45 GUELMA
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : **Mécanique**

Thème

**ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE
DE MATÉRIAUX COMPOSITES SOUS
CHARGEMENT CYCLIQUE ET DYNAMIQUE**

Par :

KHAROUBI Mounir

Directeur de Thèse : **Pr. Fatmi Louendi**
Co- Directeur de Thèse **Pr. El Mahi Abderrahim**



Laboratoire de **Mécanique** et **Structures** de l'Université de Guelma,
Algérie



Laboratoire d'Acoustique de l'Université du **Maine**, Le Mans, France

Remerciements

Ce travail a été réalisé en alternance au **Laboratoire de Mécanique et Structures** du Département de Génie Mécanique de l'Université de Guelma, Algérie et le **Laboratoire d'Acoustique** de l'Université du **Maine**, Le Mans, France.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon Directeur de Thèse **Pr. L. FATMI** pour ses conseils précieux et sa patience pour l'élaboration et la finalisation de ce travail.

Je remercie également mon Co-Directeur de Thèse **Pr. A. EL MAHI** pour m'avoir accueillie dans son laboratoire LAUM et pour sa collaboration efficace tout le long de mon stage.

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma sympathie aux membres du jury : **Pr. K. CHAOUI**, **Pr. H. TEBBIKH**, **Pr. N. OUALAA** et **Dr. M. N. AMRANE** qui ont bien voulu examiner le contenu de cette Thèse.

Mes remerciements s'adressent au **Dr. M. A. YALLESE**, Chef de Département de Génie Mécanique ainsi qu'au Directeur du Laboratoire de Mécanique et Structures **Pr. N. OUELAA** sans oublier le personnel du département de Génie Mécanique.

Je remercie Messieurs **M. ASSARAR**, **R. BERBAOUI** et **M. BENTAHAR** pour l'aide qu'ils m'ont apporté lors de mon séjour en France.

Je remercie également **Pr. Y AUREGAN**, Directeur du LAUM pour m'avoir accueillie au sein de son Laboratoire et **Pr. R. EL GUERJOURA** pour l'aide et l'intérêt qu'il a apporté à ce travail, sans oublier le personnel du LAUM ayant participé de près ou de loin à faciliter mon séjour à l'Université du Maine.

J'exprime mes remerciements aussi au Chef de Département de Génie Mécanique et Productique monsieur **Y. CARBONNEL** de l'IUT du Mans, France pour les facilités qu'il m'a apportés, sans oublier les techniciens de l'IUT.

Je ne voudrai pas oublier de remercier **Dr. S. BENMEDAKHANE** du Laboratoire Roberval de Polymères et Composites de l'Université de Technologie de Compiègne, France.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail de Thèse de Doctorat.

Table des matières

Introduction générale	8
Chapitre 1: Comportements mécanique des stratifiés composites sous chargement statique et cyclique	
1.1 Introduction.....	10
1.2 Les matériaux composites.....	10
1.2.1 Classification des matériaux composites.....	10
1.2.2 Eléments constituant un matériau composite.....	10
1.2.2.1 Les résines.....	10
1.2.2.2 Les fibres et les tissus.....	11
1.2.2.3 Les principales fibres.....	12
1.2.3 Mécanismes d'endommagements.....	13
1.2.3.1 Fissuration matricielle.....	14
1.2.3.2 Rupture de fibres.....	14
1.2.3.3 Décohésion fibre-matrice.....	14
1.2.3.4 Délaminage.....	14
1.2.4 Moyens d'identification de l'endommagement.....	15
1.2.4.1 Méthodes directes.....	15
1.2.4.2 Méthodes indirectes.....	15
1.3 Comportement en fatigue des composites.....	15
1.4 Matériaux étudiés.....	21
1.5 Essais de flexion.....	23
1.5.1 Flexion 3 points statique.....	23
1.5.1.1 Eproutette d'essais.....	23
1.5.1.2 Machine d'essais.....	23
1.5.1.3 Courbes de comportement mécanique.....	24
1.5.1.4 Analyse des courbes de comportement mécanique.....	24
1.5.2 Flexion cyclique charges – décharge.....	25
1.5.2.1 Protocole d'essais.....	25
1.5.2.2 Courbes de comportement mécanique.....	25
1.5.2.3 Analyse des courbes de comportement mécanique.....	26
1.6 Essais de traction.....	26
1.6.1 Traction statique.....	26
1.6.1.1 Eproutettes d'essais.....	27
1.6.1.2 Courbes de comportement mécanique.....	28
1.6.1.3 Analyse des courbes de comportement mécanique.....	28
1.6.2 Traction cyclique.....	29
1.6.2.1 Courbes de comportement mécanique.....	29
1.6.2.2 Analyse des courbes de comportement mécanique.....	30
1.7 Quantification du dommage.....	32
1.7.1 Evolution du dommage : cas de la flexion cyclique.....	32
1.7.2 Evolution du dommage : cas de la traction cyclique.....	32
1.7.3 Analyse des résultats.....	33
1.8 Conclusions.....	33
Chapitre 2 : Identification du dommage par EA de stratifiés composites chargés en statique et cyclique	
2.1 Emission acoustique.....	36
2.1.1 Définition.....	36

2.1.2 Principales sources d'émission acoustique.....	37
2.1.3 Effet Kaiser et rapport Felicity.....	38
2.1.4 Acquisition des signaux.....	38
2.1.4.1 Capteurs d'EA.....	38
2.1.4.2 Couplant.....	39
2.1.4.3 Chaîne d'acquisition de l'EA.....	39
2.1.5 Paramètres d'EA.....	40
2.1.5.1 Paramètres d'acquisition.....	40
2.1.5.2 Paramètres d'analyse.....	40
2.1.6 Analyse des données d'EA.....	41
2.1.6.1 Analyse spectrale.....	41
2.1.6.2 Mode de calcul des densités spectrales fréquentielles.....	42
2.1.6.3 Application aux signaux et déduction des paramètres fréquents.....	42
2.2 Classification des signaux acoustiques.....	43
2.2.1 Analyse mono paramètre.....	44
2.2.2 Analyse multi paramétrique.....	44
2.2.3 Méthode de discrimination par les (K-means).....	44
2.3 Travaux réalisés dans le domaine.....	45
2.4 Technique expérimentale.....	54
2.5 Application de l'EA aux essais réalisés en statique.....	55
2.5.1 Cas de la flexion trois points statique.....	55
2.5.2 Cas de la traction statique.....	57
2.5.3 Analyse des résultats.....	59
2.6 Application de l'EA aux essais réalisés en cyclique.....	60
2.6.1 Cas de la flexion trois points cyclique.....	60
2.6.2 Cas de la traction cyclique.....	62
2.7 Analyse des résultats.....	64
2.8 Conclusions.....	65

Chapitre 3 : Caractérisation et suivi de l'endommagement par vibrations linéaires

3.1 Introduction.....	68
3.2 Vibrations transverses des poutres stratifiées.....	68
3.3.1 Théorie des poutres.....	68
3.3.2 Vibration en flexion des poutres.....	70
3.3.3 Réponse dans le cas d'une charge concentrée impulsionnelle.....	70
3.3 Travaux réalisés dans le domaine.....	72
3.4 Procédure expérimentale.....	77
3.4.1 Système d'acquisition.....	77
3.4.2 Performance du système et difficultés associées à la mesure.....	79
3.4.3 Méthode d'analyse des résultats expérimentaux.....	81
3.5 Comportement mécanique des matériaux considérés.....	82
3.6 Comportement vibratoire des matériaux considérés.....	83
3.7 Analyse vibratoire.....	83
3.8 Conclusions.....	85
Conclusions générales.....	87
Bibliographie.....	90
Annexe.....	98

Introduction générale

L'utilisation des matériaux composites renforcés de fibres dans les applications industrielles telles que l'automobile, le génie électrique, l'aéronautique, le navale, le spatial, et bien d'autres domaines, connaît depuis plusieurs années un essor important. En effet, ces matériaux présentent de nombreux atouts qui permettent aux industriels de répondre à la fois aux attentes des consommateurs, aux nouvelles contraintes réglementaires, aux objectifs de rentabilité, de réduction des coûts d'exploitation, de la bonne résistance à la fatigue et à la corrosion aux souplesses des formes, mais surtout leurs faibles masses permettant un allègement conséquent des structures.

La connaissance et le savoir faire de ces matériaux sont récents par rapport à leurs concurrents les aciers et les aluminiums. Leurs propriétés mécaniques et autres doivent être encore optimisées. En effet, les propriétés mécaniques d'une structure en composites sont étroitement liées à leur endommagement en charge. Un des enjeux majeur c'est à voir la possibilité de contrôler l'état de santé de ces matériaux en service. Il est donc indispensable de définir des indicateurs plus sensibles à la présence du dommage afin de prévenir leur ruine. Plusieurs méthodes sont utilisées. **[Hochard, 05], [Bentahar, 05 & Marec, 08] et [Ouahabi, 06].**

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude de l'endommagement des matériaux composites stratifiés sous chargement cyclique et dynamique par trois méthodes : Calcul du module d'élasticité instantané, utilisation de l'émission acoustique et application des vibrations linéaires.

Pour concrétiser cette démarche, nous avons jugé utile d'organiser notre mémoire en trois chapitres complémentaires.

Le premier chapitre est réservé aux matériaux composites exploitant en particulier une étude bibliographique relative à leurs comportements sous différents types de chargements. Les matériaux considérés et leurs comportements sous chargement statiques et cyclique en flexion et en traction et plus particulièrement la quantification de leurs dommages.

Le deuxième chapitre décrit la technique de l'émission acoustique qui s'apparente aux méthodes de contrôle non destructif (CND), les travaux réalisés dans le domaine et la démarche retenue pour la classification des signaux acoustiques lors des essais statiques et cycliques appliqués aux matériaux étudiés. Les résultats issus de cette méthode et leurs analyses sont également présentés.

Le troisième chapitre traite la caractérisation et le suivi de l'endommagement des composites stratifiés sains et endommagés à différents niveaux en utilisant les vibrations linéaires, c'est une méthode d'évaluation non destructive (END). Nous rappelons dans ce chapitre la théorie de vibrations des poutres stratifiées, suivi d'une analyse des travaux recensés dans la littérature, de la description de la procédure expérimentale et de la présentation des résultats expérimentaux des poutres stratifiées testées en vibrations en configuration encastree-libre et de leurs discussions.

Le mémoire est terminé par les conclusions générales, les références bibliographiques et une annexe.

Chapitre 1
Comportements mécanique des
stratifiés composites sous chargement
statique et cyclique

1.1 Introduction

Les progrès de la technologie des composites sont tels qu'on assiste de plus en plus à leur emploi comme matériaux de structures. Leur certification pour une application industrielle est en grande partie déterminée par leur capacité à supporter diverses sollicitations en service. L'envolée technologique du monde aéronautique et spatial pendant les années 60 est principalement le résultat de la mise au point de structures optimisées constituées de matériaux spécifiquement résistants appelés matériaux composites.

1.2 Les matériaux composites

On définit un matériau composite, comme étant un matériau différent des matériaux habituels macroscopiquement homogène, ce matériau est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes donnant un comportement mécanique global plus performant que celui de ses composants pris séparément. 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.

1.2.1 Classification des matériaux composites

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

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

Composites à fibres : Un matériau composite à fibre est un matériau renforcé de fibres (longues, courtes ou coupées) ; l'orientation et l'arrangement de ces fibres permettent de modéliser les propriétés mécaniques de ce composite, ces dernières sont modifiables et modulables selon la variation de la nature des constituants, la proposition des constituants et l'orientation des fibres.

Composites à particules : Un matériau composite à renfort de particules est un composite chargé de particules ne possédant ni dimensions ni formes bien précises. L'utilisation de ce type de matériau est limitée, les particules sont utilisées pour réduire le coût du matériau, tout en conservant leurs propriétés mécaniques.

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés,

Composites à matrice organique

Composites à matrice métallique :

Composites à matrice minérale

1.2.2 Eléments constituant un matériau composite

Un matériau composite est constitué principalement d'une matrice (résine) et d'un renfort (fibres, particules).

1.2.2.1 Les résines

Les résines permettent de transmettre les sollicitations mécaniques aux fibres, les protéger des agressions extérieures, elles doivent être déformables et ayant une masse volumique faible de façon à conserver les caractéristiques mécaniques des matériaux composites. Il existe deux grandes familles de résines : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables : En partant de l'ordre décroissant en tonnage des résines thermodurcissables on a :

– **Les résines polyesters :** Les résines polyesters insaturées sont obtenues par polycondensation d'un ou plusieurs glycols sur un ou plusieurs diacides dont l'un au moins contient une double liaison éthylénique, elles sont classées en résines souple ; semi-rigide et rigide, :

– **Les résines de condensation :** Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques,

– **Les résines époxydes :** Les résines époxydes sont les matrices des composites à haute performance (construction aéronautique, espace, missile, etc.). leurs principaux avantages sont leurs excellentes propriétés mécaniques en association avec les fibres (Verre, aramides, carbonés), la bonne résistance chimique à l'eau, aux bases, aux hydrocarbures, aux acides faibles et aux solvants organiques, ses caractéristiques thermiques élevées, sa stabilité dimensionnelle, son excellente adhérence aux matériaux métalliques, et sont faible retrait au moulage. par contre ses inconvénients sont son coût élevé, un temps de polymérisation long, une tenue thermique en continu à 180C° et une sensibilité à la fissuration.

– **Les résines thermoplastiques :** Les résines thermoplastiques font partie d'une grande famille. Nous pouvons les subdiviser en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères). Les premiers sont mis en œuvre par injection afin d'obtenir des objets moulés ou par extrusion pour obtenir : des films, des plaques, des tubes, etc., les secondes sont généralement mis en œuvre par injection. On distingue parmi les résines thermoplastiques : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, etc., c'est dans leur faible coût que réside l'intérêt des résines thermoplastiques lié à des propriétés mécaniques et thermomécanique faibles. Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres. Cependant ils ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures.

1.2.2.2 Les fibres et les tissus

Les renforts permettent d'améliorer certaines des propriétés physiques des matériaux composites : comportement thermique, tenue aux températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc., ainsi que certaines des propriétés mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.

Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : caractéristiques mécaniques élevées, masse volumique faible, bonne compatibilité avec les résines, facilité de mise en œuvre, faible coût, etc. Les renforts se présentent sous diverses formes commerciales :

– **Fibre de formes linéiques :** sont fabriquées en filament de quelques dizaines de microns, et ne peuvent donc pas être utilisées sous forme unitaire. La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou monofilament. Les monofilaments sont ensuite réunis en fils ou mèches. Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique ou, l'unité de masse linéique est le *tex*.

– **Fibres de formes surfaciques :** peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

– **Les mats :** sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

– **Les tissus et rubans** : Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué d'une chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu, et d'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne. Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaînes et des fils de trames. Les armures utilisées sont : toile ou taffetas, satin, sergé, armure haut module, armure unidirectionnelle.

– **Structures tissées multidirectionnelles** : Il est possible de réaliser des tresses ou préformes par tissage cylindrique ou conique d'un tissu tubulaire. Les fils s'entrecroisent en hélice, comme il est possible de réaliser une pièce de révolution ayant un diamètre variable le long de son arc. Par ce procédé, divers tissus peuvent être obtenus en forme de « chaussettes » coniques, ovales ou hémisphériques, utilisées pour satisfaire aux besoins de la construction aéronautique (cône de rentrée, tuyères, etc.). Des tissages volumiques sont également utilisés, caractérisés par le nombre de directions de tissage : 3D, 4D, etc. La structure la plus simple est celle du tissage 3D où les fils sont disposés suivant trois directions orthogonales.

1.2.2.3 Les principales fibres

Les fibres de verre : sont caractérisées par une très grande fragilité sous forme massive, qui devient souple lorsqu'elle est filée. Les fibres de verre sont obtenues à partir du verre textile. On distingue les différents types de verre filables (E, D, A, C, et R, S). Les caractéristiques mécaniques de référence qu'on peut citer, sont celles mesurées sur des monofilaments prélevés à la sortie de la filière, tableau 1.1 Les filaments de verre qui sont soumis à diverses sollicitations mécaniques (abrasion, etc.), chimiques (humidité, etc.), suite à leur fibrage, voient leurs caractéristiques mécaniques initiales réduites. Enfin, il est important de noter que les fibres de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, de l'ordre de 200°C pour le verre E et de 250°C pour le verre R.

Tableau 1.1. Caractéristiques mécaniques des verres types E et R, mesurées sur un monofilament à la sortie de la filière.

Caractéristiques			Verre E	Verre R
Masse volumique	ρ	Kg/m ³	2 600	2 550
Module d'Young	E_f	GPa	73	86
Contrainte à la rupture	σ_{fu}	MPa	3 400	4 400
Allongement à la rupture	ε_{fu}	%	4,4	5,2
Coefficient de poisson	ν_f		0,22	-

Les fibres de carbone : La mise en œuvre des fibres de carbone est motivée par les caractéristiques spécifiques remarquablement élevées que prévoit la théorie pour la structure cristalline hexagonale du graphite. Les fortes liaisons entre atomes voisins d'un même plan cristallographique donnent un module de Young de l'ordre de 1200 GPa et une contrainte à la rupture de 20000 MPa dans les directions parallèles aux plans cristallographiques, pour une masse volumique inférieure à 2000 kg/m³. Malgré les imperfections des cristaux obtenus par les procédés industriels, l'élaboration de fibres d'axes parallèles aux plans cristallographiques permet d'obtenir des fibres parmi les plus performantes (650 GPa pour le module de Young et 4000 MPa pour la contrainte à la rupture). Les composites à fibres de carbone, à haute tenue

thermique, ont été développés grâce à cette propriété, qu'on utilise dans les tuyères, pour les disques de freins, etc.

Les fibres aramides : l'élaboration de ces fibres est effectuée par synthèse à basse température (-10°C), puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité. Les fibres aramides sont des fibres poly aramides ou polyamides aromatiques de synthèse dont la structure est constituée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN. Elles sont généralement plus connues sous le nom de « Kevlar ». Les fibres aramides ont des contraintes à la rupture voisines à celle des fibres de carbone HR avec un prix de revient 3 à 5 fois moindre.

Les fibres céramiques : Le principal intérêt des céramiques est leur caractère réfractaire. Diverses fibres sont obtenues par dépôt chimique en phase vapeur d'un revêtement céramique : de bore (fibres de bore B), de bore-carbure de bore (fibres B-B₄C), de silicium (fibres de silicium) ou de bore-silicium (fibres BorSic), sur un fil support en tungstène ou en carbone.

Les fibres synthétiques thermostables : Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse, conservant leurs caractéristiques mécaniques à des températures élevées. Associées à des résines thermostables, elles permettent d'obtenir des matériaux dont les caractéristiques mécaniques en température sont conservées. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres sont nettement plus faibles que celles des fibres usuelles. Elles sont utilisées dans les isolants électriques et thermiques, les protections thermiques : boucliers de missiles, cônes de rentrée de véhicule spatial, etc. Parmi ces fibres nous citons

Les fibres d'origine végétale :

- Le bois, utilisé sous forme de fibres orientées, feutres, papiers imprégnés, etc.
- Le sisal, le jute, le lin, de moins en moins utilisés au profit des fibres de verre.

Les fibres d'origine minérale :

- L'amiante (interdite dans certaines utilisations),
- La silice

Les fibres synthétiques :

- Fibres polyester (tergal, dacron, térylène, etc. ;),
- Fibres polyamides.

Les fibres métalliques :

- Acier,
- Cuivre,
- Aluminium

1.2.3 Mécanismes d'endommagements

L'endommagement se présente sous forme de discontinuités surfacique pour les microfissures ou volumiques pour les cavités. Il se présente sous forme de mouvement et accumulation des dislocations dans les métaux, et de modification des liaisons intermoléculaires dans les matériaux organiques. L'endommagement a un caractère irréversible.

Lorsque les matériaux composites subissent des contraintes externes, différents types de dégradation résultent, l'endommagement de la matrice, des fibres et de l'interface fibre-matrice. Ces mécanismes se produisent simultanément, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du matériau composite. L'endommagement se développe suivant la nature des matériaux et des conditions de sollicitation mécanique imposées. [Berthelot, 99].

1.2.3.1 Fissuration matricielle

Dans la matrice, la fissuration peut être transverse ou longitudinale. La première se produit lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint la contrainte à la rupture de la matrice, alors que la seconde a lieu lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint la contrainte à la rupture en cisaillement. Ce dernier mode de rupture appelé « splitting » se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice. Dans le cas de composites industriels à fibres de verre, les performances à la rupture peuvent être limitées par une déformabilité trop faible de la matrice. Il apparaît donc nécessaire d'adapter au mieux les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des matériaux composites. [Berthelot, 99].

1.2.3.2 Rupture de fibres

Dans certains cas, l'endommagement dans les composites est initié par une rupture de fibre. Cela se produit en général lorsque l'orientation des fibres coïncide plus ou moins avec l'axe de sollicitation du matériau composite. La rupture a lieu lorsque la contrainte de rupture de la fibre est atteinte. L'endommagement produit ne cesse de progresser à mesure que la contrainte est appliquée, et provoque ainsi la rupture de la matrice et autres fibres jusqu'à la rupture totale du matériau.

1.2.3.3 Décohésion fibre-matrice

Dans la pratique, même après avoir choisi les constituants fibres et matrice avec soin en les soumettant à des contrôles précis, l'interface issue de leur interaction ne peut être totalement maîtrisée par les efforts d'analyse et de prévision. Dans le cas particulier où les fibres sont discontinues, la zone interfaciale est le siège d'initiation de fissures et devient de ce fait critique à l'accumulation de l'endommagement. Cela est dû essentiellement à l'efficacité du transfert de charges à l'interface fibre-matrice ainsi qu'à la concentration des contraintes aux extrémités des fibres. Le comportement de l'interface fibre-matrice dépend essentiellement de ses propriétés mécaniques comparées à celles des fibres et de la matrice. Généralement la décohésion a lieu dans deux cas :

- Lorsque la cohésion est inférieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice.
- Lorsque l'adhérence fibre-matrice est faible : dans ce cas, la rupture de la matrice traverse les fibres sans qu'il y ait rupture de fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice.

Dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée, la rupture initiée, par rupture de fibres, ou par rupture de matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice. [Berthelot, 99].

1.2.3.4 Délaminage

Dans le cas d'un stratifié ou multicouche, aux mécanismes élémentaires précédemment décrits s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches appelé rupture par délaminage. Ce type d'endommagement dépend de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé. Le délaminage, qui apparaît après la phase d'endommagement intra laminaire, commence souvent sur les bords avant de s'étendre sur toute l'éprouvette. Il correspond à une fissuration qui a tendance à séparer les plis ou couche du composite [Berthelot, 99].

1.2.4 Moyens d'identification de l'endommagement

Les méthodes d'investigation et/ou de mesure de l'endommagement sont nombreuses et sont classés en deux catégories : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

1.2.4.1 Méthodes directes

Ces méthodes permettent d'observer directement l'endommagement afin de pouvoir faire une description quantitative. On distingue essentiellement :

- Microscope optique,
- Microscope à balayage (MEB),
- Microscope électronique en transmission (MET),
- Diffusion des rayons X,
- Analyse d'images.

1.2.4.2 Méthodes indirectes

Ces méthodes se caractérisent par la mesure d'un paramètre physique qui évolue au cours de l'endommagement on dénote :

- Mesure de l'évolution d'un paramètre élastique,
- Emission acoustique,
- Technique ultrasonore,
- Vibrations,
- Thermographie.

1.3 Comportement en fatigue des composites

Les stratégies de développement dans des domaines différents tel que : le sports (cyclisme, voilier...), industries automobile, ferroviaire, nautique, et biomécanique reposent en grande partie sur une plus forte intégration des matériaux composites à des niveaux structurels de plus en plus critique. Afin de garantir la fiabilité et la sécurité nécessaire dès le stade de la conception, sur le comportement mécanique des structures en composites, notamment l'endommagement causé par différents types de chargements : statiques, fatigues, dynamique et à des chargements accidentels tel que l'impact. Dans la réalité ces chargements peuvent être individuels ou couplés.

Les plaques stratifiées ont suscitées un grand intérêt du faite de leur importance comme éléments de structures. Différents travaux de recherche expérimentaux et numériques ont été entrepris.

[Baudry, 06], a présenté une étude du comportement mécanique de trois composites (P33/C-SiC (1),P33-T/C-SiC (2) et HTA-T/C-SiC (3)) 2D C/SiC consolidés par du carbone ex- résine phénolique puis densifié avec du carbure de silicium infiltré par voie gazeuse. Les essais de traction montrent un comportement non linéaire pour les trois matériaux avec une contrainte à la rupture assez faible comparé aux deux autres, le second a un module plus élevé tandis que le troisième présente une inflexion de la courbe. Les composites C/SiC sont endommagés lors de l'élaboration par apparition de microfissures et décohésions inter faciales. L'observation des ruptures et faciès de rupture montrent que le matériau 1 présente un profil de rupture plan ce qui peut correspondre à un matériau ayant une liaison fibre/matrice relativement forte. Peu de décohésion sont observées aux interfaces. Le matériau 3 se délamine plus au cours de l'essai. Par contre le matériau 2 présente un comportement intermédiaire. Les déchaussements observés sur les fractographies du matériau 2 sont plus importants que pour le matériau 1, en particulier aux interfaces fibre/carbone ex-résine. Le matériau 3 présente une décohésion généralisée des fibres. Les essais en traction avec cycles charge/décharge entraînent la

création de fissures dans la matrice fragile au contact des fibres dans les composites étudiés, et les frottements créés par cette multi-fissuration pseudopériodique perpendiculaire aux fibres en traction entraînent l'ouverture des cycles, dont la largeur à mi-hauteur peut être mesurée. Cette fissuration matricielle peut également être caractérisée par le pas de fissuration moyen séparant deux fissures successives dans la direction de la traction. L'ouverture des boucles d'hystérésis obtenues lors du cyclage est proportionnelle aux frottements et aux glissements existant au sein du matériau. Cette ouverture est d'autant plus importante lorsque la liaison fibre/matrice est faible. Une contrainte apparente de cisaillement interfacial est évaluée à partir de l'analyse des courbes de comportement mécanique en traction. L'interprétation des résultats repose sur différents modèles micromécaniques. Le comportement de ces matériaux C/C(ex-résine)-SiC est proche de celui connu pour ce type de matériaux.

[Hochard, 05], a établi un modèle de comportement permettant de décrire la rupture des composites stratifiés constitués de plis tissés pour des chargements statiques monotones et pour des chargements de fatigue. Le comportement des plis tissés dans le sens chaîne et trame est élastique fragile, l'endommagement suivant ces directions n'influence pas le comportement en traction. Cependant une traction dans le sens chaîne génère des fissures dans les mèches sens trame, mais également dans les mèches sens chaîne. Pour un chargement en cisaillement, obtenu à partir d'un chargement en traction sur un stratifiés [45]₈, une réduction du module de cisaillement et des déformations anélastiques sont observées. La diminution du module de cisaillement est due aux contraintes de cisaillement qui génèrent des fissures de petites tailles (inférieures à la demi épaisseur du pli et limitées dans le plan) parallèle aux fibres dans les mèches sens chaîne et trame. La déformation anélastique observée ainsi que la boucle d'hystérésis lors d'une charge / décharge sont principalement dues à des phénomènes de glissement avec frottement à l'échelle de ces fissures. Pour modéliser le comportement des constituants des plis tissés, un modèle pour des plis unidirectionnels est adapté. Le modèle est défini pour des plis tissés équilibrés ou non dans les directions chaîne et trame. La cinétique d'endommagement utilise trois variables internes pour l'endommagement (d_1 , d_2 , d_{12}), associées respectivement à la rupture fragile en traction sens chaîne, sens trame et à la chute progressive de rigidité en cisaillement. L'évolution de l'endommagement progressif d_{12} dépend des contraintes de cisaillement mais également des contraintes de traction sens chaîne et trame qui participent à la création de petites fissures réparties de manière homogène à l'échelle du pli, parallèle aux directions chaîne et trame. Les déformations anélastiques lors de décharges après une traction sur un stratifié [45]₈ sont principalement dues aux phénomènes de frottement au niveau des petites fissures. Seules les déformations anélastiques de cisaillement sont significatives. Pour décrire les déformations anélastiques, un modèle de plasticité à écrouissage cinématique est utilisé, la déformation anélastique pour un chargement de traction – cisaillement à l'échelle des plis sont plus importantes que pour un chargement de compression – cisaillement qui limite le glissement avec frottement. Les comparaisons essais – simulations sont présentées, un critère non local pour décrire la rupture sens fibre associé à la diminution du module de cisaillement et pris en compte, les déformations anélastiques permettant de décrire le comportement jusqu'à rupture de plaque trouées pour différentes orientations. L'évolution du module de cisaillement, due à l'endommagement, dépend du chargement maxi ainsi que de l'amplitude du chargement cyclique.

[Morscher, 99], a présenté une approche pour analyser le comportement en traction et l'accumulation de l'endommagement des composites en céramique. Des essais de traction monotone et charge/décharge/recharge ont été réalisés. L'émission acoustique modale (EA) a

été employée pour surveiller l'ampleur des dommages sur la courbe contrainte déformation. L'observation des surfaces polies au microscope a permis de lier l'endommagement aux données des EA. Il a constaté que la vitesse du son dans l'échantillon a diminuée avec l'augmentation de la déformation pendant que le composite s'endommage. La diminution de la vitesse du son par échantillon a été liée à la réduction du module élastique. Les signaux acoustiques ont été analysés pour localiser l'endroit des événements et pour déterminer les sources de rupture ayant causés ces événements. L'utilisation d'un algorithme dans le logiciel d'EA a permis de bien situer les événements d'EA avec une bonne exactitude. L'endroit des ruptures est déterminé comme étant le lieu des événements à bas amplitude, lié aux ruptures de fibres. L'analyse des fréquences des événements d'EA a été employée pour déchiffrer ce qu'étaient les sources d'événement avec un certain succès.

[**Moëvus, 08, 1**], a traité deux composites (M-E, M-S) SiC[Si-B-c] donnant un comportement mécaniques différents sous l'essai de traction figure 1.1, déformation faible pour le premier et élevée pour le second pour des contraintes semblable à la rupture. Dans l'article I, les courbes de boucles hystérésis mécanique contrainte-déformation sont analysées, La déformation du matériau M-E est deux fois celle de M-S et les boucles d'hystérésis sont plus ouvertes dans le cas M-E, bien que leurs constituants et les proportions sont presque identiques. Les boucles d'hystérésis larges dans M-E suggèrent que le glissement à l'interface matrice – fibre se produit largement dans ce composite, provoquant une dissipation d'énergie pendant le cycle décharge – recharge. Au contraire, les boucles d'hystérésis de M-S ont de très petites ouvertures et glissement à l'interface. La différence entre les deux composites est expliquée par les différences entre les valeurs de la contrainte de cisaillement. La micrographie des surfaces de rupture a permis de mettre en évidence les modèles de fissuration détaillés. Les signaux d'EA enregistrés pendant les essais ont été soigneusement filtrés afin de maintenir seulement les signaux provoqués par des mécanismes de dommages. En conséquence, l'activité globale d'EA est en bon accord avec les mécanismes observés de dommages avec plus de signaux dans le M-S en raison d'un plus grand nombre de fissures, et plus particulièrement pendant le cycle charge maintien dans le M-S, et plus d'EA pendant le déchargement de M-E en raison des mécanismes de glissement.

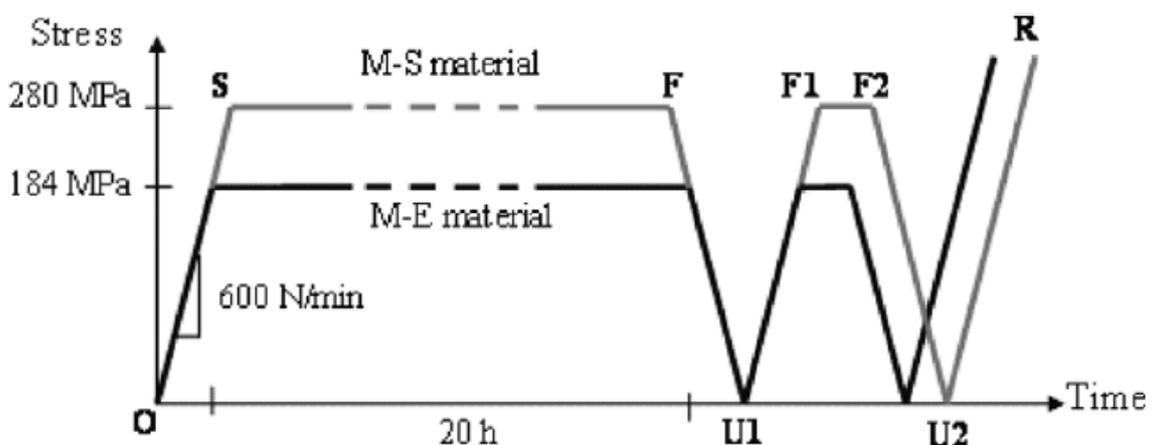


Figure 1.1. Cycle de chargement pendant les essais de traction suivi par EA [**Moëvus, 08, 1**].

[**Moëvus, 08, 2**], a consacré sa deuxième partie au traitement des données d'émission acoustique. Une méthode non supervisée est utilisée, K-means est un algorithme qui vise à réduire au minimum la somme de distances carrées entre tous les vecteurs d'un groupe et son centre. Cette méthode suppose que le nombre k de classes est spécifié à l'avance. Une analyse

de composant principal a été exécutée afin de définir de nouveaux dispositifs non corrélatifs et réduire la dimensionnalité des données. Le nombre optimal de classes k a été empiriquement déterminé en employant le critère de Davies et Bouldin. Le procédé est appliqué aux données des EA enregistrées pendant les essais précédemment décrits sur M-E et M-S. Les signaux enregistrés pendant les cycles décharge-recharge ont été supprimés parce qu'ils sont très peu, et dans le cas de M-E, ils sont principalement produits par le glissement à l'interface qui n'est pas considéré comme mécanisme de dommages. Selon le critère de Davies et Bouldin, le groupement optimal a été obtenu avec quatre classes pour M-E et six classes pour M-S. Les classes obtenues sont logiques avec la différenciation prévue des mécanismes d'endommagements. En particulier, les différents types de fissurations matricielles se produisant dans les composites 3D, elles sont bien distinguées par l'algorithme. Le nombre de signaux est en accord avec les évaluations approximatives des nombres associés de fissures, excepté les signaux de basse énergie parce que la valeur seuil d'acquisition est trop haute pour tous détecter. Les signaux correspondant aux ruptures de fibres n'ont pas été séparés par l'algorithme, probablement en raison du faible nombre de signaux.

[Payan, 2004], a exposé les fondements et les évolutions originales concernant la modélisation du comportement des composites unidirectionnels sous chargement statique. Le comportement du stratifié est modélisé à l'échelle des plis, ce qui permet de décrire le comportement de n'importe quel stratifié à partir de la connaissance du comportement d'un pli. Le comportement d'un pli est modélisé comme orthotrope, dans le sens des fibres, il est élastique fragile, alors qu'en cisaillement et en traction transverse, il est élastoplastique endommageable. L'étude fait les hypothèses simplificatrices adoptées, puis développe les éléments classiques de la mécanique de l'endommagement adaptée aux matériaux anisotropes, et expose le modèle classique de plasticité. Puis elle est consacrée à l'identification d'un modèle sous chargement statique pour la traction sens fibres, pour la traction transverse, puis le cisaillement. En cisaillement, l'identification se fait avec le modèle classique puis on modifie la modélisation de la loi d'écrouissage pour mieux décrire le comportement sous chargement statiques alterné traction/ compression. Le comportement élastoplastique endommageable est présenté puis identifié par:

- Un comportement élastique fragile en traction dans la direction des fibres,
- Un comportement en traction transverse fragile est peu non linéaire, difficile à observer sans faire intervenir l'effet de structures,
- Un comportement non linéaire en cisaillement pour des structures sollicitées de manière homogène, l'endommagement atteint une valeur limite donnée par la condition d'instabilité. En ce qui concerne les déformations résiduelles, des corrections sont réalisées par rapport au modèle classique d'écrouissage isotrope. Des essais de cisaillement alternés ont mis en évidence le caractère cinématique de la plasticité.

[Prasse, 01], a traité simultanément le suivi de l'endommagement par émission acoustique et la variation de l'impédance électrique d'un composite croisé constitué de fibres de carbone et de résine plastique (CFRP) pendant un chargement en traction cyclique. L'impédance est proportionnel au chargement, les courbes impédance - déformation ont la forme d'hystérésis, l'effet kaiser est observé pendant l'acquisition sur les courbes d'accumulation des EA - déformation, la détection par EA permet davantage de perspicacité dans les mécanismes de dommages causant la réponse électrique du matériau (CFRP). Cette dernière est fortement influencée par la rupture des fibres, le contacte induit par l'ouverture et la fermeture fibre-fibre, la déformation des fibres par échauffement. L'observation d'un échantillon après un chargement en traction cyclique au microscope optique montre des fissurations transverse

dans les plis à 90° . Les bouts des fissures atteignent les plis porteurs 0° dans l'échantillon. Les dommages se produisent principalement par une augmentation du nombre de fissures transversales dans les plis à 90° , la croissance des fissures longitudinales commence à partir des bouts des fissures transversales le long des fibres porteuses 0° . L'augmentation de la charge locale aux fond des fissures à 90° peut également initie la rupture des fibres porteuses 0° à proximité des fissures. L'utilisation simultanée de l'EA et de la variation électrique est un bon moyen pour expliquer les origines des caractéristiques électriques. La méthode peut distinguer les stratifiés précédemment contraints et endommagés de ceux soumis à une contrainte pendant un premier temps. Détecter également le maximum précédemment atteint de charge par un changement des caractéristiques de la pente de la courbe variation impédance – déformation. Elle a donc le potentiel d'être employée pour la surveillance de dommages in situ des structures de CFRP.

[Rios, 06, 1], a fait des testes en traction monotone et charge décharge suivi par émission acoustique sur des composites constitués de résine époxyde renforcée par un tissu en verre tricoté et orienté dans divers directions de chargement. Les premiers dommages pour toutes les orientations angulaires se sont développés aux points de croisement de la boucle dans la structure tricotée du tissu et se présente sous forme de micro arrachements. La fissuration matricielle se développe à partir de ces emplacements de déclenchement, le modèle de la fissuration est étroitement lié à l'architecture et à l'orientation du tissu. La représentation des résultats des essais cycliques charge décharge en termes de déformations cumulatives indique qu'une partie de l'activité d'émission acoustique pendant le chargement et le déchargement des éprouvettes est susceptible d'être associée à l'arrachement des boucles tricotées du tissu à travers les surfaces de rupture des fissures de la matrice.

[Rios, 06, 2], a étudié le comportement mécanique d'un composite constitués de quatre ou cinq couches de tissu de verre tricoté dans une matrice d'ester de vinyle de Derakane, sous un chargement de traction monotone et cycliques charge décharge par augmentation des déformations maximales figure 1.2, pour différents angles de chargement par rapport la direction chaîne du tissu tricoté. Les propriétés mécaniques des stratifiés du multicouche en fonction de l'angle de chargement sont plus isotropes que les propriétés équivalentes d'un stratifié à une seule couche du même tissu; c'est vraisemblablement en raison de l'écrasement et du froissement des couches du tissu pour réaliser une haute fraction de volume de fibre dans le processus RTM. Les courbes de comportement contraintes - déformations montrent un comportement non linéaire pour toutes les séquences d'empilement. L'endommagement est initié au croisement des boucles et se dirige dans l'architecture de tissu, provoquant une boucle d'hystérésis en déchargement et rechargement fermée et une petite déformation résiduelle sur le déchargement. Pour les déformations auxquelles la fissuration matricielle substantielle se développe (1%). Les boucles d'hystérésis ne se ferment pas pendant le rechargement, la déformation résiduelle pendant le déchargement augmente sensiblement, et la pente globale des boucles d'hystérésis diminue. Le comportement de ces boucles ainsi que la grande pseudo plasticité des courbes de contraintes - déformations mono toniques, ont été expliqués en termes d'extraction et l'étirage des boucles tricotées à travers les fissures de la matrice, la diminution de la rigidité du composite est liée aux dommages de fissuration étendue de la matrice, ainsi qu'au comportement non linéaire de la matrice en cisaillement

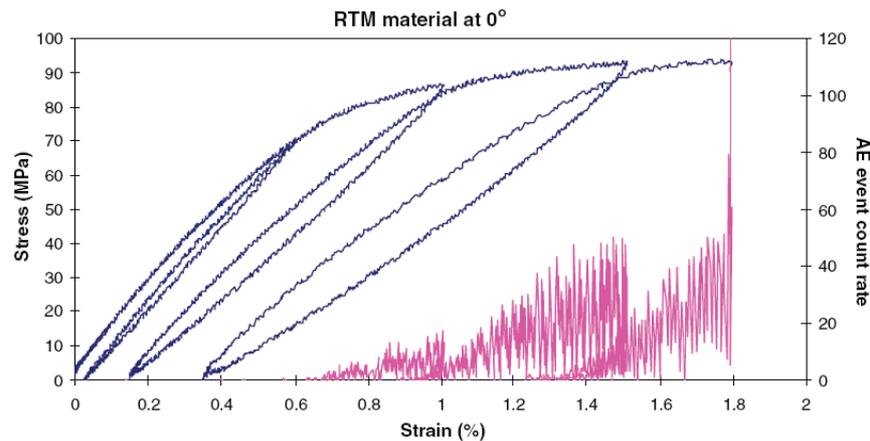


Figure 1.2. Courbe cyclique contrainte déformation pour un composite de quatre couches fabriqués par RTM suivi par EA dans la direction 0° . [Rios, 06, 2].

[Tae Kim, 97], a travaillé sur l'estimation des dommages d'un composite plastique renforcé par du tissu en carbone (CFRP) en employant l'émission acoustique (EA) et le module sécant pendant l'essai de chargement-déchargement. Le signal d'émission acoustique et le processus de rupture ont été surveillés par le système de mesure d'EA et la vidéo microscopie en temps réel pendant l'essai. La recherche du processus de rupture par distributions d'amplitude d'EA, l'énergie libérée par la rupture des fibres est plus grande que celle provoquée par la rupture de la matrice. Cela résulte du fait que les fibres ont une résistance à la rupture et un module largement supérieur à celui de la matrice. Ce résultat indique que la rupture des fibres produit des signaux acoustiques à grande amplitude. Les signaux à amplitudes élevées, moyennes et basses correspondent simultanément à la rupture des fibres, au délaminage et à la fissuration matricielle. Le coefficient appelé Kaiser est un critère important pour l'évaluation des CFRP, il montre la variation du rapport Félicité en fonction de la charge, pour des valeurs de $2a/w$ égales à 0.2, 0.3, 0.4 et 0.5. Seul pour le cas 0.2, les événements à faible amplitudes sont détectés, ces dernières correspondent à des ruptures de la matrice, alors que les signaux à grande et moyenne amplitude correspondent simultanément au délaminage et à la rupture des fibres peuvent être détectés pour une valeur de 79% de la contrainte normalisée. Le comportement mécanique pour $2a/w$ égal à 0.3 est non linéaire simultanément le nombre d'événements augmente, et le module est différent du module du matériau sain. Le module sécant est obtenu en traçant la tangente à la courbe passant entre les charges initiales et la maximales pour chaque cycle de charge – décharge. Le module sécant est inversement proportionnel au nombre d'événements acoustiques, quant les événements augmentent soudainement, l'apparition de signaux à haute et moyenne amplitude est plus fréquente, les fibres qui s'oppose à la propagation de la fissure sont largement rompus, le module sécant décroît pour ce niveau de chargement et l'éprouvette est finalement rompue quant le module sécant atteint la valeur de 57 GPa.

[Thollon, 07], a présenté une modélisation du comportement à la rupture de composites stratifiés constitués de plis tissés déséquilibrés verre/époxy sous chargements statique et en fatigue. Des essais de traction monotone puis cycliques sur des éprouvettes plates ont permis de décrire le comportement du matériau à l'échelle du pli. Il observe un comportement élasto-endommageable dans les directions chaîne et trame, et élastoplastique endommageable en cisaillement. Sur les essais de traction avec décharge, on peut mesurer la perte de rigidité et donc observer l'évolution de l'endommagement en fonction du chargement. On constate alors deux cinétiques différentes : dans le sens chaîne et trame, l'endommagement se développe jusqu'à saturation du pli; alors qu'en cisaillement l'endommagement est diffus jusqu'à rupture

du pli. Les phénomènes causant cet endommagement sont nombreux et complexes, les plus prépondérants sont les décohésions fibres-matrice et la fissuration de la matrice. Pour observer le processus d'endommagement lors des essais de traction, des éprouvettes constituées d'un seul pli sont réalisées. Les fibres de verres et la résine sont suffisamment transparentes pour laisser apparaître les fissures lorsque l'on place une forte source lumineuse derrière l'éprouvette. Ces fissures sont de l'ordre de quelques mm et inférieure à l'épaisseur du pli. Deux types de ruptures peuvent être distinguées: (i) Une rupture fragile qui correspond à une déformation maximale des fibres; (ii) une rupture par instabilité de la structure due à l'endommagement. Le modèle basé sur l'endommagement cumulé, permet de décrire l'évolution de l'endommagement sous chargements statique et de fatigue. L'évolution de l'endommagement statique dépend du maximum de chargement et prend en compte les couplages entre traction et cisaillement. Le domaine de validité de ce modèle se limite à la rupture du premier pli et ne décrit pas le délaminage.

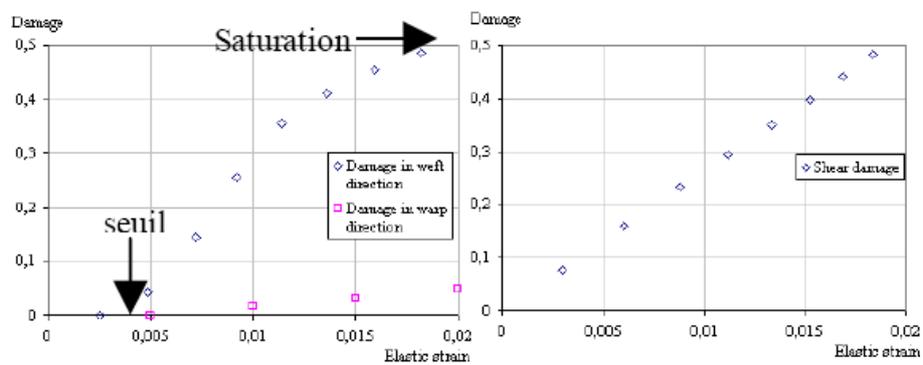


Figure 1.3. Evolution de l'endommagement en fonction de la déformation élastique, [Thollon, 07].

1.4 Matériaux étudiés

Nous avons étudiés deux types de matériaux composites : **Le premier** est fabriqué par R.T.M au Laboratoire Roberval de Polymères et Composites de l'Université de Technologie de Compiègne France. Pour vérifier d'une part l'orientation et le nombre de couches du renforts, et d'autre part les taux de résine et des renforts contenus dans chaque plaque du premier type de matériaux stratifiés, nous avons eu recours à une technique appelée pyrolyse, en découpant cinq échantillons de chaque matériau à surfaces approximativement égales figure 1.4, puis nous avons procédé à un pesage de chacun d'eux noté M1 en gramme.



Figure 1.4. Echantillons avant pyrolyse.

Les échantillons sont alors fixés dans un four à renouvellement d'air enflammé, la calcination à lieu à 600° pour une durée de 10 heures. Après refroidissement le résidu de verre est pesé de masse notée M2 en gramme, la perte de résine par calcination est $M=M1-M2$, le taux de résine en pour cent est alors $R\%=M/M1\%$.



Figure 1.5. Echantillons après pyrolyse.

Le taux de fibres de verre en pour cent est donc $F \% =100-R$. Les résultats obtenus sont représentés sur les tableaux 1.2. La masse volumique de ce stratifié est de 1798,00 Kg/m3 et sa désignation est [-60/-30/0]₁₀.

Tableau 1.2. Taux des constituants premier stratifié du premier type de matériaux.

Echantillon	L (mm)	b (mm)	h (mm)	Poids avant M1 (g)	poids verre M2 (g)	taux de renfort massique	taux de résine	taux de renfort volumique
1	21,08	12,00	12,28	5,60	3,80	67,86	32,14	47,05
2	20,30	11,72	12,28	5,40	3,50	64,81	35,19	46,08
3	20,84	11,82	12,24	5,50	3,60	65,45	34,55	45,92
4	20,34	11,92	12,28	5,40	3,60	66,67	33,33	46,51
5	20,90	11,72	12,24	5,10	3,40	66,67	33,33	43,62
Moyenne						66,29	33,71	45,83

Tableau 1.3. Taux des constituants deuxième stratifié du premier type de matériaux.

Echantillon	L (mm)	b (mm)	h (mm)	Poids avant M1 (g)	poids verre M2 (g)	taux de renfort massique	taux de résine	taux de renfort volumique
1-1	21,14	11,7	12,28	5,5	3,6	65,45	34,55	45,59
1-2	21,24	11,7	12,28	5,6	3,6	64,29	35,71	45,37
1-3	20,6	11,72	12,28	5,4	3,6	66,67	33,33	46,70
1-4	20,84	11,3	12,32	5,3	3,7	69,81	30,19	49,05
1-5	21,22	11,6	12,3	5,5	3,7	67,27	32,73	47,00
Moyenne						66,70	33,30	46,74

Il ressort de ces résultats que la masse volumique de ce stratifiée est de $1822,12 \text{ Kg/m}^3$ et sa désignation est $[-30/0/30]_{10}$.

Le deuxième type de matériaux est fabriqué 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 $300 \text{ (g/m}^2\text{)}$, 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 1.4.

Tableau 1.4. Deuxième type de matériaux.

Désignation des matériaux	Séquence d'empilement
U	$[(0)]_8$
C1	$[(0/90)_s]_2$
C2	$[(0/90)_2]_s$
C3	$[(0_2/90_2)]_s$

1.5 Essais de flexion

1.5.1. Flexion 3 points statique

1.5.1.1 Epreuve d'essais

Des éprouvettes de formes parallélépipédiques ont été découpées selon la norme I.S.O.178T de 1993, la forme et les dimensions sont représentés sur la figure 1.6.

h : épaisseur
 $L = 20 h$,
 $l = 16 h$
 $b = 15 \text{ mm}$.

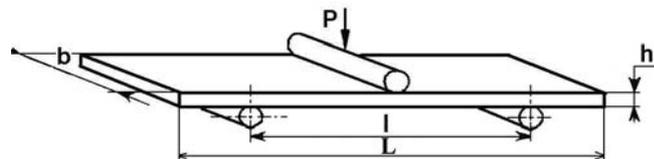


Figure 1.6. Forme et dimensions des éprouvettes de flexion.

1.5.1.2 Machine d'essais

Les essais de flexion ont été réalisés sur une machine universelle de type INSTRON équipée d'une cellule de charge de 100 kN et pilotée par ordinateur figure 1.7. Les éprouvettes sont instrumentées de capteurs d'émission acoustique, afin de suivre l'évolution de l'endommagement des matériaux lors de leurs chargements.



Figure 1.7. Principe d'essai de flexion 3 points instrumenté de capteurs d'EA.

1.5.1.3 Courbes de comportement mécanique

Pour le premier type de matériaux seul la flexion trois points statique est considérée, les courbes de comportement mécanique charge flèche sont représentées sur la figure 1.8.

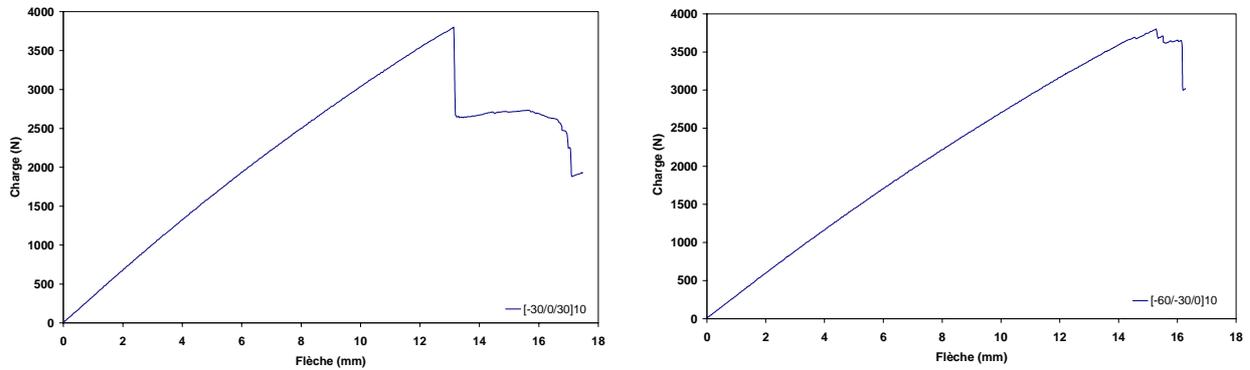


Figure 1.8. Courbe de comportement mécanique charge flèche du premier type de matériaux.

1.5.1.4. Analyse des courbes de comportement mécanique

Le calcul des caractéristiques mécaniques en flexion 3 points statiques est basé sur la relation (1.1) pour les contraintes de flexion σ_f et par l'utilisation de la relation (1.2) pour les valeurs du module de Young en flexion E_f .

$$\sigma_f = \frac{3 F l}{2 b h^2} \quad (1.1)$$

où

F : la charge à la rupture appliquée [N];

l : la longueur entre appui [mm];

b : la largeur de l'éprouvette [mm];

h : l'épaisseur de l'éprouvette [mm].

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (1.2)$$

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.

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \quad (i = 1;2) \quad (1.3)$$

Les modules d'élasticités calculés en flexion du premier type de matériaux et les charges maximales en flexion sont reportés sur le tableau 1.5.

Tableau 1.5. Modules de flexions longitudinaux et charges maximales.

Stratifiés	Module (GPa)	Charge Max (kN)
[-30/0/30] ₁₀	23,86	3,800
[-60/-30/0] ₁₀	20,14	3,801

1.5.2 Flexion cyclique charges – décharges

1.5.2.1 Protocole d'essais

Les essais de flexion cyclique sont réalisés sur des éprouvettes de type flexion statique, Ils 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, pour le dernier cycle le chargement est maintenu jusqu'à la rupture, le protocole d'essai réalisé est représenté par la figure 1.9

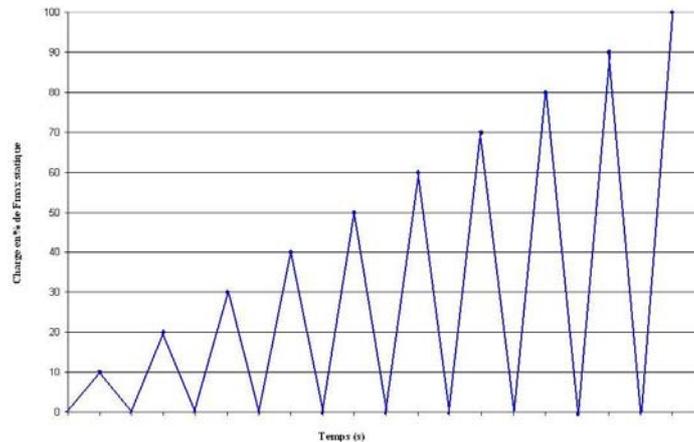


Figure 1.9. Protocole d'essais.

1.5.2.2 Courbes de comportement mécanique

Les courbes de comportement mécanique charge décharge – flèche et charge décharge – temps du premier type de matériaux sont illustrées sur la figure 1.10.

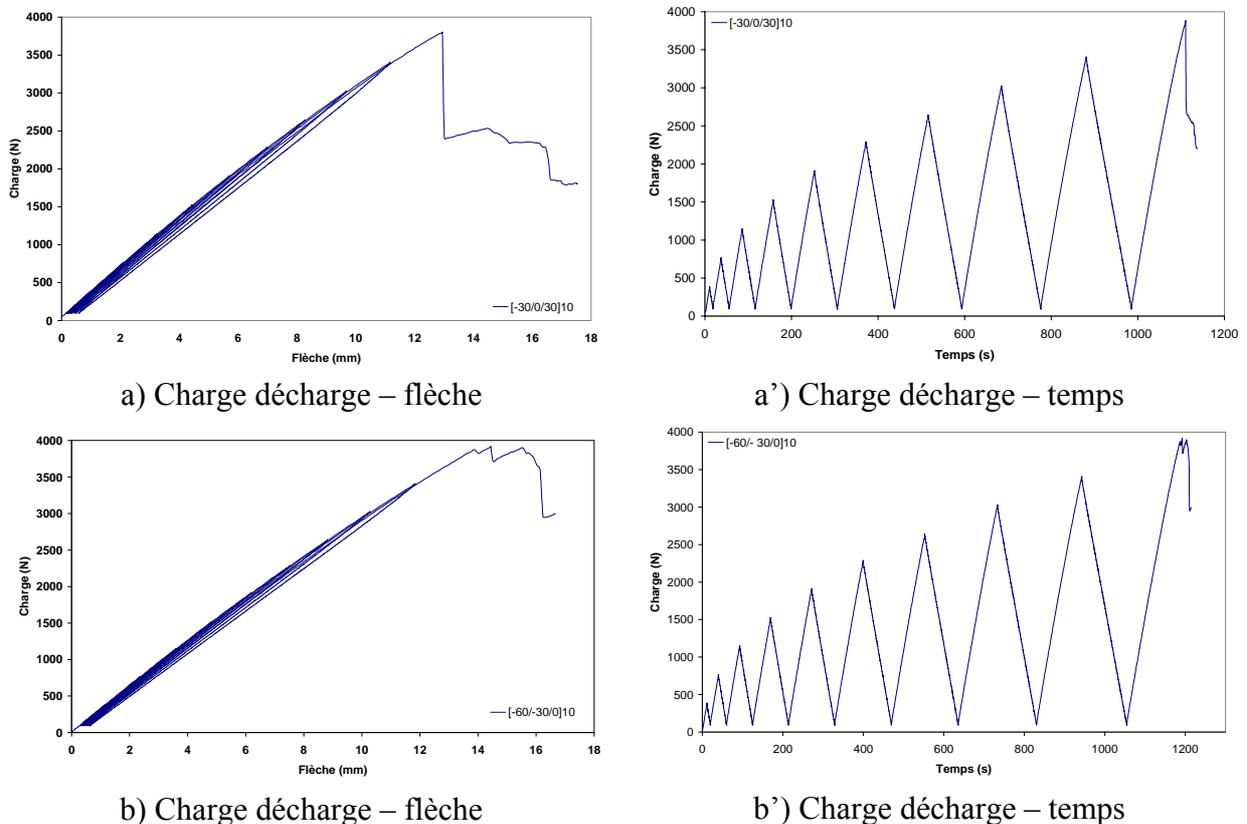


Figure 1.10. Courbe de comportement mécanique en flexion (premier type de matériaux).

1.5.2.3 Analyse des courbes de comportement mécanique

Le calcul des modules d'élasticités longitudinaux en charge et en décharge est obtenu selon la norme I.S.O.178T de 1993. Les valeurs des modules en charge et en décharge baissent lors du cyclage, les courbes modules normalisés en fonction du nombre de cycles sont montrées sur les figures 1.11 et 1.12.

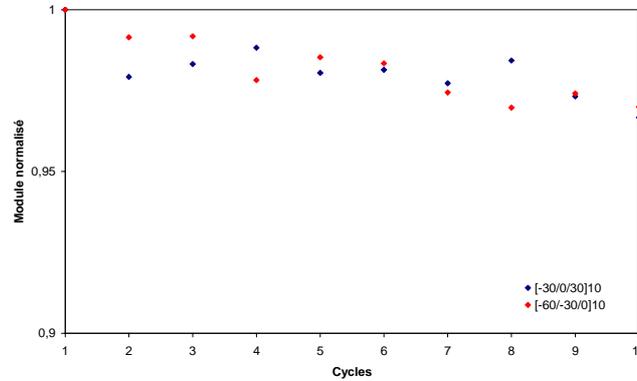


Figure 1.11. Perte de rigidité lors du chargement en flexion 3 points cyclique (Premier type de matériaux).

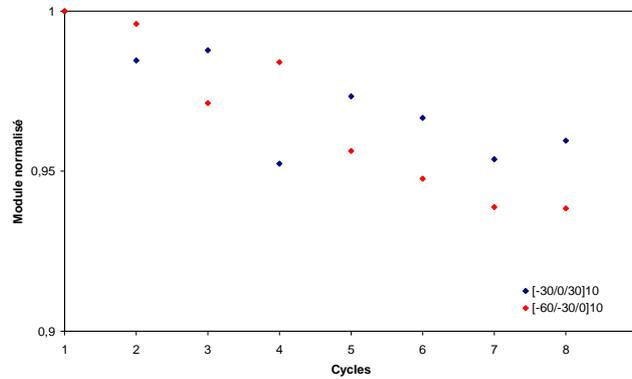


Figure 1.12. Perte de rigidité lors du déchargement en flexion 3 points cyclique (Premier type de matériaux).

Sur le tableau 1.6, nous reportons les taux de pertes des rigidités en flexion du premier type de matériaux considérés.

Tableau 1.6. Pertes de rigidité en charge et en décharge.

Matériau	Taux de réduction du module en charge en %	Taux de réduction du module en décharge en %
[-30/0/30] ₁₀	3,09	6,79
[-60/-30/0] ₁₀	3,44	5,46

1.6 Essais de traction

1.6.1 Traction statique

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques des stratifiés du deuxième type de matériaux une série de testes en traction sur des éprouvettes pour chaque empilement est effectuée. Les essais sont réalisés au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine au Mans, France en utilisant la machine décrite au (paragraphe 5.1.2). Les éprouvettes sont instrumentées de capteurs d'émission acoustique pour le suivi de l'évolution de l'endommagement de ces matériaux lors de leurs chargements (figure 1.13).



Figure 1.13. Essai de traction instrumenté en capteurs d'émission acoustique.

1.6.1.1 Epreuves d'essais

Les éprouvettes de tractions ont été découpées selon la norme : I.S.O 527-5.1997, figure 1.14.

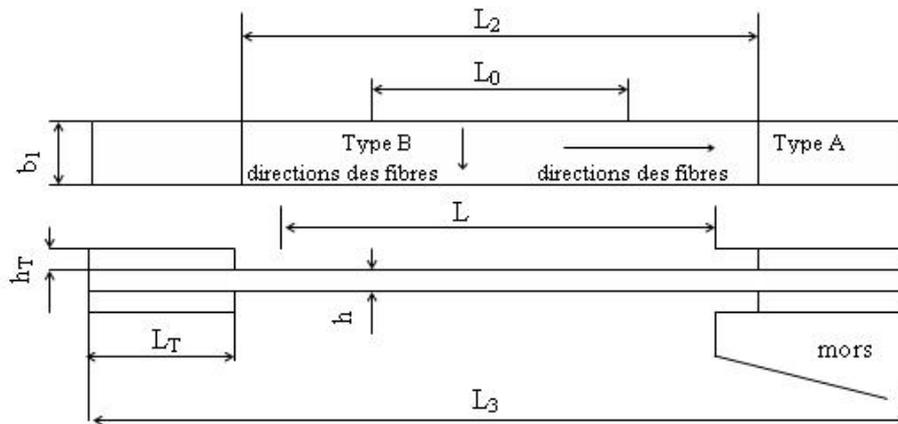


Figure 1.14. Forme des éprouvettes de traction.

Sur le tableau 1.7, nous reportons les dimensions des éprouvettes considérées.

Tableau 1.7. Dimensions des éprouvettes de traction.

		Type A	Type B
L_3	Longueur totale	250	250
L_2	Distance entre talon	150	150
b_1	Largeur	$15^{+0.5}$	$25^{-0.5}$
h	Épaisseur	$1^{+0.2}$	$2^{+0.2}$
L_0	Longueur de référence (recommandée pour les extensomètres)	50^{+1}	50^{+1}
L	Distance initiale entre mors (normale)	136	136
L_T	Longueur des talons	>50	>50
b_T	Épaisseur des talons	0.5 à 2	0.5 à 2

1.6.1.2 Courbes de comportement mécanique

Les courbes de comportement mécanique charge – déplacement pour le deuxième type de matériaux, associées à chacun des empilements considérés sont représentées sur les figures 1.15.

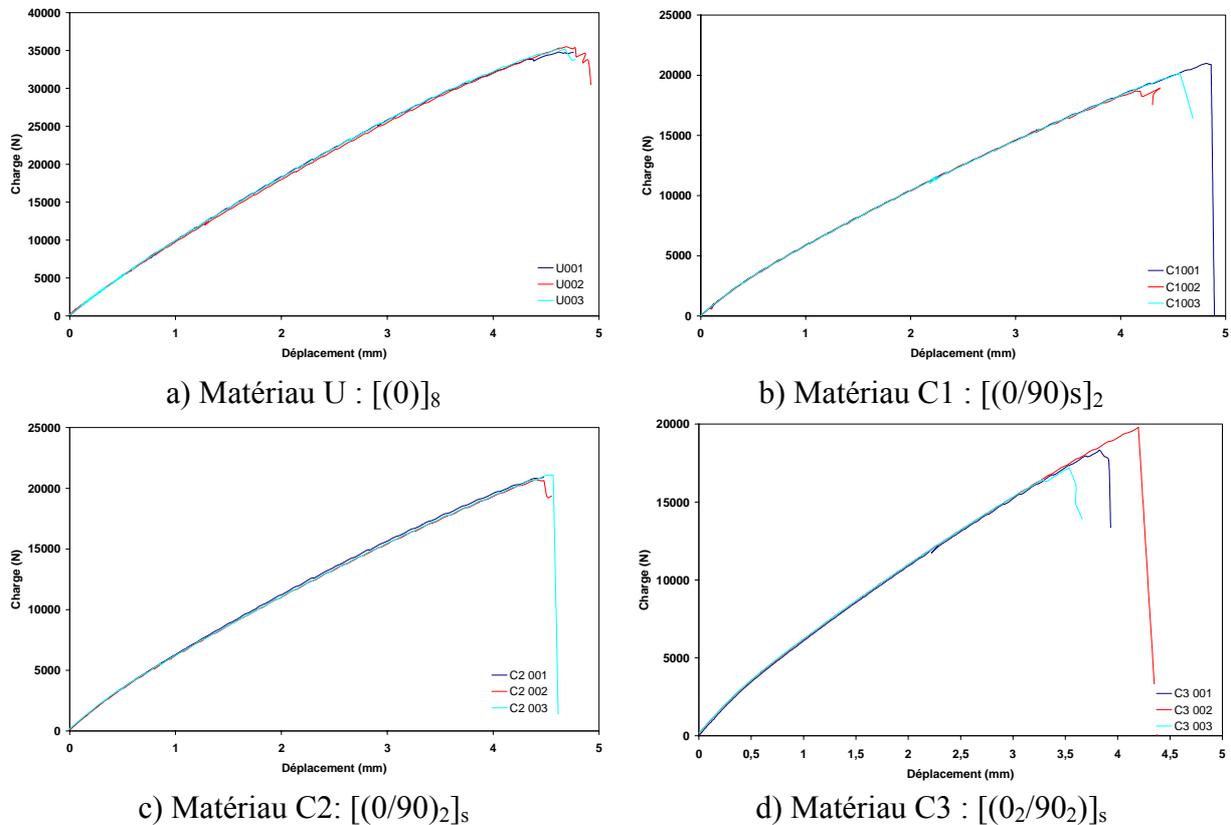


Figure 1.15. Courbes de comportement en traction charge déplacement (deuxième type de matériaux).

1.6.1.3 Analyse des courbes de comportement mécanique

A partir des courbes de comportement charge déplacement nous avons calculé les modules d'élasticités longitudinaux en utilisant la relation de Hooke généralisée reliant les contraintes aux déformations :

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1.4)$$

Avec

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1.5)$$

Où

σ : la contrainte de traction en [MPa] ; F: la force appliquée en [N] ; S_0 : la section initiale de l'éprouvette en [mm²].

Le module d'élasticité recherché est déterminé à partir de la relation (1.6). Les résultats des calculs effectués sont reportés sur le tableau 1.8

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1.6)$$

Où

E : est le module de Young recherché en [MPa] ;

σ_1 : est la contrainte mesurée à la valeur de déformation $\varepsilon_1 = 0.0005$,

σ_2 : est la contrainte mesurée à la valeur de déformation $\varepsilon_2 = 0.0025$,

Tableau 1.8. Modules d'élasticités longitudinaux et charges à la rupture du deuxième type de matériaux.

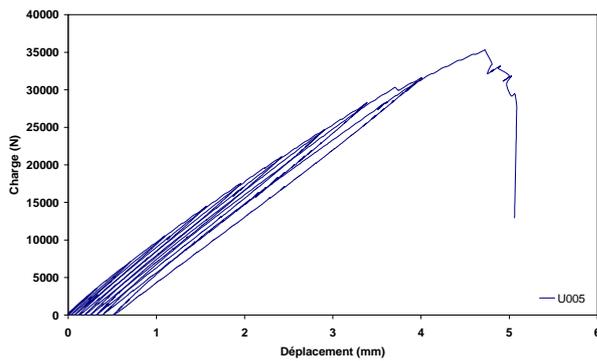
Matériaux	Séquence d'empilement	Module (GPa)	Charge Max kN
U	[(0)] ₈	21,08	35,165
C1	[(0/90) _s] ₂	14,51	20,020
C2	[(0/90) ₂] _s	15,04	20,915
C3	[(0 ₂ /90 ₂)] _s	15,06	18,428

1.6.2 Traction cyclique

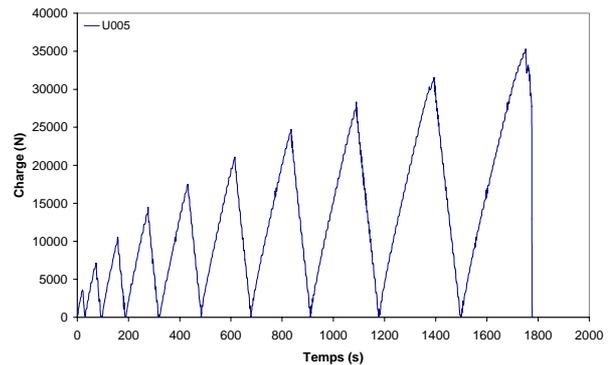
Les essais de traction cyclique sont réalisés selon le protocole d'essais cité en 1.5.2.1. Les taux de chargement retenus sont déterminés à partir des valeurs de charges à la rupture en traction statique (Tableau 1.8).

1.6.2.1 Courbes de comportement mécanique

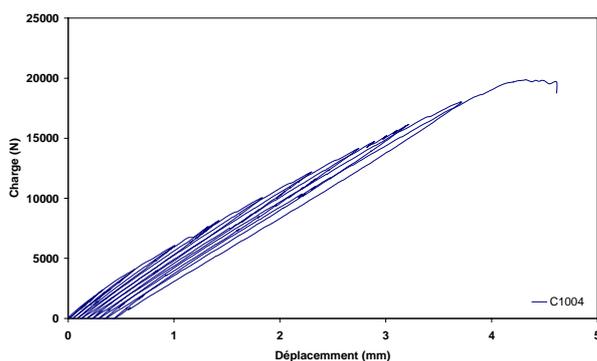
Les courbes de comportement mécanique obtenues charge décharge - déplacement et charge décharge - temps sont représentées sur les figures 1.16.



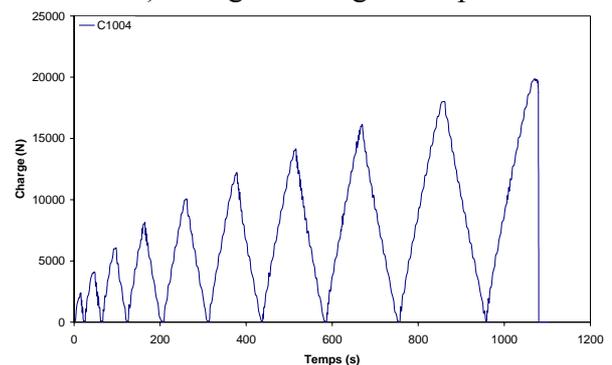
a) Charge décharge - déplacement



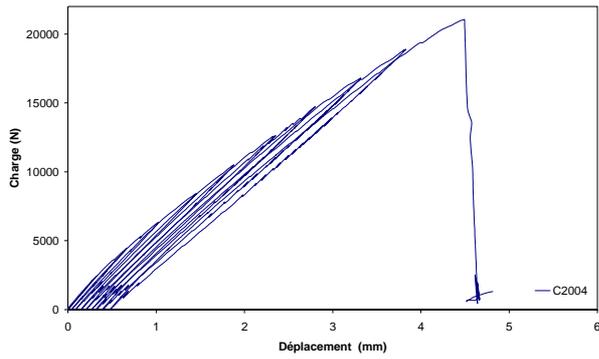
a') Charge décharge - temps



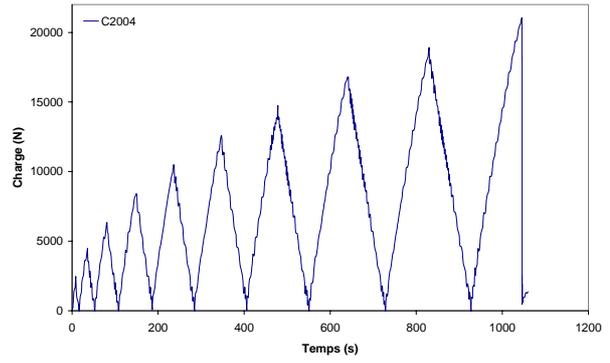
b) Charge décharge - déplacement



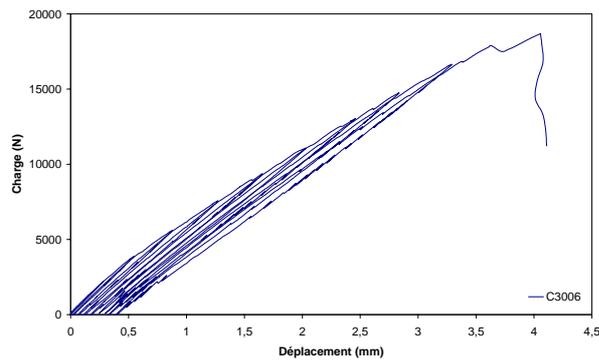
b') Charge décharge - temps



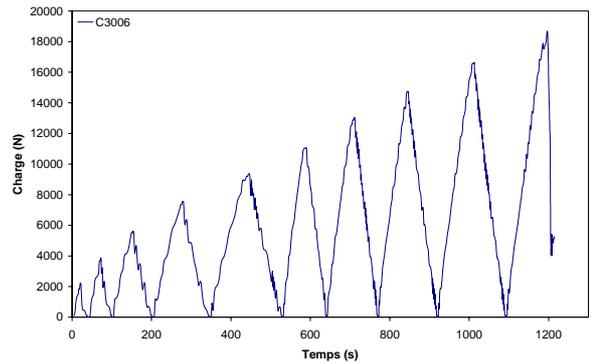
c) Charge décharge - déplacement



c') Charge décharge - temps



d) Charge décharge - déplacement

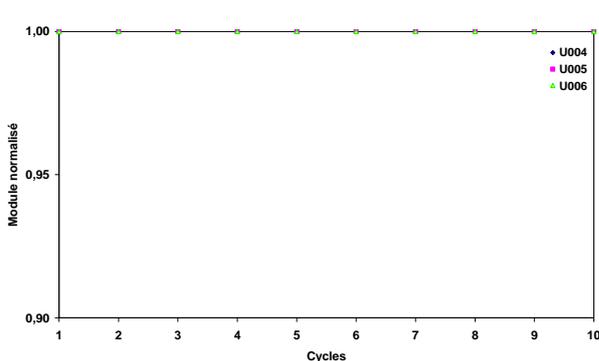


d') Charge décharge - temps

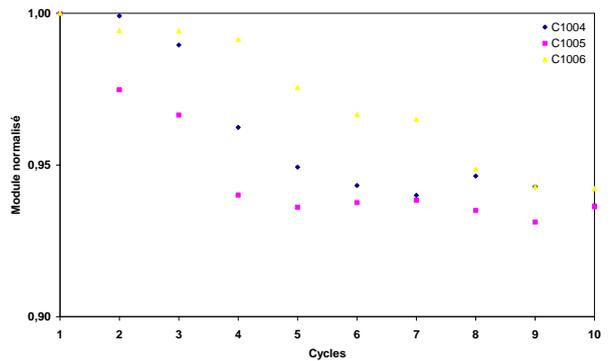
Figure 1.16. Courbes de comportements mécaniques en traction cyclique (deuxième type de matériaux).

1.6.2.2 Analyse des courbes de comportement mécanique

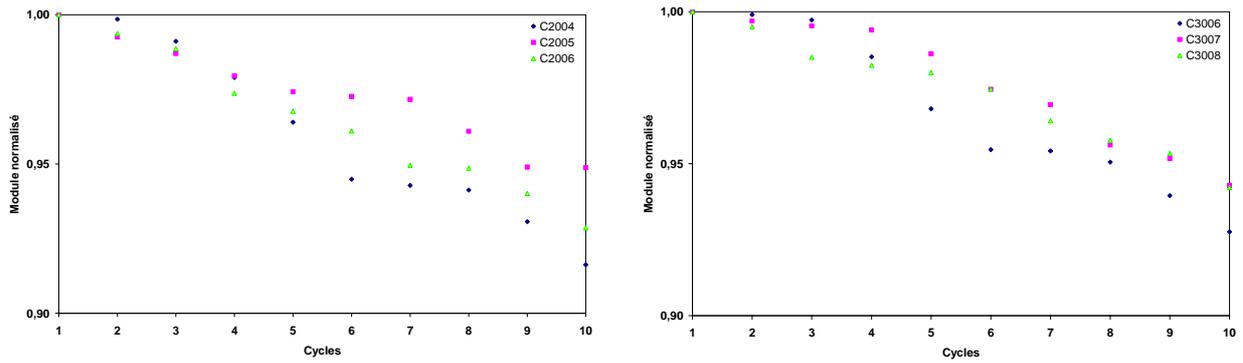
Le calcul des modules d'élasticités longitudinaux en charge et en décharge est obtenu selon la norme I.S.O 527-5.1997, prévoyant un calcul dans un intervalle de déformations allant de [0,005 à 0,025]. L'évolution des valeurs des modules en charge et en décharge en fonction du nombre de cycles est montrée aux figures 1.17 et 1.18.



a) Matériau U : [(0)₈]



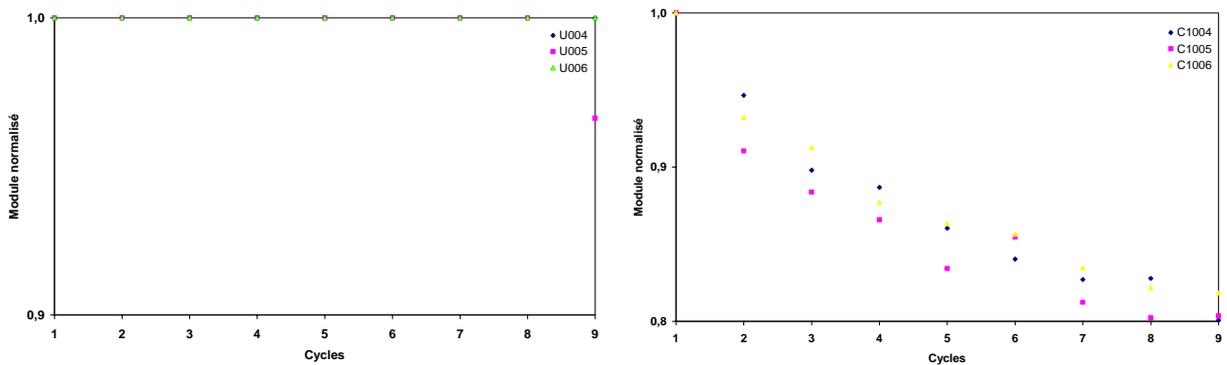
b) Matériau C1 : [(0/90)_s]₂



c) Matériau C2 : $[(0/90)_2]_s$

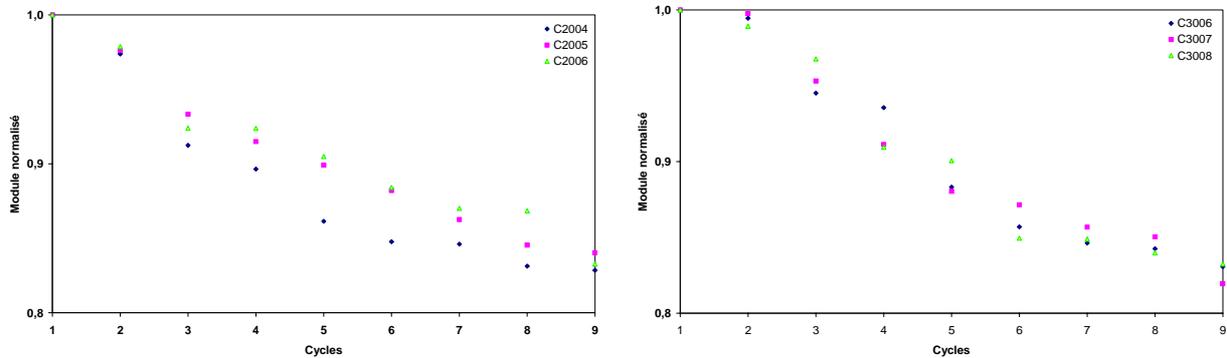
d) Matériau C3 : $[(0_2/90_2)]_s$

Figure 1.17. Evolution des modules d'élasticités lors du cyclage en charge (deuxième type de matériaux).



a) Matériau U : $[(0)]_8$

b) Matériau C1 : $[(0/90)_s]_2$



c) Matériau C2 : $[(0/90)_2]_s$

d) Matériau C3 : $[(0_2/90_2)]_s$

Figure 1.18. Evolution des modules d'élasticités en traction cyclique en décharge (deuxième type de matériaux).

Les résultats de calcul des taux de pertes de rigidité en % en **charges** et en **décharges** sont indiqués sur le tableau 1.9.

Tableau 1.9. Pertes de rigidités en charges et en décharges.

Matériaux	Séquences d'empilement	Taux de réduction du module en charge en %	Taux de réduction du module en décharge en %
U	$[(0)]_8$	0	0
C1	$[(0/90)_s]_2$	5,78 - 6,38	18,17 - 19,93
C2	$[(0/90)_2]_s$	5,12 - 8,37	15,98 - 17,15
C3	$[(0_2/90_2)]_s$	5,71 - 7,24	16,75 - 18,05

Il ressort de ces résultats que le matériau présentant un renfort à zéro degré possède une résistance maximale lors de son cyclage. L'empilement des couches à renforts croisés fragilise les structures stratifiées chargées cycliquement. Le taux de perte de rigidité en charge et en décharge dépend de l'orientation du renfort des couches du stratifié.

1.7 Quantification du dommage

Pour pouvoir quantifier le dommage cyclique, une méthode indirecte est utilisée, elle consiste à calculer l'évolution du module d'élasticité au cours des essais charge-décharge en traction ou en flexion. Le fait que la rigidité du matériau est affectée pendant un cycle charge - décharge, il est essentiel de mesurer le module d'élasticité afin de pouvoir quantifier le dommage D . Le paramètre D donne une idée sur l'évolution de l'endommagement globale du matériau, il est déterminé par la relation (1.7).

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (1.7)$$

où

\tilde{E} : le module d'élasticité du matériau endommagé,
 E : le module d'élasticité du matériau sain.

Pour confronter les résultats obtenus par notre démarche à ceux obtenus en littérature [Alloui, 05 & Bentahar, 05]. Nous avons appliqué la relation (1.7) aux résultats d'essais de flexion et de traction cycliques pour le premier et le deuxième type de matériaux considérés en charge et en décharge.

1.7.1 Evolution du dommage : cas de la flexion cyclique

La figure 1.19 représente l'évolution du dommage en flexion lors du chargement et du déchargement en fonction du nombre de cycles. Ces courbes montrent que l'augmentation du nombre de cycles entraîne une augmentation du facteur D dès les premiers cycles. Le passage de la phase de déchargement à la phase de chargement conduit à une dégradation du matériau d'un facteur de l'ordre de 1,75. Ce phénomène peut être lié à un cumul des mécanismes d'endommagement lors du déchargement associés au retour élastique avec frottement des constituants de la structure.

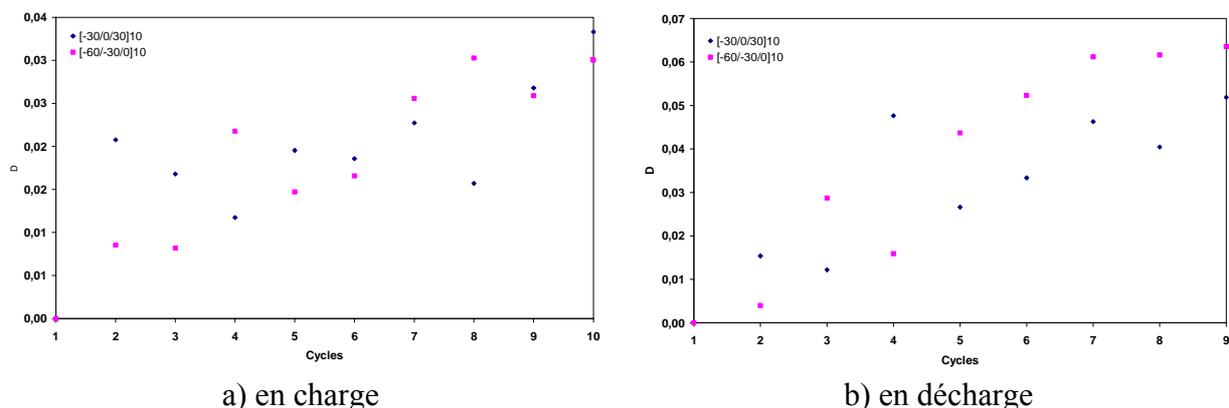


Figure 1.19. Evolution du dommage en fonction du nombre de cycles cas de la flexion (premier type de matériaux).

1.7.2 Evolution du dommage : cas de la traction cyclique

De même que pour flexion cyclique, le calcul de la valeur du dommage D lors des essais de traction charge - décharge a permis de tracer l'évolution du dommage en fonction du nombre

de cycles (figure 1.20). Ces courbes confirment que les stratifiés de renfort à zéro degré présentent un dommage macroscopiquement nul en charge et en décharge. Par contre pour les stratifiés de renforts croisés le dommage apparaît dès les premiers cycles et augmente avec l'augmentation du nombre de cycles, il est d'un facteur de l'ordre de 2,8 en passant de l'étape de déchargement à l'étape de chargement.

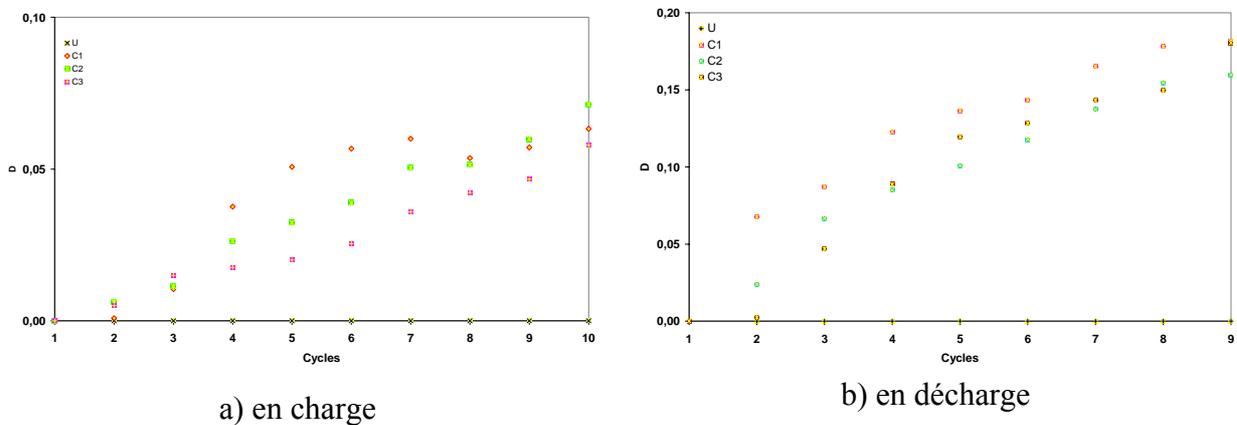


Figure 1.20. Evolution du dommage en fonction du nombre de cycles cas de la traction (deuxième type de matériaux).

1.7.3 Analyse des résultats

Le suivi de l'endommagement expérimental des stratifiés lors de leur chargement cyclique peut être fait par le calcul des modules d'élasticités instantanés.

En flexion cyclique la perte de rigidité se traduit par une augmentation du dommage en fonction du nombre de cycles lors du chargement et du déchargement [Fatmi, 07, 1 et 2 & Kharoubi, 07].

En traction cyclique le matériau unidirectionnel U conserve sa rigidité et présente un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture. Alors que pour les stratifiés à plis croisés C1, C2 et C3 une perte de rigidité est enregistrée en fonction du nombre de cycles en charge et en décharge. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par [Tea kim, 97].

La perte de rigidité des matériaux testés est plus importante en décharge qu'en charge. Elle est liée à une augmentation sensible de la déformation résiduelle [Rios, 06, 1, 2]. Ce phénomène peut être expliqué par le glissement avec frottement à l'échelle des mécanismes de rupture et d'endommagement provoqués par le chargement de la structure [Moevus, 08, 1 & Hochard, 05].

Les courbes de pertes de rigidités peuvent être divisées en trois zones: Une première très courte liée à l'apparition des micro dommages. Une deuxième plus prolongée correspond à la coalescence de microfissures. Puis une troisième brusque attribuée à la création de macro fissures. La jonction des macro fissures conduit à la ruine de l'éprouvette

1.8 Conclusions

Cette étude nous a permis de voir l'influence du type de chargement flexion ou traction sur les comportements mécaniques de deux stratifiés composites:

Le premier type de matériaux est fabriqué par RTM selon les séquences d'empilements $[-30/0/30]_{10}$ et $[-60/-30/0]_{10}$. Il nous a été livré par le Laboratoire Roberval de Polymères et Composites de l'Université de Technologie de Compiègne en France.

Le deuxième type de matériaux est fabriqué par nous même au Laboratoire d'Acoustique de l'Université de Maine en France, en utilisant la technique du sac. C'est un stratifié croisé en quatre séquences d'empilements U, C1, C2 et C3.

La perte de rigidité des structures stratifiées soumises à des chargements cycliques peut être décrite par le calcul des modules d'élasticités instantanés déterminés à partir des courbes de comportement charge décharge – flèche ou charge décharge – déplacement.

En flexion cyclique la dégradation du matériau se traduit par une perte de rigidité fonction du nombre de cycles lors du chargement et du déchargement.

En traction cyclique seul l'unidirectionnel U présente un module d'élasticité constant et donc un dommage macroscopiquement nul. Ce matériau présente un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture en charge et en décharge. Les pertes de rigidités calculées sont plus importantes en décharge qu'en charge. Elles sont liées principalement aux glissements avec frottement des mécanismes de rupture et d'endommagement criés en chargement.

En cyclique les courbes de pertes de rigidités peuvent être divisées en trois phases: Une première très courte localisée dès les premiers cycles, elle est liée à l'apparition des micro dommages. Une deuxième plus prolongée, elle correspond à la coalescence de microfissures. La troisième est brusque, elle est attribuée à la création de macro fissures. Ces constatations sont validées par les tracés des courbes dommage - nombre de cycles déduites des modules d'élasticités des structures endommagées. Le dommage est localisé dès les premiers cycles, sa croissance est attribuée à l'augmentation du nombre de cycles pour les deux types de matériaux en charge et en décharge indépendamment du type de sollicitation.

Chapitre 2
Identification du dommage
par EA de stratifiés composites chargés
en statique et cyclique

2.1 Emission acoustique

2.1.1 Définition

Les normes AFNOR et ASTM, définissent l'émission acoustique comme étant un phénomène de création d'ondes élastiques transitoires, résultant de micro-déplacements locaux internes à un matériau. D'un point de vue énergétique, une source d'EA est un lieu de dissipation d'énergie mécanique par brusque variation du champ de contrainte. Seule une partie de cette énergie est disponible pour la création d'ondes élastiques. En effet, le reste de l'énergie est dissipée soit thermiquement par déplacement de dislocations dans le réseau, soit convertie en énergie de surface, ou absorbée dans le réseau par accumulation de dislocations. Le mouvement de dislocations résultant de cette dissipation d'énergie émet également des ondes élastiques. Cependant, même si la majeure partie de l'énergie contribue finalement à la création d'ondes élastiques, l'énergie reçue par un capteur d'EA est beaucoup plus faible. La part de l'énergie convertie en EA dépend non seulement de la nature de la source, mais aussi de son environnement dans le matériau [EPA]. Les ondes de nature et de fréquences diverses, se propagent dans le matériau et subissent d'éventuelles modifications avant d'atteindre la surface du spécimen étudié. La vibration de surface est recueillie par un capteur piézo-électrique, amplifiée, et fournit le signal d'émission acoustique figure 2.1.

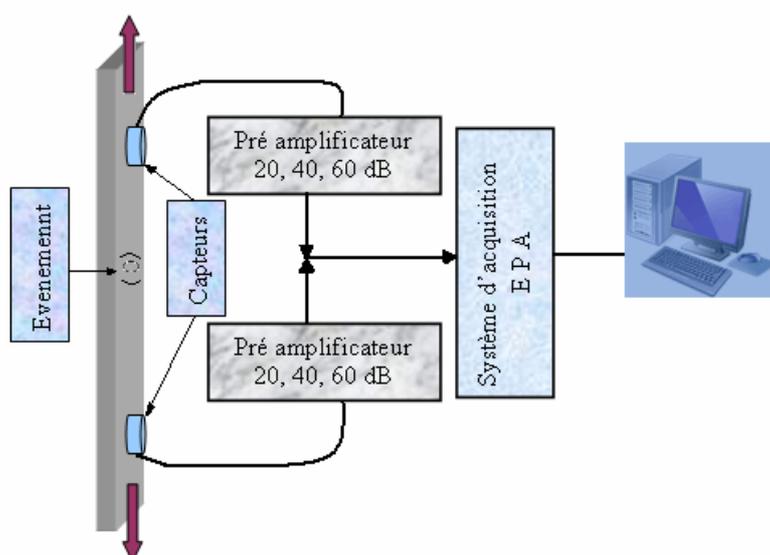


Figure 2.1. Principe d'acquisition de signaux acoustiques.

On distingue l'émission acoustique continue et l'émission acoustique discrète ou par salves figure 2.2. Pour cette dernière, le signal d'émission acoustique ou la salve a l'allure d'une sinusoïde amortie. Lorsque les salves sont si fréquentes qu'elles se chevauchent, le signal d'émission acoustique se traduit par une augmentation apparente du bruit de fond. Cette émission acoustique est dite continue. Elle est principalement observée lors de la déformation plastique dans les matériaux métalliques. En général on n'observe pas d'émission acoustique continue dans le cas de composites. Il existe bien le cas de la détection de fuites dans les réservoirs en composites par émission acoustique de type continu mais c'est l'écoulement de la fuite, plus que l'endommagement même du matériau, occasionnant dans ce cas l'émission acoustique.

L'émission acoustique présente les avantages suivants :

- Sensibilité élevée,
- Détection en temps réel (alarme avant rupture),
- Détection à distance (possibilité de détecter des défauts dans des endroits inaccessibles),
- Sensible aux défauts évolutifs, permet le suivi en temps réel,
- Méthode globale et rapide (examen de la totalité d'une structure en un seul essai),
- S'applique à l'étude d'un grand nombre de matériaux,
- Permet la surveillance permanente.

Ces limitations sont :

- La structure doit être mise sous contraintes,
- Le capteur doit être en contact ou couplé acoustiquement au matériau,
- Méthode sensible uniquement aux défauts évolutifs et aux transformations irréversibles (effet Kaiser),
- Ne donne pas d'indication sur la taille ou la géométrie des défauts.

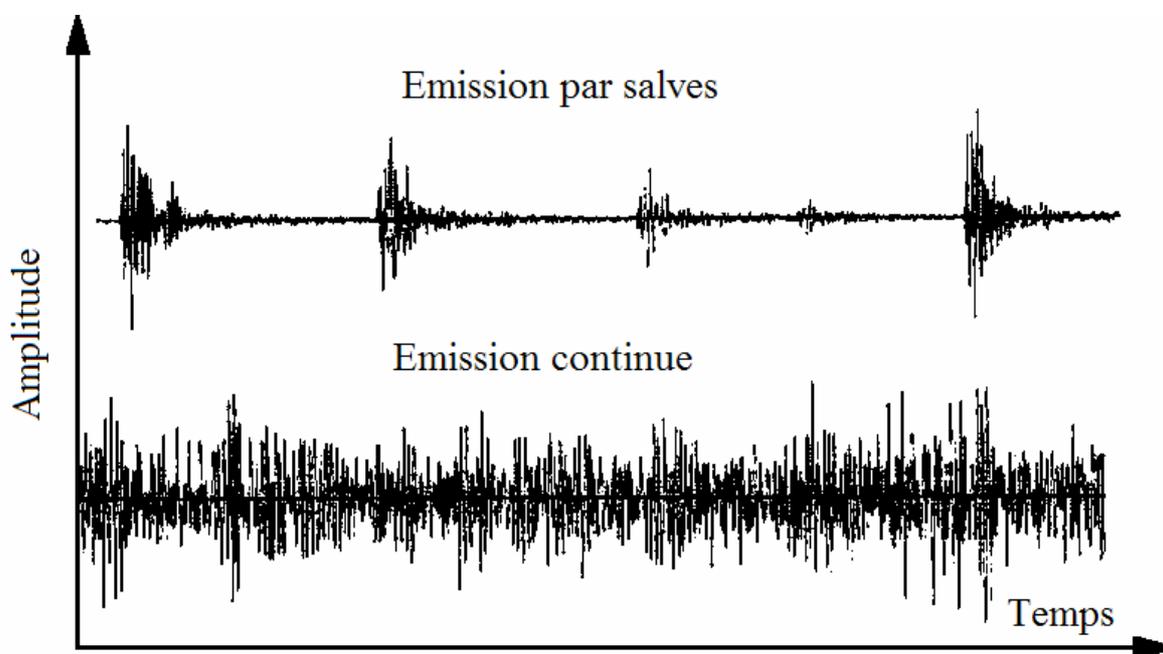


Figure 2.2. Type de signaux d'émission acoustique, [EPA].

2.1.2 Principales sources d'émission acoustique

Les sources d'émission acoustique sont liées à des phénomènes irréversibles. Dans les matériaux composites, les salves recueillies peuvent être attribuées à divers mécanismes d'endommagement ou à des phénomènes de frottement. Par endommagement, nous entendons tous les phénomènes liés à une perte de cohésion du matériau dont l'accumulation conduit à la ruine de la structure. Lors d'une décohésion une partie de l'énergie libérée peut être transformée en onde acoustique. Cependant nous pouvons rappeler que de nombreux phénomènes physiques peuvent être à l'origine de l'EA :

- Endommagement des matériaux composites et béton (micro - fissuration de la matrice, délaminage, ruptures d'interfaces, ruptures de fibres, etc.),
- Déformation plastique, mouvement de dislocations, maclage, glissement aux joints de grains,

- Ruptures d'inclusions ou de composés intermétalliques,
- Transformation de phases (martensitique),
- Amorçage et propagation de fissures (contraintes statiques, fatigues, etc.),
- Fragilisation par hydrogène,
- Corrosion localisée (corrosion sous contrainte, piqûre, crevasse),
- Frottement, impact mécanique,
- Fuites (liquide et gaz), cavitation, ébullition.

La localisation d'une source d'EA dans un matériau s'effectue en utilisant plusieurs capteurs. Une disposition particulière de ces capteurs sur la structure, définie ainsi une maille de localisation adaptée à la géométrie.

2.1.3 Effet Kaiser et rapport Felicity

Comme l'émission acoustique est un phénomène irréversible. Cela est connu sous le nom d'effet Kaiser. Lorsqu'un matériau ou une structure portée à un niveau de sollicitation noté P_1 , elle émet des signaux acoustiques, si on la décharge l'émission ne reprend que si on dépasse le niveau de chargement précédant, On appelle P_2 le niveau de sollicitation à l'apparition de l'émission acoustique lors de la deuxième mise en charge. Si la structure est endommagée alors $P_2 < P_1$. En général, l'effet Kaiser est plus respecté par les matériaux métalliques sans défauts évolutifs que par les composites. Ces derniers étant de nature viscoélastique, obéissant à des évolutions temporelles, des déformations susceptibles de se reproduire à contrainte constante. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Felicity, il est rencontré essentiellement dans les composites à matrice organique. [Huguet, 02 & Bentahar, 05]. On définit ainsi le rapport Felicity par : $R_f = P_2/P_1$.

2.1.4 Acquisition des signaux

2.1.4.1 Capteurs d'EA

Les capteurs les plus couramment utilisés en E. A sont de type piézo-électrique. Ils sont constitués d'une céramique piézo-électrique qui, lorsqu'elle est en contact avec le matériau transforme les ondes mécaniques en signaux électriques. Les capteurs peuvent être de type résonant ou de type large bande. Le choix du capteur va être orienté en fonction du domaine de fréquences des ondes générées par le phénomène physique étudié, de l'environnement expérimental :

- Large bande, ils possèdent une bande passante régulière pour un étendu fréquentielle assez large pouvant aller jusqu'au MHz. Ils ont l'avantage de modifier peu la forme réelle du signal mais ils ont une faible sensibilité.
- Résonnants, ils ont une bande passante moins large et un pic aux alentours d'une certaine fréquence. Ce pic de réponse entraîne une modification de l'allure des signaux et de leur contenu fréquentiel. Ces capteurs sont cependant les plus utilisés car ils présentent une meilleure sensibilité et permettent de détecter des signaux de plus faible amplitude [Marec, 08]

Pour cette étude les capteurs utilisés sont des capteurs piézoélectriques résonnants de type Micro 80, de 10mm de diamètre, de bande passante 100kHz-1MHz et présentant un pic de résonance aux alentours de 300 kHz.

En sortie de capteur, les niveaux de tension générés sont très faibles. Il est alors nécessaire d'amplifier, de filtrer éventuellement en fréquence (filtre passe bande) et de conditionner le signal (adaptation d'impédance pour le transport du signal, parfois sur de longue distance) à

l'aide d'un préamplificateur. Cette instrumentation spécifique minimise les perturbations induites par le milieu environnant.

2.1.4.2 Couplant

La transformation des ondes mécaniques en surface d'un matériau, en signaux d'émission acoustique, est réalisée par l'utilisation de capteurs généralement de nature piézoélectrique. Ceux-ci sont placés en surface du matériau, le couplage avec celle-ci étant assuré le plus souvent par l'utilisation d'un gel silicone. Le rôle du couplant est d'améliorer la transmission des ondes entre la surface de l'échantillon et le capteur, le couplant utilisé dans notre cas est une graisse silicone 500 (2301) KF.

2.1.4.3 Chaîne d'acquisition d'EA

Dans cette étude, un système d'acquisition des données d'EA de la société Euro Physical Acoustics (EPA) est utilisé avec quatre voies d'acquisitions. Les signaux d'EA détectés sont amplifiés à l'aide de quatre préamplificateurs de 40 dB de gain. Ils sont ensuite échantillonnés avec une fréquence d'échantillonnage généralement de 5 MHz en prenant 2048 points. Les signaux sont enregistrés par le système d'acquisition pour traitement ultérieur. Un seuil d'acquisition compris entre 42 dB est utilisé. Ce seuil est fixé à une valeur légèrement supérieure au bruit de fond afin de l'éliminer. Le système d'acquisition est calibré avant chaque essai en utilisant une procédure de casser de mine figure 2.3, qui permet de générer des sources étalons d'ondes élastiques simulant l'EA. Ces sources d'EA sont créés sur la zone de l'échantillon entre les capteurs d'EA.

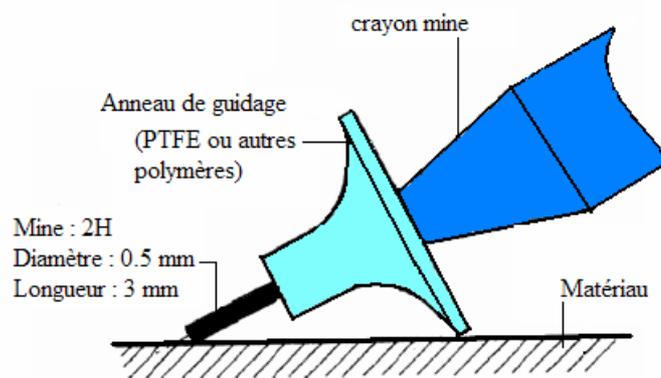


Figure 2.3. Dispositif expérimental pour la génération de source étalon artificiel d'ondes vibratoires élastiques.

Il suffit alors de vérifier la bonne localisation des sources créées et d'ajuster le temps d'arrivée des salves si besoin est par l'intermédiaire de la vitesse de propagation (la distance de propagation étant connue). On peut aussi vérifier que les caractéristiques (amplitude et énergie) des signaux reçus par les capteurs d'EA en fonction de la distance source-capteur restent identiques c'est-à-dire que l'atténuation des ondes dans le matériau n'est pas trop importante sur la distance de propagation. Ce test permet donc de localiser les sources d'EA, d'estimer la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau. L'atténuation des ondes reste négligeable pour les éprouvettes étudiées (moins de 3dB de perte pour la distance capteur-source).

2.1.5 Paramètres d'EA

2.1.5.1 Paramètres d'acquisition

Préalablement à toute acquisition, il est nécessaire de définir un seuil de détection (en dB_{EA}) en dessous duquel aucune salve ne sera détectée par le système d'acquisition utilisé dans l'environnement déterminé (remarque : dB_{EA} est l'unité acoustique utilisée en EA, référencée au microvolt-capteur, amplitude en $dB_{EA} = 20 \cdot \log[(V)/(V_{réf})]$ avec V , la tension électrique mesurée à la sortie du capteur en μV et $V_{réf}$, la tension de référence en sortie du capteur pour 0 dB_{EA} , soit 1 μV). Le seuil d'acquisition permet de définir le début d'une salve et par la même, son franchissement signifie le début des calculs pour les caractéristiques EA. Cependant, la durée réelle d'une salve peut varier de quelques microsecondes à quelques centaines de millisecondes. Il devient donc nécessaire, afin que ces calculs soit représentatifs du phénomène étudié, de pouvoir les achever au mieux et donc de définir correctement la fin de la salve. A cet effet et pour que le système soit auto adaptatif en fonction de la durée et de la forme de la salve, trois fenêtres glissantes temporelles sont utilisées pour déterminer principalement la fin d'une salve.

La première fenêtre appelée HDT (hit definition time) permet de déterminer la fin de cette salve. Après le premier franchissement de seuil, le système déclenche cette fenêtre temporelle (HDT). Tant qu'un dépassement de seuil est détecté durant le temps défini pour cette fenêtre temporelle, la salve n'est pas clôturée et cette constante de temps est reconduite. Au contraire, si pendant le temps défini pour le HDT, aucun dépassement de seuil n'est détecté, la salve est alors clôturée et les calculs sur celle-ci sont terminés.

Afin de s'affranchir du phénomène d'échos, de la dissociation des modes de propagation dans le matériau, il existe la fenêtre temporelle nommée HLT (hit lockout time). Ce paramètre permet alors de ne pas déclencher l'acquisition sur les échos de propagation et donc de comptabiliser ces échos en tant que signal d'EA à part entière. Le réglage de ces deux paramètres dépend donc beaucoup plus de la géométrie du matériau, de son environnement et des caractéristiques d'atténuation, que du type de source à détecter. En procédant par simulation, à l'aide de la source normalisée Hsu Nielsen (Norme NF A 09350) qui est un générateur d'ondes élastiques transitoires, il est possible de régler ces deux paramètres. Pour un même événement, si la composante de l'onde de volume n'est pas totalement dissociable de la composante de l'onde de surface, la salve résultante peut présenter deux maxima. La fenêtre temporelle PDT (peak definition time) est utilisée de la même façon pour définir correctement la valeur de l'amplitude maximale qui sert à caractériser la salve. Les valeurs expérimentalement sont : PDT = 50 μs , HDT = 100 μs et HLT = 400 μs .

2.1.5.2 Paramètres d'analyse

Afin de caractériser le signal EA, il existe un grand nombre de paramètres, qui lorsque la salve est numérisée, sont extraits, calculés et présentés pour affichage selon le mode choisi par l'utilisateur. Ces paramètres, dont une partie est présentée à la figure 2.4, sont définis de la façon suivante :

- Amplitude maximale: amplitude maximale du signal pendant toute la durée de la salve (dB_{EA}),

$$A = \log\left(\frac{V_{\max}}{1\mu V} - (\text{preampGain})\right)$$

- Temps de montée (μs): intervalle de temps qui sépare le premier dépassement du seuil de l'instant où l'amplitude maximale est atteinte,

- Durée (μs): intervalle de temps entre le premier et le dernier dépassement de seuil de la salve,
- Nombre de coups (sans dimension): nombre de fois où l'amplitude du signal dépasse la valeur du seuil,
- Energie (énergie absolue ou énergie d'EA, $1 \text{ aJ} = 10^{-18} \text{ J}$): l'intégrale du signal au carré sur la durée de la salve,

$$E_{abs}(T) = \int_T A^2 dt$$

$$E(T) = \int_T A dt$$

- Fréquence au pic ou fréquence maximale (kHz), c'est la fréquence au maximum de la transformée de Fourier discrète de la salve,
- Puissance partielle (kHz), représente la répartition d'énergie par bande de fréquences. Elle permet le réglage des bandes de fréquences pour caractériser la répartition énergétique spectrale de chaque salve. Les valeurs sont représentées en pourcentage de l'énergie totale de la salve. La densité spectrale d'énergie est toujours calculée à partir d'un kilo point extrait de la forme d'onde numérisée (par décimation).

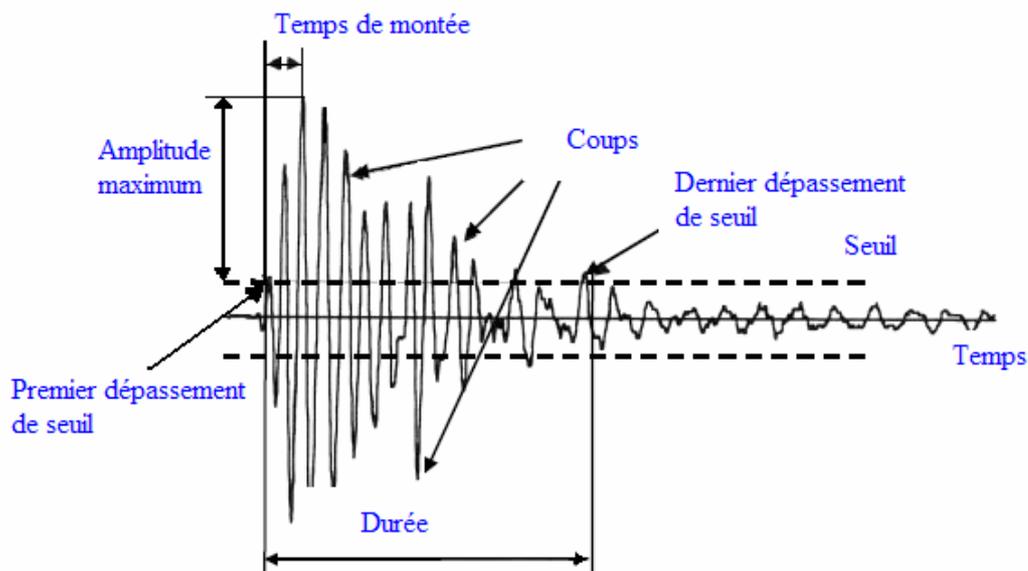


Figure 2.4. Principaux paramètres temporels d'une salve d'émission acoustique.

2.1.6 Analyse des données d'EA

2.1.6.1 Analyse spectrale

Le traitement des données d'EA peut être effectué à partir de l'analyse spectrale (transformée de Fourier) des formes d'ondes. Le calcul des densités spectrales fréquentielles des signaux d'EA à partir des transformées de Fourier est décrit ci après. La figure 2.5 représente un signal acoustique et la transformée de Fourier associée. Une fréquence propre à un phénomène émissif est mise en évidence.

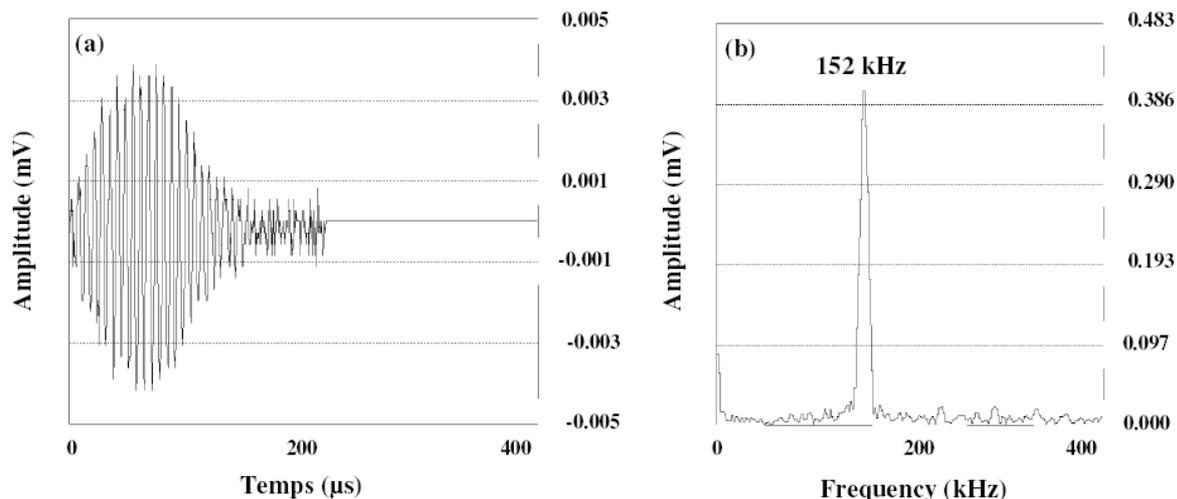


Figure 2.5. Signal d'EA et spectre fréquentiel associé respectifs (a) et (b)

2.1.6.2 Mode de calcul des densités spectrales fréquentielles.

Le système d'acquisition et le traitement acoustique DISP permet de calculer les densités spectrales fréquentielles des signaux acoustiques par utilisation de la transformée de Fourier. Cette transformée permet de décomposer en fonction quelconque non périodique $f(t)$ en somme de fonctions sinusoïdales simples $F(\nu)$. Les principales relations à retenir sont :

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t).e^{-j2\pi\nu t} dt$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\nu).e^{j2\pi\nu t} d\nu$$

La transformée de Fourier $F(\nu)$ est également désignée par spectre ou densité spectrale de la fonction $f(t)$. Pour simplifier son utilisation, on la représente généralement sous la forme :

$$F(\nu) = \rho(\nu).e^{-j.\phi(\nu)}$$

Dans ce cas, $\rho(\nu)$ est la densité spectrale d'amplitude et $\phi(\nu)$ est la densité spectrale de phase. Dans notre étude, la densité spectrale fréquentielle utilisée correspond à la densité spectrale d'amplitude.

2.1.6.3 Application aux signaux et déduction des paramètres fréquentsiels.

Le calcul de la densité spectrale des salves nécessite la sélection de la fenêtre temporelle dans laquelle il sera effectué. Cette fenêtre est définie par deux paramètres fixés par l'utilisateur : sa durée, et sa position par rapport au premier dépassement de seuil de la salve figure 2.6. La partie de la salve sélectionnée est modifiée par l'application d'une fonction de Hamming de la manière suivante :

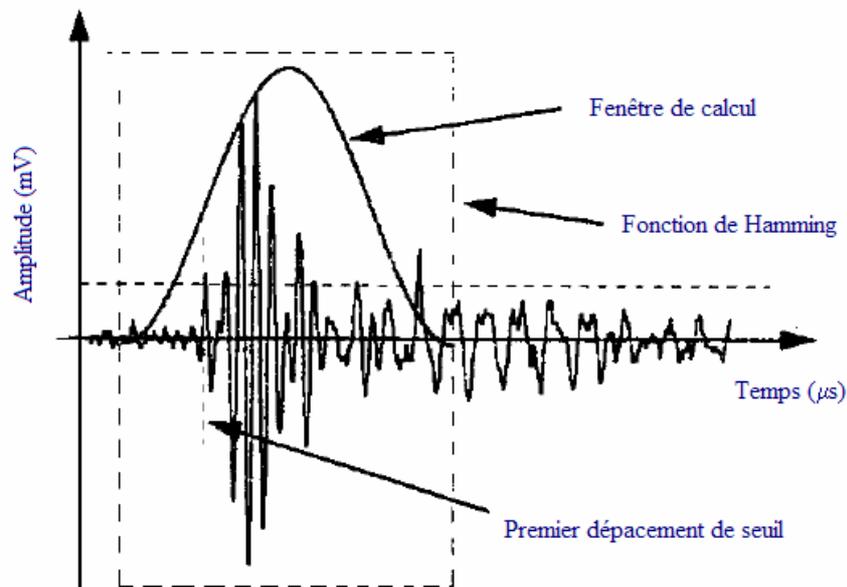


Figure 2.6. Schéma de principe du calcul de la densité spectrale d'une salve.

- Si N est le nombre total de points contenus dans la fenêtre 1 et k le numéro du point échantillonné parmi ces N points, le coefficient w appliqué à chaque K est :
- $w(k) = 0,54 + 0,46 \cos(2\pi k/N)$ pour $-N/2 \leq k \leq N/2$
- $w(k) = 0$ pour le reste de la fenêtre.

Le nombre de points 1, est égal au produit de la durée de la fenêtre, par la fréquence d'échantillonnage utilisée pour l'acquisition. Pour une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz, une fenêtre de 100 μ s contient 500 points.

2.2 Classification des signaux acoustiques

La classification est la détermination parmi un ensemble fini de classes, la classe d'appartenance d'un objet. C'est à dire définir les frontières qui existent entre les différentes classes. Appliquées à l'émission acoustique, ces techniques servent à identifier parmi un grand nombre de signaux, décrits par un certain nombre de paramètres, des classes de signaux de paramètres proches et donc provenant de phénomènes identiques au sein du matériau. On regroupe la classification en deux catégories figure 2.7, supervisées et non supervisées. Le terme de classification non supervisées signifie que les classes ne sont pas connues à priori par l'utilisateur Nous citons l'analyse en composantes principales, les k-means..etc. [Hyguet, 02 & Marec, 08], alors que Les méthodes supervisées nécessitent un jeu de données déjà identifié pour construire le modèle statistique. Les classes sont connues par l'utilisateur et elles ont a priori un sens pour ce dernier. Par exemple les techniques de l'analyse de Fisher, des k plus proches voisins.

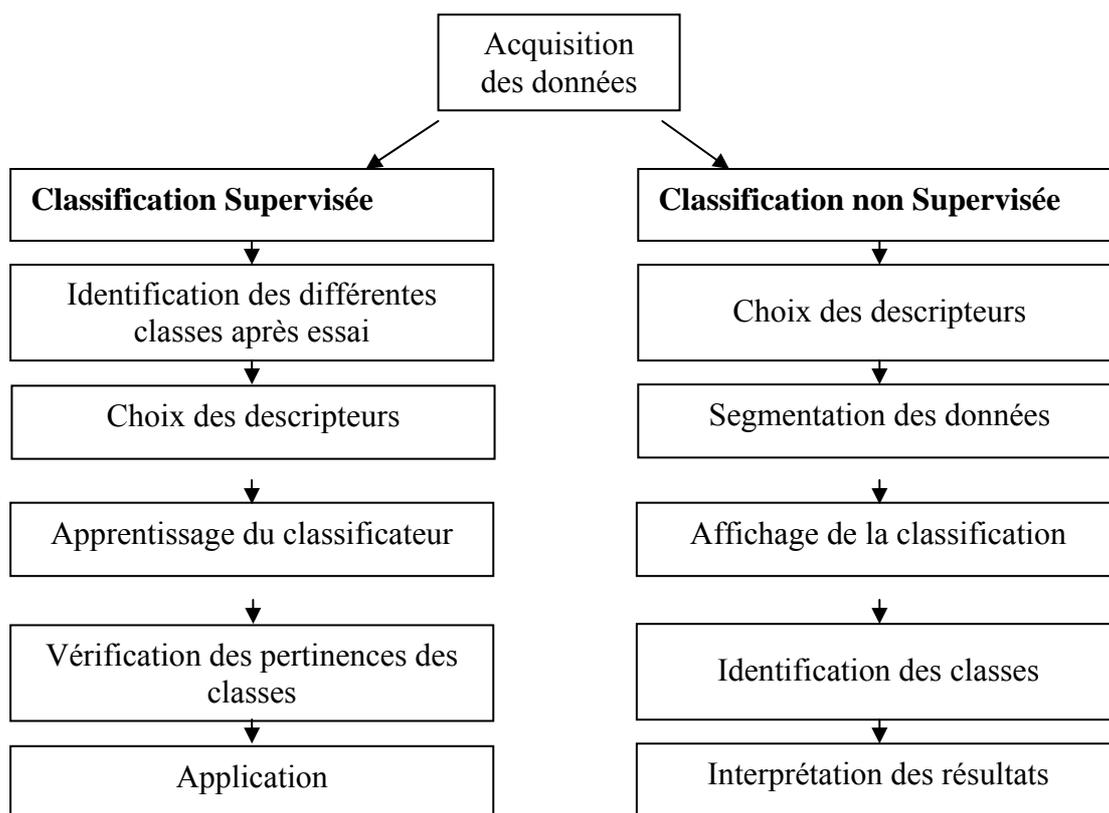


Figure 2.7. Etapes de classification supervisée et non supervisée.

2.2.1 Analyse mono paramètre

Une analyse empirique mono paramètre discrimine les mécanismes d'endommagement et les associe à des signaux d'EA typiques. La plupart d'entre elles portent sur un seul paramètre de classement qui est l'amplitude des signaux d'émission acoustique [Barre, 94 & Bentahar, 05].

2.2.2 Analyse multi paramétriques

L'analyse multiparamétrique des caractéristiques extraites des signaux d'EA est très utilisée. En effet, l'étude des fonctions de distribution et des multiples corrélations réalisables entre les différentes caractéristiques d'EA, observables en temps réel et en temps différé, est utilisée pour identifier les différents mécanismes sources. Cette méthode consiste à mettre en évidence, par le biais de la corrélation établie, s'il existe une ou plusieurs relations de dépendances particulières entre ces deux paramètres. L'observation de ces relations de dépendance par la représentation choisie permet alors d'identifier parmi la totalité des signaux d'EA (ou pour un nombre plus restrictif), s'il existe une seule et unique ou plusieurs populations de signaux. Il est alors possible d'en déduire le nombre de mécanismes émissifs au cours de l'essai et/ou d'établir un filtrage particulier pour supprimer les mécanismes "parasites". Chaque relation de dépendance est caractéristique d'un phénomène physique émissif ou d'une propriété des signaux d'EA.

2.2.3 Méthode de discrimination par les K-means

Une des techniques de classification non supervisée (clustering) la plus utilisée est la méthode de discrimination par les K-means. Cette démarche partitionne les données en K groupes, ou

"clusters", ou "classes". Le résultat est obtenu en positionnant K "prototypes", ou "Centroïdes" dans les régions de l'espace les plus peuplées. Chaque observation est alors affectée au prototype le plus proche (règle dite de la distance minimale). Chaque classe contient donc les observations qui sont plus proches d'un certain prototype que de tout autre prototype figure 2.8.

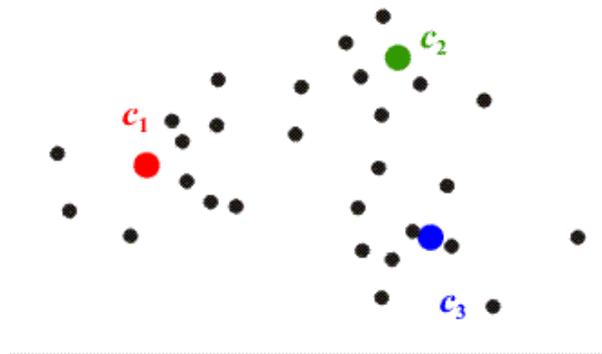


Figure 2.8. Centroïdes des classes par les K -means.

K -means est la méthode utilisée au cours de cette étude, c'est un algorithme itératif simple qui tend pour un nombre de clusters donné à minimiser l'écart au carré entre chaque point.

2.3 Travaux réalisés dans le domaine

[Anastassopoulos, 2000], a utilisé une classification non supervisée pour l'analyse et l'évaluation des données d'AE enregistrées pendant l'essai de cinq dispositifs aériens d'ascenseur, constitués de deux parties : composite et métallique, treize sondes résonnantes sont utilisées, six sur la partie composite et le reste sur la partie métallique, le dispositif aérien a été placé et chargé selon les directives de la norme ASTM, deux cycles de chargement ont été exécutés avec 10 minutes de maintien à la charge maximum, les salves d'EA, sont représentés dans un espace multidimensionnel par une matrice, dont les composants sont les descripteurs d'AE (amplitude, coups, etc.). La distance euclidienne est employée comme mesure de similitude entre les vecteurs modèles. Les données sont groupées au tour du centre des faisceaux pour former une classe, alors que les distances les plus éloignées sont assignées à une classe différente. Le groupement des données peut être facilement compris et les résultats peuvent être visuellement confirmés dans les espaces bidimensionnels. Cependant la difficulté principale de grouper dans un espace multidimensionnel est l'incapacité humaine à visualiser les propriétés géométriques d'un tel espace. Quatre algorithmes différents de classification ont été employés pour une étude paramétrique en groupant les données d'EA dans les classes s'étendant de deux à vingt-cinq. L'évaluation du nombre de classe a été fait au moyen des critères R_{ij} et Tou figure 2.9. Tous les deux sont des critères heuristiques basés sur le rapport des distances moyennes des centres de classes à la distance entre les classes. La minimisation de R_{ij} ou la maximisation de Tou en fonction du nombre résultant de classes peut être employée pour estimer le nombre de classes dans le data.

Les résultats de l'étude paramétrique réalisée avec l'algorithme de K -Means, le critère de R_{ij} est minimum à quatre classes (un deuxième minimum local observé à onze classes), alors que le critère de Tou est maximal pour trois et quatre classes. Par conséquent la classification des données en quatre classes a été considérée comme la plus représentative figure 2.9. L'algorithme supervisé, un réseau de neurones a été formé avec succès, en employant les résultats d'identification non supervisé.

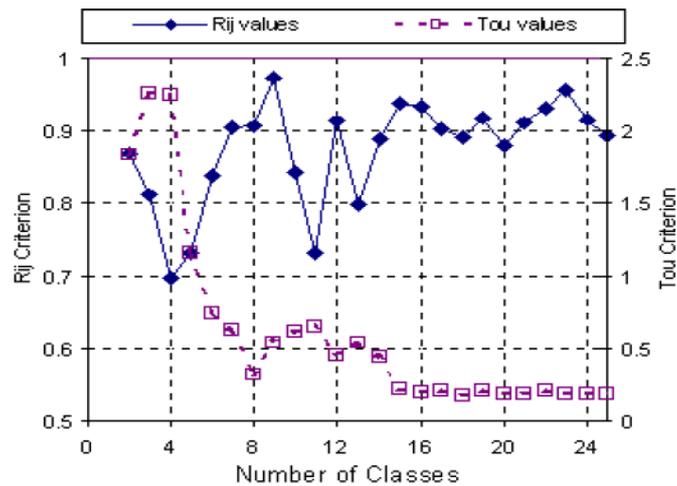


Figure 2.9. Estimation du nombre de classes [Anastassopoulous, 00].

[Benmedakhene, 99], a consacré son étude à l'effet de la vitesse sur l'initiation et la croissance du délaminage des matériaux composites en employant des approches de la mécanique de la rupture. Des éprouvettes de forme (DCB) sont utilisées pour des essais de traction monotone en mode I et des éprouvettes (SCB) instrumentées pour les essais dynamiques à vitesses variables. L'étude effectuée a permis d'établir un modèle schématisé de l'émission acoustique. Dans ce modèle figure 2.10, les différents niveaux d'amplitudes de signaux émis par les matériaux sous différents types de chargement sont assignés aux différents mécanismes de dommage. L'application de cette méthodologie expérimentale aux essais de décollement a permis un contrôle continu de la croissance du dommage. Ce type d'analyse a également permis d'accentuer l'aspect complémentaire des distributions d'amplitude d'émission acoustique avec les observations microscopiques.

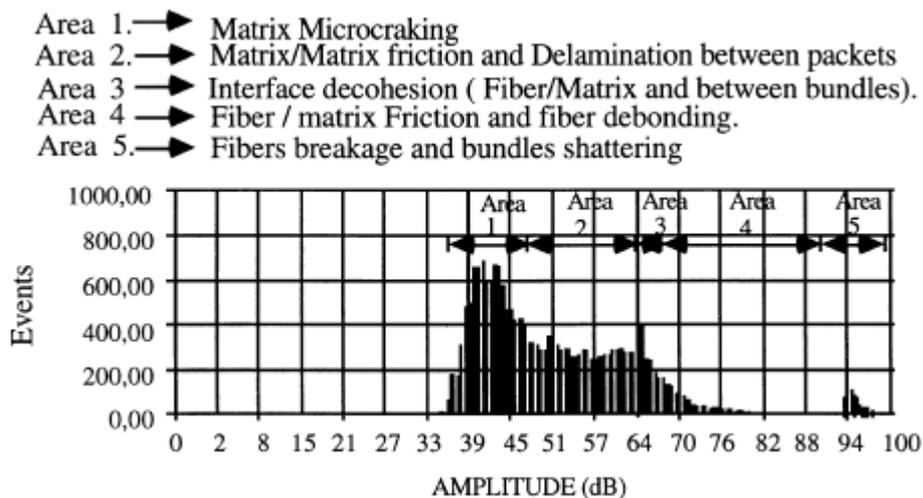


Figure 2.10. Distribution de l'amplitude et définition des secteurs, [Benmedakhene, 99].

[Bentahar, 05], a étudié le comportement mécanique des matériaux hétérogènes béton et composite base polymère, les échantillons étudiés sont endommagés par des essais mécaniques, il représente la réponse de chaque type de matériau aux essais statiques de compression et de traction et les mécanismes d'endommagement ayant lieu aux niveaux des constituants et des interfaces. Après avoir décrit le composite SMC et le béton, il introduit les méthodes d'identification des modes de vibration en résonance, puis présente les différentes

méthodes non linéaires utilisées pour la caractérisation de l'endommagement. Une description des différents modèles théoriques relatant le comportement élastique non linéaire des matériaux est donnée. Dans un premier temps, il présente la théorie d'élasticité classique. Après avoir montré l'incapacité de cette dernière à prendre en compte les comportements élastiques hystérétiques observés dans divers matériaux, les différents modèles qui tiennent compte de l'hystérésis selon une description phénoménologique dans un espace de pression sont décrites. Plus particulièrement, l'approche dite LISA (*Local Interaction Simulation Approach*), est utilisée pour la simulation du comportement non linéaire hystérétique du béton en résonance. Il décrit dans un premier temps les résultats issus de la caractérisation du béton avant de s'intéresser à sa limite de fonctionnement linéaire. Il s'intéresse essentiellement au comportement non linéaire hystérétique à l'état intact et endommagé. L'évolution de la fréquence de résonance en mode de vibration en épaisseur appelé « mode d'Young » est suivie pour des niveaux d'excitation croissants (*Dynamique Rapide*). Après avoir soumis le matériau à un conditionnement continu à fort niveau d'excitation, sa relaxation est suivie à travers la variation temporelle de la fréquence de résonance (*Dynamique Lente*). L'auteur se sert d'une adaptation du modèle LISA afin de reproduire qualitativement et quantitativement les variations fréquentielles relatives au comportement hystérétique non-linéaire du béton. Les résultats expérimentaux et simulés sont présentés de façon superposés. Dans le cas du SMC (*Sheet Molding Compound*) la caractérisation à travers le suivi du sixième mode de résonance en flexion, l'endommagement est quantifié dans un premier temps par l'évolution non linéaire de l'atténuation. Il observe ensuite l'évolution du temps de relaxation en fonction de l'endommagement. De nouveaux indicateurs d'endommagement liés à ces phénomènes dynamiques sont discutés. L'endommagement est également caractérisé par émission acoustique à travers l'énergie élastique libérée par le matériau. A l'aide de ce contrôle d'endommagement, il a corrélié les indicateurs non linéaires d'endommagement et l'énergie élastique libérée par le matériau. Cela a également permis de mettre en lumière des lois de variation logarithmique essentielles pour envisager l'estimation de la durée de vie des matériaux. Enfin, à l'aide de la discrimination des différents mécanismes d'endommagement, réalisée à partir des signaux d'émission acoustique, il propose comme perspective une corrélation entre ces mécanismes et l'évolution du comportement non linéaire.

[Bonnafous, 09], a présenté une étude expérimentale des mécanismes d'endommagement de composites tissés chanvre/époxy par la technique non destructive d'émission acoustique. Une étude multi échelle des distributions d'amplitude des évènements acoustiques a été développée. Des essais de traction sur la résine seule et sur le fil de chanvre seul, constituants élémentaires du composite, ont été réalisés afin de caractériser leurs signatures acoustiques propres. Les gammes d'amplitude pour ces constituants élémentaires ont ensuite été identifiées dans les distributions d'évènements acoustiques de composites chanvre/époxy. Des observations microscopiques des faciès de rupture des composites couplées à l'analyse statistique des distributions d'amplitudes ont permis d'identifier les différents modes d'endommagement dans les composites chanvre/époxy : Trois modes d'endommagement principaux ont été isolés par leurs amplitudes caractéristiques : les phénomènes matriciels, les phénomènes interfaciaux, et les phénomènes liés au renfort. Ces différents mécanismes d'endommagement ont été confirmés par des observations microscopiques des faciès de rupture des composites.

[Bussida, 08], a testé en traction statique et en flexion trois matériaux composites, stratifié à fibres métalliques, graphite/époxy (Gr/Ep) et carbone / carbone (C/c), différentes formes d'éprouvettes uniformes et entaillées sont utilisées. La technique d'émission acoustique est appliquée pour dépister l'accumulation de dommages pendant le chargement jusqu'à la

rupture. En outre la transformée en ondelettes est employée pour traiter les signaux d'EA afin d'obtenir l'information en temps et fréquences sur les principaux mécanismes de rupture. Ces derniers sont observés par microscopies optique et électronique. Les réponses acoustiques et mécaniques ont été examinées pour : le stratifié à fibres métallique les effets d'orientation et de température sont examinés, l'effet de l'exposition à la température pour le Gr/Ep et l'effet de degré de porosité pour C/C. Les résultats d'EA ont montré différents profils de dommages, point de transition et micro mécanismes de rupture en ce qui concerne l'influence de chaque paramètre (la température, orientation, et densité) sur les composites spécifiés. Pour le Gr/Ep, la transformée en ondelette indique la séquence d'événements dans le processus de rupture, la rupture des fibres est suivie de délaminage pour finir avec la fissuration matricielle.

[Giordano, 98], a proposé une nouvelle méthodologie d'analyse des modes de ruptures des matériaux composites au moyen des techniques d'émission acoustique. Le matériau étudié est un composite mono fibre de carbone/polyester employé comme modèle simple pour produire la rupture préférentielle de fibres. Un système de deux capteurs est utilisé pour acquérir les événements d'émission acoustique. L'observation optique de la rupture des fibres dans la lumière polarisée corrèle la ruine et la surveillance acoustique directe. La méthodologie proposée pour la génération et l'acquisition des événements acoustiques dus à un mode de défaillance spécifique permet d'exécuter une analyse basique du signal. Une analyse spectrale par FFT a été exécutée afin d'évaluer le spectre fréquentielle du signal. L'acquisition de différents événements pendant les différents essais de traction et leur comparaison a prouvé qu'une signature acoustique claire pourrait être caractérisée en terme de fréquence continue. Les premiers résultats indiquent que l'analyse spectrale des formes d'onde produite par la rupture de fibre ne peut pas être exécutée par FFT en raison du manque inhérent d'information sur le temps de rupture avec cette sorte de transformée.

[Huguet, 02], a fixé comme objectif l'évaluation sur site du niveau de dégradation des tuyauteries, en composite à fibres de verre et à matrice époxyde en utilisant une technique de contrôle non destructif capable de distinguer les principaux modes d'endommagement. La méthodologie utilisée consistait en l'analyse des signaux d'EA reçus lors d'essais de traction monotone sur des échantillons dit école : de résine pur et de composites unidirectionnels sollicités dans différentes directions par rapport aux fibres. L'étude d'un composite à matrice polyester, de caractéristiques semblables à celles d'un composite à matrice époxyde, a permis d'analyser l'effet d'un vieillissement hygrothermique sur l'activité acoustique. La classification utilisant l'amplitude comme seul paramètre a permis de distinguer correctement l'endommagement matriciel et les décohésions, par contre les ruptures de fibres sont difficilement identifiables. Les signatures acoustiques de la fissuration matricielle, la décohésion et les ruptures de fibre ont ainsi pu être identifiées. Le vieillissement hygrothermique provoque une diminution significative de la quantité de signaux d'émission acoustique. Cette baisse a été attribuée à l'endommagement matriciel. Un outil statistique a été créé permettant ainsi une classification automatique de chaque signal d'EA. Il se repose sur l'utilisation d'une carte de Kohonen (figure 2.11), ainsi que de la technique des k plus proches voisins ont été utilisées en parallèle, les résultats sont similaires. Des essais sur des matériaux composites stratifiés à plis croisés ont été menés dans le but de franchir une première étape vers l'application aux tubes en composite. L'EA reçue lors de ces essais s'est révélée difficile à interpréter selon les critères définis pour les échantillons école. Il a donc été choisi d'utiliser de manière aveugle une technique d'analyse statistique sur ces résultats, une séparation entre trois types de signaux est effectuée. Les formes de ces derniers correspondent pour deux d'entre eux à ceux observés sur les composites unidirectionnels et le parallèle a donc été fait pour les relier à l'endommagement matriciel et à la décohésion. Une troisième

forme de signaux, encore inconnue sur les échantillons unidirectionnels sollicités hors axes, a été attribuée au délaminage. Une zone de recouvrement pour les signaux de l'endommagement matriciel et du délaminage se sont révélés dans une même gamme d'amplitudes. Cette constatation a amené l'auteur à formuler les conclusions suivantes : les résultats obtenus sur des matériaux simples ne sont pas directement applicables à des matériaux complexes, même dans des conditions d'acquisition de l'EA strictement identique, dans le cas de conditions d'acquisition équivalentes, les formes des signaux restent en revanche identiques pour des phénomènes semblables au sein du matériau, car elles sont directement reliées à la nature de la source de l'endommagement. La classification des signaux peut donc se faire à partir d'un ensemble de descripteurs choisis judicieusement. La possibilité d'observer l'endommagement au sein d'un composite stratifié à plis croisés durant des essais suivis par émission acoustique semble être une voie pouvant justifier l'association des types de signaux identifiés par analyses statistiques aux phénomènes se produisant dans un matériau. De telles observations posent cependant des difficultés techniques considérables.

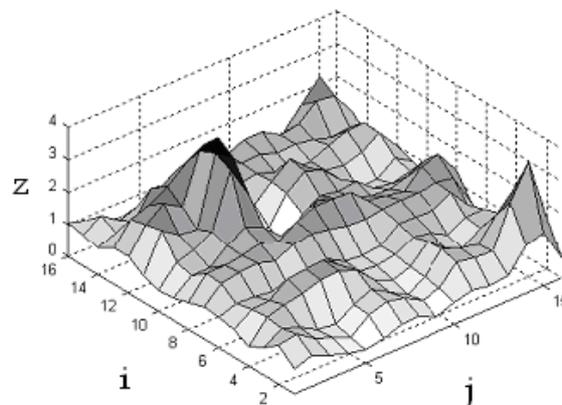


Figure 2.11. Représentation par la méthode NP-SOM de la carte de Kohonen, [Huguet, 02].

[Johnson M, 00], a utilisée une analyse spectrale pour séparer les signaux d'EA dues à différents genres de dommage, telles que la fissuration matricielle, la rupture des fibres et les délaminages locaux, les signaux ont été enregistrés pendant les essais de traction de stratifiés composites verre/époxyde avec différentes séquences d'empilements, $[0/90_2]_s$, $[90_2/0]_s$, $[+45/-45]_s$ et $[0_4]$. Les signaux d'EA ont été enregistrés comme des fonctions de temps par l'utilisation de capteurs d'EA large bande. Au cours des essais, l'auteur a constaté que la multiplication des types de rupture produisent des signaux acoustiques à amplitude, durée et fréquence variables. Il a également constaté qu'un type de dommage produit des signaux avec différentes caractéristiques selon sa localisation dans la couche où le dommage est apparu, et de son orientation par rapport à l'endroit du capteur.

[Kostopoulos, 07, 1], afin de voir l'influence des nano fibres de carbone (CNF) et/ou des particules (PZT) piézoélectriques sur le comportement mécanique à la rupture des stratifiés polymères renforcés de fibres de carbone, des additifs ont été ajoutés comme des dopants dans la matrice époxyde du stratifié. L'auteur a observé une augmentation de l'énergie de rupture de 100% après l'addition de 1% de CNF dans la matrice, alors que l'introduction des particules de PZT provoque la réduction de l'énergie de rupture, principalement due au caractère fragile des inclusions de ces particules. En outre, la technique d'émission acoustique a été employée pour surveiller le processus de rupture en mode I de ces stratifiés. Le logiciel Noesis de Physical Acoustics Corporation a été employé pour l'identification des classes selon des algorithmes non supervisés. La validation des résultats de la classification est évaluée en

utilisant des critères de validité R_{ij} et Tou . Ces deux critères fournissent des preuves de la compacité et de la séparation parmi les classes résultantes. Les valeurs minimales pour R_{ij} et les valeurs maximales pour Tou indiquent une classification réussie traduite par la formation de classes compactes bien définies.

[Kostopoulos, 07, 2], l'étude repose sur le suivi de l'activité acoustique pendant des essais de traction quasi statiques des éprouvettes DEN d'un composite à fibres céramiques SiC/MAS-L. Les paramètres d'acquisition pour les deux canaux actifs sont : le seuil et le gain dont les valeurs sont respectivement égales à 30 et 20 dB. Les données d'EA ont été classifiées en utilisant des algorithmes d'identifications non supervisés : Maxmin Distance-Forgy, Maxmin Distance-Cluster Seeking, Maxmin Distance-Isodata, k-means, les résultats ont été évalués sur des critères de validité de R et de T . L'examen au microscope a été employé pour corrélérer les classes avec les mécanismes de dommages qui leurs correspondent et fournissent ainsi l'identification du mode de rupture basé sur des données d'EA. L'identification par un modèle non supervisé a prouvé que c'est un outil puissant pour la classification des signaux acoustique, dans le cas des composites céramique, le procédé établi peut être répété et fiable.

[Marec, 08], l'auteur se base sur une classification non supervisée des données suivant une méthode de coalescence floue. L'objectif de cette analyse statistique multivariable est de discriminer les signatures acoustiques de matériaux composites sollicités mécaniquement et de rendre l'interprétation des données plus aisée. Pour valider les similitudes observées entre les signaux d'une même classe correspondent à un même mécanisme d'endommagement, deux méthodes ont été utilisées. La première consiste à effectuer des tests sur des matériaux modèles bien connus. La seconde méthode consiste à étudier les caractéristiques des formes de chacune des classes pour pouvoir valider la partition obtenue. La classification composée de la méthode de coalescence floue figure 2.12 et d'une ACP est appliquée sur des matériaux composites de type fibres/matrice. Cette méthode est d'abord utilisée pour des matériaux écoles bien connus tels que les composites unidirectionnels afin d'être validés, puis à des matériaux plus complexes tels que les composites à plis croisés et à des composites SMC. Ces matériaux sont soumis à différentes sollicitations mécaniques telles que la traction simple, le fluage en traction et en flexion trois points quasi statique. L'autre objectif est l'étude des matériaux hétérogènes de type béton polymère afin d'analyser leur comportement soumis à une flexion trois points statique et d'identifier les signatures acoustiques des différents mécanismes d'endommagement de ces matériaux granulaires. Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de l'émission acoustique pour quatre types d'échantillons de formulations différentes notamment en termes de renfort. Ils sont sollicités dans les mêmes conditions en flexion trois points sous une charge quasi statique jusqu'à la rupture. Cette méthode permet d'identifier les signatures acoustiques émises par trois principaux modes d'endommagement : la fissuration matricielle, la décohésion inter faciale et la rupture des agrégats. L'observation de micrographies optiques et électroniques post-mortem confirme les mécanismes d'endommagement au sein des matériaux granulaires à base polymère. Cependant, l'analyse limitée à l'étude des paramètres temporels n'est pas toujours pertinente pour caractériser les ondes acoustiques, notamment pour des composites de nature complexe où l'on peut observer des recouvrements des formes dans les projections obtenues par ACP. Ainsi, dans le but d'obtenir des informations supplémentaires sur les signaux d'EA afin de les discriminer, une méthode consiste à utiliser les transformées en ondelettes continues et discrètes.

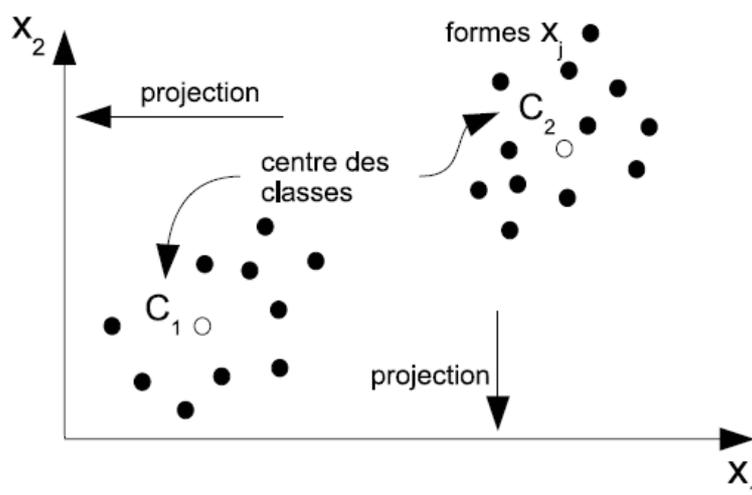


Figure 2.12. Identification par coalescence floue, deux classes dont les centres sont C_1 et C_2 .

L'objectif est l'amélioration de l'identification des différents mécanismes d'endommagement pouvant intervenir dans les matériaux composites sous charge en définissant de nouveaux descripteurs temps-fréquence ou temps-échelle pour la classification. L'application des transformées en ondelettes continues et discrètes aux signaux d'émission acoustique permettent de différencier les signaux typiques d'EA provenant de sources d'endommagement différentes telles que les microfissurations matricielles, les décohésions interraciales fibre-matrice et les ruptures de fibre. Dans la perspective de quantifier l'endommagement des matériaux composites et d'identifier les différents mécanismes qui en sont responsables une étude par acoustique non-linéaire en résonance de matériaux composites SMC graduellement endommagées est menée. Les essais de dynamique lente montrent une grande sensibilité à la présence et à l'évolution de l'endommagement. La classification à partir des signaux d'EA permet de connaître la contribution des différents mécanismes d'endommagement au comportement non-linéaire en dynamique lente lors du processus d'endommagement du matériau.

[Momon, 09, 1], par son travail vise à comprendre quels sont les mécanismes d'endommagement contrôlant la durée de vie du composite Cf / [Si-B-C] à hautes températures ($>600^\circ\text{C}$), et à mesurer les cinétiques de ces mécanismes pendant les essais mécaniques. Pour cela, des essais de fatigue statique et de fatigue cyclique ont été réalisés entre 700°C et 1200°C . Plusieurs indicateurs de l'endommagement ont été enregistrés en temps réel : la déformation, le module d'élasticité (mesuré à partir des boucles d'hystérésis des cycles de charge décharge) et l'émission acoustique (EA). L'objectif de l'analyse des données d'EA est d'établir une classification des données d'émission acoustique afin de regrouper les signaux ayant des caractéristiques semblables et de pouvoir par la suite les associer à un ou à plusieurs mécanismes d'endommagement du matériau. Un algorithme de classification non supervisée résultant de la combinaison de différents classificateurs (analyse en composante principale et l'algorithme des k-means) déjà optimisé sur un autre type de composite a été utilisée pour différencier les signaux provenant de différents mécanismes d'endommagement et de rupture (ruptures collectives ou individuelles des fibres, fissuration matricielle, décohésions fibre/matrice ou fil/fil, glissement interfaciale). Ensuite, une méthode de classification supervisée (K-plus proches voisins) a été développée, de manière à établir une classification des signaux en temps réel quels que soient la température. Cette méthode nécessite une bibliothèque de signaux déjà labellisés. Pour cela une bibliothèque a été créée

par fusion de données d'EA collectées au cours de plusieurs essais réalisés en fatigue statique à (1200°C-150 MP a) et en fatigue cyclique à (700°C-0/130MPa). La comparaison des deux méthodes a montré que la méthode supervisée prend en considération des classes que la méthode non supervisée n'arrive pas à représenter à cause de leurs faibles quantités.

[Momon, 09, 2], l'étude concerne deux types de composite à matrice céramique (CMC) : SiCf / [Si-B-C] et Cf / [Si-B-C], testés en fatigue statique à des températures supérieures à 450°C. La faisabilité de la technique d'émission acoustique pour prévoir la durée de vie est présentée. En effet, dans ce papier, deux approches basées sur l'analyse de l'énergie libérée sont appliquées. L'émission acoustique permet de mettre en évidence une certaine accélération de l'endommagement en cours d'essai. Ce changement de régime peut être détecté à partir d'une mesure de l'incrément d'énergie libérée pendant un intervalle de temps fixé. L'activité acoustique passe par un minimum au bout d'un certain temps, qui correspond à peu près à la demi-vie de l'éprouvette. Ainsi, cet indicateur noté R_{AE} est un moyen d'anticiper la rupture. De plus, une loi de type puissance (loi de Bénéioff) utilisée pour des activations pré sismiques est appliquée afin de quantifier la libération d'énergie. Pendant la déformation du composite sous chargement statique, des micro-fractures se créent et émettent des ondes élastiques d'une façon semblable aux tremblements de terre à plus petite échelle. Cette loi peut alors être utilisée comme une loi prédictive. Cette approche est intéressante et prometteuse en vue d'établir une prévision de la durée de vie du composite pour de longues durées. Cette loi permet de prédire le temps t_r où se produit la rupture en mesurant le taux d'endommagement, en termes d'énergie acoustique.

[Nechad, 04], a étudié le comportement en fluage de composites à matrice polyester renforcés par des fibres de verre, la méthodologie utilisée consiste à étudier tout d'abord l'endommagement des composites unidirectionnels du fait de leur relative simplicité. Une analyse conventionnelle des données d'EA a permis d'identifier les mécanismes d'endommagement élémentaires, la microfissuration matricielle et la décohésion fibre/matrice, suivi de l'étude de l'endommagement des matériaux hétérogènes et de composites stratifiés à matrice polymère renforcés par des fibres de verre à plis croisés et à des SMC. A partir des signaux d'EA les mécanismes d'endommagement sont identifiés. Parallèlement une étude microscopique au MEB est menée sur des éprouvettes post mortem.

Une combinaison d'EA – évaluation ultrasonore a permis de corrélérer la perte de rigidité à l'échelle macroscopique mesurée par ultrasons, l'activité acoustique témoigne de l'endommagement à l'échelle microscopique. Une partie de l'étude est consacrée à l'analyse du comportement en fluage des composites à matrice polyester par des fibres de verre complété par une description complète des trois régimes de fluage. Les évolutions des taux de déformation et d'émission acoustique ont été étudiées en fonction du temps. Des corrélations intéressantes ont été faites sur ces deux grandeurs. La forte dépendance entre le temps à la rupture et la durée du fluage primaire permettent d'envisager une méthode originale de prédiction de la durée de vie restante des matériaux. De manière à mieux comprendre ces corrélations, une modélisation de type modèle démocratique du faisceau de fibre, democratic fibre bundle model (DFBM) a permis de retrouver la plupart des caractéristiques du comportement en fluage primaire et en loi de puissance pour le fluage tertiaire avec des exposants du même ordre que ceux observés expérimentalement. De bonnes corrélations entre durée de vie et fluage primaire ont également été mise en évidence théoriquement.

[Sung-choong, 08], A présenté une analyse du processus de rupture de stratifiés composites (SEN) simple entaille, trois séquences d'empilements $[0_8]_s$, $[90_8]_s$ et $[+45_4/-45_4]_s$ renforcés de verre UD et deux autres $[0/90]_{16}$ et $[+45/45]_{16}$ renforcés d'un tissu de verre satin, l'acquisition

est basés sur les signaux d'EA à amplitude élevée. La classification du type de signal se fait selon la bande de fréquence dominante et de sa grandeur par l'intermédiaire de FFT, des observations microscopiques combinées microscope optique de réflexion et microscope à transmission, ont été exécutées afin de soutenir l'efficacité de l'analyse basée sur les signaux d'EA à amplitude élevés. Il a été montré que les signaux d'EA à amplitude élevée décrivent bien le processus de rupture des composites stratifiés SEN avec différentes orientations de fibre. Les résultats obtenus indiquent que la fissure se propage parallèlement à la direction initiale de l'entaille seulement dans le cas des éprouvettes $[90_8]_s$, mais pour les autres éprouvettes la direction finale de la fissure principale est conforme à l'orientation des fibres. Par conséquent, la direction de propagation de la fissure dans les stratifiés SEN est principalement affectée par l'orientation des fibres et est indépendamment de la direction initiale de l'entaille. Le comportement du taux élevé d'événements d'amplitudes décrit bien l'histoire de la rupture de fibre dans les composites stratifiés SEN, qui pourraient être utilisé comme approche simple et puissante pour surveiller le mode de dommage majeur qui est la rupture de la fibre en combinaison avec la classification des types de signaux. Néanmoins, pour plus de compréhension et de précision pour interpréter les signaux acoustiques générés, l'auteur recommande que des analyses dans le domaine fréquentielle et des observations de l'état de dommage devraient être accompagnées d'une étude basée sur les signaux d'EA à amplitudes élevées.

[Proust, 06], a traité l'effet de la contrainte normale interlaminaire sur l'amorçage du délaminage dans le but de proposer un critère d'amorçage du délaminage issu du bord libre d'un stratifié. Cette dégradation est due à la présence, au voisinage des bords, de contraintes interlaminaires hors plan dont le calcul est réalisé à partir du logiciel CLEOPS couplé à un modèle d'endommagement intralaminaire. A priori deux aspects indépendants l'un de l'autre, sont développés simultanément, la mise en œuvre des concepts théoriques nécessaires à la définition d'un critère interlaminaire, et l'utilisation d'essais spécifiques permettant de déterminer expérimentalement l'influence de la contrainte normale interlaminaire. La démarche appliquée pour déterminer expérimentalement l'influence de la contrainte normale interlaminaire a imposé la réalisation d'essais d'amorçage du délaminage en traction et en compression. Les paramètres intrinsèques au matériau ont été identifiés à partir des résultats d'essais suivis par émission acoustique. La reconnaissance de forme des signaux d'EA permet de progresser dans l'analyse de problèmes complexes. Une analyse multiparamétrique par réseaux de neurones via le logiciel Noesis figure 2.13 a été réalisée afin d'isoler la signature des délaminages. L'exploitation des essais menés sur l'empilement $[\pm 10_n]_s$ a permis de mettre en œuvre un critère en cisaillement pur. Il a ainsi été montré que les propriétés de l'interface sont indépendantes de l'orientation des couches adjacentes à l'interface délaminant. La contribution de la contrainte normale interlaminaire à l'amorçage du délaminage a été étudiée à partir des essais de traction et de compression réalisés sur l'empilement $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$ se délaminant en mode mixte. L'effet du cisaillement interlaminaire est alors supposé connu. Cette étude montre que la prise en compte des contraintes de cisaillement interlaminaire ne suffit pas à prédire correctement l'amorçage du délaminage au bord de cet empilement. Un critère, traitant les phénomènes de traction et de compression d'interface par des formulations différentes, a donc été considéré. La mise en œuvre de ce critère, réalisé à partir des résultats d'essais sur l'empilement $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$, a permis de prédire avec une bonne précision l'amorçage du délaminage au bord de cet empilement dans les deux cas de sollicitation. Cependant, les hauteurs émettent quelques réserves sur la pertinence des valeurs des paramètres de compression identifiés, car la fissuration constatée au bord des empilements $[15_{2n}/90_n/-15_{2n}]_s$ laisse subsister un doute quant à l'antériorité du délaminage par rapport à la fissuration intralaminaire de la couche externe à 15° . De plus, l'épaisseur importante du pli de

base a conduits à tester des stratifiés relativement épais. Leur chargement, à partir du montage de flexion 4 points, s'éloigne d'une sollicitation uni axiale uniforme. Il n'est donc pas certain que l'identification soit faite dans les conditions requises.

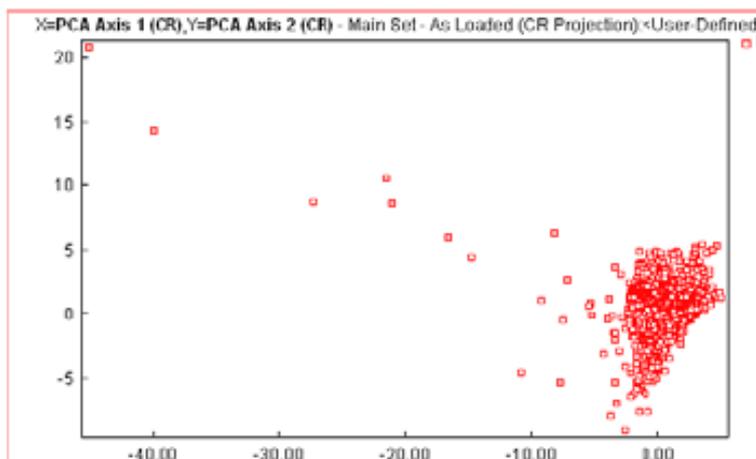


Figure 2.13. Projection de données d'EA suivant les vecteurs propres, [Proust, 06] .

[Zhuang, 06], par un tel travail l'auteur a étudié le suivi des mécanismes de dommages dans un composite stratifié (UHMWPE/HDPE) soumis à un chargement de traction monotone par la technique de l'EA. Le processus de croissance du dommage du stratifié renforcé de fibres est une accumulation des mécanismes de dommages de base, tels que l'arrachement fibre-matrice, la fissuration de la matrice, la rupture de la fibre et le délaminage. Les mécanismes du dommage sont observés par microscope électronique à balayage. Les corrélations ont été établies entre les mécanismes de rupture dominant et l'événement d'EA en fonction de l'amplitude pour les éprouvettes modèles ayant montrés les mécanismes dominants des dommages. Les résultats ont montré arrachement fibre-matrice, déformation plastique et fissuration de la matrice, arrachement de fibres, rupture de fibres et délaminage interlaminaire. Ces mécanismes sont associés à la gamme d'événements acoustiques selon les amplitudes respectivement : 30 - 45 dB (événement basse amplitude), 30 - 60 dB (événements basse amplitude), 60 - 80 dB (événements moyens amplitude), 80 - 97 dB (événements élevés d'amplitude) et 60 - 85 dB (événements moyens d'amplitude). Les résultats de cette étude ont montré que la technique d'AE est un outil viable et efficace pour identifier les mécanismes de dommages des composites d'UHMWPE/HDPE.

2.4 Technique expérimentale

L'acquisition des signaux acoustiques est réalisée à l'aide d'une chaîne EPA. Ce système est composé d'une carte PCI-2 et d'un micro-ordinateur figure 2.14. Les signaux d'émission acoustique sont convertis par des capteurs différentiels piézoélectriques de type R10, résonnant à 250 KHz et de surface de contact de diamètre de 10 mm. Ces signaux sont amplifiés par un préamplificateur avec 40 ou 60 dB de gains, dans une bande de fréquences de [175 à 1000 KHz]. Ils sont ensuite convertis par la carte PCI-2 qui les numérise et procède à l'extraction des paramètres d'émission acoustique. Les données issues des cartes sont transmises au micro-ordinateur, pour affichage en temps réel, l'acquisition est faite à l'aide du logiciel AEwin, le stockage et le post-traitement est fait avec le logiciel NOESIS selon une méthode de classification multiparamétrique non supervisée K means. L'algorithme de classification non supervisée représente un processus itératif se déroulant en 7 étapes figure 2.15.



Figure 2.14. Banc d'essais et acquisition des signaux acoustiques.

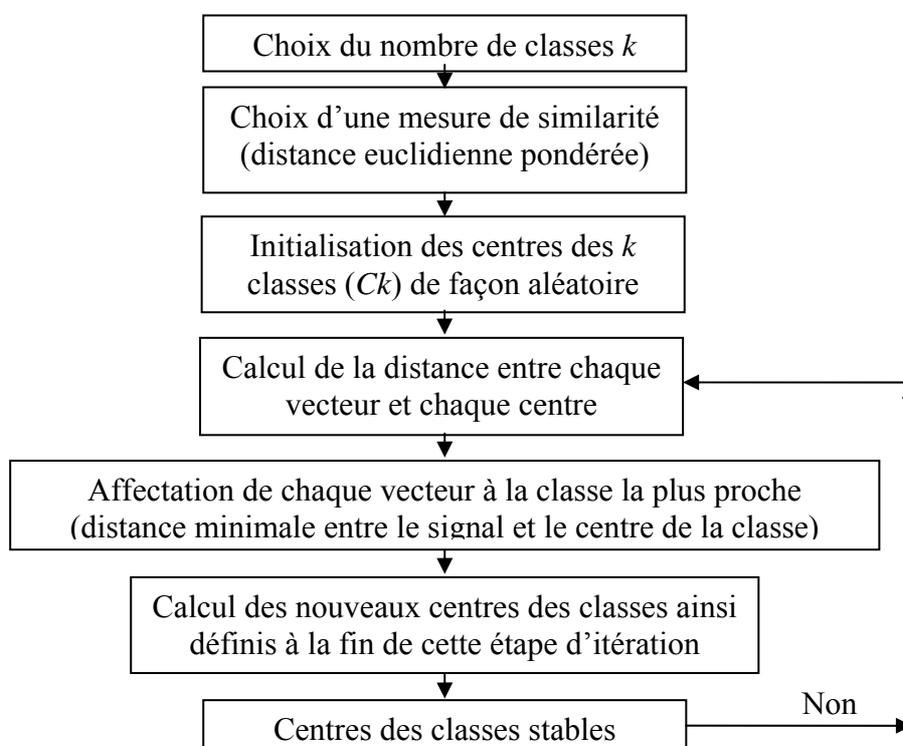


Figure 2.15. Algorithme des k means.

Le traitement des signaux acoustiques est réalisé à l'aide du logiciel Noesis, en utilisant la méthode non supervisée des K-means. Le nombre de classes est optimisé en prenant la valeur minimale du facteur R_{ij} [Anastassopoulos, 00] par balayage d'un nombre de classes dans une gamme allant de 2 à 5.

2.5 Application de l'EA aux essais statiques

2.5.1 Cas de la flexion trois points statique

Le traitement des données acoustiques des essais de flexion trois points statique présentés au premier chapitre, ayant pour bases les démarches d'analyses retenues (k-means et R_{ij} min) a conduit à une représentation graphique des résultats (figures 2.16 et 2.17).

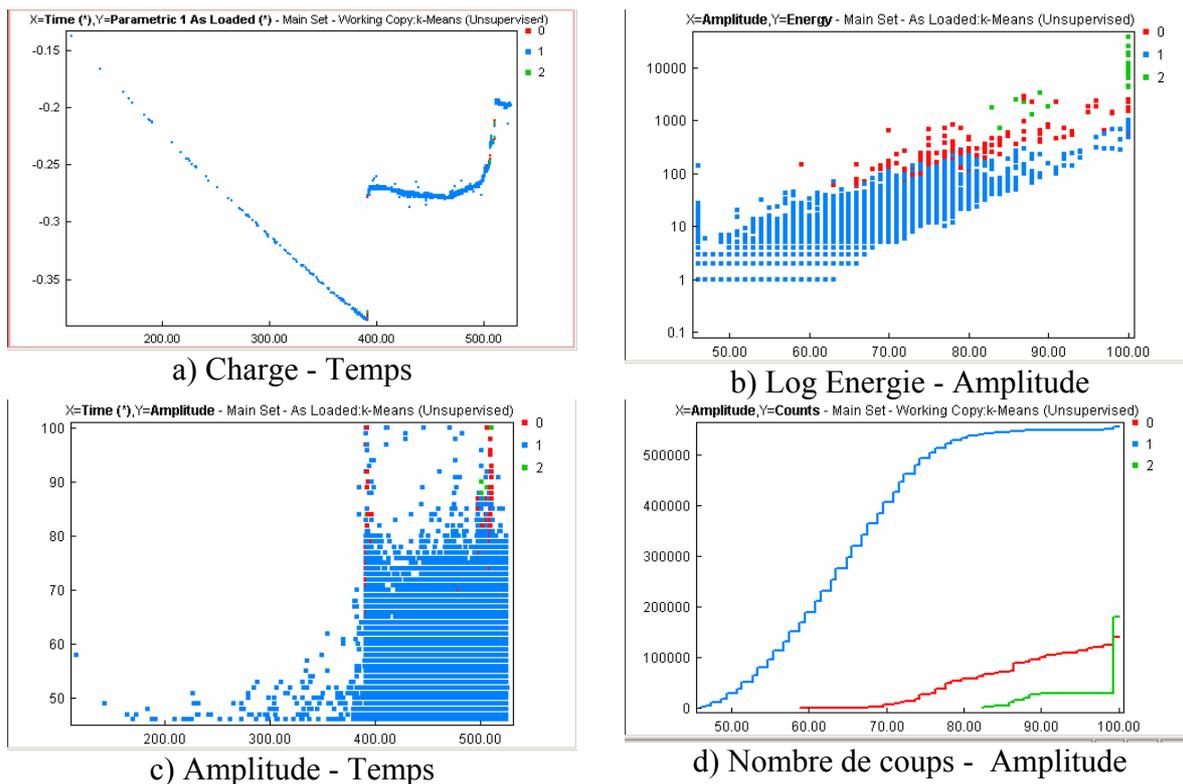


Figure 2.16. Classification des signaux d'EA, matériau [-30/0/30]₁₀.

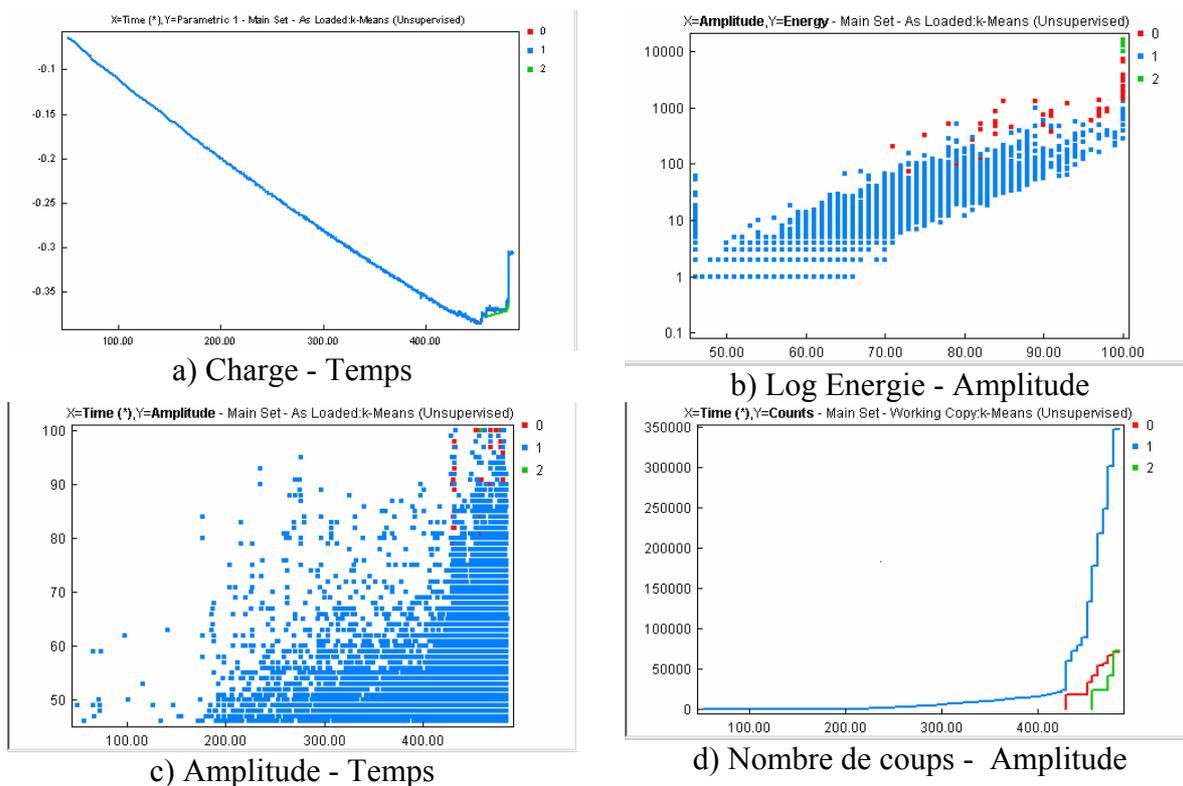


Figure 2.17. Classification des signaux d'EA, matériau [-60/-30/0]₁₀.

2.5.2 Cas de la traction statique

De même que pour la flexion trois points, nous reportons sur les figures 2.18 à 2.21, le traitement des données acquis lors des essais de traction statique du second type de matériaux.

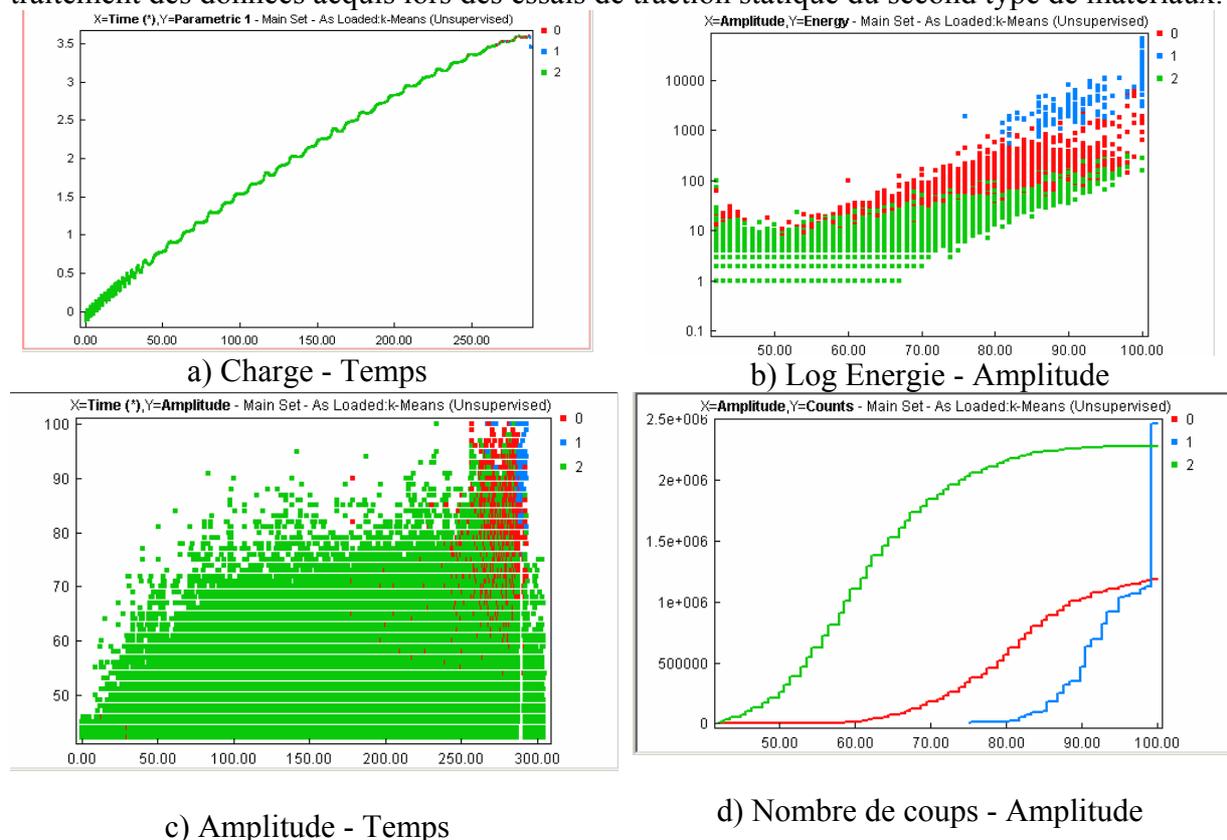


Figure 2.18. Classification des signaux d'EA du matériau U.

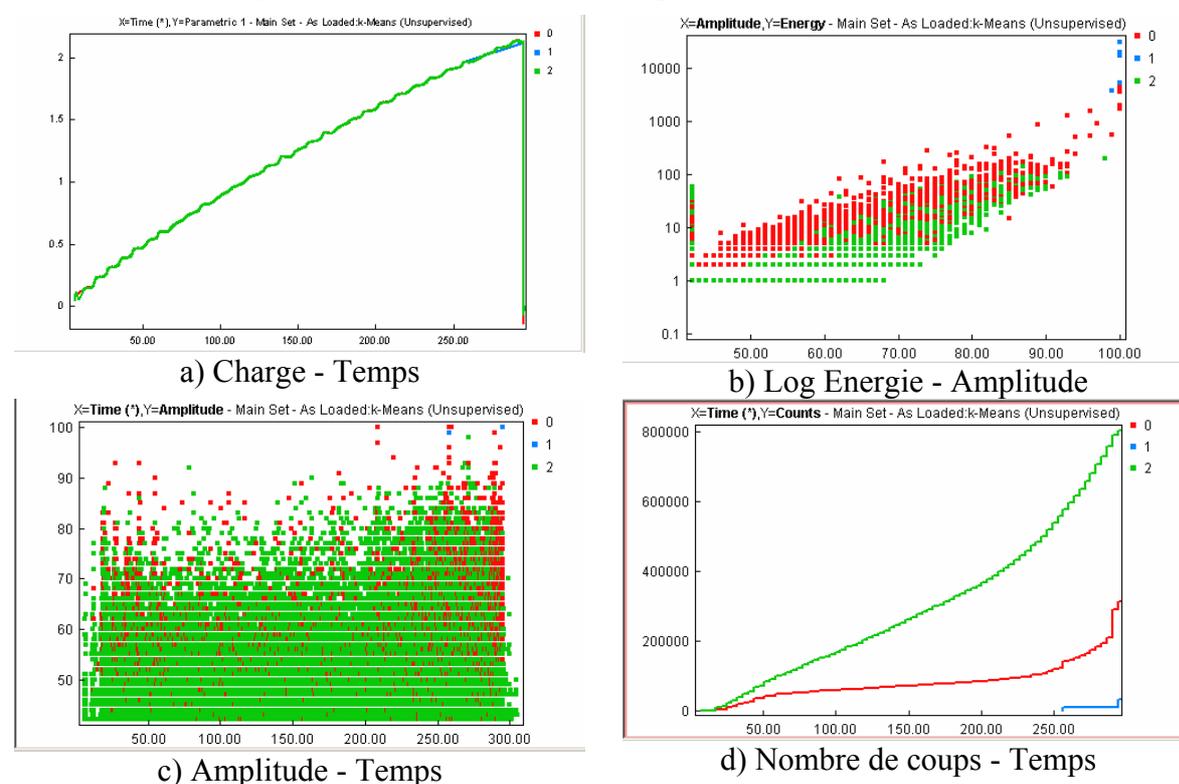


Figure 2.19. Classification des signaux d'EA du matériau C1.

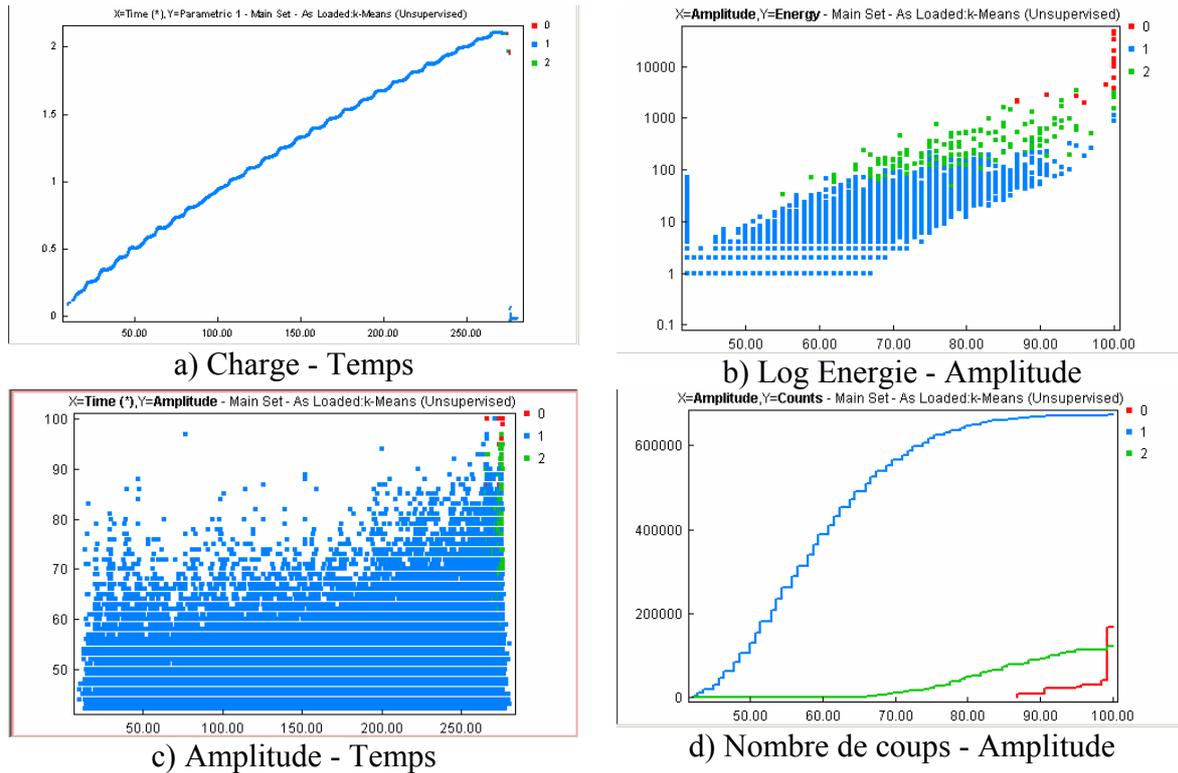


Figure 2.20. Classification des signaux d'EA du matériau C2.

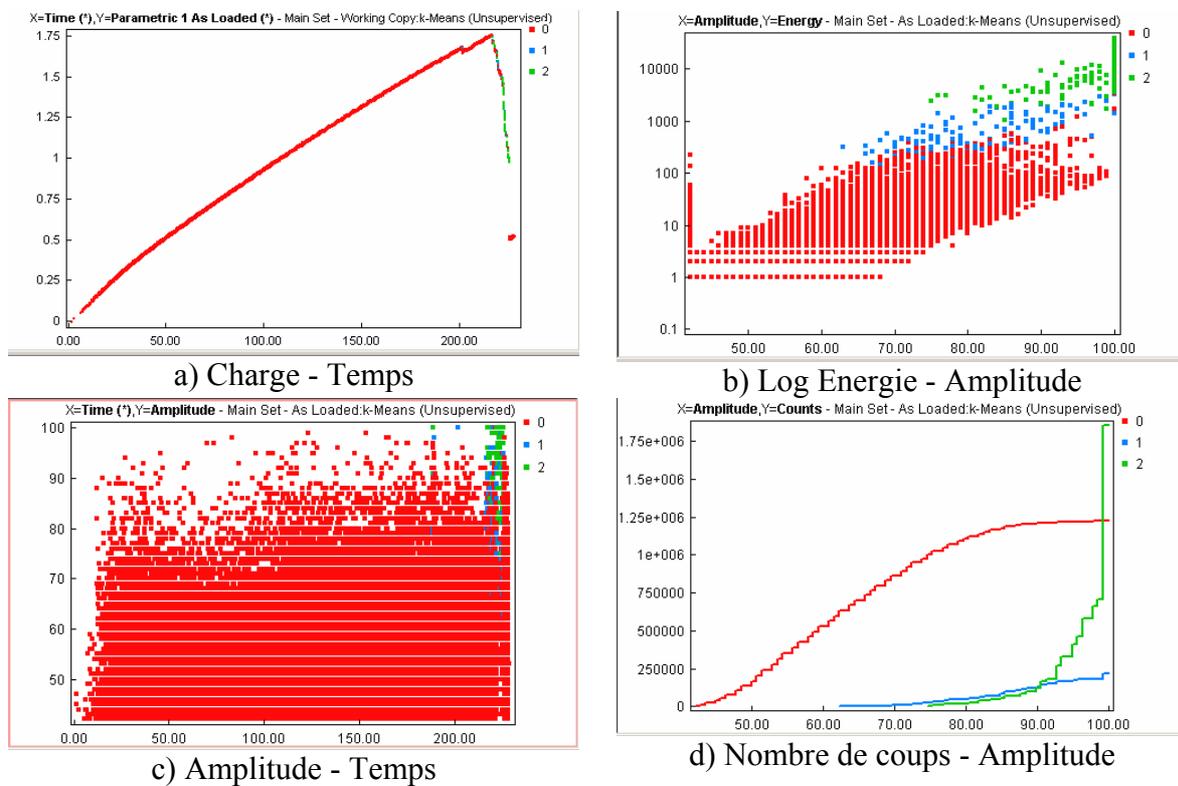


Figure 2.21. Classification des signaux d'EA du matériau C3.

2.5.3 Analyse des résultats en statique

Les courbes de comportement mécanique des différents types de stratifiés chargés en flexion et en traction statique, montrent une très bonne corrélation essais mécaniques émission acoustique :

- Figure 1.9a et b comportement mécanique charge flèche et figures 2.16a et 2.17a émission acoustique charge temps, cas de la flexion statique,
- Figures 1.15a à d comportement mécanique charge déplacement et figures 2.18a à 2.21a émission acoustique charge temps; cas de la en traction statique.

Dans le cas de la flexion 3 points statique trois classes d'endommagements ont été décelées (tableau 2.1).

Tableau 2.1 Correspondance des modes d'endommagements à la classification des signaux acoustiques, cas de la flexion statique.

	Rupture matricielle	Rupture de l'inter plis	Rupture de fibres
	Classe 1	Classe 0	Classe 2
Nombre de coups cumulés	5,5 E+5	1,2 E+5	1,6 E+5
Log Energie (aJ)	1 - 800	80 - 4000	800- 50 000
Amplitude (dB)	40 - 100	58 - 100	85-100

a) Matériau [-30/0/30]₁₀

	Rupture matricielle	Rupture de l'inter plis	Rupture de fibres
	Classe 1	Classe 0	Classe 2
Nombre de coups cumulés	3,5 E+5	0,7 E+5	0,7 E+5
Log Energie (aJ)	1 - 1000	80 - 9000	>10 000
Amplitude (dB)	40 - 100	70 - 100	100

b) Matériau [-60/- 30/0]₁₀

Dans le cas de la traction statique le nombre de classes recensées est également de trois (tableau 2.2).

Tableau 2.2 Correspondance des modes d'endommagement à la classification des signaux acoustiques, cas de la traction statique.

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 0	Classe 1
Nombre de coups cumulés	2,0 E+6	1,1 E+6	2,5 E+6
Log Energie (aJ)	1-200	10-5000	600-100 000
Amplitude (dB)	40-90	55-100	75-100

a) Matériau U : [(0)]₈

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 0	Classe 1
Nombre de coups cumulés	8 E+5	3 E+5	0,6 E+5
Log Energie (aJ)	1-100	2-2500	5000-50 000
Amplitude (dB)	40-90	45-90	> 90

b) Matériau C1 : [(0/90)_s]₂

	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	1-900	100-5000	1000-50000
Amplitude (dB)	40-90	65-90	> 90

c) Matériau C2 : [(0/90)₂]_s

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 0	Classe 1	Classe 2
Nombre de coups cumulés	1,2 E+6	2,5 E+5	1,7 E+6
Log Energie (aJ)	1-1000	200-2000	1000-50000
Amplitude (dB)	40-90	65-90	80-100

d) Matériau C3 : [(0₂/90₂)]_s

En flexion ; les premiers endommagements apparaissent dans la matrice. Ils sont localisés au niveau des couches extrêmes, suivi dans l'ordre par la rupture de l'inter plis et la rupture des fibres. Cet d'endommagement est caractérisé par de faibles amplitudes, de faibles énergies et un nombre de coups élevé. Il est recensé essentiellement au niveau des couches orientées à zéro degré. Le stratifié [-30/0/30]₁₀ présente le plus grand nombre de coups cumulés par rapport aux différents types d'endommagements localisés.

Les essais de traction statique ont confirmé la fissuration matricielle aux caractéristiques acoustiques déjà obtenues en flexion pour les stratifiés testés.

Ces résultats sont conformes à ceux décrits en littérature [**Huguet, 02**]. La décohésion fibre matrice et les ruptures de fibres ont respectivement pour caractéristiques, des énergies de ruptures d'intensité moyennes et fortes. Ces dommages correspondent à des nombres de coups cumulés différents selon la séquence d'empilement

2.6 Application de l'EA aux essais cycliques

2.6.1 Cas de la flexion trois points cyclique

De même que pour les essais statiques, les figures 2.22 à 2.23 représentent le classement des signaux acoustiques en fonction de différents paramètres dans le cas de la flexion cyclique.

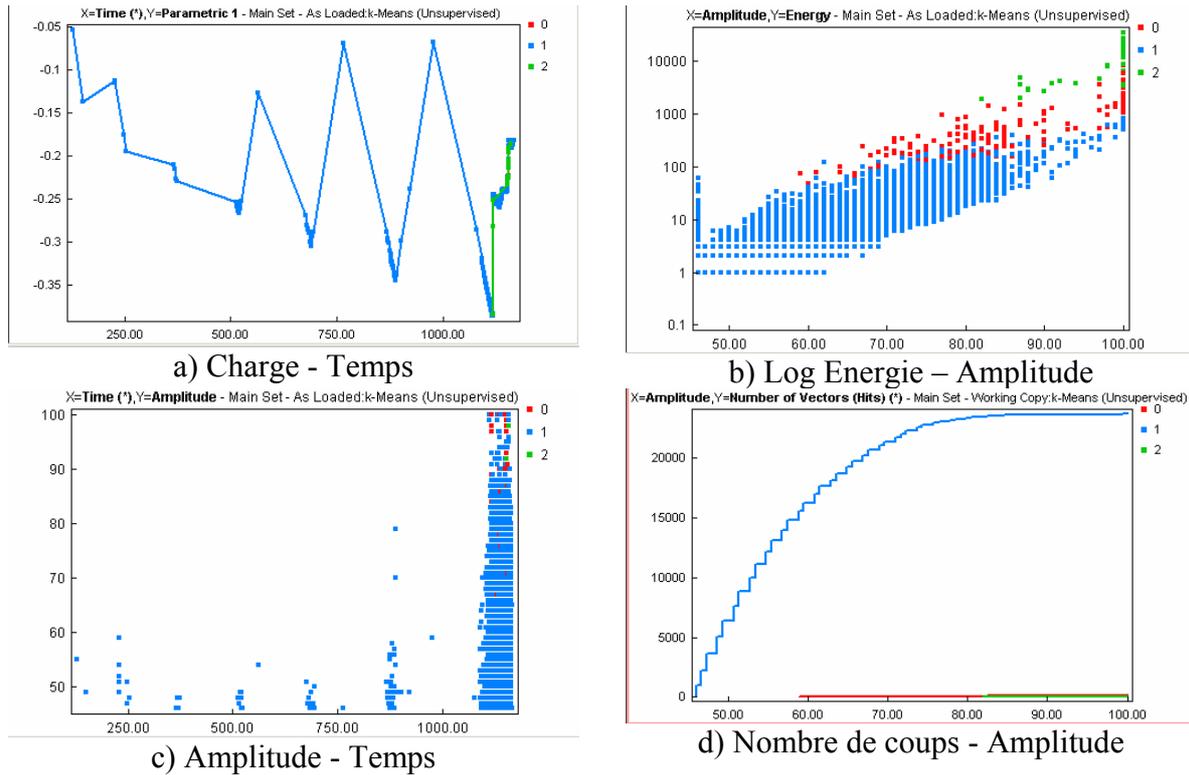


Figure 2.22 Classification des signaux d'EA du matériau [-30/0/30]₁₀.

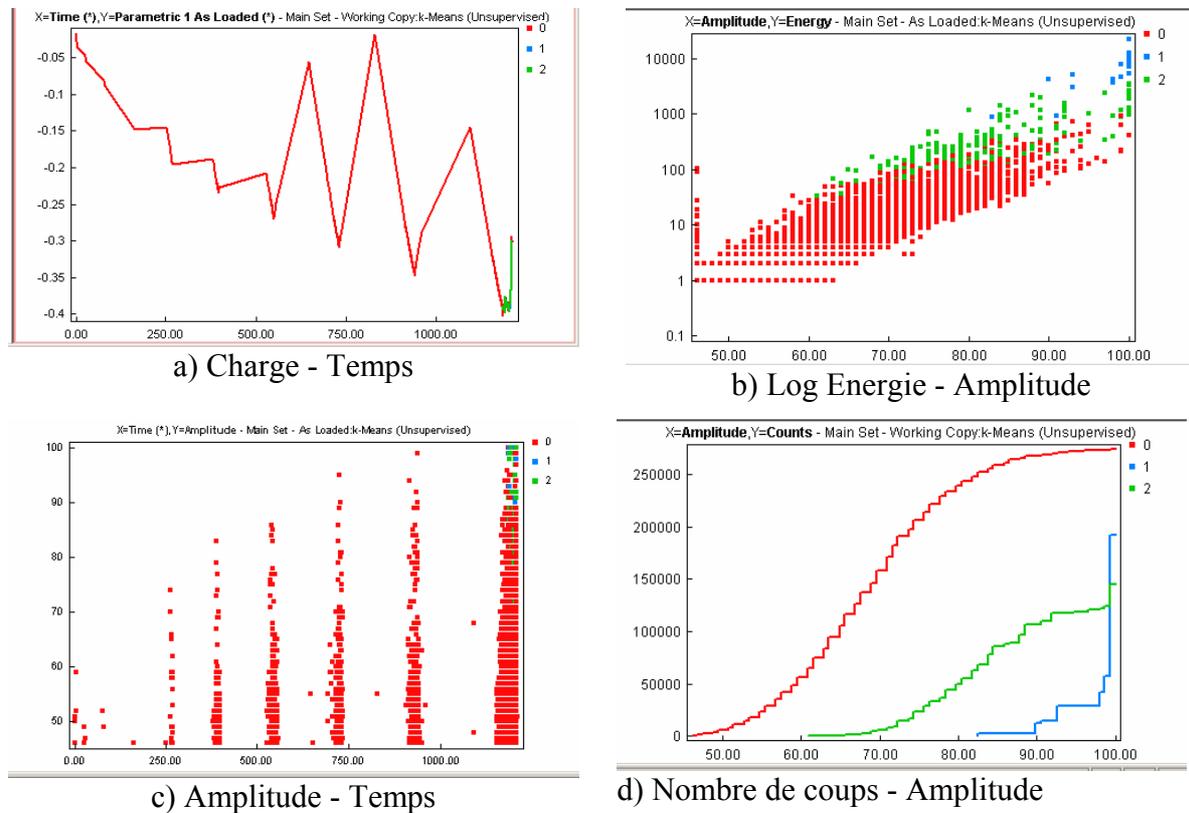


Figure 2.23. Classification des signaux d'EA du matériau [-60/-30/0]₁₀.

2.6.2 Cas de la traction cyclique

Les figures 2.24 à 2.27 représentent le classement des signaux acoustiques dans le cas de la traction cyclique.

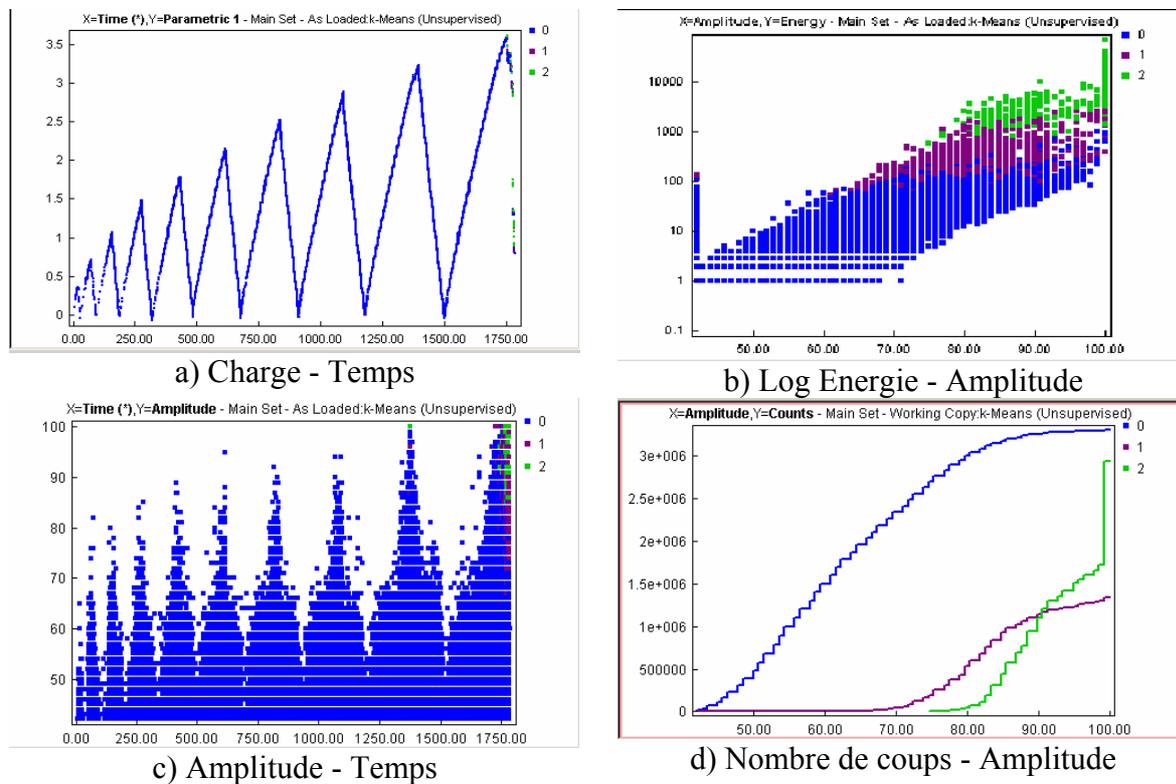


Figure 2.24. Classification des signaux d'EA du matériau U.

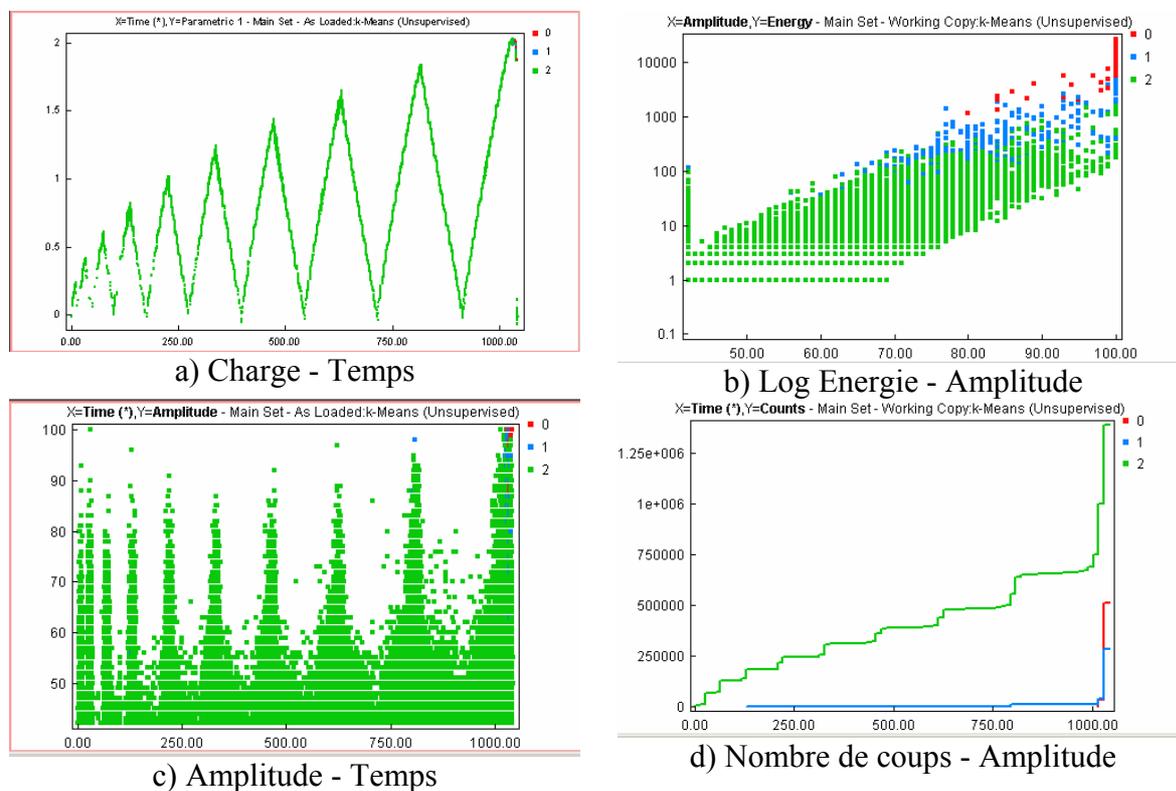


Figure 2.25. Classification des signaux d'EA du matériau C1.

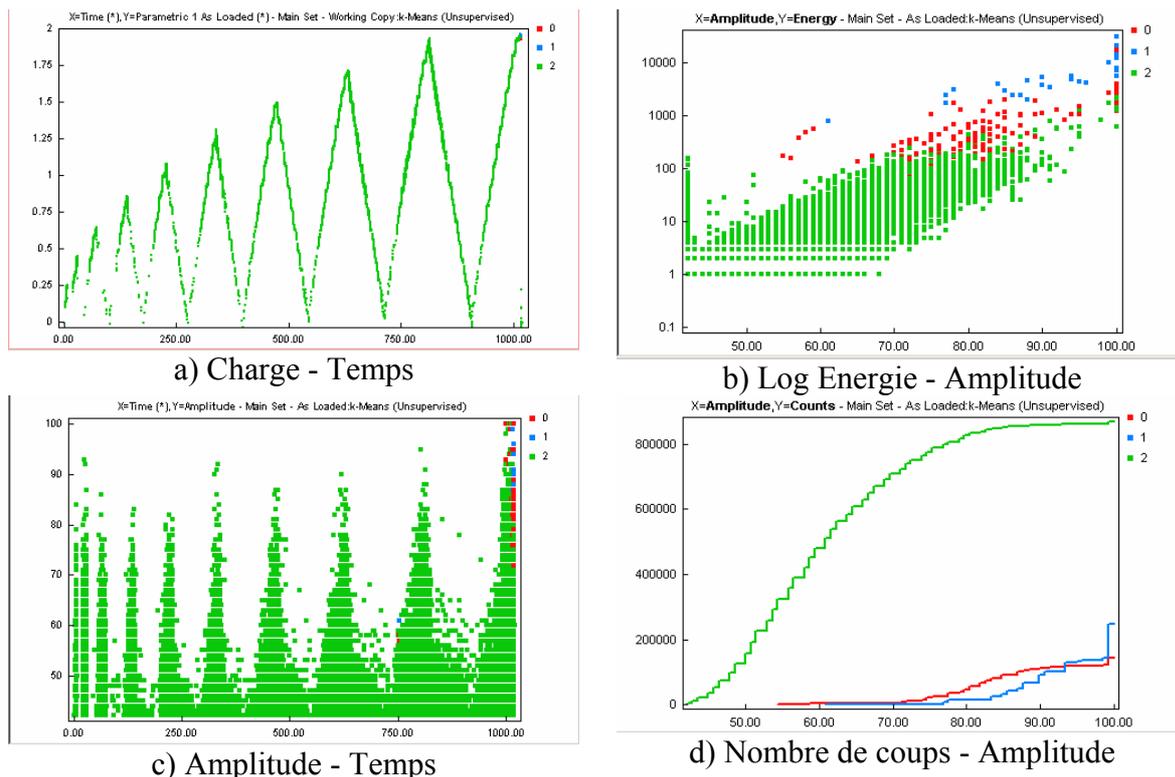


Figure 2.26. Classification des signaux d'EA du matériau C2.

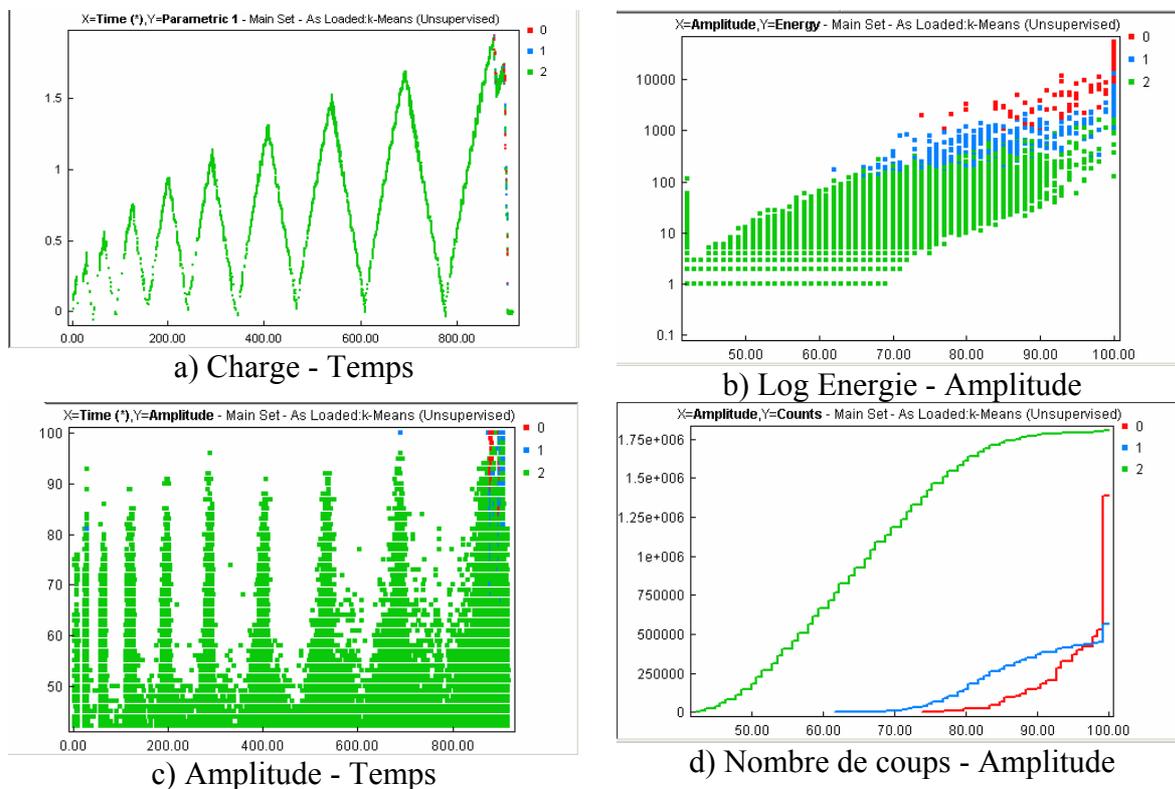


Figure 2.27. Classification des signaux d'EA du matériau C3.

2.6.3 Analyse des résultats en fatigue cyclique

Les courbes de comportement mécanique charges flèches et protocoles d'essais émission acoustique pour les différents types de stratifiés étudiés en flexion et en traction cycliques montrent une bonne concordance.

Figures 1.10a', b'. Comportement mécanique charges flèches et figures 2.22a - 2.23a émission acoustique en flexion cyclique,

Figures 1.16a' à d'. Comportement mécanique charges flèches et figures 2.24a à 2.27a, émission acoustique en traction cyclique.

La discrimination des classes a conduit aux mêmes types d'endommagements déjà identifiés en statique tableaux 2.3 et 2.4.

Tableau 2.3 Correspondance des modes d'endommagements à la classification des signaux acoustiques, cas de la flexion cyclique.

	Rupture matricielle	Rupture de l'inter plis	Rupture de fibres
	Classe 1	Classe 0	Classe 2
Nombre de coups cumulés	0,3 E+5	0,01 E+5	0,01 E+5
Log Energie (aJ)	1 - 500	80 - 9000	2000- 50 000
Amplitude (dB)	40 - 100	60 - 100	80-100

a) Matériau [-30/0/30]₁₀

	Rupture matricielle	Rupture de l'inter plis	Rupture de fibres
	Classe 0	Classe 2	Classe 1
Nombre de coups cumulés	2,7 E+5	1,4 E+5	1,9 E+5
Log Energie (aJ)	1 - 1000	50 - 9000	1000 - 50 000
Amplitude (dB)	40 - 100	60 - 100	80 - 100

b) Matériau [-60/- 30/0]₁₀

Tableau 2.4 Correspondance des modes d'endommagement à la classification des signaux acoustiques, cas de la traction cyclique.

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 0	Classe 1	Classe 2
Nombre de coups cumulés	34,0 E+5	11,0E+5	27,0 E+5
Log Energie (aJ)	1-1000	90-4000	500-50 000
Amplitude (dB)	40-100	60-100	75-100

a) Matériau U : [(0)]₈

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 1	Classe 0
Nombre de coups cumulés	15,0 E+5	2,5 E+5	5,0 E+5
Log Energie (aJ)	1-2000	50-6000	1000-50 000
Amplitude (dB)	40-100	55-100	80-100

b) Matériau C1 : [(0/90)_s]₂

	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

c) Matériau C2 : [(0/90)₂]_s

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 1	Classe 0
Nombre de coups cumulés	18,0 E+5	5,0 E+5	17,0 E+5
Log Energie (aJ)	1-1000	100-10 000	1000-70 000
Amplitude (dB)	40-100	60-100	75-100

d) Matériau C3 : [(0₂/90₂)_s]

En fatigue cyclique, la fissuration matricielle conserve les faibles valeurs d'énergie, d'amplitude et un nombre de coups élevés en relation avec la séquence d'empilement. Ces caractéristiques sont accompagnées de la même chronologie d'événements acoustiques et du lieu d'apparition de l'endommagement qu'en statique.

Pour les autres endommagements : décohésion fibre matrice et rupture de fibres, ils présentent respectivement de moyenne et fortes énergie et un nombre de coups intensif et variable fonction de la séquence d'empilement.

Les ruptures de fibres sont plus localisables en cyclique qu'en statique, elles sont caractérisées par les valeurs d'énergies les plus élevées en traction et en flexion et par le plus grand nombre de coups cumulés en traction, en particulier pour les matériaux possédant le plus grand nombre de couches à zéro placées à l'extérieure.

2.7 Conclusions

Le suivi de l'évolution de l'endommagement par émission acoustique est pratiqué sur des éprouvettes instrumentées par trois capteurs acoustiques, l'acquisition est faite à l'aide du logiciel AEwin et le traitement par le logiciel Noesis de la société EPA,

La classification des signaux acoustiques est réalisée selon une méthode non supervisée multi variables à cinq descripteurs (temps de montée, nombre de coups, énergie, durée et l'amplitude). Le nombre de classes exactes est déterminé par la minimisation du coefficient R_{ij} (Davies et Bouldin),

Les courbes de comportement des différents types de stratifiés chargés en statique et en cyclique, montrent une très bonne concordance des courbes de comportement essais mécaniques et émission acoustique,

Pour chacun des matériaux étudiés sous chargement statique et cyclique trois types d'endommagements ont été discriminés rupture matricielle, rupture de l'inter plis et rupture de fibres en flexion ou rupture matricielle, décohésion fibre matrice et rupture de fibres en traction,

Les premiers endommagements apparaissent dans la matrice, localisés au niveau des couches extrêmes dans le cas de la flexion. Ils sont suivis dans l'ordre par la rupture de l'inter plis ou la décohésion fibre matrice et la rupture des fibres. L'endommagement de la matrice est caractérisé par de faibles amplitudes, de faibles énergies et un nombre de coups élevé,

La rupture de l'inter plis ou la décohésion fibre matrice a pour caractéristique, des énergies de ruptures d'intensité moyennes. Ces dommages correspondent à des nombres de coups cumulés différents selon la séquence d'empilement,

Les ruptures de fibres sont plus localisables en cyclique qu'en statique, elles sont caractérisées par les valeurs d'énergies les plus élevées en traction et en flexion et par le plus grand nombre de coups cumulés en traction, en particulier pour les matériaux possédant le plus grand nombre de couches à zéro placées à l'extérieure.

Chapitre 3
Caractérisation et suivi de
l'endommagement par vibrations linéaires

3.1 Introduction

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 ce chapitre nous comptons mettre en évidence les potentialités des méthodes d'évaluation non destructive (END) par vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des matériaux composites stratifiés. Le comportement dynamique est un paramètre important dont il faut tenir compte lors de la conception des structures. En effet, les mouvements vibratoires sont à l'origine de nombreux problèmes typiques pouvant conduire à la ruine de la structure. Dans le cas des vibrations linéaires la détermination des paramètres modaux d'une structure, à savoir les fréquences et déformées propres des modes de résonance ainsi que les amortissements modaux associés, permet de localiser les problèmes liés aux vibrations et de construire un modèle de comportement en basses fréquences lié à la structure considérée, servant à prédire la réponse de celle-ci aux différents types de chargements dynamiques, Ainsi ont pu vérifier les solutions apportées pour le contrôle de ces problèmes cités.

Par cette démarche, nous présentons une méthode d'évaluation par vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement de composites stratifiés chargés.

3.2 Vibrations transverses des poutres stratifiées

3.2.1 Théorie des poutres

La théorie des poutres analyse le cas de plaques dont la longueur est très supérieure à la largeur ($a \ll b$), la largeur étant toutefois élevée par rapport à l'épaisseur de la plaque (figure 3.1). L'équation constitutive relative au comportement en flexion-torsion s'écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Cette équation peut également être écrite sous la forme inverse :

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^{-1} & D_{12}^{-1} & D_{16}^{-1} \\ D_{12}^{-1} & D_{22}^{-1} & D_{26}^{-1} \\ D_{16}^{-1} & D_{26}^{-1} & D_{66}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Où les termes D_{ij}^{-1} sont les éléments de la matrice inverse de la matrice $[D_{ij}]$. Les poutres ayant un rapport longueur sur largeur élevé, la théorie des poutres fait l'hypothèse que, dans le cas d'une flexion suivant l'axe x , le moment de flexion dans la direction y et le moment de torsion sont nuls :

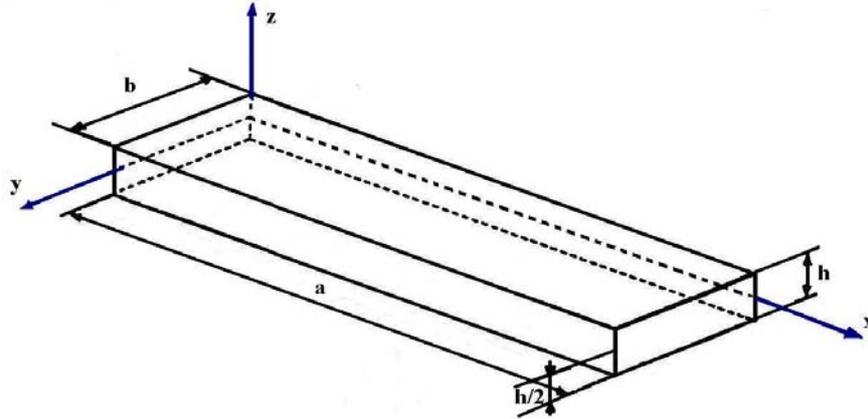


Figure 3.1. Élément de poutre.

$$M_y = M_{xy} = 0, \quad (3.3)$$

Et d'autre part, le déplacement transverse ne dépend que de la coordonnée x :

$$w_0(x,y,t) = w_0(x,t). \quad (3.4)$$

En fait lorsque seul un moment de flexion dans la direction x est exercé ($M_y=M_{xy}=0$), l'équation constitutive inverse (3.2) implique que les courbures κ_y et κ_{xy} sont liées au moment de flexion M_x imposé par les relations :

$$\kappa_y = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = D_{12}^{-1} M_x, \quad \kappa_{xy} = -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = D_{16}^{-1} M_x \quad (3.5)$$

Ces relations montrent que la flèche w_0 dépend à priori de la variable y . Dans la pratique cet effet est diminué d'autant plus que la longueur des poutres sera élevée. Dans cette hypothèse, l'équation (3.2) conduit à la relation entre la courbure et le moment de flexion dans la direction x :

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = D_{11}^{-1} M_x, \quad (3.6)$$

L'équation de vibration en flexion des poutres s'écrit alors :

$$\rho_s \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} + \frac{1}{D_{11}^{-1}} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} = q \quad (3.7)$$

L'équation de vibration apparaît comme celle d'une structure de rigidité par unité de surface k_s égale à :

$$k_s = \frac{1}{D_{11}^{-1}} \quad (3.8)$$

L'équation (3.7) peut également s'écrire sous la forme :

$$\rho_s \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} + \frac{h^3}{12} E_{fx} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} = q \quad (3.9)$$

En introduisant le module de flexion de la poutre E_{fx} :

$$E_{fx} = \frac{12}{h^3 D_{11}^{-1}} \quad (3.10)$$

3.2.2 Vibration des poutres en flexion

L'équation de mouvement des vibrations libres en flexion des poutres non amorties est donnée par la relation (3.7). Elle peut s'écrire sous la forme :

$$\rho_s \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} + k_s \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} = q(x, t) \quad (3.11)$$

Où k_s est la rigidité par unité de surface introduite en (3.8). L'équation (3.11) des vibrations transverses peut également être exprimée sous la forme :

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} + \omega_0^2 a^4 \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} = 0 \quad (3.12)$$

En introduisant la pulsation propre du système non amortie, exprimée par :

$$\omega_0 = \frac{1}{a^2} \sqrt{\frac{1}{\rho_s D_{11}^{-1}}} \quad (3.13)$$

avec a la distance entre les supports de la poutre.

Sachant quand une poutre en flexion vibre suivant un de ses modes propres, le déplacement transverse en un point de coordonnée x varie harmoniquement en fonction du temps suivant :

$$w_0(x, t) = X_i(x)(A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t) \quad (3.14)$$

Où $X_i(x)$ est la déformée modale du mode i et ω_i sa fréquence angulaire. En reportant ce déplacement dans l'équation (3.12) de mouvement, nous obtenons :

$$\frac{d^4 X_i}{dx^4} - \frac{1}{a^4} \frac{\omega_i^2}{\omega_0} X_i = 0 \quad (3.15)$$

La solution générale de cette équation peut se mettre sous la forme :

$$X_i(x) = C_i \sin \kappa_i \frac{x}{a} + D_i \cos \kappa_i \frac{x}{a} + E_i \sinh \kappa_i \frac{x}{a} + F_i \cosh \kappa_i \frac{x}{a} \quad (3.16)$$

Le paramètre κ_i et les constantes C_i , D_i , E_i et F_i sont déterminés en fonction des conditions imposées au niveau des supports de la poutre. Les modes propres ayant été obtenus pour des conditions données au niveau des supports de la poutre, la réponse de la poutre est obtenue par superposition de l'ensemble des modes propres, suivant :

$$w_0(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x)(A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t) \quad (3.17)$$

3.2.3 Réponse dans le cas d'une charge concentrée impulsionnelle

Dans le cas d'une charge concentrée exercée au point $x = x_1$ d'une poutre [Assarar, 07 & Sefrani, 02], la charge exercée s'écrit :

$$q(x, t) = q(x_1, t) = \delta(x - x_1) q_1(t) \quad (3.18)$$

Où $\delta(x - x_1)$ est la distribution de Dirac localisée en x_1 . La composante modale de la charge réduite est:

$$p_i = p_i(t) \int_0^a X_i(x) \delta(x - x_1) dx \quad (3.19)$$

Soit :

$$p_i(t) = X_i(x_1)p_1(t) \quad (3.20)$$

Avec :

$$p_1(t) = \frac{1}{\rho_s} q_1(t) \quad (3.21)$$

Dans le cas d'un impact, la charge réduite peut se mettre sous la forme :

$$p_1(t) = p_1 \delta(t) \quad (3.22)$$

Où p_1 est une constante et $\delta(t)$ est la fonction impulsion de Dirac. Cette fonction peut être décomposée en transformée de Fourier suivante :

$$\delta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\omega \quad (3.23)$$

L'excitation par impact génère donc l'ensemble des fréquences, et pour chaque fréquence l'équation de mouvement en coordonnées modales s'écrit sous la forme:

$$\ddot{\phi}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{\phi}_i + \omega_i^2 \phi_i = p_{mi} \cos \omega t \quad (3.24)$$

Avec :

$$p_{mi} = p_1 X_i(x_1) \quad (3.25)$$

Le déplacement transverse peut s'écrire sous la forme :

$$w_0(x,t) = p_1 \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x_1) X_i(x) \frac{1}{\omega_i^2} K_i(\omega) \cos \omega t - \varphi_i \quad (3.26)$$

Dans le cas d'une modélisation de l'amortissement par frottement visqueux :

$$K_i = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_i^2)^2 + (2\xi_i \omega/\omega_i)^2}} \quad (3.27)$$

$$\varphi_i(\omega) = \tan^{-1} \frac{2\xi_i \omega/\omega_i}{1 - \omega^2/\omega_i^2} \quad (3.28)$$

Et dans le cas d'un modèle avec rigidité complexe :

$$K_i(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_i^2)^2 + \eta_i^2}} \quad (3.29)$$

$$\varphi_i(\omega) = \tan^{-1} \frac{\eta_i}{1 - \omega^2/\omega_i^2} \quad (3.30)$$

Dans le cas d'une poutre en flexion avec une extrémité encastree et l'autre libre, les déformées modales s'écrivent :

$$X_i(x) = \cos \kappa_i \frac{x}{a} - \cosh \kappa_i \frac{x}{a} - \gamma_i \left(\sin \kappa_i \frac{x}{a} - \sinh \kappa_i \frac{x}{a} \right) \quad (3.31)$$

Où les constants κ_i et γ_i sont reportées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Valeurs des coefficients de la fonction poutre encastrée-libre.

m	1	2	3	4	5	6	7
κ_i	1,8751	4,6941	7,8548	10,996	14,137	17,279	20,420
γ_i	0,7341	1,0185	0,9992	1,000	1,000	1,000	1,000

3.3 Travaux réalisés dans le domaine

[Amrane, 07], par ce travail l'auteur a évalué de l'énergie modale résiduelle dans une poutre composite fibreuse unidirectionnelle verre/époxy. Dans un état endommagé, on suppose une matrice de rigidité élémentaire endommagée pour l'évaluation de l'énergie potentielle globale. L'extraction de la matrice globale de rigidité est obtenue par une approche élément finie classique. La prédiction du dommage est basée sur l'emploi du postulat de Kachanov. Le phénomène de perte de rigidité est considéré responsable de l'augmentation de l'endommagement dans la poutre composite. La modélisation du dommage de la structure globale est réalisée par implémentation du dommage locale mettant en application la loi élastique endommageable dans une formulation de flexion structurale globale. L'extraction des caractéristiques modales effectives à un niveau de sollicitation cycliques données est obtenue par la résolution de l'équation dynamique sous sa forme matricielle.

[Assarar, 08], a contribué à l'analyse du comportement en statique, en fatigue et en vibration des composites stratifiés et sandwichs. Dans un premier temps l'étude du comportement en statique des matériaux, en flexion simple et flexion avec cisaillement transverse. Les essais de fatigue ont été menés sur des éprouvettes sandwichs constituées de peaux en stratifiés à fibres de verre et avec âme en PVC de différentes masses volumiques. Un critère de durée de vie a été considéré pour construire les courbes de Wöhler à partir de l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'influence de la masse volumique de l'âme sur le comportement mécanique et la durée de vie des sandwichs étudiés. Cette étude est complétée par une caractérisation en vibration des matériaux stratifiés et sandwichs dans le cas de la flexion de poutre, afin d'identifier l'amortissement et les propriétés élastiques de ces matériaux et à leur évolution en fonction de la fréquence. L'étude expérimentale de la réponse en fréquence à une impulsion, est menée à l'aide d'un vibromètre laser, elle a permis dans un premier temps de mesurer l'amortissement de ces matériaux autour de chaque pic de résonance. Plusieurs matériaux stratifiés et sandwichs ont ainsi été étudiés. Dans un deuxième temps l'auteur a procédé à l'identification des propriétés élastiques au pic de résonance en utilisant une procédure itérative et en comparant les résultats expérimentaux à ceux obtenus par éléments finis.

Une modélisation de l'amortissement des matériaux composites a été développée également. Elle est basée sur la théorie des stratifiés avec cisaillement transverse, en utilisant la méthode des éléments finis. L'évaluation de différentes énergies emmagasinées a permis de déterminer l'amortissement des différents stratifiés et sandwichs. Un très bon accord entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus à partir de la modélisation est obtenu. Ces résultats montrent que les matériaux sandwichs étudiés ont un facteur d'amortissement plus élevé que les matériaux stratifiés. Une étude paramétrique a ensuite été menée sur les matériaux sandwichs. Elle a permis de mettre en évidence la possibilité d'optimiser l'amortissement de ces matériaux en faisant varier divers paramètres: l'épaisseur de l'âme, l'épaisseur des peaux, la masse volumique de l'âme, le module de cisaillement de l'âme, etc. Enfin la dernière partie du travail a été consacrée à l'étude des réponses en fréquence de trois structures en composites. Elles sont constituées de stratifiés, avec interposition d'une couche viscoélastique et d'un matériau sandwich. Les propriétés

d'amortissement des trois structures et leur évolution en fonction de la fréquence ont été identifiées suivi d'une confrontation analyse expérimentale - modélisation.

[Brandinelli, 03], a traité la réponse dynamique des structures stratifiées de type poutre présentant des délaminages caractérisée par une dégradation de la rigidité, des décalages de fréquences, dans des cas spéciaux, en l'occurrence des modes d'ouverture pendant la vibration. Le papier étudie comment les mécanismes d'endommagement agissant entre les surfaces délaminées peut affecter ces comportements. De tels mécanismes peuvent se développés lors du renforcement selon l'épaisseur appliqué au stratifié afin d'améliorer sa résistance et tolérance contre l'endommagement par délaminage. Un modèle basé sur la théorie de flexion des plaques stratifiés est formulé où les mécanismes transverses sont modélisés comme des distributions uniforme linéaires élastiques qui s'opposent à des déplacements longitudinaux relatifs et transversaux entre les surfaces délaminées. Le modèle est appliqué pour prévoir les fréquences naturelles et la forme modale d'une poutre délaminée à section droite rectangulaire. Une variété de solutions et de transitions dans la réponse dynamique est trouvée en variant la rigidité des ligaments. Une transition des valeurs des poutres endommagées jusqu'à intact est prévue lors de l'augmentation simultanément de rigidités élastiques longitudinales et transversales. Une application du modèle à un stratifié carbone-époxyde utilisé dans l'industrie aéronautique prouve que les faibles pourcentages de renfort dans l'épaisseur peuvent sensiblement améliorer la réponse dynamique des structures délaminées.

[Chondros, 98], a développée Une théorie de vibrations des poutres fissurées pour l'étude de vibrations latérales des poutres d'Euler Bernoulli avec simple ou double bord fissurées. La formulation variationnelle de Hu Washizu Barr a été employée pour développer les équations différentielles et les conditions de frontière des poutres fissurées. Le champ de déplacement au bord de la fissure a été utilisé pour modifier le champ de contraintes et de déplacements dans toute la poutre. La fissure a été modélisée comme continu flexible en utilisant le champ de déplacement a proximité de la fissure, calculée en mécanique de la rupture. Les résultats de deux évaluations indépendantes à basses fréquences naturels des vibrations latérales pour des poutres fissurées avec simple bord sont présentés, l'analyse de vibration des poutres fissurées localisées est présentée. Les résultats expérimentaux des poutres en aluminium avec des fissures de fatigue sont très près des valeurs prévues. Une poutre en acier avec un double bord fissuré a été également étudiée, les résultats ont bien rivalisés avec les données expérimentales existantes.

[Diaz valdes, 99], a développé une méthode de surveillance de santé, l'étude porte sur l'effet du délaminage sur les fréquences modales des poutres stratifiées composites, pour cela une poutre encastré libre est instrumenté de deux capteurs collés près de l'encastrement, un piézocéramique qui joue de rôle de déclencheur et l'autre piézoélectrique jouant le rôle de capteur, le traitement et l'acquisition des signaux se font en même temps sur un ordinateur. La figure 3.2 illustre l'arrangement expérimental. La comparaison des fréquences modales de poutres saines à celles des poutres dé laminées a donné une bonne indication du degré de dommages, et plus particulièrement à des hautes fréquences. L'idée d'employer les vibrations pour la détection de dommages dans des stratifiés n'est pas un neuf. Néanmoins, la majeure partie du travail expérimental sur la détection de dommages employant l'analyse vibratoire trouvée dans la littérature explore le comportement dynamique des structures sur les modes de vibrations liés à des basses fréquences normales. L'utilisation de la vibration à des fréquences plus élevées permet l'identification du délaminage dans les poutres composites encastrées - libres.

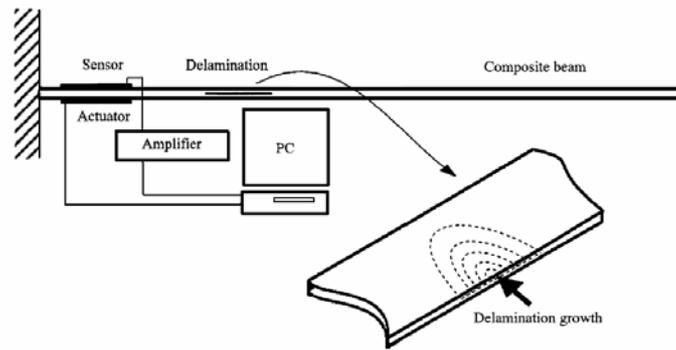


Figure 3.2. Experimental set up and detail of delaminating growth. [Diaz valdes, 99].

[El Mahi, 08], a déterminé les amortissements caractéristiques des stratifiés expérimentalement en utilisant des poutres soumises à des excitations impulsionnelles. Les facteurs de pertes ont été obtenus à partir des courbes de réponses expérimentales de Fourier. Les paramètres d'amortissement ont été mesurés la première fois dans le cas des poutres composites unidirectionnels à fibre de verre, tissu de verre unidirectionnel, tissu de verre taffetas et tissu sergé. Les résultats expérimentaux obtenus pour les facteurs de perte montrent une augmentation significative de l'amortissement des matériaux avec la fréquence. L'analyse a été alors appliquée à l'amortissement des poutres de séquences d'empilements : $[0/90/0/-90]_s$, $[0/90/45/-45]_s$ et $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]_s$. L'évaluation de l'amortissement tient compte des facteurs de perte avec la fréquence. Les empilement $[0/90/0/-90]_s$ et $[0/90/45/-45]_s$ mènent aux propriétés d'amortissement pratiquement semblables dans les directions des fibres à 0 et 90, par contre pour le stratifié ayant la séquence d'empilement $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]_s$ les propriétés sont plus tôt semblables à ceux d'un stratifié unidirectionnel dont l'orientation des fibres est égale à θ . L'amortissement des composites à renfort taffetas et sergé est sensiblement plus grand que celui des stratifiés croisés à renfort unidirectionnels. Cette augmentation a été associée au frottement entre les fibres chaîne et trame dans le cas du taffetas et le sergé. Les résultats issus de cette analyse est les résultats expérimentaux sont en bon accord.

[Fatmi, 07], a présenté une étude expérimentale et numérique du comportement vibratoire des plaques rectangulaires en stratifié symétriques. La formulation du problème est développée dans le cadre de la théorie classique des stratifiés et les solutions du problème de vibration de flexion sont dérivées analytiquement par la méthode variationnelle de Rayleigh-Ritz, basée sur une approximation des déflexions des plaques par les fonctions poutres. Cette démarche est programmée sous Matlab permettant de calculer les fréquences et déformées propres des modes de flexion des plaques considérées. Le programme est validé en calcul de structures par élément finis sous I-DEAS et confronté aux résultats expérimentaux mesurés sur deux plaques croisées symétriques $[0/90_2/0]_s$ et $[90/0_2/90]_s$ dans deux configurations : encastrée sur un coté (ELLL) ou sur deux cotés opposés (ELEL). Les fréquences propres expérimentales présentent des dispersions mais restent comparables aux résultats calculés. Les écarts entre théorie et mesure s'accroissent pour la configuration ELEL du fait de la présence du deuxième encastrement. Les tracés des déformées propres obtenus sous Matlab et I-DEAS ont permis d'expliquer les dispersions expérimentales, en mettant en évidence l'influence de la masse du capteur sur les mesures, et d'identifier les modes propres correspondant à chaque fréquence expérimentale. Les amortissements des deux stratifiés ont été mesurés et les tendances relevées sur leur évolution en fonction de la fréquence correspondent bien aux résultats de la littérature.

[Hua,02], afin d'analyser la réponse en vibration de plaques composites délaminées à épaisseur modérée, un modèle FEM est utilisé, il est basé sur la théorie des plaques d'ordre supérieure, qui satisfait la condition de contrainte en cisaillement transverse nulle sur les couches extrêmes supérieures (Top) et inférieures (Bottom), deux variables artificielles ont été introduites dans le champs de déplacement pour éviter les dérivés d'ordre supérieure dans la théorie des plaques d'ordre supérieure. Les contraintes correspondantes aux conditions des deux variables artificielles ont été imposées efficacement par la méthode de pénalité des fonctions en utilisant l'intégration réduite dans le secteur d'élément. En outre, l'exécution des conditions de continuité de déplacement avant le délaminage a été décrite en utilisant la théorie classique d'élément finis. Divers exemples étudiés dans la littérature ont été utilisés pour valider l'exactitude et l'efficacité du modèle. L'influence du délaminage sur les caractéristiques de vibration du stratifié composite est étudiée. Particulièrement la variation de la courbure du mode de vibration causé par le délaminage afin de fournir des informations valables pour l'identification possible du délaminage.

[Ju, 95], l'étude présentée est une approche par élément finie par analyse de vibrations libres de plaques en composites circulaires et carrés avec des décollements et des coupes internes. Des exemples numériques comprenant des plaques composites avec des décollements autour des trous circulaires ou des coupes en circuit carrés sont présentés. L'effet des coupes en circuit et des décollements sur les fréquences naturelles et sur les formes des modes sont discutés. L'effet des décollements sur les fréquences naturelles dépend des modes. Dans certains cas, les décollements peuvent avoir un effet significatif sur quelques fréquences normales. Quoique la forme des modes des plaques n'est pas sensiblement affectée par les décollements.

[Kim, 03], a visé l'établir une méthode d'identification des dommages basée sur les vibrations pour les stratifiés composites renforcées de fibres et sur les sandwichs. Cette nouvelle technique structurale d'identification des dommages emploie la méthode dynamique structurale de reconstruction des systèmes exploitant les fonctions de réponse en fréquence (FRFs) d'une structure endommagée. Pour vérifier l'efficacité de cette méthode d'identification de dommages, les réponses en fréquence obtenues par l'essai de vibration de stratifiés endommagés par fatigue et des poutres sandwich à nid d'abeilles fléchés sont examinés selon l'ampleur du dommage induit par le chargement en cyclage de fatigue pour les stratifiés, et par la flexion pour les poutres sandwich. Les décalages des pics du FRFs selon l'ampleur de l'endommagement sont examinés. L'autre montre que l'ampleur du décollement pour les poutres sandwich et pour les stratifiés endommagés par fatigue peuvent être facilement identifiés en termes de changements de fréquences naturelles et des coefficients d'amortissements du FRFs reconstruit pour les structures composites endommagées.

[Kyriazoglou, 04], a mesuré la capacité d'amortissement spécifique (SDC) des poutres composites en flexion. Les poutres ont été examinées avant et après introduction des dommages en utilisant un chargement quasi statique ou de fatigue. Les mécanismes de dommages et leurs localisations dans un stratifié tissé sont déduits de la comparaison des résultats de fatigue avec la réponse dynamique du stratifié à plis croisé contenant des dommages bien caractérisés. Ces résultats montrent que la mesure du SDC est une technique prometteuse pour la détection des dommages initiaux dans les composés tissés.

[Luo, 00], a présenté un modèle analytique pour les poutres composites avec des délaminages traversant la largeur. Le modèle tiens compte de l'inertie rotatoire, du cisaillement transverse

et du couplage flexion - traction dans l'analyse. Le modèle libre et le modèle contraint sont unifiés dans sont modèle sous deux aspects:

– Quand la longueur de délaminage est petite et est située au milieu de la géométrie, il n'y a aucune ouverture significative du délaminage dans le premier mode et le modèle non-linéaires approche du modèle linéaire, dans ce cas le modèle libre et le modèle contraint donnent presque les mêmes fréquences.

– Quand le décollement est grand et près de la surface de la poutre, une ouverture du délaminage se produit lors des vibrations. Des effets non-linéaires doivent être pris en compte. Un cycle de réponse de vibration est une combinaison des vibrations du modèle libre et du modèle contraint. En se basant sur le modèle linéaire, les fréquences prévues montrent une bonne concordance avec les mesures expérimentales. Les prévisions des formes de modes basés sur une technique d'analyse modale non-linéaire reflètent également les phénomènes expérimentaux.

[Ouahabi, 06], a développé 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. Toutefois, la surveillance modale s'est avérée peu sensible et ne détecte le défaut que lorsque la fissure devient importante. Cette étude s'intéresse spécialement aux fissures de fatigue de respiration. Désormais, le comportement vibratoire est non linéaire et les fréquences naturelles varient constamment. L'analyse modale ne peut être appliquée. La variation de rigidité induit une variation des fréquences naturelles ainsi que du taux d'amortissement, d'où une modulation de l'amplitude de la réponse pendant un cycle, ce qui génère des harmoniques de la fréquence d'excitation. La nouvelle méthode proposée consiste à injecter à la structure une excitation harmonique à la moitié de la première fréquence naturelle. S'il y a fissure, la non linéarité génère des harmoniques de la fréquence d'excitation, la fréquence naturelle se trouve alors excitée et l'analyse Temps- Fréquence révèle son importance. Dans le cas contraire, on obtient une simple réponse harmonique.

[Saravanos, 96], a présenté un travail analytique et expérimental dans le cas de poutres stratifiées délaminées et saines en vibration encasté libre. Une théorie des stratifiées est développé dans laquelle les perturbations cinématiques inconnues induites par la fissuration par délaminages sont traitées en tant que degrés de liberté additionnels. La rigidité généralisée, inertie et matrices d'amortissement du stratifié sont formulées. Une solution analytique est développée pour la prédiction des fréquences naturelles, des modes et de l'amortissement modale dans les poutres composites fissurées par délaminage. Des évaluations des caractéristiques mécaniques sur diverses poutres encastées libres avec un délaminage central sont exécutées. Des résultats expérimentaux pour les fréquences modales et l'amortissement des poutres composites avec un simple délaminage sont également présentés et des corrélations entre les prédictions analytiques et les données mesurées sont montrées. L'analyse des résultats a montré que les effets du délaminage varient en fonction de la taille de la fissure, de la configuration du stratifié et de l'ordre de mode.

[Sefrani, 02], a abordé une analyse approfondie de l'amortissement dans le cas de la flexion de poutres et de la flexion cylindrique des plaques, constituées de deux types de matériaux composites unidirectionnels : des composites à fibres de verre et à fibres de Kevlar. Les résultats expérimentaux obtenus ont été comparés avec les modèles de la littérature, la confrontation des résultats a mis en évidence les limites de ces modèles. Une évaluation de

l'amortissement basée sur une analyse des vibrations par la méthode de Ritz est mise en place, l'analyse peut être appliquée aux plaques et à la flexion des poutres. L'étude de l'effet de l'interposition d'une ou de plusieurs couches viscoélastiques, permettent d'accroître l'amortissement des matériaux. Les résultats expérimentaux sont modélisés en considérant les énergies dissipées par cisaillement transverse. L'analyse de l'effet de température sur les composites à fibre de verre est étudiée. L'analyse expérimentale a montré le rôle important de la matrice, lors que la température de transition vitreuse de la matrice est atteinte les propriétés des matériaux se dégradent.

[Usik, 02], présente une fonction de réponse en fréquence (FRF) basée sur une méthode structurale d'identification des dommages (SDIM) pour des structures en poutre. Les dommages dans une structure en poutre sont caractérisés en présentant une fonction de distribution des dommages. Les dommages peuvent induire le couplage entre les modes de vibration. Les dispositifs attrayants du SDIM actuel inclue que les données modales de la structure endommagée ne sont pas exigées dans l'analyse et un grand nombre d'équations qui peuvent être aisément dérivées en changeant la fréquence d'excitation ainsi que le point de mesure de réponse. La taille du problème peut être rigoureusement réduit en employant une méthode itérative de réduction du domaine. Les investigations numériques sur la dynamique des poutres endommagées ont permis de conclure que la négligence du DIMC (Dommages Induit Modal Couplés) peut sous-estimer les changements du dommage, les effets de DIMC sur les changements des fréquences naturelles et des FRFs sont en général négligeable, les changements du dommage-induits des fréquences naturelles sont relativement élevés aux modes inférieurs, mais fortement dépendants des modes.

[White, 09], a traité la technologie structurale de surveillance de santé (SHM), qui peut être appliquée aux réparations des composites collées, elle permet l'évaluation de la vie restante et assure l'efficacité de la réparation. Le joint adhésif collé est un point de départ idéal pour la surveillance et la localisation en temps réel, des mécanismes de dommage. La technique de SHM est basée sur la réponse en fréquence. Deux arrangements de réparation sont examinés, la réparation externe doublée et la réparation d'écharpe. Le travail décrit une recherche expérimentale sur la réponse en fréquence des réparations avec et sans défauts dans différentes conditions de frontière. Le constat fait est que des dommages pourraient aisément être détectés par des changements de réponses en fréquence pour les deux types de réparation.

[Zou, 00], a présenté des méthodes utilisant des techniques d'analyse par éléments finis, ainsi que des résultats expérimentaux, pour détecter des dommages. Ils localisent et estiment les événements des dommages en comparant des réponses dynamiques entre les structures endommagées et intactes. Selon les paramètres de réponse dynamique analysés, ces méthodes peuvent être subdivisées en modale analyse, domaine de fréquence, domaine de temps et domaine d'impédance. Ces méthodes peuvent fournir des informations globales et locales de dommages. Elles sont rentables et sont relativement faciles à utiliser. Cependant, il reste beaucoup de défis et obstacles avant que ces méthodes puissent être appliquées dans la pratique.

3.4 Procédure expérimentale

3.4.1 Système d'acquisition

L'analyse modale expérimentale des vibrations avec excitation par impact présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre. Les figures 3.3 et 3.4 montrent le principe d'essais et système d'acquisition utilisé pour étudier les vibrations des poutres en configuration

encastrée-libre. 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 vibromètre laser Polytec. Ce vibromètre est constitué d'une tête optique OFV 302 R associée à un contrôleur OFV 3000. 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. Cet analyseur est constitué d'une carte d'acquisition et de traitement, associée à un logiciel résidant de contrôle et traitement des signaux. La carte d'acquisition est équipée d'un processeur, permettant l'acquisition simultanée de deux signaux avec une fréquence maximum d'échantillonnage de 50 kHz et une résolution de 13 bits sur chaque canal. Ce système effectue l'acquisition des signaux, contrôle les conditions d'acquisition (sensibilité, bande passante, conditions de déclenchement, etc.), effectue le traitement des signaux (transformée de Fourier, réponse en fréquence, etc.). Ensuite les signaux et les traitements associés peuvent être sauvegardés, pour des post-traitements.

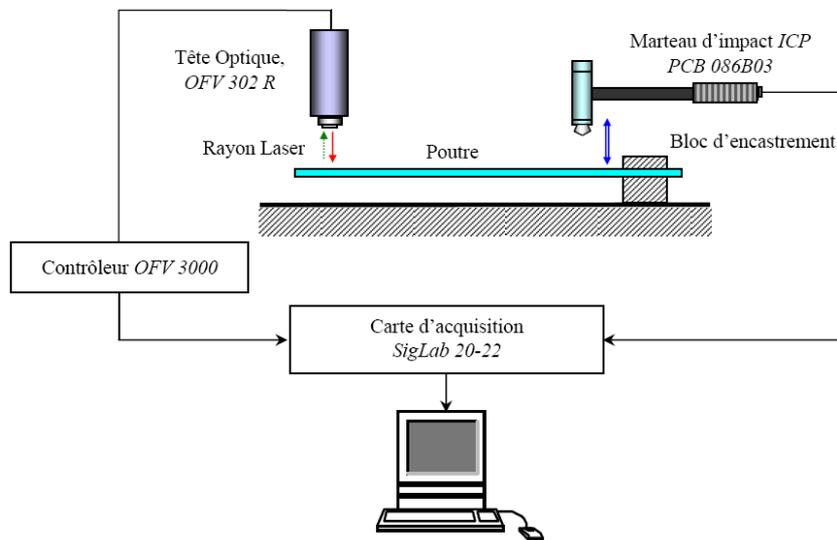


Figure 3.3. Principe d'essais.

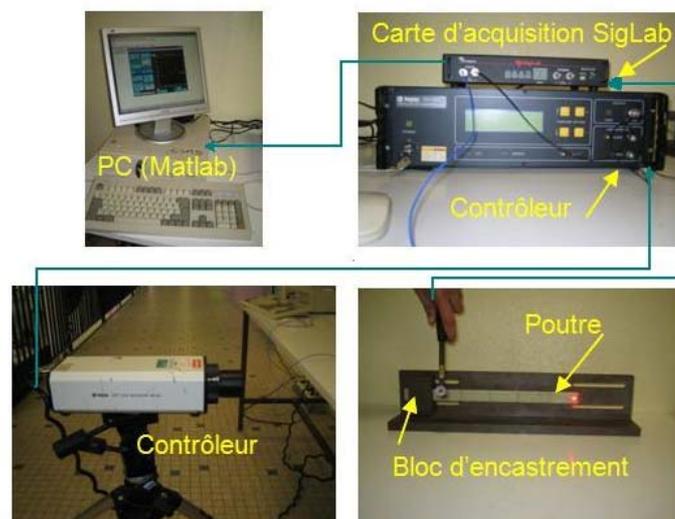


Figure 3.4. Système d'acquisition.

3.4.2 Performance du système et difficultés associées à la mesure

Les performances du système d'acquisition sont liées à la fréquence maximale d'échantillonnage et au nombre maximum d'échantillons que peut acquérir le système. La fréquence maximum est de 50 kHz avec une résolution de 13 bits. Notre domaine d'étude s'étendant jusqu'à des fréquences de 1000 à 2000 Hz, nous ne serons donc pas limités en hautes fréquences. Par contre, le nombre d'échantillons qui peut être acquis lors d'une acquisition d'un signal temporel avec calcul en temps réel de la transformée de Fourier est limité à 8192. Un nombre d'échantillons pouvant aller jusqu'à 1,5 M est possible dans le cas d'un enregistrement du signal temporel seul. La transformée de Fourier est alors calculée ensuite en différé. Avant l'acquisition des signaux, nous réglons les valeurs du nombre d'échantillons qui seront stockés et la valeur de la bande passante f_2 , cette valeur détermine la fréquence d'échantillonnage utilisée par le système :

$$f_e = 2 f_2. \quad (3.32)$$

La résolution en fréquence de la mesure est ensuite déterminée par le nombre de points n_f pour lesquels est calculée la transformée de Fourier :

$$r_f = \frac{f_2}{n_f} \quad (3.33)$$

Dans le cas d'un faible amortissement de la structure à analyser, la bande passante à - 3 dB au voisinage de la fréquence modale f_i de la réponse modale de la structure, s'exprime par :

$$\frac{\Delta f}{f_i} = \eta_i \quad (3.34)$$

Où η_i est le facteur de perte du mode i . Si n_p est le nombre de points nécessaire dans la bande passante pour avoir une évaluation correcte de la réponse modale dans la bande passante, la résolution nécessaire pour la fréquence f_i est :

$$r_{f_i} = \frac{\Delta f}{n_p} = \frac{1}{n_p} \eta_i f_i \quad (3.35)$$

La résolution maximale de l'analyseur est obtenue d'après (3.33) :

$$r_{f_{\max}} = \frac{f_2}{n_{f_{\max}}} \quad (3.36)$$

Où $n_{f_{\max}}$ est le nombre maximum de points pour lesquels peut être calculée la transformée de Fourier. Pour obtenir la résolution souhaitée (3.35), il faut que $r_{f_{\max}} \leq r_{f_i}$. soit :

$$\frac{f_2}{n_{f_{\max}}} \leq \frac{1}{n_p} \eta_i f_i \quad (3.37)$$

Soit :

$$f_i \geq f_1, \quad (3.38)$$

avec :

$$f_1 = \frac{n_p}{n_{f_{\max}}} \frac{1}{\eta_i} f_2 \quad (3.39)$$

La bande de fréquence qui peut être analysée est alors limitée à l'intervalle $[f_1, f_2]$. La fréquence f_1 doit être strictement inférieure à la fréquence f_2 . Il en résulte que les amortissements η_i qui peuvent être mesurés pour un nombre donné d'échantillons $n_{f \max}$ sont tels que :

$$\eta_i = \frac{n_p}{n_{f \max}} \quad (3.40)$$

Pour un nombre d'échantillons égal à 8192, seuls des amortissements supérieurs à $1,22 \times 10^{-3}$ peuvent être mesurés, alors que pour un nombre de 500 000 échantillons, les amortissements mesurés peuvent atteindre la valeur théorique de 2×10^{-6} . Dans le cas d'une évaluation de la réponse modale par 10 échantillons à l'intérieur de la bande passante à -3 dB, d'une transformée de Fourier calculée sur 8192 échantillons et d'un facteur de perte 2×10^{-3} , la relation (3.39) conduit à :

$$f_1 = 0,610 f_2. \quad (3.41)$$

Pour un nombre d'échantillons égal à 500 k et d'un même facteur de perte de 2×10^{-3} , nous obtenons :

$$f_1 = 0,01 f_2. \quad (3.42)$$

Les tableaux 3.2 et 3.3 donnent la bande de fréquences qui peut être analysée dans le cas d'un amortissement $\eta_i = 2 \times 10^{-3}$ et pour les deux nombres d'échantillons 8192 et 500000. Les valeurs reportées montrent finalement la nécessité de réaliser les mesures d'amortissement en enregistrant d'abord les signaux temporels avec un nombre d'échantillons suffisant, puis en calculant la transformée de Fourier en différé. La figure 3.5 illustre l'influence des nombres d'échantillons sur la résolution en basse fréquence. Sur cette figure, nous avons deux réponses modales d'une poutre encastree-libre pour une valeur de 500 Hz de bande passante, associées à une acquisition de 8192 et 1024 échantillons.

Tableau 3.2 Bande de fréquences d'analyse en fonction de la bande à 500 000 échantillons.

f_2 (Hz)	f_1 (Hz) - f_2 (Hz)
33	0,33 - 33
297	3 - 297
1782	17,8 - 1782

Tableau 3.3 Bande de fréquences d'analyse en fonction de la bande passante, pour un nombre d'échantillons égal à 8192.

f_2 (Hz)	f_1 (Hz) - f_2 (Hz)
33	20 - 33
99	60,2 - 99
297	181,2 - 297
891	543,5 - 891
1782	1087 - 1782

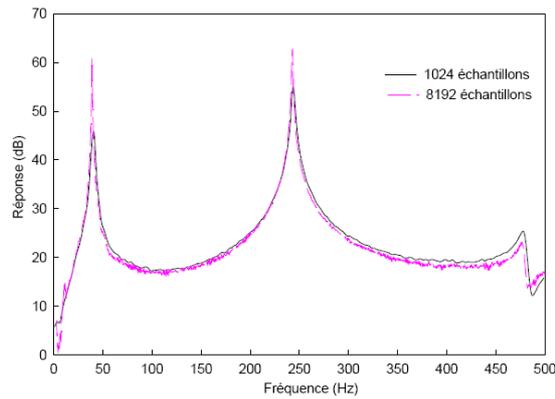


Figure 3.5. Illustration de l'influence de la résolution sur la courbe de réponse à un impact [Assarar, 07].

3.4.3 Méthode d'analyse des résultats expérimentaux

L'analyse expérimentale a été effectuée dans le cas de la flexion de poutres, les poutres étant encastées à une extrémité et libre à l'autre. Elles sont graduées afin de repérer la coordonnée de l'impact et celle du point de mesure (figure 3.6). L'origine du repère correspond à la limite de l'encastrement. Toutes les distances ou mesures sont données à partir de ce repère. 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 d'un encastrement 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.

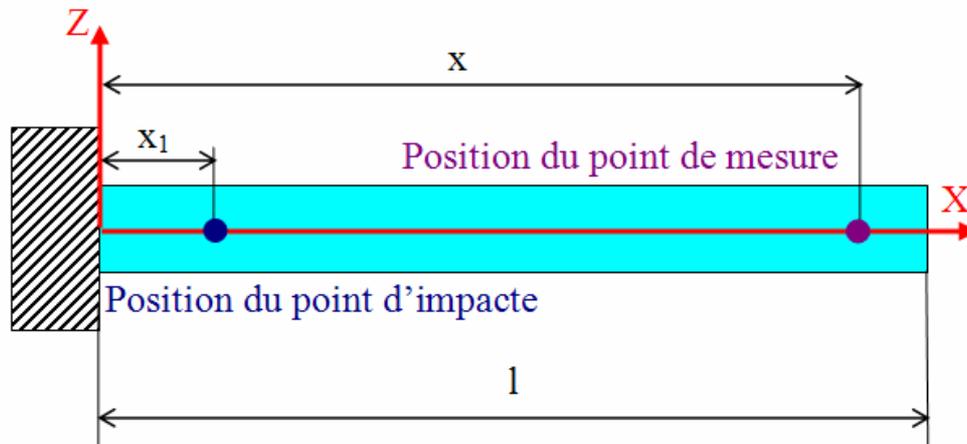


Figure 3.6. Repérage des points d'impact et de mesure sur une poutre encastée-libre.

Nous présentons sur la figure 3.7 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 vibrations.

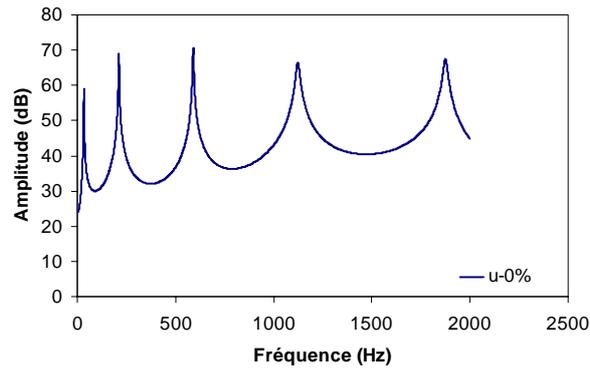


Figure 3.7. Réponse en fréquence d'une poutre encastrée - libre excitée par impact.

3.5 Comportement mécanique des matériaux considérés

Pour montrer que les vibrations linéaires peuvent être utilisés comme moyen de caractérisation de l'endommagement des structures composites, des dommages gradués sont introduit aux seins des éprouvettes par l'application de deux niveaux de chargements 50% et 90% de la charge maximale en traction (F_{max} déterminée au premier chapitre) sur trois éprouvettes de dimensions $260 \times 20 \times 2,3 \text{ mm}^3$ de chaque stratifié, pour chaque cycle un déchargement est pratiqué jusqu'à 0. Les figures 3.8 montrent les courbes de comportements mécaniques obtenues charge décharge- déplacement. Les éprouvettes saines et endommagées mécaniquement sont ensuite étudiées en vibrations linéaires pour chaque matériau.

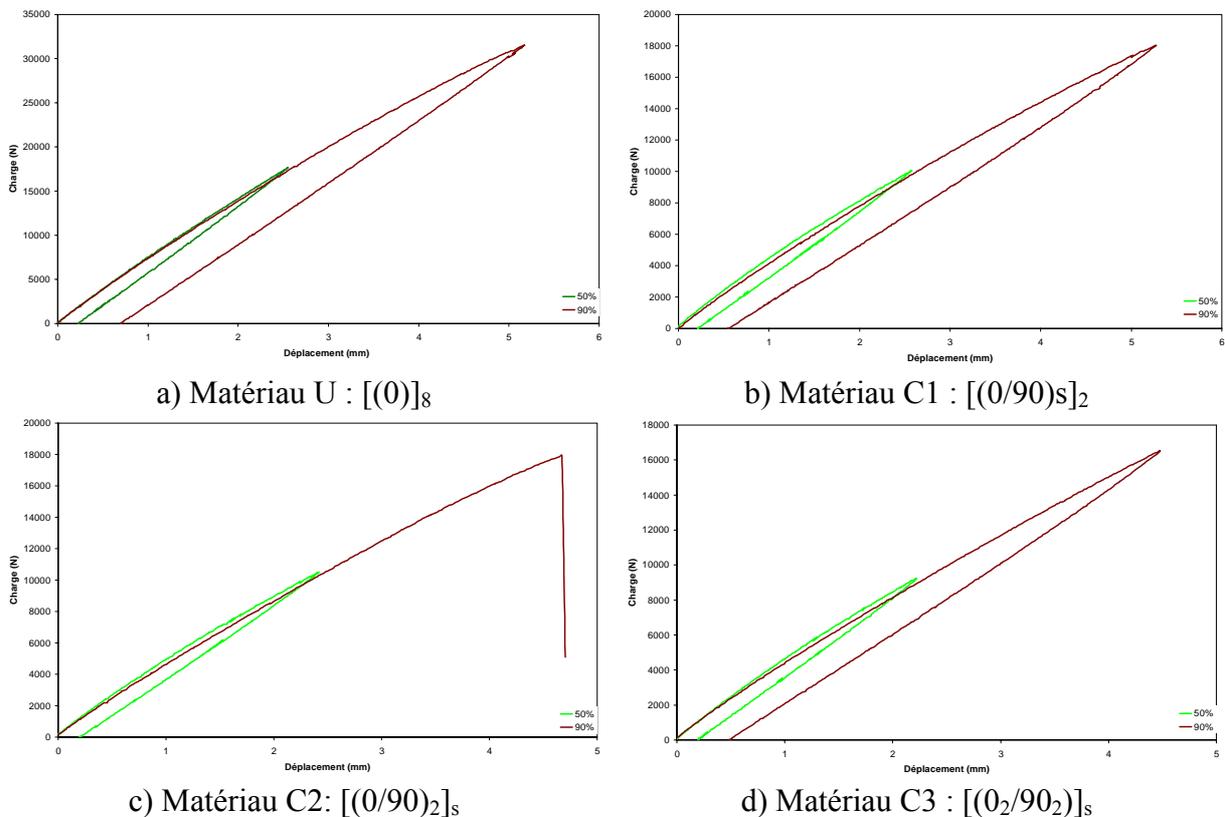


Figure 3.8. Courbes de comportement mécanique charge décharge - déplacement,

3.6 Comportement vibratoire des matériaux considérés

Les essais de vibrations sont effectués en flexion sur des poutres stratifiées de longueurs libre de 200 mm. Les figures 3.9 représentent la réponse en vibrations libres en fonction de la fréquence des poutres en composites stratifiés endommagées sollicitées à différents niveaux de chargement : 0%, 50% et 90% de Fmax.

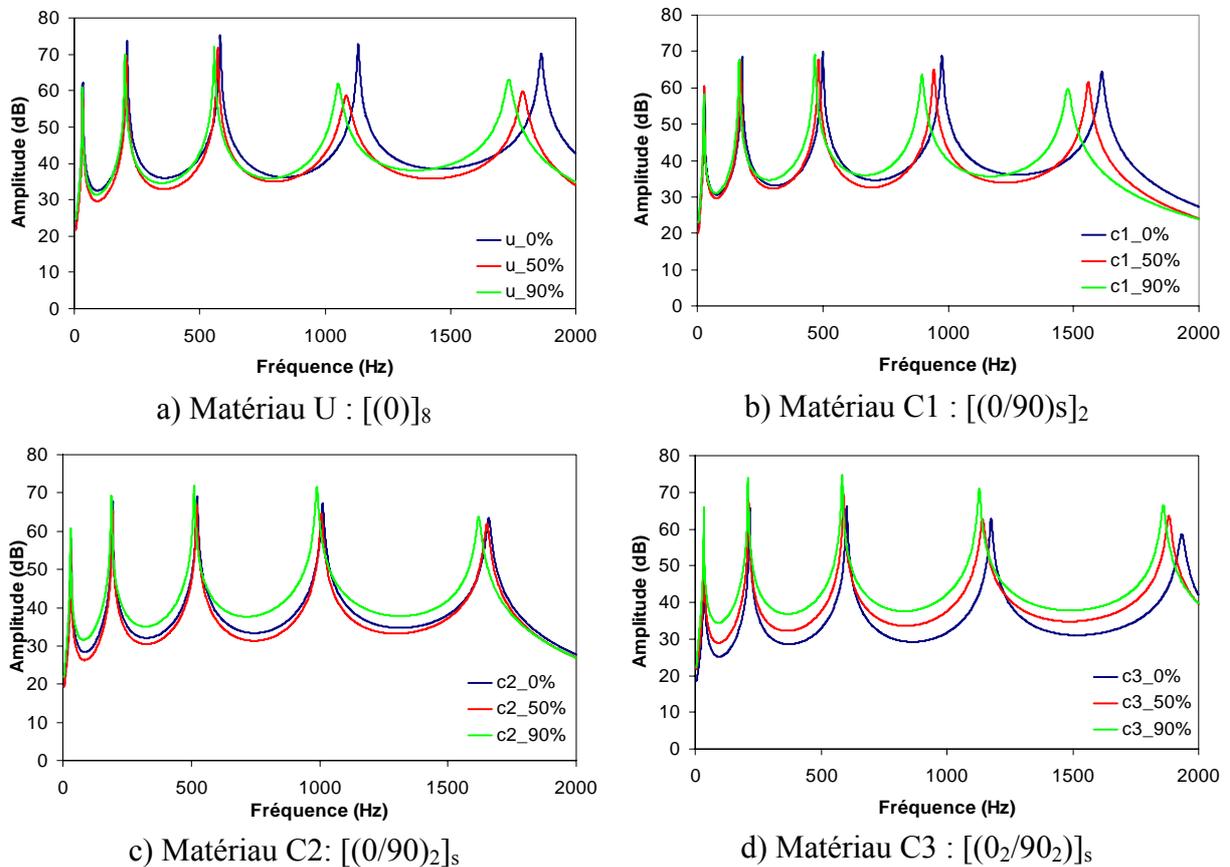


Figure 3.9. Réponse en fréquence de poutres stratifiées à différents niveaux de chargement

3.7 Analyse vibratoire

Les courbes expérimentales (figure 3.9) font apparaître des pics correspondants aux fréquences de résonance de la poutre. Nous constatons que 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 des pertes de rigidités plus importantes de ces derniers.

Les tableaux 3.4 montrent les fréquences propres déterminées à différents niveaux de chargements pour les cinq premiers modes.

Tableau 3.4 Variation des fréquences propres en fonction du niveau de chargement,

<i>Niveau de charge (%)</i>	0%	50%	90%
<i>Mode 1 (Hz)</i>	34,8	34,37	33,5
<i>Mode 2 (Hz)</i>	210,6	208	203
<i>Mode 3 (Hz)</i>	581,9	571,9	558
<i>Mode 4 (Hz)</i>	1131,9	1084,4	1053
<i>Mode 5 (Hz)</i>	1864,4	1788	1735

a) Matériau U : [(0)]₈

<i>Niveau de charge (%)</i>	0%	50%	90%
<i>Mode 1 (Hz)</i>	28	27,5	26,87
<i>Mode 2 (Hz)</i>	178,75	173,12	167
<i>Mode 3 (Hz)</i>	500	485	470
<i>Mode 4 (Hz)</i>	976	943,75	898,75
<i>Mode 5 (Hz)</i>	1612	1560,6	1480

b) Matériau C1 : [(0/90)_s]₂

<i>Niveau de charge (%)</i>	0%	50%	90%
<i>Mode 1 (Hz)</i>	31,87	31,87	30,65
<i>Mode 2 (Hz)</i>	193	193	188
<i>Mode 3 (Hz)</i>	524	521	511
<i>Mode 4 (Hz)</i>	1011	1006	990
<i>Mode 5 (Hz)</i>	1660	1651	1620

c) Matériau C2: [(0/90)₂]_s.

<i>Niveau de charge (%)</i>	0%	50%	90%
<i>Mode 1 (Hz)</i>	35,6	34,4	34
<i>Mode 2 (Hz)</i>	216,8	213	210,6
<i>Mode 3 (Hz)</i>	603	589,6	584
<i>Mode 4 (Hz)</i>	1176,8	1143	1129
<i>Mode 5 (Hz)</i>	1933	1881,8	1860,6

d) Matériau C3 : [(0₂/90₂)]_s

A titre d'exemple, pour le matériau U sain la fréquence de résonance en mode 1 est de 34,8 Hz, alors qu'elle est de 33,5 Hz après un endommagement sous une charge de 90% de F_{\max} . Par contre en mode 5, la fréquence de résonance est de 1864,4 Hz pour l'éprouvette saine et de 1735 Hz pour l'éprouvette sollicitée à 90% de F_{\max} . Il ressort de ces résultats que les fréquences de résonances diminuent lorsque le niveau de chargement augmente. Pour les modes supérieurs le décalage en fréquence augmente avec la croissance des modes. Ce

phénomène peut être expliqué par la diminution de la rigidité en flexion du stratifié considéré [Kharoubi, 09 & Usik, 02].

Pour mettre en évidence l'influence du dommage sur les valeurs des fréquences propres, nous avons reporté sur les figures 3.10 l'évolution des fréquences propres normalisées pour chaque mode en fonction des niveaux de chargements.

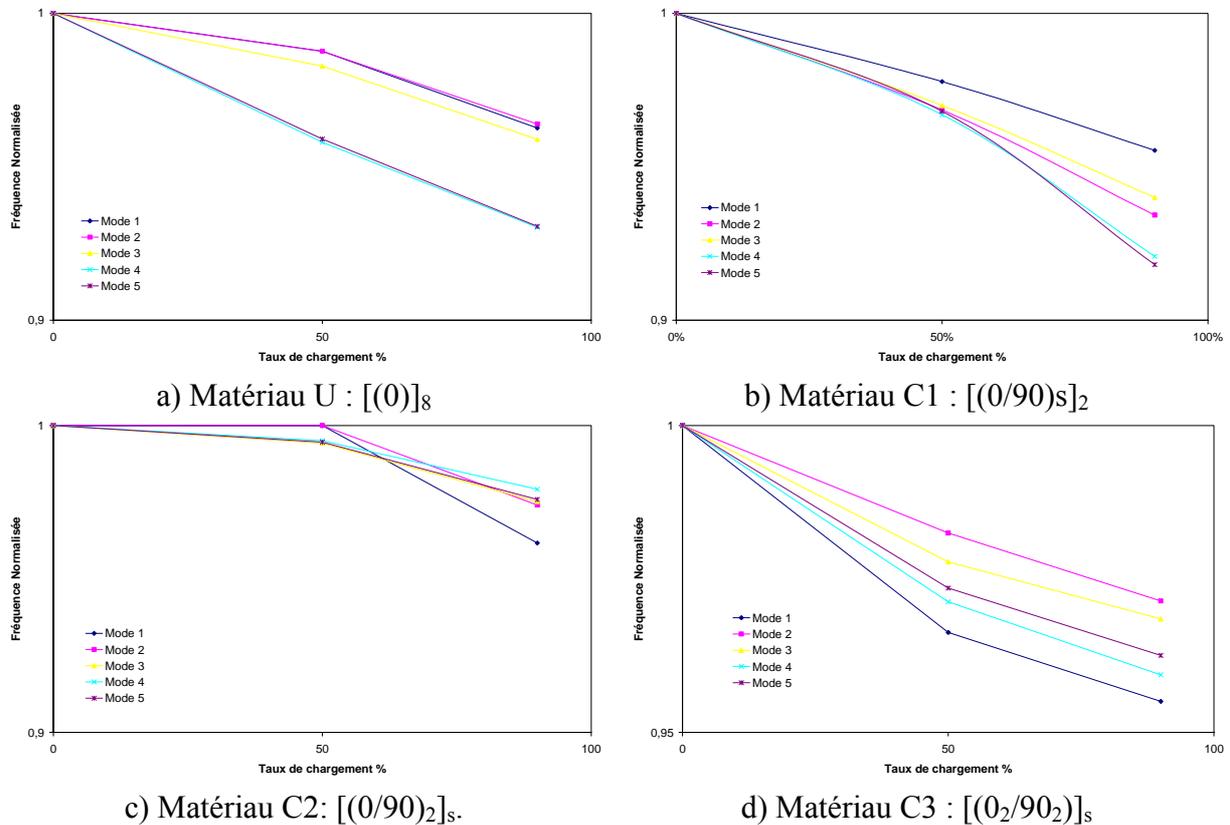


Figure 3.10. Evolution des fréquences propres en fonction des taux de chargement,

La valeur de la fréquence est normalisée par rapport à celle obtenue dans le cas d'une poutre stratifiée saine. Il ressort de ces résultats que l'augmentation niveau de chargement entraîne une diminution de la fréquence de chaque mode [Kharoubi, 09]. Ce décalage s'explique par le fait que la rigidité en flexion des stratifiés diminue lorsque le niveau de chargement augmente.

3.8 Conclusions

Le travail présenté dans ce chapitre nous a permis de mettre en évidence les potentialités des méthodes d'évaluation non destructive (END) en vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des composites stratifiés chargés. Les courbes expérimentales réponses en fréquences font apparaître des pics correspondant aux fréquences de résonances des poutres. Nous constatons que lorsque le niveau de chargement augmente, les pics de résonances se décalent vers les basses fréquences. Ce décalage est plus important lorsque la fréquence de résonance augmente. En effet, l'augmentation du niveau de chargement entraîne une augmentation du taux d'endommagement du matériau diminuant ainsi sa rigidité en flexion et donc ses fréquences de résonance. Cette étude a montré la possibilité d'utiliser les vibrations linéaires comme outil de contrôle de santé des matériaux composites en service.

Conclusions générales

Le travail que nous venons de présenter dans ce mémoire traite l'étude du comportement mécanique de matériaux composites sous chargements cyclique et dynamique. L'objectif fixé est triple : quantifier le dommage par des essais mécaniques, discriminé et localisé son type par émission acoustique et faire sa caractérisation et son suivi en vibrations linéaires. Pour atteindre ce but nous avons abordé ce sujet sous trois aspects différents mais complémentaires:

Le premier aspect s'articule autour de la mesure de l'une des caractéristiques intrinsèques des stratifiés considérés et plus particulièrement les modules d'élasticité en flexion et en traction statique et cyclique. Les essais mécaniques réalisés ont permis de calculer les modules d'élasticités en charge et en décharge. En flexion cyclique l'évolution de ces caractéristiques en fonction des nombres de cycles en charge et en décharge a montré une dégradation de la rigidité de ces matériaux dès les premiers cycles. L'augmentation du nombre de cycles a conduit à une augmentation des dommages déduits, indépendamment du type de chargement. En traction cyclique seul l'unidirectionnel U a présenté un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture en charge et en décharge. Les pertes de rigidités calculées et donc les dommages déduits sont plus importants en décharge qu'en charge, ce constat est principalement lié aux phénomènes de glissement avec frottement des mécanismes de ruptures et d'endommagements criés en chargement. La démarche appliquée est efficace pour quantifier les dommages des composites chargés, mais elle ne peut être appliquée à des unidirectionnels dont le comportement est linéaire élastique, sans dommage apparent macroscopiquement.

Le deuxième aspect consiste à écouter le comportement d'un matériau en service afin de discriminer ses dommages en utilisant la technique d'émission acoustique, en instrumentant les éprouvettes à tester à l'aide de trois capteurs acoustiques. Une méthode de classification non supervisée multi variables à cinq descripteurs K moyens est utilisée (temps de montée, nombre de coups, énergie, durée et l'amplitude). La validité des classes est assurée par la minimisation du coefficient R_{ij} (Davies et Bouldin).

Les résultats obtenus ont conduit à une bonne concordance des courbes de comportement essais mécaniques - émission acoustique. Trois types de dommages sont recensés et localisés par matériaux et par type de chargement. Les premiers dommages apparaissent dans la matrice, localisés au niveau des couches extrêmes dans le cas de la flexion. Ils sont suivis dans l'ordre par la rupture de l'inter plis ou la décohésion fibre matrice et la rupture des fibres. L'endommagement de la matrice est caractérisé par de faibles amplitudes, de faibles énergies et un nombre de coups élevé. La rupture de l'inter plis ou la décohésion fibre matrice a pour caractéristique, des énergies de ruptures d'intensités moyennes. Ces dommages correspondent à des nombres de coups cumulés différents selon la séquence d'empilement. Les ruptures de fibres sont plus localisables en cyclique qu'en statique, elles sont caractérisées par les valeurs d'énergies les plus élevées en traction et en flexion et par le plus grand nombre de coups cumulés en traction, en particulier pour les matériaux possédant le plus grand nombre de couches à zéro placées à l'extérieure.

Le troisième aspect a permis de mettre en évidence les potentialités des méthodes d'évaluation non destructive (END) en vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des composites stratifiés chargés. Les courbes expérimentales réponses en fréquences font apparaître des pics correspondants aux fréquences de résonances des poutres. Lorsque le niveau de chargement augmente, les pics de résonances se décalent vers les basses

fréquences. Ce décalage est plus important lorsque la fréquence de résonance augmente. En effet, l'augmentation du niveau de chargement entraîne une augmentation du taux d'endommagement du matériau diminuant ainsi sa rigidité en flexion et donc ces fréquences de résonance. Cette étude a confirmé la possibilité d'utiliser les vibrations linéaires comme outil de contrôle de santé des matériaux composites en service.

Bibliographie

Allaoui S.

Etude et modélisation d'un comportement d'une structure sandwich de type carton, thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2005, France.

Amrane M. N., Belhadek K.

Residual modal energy evaluating of fatigue damaged composite structure, International Symposium on Aircraft Materials, 2007, Mai 22-24, Agadir, Morocco.

Anastassopoulos A., Kousroussis D., Tsimogiannis A.

Unsupervised classification of acoustic emission sources from aerial man lift devices, 15th WCNDT, Roma 2000.

Assarar M.

Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs, Thèse de doctorat, Université du Maine, Décembre 2008

Baudry P., Dourges M-A, Paillet R., Lamon J.

Comportement mécanique de composites 2D C/SiC, relation microstructure/propriétés, Matériaux 2006, 13-17 Novembre 2006 - Dijon, France.

Brandinelli L., Massabo R.

Free vibrations of delaminated beam-type structures with crack bridging, Composite Structures 61, 129 - 142, 2003.

Barre S., Benzeggagh M.-L.

On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene. Composites Science and Technology, 1994, vol.52, pp.369-376.

Benmedakhene S., Kenane M. et Benzeggagh M. L.

Initiation and growth of delamination in glass/epoxy composites subjected to static and dynamic loading by acoustic emission monitoring, Composites Science and Technology 59 (1999) 201-208.

Bentahar M.

Acoustique non linéaire : Application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogènes et à la prédiction de la durée de vie, thèse INSA de Lyon, 2005.

Berthelot J-M.

Comportement mécanique et analyse des structures, Masson, 1992, 2^{ème} édition 1996, France.

Berthelot J. M. et Fatmi L.

Statistical investigation of the fracture behaviour of inhomogeneous materials in tension and three-point bending, Engineering Fracture Mechanics 71 (2004)1535 –1556.

Bois C.

Mesure et prévision de l'évolution des endommagements dans les composites stratifiés, thèse de doctorat, Université Aix-Marseille II, 2003, France.

Bonnafeous C., Touchard F., Chocinski-Arnault L., Dever C., Alise G.

Analyse multi-échelle des mécanismes d'endommagement de composites chanvre/époxy par émission acoustique, JNC 16, 10-12 juin 2009, Toulouse, France.

Bussida A., Kupiec M., Ifergane S., Piat R., Böhlke T.

Damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique, Composites Science and Technology, 68 (2008) 1144-1155

Chondros T.G.

A continuous cracked beam vibration theory, Journal of Sound and Vibration, 215 (1), 17 - 34, 1998.

Chretien G.

Matériaux composites à matrice organique polymère et renfort type, Caractéristique Technique de mise en œuvre application, Lavoisier, Paris 1986.

Dessarthe A.

Assemblage des Matériaux Composites, Structures Sandwichs, et Matières plastiques, Cetim, 1992.

Dessarthe A., Carayol M.12

Usinage des Matériaux Composites et élastomères », Cetim, 1996.

Diaz valdes S. H. & Soutis C.

Delamination detection in composite laminates from variations of their modal characteristics Journal of Sound and Vibration, 228 (1), 1 - 9, 1999.

El mahi A.

Contribution à la modélisation numérique et expérimentale de l'endommagement par fissuration transverse des composites stratifiés, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 1991, France.

El Mahi A., Assara M., Sefrani Y., and J. M. Berthelot,

Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates, Composites Part B: Engineering, Volume 39, Issues 7-8, pp 1069-1076, 2008.

Euro Physical Acoustics SA

Technique d'émission acoustique.

Fatmi L.

Modélisation de l'endommagement des matériaux hétérogènes par ré analyse après modification locale de la matrice de rigidité, Thèse de Doctorat Université de Maine, Mai 1994.

Fatmi L., Berthelot J-M.

Contribution à l'étude du comportement en flexion 3 points statique et cyclique de matériaux composites stratifiés, cimasi 2000, Casablanca, Maroc.

Fatmi L., Berthelot J.M.

Modélisation de l'endommagement des matériaux hétérogènes : application au béton cas de la flexion 3 points statique, *Revue Française de Mécanique*, N 2, Juin 2001, pp. 89-97.

Fatmi L., Kharoubi M., Barbaoui R., Bemedakhene S. & El Mahi A.

Etude de l'Endommagement par Emission Acoustique de deux Stratifiées Composites soumis à Différents Niveaux de Chargements, *International Symposium on Aircraft Materials* Mai 22-24, 2007 Agadir Morocco.

Fatmi L., Kharoubi M., Barbaoui R., El Mahi A. & Bemedakhene S.

Analyse de l'endommagement par émission acoustique d'un stratifié composite soumis à différents niveaux de chargement, *JNC 15 6-8*, juin 2007 Marseille, France

Fatmi L., Seddiki S. H., Kharoubi M. & OUELAA N.

Etude expérimentale et numérique du comportement dynamique de plaques stratifiées symétriques, *International Symposium on Aircraft Materials*, 2007, Mai 22-24, Agadir, Morocco.

Gay D.

Matériaux Composites, HERMES, Juin 1991.

Giordano. M., Calabro A., Esposito C., D'Amore A. & Nicolais L.

An acoustic - emission characterization of the failure modes in polymer - composite materials, *Composites Science and Technology*, 58 (1998) 1923 - 1928.

Hochard C., Bordredreuil C. et Payan J.

Endommagement et rupture de stratifiés constitués de plis tissés sous sollicitations statique et de fatigue, *17 Congrès Français de Mécanique*, 29 Aout-Septembre 2005, Troyes , France.

Hua N., Fukunagab H., Kameyamab M., Aramakib Y. & Changc F.K.

Vibration analysis of delaminated composite beams and plates using a higher-order finite element, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 1479 - 1503, 2002.

Huguet S.

Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2002.

Hou J.P. & Jeronimidis G.

Vibration of delaminated thin composite plates, *Composites: Part A*, 30, 989 - 995, 1999.

Johnson M.

Waveform based clustering and classification of AE transients in composite laminates using principal component analysis, *NDT & E international*, 35 (2002) 367-376.

Johnson M., Gudmundson P.

Broad - band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates, *Composites Science and Technology*, 60 (2000) 2803 - 2818.

Ju F., Lee H. P. & Lee K. H.

Free vibration of composite plates with delaminations around cutouts, *Composites structures*, 31, 177 - 183, 1995.

Kharoubi M., El Mahi A., Assarar M., Fatmi L. et EL Guerjouma R.

Analyse vibratoire de composites stratifiés endommagés, JNC 16, 10-12 juin 2009, Toulouse, France.

Kharoubi M., Fatmi L., Barbaoui R., Bemedakhene S. & El Mahi A

Study of the damage by acoustic emission of two laminate composites subjected to various levels of loading in three points bending, *Mechanika*, 2007, Nr.5 (67) PP 48-52, published by the Kaunas University of technology Lithuania 2007.

Kim H.-Y.

Vibration-based damage identification using reconstructed FRFS in composite structures. *Journal of Sound and Vibration* 259 (5), 1131 - 1146, 2003.

Kyriazoglou C., Le Page B.H. & Guild F.J.

Vibration damping for crack detection in composite laminates, *Composites: Part A*, 35, 945 - 953, 2004.

Luo H. & Hanagud S.

Dynamics of delaminated beams, *International Journal of Solids and Structures* 37, 1501-1519, 2000.

Kostopoulos V., Tsotra P., Karapappas P., Tsantzalis S., Vavouliotis, Loutas T.H., Paipetis A., Friedrich K., Tanimoto T.

Mode I interlaminar fracture of CNF or: and PZT doped CFRPs via acoustic emission monitoring, *Composites Science and Technology*, 67 (2007) 822-828.

Kostopoulos V., Loutas T., Dassios K.

Fracture behaviour and damage mechanisms identification of SiC/ glass ceramic composites using AE monitoring, *Composites Science and Technology*, 67 (2007) 1740-1746.

Marec A.

Contrôle de sante des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : Discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante, thèse de doctorat, Université du Maine, 2008, France.

Marec A., Thomas J.-H., El Guerjouma R.

Damage characterization of polymer- based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data, *Mechanical systems and Processing*, 22 (2008) 1441-1464.

Moevus M., Godin N., R'Mili M., Roubly D., Reynaud P., Fantozzi G., Farizy G.

Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering, *Composites Science and Technology*, 68 (2008) 1258 - 1265.

Moevus M., Rouby D., Godin N., R'Mili M., Reynaud P., Fantozzi G., Farizy G.

Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiC/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part I: Damage patterns and acoustic emission activity, *Composites Science and Technology*, 68 (2008) 1250 - 1257.

Momon S., Moevus M., Godin N., R'Mili M., Reynaud P., Fantozzi G., Fayolle G.

Identification de la signature acoustique des différents mécanismes sources lors d'essais de fatigue sur CMC : Application de classificateur supervisé et non supervisé, JNC 16, 10-12 juin 2009, Toulouse, France.

Momon S., Moevus M., Godin N., R'Mili M., Reynaud P., Fantozzi G., Fayolle G.

Détermination de la durée de vie lors d'essai de fatigue statique en température sur CMC à l'aide de l'émission acoustique : Application de la loi de Benioff, JNC 16, 10 - 12 juin 2009 Toulouse, France.

Morscher G. N.

Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite, *Composites Science and Technology*, 59 (1999) 687-697

Nechad H.

Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2004.

Nechad H., Helmstetter A., El Guerjouma R. et Sornette D. Andrade and critical time-to-failure laws in fibre-matrix composites : Experiments and model. *Journal of the Mechanics and Physics of solids* 53 (2005), 1099 - 1127.

Ouahabi. A , Thomas M. et Lakis A.A.

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.

Pardo S., Baptiste D., Decobert F., Fitoussi J., Joannic R.

Tensile dynamic behaviour of a quasi - unidirectional E - Glass / polyester composite, *Composites Science and Technology*, 59 (2002) 579-584.

Payan J.

Etude du comportement composites sous chargements statique et de fatigue, thèse de doctorat, Université Aix-Marseille II, 2004, France.

Prasse T., Michel F., Mook G., Schulte K., Bauhofer W.

A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates, *Composites Science and Technology*, 61 (2001) 831-835

Peter J. de Groot, Peter A. M. Wijnen & Roger B. F. Janssen

Real - time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/Epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 55 (1995) 405-412.

Proust A., Wargnier H., Harry R., Lorriot T., Lenain J. C.

Détermination d'un critère d'amorçage du délaminage au sein d'un matériau composite à l'aide de la technique d'émission acoustique, Matériaux 2006, 13- 17 novembre 2006, Dijon, France.

Rios C.R, Ogin S.L., Lekakou C., Leong K.H.

A study of damage development in a weft knitted fabric reinforced composite. Part 1: Experiments using model sandwich laminates, Composites Part A: applied science and manufacturing, 38 (2007) 1773-1793.

Rios C.R, Ogin S.L., Lekakou C., Leong K.H.

A study of damage development in a weft knitted fabric reinforced composite. Part 2: Stress-strain and early cyclic behaviour of composite laminates with realistic fabric layups, Composites Part A: applied science and manufacturing, 38 (2007), 1794-1808.

R'Mili M., Moevues M., Goldin N.

Statistical fracture of E - glass fibres using a bundle tensile test and acoustic emission monitoring, Composites Science and Technology, 68 (2008), 1800-1808.

Sanders B. P, Mall S. Pittman R. B.

The effects of frequency and temperature on the fatigue behavior of a unidirectional titanium - matrix composite, Composites Science and Technology, 59 (1999), 583-591.

Saravanos D.A. and Hopkins D.A.,

Effects of Delamination on the damped dynamic characteristic of composite laminates analysis and experiments, Journal of Physics, D: Applied Physics, 6, pp 27-41, 1996.

Sefrani Y.

Analyse de l'amortissement de matériaux composites à fibres unidirectionnelles, Thèse de doctorat, Université du Maine, 2002.

Sgard E., Benmedakhene S., Laksimi A., Lai D.

Damage analysis and the fibre - matrix effect in polypropylene reinforced by short glass fibres above glass transition temperature, Composites Structures 60 (2003), 67-72.

Sung -choong Woo, Nak - Sam Choi,

Analysis of fracture process in single - edge - notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events, Composites Science and Technology, 67 (2007), 1451-1458.

Sung -choong Woo, Nak - Sam Choi, Nahmgyoo Cho.

Characterization of the fracture process of notched glass fiber/aluminium hybrid laminates by acoustic emission, Composites Science and Technology, 68 (2008), 1521-1530.

Surgeon M., Vanswijgenhoven E., Wevers M., & van Der Biest O.

Acoustic emission during tensile testing of SiC - fibre - reinforced BMAS glass - ceramic composite, Composites Part A, 28A (1997), 473-480.

Tae Kim S., Tae Lee Y.

Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method, *Materials Science and Engineering A*, 234-236 (1997), 322 - 326.

Thollon Y. et Hochard C.

Endommagement de composites stratifiés verre/époxy sous chargements statique et de fatigue, 18 Congrès Français de Mécanique, 27-31 Aout 2007, Grenoble , France.

Usik L. & Jinho S.

A frequency response function-based structural damage identification method, *Computers and Structures*, 80, 117 - 132, 2002.

White C., H. C.H. Li a, Whittingham B., Herszberg I., Mouritz A. P.

Damage detection in repairs using frequency response techniques, *Composite Structures* 87 175 - 181, 2009

Youris A. Dzenis, Jie Qian

Analysis of microdamage evolution histories in composites, *International journal of Solids and Structures*, 38 (2001) 1831-1854.

Zhuang X., Yan X.

Investigation of damage mechanisms in self - reinforced polyethylene composites by acoustic emission, *Composites Science and Technology*, 66 (2006), 444-449.

Zou Y., Tong L. & Steven G. P.

Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures a review, *Journal of Sound and Vibration*, 230 (2), 357 - 378, 2000.

Annexe

Travaux publiés et communiqués dans le cadre de cette thèse

Kharoubi M., Fatmi L., Barbaoui R., Bemedakhene S. & El Mahi A.

Study of the damage by acoustic emission of two laminate composites subjected to various levels of loading in three points bending, *Mechanika*, 2007, Nr.5(67) PP 48-52, published by the Kaunas University of technology Lithuania 2007.

Fatmi L., Kharoubi M., Barbaoui R., Bemedakhene S. & El Mahi A.

Etude de l'Endommagement par Emission Acoustique de deux Stratifiées Composites soumis a Différents Niveaux de Chargements, International Symposium on Aircraft Materials Mai 22-24, 2007 Agadir Morocco.

Fatmi L., Kharoubi M., Barbaoui R., El Mahi A. & Bemedakhene S.

Analyse de l'endommagement par émission acoustique d'un stratifié composite soumis à différents niveaux de chargement, JNC 15 6-8 juin 2007 Marseille, France.

Kharoubi M., El Mahi A., Assarar M., Fatmi L. et EL Guerjouma R.

Analyse vibratoire de composites stratifiés endommagés, JNC 16,10-12 juin 2009 Toulouse, France.

Kharoubi M., Fatmi L., & El Mahi A

Suivi de l'Endommagement par Emission Acoustique des Composites Chargés, Congrès Algérien de Mécanique, CAM 2009, Novembre 2009, Biskra, Algérie (Accepté).

Study of the damage by acoustic emission of two laminate composites subjected to various levels of loading in three points bending

M. Kharoubi*, L. Fatmi**, R. Berbaoui***, S. Bemedakhene****, A. El Mahi*****

*University of Guelma, P.B. 401, 24000 Algeria, E-mail: mounirkharoubi@yahoo.fr

**University of Guelma, P.B. 401, 24000 Algeria, E-mail: F_louendi@yahoo.fr

***University of Maine, France, E-mail: rachid.berbaoui.etu@univ-lemans.fr

****University of Technology of Compiègne, France, E-mail: salim.benmedakhene@aetech.fr

*****University of Maine, France, E-mail: abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr

1. Introduction

Due of their importance like structural elements, the laminated plates cause a great interest for the study of damage evolution and its mechanisms of rupture while based on numerical and experimental approaches. Many research tasks were undertaken on the behaviour of the composite structures, in particular the damage caused by loadings of various types [1-8]. The present study treats the experimental follow-up of the damage of two laminates [-30/0/30]₁₀ (material 1) and [-60/-30/0]₁₀ (material 2) during their loadings in 3- points bending in static and cyclic tests. These materials are composed with glass fibres E and epoxy resin.

2. Materials

The materials used in the study are laminate composites manufactured by RTM. To check on the one hand the orientation and number of layers of the reinforcement, and on the other hand the rates of resin and the reinforcement of these materials, we had recourse to the pyrolysis technique, envisaging cutting of the five samples roughly in equals surfaces, followed by a weighing each of them in gram noted M1. The specimens are fixed in a furnace of renewed ignited air, the calcinations takes place at 600°C during 10 hours. After cooling, the residue of glass is weighed in mass in gram noted M2, the resin loss by calcinations is $M=M1-M2$. The resin rate in percent is then $R\%=(M/M1)\%$ and the fibre rate of glass in percent is thus $F\%=100-R$. The results obtained are reported in Table 1.

Table 1

Results after pyrolysis

Designation	Rate of		
	Reinforcement in mass F , %	Resin in mass R , %	Reinforcement in volume, %
[-30/0/30] ₁₀	66.70	33.30	46.74
[-60/-30/0] ₁₀	66.29	33.71	45.83

3. Experimental set-up

Experimental tests were carried out on a standard hydraulic machine INSTRON 8516 that can be used in static and fatigue tests. The force is measured by a load cell. The capacity of machine is ± 100 kN, the tests were carried out with a load cell of ± 5 kN. The displacement of the actuator is ± 75 mm, in a frequency range up to 100 Hz.

The machine is interfaced with a detected computer for controlling and data acquisition. The damage evolution is followed by acoustic emission using the system EPA NCV-2.

3.1. Static tests

The three points bending tests were performed according to standard I.S.O.178 T : (1993) shown in Fig. 1. The dimensions of specimens were: $h = 12$ mm, $L = 240$ mm, $l = 192$ mm, $b = 15$ mm, crosshead speed of static and cyclic tests was 2 mm/min.

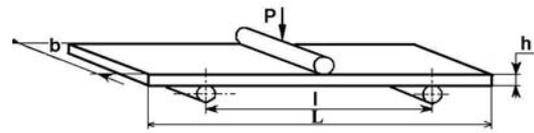
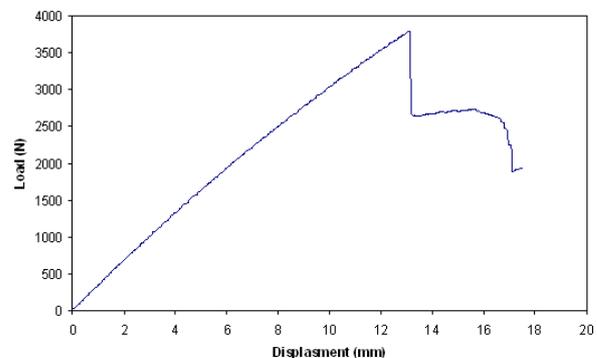
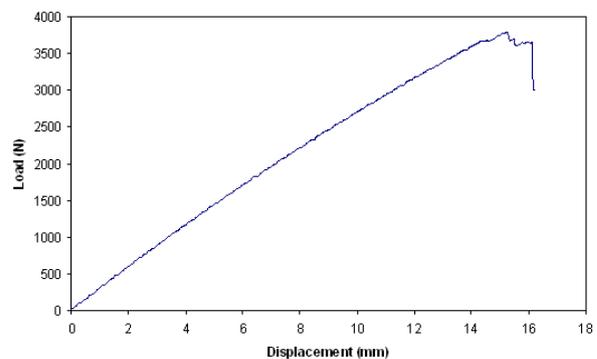


Fig. 1 Three points bending tests set-up



a



b

Fig. 2 Load-displacement curves: a - material 1, b - material 2

The Fig. 2 represents a load-displacement curves during load in tree points bending in static tests until rupture.

The calculation of the mechanical characteristics in 3 points static bending is based on the Eq. (1) for bending stresses σ_f and on the Eq. (2) for the values of the bending modulus E_f .

$$\sigma_f = \frac{3 F l}{2 b h^2} \quad (1)$$

where F is load at the rupture applied; l is support length; b is width of the specimen, and h is thickness of the specimen.

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

σ_{f2} and σ_{f1} are the bending stresses measured at deflection s_2 and s_1 ; ε_{f2} and ε_{f1} are respectively the bending strains at 0.0025 and 0.005 corresponding to the deflection s_2 and s_1 such as

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

For material 1, the modulus equal to 23857.96 MPa while for material 2 the modulus is 20141.25 MPa.

3.2. Cyclic tests

The specimen undergo a growing load by the step of 10 % of the static load at rupture. For each step an unloading is applied until zero value, only the last cycle is maintained until rupture. The load-displacement curves in load and unload - displacement obtained are presented in Fig. 3.

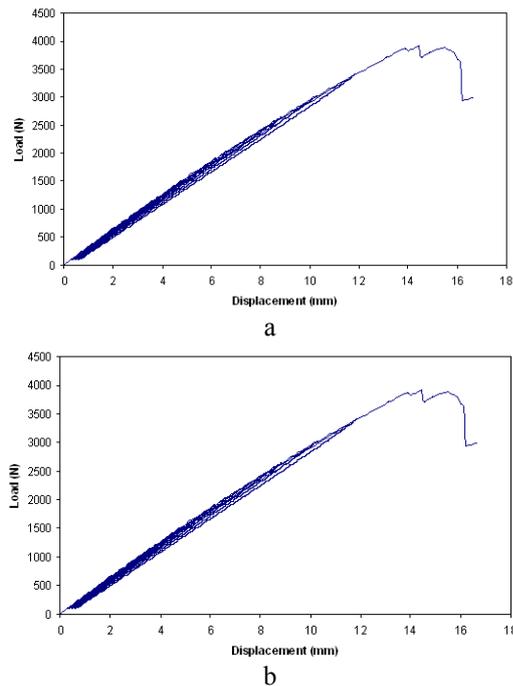


Fig. 3 Load, unload – displacement curves: a - material 1, b - material 2

4. Results analysis

The bending modulus in load and unload are obtained according the Eq. (2). The corresponding values are presented in Tables 2-5. The modulus evolution according of the cycles number under loading and unloading is represented on Fig. 4.

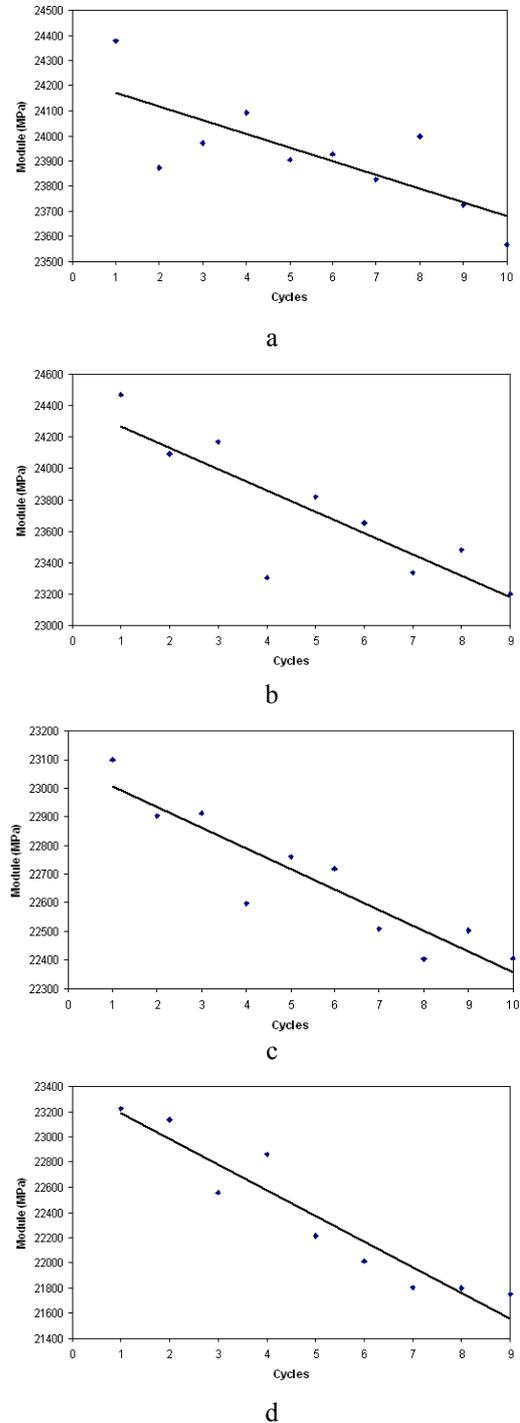


Fig. 4 Modulus by step of load as the function of cycles number: a - loading of material 1, b - unloading of material 1, c - loading of material 2, b - unloading of material 2

The results obtained show that the increase in the number of cycles in loading or unloading involves a linear reduction of the modulus of elasticity of the two studied

materials; this reduction is probably related to the appearance of microcracks. These microcracks influence the mechanical behaviour of the specimen and particularly in terms of macroscopic properties such as module degradation. The fact that rigidity of the material is affected during the loading-unloading it is essential to measure the elastic modulus in order to be able to quantify the damage [5, 6], thus giving an idea on the evolution of the total damage of the material. Damage is determined by

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (4)$$

where \tilde{E} is the Young modulus of damaged material, E is the Young modulus of intact material.

The evolution of the damage parameter D during the loading – unloading tests in 3 points bending is a direct technical characteristic. It is obtained by measuring the Young modulus of the damaged material from the curves load–displacement (Table 2-5).

Table 2
Modulus and damage by step of loading of the material 1

Cycle	1	2	3	4	5
\tilde{E}	24380	23873	23970	24093	23903
D	0.0000	0.0208	0.0168	0.0117	0.0195
Cycle	6	7	8	9	10
\tilde{E}	23927	23825	23997	23726	23567
D	0.0186	0.0227	0.0157	0.0268	0.0333

Table 3
Modulus and damage by step of unloading of the material 1

Cycle	1	2	3	4	5
\tilde{E}	24468	24091	24170	23302	23817
D	0.000	0.0154	0.0122	0.0477	0.0266
Cycle	6	7	8	9	
\tilde{E}	23652	23335	23479	23199	
D	0.0333	0.0463	0.0404	0.0519	

Table 4
Modulus and damage by step of loading of the material 2

Cycle	1	2	3	4	5
\tilde{E}	23100	22903	22911	22597	22761
D	0.0000	0.0085	0.0082	0.0218	0.0147
Cycle	6	7	8	9	10
\tilde{E}	22717	22509	22401	22502	22406
D	0.0166	0.0256	0.0303	0.0259	0.0300

Table 5
Modulus and damage by step of unloading of the material 2

Cycle	1	2	3	4	5
\tilde{E}	23228	23136	22561	22858	22213
D	0.0000	0.0040	0.0287	0.0159	0.0437
Cycle	6	7	8	9	
\tilde{E}	22013	21806	21796	21750	
D	0.0523	0.0612	0.0616	0.0636	

5. Mechanisms of damages and rupture

To confirm the results of mechanical behaviours obtained at experimental tests in 3 points static and cyclic bending, we have applied an experimental procedure of acoustic emission. It is based on a system of acquisition (EPA) including 2 ways. This system is composed of a chart PCI-2 and a microcomputer. Signals of acoustic emission are converted by 2 piezoelectric differential sensors of R10 type, resonating at 250 (325) kHz and with contact surface of 10 mm diameter. These signals are then amplified by a preamplifier with 40 or 60 dB gains, in a band of frequencies between 175 and 1000 kHz. The signals are then converted by the chart PCI-2 which digitizes them and proceeds to the extraction of the acoustic emission parameters. The data resulting from the charts are transmitted to the microcomputer, in real time of acquisition; storage and post processing are done using a program prepared under MATLAB. Fig. 5 shows the set-up of acquisition of acoustic events



Fig. 5 Set-up for the acoustic events

5.1. Results

Figs. 6 and 7 represent respectively the mechanisms of damages and rupture observed under the optical microscope and located by acoustic emission during 3 points static and cyclic bending of materials 1 and 2.

In the same way Figs. 8 and 9 represent respectively the mechanisms of damage and ruptures observed under the optical microscope and located by acoustic emission for material 2 [-60/-30/0]₁₀.

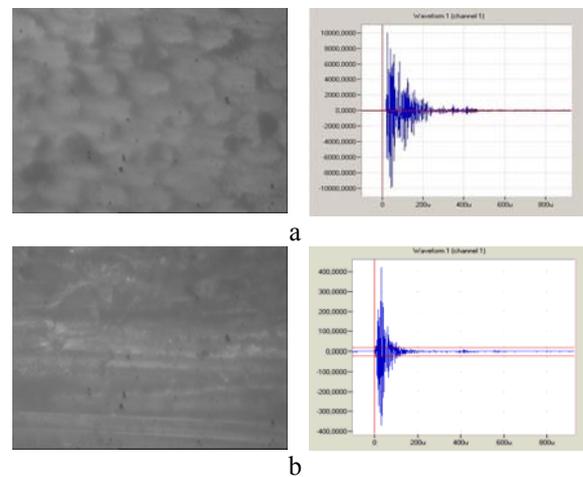


Fig. 6 Mechanisms of damage and rupture in static bending of the material 1: a - interface rupture, b - interfolys rupture

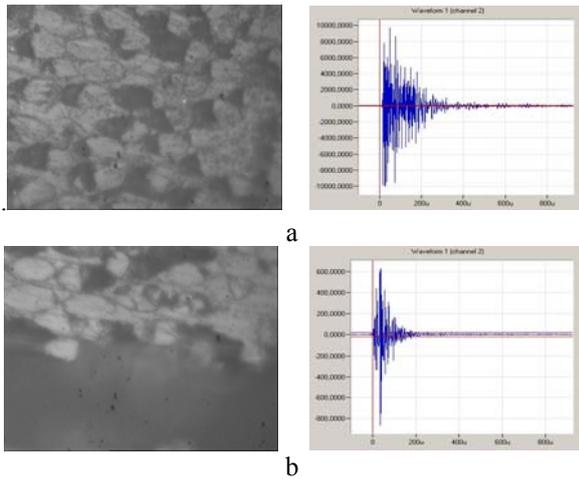


Fig. 7 Mechanisms of damage and rupture in cyclic bending of the material 1: a - interface rupture, b - inter-folds delamination

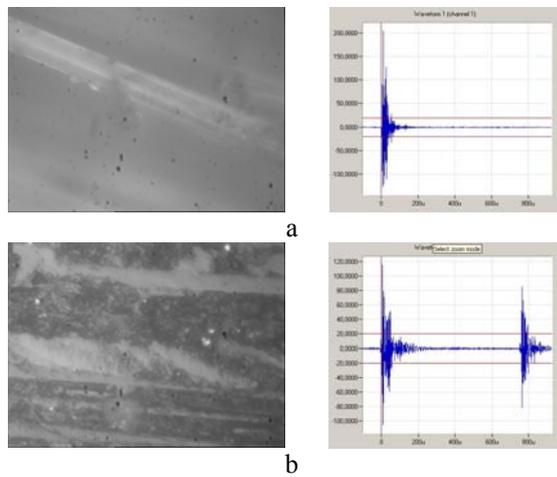


Fig. 8 Mechanisms of damage and rupture in static bending of material 2: a - rupture of fibres extended to 0° , b - inter-folds delamination

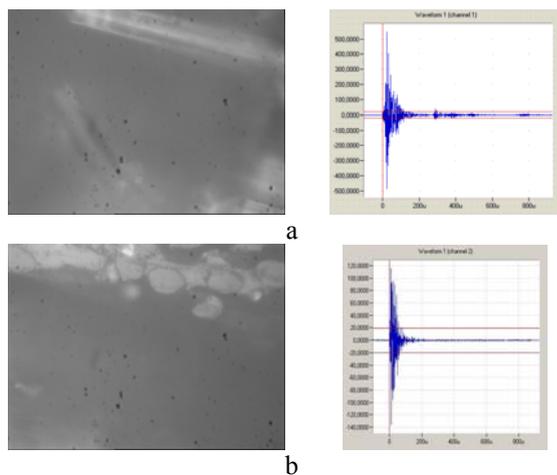


Fig. 9 Mechanisms of damage and rupture in cyclic bending of material 2: a - rupture of fibres extended to 0° , b - inter-folds delamination

5.2. Results analysis

A perfect correspondence resulted between the mechanisms observed under optical microscope and those

obtained by acoustic emission which are principally of three types: in static and cyclic load, i.e. rupture of fibres, rupture of the interface, and delamination rupture.

6. Conclusion

This study enabled us to see the influence of the type of loading on the mechanical behaviour of two laminate composites. The cyclic loading of materials studied in 3 points bending showed a linear reduction of the bending modulus with the increase in the number of cycles in loading and in unloading. The sequence of stacking has little influence on the values of the modulus determined starting from the curves of experimental in statics and cyclic tests. The mechanisms of ruptures and damage observed are primarily: rupture of fibres, rupture of the interface and delamination. The follow-up of the damage evolution by acoustic emission led to the detection of rupture mechanisms and of damage during the loading of material. The microscopic observations confirmed the detected mechanisms.

References

1. **Mouhmid, B., Imad, A., Benseddiq, N., Benmedakhène, S., Maazouz A.** A study of the mechanical behaviour of a glass fibre reinforced polyamide 6,6. Experimental Investigation.-Polymer Testing, 2006, v.25, p.544-552.
2. **Sgard, E., Benmedakhene, S., Laksimi, A., Laï, D.** Damage analysis and the fibre - matrix effect in polypropylene reinforced by short glass fibres above glass transition temperature.-Composites Structures, 2003, v.60, p.67-72.
3. **Berthelot, J.M., Fatmi, L.** Statistical investigation of the fracture behaviour of inhomogeneous materials in tension and three-point bending.-Engineering Fracture Mechanics, 2004, v.71, p.1535-1556.
4. **Nechad, H., Helmstetter, A., El Guerjouma, R., Sornette, D.** Andrade and critical time-to-failure laws in fiber-matrix composites. Experiments and model. -J. of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, v.53, p.1099-1127.
5. **Bounouas, L., Benmedakhene, S., Laksimi, A., Neumann, F., Imad, A., Azari, Z.** Experimental analysis of the influence of structural parameters on the behaviour of glass-fiber reinforced polypropylene composites.-Strength of Materials, 2001, v.33, No.1.
6. **Allaoui, S.** Etude d'un comportement de structure sandwich carton nodule. Thèse de doctorat.-Université de Compiègne, 2005.
7. **Benmedakhene, S., Kenane, M., Benzeggagh, M.L.** Initiation and growth of delamination in glass/epoxy composites subjected to static and dynamic loading by acoustic emission monitoring.-Composites Science and Technology, 1999, v.59, p.201-208.
8. **Jei, Y., Ouaskit, S., Nassif, R., Boughaleb, Y., Nechad, H., El Guerjouma, R.** Critical fracturing phenomenon in heterogeneous materials under external mechanical stress.-Physica A, 2005, v.358, p.10-21.

M. Kharoubi, L. Fatmi, R. Barbaoui, S. Bemedakhene,
A. El Mahi

TRIJUOSE TAŠKUOSE ĮVAIRIAUS LYGIO LENKIMO
APKROVA VEIKIAMŲ DVISLUOKSNIŲ
KOMPOZITŲ TYRIMAS AKUSTINE EMISIJA

R e z i u m ė

Straipsnyje aprašomi dvisluoksnių kompozitų, pagamintų RTM būdu ir statiškai bei cikliška lenkiamų apkraunant trijuose taškuose iki suirimo, eksperimentinių tyrimų rezultatai. Šie bandiniai buvo pagaminti iš epoksidinės dervos ir E stiklo pluošto. Mechaniniai bandymai atlikti naudojant „Instron“ įrenginį su kompiuterizuotu 50 kN galios apkrovos moduliu. Suirimo procesas buvo stebimas akustines emisijos sistema EPA NCV-2, sujungta su bandymo įrenginiu; bandiniai buvo papildomai tiriami optiniu mikroskopu. Tyrimų rezultatai rodo, kad mechaniniais bandymais gautų rezultatų eksperimentinių kreivių pobūdis priklauso nuo pažeidimo tipo. Didėjant ciklinės lenkimo apkrovos ciklų skaičiui, dvisluoksniu kompozito tamprumo modulis, apkraunant ir nukraunant apkrovą sumažėja. Akustinė emisija įgalino nustatyti pažeidimų tipą ir suirimą veikiant ciklinei apkrovai.

M. Kharoubi, L. Fatmi, R. Berbaoui, S. Bemedakhene,
A. El Mahi

STUDY OF THE DAMAGE BY ACOUSTIC EMISSION
OF TWO LAMINATE COMPOSITE SUBJECTED TO
VARIOUS LEVELS OF LOADINGS IN THREE
POINTS BENDING

S u m m a r y

We present on this paper an experimental study of the follow-up of the damage of two laminate composites manufactured by RTM during their loadings in 3 points bending in static and cyclic tests. These materials are composed E glass fibres and epoxy resin. The mechanical tests are carried out on a standard hydraulic machine INSTRON 8516 that can be used in static and fatigue tests. The machine is interfaced with a detected computer for control-

ling and data acquisition. The evolution of the damage is followed by acoustic emission using the system EPA NCV-2 connected to the testing machine, then confirmed by optical microscopic observations. The results obtained show that the curves of mechanical behaviour are strictly related to the observed damages. In the case of cyclic bending, the increase in the number of cycles involves a modulus reduction for the two materials that in loading as well as in unloading. The Acoustic emission allows to locate the mechanisms of damage and rupture caused by the loading of these materials.

М. Кгароуби, Л. Фамми, Р. Барбаоуи, С. Бэмэдакгэнэ,
А. Эл Маги

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДВУХСЛОЙНОГО
КОМПОЗИТА ВОЗДЕЙСТВОВАННОГО В ТРЕХ
ТОЧКАХ ИЗГИБАЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ ПРИ
ПОМОЩИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Р е з ю м е

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований двухслойного композита, изготовленного методом RTM при нагрузке трехточечным статическим и циклическим изгибом. Образцы изготовлены из эпоксидной смолы и стекловолокна типа E. Испытания проведены испытательной установкой „Instron“, снабженной силовым устройством мощностью 50 kN и компьютеризированным модулем. Процесс разрушения наблюдался при помощи прибора акустической эмиссии типа PA VSV-2, подключенного к испытательному устройству, при дополнительном исследовании оптическим микроскопом. Полученные результаты показывают, что характер кривых, полученных при механических испытаниях зависит от типа повреждения образца. При увеличении числа циклов нагружения модуль упругости двухслойного композита уменьшается при его нагружении и разгрузке. Метод акустической эмиссии позволил установить тип повреждения и разрушения образцов при воздействии циклической нагрузки.

Received September 24, 2007

Résumé

L'objectif principal de ce travail est la mise au point d'un ensemble d'outils permettant de donner des indications précises sur le dommage de deux matériaux composites de fabrications différentes chargés en flexion et en traction cyclique.

Une étude détaillée est menée pour caractériser le comportement mécanique en statique des matériaux considérés en flexion et en traction. Les résultats obtenus ont servis de données pour les essais cycliques.

Trois démarches expérimentales sont abordées pour décrire les comportements mécaniques des stratifiés composites sous chargements cyclique et dynamique:

Par la première démarche on mesure l'une des caractéristiques intrinsèques du stratifié et plus particulièrement les modules d'élasticités en flexion et en traction cyclique. En flexion cyclique une dégradation de la rigidité de ces matériaux est enregistrée dès les premiers cycles en charge et en décharge. L'augmentation du nombre cycles a conduit à une augmentation des dommages déduits, indépendamment du type de chargement. En traction cyclique seul l'unidirectionnel a présenté un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture en charge et en décharge. Les pertes de rigidités et donc les dommages déduits sont plus importants en décharge qu'en charge. Ce constat est lié aux phénomènes de glissement avec frottement des mécanismes de ruptures et d'endommagements créés en chargement. La mesure du module instantané est une démarche efficace pour la description de la dégradation du matériau et donc la quantification des dommages des composites chargés, mais elle ne peut être appliquée à des unidirectionnels dont le comportement est linéaire élastique jusqu'à la rupture.

La deuxième démarche est basée sur la technique d'émission acoustique en utilisant une classification non supervisée multi variables K-moyens à cinq descripteurs, la validité des classes est assurée par la minimisation du coefficient R_{ij} . Les résultats obtenus ont conduit à une bonne concordance des courbes de comportement essais mécaniques - émission acoustique. Trois types de dommages sont recensés et localisés par matériaux et par type de chargement. Les premiers dommages apparaissent dans la matrice, Ils sont suivis dans l'ordre par la rupture de l'inter plis ou la décohésion fibre matrice et la rupture des fibres. Les ruptures de fibres sont plus localisables en cyclique qu'en statique.

La troisième démarche est une application des vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des composites stratifiés chargés. Les courbes expérimentales réponses en fréquences font apparaître des pics correspondant aux fréquences de résonances des poutres. Lorsque le niveau de chargement augmente, les pics de résonances se décalent vers les basses fréquences. Ce décalage est plus important lorsque la fréquence de résonance augmente. En effet, l'augmentation du niveau de chargement entraîne une augmentation du taux d'endommagement du matériau diminuant ainsi sa rigidité en flexion et donc ses fréquences de résonance. Cette étude a confirmé la possibilité d'utiliser les vibrations linéaires comme outil de contrôle de santé des matériaux composites en service.

Mots clés

Stratifiés composites, Essais cycliques, Perte de rigidité, Dommage, Emission acoustique ; Classification des signaux acoustiques, Vibrations linéaires.

Abstract

The principal objective of this work is the development of a set of tools allowing to give precise information on the damage of two composite materials of different manufacture charged in cyclic bending and tension.

A detailed study is performed to characterize the mechanical behaviour in statics of considered materials in bending and tension. The obtained results were used as data for the cyclic tests.

Three experimental steps are approached to describe the mechanical behaviours of the composite laminates under cyclic and dynamic loadings:

In the first step one measures one of the intrinsic characteristics of the laminate and more particularly the modulus of elasticity in cyclic bending and tension. In cyclic bending a loss of the rigidity of these materials is recorded at the first cycles in load and unload. The increase of the cycle numbers led to an increase in the deduced damage, independently of the type of loading. In cyclic traction only the unidirectional material has presented an elastic linear behaviour until the rupture of load and unload. The losses of rigidities and thus the damage deduced are more significant in unload than in load. This finding is related to the phenomena of slip with friction of the mechanisms of ruptures and damages shouted in loading. The measurement of the instantaneous modulus is an effective step for the description of the degradation of material and the quantification of the damage of the charged composites, but it cannot be applied to the unidirectional materials whose behaviour is linear until the rupture.

The second step is based on the acoustic emission technique by using a multi variable K-means unsupervised classification with five features, the validity of the classes is ensured by the minimization of the R_{ij} coefficient. The results obtained had led to a good agreement between the curves of behaviour mechanical tests and acoustic emission. Three types of damages are listed and located by materials and type of loading. The first damages appear in the matrix, They are followed in the order by the rupture of inter folds or decohesion fibre matrix and the rupture of fibres. The fibre ruptures are more localised in cyclic than in statics.

The third step is an application of the linear vibrations for the characterization and the follow-up of the damage of the charged laminated composites. The experimental curves of response frequencies reveal peaks corresponding to the frequencies of resonances of the beams. When the loading level increases, the peaks of resonances shift towards the lower frequencies. This shift is more significant when the frequency of resonance is high. Indeed, the increase in the loading level involves an increase in the rate of material damage thus decreasing its rigidity in bending and its frequencies of resonance. This study has confirmed the possibility of using the linear vibrations as a health control tool of composite materials in use.

Key words

Composite laminates, Cyclic tests, Loss of rigidity, Damage, Acoustic emission; Classification of the acoustic signals, Linear vibrations.

ملخص

والهدف الرئيسي من هذا العمل هو تطوير مجموعة من الأدوات لتوفير معلومات دقيقة عن الأضرار الناجمة على تحميل اثنين من مواد مركبة تحت الشد والانحناء دوري. وتم إجراء دراسة تفصيلية لوصف السلوك الميكانيكية للمواد في حالة الشد والانحناء. واستعملت النتائج لأجراء الاختبارات دورية. ثلاثة مناهج تجريبية وتناقش لوصف السلوك الميكانيكي للمواد المركبة تحت الاجهادات الدوري والديناميكية

النهج الأول نقيس السمة الجوهرية للمواد المركبة وبالأخص معامل المرونة في حالة الشد والانحناء الدوريين. نلاحظ في حالة الانحناء تدهور صلابة هذه المواد خلال الدورات الأولى من التحميل والتفريغ. الزيادة عدد الدورات أدى إلى تفاقم الضرر، بغض النظر عن نوع من التحميل. في حالة الشد فقط المركب أحادي الاتجاه له سلوك خطي حتى الكسري كلتي التحميل والتفريغ. فقدان الصلابة ، وبالتالي التدهور أكبر بالتفريغ عنه بالتحميل، هذه هي الحقائق المتصلة ظواهر الاحتكاك مع انزلاق الكسر الانتجة عن التحميل. قياس معامل المرونة هو نهج فعال لوصف التدهور المادي ، وبالتالي تقدير حجم الأضرار للمواد المركبة تحت الاجهاد، ولكنه لا يمكن أن تطبق على المركب أحادي الاتجاه ذو السلوك الخطي حتى الكسر.

والنهج الثاني هو أساس تقنية الانبعاثات الصوتية باستخدام التصنيف دون إشراف متعدد السبل (-K-moyens) ذوخمسة متغيرات، صحة التقسيم يتحقق ذلك من خلال التقليل من معامل Rij. النتائج المحصل عليها أدت إلى تطابق منحنيات الاختبارات الميكانيكية مع المحصل عليها من الانبعاثات الصوتية. ثلاثة أنواع من الضرر قد تم تحديد نوعها حسب نوع المواد والشحن.

النهج الثالث هو تطبيق للاهتزاز الخطي لتوصيف ومراقبة الأضرار التي لحقت بالمواد المركبة تحت التحميل. منحنيات الاستجابة التجريبية تظهر قمم تردد المقابلة للترددات الرنين. عندما يزيد مستوى التحمل قمم الأصداء تتحول إلى الترددات المنخفضة نسبيا. هذا الفارق هو أكبر عندما يزيد تردد رنين. في الواقع تزايد مستوى التحميل يزيد من معدل تلف المواد مما يقلل من تصلب في الانحناء، وبالتالي رنين الترددات. أكدت هذه الدراسة جدوى استخدام الاهتزاز الخطي كأداة للمراقبة صحة للمواد مركبة في الخدمة.

المصطلحات

المواد المركبة، اختبارات دورية ، فقدان صلابة ، الضرر ، الانبعاثات الصوتية ، تصنيف الإشارات الصوتية ، الاهتزاز الخطية.