



**HAL**  
open science

# Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite

Sahir Masmoudi

► **To cite this version:**

Sahir Masmoudi. Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite. Autre [cond-mat.other]. Le Mans Université; Université de Sfax (Tunisie), 2013. Français. NNT : 2013LEMA1023 . tel-00955508

**HAL Id: tel-00955508**

**<https://theses.hal.science/tel-00955508>**

Submitted on 4 Mar 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# THESE

(en cotutelle)

*Pour obtenir le grade de*

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DU MAINE ET DE SFAX**

**Discipline : Physique**

**Spécialité : Acoustique**

*Présentée et soutenue publiquement par*

**Sahir MASMUDI**

Le 27/09/2013

## ***Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite***

*Devant le jury composé de :*

<b>M. GARGOURI</b>	<b>Professeur, Faculté des Sciences de Sfax</b>	<i>Président</i>
<b>C. KARRA</b>	<b>Professeur, Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Sfax</b>	<i>Rapporteur</i>
<b>A. LAKSIMI</b>	<b>Professeur, Université de Technologie de Compiègne</b>	<i>Rapporteur</i>
<b>A. VIVET</b>	<b>MCF HDR, Pôle universitaire de Montfoulon</b>	<i>Examineur</i>
<b>M. HADDAR</b>	<b>Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax</b>	<i>Invité</i>
<b>A. EL MAHI</b>	<b>Professeur, Université du Maine</b>	<i>Directeur</i>
<b>S. TURKI</b>	<b>Professeur, Faculté des Sciences de Sfax</b>	<i>Directeur</i>
<b>R. EL GUERJOURA</b>	<b>Professeur, Université du Maine</b>	<i>Co-directeur</i>





UNIVERSITÉ DU MAINE



UNIVERSITÉ DE SFAX

## *Thèse*

# *Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite*

Présentée par : **Sahir MASMUDI**

Directeurs de Thèse : **Abderrahim EL MAHI**  
**Saïd TURKI**



**École doctorale SPIGA**



**École doctorale Sciences Fondamentales de la FSS**



# DEDICACE

*J'ai l'honneur de dédier ce travail*

*À l'âme du prophète*

*Mohamed, que dieu le bénit, qui nous a éclairé la voie du bonheur.*

*À mes chers parents*

*Qu'ils trouvent dans ces mots l'expression de ma profonde gratitude ainsi  
que ma sincère reconnaissance pour leur sacrifice et leur soutien.*

*Je leurs dédie ce travail en signe d'une sincère reconnaissance et d'une gratitude  
éternelle.*

*À mon cher frère et mes chères sœurs*

*Je vous aime de tout mon cœur*

*Je vous souhaite une vie pleine de joie, de bonheur et de réussite dans vos études  
et votre vie.*

*À tous les membres de ma grande famille*

*Qui ont toujours été affectueux et serviables*

*En témoignage de mon amour, je vous souhaite la bonne santé.*

*À tous mes fidèles amis pour leur aide et leur encouragement.*

*À tous ceux qui me sont chers*

*Que ce travail soit l'expression de ma vive gratitude et de mon profond  
attachement*

*Sahir ...* 



# REMERCIEMENTS

*Ce travail de thèse en cotutelle a été effectué dans le cadre d'une collaboration entre la faculté des sciences et techniques de l'université du Maine (France) et la faculté des sciences de Sfax (Tunisie).*

*Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **A. EL MAHI** mon directeur de thèse Français pour son soutien qu'il n'a cessé de m'apporter, sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont permis de mener à bien ce travail, et à Monsieur **S. TURKI** mon directeur de thèse Tunisien qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et ma profonde gratitude pour avoir initié et dirigé ce travail.*

*Je remercie aussi Monsieur **R. EL GUERJOURA** co-directeur de thèse pour ses aides, sa collaboration aussi efficace qu'agréable tout au long de ce travail.*

*Mes vifs respects s'expriment aux membres de jury le Professeur **M. GARGOURI**, le Professeur **M. HADDAR**, le Professeur **C. KARRA**, le Professeur **A. LAKSIMI** ainsi que Monsieur **A. VIVET** (MCF HDR), pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de faire partie du jury.*

*Un grand merci aux techniciens de l'IUT (Le Mans-France) notamment Monsieur **A. ARAGOT**, **C. BOUCHERIE**, ainsi que Monsieur **S. LEBON** technicien du laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (LAUM) pour leurs aides.*

*Je tiens à remercier vivement mes collègues du LAUM et mes chers amis **M. KARRAY**, **I. BEN AMMAR** et **M. IDRIS** qui m'ont soutenu durant les moments difficiles et l'aide qu'ils m'ont apporté tout au long de mes séjours en France.*

*Je pense tout particulièrement à **MES PARENTS** pour leurs sacrifices, et toute **MA FAMILLE** pour le soutien moral qu'ils m'ont apporté tout au long de ce travail, merci pour tout ce que vous avez fait pour moi*

*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.*

# LISTE DES PUBLICATIONS

## Publications

- Art-1) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUA & S. TURKI, 'Mechanical behaviour and identification of damage by acoustic emission of smart composites' *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. Accepté pour publication
- Art-2) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUA & S. TURKI, 'Mechanical behaviour and health monitoring by acoustic emission of sandwich composites implanted by piezoelectric sensor' Soumis pour publication dans *Composites Part B: Engineering*.
- Art-3) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, S. TURKI & R. EL GUERJOUA, 'Fatigue behaviour and structural health monitoring by acoustic emission of E-glass/epoxy laminates with piezoelectric implant' Soumis pour publication dans *Composite Structures*.
- Art-4) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, S. TURKI & R. EL GUERJOUA, 'Health monitoring by acoustic emission of composite laminates integrated by piezoelectric implant' Soumis pour publication dans *Applied Acoustics*.

## Communications

- Com-1) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, S. TURKI et R. EL GUERJOUA, 'Structural health monitoring by acoustic emission of smart composite laminates embedded with piezoelectric sensor', *Cinquième Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques (CMSM 2013)*, Djerba-Tunisie, 25-27 Mars 2013 **published** in *Design and Modelling of Mechanical Systems Design and Modeling of Mechanical Systems*, pp. 307–314, DOI: 10.1007/978-3-642-37143-1\_37- Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013 (Présentation orale).
- Com-2) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUA & S. TURKI 'Integration of piezoelectric sensors for structural health monitoring of composite materials' 13<sup>th</sup> International Symposium on Non destructive Characterization of materials NDCM-XIII, Mai 2013 (Poster).
- Com-3) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUA & S. TURKI 'Analyse du comportement mécanique et identification des mécanismes l'endommagement des composites instrumentés' 11<sup>ème</sup> Congrès de Mécanique - Agadir, du 23 au 26 avril 2013 (Présentation orale)
- Com-4) **S. MASMUDI**, A. EL MAHI, S. TURKI et R. EL GUERJOUA, 'Comportement mécanique et identification des mécanismes d'endommagement par émission acoustique

des composites instrumentés " *JNC 18, AMAC, Nantes, 12-14 juin 2013* (Présentation orale)

- Com-5) **S. MASMOUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUMA et S. TURKI, 'Structural Health Monitoring of Smart Composite Material by Acoustic Emission', *Congrès International d'Acoustique (ACOUSTICS 2012)*, Nantes-France 23-27 Avril 2012 (Présentation orale).
- Com-6) **S. MASMOUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUMA et S. TURKI, 'Identification de l'endommagement par émission acoustique d'un composite instrumenté par implant piézoélectrique', *Congrès Tunisien de Mécanique (COTUME 2012)*, Sousse-Tunisie 19-21 Mars 2012 (Présentation orale).
- Com-7) **S. MASMOUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUMA et S. TURKI, 'Mechanical Behavior and Identification of Damage Mechanisms of Integrated Composite Structure', *International Symposium Non Destructive Testing and Evaluation 2012: Physics, Sensors, Materials and Information*, Ecole Centrale de Nantes-Nantes, France 21-22 Novembre 2011 (Poster)
- Com-8) **S. MASMOUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUMA and S. TURKI, 'Health Monitoring of the Damage of Laminate Embedded with Piezoelectric Sensor by Acoustic Emission', *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics (ICAMEM 2010)*, Hammamet-Tunisia, 18-20 December 2010 (Présentation orale).

### **Journées scientifiques**

- Com-9) **S. MASMOUDI**, A. EL MAHI, R. EL GUERJOUMA et S. TURKI, 'Comportement mécanique et identification des mécanismes d'endommagement d'une structure composite instrumentée', *Journée Scientifique Evaluation et Contrôle Non Destructifs (END/CND 2012), caractérisation et durabilité des matériaux et structures*, Université du Maine-Le Mans, France 14 Octobre 2011 (Poster)
- Com-10) **S. MASMOUDI**, A. EL MAHI, S. TURKI et R. EL GUERJOUMA, 'Comportement mécanique et caractérisation du matériau composite intégré d'un capteur piézoélectrique : vers le concept de matériau intelligent', *Journées Acoustique Physique, Sous-Marine et Ultra-Sonore (JAPSUS 2011)*, Lille, France 8-10 juin 2011 (Présentation orale)
- Com-11) **S. MASMOUDI**, A. EL MAHI, S. TURKI et R. EL GUERJOUMA, 'Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite', *11ème journée de présentation des travaux de thèse des doctorants de 2ème année 2011*, à l'ONIRIS-Nantes, France 21 avril 2011 (Présentation orale).

# Résumé

Ce travail de thèse porte sur le contrôle de santé intégré par émission acoustique des matériaux composites stratifiés et sandwichs. Le capteur d'EA est d'une part implanté dans la masse du matériau et d'autre part collé à la surface de ce dernier. Une première étude est consacrée à l'étude de l'influence de l'implant piézoélectrique dans le volume du matériau sur le comportement et les caractéristiques mécaniques en statiques, en fatigue cyclique et en fluage sous sollicitations en traction et en flexion. Les signaux d'émission acoustique sont collectés au cours des essais sur les différents matériaux. Les mécanismes d'endommagement de chaque matériau sont identifiés et caractérisés en utilisant une analyse multiparamétrique ( $k$ -moyennes) des signaux collectés. La dynamique de chaque mécanisme est suivie jusqu'à la rupture permettant de discriminer les mécanismes les plus critiques conduisant à la rupture du matériau. Une étude comparative des signaux d'EA entre matériau instrumenté en surface et celui instrumenté en volume avec insertion d'élément piézoélectrique est également menée. Elle a montré que les matériaux avec capteurs intégrés sont plus sensibles à l'émission acoustique, améliorant ainsi l'identification des mécanismes d'endommagement et le contrôle de santé intégré des matériaux composites étudiés. Enfin, la dernière partie du travail a été consacrée à l'étude de l'influence de l'intégration de plusieurs capteurs dans des structures en composites stratifiés et sandwichs. L'analyse des résultats expérimentaux et l'observation des signaux d'EA obtenus dans ces structures soumises à différentes sollicitations ont permis de définir les principaux signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de structure. La localisation des sources d'endommagement a mis en évidence que les événements acoustiques sont apparus loin des positions des capteurs intégrés. De point de vue comparaison entre matériau instrumenté et matériau non instrumenté, l'activité acoustique montre clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein du composite. Cet avantage réside dans le fait de la détection expérimentale des modes d'endommagement précoces et leur chronologie d'apparition, faisant ainsi révéler les performances du composite instrumenté vis-à-vis à sa réponse envers l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques.

**Mots clé :** Composites intelligents, implant piézoélectrique, traction, flexion 3-point, statique, fatigue, fluage, endommagement, émission acoustique,  $k$ -moyennes.

---

# **Table des matières**

---

<b>Chapitre 1: Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 2: Etude bibliographique</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2. Matériaux composites</b> .....	<b>7</b>
2.2.1. Définition .....	7
2.2.2. Le stratifié .....	8
2.2.2.1. La matrice .....	9
2.2.2.2. Les fibres .....	9
2.2.3. Le sandwich .....	10
2.2.4. Mécanismes d'endommagement des matériaux composites .....	12
2.2.4.1. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés .....	12
2.2.4.2. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux sandwichs .....	14
<b>2.3. Contrôle Non Destructif (CND) classique</b> .....	<b>15</b>
2.3.1. Emission Acoustique .....	16
2.3.1.1. Définition .....	16
2.3.1.2. Description et acquisition des signaux de l'émission acoustique .....	16
2.3.1.3. Transducteurs utilisés pour l'EA .....	17
2.3.1.4. Paramètres caractéristiques des signaux d'émission acoustique .....	18
2.3.1.5. Identification de la signature acoustique dans les matériaux composites.....	19
2.3.1.5.1. Analyse mono-paramétrique .....	19
2.3.1.5.2. Analyse statistique multi-paramétriques .....	20
2.3.1.5.3. Présentation de segmentation des données par la technique des <i>k</i> -moyennes .....	23
2.3.1.5.4. Identification de la signature acoustique dans les matériaux sandwichs .....	24
<b>2.4. Contrôle Non Destructif des matériaux intelligents (CND intégré)</b> .....	<b>25</b>
2.4.1. Définition d'une structure Intelligente (Smart structure) .....	25
2.4.2. Différent type de capteurs intégrés.....	26
2.4.2.1. Les fibres optiques .....	27
2.4.2.2. Les piézoélectriques .....	27
2.4.3. État de l'art du contrôle de santé par capteurs intégrés .....	29
2.4.4. Présentation de la technique de l'implant piézoélectrique .....	32
2.4.5. Etat de l'art des couches intelligentes (SMART Layer).....	36
2.4.6. Problèmes d'intégration .....	37
<b>2.5. Cadre et objectifs de l'étude</b> .....	<b>39</b>
<b>2.6. Conclusions</b> .....	<b>39</b>
<b>Chapitre 3: Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Matériaux Composites Stratifiés en Flexion Trois Points</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1. Introduction</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2. Mise en œuvre des composites stratifiés destinés aux essais de flexion trois-points</b> .....	<b>43</b>
<b>3.3. Procédures expérimentales</b> .....	<b>44</b>
<b>3.4. Classification des signaux de l'EA par la méthode des <i>k</i> moyennes</b> .....	<b>48</b>

<b>3.5. Faisabilité de l'étude</b> .....	49
<b>3.6. Résultats des essais de flexion appliqués aux matériaux unidirectionnels intégrés par capteur piézoélectrique</b> .....	51
3.6.1. Résultats des essais statiques.....	51
3.6.1.1. Comportement mécanique .....	51
3.6.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	53
3.6.1.3. Observation du capteur implanté dans le matériau après rupture .....	56
3.6.2. Résultats des essais de fatigue cyclique .....	57
3.6.2.1. Comportement mécanique .....	57
3.6.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	58
3.6.3. Résultats des essais de fluage .....	60
3.6.3.1. Comportement mécanique .....	60
3.6.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	61
<b>3.7. Résultats des essais de flexion appliqués aux composites stratifiés croisés intégrés par capteur piézoélectrique</b> .....	63
3.7.1. Résultats des essais statiques.....	63
3.7.1.1. Comportement mécanique .....	63
3.7.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	65
3.7.2. Résultats des essais de fatigue cyclique .....	66
3.7.2.1. Comportement mécanique .....	66
3.7.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	68
3.7.3. Résultats des essais de fluage .....	69
3.7.3.1. Comportement mécanique .....	69
3.7.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	70
<b>3.8. Conclusions</b> .....	71
<b>Chapitre 4: Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Matériaux Composites Stratifiés en Traction</b> .....	73
<b>4.1. Introduction</b> .....	75
<b>4.2. Mise en œuvre des composites stratifiés destinés aux essais de traction</b> .....	76
<b>4.3. Dispositif expérimental</b> .....	76
<b>4.4. Faisabilité de l'étude en traction</b> .....	77
<b>4.5. Résultats des essais de traction appliqués aux matériaux unidirectionnels intégrés par capteur piézoélectrique</b> .....	79
4.5.1. Résultats des essais statiques.....	79
4.5.1.1. Comportement mécanique .....	79
4.5.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	80
4.5.1.3. Observation des faciès de rupture .....	83
4.5.2. Résultats des essais de fatigue cyclique .....	83
4.5.2.1. Comportement mécanique .....	83
4.5.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	84
4.5.3. Résultats des essais de fluage .....	85

4.5.3.1. Comportement mécanique .....	85
4.5.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	86
<b>4.6. Résultats des essais de traction appliqués aux matériaux croisés intégrés par capteur piézoélectrique .....</b>	<b>88</b>
4.6.1. Résultats des essais statiques.....	88
4.6.1.1. Comportement mécanique .....	88
4.6.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	89
4.6.2. Résultats des essais de fatigue cyclique .....	91
4.6.2.1. Comportement mécanique .....	91
4.6.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	92
4.6.3. Résultats des essais de fluage .....	93
4.6.3.1. Comportement mécanique .....	93
4.6.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	94
<b>4.7. Conclusions .....</b>	<b>96</b>
<b>Chapitre 5: Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Matériaux Composites Sandwichs .....</b>	<b>97</b>
<b>5.1. Introduction .....</b>	<b>99</b>
<b>5.2. Mise en œuvre des matériaux composites sandwichs .....</b>	<b>99</b>
<b>5.3. Dispositif expérimental .....</b>	<b>101</b>
<b>5.4. Résultats .....</b>	<b>102</b>
5.4.1. Résultats des essais statiques.....	102
5.4.1.1. Comportement mécanique .....	102
5.4.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	103
5.4.1.3. Observation des faciès de rupture .....	108
5.4.2. Résultats des essais de fatigue cyclique .....	108
5.4.2.1. Comportement mécanique .....	108
5.4.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	109
<b>5.5. Conclusions .....</b>	<b>111</b>
<b>Chapitre 6: Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Structures en Matériaux Composites .....</b>	<b>112</b>
<b>6.1. Introduction .....</b>	<b>114</b>
<b>6.2. Application de l'implant piézoélectrique à une structure 2D (plaque) en matériaux composites .....</b>	<b>114</b>
6.2.1. Mise en œuvre des plaques .....	114
6.2.2. Dispositif expérimental .....	116
6.2.3. Résultats des essais sur les plaques en matériau stratifié .....	117
6.2.3.1. Comportement mécanique .....	117
6.2.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement.....	118
6.2.3.3. Localisation des sources d'endommagement .....	119
6.2.4. Résultats des essais sur les plaques en matériau sandwich .....	120
6.2.4.1. Comportement mécanique .....	120

6.2.4.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement .....	121
6.2.4.3. Localisation des sources d'endommagement .....	122
<b>6.3. Application de l'implant piézoélectrique aux structures 3D en matériau composite.....</b>	<b>123</b>
6.3.1. Mise en œuvre des structures 3D .....	123
6.3.2. Dispositif expérimental .....	124
6.3.3. Résultats des essais sur les structures 3D.....	124
6.3.3.1. Comportement mécanique.....	124
6.3.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement.....	125
6.3.3.3. Localisation des sources d'endommagement .....	126
<b>6.4. Conclusions .....</b>	<b>127</b>
<b>Chapitre 7: Conclusion générale.....</b>	<b>128</b>
<b>Références .....</b>	<b>132</b>

## **Chapitre 1:**

# **Introduction générale**

L'utilisation des matériaux composites s'est imposée depuis ces dernières années dans différents secteurs industriels. Leurs principales applications se trouvent dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, les bâtiments, l'aérospatial, ainsi que les sports et les loisirs. Les raisons d'un tel succès sont attribuées à leurs qualités de réduction des coûts d'exploitation, telles que leur bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, leur souplesse de forme et surtout leur faible masse qui permet un allègement conséquent des structures et leurs caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Cependant, au cours de leur utilisation, les matériaux composites subissent des agressions à l'origine d'une large variété d'endommagement: des défauts dus à l'exposition à l'humidité, à des cycles de température, à la fatigue mécanique ou à des impacts. Dans la perspective de quantifier l'endommagement des matériaux composites et d'identifier les différents mécanismes sources, les méthodes de contrôle non destructif (CND) des matériaux composites, depuis leur polymérisation jusqu'à la fin de leur cycle de vie, sont nécessaires.

Selon le système structural, le coût associé à l'inspection du CND systématique et de maintenance peut être important par rapport au total des coûts du cycle de vie du système à contrôler. Par exemple pour les avions commerciaux et militaires, 27% des coûts du cycle de vie moyenne sont liés à l'inspection et à la réparation [1]. En outre, il y a un coût d'opportunité associé à la perte de disponibilité opérationnelle au cours de l'entretien. Pour résoudre tous ces problèmes, de nombreux systèmes dits in-situ ou intégrés sont proposés pour surveiller les endommagements dans les structures composites au cours de leur utilisation. Il existe divers techniques de contrôle de santé in-situ dont on cite les méthodes de contrôle par micro-ondes, fibres optiques, ultrasons et émission acoustique (EA).

Aujourd'hui, l'industrie est à la recherche de techniques de CND fiables et de mise en œuvre simple afin de détecter un défaut, de le caractériser (position, taille) et de le surveiller en temps réel dans de telles structures. C'est l'avènement des matériaux intelligents. Les activités de recherches dans le domaine générique des matériaux et des structures intelligentes ("Smart Materials and Structures") sont aujourd'hui conséquentes et représentent un potentiel important d'innovations technologiques. Ces innovations peuvent répondre aux besoins de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, l'espace, l'énergie et le génie civil. Ces besoins s'expriment par exemple en termes de réduction des niveaux vibro-acoustiques ou en termes d'amélioration de la fiabilité des constructions mécaniques. Les questions majeures de l'allègement et de la conception optimale sont les principaux vecteurs des travaux menés. Pour réaliser la conception optimale de ces systèmes et l'adaptation des structures mécaniques, de nouveaux outils scientifiques et technologiques sont maintenant étudiés et mises en œuvre. Ils devraient permettre la fabrication des matériaux composites incorporant de nouveaux matériaux

fonctionnels (dispositifs électromécaniques) qui peuvent être actifs ou passifs. Les matériaux piézo-électriques, les fibres optiques et les magnétostrictifs/électrostrictif sont des exemples typiques. Cependant, la présence de ces inclusions provoque des discontinuités géométriques qui sont responsables de la réduction des propriétés mécaniques, résistance à la rupture et les performances des matériaux en général. Il est donc important d'étudier les effets de ces éléments implantés sur les matériaux d'accueil.

Dans le but de surveiller de près le matériau, améliorer son fonctionnement, en réduire la maintenance et, enfin, allonger son cycle de vie, notre étude s'est orientée vers le contrôle de santé structurale en temps réel et en continu par capteurs piézoélectriques insérés dans la masse. Notre choix s'est porté sur des capteurs piézoélectriques grâce à leurs caractéristiques adaptables dans le cadre de notre travail des matériaux composites dit « intelligents ». Ces capteurs sont utilisés de manière passive comme capteur d'EA provenant des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion 3-points et de traction, en statique, en fatigue cyclique et en fluage. Cependant, l'incorporation de ces éléments dans la masse peut fragiliser le matériau et peut être source d'endommagement et de rupture. Ce point-là est également étudié en fonction de la taille des capteurs introduits et en fonction des différents types de chargement mécanique appliqués sur des échantillons de matériaux composites.

Après l'introduction du travail dans le présent chapitre, le chapitre 2 rassemble les éléments bibliographiques nécessaires à l'étude du comportement mécanique et à la caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré des matériaux composites. La première partie est consacrée à une présentation rapide des matériaux composites à matrice polymère, suivie par une description détaillée des matériaux étudiés dans ce travail et leurs modes d'endommagements. La deuxième partie est dédiée à la technique d'émission acoustique (EA), orientée vers la discrimination des sources d'EA au sein des matériaux composites. Les différents types de capteurs intégrés, l'état de l'art du contrôle non destructif (CND) intégré des matériaux composites ainsi qu'une explication détaillée de la méthode de l'implant piézoélectrique sont énoncés à la fin de ce chapitre.

Au chapitre 3, nous présentons les résultats obtenus au cours des essais de flexion 3-points effectués sur des échantillons en composites stratifiés. Ils sont constitués de fibres de verre et de résine époxyde avec deux séquences d'empilement  $[0]_{24}$  et  $[0_6/90_6]_s$ . Afin de contrôler l'effet de l'insertion d'un objet externe au sein du composite, une étude détaillée est menée sur le comportement en statique, en fluage et en fatigue cyclique sur des échantillons de ces composites avec implants métalliques et piézoélectriques de différentes tailles insérés dans la masse. Ensuite, une comparaison des résultats, en termes de suivi par émission acoustique des mécanismes

d'endommagement est effectuée sur des stratifiés avec et sans capteurs d'émission acoustique insérés dans la masse. L'analyse et l'observation des signaux d'EA ont conduit à l'identification des signatures acoustiques des différents modes d'endommagement dominants dans les matériaux composites stratifiés avec et sans capteurs intégrés.

Le chapitre 4 présente les résultats obtenus lors des essais de traction en statique, en fatigue et en fluage effectués sur des composites stratifiés avec des séquences d'empilement  $[0]_{12}$  et  $[0_3/90_3]_s$ . Comme dans le chapitre précédent, là aussi deux types d'éprouvettes, avec et sans capteurs intégrés de différentes tailles sont considérés. Une comparaison est menée tout d'abord en termes de comportement mécanique afin de voir l'impact de l'intégration sur l'intégrité des matériaux étudiés. Ensuite, une identification des signatures acoustiques de chaque mécanisme d'endommagement dans les deux types de matériaux (avec et sans intégration) est présentée. Enfin, l'analyse et l'observation des signaux d'EA en fonction du type d'échantillon, ont permis de définir les principales signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de matériau composite.

Dans le chapitre 5, l'effet de l'implant piézoélectrique sur le comportement mécanique des composites sandwichs est étudié. Ces matériaux sont constitués de fibres de verre et de résine époxyde pour les peaux et d'une âme en mousse PVC. Les résultats des essais de flexion trois-points en statique et en fatigue cyclique, effectués sur des échantillons de composites sandwichs avec et sans intégration de capteurs d'émission acoustique sont présentés. Une comparaison est menée tout d'abord en termes de comportement mécanique afin de voir l'impact de l'intégration sur les propriétés mécaniques de ces matériaux. Ensuite, les signatures acoustiques des différents mécanismes d'endommagement sont identifiées et suivies au cours des essais.

Dans le chapitre 6, est étudiée l'influence de l'intégration de plusieurs capteurs dans des structures en matériaux composites. Des plaques (2D) et des structures (3D) de formes simples constituées de composites stratifiés et de matériaux sandwichs sont considérées. Le comportement mécanique, l'activité acoustique ainsi que la localisation des sources d'endommagement dans les différentes structures avec et sans implants piézoélectriques sont comparés. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus dans ces structures soumises à différentes sollicitations permet de mieux cerner l'influence de l'impact de l'intégration des capteurs sur le comportement mécanique, la localisation et le suivi des mécanismes d'endommagement.

Enfin, les divers résultats obtenus lors de ce travail sont repris dans la conclusion générale qui constitue le chapitre 7.

## **Chapitre 2 :**

# **Etude bibliographique**

## Résumé

Ce chapitre rassemble les éléments bibliographiques nécessaires à l'étude du comportement mécanique et à la caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré des matériaux composites. La première partie est consacrée à une présentation rapide des matériaux composites à matrice polymère, suivie par une description détaillée des matériaux étudiés dans ce travail et leurs modes d'endommagements. La deuxième partie est dédiée à la technique d'émission acoustique (EA), orientée vers la discrimination des sources d'EA au sein des matériaux composites. Les techniques d'analyse statistiques ainsi que les résultats de la littérature relatifs à la discrimination des mécanismes d'endommagement sont rappelés. Ils ont pour but d'extraire, parmi des jeux de données volumineux et complexes, les paramètres qui aideront à la classification des données et donc à l'identification de la signature acoustique des différentes sources d'endommagement. Les différents types de capteurs intégrés, l'état de l'art du contrôle non destructif (CND) intégré des matériaux composites ainsi qu'une explication détaillée de la méthode de l'implant piézoélectrique sont énoncés dans la dernière partie de ce chapitre.

## 2.1. Introduction

Les matériaux composites à fibres continues et à matrices polymères sont de plus en plus utilisées dans des applications structurales, dans diverses industries (aéronautique, maritime, automobile, ferroviaire, etc.). Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses applications basées sur ces matériaux ont vu le jour dans plusieurs pays d'Europe, aux Etats-Unis, au Canada, au Japon...etc. Cependant, malgré le caractère innovant de ces matériaux et leurs réponses partielles à certains questionnements des maîtres d'ouvrages, la problématique du contrôle continu de leurs santé structurales reste ouverte. Dans cette thèse, nous proposons de développer le concept de matériau composite intelligent: ce sont des composites dotés de la possibilité de diagnostic de santé structurale en temps réel et en continu par capteurs d'émission acoustique, insérés dans la masse. Ce concept assure l'intégration aussi bien du côté mécanique, que de la composante détection et suivi de santé structurale, assurés par le diagnostic des capteurs d'émission acoustique. Dans ce chapitre nous proposons de rassembler les éléments bibliographiques nécessaires à l'étude du comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré des matériaux composites.

## 2.2. Matériaux composites

### 2.2.1. Définition

Un matériau composite est constitué d'une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection appelée matrice qui est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) et qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort (Fig. 2.1). Cette association conduit à un matériau dont les performances sont supérieures à celles d'un matériau à un seul constituant.

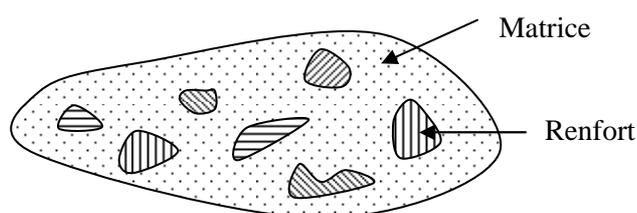


Figure 2.1. Schéma d'un matériau composite

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice:

- les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, le volume le plus important aujourd'hui à l'échelle industrielle,

- les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique),
- les composites à matrices métalliques (CMM) qui intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisir pour leur capacité à répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

Dans notre étude, on s'intéresse aux matériaux composites stratifiés et sandwichs, qui font partie de la première famille, mentionnée précédemment.

### 2.2.2. Le stratifié

Les composites stratifiés sont utilisés dans divers domaines de haute technologie (aéronautique, aérospatiale, construction navale et ferroviaire, automobile...). Ils sont plus avantageux par rapport aux matériaux métalliques. Ils sont caractérisés par leur légèreté, leur tenue à la corrosion, leur facilité de mise en œuvre, leur tenue à la fatigue, etc.

Un stratifié résulte de la superposition de plusieurs plis (couches) constitués par des fibres enrobées d'une résine. Lorsque toutes les fibres sont dans la même direction, le pli est dit unidirectionnel. Il est dit tissé, lorsque les fibres sont disposées suivant deux directions différentes, appelées sens chaîne et sens trame. S'il y a autant de fibres dans les sens chaîne et trame, le pli est dit tissé équilibré. Les plis successifs sont en général orientés différemment (classiquement  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ). La figure 2.2 présente un exemple de la composition d'un stratifié  $[60^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ]_s$  ayant la symétrie miroir. Les minimums technologiques sont de 3 à 4 couches de tissu équilibré ou 8 couches unidirectionnelles et une épaisseur de 1 mm.

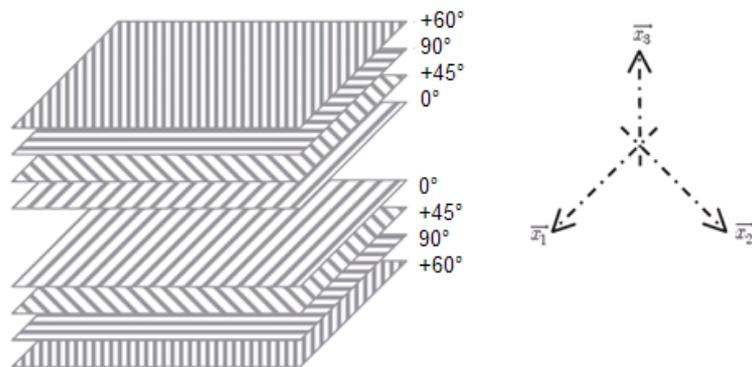


Figure 2.2. Composition d'un stratifié  $[60^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ]_s$

Un matériau composite stratifié est composé d'une matrice et des fibres qui peuvent être de différents types.

### 2.2.2.1. La matrice

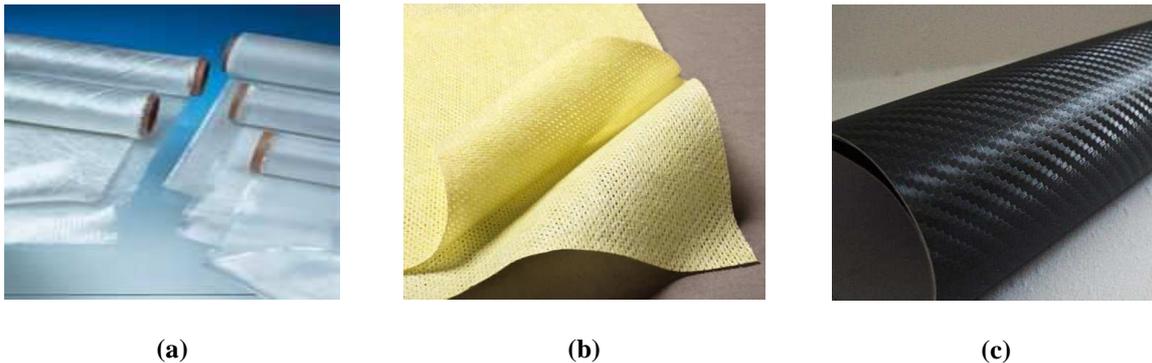
Le choix de la matrice dépend du domaine d'application auquel est destiné le composite (résistance à des températures élevées, résistance à la corrosion, coût de revient etc.). Le rôle de la matrice est de transmettre les charges entre les fibres pour utiliser leurs propriétés mécaniques et de maintenir les renforts dans une forme compacte. Les résines les plus utilisées sont les époxydes et les polyesters insaturés qui sont des résines à polymérisation irréversible.

- Résines polyesters: elles se présentent sous la forme d'une solution de polyacide et de polyalcool qui se rigidifient sous les actions d'un catalyseur et de la chaleur. Les résines polyesters principalement utilisés sont : les orthophtaliques qui sont les plus courantes, les isophtaliques ayant une excellente tenue chimique et à l'humidité, les chlorés et les bisphénols ayant des excellentes caractéristiques chimiques et thermiques.

- Résines époxydes: sont des produits thermodurcissables. Ces résines résultent d'une réaction de polyaddition entre un monomère époxydique et un durcisseur anhydrique d'acide ou amine, sous un apport thermique. Leurs performances mécaniques élevées sont supérieures à celles des polyesters. Elles se caractérisent par une bonne tenue en température, des performances adhésives et une dilatation limitée.

### 2.2.2.2. Les fibres

Le rôle des fibres est d'assurer les fonctions mécaniques. Les fibres les plus utilisées sont les fibres de verre, d'aramide et de carbone (Fig. 2.3). Elles présentent des caractéristiques intéressantes:



*Figure 2.3. Exemples de fibres les plus utilisées dans la construction des stratifiés : a) verre, b) aramide et c) carbone*

- Les fibres de verre sont produites à partir du verre en fusion passant à travers des filières de 3 à 25  $\mu\text{m}$  où il est refroidi. L'excellent rapport qualité/prix des fibres de verre fait qu'elles sont les plus utilisées actuellement dans les composites à matrice polymère. Le verre est un matériau très fragile du fait de sa forte sensibilité aux microfissures. Cette fragilité diminue lorsque le verre est sous forme de fibre, puisque les microfissures sont moins nombreuses, ce qui lui confère de bonnes performances. D'une manière générale, les fibres de

verre présentent une résistance élevée à la rupture, une masse volumique faible (voisine de  $2500 \text{ kg/m}^3$ ) et une rigidité relativement plus faible que celles des autres renforts. Il existe différents types de verre : le verre E, C, D, R ou S, de différentes propriétés dues à la différence de la composition du mélange de préparation.

- Les fibres de Kevlar ou aramide, qui sont produites par polymérisation de polyamides, ayant des modules allant de 60 à 180 GPa et une masse volumique d'environ  $1400 \text{ kg/m}^3$ . Ces fibres possèdent deux avantages particuliers du fait qu'elles sont les moins denses et les plus résistantes à l'impact.

- Les fibres de carbone, qui sont fabriquées à partir d'un précurseur (polyacrylonitrile) oxydé, carbonisé et graphité. Les fibres de carbone ont des modules qui varient de 150 à 800 GPa et une masse volumique en général inférieure à  $2000 \text{ kg/m}^3$ . La propriété la plus connue des fibres de carbone est bien sûr sa légèreté. C'est en effet grâce à cet argument que la fibre de carbone est un des constituants principaux des voitures de course et des engins aérospatiaux.

### 2.2.3. Le sandwich

Un matériau composite sandwich résulte de l'association de deux peaux, de faibles épaisseurs, constitués de matériaux de haute résistance et haut module, et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible masse volumique. La figure 2.4 illustre cette structure.

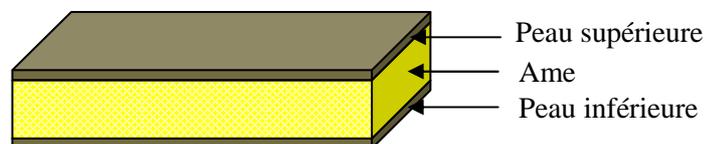


Figure 2.4. Structure en matériau sandwich

L'insertion de l'âme, qui sépare les peaux en gardant constante leur distance relative, permet d'augmenter notablement le moment d'inertie de la structure, et donc sa rigidité en flexion, tout en conservant une masse spécifique minimale. Le rôle des peaux est de supporter les contraintes planes. Elles doivent aussi être assez épaisses pour éviter un voilement local. Les peaux des composites sandwichs sont généralement des matériaux composites stratifiés à moyennes et hautes performances, constituées d'une matrice polymère thermodurcissable renforcée par des fibres (mat ou tissu) de verre, de carbone ou bien de kevlar [2].

Dans les matériaux sandwichs l'âme doit être constituée d'un matériau ayant une faible masse volumique et de bonnes propriétés en cisaillement pour transmettre les contraintes de traction-compression supportées par les peaux. Par ailleurs l'âme doit pouvoir supporter des charges de poinçonnement localisées [2].

Parmi les différents types d'âmes qui existent sur le marché, nous trouvons les matériaux suivants (Fig. 2.5):

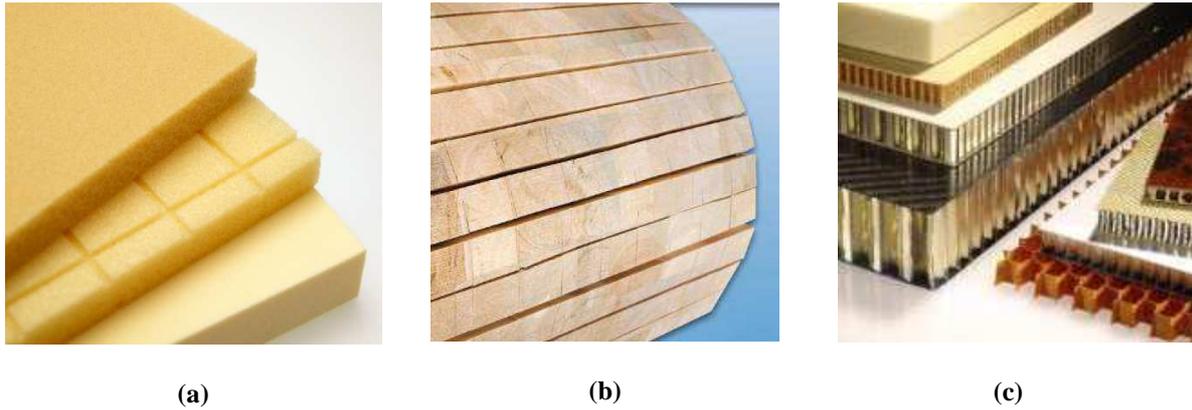


Figure 2.5. Exemples d'âmes les plus utilisées dans la construction des composites sandwichs :  
a) mousse, b) balsa bois c) nid d'abeilles

- **Les mousses :** Ce sont des matières plastiques cellulaires de nature therm durcissable, rigides ou souples. Ayant une masse volumique variant entre 30 et 300 kg/m<sup>3</sup> et des épaisseurs allant de 3 à 40 mm. Elles sont thermoformables et permettent de réaliser des pièces complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes mais demeurent limitées. Elles adhèrent bien à la résine et adsorbent peu d'eau. Les mousses les plus fréquemment utilisées sont à base de PVC, de polystyrène, de polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques [2,3].

- **Le bois :** Il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. Le balsa est la variété la plus courante grâce à sa faible masse volumique 100 kg/m<sup>3</sup>. Le bois est le matériau le moins cher, mais le plus poreux [2,3].

- **Le nid d'abeilles:** c'est une structure hexagonale qui peut être réalisée en divers matériaux comme le papier et l'aluminium. Ses caractéristiques mécaniques dépendent du matériau et de la taille des cellules. Sa masse volumique varie de 15 à 100 kg/m<sup>3</sup> avec des épaisseurs allant de 3 à 50 mm [2,3].

Il existe un troisième composant important dans un sandwich: il s'agit de l'adhésif qui permet un bon assemblage de la structure et aussi une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre. Sa principale caractéristique doit être une bonne résistance en cisaillement. Dans le cas des peaux en matériau composite, l'insertion de cette troisième phase peut être évitée par l'utilisation d'une résine auto-adhésive.

Ces structures complexes offrent de grandes potentialités aux concepteurs dans des domaines très divers. Grâce à leur légèreté et leur rigidité, elles sont largement utilisées dans des applications structurales classiques comme l'industrie aérospatiale, ou généralement le transport, puisque ce type de matériau est utilisé, parmi d'autres, pour les TGV à deux niveaux. L'usage des composites sandwichs s'étend également à l'industrie du bâtiment grâce à leurs excellentes caractéristiques d'isolation thermique et acoustique qui leur confèrent une place de choix. De ce fait, la connaissance structurale de ces matériaux est un point clé pour toute étude de leur comportement sous sollicitation statique et/ou dynamique.

## 2.2.4. Mécanismes d'endommagement des matériaux composites

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui consiste en l'apparition de micro-défauts locaux. Dans un composite, les premiers endommagements détectés commencent à se développer à l'échelle microscopique, lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture de l'un des constituants ou celle de l'interface les reliant. Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale du matériau. Ainsi, un nombre important de ces microfissures s'accumulent dans le matériau avant la rupture finale. Les paramètres, tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres, jouent un rôle très important dans la progression de l'endommagement [4]. Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites stratifiés et sandwichs en tant que matériaux d'étude dans notre travail.

### 2.2.4.1. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés

Lorsqu'ils sont soumis à des contraintes externes, les matériaux composites (fibres/matrice) subissent différents types de dégradation résultant de l'endommagement local au niveau de la matrice, des fibres et de l'interface fibre/matrice. Généralement, ces mécanismes se produisent simultanément, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du matériau composite. Les mécanismes de dégradation se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitation mécanique imposées [3]. Pour les composites à base polymère soumis à une sollicitation mécanique, l'expérience a montré que l'on peut distinguer quatre principaux modes d'endommagement [4-6]: la fissuration matricielle, la rupture de l'interface fibre/matrice ou décohésion, la rupture des fibres et le délaminage inter plis (Fig.2.6).

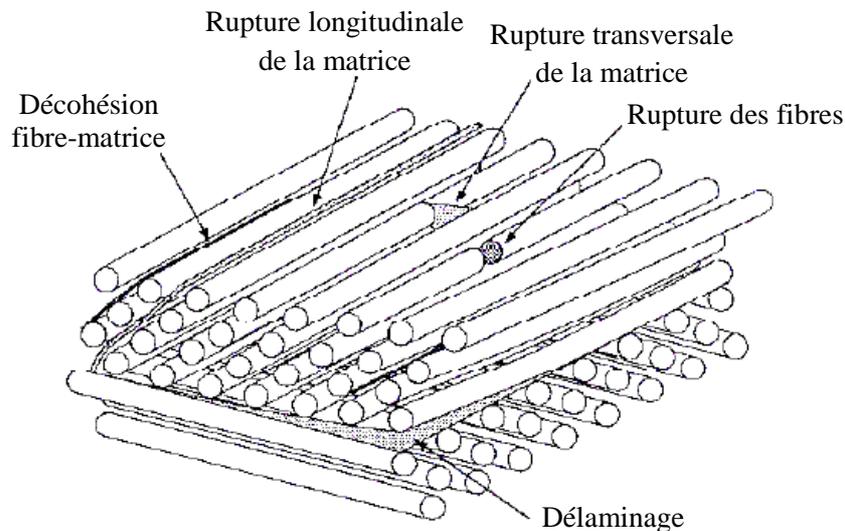


Figure 2.6. Mécanismes d'endommagement observés dans un composite stratifié [3]

### **a) Fissuration matricielle**

Les microfissures qui se produisent au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions, soit par fissuration transversale, soit par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Dans ce cas, les fissures sont orientées dans la direction de la sollicitation. La fissuration transversale se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre/matrice.

### **b) Décohésion fibre/matrice**

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers les fibres ou vice versa. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre/matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants :

- Cas d'une interface très forte : si l'adhérence entre les fibres et la matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle. La rupture observée sera de type fragile.

- Cas d'une interface très faible: la fissuration matricielle est déviée à l'interface et la décohésion fibre/matrice s'étend sur une très grande distance.

- Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires: la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface.

### **c) Rupture de fibre**

La rupture de fibre intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint sa contrainte à la rupture. Elle se produit souvent dans les plis les moins désorientés par rapport à la direction de la sollicitation. Ce mode d'endommagement est la conséquence de concentrations de contraintes dues aux deux types d'endommagement précédents. Lorsqu'une fissure apparaît dans une fibre, son instabilité devient grande, entraînant ainsi sa rupture complète.

### **d) Délaminage**

Dans le cas de stratifiés à plis croisés, aux mécanismes décrits précédemment (fissuration matricielle, décohésion et rupture de fibres), s'ajoute un autre mécanisme d'endommagement entre couches appelé délaminage. Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Le délaminage est donc une séparation locale de deux plis du composite. Elle est due soit à une concentration de contraintes locale près des bords, soit à une densité de fissurations transversales très importante. Ce type d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure.

### 2.2.4.2. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux sandwichs

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à l'étude des matériaux plus complexes qui sont les composites sandwichs. Les mécanismes d'endommagement des matériaux sandwichs sont moins maîtrisés [7]. Par ailleurs, il existe peu d'étude sur l'évaluation non destructive de ces matériaux [7,8]. Rappelons qu'un matériau sandwich est une structure composée de trois éléments: deux peaux et une âme assemblées. Chacun des constituants possède des modes de rupture propre. L'ensemble qui forme la structure en possède d'autres, nous obtenons donc un certain nombre de possibilités qui vont être énumérées. Il existe donc plusieurs modes d'endommagement des matériaux sandwichs qui dépendent de la géométrie de la poutre, du type de sollicitation, de la contrainte appliquée, etc. La résistance et le module d'élasticité des peaux conditionnent le comportement à la flexion d'un matériau sandwich. En flexion, la peau supérieure du sandwich est sollicitée en traction et la peau inférieure en compression, tandis que l'âme transmet des efforts de cisaillement. C'est pourquoi, ce type de construction fait de la structure sandwich, une structure peu flexible, recherchée pour sa rigidité. De plus, on peut augmenter l'inertie du panneau en augmentant l'épaisseur de l'âme sans pour autant augmenter sa masse.

Dans le cas où le matériau sandwich est sollicité en flexion, on peut distinguer les différents modes d'endommagement donnés sur la figure 2.7. Pour les structures en matériaux sandwichs, la propagation des fissures peuvent se produire par trois modes de défaillance fondamentaux: la décohésion entre la peau et l'âme, le délaminage des peaux et la fissuration par cisaillement de l'âme (fissuration transverse de l'âme). L'endommagement du matériau sandwich se manifeste aussi par le flambement, la déformation et le poinçonnement [9].

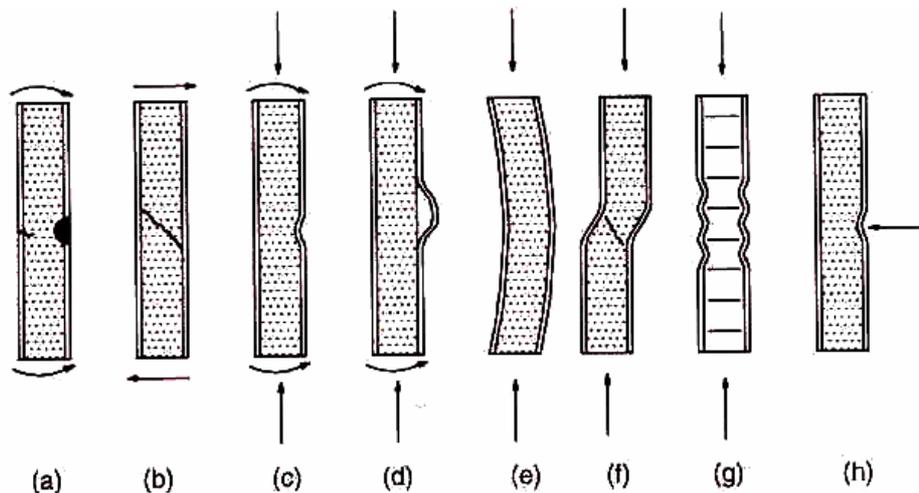


Figure 2.7. Modes d'endommagement dans les composites sandwichs: a) décohésion, b) fissuration par cisaillement de l'âme, c) et d) délaminage, e) flambement, f) et g) déformation et h) poinçonnement [9]

La décohésion peau/âme, où la couche interne de la peau (stratifié) se détache de l'âme, est un mode d'endommagement très significatif dans les matériaux composites sandwichs. Une fois initié, cet endommagement a le potentiel de se développer rapidement et il influe surtout sur les performances de toute la structure. La vitesse avec laquelle cet

endommagement se développe dépend surtout des facteurs de la matière et de la structure telle que la position de l'endommagement dans la structure, sa taille, la contrainte appliquée et la qualité du matériau [10]. L'endommagement peut également apparaître entre deux couches du stratifié et ceci est connu sous le nom de délaminage. Le sens de l'ondulation, produite vers l'extérieur ou vers l'intérieur, dépend du rapport entre la résistance à l'arrachement de l'adhésif et la résistance à la compression de l'âme [11].

### **2.3. Contrôle Non Destructif (CND) classique**

Le Contrôle Non Destructif (CND) est l'application des tests d'évaluation qui cache une activité essentielle. Cette activité garantit la qualité et la sécurité des biens et donc des personnes. En effet, le CND est en permanence mis en œuvre dans l'industrie afin de s'assurer de la "santé" de la matière tout en la préservant de toute dégradation préjudiciable à une utilisation ultérieure.

Comme l'instrumentation scientifique, le CND constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire des essais non destructifs (END) commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle: découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézoélectricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur place dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie: contrôle des aciers, radiographie des soudures. Un grand développement des CND s'est manifesté vers les années 60/70 avec le développement rapide de secteurs d'applications tels que le génie des centrales électriques nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs et les plateformes off-shore.

La dernière décennie a vu l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante; on assiste alors au développement rapide des contrôles entièrement automatisés et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique, comme les contrôles optiques.

Le contrôle non destructif regroupe l'ensemble des techniques permettant de tester des matériaux et d'évaluer leurs aptitudes sans les détruire. De ce fait, le CND a une grande importance économique. Il consiste à évaluer, par une méthode physique (émission acoustique, ultrasons, etc.), l'intégrité d'un matériau à y détecter d'éventuels défauts et à diagnostiquer son état de santé sans aucune détérioration [12]. Dans toutes les méthodes employées, on peut distinguer les étapes suivantes:

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique,
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts,
- Détection de ces modifications par un capteur approprié,
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

Dans le cadre de notre travail nous nous intéressons à la caractérisation par émission acoustique et à l'identification des mécanismes d'endommagement des composites

instrumentés par implant piézoélectrique ultrasonore intégré dans la masse. De ce fait, dans la suite du chapitre, nous nous intéressons particulièrement à la méthode du CND par émission acoustique (EA).

### **2.3.1. Emission Acoustique**

#### **2.3.1.1. Définition**

L'émission acoustique (EA) est une technique de contrôle non destructif qui utilise la propagation des ondes dans les matériaux. Lorsque la matière évolue, se déforme, se fissure sous l'action d'une ou plusieurs contraintes extérieures (mécanique, thermique, chimique, etc.), il se crée spontanément des ondes élastiques.

Selon la norme française AFNOR, l'émission acoustique est «le phénomène de création d'ondes élastiques transitoires résultant de micro déplacements internes dans un matériau» [13]. Les ondes élastiques peuvent être créées par différents mécanismes appelés sources d'émission acoustique, qui sont liées à des phénomènes irréversibles dans le matériau [14]. Cette source peut être le mouvement coopératif des dislocations, la transformation de phase, la création et la croissance de fissures [12].

L'émission acoustique est une technique très prometteuse à laquelle on accorde de plus en plus d'attention que ce soit pour le suivi de l'intégrité des structures en service ou pour l'étude des mécanismes d'endommagement [4,12,15]. Le contrôle non destructif par EA est utilisé pour la pétrochimie (cuves et sphères de stockage), les ouvrages d'art (Pont de Millau équipé de capteurs) et il est aussi largement utilisé pour la surveillance de l'évolution de l'endommagement en temps réel et in-situ dans les matériaux composites.

#### **2.3.1.2. Description et acquisition des signaux de l'émission acoustique**

L'EA est basée sur la détection des ondes élastiques générées par une déformation locale dans le matériau sous l'action d'une contrainte. La méthode d'EA ignore tout ce qui est bruit et défaut bénin qui n'évolue pas lors des chargements mécaniques ou pendant le service. Elle ne sélectionne que ceux qui induisent des changements et qui sont de ce fait potentiellement dangereux [16]. Le principe de cette méthode est présenté sur la figure 2.8.

Sous chargement, un défaut est créé à l'intérieur du matériau. Ce dernier émet une ou plusieurs ondes élastiques, de nature et de fréquences diverses, qui se propagent dans le matériau. Ces ondes sont recueillies par un capteur piézoélectrique, après elles sont conditionnées par des préamplificateurs et des filtres. Par la suite, l'onde est convertie en signal électrique et fournit le signal d'émission acoustique. Cette technique permet donc de déceler en temps réel l'existence de défauts évolutifs. Le principe de la méthode, dans lequel le matériau joue le rôle d'émetteur, n'exige ni l'utilisation d'un type particulier de matériau ni d'un environnement spécifique. Cet avantage privilégie l'utilisation de l'EA lorsqu'il est question de suivre in-situ l'évolution de l'endommagement des matériaux en

service. Cependant, ce même avantage est la source du plus grand problème pratique de cette technique. En effet, il n'y a aucun moyen d'intensifier les ondes élastiques générées par un défaut et d'améliorer ainsi la sensibilité des capteurs [17].

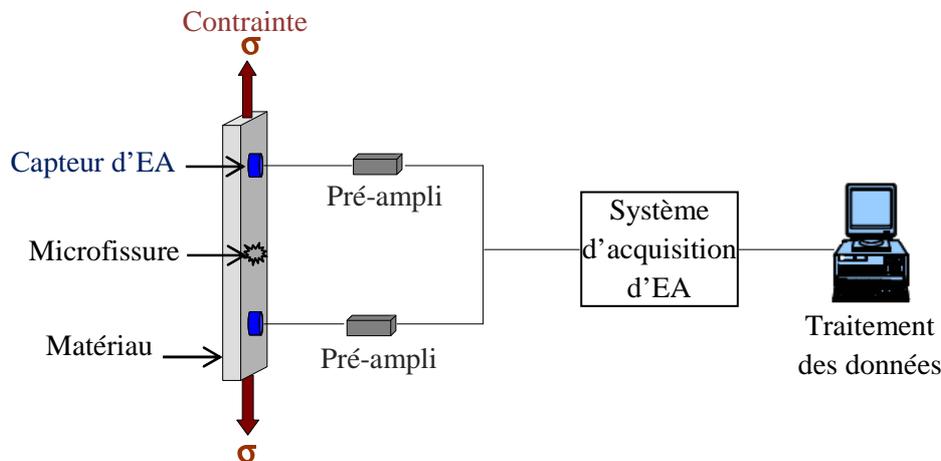


Figure 2.8. Dispositif expérimental de l'émission acoustique

On peut distinguer deux types d'émission acoustique : l'émission acoustique continue et l'émission acoustique discontinue [13]. Le signal issu de l'émission discrète se présente sous forme d'ondes sinusoïdales amorties, désignées sous le terme de salves ou d'événements. Ce type d'émission a pour origine des mécanismes très énergétiques comme les phénomènes de propagation de fissures conduisant à la rupture [4]. L'émission dite continue est un ensemble d'émissions discrètes dont les salves sont très rapprochées et ne peuvent pas être séparées les unes des autres [4]. Elle est principalement associée à des sources présentes dans tout l'échantillon et constamment actives durant la déformation, comme les mouvements collectifs de dislocations ou la formation des bandes de glissement [18].

### 2.3.1.3. Transducteurs utilisés pour l'EA

Les capteurs d'émission acoustique les plus utilisés sont les capteurs piézoélectriques, fabriqués à partir de céramiques ferroélectriques et constituant l'élément clé de la chaîne de l'EA, [17]. Généralement, le capteur d'EA est placé sur la surface du matériau et il est couplé à l'échantillon avec un couplant visqueux. La graisse silicone est le couplant le plus utilisé pour assurer et améliorer la bonne transmission des ondes entre la surface de l'échantillon et le capteur. Deux familles de capteurs sont utilisées en EA :

- “large bande” : ils possèdent une bande passante régulière pour une étendue fréquentielle assez large pouvant aller jusqu'au MHz. Ils ont l'avantage de modifier légèrement 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.

Le nombre de capteurs utilisés permet de localiser les sources d'EA. Une localisation linéaire, sur un matériau sollicité en traction uniaxiale par exemple, ne nécessite l'utilisation que de deux capteurs. Une localisation en deux dimensions sur une plaque par exemple nécessite au minimum trois transducteurs. Plus la géométrie des structures étudiées est complexe, plus le nombre de capteurs nécessaires augmente. La position d'une source d'EA liée à un signal reçu est calculée en fonction des différences de temps d'arrivée des signaux aux capteurs et de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau étudié.

#### 2.3.1.4. Paramètres caractéristiques des signaux d'émission acoustique

Afin de caractériser le signal d'EA, il existe un grand nombre de paramètres exploitables, représentés dans la figure 2.9. Ces paramètres permettent de caractériser le type du signal pour le remonter à l'identification des différents mécanismes d'endommagement.

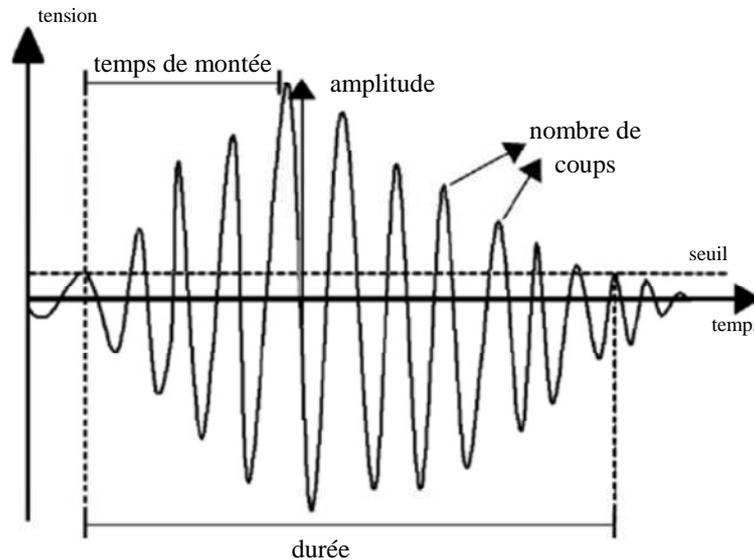


Figure 2.9. Principaux paramètres d'une salve d'EA

Une salve est bornée par la première et la dernière arche dépassant le seuil. Le seuil est le niveau qui permet à l'appareil d'EA de faire la différence entre le bruit de fond et le signal réel. Les paramètres classiques enregistrés en temps réel sont les suivants [19,20]:

- le nombre de coups (Counts): c'est le nombre de fois où le signal franchit le seuil d'acquisition sur toute sa durée,
- l'amplitude maximale: c'est la valeur maximale atteinte par la salve, exprimée en décibels (dB),
- l'énergie du signal: exprimée en attojoule (aJ),
- la durée de la salve: le temps qui sépare le premier et le dernier dépassement de seuil, exprimée en microsecondes,
- le temps de montée (Rise Time): le temps entre le premier dépassement de seuil et le pic d'amplitude maximale, exprimé en microsecondes,
- le nombre de coups au pic: correspond au nombre de franchissements de seuil par le

signal entre le premier dépassement de seuil et l'amplitude maximale,

- la fréquence moyenne: est une valeur donnée par la plupart des systèmes d'acquisition, c'est le nombre de coups d'une salve divisé par sa durée.

Tous ces paramètres sont calculés par le système d'acquisition pour chaque événement de l'EA. Seule l'amplitude maximale du signal est mesurée en temps réel par le système d'acquisition de données. Tous les autres paramètres sont calculés à partir des formes d'onde et dépendent du seuil de l'amplitude. L'acquisition de ce seuil est déterminée avant le début de chaque essai en utilisant la procédure de casse de mine, cette procédure est expliquée dans les travaux de Nielsen [21].

### **2.3.1.5. Identification de la signature acoustique dans les matériaux composites**

Chaque signal de l'EA généré contient des informations utiles sur le mécanisme d'endommagement source. Un des principaux problèmes de l'EA est de pouvoir discriminer les différents mécanismes d'endommagement à partir des signaux d'EA détectés [14,19]. Les méthodes basées sur l'exploitation de descripteurs sont souvent limitées à l'analyse des paramètres temporels. De ce fait, des études [22, 23] ont été d'abord menées dans le domaine fréquentiel afin de pouvoir relier les sources d'endommagement aux signaux d'EA. Ces études ont montré que chaque mécanisme d'endommagement peut être caractérisé par un pic fréquentiel différent, obtenu par une analyse de transformée de Fourier (FFT) [24, 25].

L'analyse des paramètres temporels ne sont pas toujours pertinents pour caractériser les ondes acoustiques, notamment pour des composites de nature complexe. De ce fait, des études [26-28] ont été menées pour différencier les mécanismes sources des signaux d'émission acoustique recueillis lors d'essais sur les composites chargés, par l'emploi d'un ou plusieurs paramètres calculés sur les formes d'ondes.

#### **2.3.1.5.1. Analyse mono-paramétrique**

Afin de différencier les mécanismes sources des signaux d'EA recueillis, de nombreuses études [29-33] ont été menées en utilisant des procédures simples basées sur un seul paramètre. Dans une analyse mono-paramétrique, les mécanismes sources des signaux d'EA, recueillis pour des composites sous chargement, peuvent être identifiés en utilisant seulement l'amplitude des signaux. La majorité des études a été faite sur les matériaux composites stratifiés, sollicités en traction. Benzeggagh et *al.* [29], Chen et *al.* [30], Kim et *al.* [31], Kotsikos et *al.* [32] et Ceysson et *al.* [33] se sont intéressés à l'évolution de l'amplitude des signaux d'émission acoustique reçus lors des essais de flexion et de traction statique sur des échantillons de composites fibreux. Comparés à des observations micrographiques à différents stades d'essais, leurs résultats ont permis d'identifier différents mécanismes d'endommagement entre deux et trois zones d'amplitudes : la fissuration matricielle, la décohésion renfort/matrice, le délaminage et la rupture de fibres. Ces différents résultats sont présentés dans le tableau 2.1. Il semble également que, dans cette analyse mono-paramétrique,

les zones identifiées par rapport à l'endommagement correspondant, présentent des recouvrements et rendent incertaine l'attribution d'un signal à un endommagement ayant réellement eu lieu, notamment lorsque son amplitude est comprise dans une zone de recouvrement.

**Tableau 2.1 : Synthèse des zones d'amplitude associées aux différents modes d'endommagement**

Auteurs	Benzeggagh [29]	Chen [30]	Kim [31]	Kotsikos [32]	Ceysson [33]
Composite	verre/polypropylène	carbone/verre	carbone/époxy	verre/polyester	carbone/époxy
Essais	traction statique et fatigue	flexion et traction	mises en charge successives	Fatigue	Flexion
Fissuration de la matrice	40-55dB	60-80dB	40-70dB	40-55dB	50dB
Décohésion	60-65dB				
Délaminage				55-70dB	62dB
Rupture des fibres	85-95dB	70-90dB	60-100dB	>80dB	

### 2.3.1.5.2. Analyse statistique multi-paramétriques

L'utilisation d'un seul paramètre (tel que l'amplitude) des signaux d'EA pour la discrimination des modes d'endommagement est avérée insuffisante, notamment pour les matériaux les plus complexes (matériaux ayant quatre modes d'endommagement et plus). Dans le cas de l'analyse mono-paramétrique, les distributions d'amplitude obtenues pour chaque mécanisme d'endommagement sont assez similaires mais il semble difficile de pouvoir les définir séparément. De plus, dans la plupart de ces études, les distributions d'amplitude entre les différents modes d'endommagement présentent des recouvrements et rendent incertaine l'attribution d'un signal à un mécanisme d'endommagement lorsque son amplitude est comprise dans une zone de recouvrement. Ainsi, pour ces deux raisons, d'autres études sont portées sur l'analyse simultanée de plusieurs paramètres du signal acoustique afin d'améliorer la caractérisation des mécanismes sources de l'EA. Les méthodes d'analyse statistique multi-paramétriques permettent de définir les ressemblances ou les différences entre les données en prenant en compte non pas un seul paramètre caractéristique mais plusieurs paramètres simultanément. Appliquées aux signaux de l'EA, ces méthodes de reconnaissance de formes permettent de prédire l'appartenance des données d'EA à des classes représentatives des différents mécanismes d'endommagement du matériau. Les techniques d'analyse multi-paramétriques ont été développées en parallèle avec les progrès de l'informatique pour repérer plus rapidement les paramètres significatifs et classer les événements d'EA en

différentes familles.

Les chercheurs ont regroupé les méthodes de classification en deux catégories: supervisés et non supervisés. Le terme de classifications non supervisées signifie que les classes ne sont pas connues a priori par l'utilisateur. Il existe différentes méthodes de classification non supervisée. Nous pouvons citer l'analyse en composantes principales (ACP), les  $k$ -moyennes, la carte de Kohonen, etc. Les méthodes supervisées, quant à elles, 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. Nous pouvons citer les techniques de l'analyse de Fisher, les  $k$ -plus proches voisins, LVQ (Learning Vector Quantization), Multi-Layer Perceptron (MLP) qui est un réseau de neurones en couches.

Dans la suite, nous présentons des travaux relatifs à l'utilisation des méthodes de classifications dans le but d'identifier la signature acoustique des différents mécanismes sources se produisant lors de l'endommagement dans les matériaux composites sous chargement.

Nechad *et al.* [34] ont étudié des composites verre/polyester unidirectionnels, à plis croisés et des composites SMC soumis à des essais de fluage en traction. Ils ont réalisé une étude paramétrique en considérant l'amplitude, l'énergie absolue et la durée des signaux d'EA. Ils ont mis en évidence, de manière qualitative avec l'EA, la cinétique d'évolution des différents mécanismes d'endommagement.

El Guerjouma *et al.* [35] ont étudié sur des échantillons de polyester et de verre/polyester unidirectionnels, soumis à un chargement de traction, les modes d'endommagement pour chaque type de matériau. Trois types d'échantillons ont été utilisés: résine pure et stratifiés unidirectionnels orientés à  $45^\circ$  et à  $90^\circ$ . Chacun de ces échantillons ont été choisis pour générer les modes d'endommagement correspondant. Pour les échantillons de résine, ils ont généré des signaux de la fissuration de la matrice. Pour les échantillons unidirectionnels à  $45^\circ$  et à  $90^\circ$  en plus des signaux de fissuration de la matrice, ils ont généré des décohésions de  $90^\circ$  et des décohésions de  $45^\circ$ . Par la suite, afin de séparer numériquement les deux types de signaux, ils ont mis en place une approche de réseau de neurones. Ils ont utilisé six paramètres des salves acoustiques pour les regrouper. La réponse du réseau a été bien claire : deux groupes principaux ont été observés qui correspondent aux deux types de signaux observés auparavant.

Marec *et al.*[36,37] ont proposé la méthode de coalescence flou (C-means) associée à une analyse en composantes principales (ACP) pour différents composites à structure complexes (stratifiés à plis croisés, Sheet Molding Compound (SMC) et bétons polymères). La méthodologie utilisée consiste à analyser les signaux d'EA reçus lors d'essais de traction quasi statique sur des composites modèles (résine, composites unidirectionnels), puis lors d'essais de flexion trois-points en statique et en fluage sur les structures complexes citées précédemment.

Les principaux mécanismes d'endommagement étudiés sont: la fissuration de la matrice, la décohésion fibre/matrice (ou granulat/résine dans le cas du béton polymère), la rupture des fibres (ou des granulats dans le cas du béton polymère) et le délaminage pour les composites stratifiés. Pour pouvoir séparer les signaux d'EA provenant des différents modes d'endommagement issus de composites complexes, un outil d'analyse statistique multivariable est mis en place. Il est composé d'un algorithme de classification de données multidimensionnelles (méthode de coalescence floue) et d'une analyse en composantes principales (ACP).

Berbaoui et *al.*[38,39] ont utilisé la technique d'EA dans le but de localiser et caractériser les différents mécanismes d'endommagement dans le béton polymère au cours des essais statique, fluage et fatigue cyclique dans le cas de la flexion à trois points. Une analyse statistique multi variable a permis d'identifier trois classes correspondant aux signatures acoustiques de trois mécanismes d'endommagement (la fissuration matricielle, la décohésion interfaciale et la rupture des agrégats) ainsi que leur chronologie d'apparition.

Godin et *al.* [40] ont étudié la classification des données d'EA collectés au cours des essais de traction sur des composites stratifiés unidirectionnels et croisés. Deux méthodes de classification des signaux ont été utilisées pour traiter les données d'EA afin d'identifier les différents mécanismes sources intervenant à haute température: une méthode de classification non supervisée (ACP +  $k$ -moyennes) et une méthode de classification supervisée ( $k$  plus proches voisins). Dans un premier temps, la méthode de classification non supervisée a permis de séparer de façon reproductible les signaux d'EA enregistrés lors des essais en différentes classes, ceci à partir de leur signature acoustique, sans nécessité de connaître les mécanismes sources. Les connaissances acquises à partir de l'étude du comportement mécanique, des observations microscopiques et de l'activité acoustique des différentes classes de signaux ont permis d'établir une labellisation des classes de signaux à partir des données obtenues. Chaque classe de signaux a pu être ainsi attribuée à un ou des mécanismes d'endommagement sources majoritaires. Dans un second temps, le passage à une méthode de classification supervisée a permis de classifier les signaux en temps réel quels que soient la température, la contrainte appliquée et le mode de chargement (statique ou cyclique), à partir d'une bibliothèque applicable sur tous les essais.

Huguet et *al.*[6,19,412] ont utilisé le réseau de neurones de Kohonen [42] associé à un algorithme des  $k$ -moyennes [43] pour classifier les données d'EA collectés lors des essais de traction sur des matériaux composites unidirectionnels à fibres de verre. Des essais ont d'abord été menés sur des matériaux composés de la matrice seule de manière à identifier les signaux caractéristiques des microfissurations matricielles. D'autres essais ont été menés sur des éprouvettes unidirectionnelles avec une orientation des fibres à 90° et à 45° par rapport à l'axe de sollicitation pour favoriser les décohésions fibre/matrice et identifier les signaux d'EA correspondant à ce mécanisme. Des essais ont été conduits sur des composites mono

filamentaires pour identifier les signaux correspondant aux ruptures des fibres. Enfin, des essais sur des composites stratifiés à plis croisés ont été menés afin de générer des signaux correspondant aux délaminages entre les plis. L'analyse paramétrique des signaux d'EA a été effectuée en considérant l'amplitude, le temps de montée, la durée et l'énergie des signaux d'EA. Cette étude a permis d'identifier quatre types de signaux appelés signaux de type A, B, C et D. Leurs principales caractéristiques sont données dans le tableau 2.2 [19]:

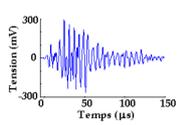
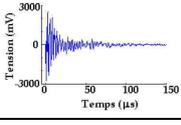
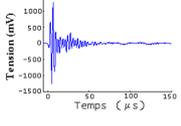
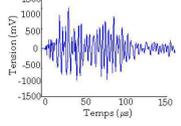
✓ Signaux de type A (fissuration matricielle) : Ils ont une amplitude comprise entre 50 et 70 dB et sont caractérisés par des formes d'onde de faible durée, un temps de montée assez lent et une énergie relativement faible.

✓ Signaux de type B (décohésion fibre/matrice) : ils ont une amplitude comprise entre 70 et 100 dB et sont caractérisés par des temps de montée assez courts et des énergies plus élevées.

✓ Signaux de type C (rupture des fibres): ils ont des temps de montée ainsi que des temps de décroissance relativement courts avec des amplitudes et énergies assez importantes. Ces signaux sont très proches des signaux de type B.

✓ Signaux de type D (délaminage): ils ont des durées très longues, des temps de montée lents, ils sont assez énergétiques avec une gamme d'amplitude assez large.

**Tableau 2.2. Caractéristiques des types de signaux A, B, C et D identifiés par Huguet et al. [19]**

	Amplitude	Temps de monté	Durée du signal	Décroissance du signal	Type du signal	Forme du signal
Fissuration matricielle (Type A)	~50-70	Moyen	Moyenne	Lente	Résonnant	
Décohésion (Type B)	~55-80	Court	Moyenne	Courte	Impulsionnel	
Rupture de Fibres (Type C)	~70-100	Court	Courte	Courte	Impulsionnel	
Délaminage (Type D)	~55-70	Lent	Très longue	Lente	Résonnant	

### 2.3.1.5.3. Présentation de segmentation des données par la technique des k-moyennes

Pour résoudre certains problèmes complexes, il s'avère utile de commencer par segmenter les données c'est à dire les diviser en classes. C'est l'objet de la méthode des k-

moyennes [43,44]. Cette méthode fait partie de la famille d'algorithmes de classification dite à "centres mobiles". Elle est très simple à mettre en œuvre et très utilisée. C'est une méthode itérative de partition des données par minimisation de la variance intra-groupe c'est-à-dire minimiser la somme des carrés des distances entre tous les vecteurs d'une classe et son centre (Fig. 2.10).

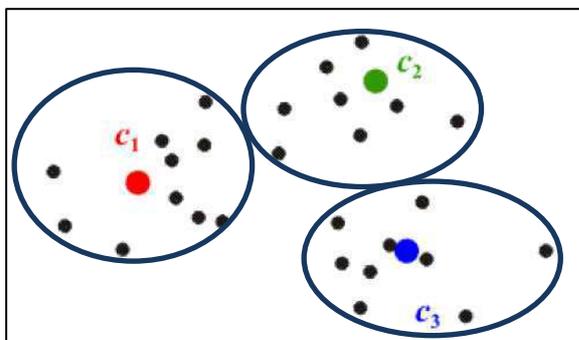


Figure 2.10. Regroupement des différents vecteurs entourant leurs centres de classes par l'algorithme des  $k$ -moyennes

Avant d'appliquer cet algorithme aux signaux d'EA, il est seulement nécessaire de préciser le nombre de classes  $k$  qui peut être déterminé en employant le critère de Davies et Bouldin  $R_{DB}$  [45]. L'algorithme de classification par les  $k$ -moyennes sera détaillé dans le deuxième chapitre. Plusieurs chercheurs [5,46,47] ont utilisé cette technique sur les composites à matrice polymère et à renforts fibreux ou granulaires.

#### 2.3.1.5.4. Identification de la signature acoustique dans les matériaux sandwichs

Puisque les matériaux composites sandwichs sont des matériaux assez complexes, l'étude de leurs mécanismes d'endommagement est moins maîtrisée. Par ailleurs, dans la littérature, l'étude de l'évaluation non destructive par EA de ces matériaux est très rare. Par exemple, Quispitupa *et al.* [7,8] ont étudié les modes d'endommagement des composites sandwichs constitués de deux peaux en fibres de carbone et une âme en nid d'abeilles, sollicités en statique et en fatigue. La détection des endommagements a été principalement basée sur une analyse simultanée des événements, de l'énergie, du temps, de l'amplitude et de la position des sources des événements collectés. La classification des signaux d'EA recueillis lors des tests a permis d'identifier quatre mécanismes d'endommagement pouvant intervenir: Les fissurations de l'âme, les décohésions interfaciales, les fissurations de matrice et les ruptures de fibres. La distribution de l'amplitude en fonction du temps de ces quatre mécanismes d'endommagement montre que les fissurations de l'âme sont les plus prépondérantes. Elles apparaissent dès le début de l'essai et correspondent à 83,3% des signaux d'EA qui sont caractérisés par une faible énergie et des amplitudes comprises entre 45 et 60 dB. Les décohésions interfaciales, ayant des amplitudes comprises entre 60 et 80 dB, commencent aussi au début des essais et leurs nombre augmentent progressivement pendant l'essai (14,8% des salves d'EA). Les fissurations de la matrice sont caractérisées par des signaux un peu plus

énergétiques que celles des décohésions et ont des amplitudes comprises entre 80 et 90 dB. Elles représentent seulement 1,2% des événements d'EA et apparaissent avant la fin d'essai. Quant à la rupture des fibres, caractérisée par des signaux énergétiques dont l'amplitude est supérieure à 90 dB, elle intervient à la fin de l'essai et leur nombre croît jusqu'à la rupture du matériau (0,7% des événements d'EA).

## **2.4. Contrôle Non Destructif des matériaux intelligents (CND intégré)**

Les systèmes de mesure, intégrés dans les structures, sont le plus souvent issus du Contrôle Non Destructif (CND) classique qui est un ensemble de méthodes permettant de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader [48-50]. Parmi les méthodes, on peut citer par exemple la méthode de propagation d'ondes ultrasonores ou celle de l'écoute acoustique (EA). Ces techniques utilisent généralement des accéléromètres ou des transducteurs piézoélectriques liés dans la plupart des cas à la surface du matériau. Des mesures effectuées ont montré que ces méthodes s'avèrent inefficace vu que l'onde peut s'atténuer avant d'atteindre la surface. Une autre méthode consiste à mettre en contact direct le capteur piézoélectrique avec le matériau à examiner pour que les signaux acoustiques passent au capteur avec un minimum de perte à l'interface capteur/matériau. Pour remédier ce problème, les chercheurs ont recouru au contrôle de santé intégré en incorporant les captures au sein de la structure à examiner.

Afin d'augmenter la sécurité des avions, de réduire le temps de maintenance et diminuer les coûts de réparation, le contrôle de santé intégré pourrait être envisagé de façon permanente ou semi-permanente, pour l'évaluation de l'état de dégradation des structures en composites [51]. Cela pourrait fournir des informations sur l'évolution de l'endommagement dans la structure à contrôler en temps réel et in-situ. L'implantation des capteurs au sein des structures composites donne la possibilité de développer des matériaux intelligents pour l'utilisation et la surveillance de santé des systèmes (Health and Usage Monitoring Systems: HUMS) [52,53].

### **2.4.1. Définition d'une structure Intelligente (Smart structure)**

D'après Spillman et *al.* [54], une structure intelligente est une structure physique, non biologique, possédant les attributs suivants: un but précis, l'impératif et les moyens de réaliser cet objectif, un mode de fonctionnement semblable à un système biologique, c'est-à-dire qu'elle doit être adaptable et doit utiliser l'énergie disponible aussi efficacement que possible. Les matériaux intelligents, appelés aussi matériaux "sensibles", sont des matériaux ou des structures simplement capables d'estimer leur état de santé, c'est-à-dire d'assurer le suivi de leur éventuel endommagement, qu'il soit localisé ou réparti de façon homogène.

Le développement de telles technologies est déjà mis en œuvre dans des secteurs aussi variés comme les industries aéronautiques civile et militaire, les transports, l'industrie manufacturière, les télécommunications, la défense, la médecine, etc. Les matériaux intelligents possèdent des fonctions leur permettant de se comporter comme un capteur

(détecteur de signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer, stocker des informations) [55]. "L'intelligence" de ces structures provient des instruments de mesure qui peuvent y être incorporés, et de l'informatique qui y est associée pour la gestion du processus de contrôle. Il s'agit principalement de trois catégories de matériaux intelligents connaissant de nombreuses applications dans des secteurs divers: les alliages à mémoire de forme (AMF), les matériaux piézoélectriques et les matériaux électrostrictifs et magnétostrictifs [56].

Une tendance récente s'oriente plus particulièrement vers l'intégration des capteurs, des processeurs et des contrôleurs dans les systèmes adaptatifs. Par exemple, les matériaux composites instrumentés par capteurs et qui sont capables de contrôler en continu certaines de leurs propriétés physiques, sont appelés des composites "intelligents".

#### 2.4.2. Différent type de capteurs intégrés

Dans cette partie, on s'intéresse aux capteurs intégrés utilisés pour contrôler en continu certaines propriétés physiques et pour détecter les défauts dans les matériaux composites. Il s'agit donc de choisir un capteur susceptible de détecter au mieux l'endommagement et pouvant s'intégrer facilement au sein du matériau composite. Plusieurs voies ont jusqu'ici été adoptées pour essayer de suivre l'endommagement in-situ de matériaux composites en utilisant divers types de capteurs intégrés (Fig. 2.11) comme les fibres optiques, les matériaux piézoélectriques, les Macro Fibre Composite (MFC), les poly-vinylidene de fluorure (PVDF), les MEMS, etc. Les plus utilisés sont les piézoélectriques et les fibres optique [48].

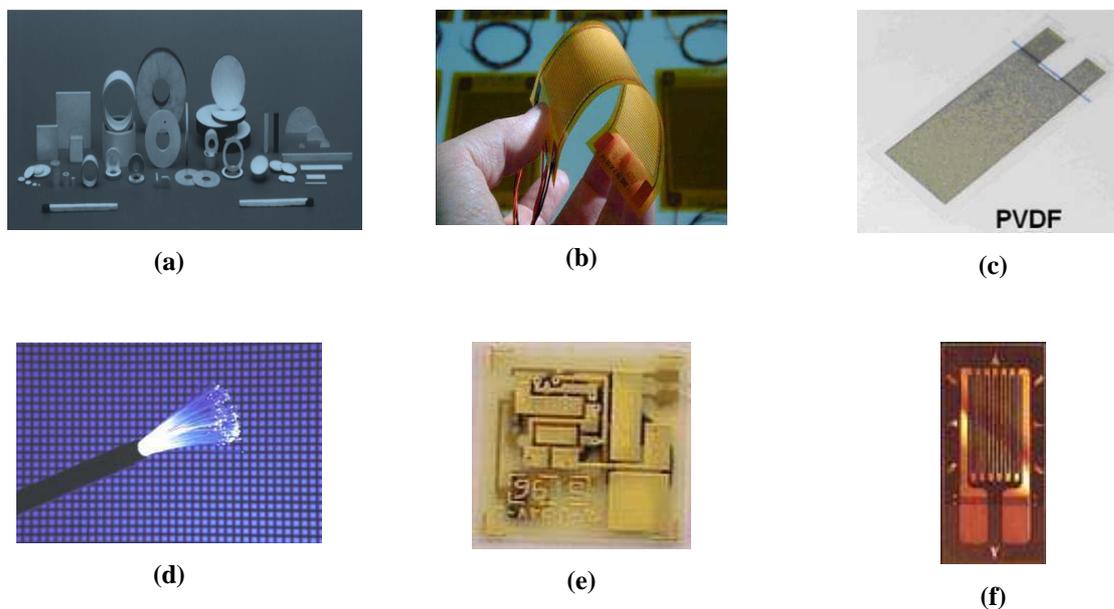


Figure 2.11. Exemples des capteurs intégrés utilisés dans le contrôle de santé structurale: a) Piézoélectriques, b) MFC, c) PVDF, d) Fibre-optique, e) MEMS et f) Jauge de déformation

### 2.4.2.1. Les fibres optiques

La nécessité de miniaturiser a donné naissance à de nouveaux capteurs comme les fibres optiques utilisées pour détecter un impact ou des fissures, mesurer une déformation ou une température et servir de récepteur en transmission d'ondes de Lamb [57-59]. La plupart des fibres optiques sont constituées d'un cœur et d'une gaine en silice. Généralement, une deuxième gaine en polymère est ajoutée pour assurer la protection mécanique de la fibre optique. De ce fait, les diamètres des fibres optiques sont compris entre 30  $\mu\text{m}$  et 600  $\mu\text{m}$ . Un exemple de l'insertion d'une fibre optique de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre est illustré dans la figure 2.12.

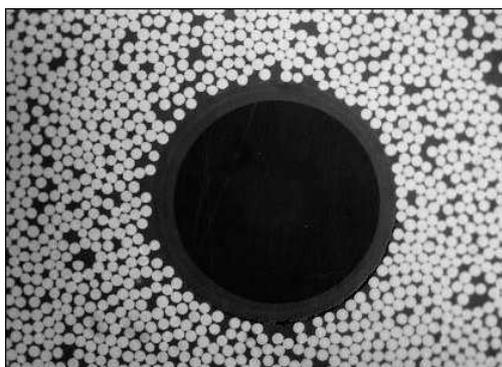


Figure 2.12. Insertion d'une fibre optique dans un composite à fibres de carbone

Dans les composites intelligents, les fibres optiques intégrées jouent simultanément le rôle de capteur et de système de transport de l'information. Suivant le procédé utilisé pour suivre l'endommagement du matériau, plusieurs grandeurs peuvent être mesurées comme l'intensité, le déphasage ou la longueur d'onde [60]. Les fibres optiques sont intégrées entre deux plis du composite durant la phase de fabrication. Les ruptures, les microfissures ou les délaminages du matériau entraînent la fissuration de la fibre optique. Cela provoque une interruption de la lumière transmise par la fibre optique et une chute complète de l'intensité lumineuse en sortie de la fibre. Cette technique constitue la méthode la plus simple de contrôle utilisant les fibres optiques.

### 2.4.2.2. Les piézoélectriques

Les matériaux sur lesquels nos efforts se sont concentrés sont les matériaux piézoélectriques qui ont la capacité de transformer une énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa. L'effet piézoélectrique a été découvert la première fois par les frères Curie en 1880. Les matériaux piézoélectriques produisent une tension électrique lorsqu'ils subissent une contrainte mécanique. Soumis à un courant électrique, ils peuvent aussi se déformer mécaniquement. La fréquence du signal électrique et son amplitude varient directement en fonction de la déformation mécanique qu'ils subissent. Pour cela, les matériaux piézoélectriques sont utilisés pour contrôler la déformation et l'endommagement

des matériaux composites. Contrairement aux capteurs optiques, les capteurs piézoélectriques n'ont pas besoin a priori de signaux extérieurs en entrée [61].

Les piézoélectriques ont trouvé leurs applications dans plusieurs domaines, tels que la suppression du bruit, l'amortissement des vibrations ou des micro-positionnements, etc. On utilise aussi des polymères piézoélectriques pour des applications médicales ou pour capter des ultrasons. Une application intéressante des matériaux piézoélectriques est le contrôle de santé de certains matériaux intervenant dans la construction des carlingues d'avions ou les bâtiments en ciment. Un capteur piézoélectrique pourra détecter des défauts localisés, comme des fissures, des trous ou des impacts [62,63].

Dans les années soixante, de nouvelles variétés de piézoélectriques à base de céramiques et de polymères ont été développées. Aujourd'hui, pour des raisons de réduction de taille des transducteurs, les céramiques minces ont la possibilité d'être intégrées à l'intérieur du matériau susceptible de se dégrader. Les piézoélectriques sont disponibles sous différentes formes, telles que les films [64], poudre [65], peins [66], multicouches [67] ou fibres simples [68]. Ils sont disponibles en plusieurs types, tels que le fluorure de vinylidène, (PVDF) [69], les lanthanides modifié au piézo-céramique, PLZT [65], ou la classe populaire des piézo-céramiques titanate-zirconate (PZT) [56,70,71]. Cette liste n'est pas complète, car la composition des matériaux piézoélectriques comporte une grande variété de piézoélectricité et de nouvelles classes piézoélectriques devraient être mises au point dans un proche avenir.

La piézoélectricité peut être définie comme le couplage entre les phénomènes mécaniques (déformation ou contrainte) et électriques (champ électrique, charge électrique). Dans l'approximation linéaire, le matériau piézoélectrique est régi par les deux équations tensorielles suivantes [72]:

$$D = \varepsilon^T E + dT \quad (2.1)$$

$$S = S^E T + d^T E \quad (2.2)$$

avec :

$S$  : est la déformation du matériau

$T$  : la contrainte mécanique

$D$  : la densité surfacique de charges

$E$  : le champ électrique.

$\varepsilon^T$ : permittivité du matériau à contrainte nulle,

$d^T$  : constante piézoélectrique, il s'agit du rapport entre la densité de charges et la contrainte à champ électrique nul,

$s^E$  : compliance (inverse de la raideur mécanique) à champ électrique nul.

Les équations (2.1) et (2.2) correspondent respectivement à l'effet direct (le solide se polarise sous l'action d'une contrainte mécanique) et à l'effet inverse (déformation du cristal induite par application d'un champ électrique)

On définit également le coefficient de couplage électromécanique  $k$  par:

$$k^2 = \frac{\text{Energie mécanique convertie en charge électrique}}{\text{Energie mécanique fournie}} \quad (2.3)$$

ou bien

$$k^2 = \frac{\text{Energie électrique convertie en déformation mécanique}}{\text{Energie électrique fournie}} \quad (2.4)$$

### 2.4.3. État de l'art du contrôle de santé par capteurs intégrés

Afin d'ajouter le contrôle de santé structurale (Structural Health Monitoring : SHM) au sein de la structure des composites sans sacrifier l'intégrité de la structure, des efforts considérables ont été fournis ces dernières années pour réduire les coûts d'exploitation et d'amélioration de la sécurité des matériaux composites testés [76]. Malgré les développements dans la technologie des capteurs, l'étude de l'effet des transducteurs intégrés sur l'intégrité du composite est toujours très importante. La présence d'inclusions entraîne des discontinuités géométriques qui sont responsables à des valeurs indésirables de concentration de contraintes provoquant la réduction de la rigidité et de l'ensemble des performances des matériaux.

De nombreux travaux [73-75] ont été consacrés à la faisabilité de l'incorporation de différents types de capteurs et d'instruments, pour évaluer la durabilité des capteurs intégrés et la durée de vie des matériaux composites intelligents. Dans ces travaux, les chercheurs se sont intéressés à l'étude des mécanismes d'endommagement et du comportement mécanique du matériau pour différent type d'essais. Ils ont développé différents systèmes de mesure et de surveillance dans les industries aéronautique et du génie civil.

L'implant d'une fibre optique est utilisé par Measures [77] pour étudier l'endommagement des structures intelligentes sensibles. Différents capteurs optiques ont été utilisés pour détecter l'émission acoustique induite et explorer le potentiel d'un concept de surveillance opto-acoustique. Fan et *al.* [78] ont étudié l'intégration d'un réseau de fibres de Bragg orthogonales (FBG) dans les structures composites graphite/époxy.

D'autres travaux ont été effectués pour étudier les structures intelligentes incorporant un capteur piézoélectrique. Ces structures offrent de nombreux avantages pour les applications d'ingénierie [71,79,80] telles que le contrôle des vibrations [82,83], la suppression du bruit [84], la mesure de l'impédance électromécanique [85], la surveillance de santé structurale par ultrason [86,87] et par émission acoustique [88,89], etc.

La mesure de l'impédance électromécanique d'un piézoélectrique couplé à la structure permet d'obtenir des informations sur la réponse fréquentielle dynamique, permettant d'avoir des informations sur l'endommagement du matériau ou de la structure. Cette méthode est également utilisée pour détecter des fissures et pour contrôler la polymérisation lors de la fabrication de composite. Annamdas et *al.* [85] ont utilisé la technique d'impédance électromécanique aux échantillons de béton intégré par transducteur piézoélectrique (PZT). Le principe de base consiste à enregistrer les signatures de l'admittance EM issues des actionnements des PZT, en présence d'un champ électrique. Au cours de la surveillance, tout écart dans ces signatures indique une perturbation due à l'endommagement dans la structure en béton. Ils ont également démontré avec succès le contrôle de gain de résistance du béton au cours du durcissement à l'aide des PZT intégrés, qui sont capables de détecter les endommagements jusqu'à 200 mm.

Mall et *al.* [79,90] ont étudié les performances de l'intégration d'un capteur PZT sur la réponse mécanique du composite stratifié en graphite/époxy soumis à des chargements mécaniques (statique, fatigue cyclique) et électromécanique (EM). Sous chargement en statique, ils ont remarqué que la charge à la rupture et le module d'Young du stratifié avec capteur intégré ont diminué de 4% par rapport à ceux du stratifié sans intégration. Les durées de vie en fatigue des matériaux avec et sans intégration sont très proches les unes des autres. Sous chargement en fatigue électromécanique du matériau intégré, le PZT intégré a été soumis à une tension électrique variant de -10 à -100 V ou de 10 à 100 V, donnant lieu respectivement à une charge électrique en-phase ou hors-phase. Ils ont remarqué que le fonctionnement du PZT est meilleur dans les conditions de chargement hors-phase qu'en phase.

Yocum et *al.*[91] ont étudié la fonctionnalité d'un actionneur/capteur piézo-électrique intégré dans un composite graphite/époxy sous chargement EM en traction-compression et en traction-traction. Le PZT intégré est soumis à des tensions alternatives allant de -100 à 100 V ou de 100 à -100 V à 10 Hz, donnant soit une déformation en phase soit une déformation hors phase induite électriquement par rapport à la charge cyclique. Pour le chargement de fatigue EM en traction-compression hors-phase, ils ont constaté la génération des endommagements plus importants que le chargement en phase. En outre, les résultats en-phase ont montré moins d'endommagements du PZT dans les essais de traction-compression que dans les essais de traction-traction.

Qing et *al.* [92] ont développé la technique d'intégration d'un réseau de capteurs à l'intérieur d'une structure complexe 3-D en matériau composite en utilisant différents procédés de fabrication. Ils ont étudié à la fois la propagation des ondes et la technique d'impédance. Le réseau de capteurs intégrés de façon permanente à l'intérieur des structures composites peut être utilisé en détection actifs ou passifs pour surveiller l'état de santé du matériau tout au long de sa durée de vie. Des essais mécaniques effectués sur des éprouvettes

composites avec et sans couches intelligentes intégrées montrent que la présence de la couche intelligente n'a pas d'effet significatif sur la résistance de la structure d'accueil et ne provoque pas la décohésion.

D'autres chercheurs se sont intéressés à la propagation des ondes de Lamb dans les structures minces notamment à la détection d'impacts, de délaminages ou de fissures. Ces ondes ont l'avantage de se propager sur de longues distances et donc de limiter le nombre de capteurs. Paget et *al.* [86] ont étudié la performance des capteurs piézo-céramique (PZT) intégrés dans le matériau composite soumis à un chargement en statique et en fatigue. Le capteur PZT intégré est utilisé comme générateur d'ondes de Lamb. Ils ont montré que la réponse des ondes de Lamb n'est pas changée après un grand nombre de cycles de fatigue. Ils ont montré aussi que les capteurs intégrés fonctionnent très bien durant les essais statiques jusqu'à 90% de la durée de vie du matériau. En outre, tout endommagement survenant à l'emplacement du PZT intégré n'a pas d'influence sur les performances du transducteur quel que soit le type de chargement en statique ou en fatigue. Ils ont conclu que le transducteur fonctionne très bien même après la présence de l'endommagement.

Les caractéristiques de propagation des ondes de Lamb ont été étudiées par Zhongqing et *al.* [93]. Des ondes de Lamb sont produites et rassemblées par le réseau de capteurs PZT intégrés dans une plaque de stratifié à fibres de carbone/résine époxyde. L'influence du renfort et de la fréquence d'excitation sur la propagation de ces ondes a été évaluée et comparée avec celle captée par un capteur de surface PZT traditionnel. Les résultats montrent que le réseau de capteurs intégrés présente une immunité particulière au bruit environnemental aussi bien une excellente stabilité et une répétabilité dans l'acquisition de données. D'excellentes possibilités d'identification indiquent le potentiel considérable d'application de l'approche proposée en fournissant l'acquisition de données et la surveillance dans des conditions de haute-fidélité pour les structures composites d'avion.

Les travaux effectués sur le contrôle de structure par émission acoustique des matériaux composites intégrés sont très rares. Le contrôle par émission acoustique (EA) des composites en fibre de verre/résine époxyde intégrés par capteurs piézoélectrique est étudié par Ghezzi et *al.* [94,95]. Des essais de traction ont été effectués sur des échantillons en suivant en temps continu leur endommagement par EA. Les résultats montrent que les propriétés mécanique du matériau avec capteurs intégrés sont sensiblement les mêmes que celles du matériau non intégré. Les résultats montrent aussi que les événements acoustiques ont commencé plutôt, à 1/4 de la contrainte appliquée pour les échantillons intégrés. Ces premiers événements acoustiques détectés sont localisés à l'emplacement de l'intégration du capteur. Ils ont montré aussi que le processus d'intégration provoque des discontinuités matérielles et géométriques dans le composite.

De Rosa et Sarasini [89] ont démontré que les capteurs de poly fluorure de vinylidène (PVDF) peuvent être intégrés avec succès dans les structures composites sans affecter

significativement le comportement mécanique des stratifiés, testés en traction et en flexion trois points. En outre, ils ont vérifié que les capteurs PVDF intégrés peuvent être utilisés comme capteurs d'EA, assurant ainsi en temps réel une idée sur les différents mécanismes d'endommagement des matériaux. Ils ont conclu que le PVDF intégré peut être considéré comme la base d'un système de surveillance de santé structurale (SHM) efficace et à faible coût.

Dans le cas du CND par EA des matériaux composites sandwichs, le capteur est couplé à la surface du matériau. L'impédance acoustique du couplant est différente de celle du matériau sandwich et augmente ainsi la perte d'ondes lors de leur transmission en raison de la différence d'impédance. En outre, comme le matériau sandwich avec une âme en mousse est un type de matériau caractérisé par une atténuation élevée, les ondes d'EA sont fortement atténuées et déformées après propagation à longue distance dans le matériau sandwich. Par conséquent, ce n'est pas évident d'appliquer les méthodes traditionnelles de CND avec capteurs collés pour la surveillance des structures en matériaux sandwichs à l'échelle industrielle. Les chercheurs ont recours donc aux capteurs intégrés au sein de la structure.

Konka et al.[96] ont étudié les effets de l'intégration des capteurs piézoélectriques insérés dans la peau sur l'intégrité structurale des composites sandwichs. Ils se sont intéressés aux conséquences de l'intégration sur la résistance à la traction en statique et en fatigue. Ils ont aussi enregistré la réponse des capteurs intégrés en termes de tension de sortie. Les essais de traction ont montré que les valeurs de la résistance à la rupture et le module d'élasticité des matériaux, testés avec et sans capteurs incorporés, subissent une réduction de l'ordre de 7%. Les essais de fatigue montrent que la durée de vie en fatigue et les résistances des échantillons avec et sans capteurs intégrés sont proches les unes des autres. D'autres expériences ont été réalisées en utilisant la méthode d'analyse modale pour explorer la capacité des capteurs intégrés à détecter les endommagements. Les résultats de ces expériences montrent que les piézoélectriques sont efficaces pour la détection de l'initiation du délaminage.

#### **2.4.4. Présentation de la technique de l'implant piézoélectrique**

Les systèmes de Contrôle Non Destructif (CND) classiques utilisent le plus souvent des accéléromètres ou des transducteurs piézoélectriques dont la taille et en particulier l'épaisseur est assez importante (plus de 10 mm). Pour adapter ces méthodes à la mesure *in-situ*, il est nécessaire de réduire la taille des capteurs le plus possible et en particulier leurs épaisseurs. La méthode dite de l'implant piézoélectrique a pour but le contrôle *in-situ* la polymérisation et l'endommagement des composites. Cette méthode se base sur l'intégration d'un disque piézoélectrique de Titanate Zirconate de Plomb (PZT) à l'intérieur d'un matériau composite avant sa mise en forme. Ainsi de nombreux auteurs utilisent des pastilles piézoélectriques nues de faible épaisseur pour différentes applications. Deux configurations de l'intégration entre les plis du composite des capteurs piézo-céramique sont décrites dans la littérature [52,53].

La technique porte sur la façon d'intégrer le transducteur PZT dans le composite. Certains chercheurs ont choisi de couper une partie des fibres du composite à l'endroit de l'insertion du transducteur piézo-céramique intégré [70,79,97,98]. D'autres chercheurs ont directement implanté les transducteurs PZT en évitant de couper les fibres [86,99-102].

Hagood et *al.* [98] ont utilisé la technique de cut-out (découpage) pour intégrer les transducteurs piézo-céramiques dans le stratifié à fibres de verre (GFRP). Pour le pli central, une fenêtre a été découpée aux mêmes dimensions que l'élément piézo-céramique. Des fentes ont été également coupées dans les plis au-dessus et en dessous de l'élément piézo-céramique pour faire sortir les inter-connecteurs aux bords, comme le montre la figure 2.13. Les inter-connecteurs sont des fils soudés sur les faces de l'élément piézo-céramique.

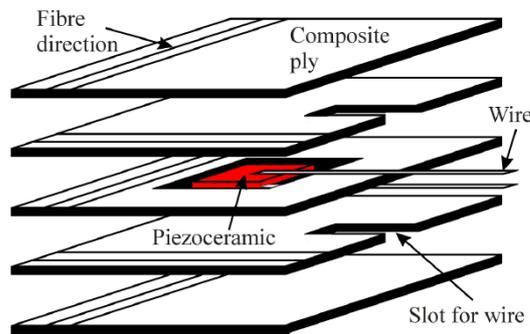


Figure 2.13. Élément piézo-céramique intégré dans un stratifié verre/époxy [98]

Elspar et *al.* [97] ont fabriqué un transducteur piézo-céramique implanté dans les composites thermoplastiques renforcés par des fibres de carbone. Les deux inter-connecteurs utilisés sont fabriqués à partir de la même matière que le composite. Chaque inter-connecteur est placé sur un côté de l'élément piézo-céramique. L'isolation électrique des inter-connecteurs supérieure et inférieure est réalisée par deux plis thermoplastiques renforcés par les fibres de verre, comme le montre la figure 2.14. Les découpages (cut-out) dans les plis thermoplastique renforcés par des fibres de verre et des fibres de carbone ont été réalisés pour avoir un contact électrique des bornes des inter-connecteurs avec l'élément piézo-céramique intégré.

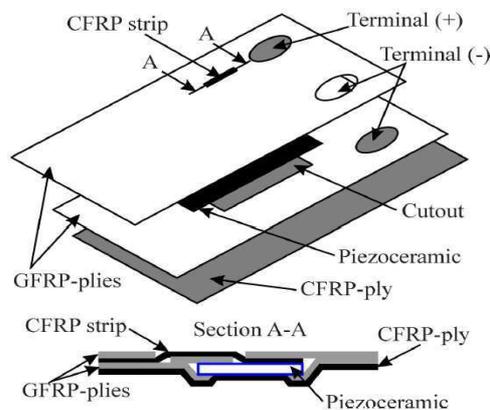


Figure 2.14. Élément piézo-céramique intégré dans le composite thermoplastique renforcé des fibres de carbone [97]

D'autres chercheurs comme Hagood et *al.*[98], Mall et Hsu .[79], Mall et Coleman.[90] et Crawley et de Luis [103] ont également intégré l'élément piézo-céramique dans un matériau conducteur, tel que le composite polymère renforcé par des fibres de carbone (CFRP). Pour isoler électriquement le transducteur piézo-céramique du matériau entourant, une couche de polyimide a été utilisée pour encapsuler l'élément piézo-céramique et les inter-connecteurs, comme le montre la figure 2.15.

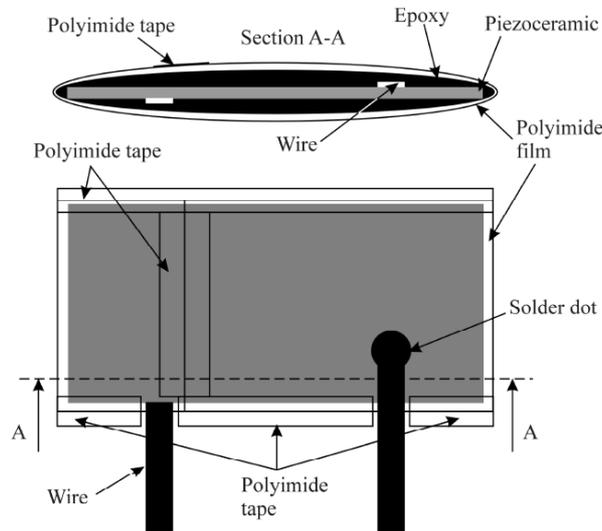


Figure 2.15. Isolation du transducteur piézo-céramique par une couche de polyimide [98]

Mall et Coleman [90] ont remarqué que le procédé de cut-out (découpage) des plis entraîne de grave délamination et l'initiation de fissure autour du capteur intégré, mais la résistance à la rupture en statique est de 130% supérieure à celle des autres procédés d'insertion. L'observation du matériau testé montre que les performances de la structure intégrée et la durée de vie du matériau en fatigue sont gravement dégradées en utilisant la méthode du cut-out, car la résistance au délaminage est plus faible dans ce cas. La technique ultrasonore a été utilisée après la fabrication des échantillons afin de s'assurer qu'aucun vide ou défaut n'a été introduit par l'insertion. Un petit problème a été remarqué lors de la fabrication, il s'agit de l'écoulement de la résine époxyde autour des fils conducteurs qui ont abouti à la circulation des fils conducteurs sur le bord de l'éprouvette. Ils ont également placé un ruban Kapton au bord des composites pour empêcher d'endommager les fils conducteurs et à maintenir sa position centrale au niveau du bord. Crawley et de Luis [103] ont constaté que le découpage dans le verre/époxy et le graphite/époxy entraîne une diminution de la résistance.

Bourasseau et *al.* [100] ont intégré un transducteur piézo-céramique sans découper les plis du composite à fibre de carbone. Le transducteur est constitué d'un matériau en niobate de lithium et une paire de bandes d'inter-connecteurs. Le niobate de lithium a été choisi pour sa température de Curie élevée (1100°C). La connexion entre l'inter-connecteur et l'élément piézo-céramique a été réalisée par une colle conductrice argent/époxy. Paget et *al.* [86,99] ont développé la technique de Bourasseau et *al.* [100], des transducteurs piézo-céramiques en

zirconate titanate de plomb souples ont été intégrés dans un stratifié en fibre de carbone, comme le montre la figure 2.16. Neary *et al.* [101] ainsi que Shen *et al.* [102] ont encapsulé le PZT dans les composites de la même façon que Bourasseau *et al.* [100] ainsi que Paget *et al.* [86,99].

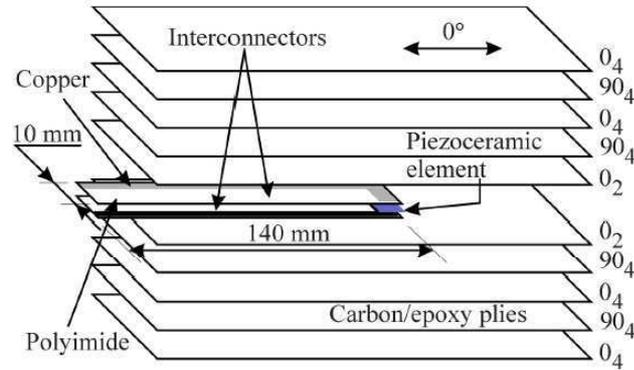


Figure 2.16 Inter-connecteurs polyimide/cuivre et éléments PZT intégré dans le CFRP [86]

Tous les travaux précédents ont réussi à isoler le capteur/actionneur avec succès, mais le processus de main-d'œuvre et les problèmes de fiabilité associés restent la préoccupation majeure dans la mise en œuvre.

D'autres chercheurs ont comparé les deux techniques d'intégration des PZT (avec et sans cut-out). Par exemple, Mall [104] a étudié l'intégrité du stratifié graphite/époxy intégré par le capteur PZT actif sous chargement monotone et de fatigue. Deux structures ont été testées:  $[0/\pm 45/90]_S$  et  $[0/0/\pm 45/0/0/90]_S$ . Les capteurs sont implantés dans le stratifié selon deux méthodes. La première consiste à placer les capteurs dans une zone coupée (cut-out) entre les deux plis orientés à  $90^\circ$  au centre. La deuxième consiste à les insérer dans le même emplacement sans aucune coupure. La résistance à la traction et le module d'Young des composites considérés ne sont pas affectés par l'insertion des éléments piézoélectriques en utilisant l'une ou l'autre méthode. Les courbes contrainte-déformation de traction monotone avec et sans PZT inséré n'ont montré aucune différence (Fig. 2.17). De plus, il n'y avait pas de dégradation de la durée de vie du matériau testé en fatigue.

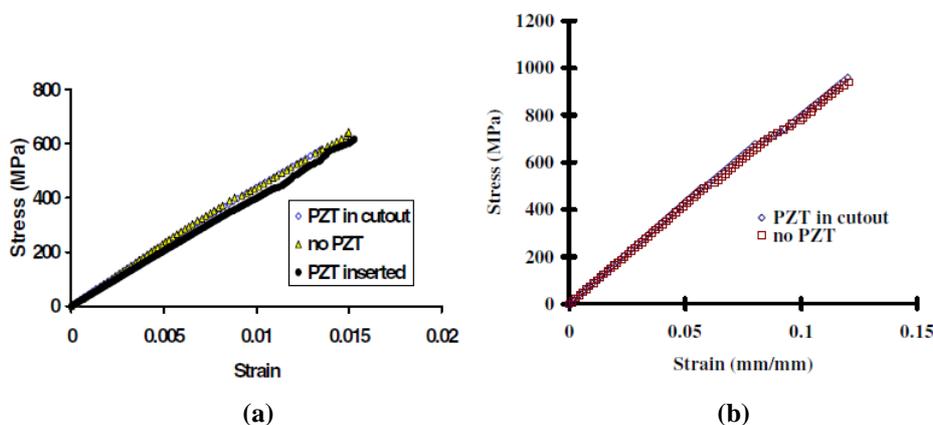
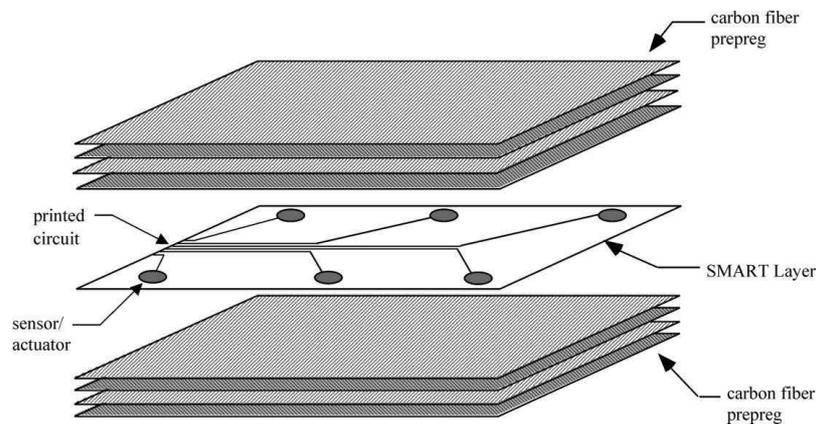


Figure 2.17. Courbes contrainte-déformation en traction monotone de a)  $[0/\pm 45/90]_S$  et b)  $[0/0/\pm 45/0/0/90]_S$  [104]

### 2.4.5. Etat de l'art des couches intelligentes (SMART Layer)

Le développement de l'implant des capteurs PZT a donné naissance à un réseau de capteurs PZT connu sous le nom de 'couche intelligente' (SMART Layer : Stanford Multi-Actuator Receiver Transduction layer) [80,81]. L'objectif de la couche intelligente est d'adapter le concept de circuit imprimé flexible dans la fabrication de structures en composite à capteur intégré. Le concept proposé utilise cette technique pour fabriquer une large couche mince et flexible qui contient un réseau de piézo-céramiques bien isolés, répartis et connectés par circuits imprimés. La couche SMART qui peut être utilisée comme un pli supplémentaire (pli intelligent), est incorporée à l'intérieur d'un composite stratifié afin de créer une structure composite intelligente. Cela donnerait à la structure une fonctionnalité supplémentaire : elle devient une structure capable de réaliser la fonction d'actionnement (excitation) et comme collecteur d'informations de la structure (détection).

Cette nouvelle technologie a été proposée par un groupe de chercheurs de l'Université de Stanford [102,105,106] qui a développé un système de capteurs commercialisé. Le procédé de fabrication de ce réseau de capteurs piézo-céramique [80] est illustré dans la figure 2.18. Cette figure montre un SMART Layer composé d'un réseau d'éléments piézoélectriques supportés sur un substrat mince qui est un circuit imprimé flexible. Cette couche est intégrée entre deux plis d'une structure composite stratifié carbone/époxy. Leur méthode a été réalisée afin de suivre la progression de la polymérisation des composites utilisant des signaux de diagnostic générés par les piézo-céramiques implantés. Ils ont montré que les SMART Layer peuvent être insérés entre deux plis sans altérer l'intégrité structurale des matériaux.



**Figure 2.18. Intégration des capteurs et leur câblage pour la méthode de l'implant piézoélectrique [80]**

Cette couche intelligente peut être personnalisée dans une variété de tailles, de formes et de complexité (Fig. 2.19), permettant son intégration dans de nombreuses structures composites, tels que les appareils à pression, les tuyauteries ou les ailes. Les éléments PZT sont des PKI-400, d'une épaisseur de 254µm. L'inter-connecteur, fabriqué du cuivre, est collé sur un film de polyimide.

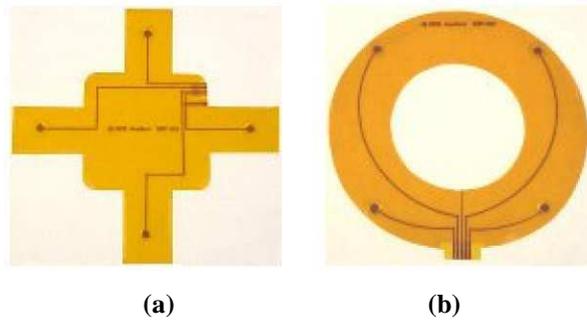


Figure 2.19. Réseaux de transducteurs piézo-céramique pour l'intégration dans a) Plaques composites et b) Récipients sous pression [107]

Yang et al. [82] ont développé un modèle de conception d'une couche intelligente intégrée dans une structure composite en utilisant le processus de circuit imprimé flexible (flexible printed circuit : FPC). Ce modèle fournit non seulement une meilleure isolation du capteur piézoélectrique des fibres carbone/graphite, mais empêche aussi les endommagements des fils conducteurs. Le modèle de la couche intelligente, illustré dans la figure 2.20-a, comprend deux simples faces flexibles de films de polyimide, des éléments piézoélectriques (PZT) et un connecteur. Les auteurs ont comparé les caractéristiques mécaniques de quatre types de matériaux (Fig. 2.20-b): sans intégration de piézoélectrique, avec intégration sans cut-out, intégration avec cut-out et intégration d'une couche intelligente (Smart Layer). Les résultats obtenus en traction statique montrent que l'intégration des piézo-céramiques sans cut-out peut augmenter la rigidité, mais elle diminue défavorablement la résistance des composites stratifiés. Une telle diminution de la résistance devient plus évidente lorsque les fibres sont coupées. Il est à noter que l'éprouvette avec la couche intelligente a la plus forte résistance à la traction en raison de la forte résistance du film polyimide.

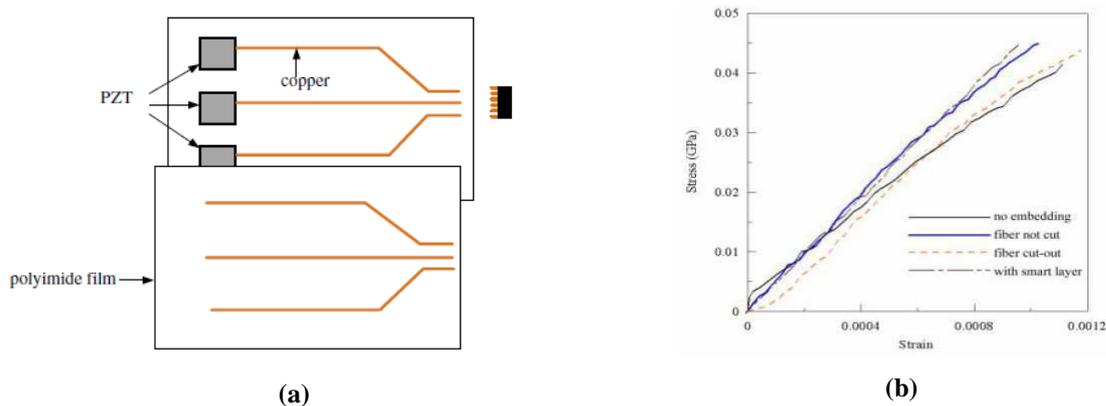


Figure 2.20. a) Modèle de la couche intelligente étudié par Yang et al. et b) Courbes contrainte-déformation des essais de traction effectués sur quatre types d'échantillons [82]

#### 2.4.6. Problèmes d'intégration

L'insertion d'un élément étranger dans un matériau hôte a pour effet immédiat de modifier localement le comportement mécanique de la structure. Cet élément lui-même doit être capable de résister aux concentrations de contraintes internes lors de l'élaboration de la

structure et aux sollicitations mécaniques durant le cycle de vie du matériau. D'autre part, il est nécessaire de prendre garde à la robustesse des techniques de mise en œuvre de la structure, vis-à-vis des aléas pouvant survenir au moment de l'intégration des capteurs. En effet, les industriels sont parfaitement conscients que même en possession d'un cahier des charges bien précis, et malgré la haute technicité de leurs équipes de maintenance, il n'en subsiste pas moins des incertitudes importantes, sur la position, l'orientation et le collage des capteurs.

Les méthodes de contrôle de santé par intégration d'un réseau de capteurs piézo-céramiques au sein des structures composites soulèvent plusieurs questions très importantes qui sont :

- L'isolation électrique : dans le cas de l'intégration des capteurs dans un matériau conducteur comme le carbone, les capteurs piézo-céramiques ont besoin d'être protégés contre l'environnement. Cela se produit généralement durant la phase d'autoclave du processus de fabrication, lorsque le panneau intégré est soumis à une température et une pression élevées. Ces dernières peuvent provoquer une rupture physique dans le matériau isolant qui permet aux fibres de carbone d'entrer en contact avec l'élément piézoélectrique et court-circuitant les électrodes piézoélectriques. Une méthode développée [98,108] pour résoudre ce problème et d'envelopper chaque capteur piézo-céramique et ses fils avec un film isolant. Cette méthode de protection des capteurs devient plus compliquée quand un grand nombre de capteurs est nécessaire. Une autre méthode proposée par Joshi et Chan [109], consiste à utiliser des plis de fibres de verre pour séparer les capteurs des fibres de carbone. Cette méthode permet l'isolation et l'incorporation simultanée de plusieurs capteurs, mais elle nécessite l'utilisation de couches de fibre de verre qui entraîne des changements de la résistance et du poids.

- L'intégrité structurale : le problème de la dégradation de la structure se présente lorsque les capteurs incorporés réduisent la résistance de la structure composite. Si le réseau de capteurs intégrés affaiblit la structure d'accueil, il pourrait causer l'échec précoce de cette structure. Pour être applicable à des structures réelles, le réseau de capteurs intégrés ne doit pas affaiblir de manière significative la structure.

- L'uniformité et la cohérence de la réponse du capteur : l'uniformité de la réponse des capteurs multiples est également une question importante quand tout un réseau de capteurs est utilisé pour surveiller une structure. Le problème de la réponse du capteur non uniforme se pose généralement lorsque les capteurs sont montés séparément sur une structure. L'intégration des capteurs dans la structure rend leur réponse très sensible à l'interface de leur contact avec la structure. Ainsi, si la manière de collage des capteurs est un peu différente, la différence de réponse du capteur peut être très significative. En outre, la réponse du capteur peut varier dans le temps et après le chargement de structure, conduisant à des mesures incompatibles, ce qui les rend inutilisables.

## 2.5. Cadre et objectifs de l'étude

Les études retrouvées dans la littérature traitent le problème de l'implant piézoélectrique intégré dans la masse d'un matériau stratifié seulement sous chargement de tension sans l'analyse des signaux acoustiques collectés au cours des essais. Ce travail de recherche s'intègre parfaitement dans la continuité de l'effort mené au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM) dans le but de développer le concept de matériaux sensibles par l'intégration des capteurs piézoélectrique dans les composites stratifiés (matrice polymère/fibres de verre) et dans les structures sandwichs (peaux en stratifié et une âme en mousse PVC) pour la surveillance de l'état de santé structurale du système et la détection de leur endommagement.

Dans la présente étude, nous proposons d'utiliser l'implant piézoélectrique en utilisant des capteurs piézoélectriques. L'un des enjeux pour ces matériaux est de pouvoir identifier les mécanismes sources de l'endommagement et évaluer l'état de santé *in-situ* et en temps réel à différents stades de vieillissement. Dans ce but, la technique de l'émission acoustique (EA) sera utilisée pour ce travail de recherche. Elle présente de nombreux avantages: c'est un moyen de contrôle non destructif applicable sur des structures en fonctionnement.

## 2.6. Conclusions

Dans ce chapitre, les matériaux composites stratifiés et sandwichs ainsi que leurs mécanismes d'endommagement sont présentés. Nous avons mis en évidence l'importance de la technique d'émission acoustique comme moyen de suivi et de contrôle de santé structurale au cours du chargement. Ainsi, quelques travaux de la littérature sur la classification des signaux acoustiques émis par les différents mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites sont rappelés. Les divers types de capteurs intégrés, l'état de l'art du CND intégré des matériaux composites ainsi qu'une explication détaillée des différentes techniques de la méthode de l'implant piézoélectrique sont aussi présentés.

Dans le but d'étudier l'effet de l'incorporation des capteurs piézoélectriques au sein des matériaux composites sur le comportement mécanique ainsi que les mécanismes d'endommagement intervenant, les chapitres suivants seront consacrés à une analyse plus fines des mécanismes d'endommagement de ces matériaux soumis à différents type d'essais mécaniques en statique, fluage et fatigue cyclique.

## **Chapitre 3**

# **Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Matériaux Composites Stratifiés en Flexion Trois Points**

## Résumé

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus des essais de flexion trois points effectués sur des échantillons de stratifiés à plis unidirectionnels du type  $[0]_{24}$  et à plis croisés du type  $[0_6/90_6]_s$ . Afin de contrôler l'effet de l'insertion d'un objet externe au sein du composite, une étude détaillée est menée sur le comportement mécanique en statique sur des échantillons en composites stratifiés avec implants métalliques de différentes tailles. Ensuite, les résultats des matériaux instrumentés par implant piézoélectrique sont analysés dans des essais en statique, en fluage et en fatigue cyclique sur deux type de matériaux (avec et sans intégration de capteur).

Les résultats obtenus dans les différents types d'essais ont permis de montrer que l'incorporation de l'instrumentation au sein du composite réduit légèrement ses propriétés mécaniques. La comparaison des résultats, en termes de suivi par émission acoustique des mécanismes d'endommagement, montre que l'activité acoustique du matériau intégré est plus importante que celle du matériau non intégré. L'analyse et l'observation des signaux d'EA ont conduit à l'identification des signatures acoustiques des différents modes d'endommagement dominants dans les matériaux composites stratifiés.

### 3.1. Introduction

Les essais mécaniques jouent un rôle très important dans l'évaluation fondamentale des propriétés des matériaux d'ingénierie ainsi que dans le développement de nouvelles structures et leur contrôle de qualité. Pour un matériau intelligent, il est important de savoir que le matériau est suffisamment fort et suffisamment rigide pour résister aux charges auxquelles il sera exposé. Pour se faire, l'application d'un certain nombre des essais mécaniques (traction, compression, flexion, torsion, etc.) a été nécessaire. L'un des essais le plus employé pour déterminer les caractéristiques mécaniques de matériaux composites est en fait la flexion. Ce choix correspond souvent aux sollicitations auxquelles sont soumises des pièces réelles (pales d'hélicoptère suspensions à lames, éléments de structures, etc.) mais surtout offre l'avantage de diminuer considérablement les difficultés de réalisation de l'essai par des éprouvettes simples. De plus, selon que l'opérateur travaillera en flexion 3-points ou 4-points et suivant la distance entre appuis, il pourra privilégier un mode de rupture en traction/compression ou en cisaillement.

Dans ce chapitre, nous étudions l'évolution de l'endommagement dans un matériau composite stratifié avec et sans implant piézoélectrique soumis à différents type d'essais de flexion (statique, fatigue cyclique et fluage) qui sont connus comme essai transversal. C'est une façon de déterminer comment le produit testé réagit en appliquant une charge axiale afin de le plier. L'essai de flexion 3-points induit un fort gradient dans l'état des contraintes. En effet, la face opposée au chargement est en état de traction avec un maximum de contrainte en son milieu. Tandis que, la face où à lieu le chargement est en compression et le maximum des contraintes en cisaillement est atteinte dans le plan médian de l'éprouvette. Ces essais sont réalisés afin d'analyser le comportement de ces matériaux en flexion et permettront également la mesure de la rigidité en flexion, de la charge et le déplacement à la rupture.

Afin de vérifier la faisabilité de l'implant des capteurs à l'intérieur d'un matériau composite et de contrôler l'effet de l'insertion d'un objet externe au sein du composite, nous proposons de commencer notre étude par l'insertion de disques métalliques de différentes tailles dans le matériau. Ainsi, l'effet de la taille de la pastille métallique sur le comportement et sur les propriétés mécaniques sera analysé en termes de comparaison avec les résultats obtenus dans des composites non instrumentés. Ensuite, nous proposons d'effectués des essais de flexion 3-points sur des matériaux sans intégration qui seront désignés par NI et des matériaux avec capteurs piézoélectriques intégrés de différentes tailles qui seront désignés par

IP (avec petit capteur) et IG (avec grand capteur). Les essais seront menés en statique, en fluage et en fatigue cyclique. Les résultats obtenus dans les différents matériaux instrumentés par implant piézoélectrique intégrés dans la masse ou collés à la surface des composites seront analysés en termes de comportement mécanique et sensibilité de l'émission acoustique aux mécanismes d'endommagement au cours des essais.

### 3.2. Mise en œuvre des matériaux composites stratifiés destinés aux essais de flexion trois-points

Les matériaux étudiés dans ce travail sont des composites stratifiés à plis unidirectionnels de type  $[0]_{24}$  et des stratifiés à plis croisés avec une séquence d'empilement de type  $[0_6/90_6]_s$ . La fabrication de ces matériaux est réalisée au sein du laboratoire (LAUM). Le dosage utilisé est de 50% du taux de fibres de verre de densité  $300 \text{ g/m}^2$  et de 50% du taux de résine époxyde de type SR1500/SD2505, commercialisées par la société SICOMIN. La mise en œuvre des composites est réalisée par moulage sous vide (la technique du "sac"). Les différentes couches sont stratifiées et imprégnées à température ambiante, puis moulées sous vide entre le moule et le contre moule après l'interposition de divers tissus de moulage. L'interposition d'un moule et d'un contre moule permet de contrôler l'épaisseur des plaques réalisées. L'ensemble est ensuite mis sous vide (dépression de 30 kPa) dans une poche pendant 8 heures à température ambiante. Le capteur d'EA est implanté au milieu entre les plis du matériau dans le plan neutre. Il est placé approximativement au tiers de la longueur de l'éprouvette à partir du bord (Fig. 3.1). Les plaques ainsi fabriquées sont exposées à température ambiante pendant 2 à 3 semaines afin d'avoir une polymérisation complète de la résine époxyde.

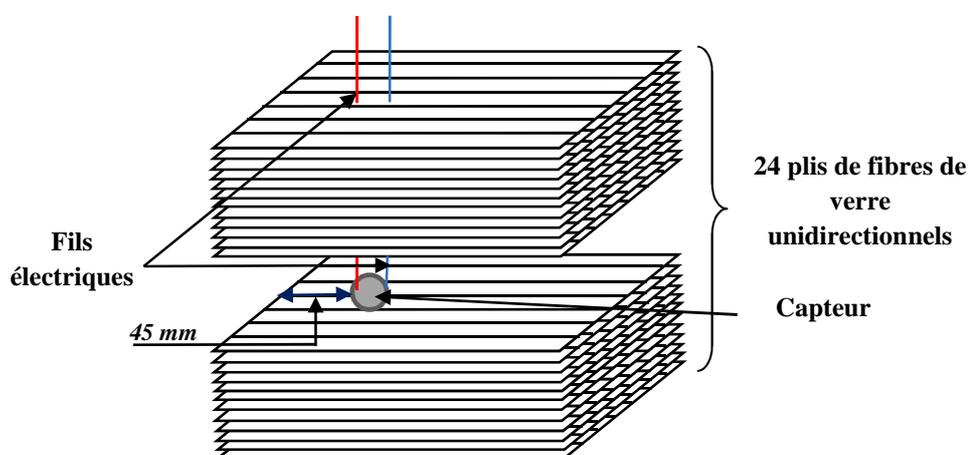


Figure 3.1. Matériau stratifié unidirectionnel intégré par un capteur piézoélectrique

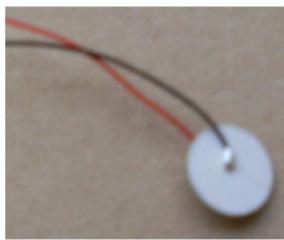
Afin d'évaluer l'influence de la taille de l'instrument incorporé sur le comportement mécanique du matériau, deux dimensions de capteur sont utilisées (Tab. 3.1).

**Tableau 3.1. Dimensions des capteurs piézoélectriques implantés**

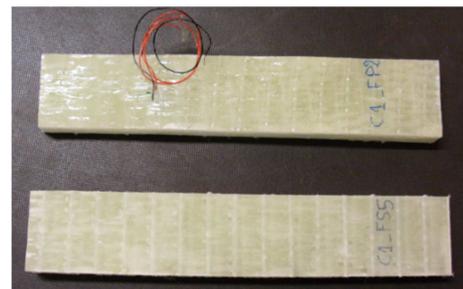
Capteur piézoélectrique	P	G
Diamètre (mm)	5	10
Épaisseur (mm)	0,5	1

Les capteurs piézo-céramiques de type Pz 27 (Fig. 3.2-a), utilisés dans nos applications, sont fournis par la société Ferroperm [110]. Ces capteurs garantissent d'excellentes propriétés: une température de Curie relativement élevée ( $>350^{\circ}\text{C}$ ), une résistivité électrique importante à des températures élevées et des coefficients de charge ainsi que des coefficients de couplage électromécanique élevés. Les céramiques de cette composition sont particulièrement utilisées pour des mesures médicales et dans le contrôle non destructif (ultrasons et émission acoustique). Une explication détaillée sur le Pz 27 est présentée dans le catalogue de la société Ferroperm [110].

Trois types de matériaux sont élaborés: matériau non instrumenté (NI), matériau instrumenté avec le petit capteur (IP) et matériau instrumenté avec un grand capteur (IG). Des éprouvettes parallélépipédiques sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir des plaques de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ . Les éprouvettes utilisées pour les essais de flexion ont pour longueur  $L_I = 150 \text{ mm}$ , pour largeur  $b_I = 30 \text{ mm}$  et pour épaisseur  $e_I = 8 \text{ mm}$  (Fig. 3.2-b).



(a)

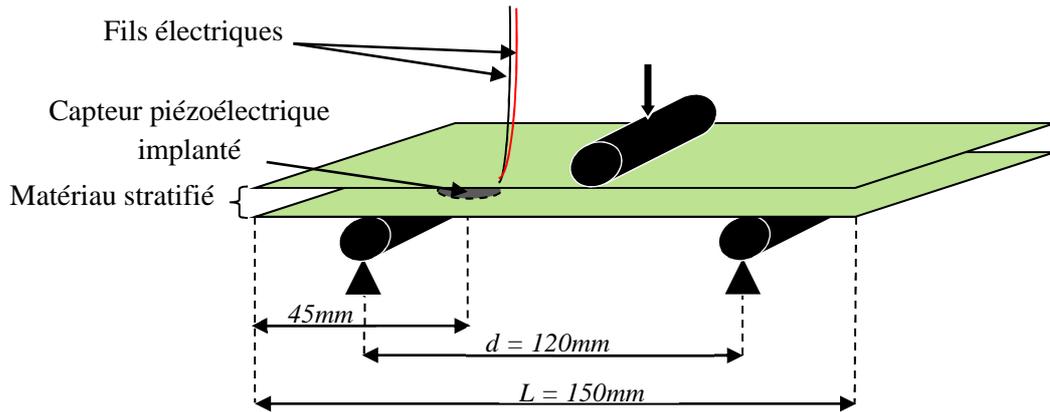


(b)

**Figure 3.2. a) Capteur piézo-céramique Pz 27 et b) Eprouvettes utilisées pour les essais de flexion avec et sans intégration**

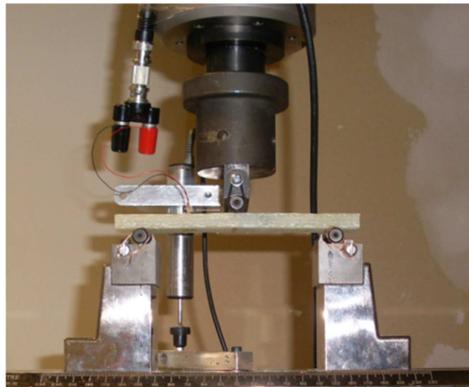
### 3.3. Procédures expérimentales

Les éprouvettes sont sollicitées en flexion trois-points avec une distance entre appuis  $d=120 \text{ mm}$  (Fig. 3.3). Trois à cinq éprouvettes sont testées pour chaque type de matériau.



**Figure 3.3. Schéma de principe de l'essai de flexion 3-points sur une éprouvette stratifiée intégrée par un capteur piézoélectrique**

Les essais sont effectués à l'aide d'une machine hydraulique universelle de type INSTRON modèle 8801 munie d'une cellule de charge de 10 kN (Fig. 3.4) dont le pilotage et l'acquisition des données sont effectués par ordinateur. La flèche et la charge sur l'éprouvette sont mesurées à l'aide d'un capteur de déplacement (LVDT) et d'une cellule de force respectivement.



**Figure 3.4. Dispositif expérimental de l'essai de flexion trois-points sur une éprouvette intégrée**

Les échantillons sont testés en statique, en fatigue cyclique et en fluage.

Dans les essais statiques, les éprouvettes sont chargées jusqu'à la rupture avec une vitesse d'essai de 2 mm/min. La charge et le déplacement de l'éprouvette sont enregistrés au cours de ces essais. Ces essais sont effectués afin de déterminer les propriétés statiques des matériaux (rigidité, déplacement et charge à la rupture).

Le comportement de l'ensemble des éprouvettes est aussi analysé sous chargement de fatigue cyclique. Le phénomène de fatigue cyclique du matériau se caractérise par l'application d'un grand nombre de sollicitations cycliques dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture en statique du matériau. Les essais de fatigue sont menés en contrôlant le signal de la force. La forme d'onde est sinusoïdale avec une fréquence égale à 5 Hz. La

charge maximale imposée est de 70% par rapport à la charge à la rupture en statique avec une amplitude du signal de 10%.

Dans le cas des essais de fluage, les éprouvettes de l'ensemble des matériaux sont soumises à une charge constante de flexion sur une durée prolongée et à température ambiante. Le déplacement est enregistré selon une périodicité donnée. La rupture, si elle intervient, termine l'essai et l'instant de la rupture est enregistré. Si l'éprouvette ne se rompt pas, l'essai se termine au bout de 24 heures. Ces tests sont effectués avec des niveaux de charges appliqués égales à 70% de la charge à la rupture en statique.

Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de la mesure de l'émission acoustique. Un système d'acquisition EPA (Euro Physical Acoustics) comportant 6 voies avec une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz est utilisé. Ce système est composé d'une carte d'acquisition PCI reliée à un micro-ordinateur. La figure 3.5 représente une vue d'ensemble du dispositif de l'EA. La détection des signaux acoustiques est assurée par les capteurs piézoélectriques pz 27 de bande passante 100 kHz - 1 MHz. Ces signaux sont ensuite amplifiés à l'aide d'un préamplificateur de gain 40 dB, puis convertis par la carte PCI pour les numériser et pour procéder à l'extraction des paramètres d'EA. Les données de l'EA sont transmises au micro-ordinateur, permettant l'affichage en temps réel, le stockage et le post-traitement des données.

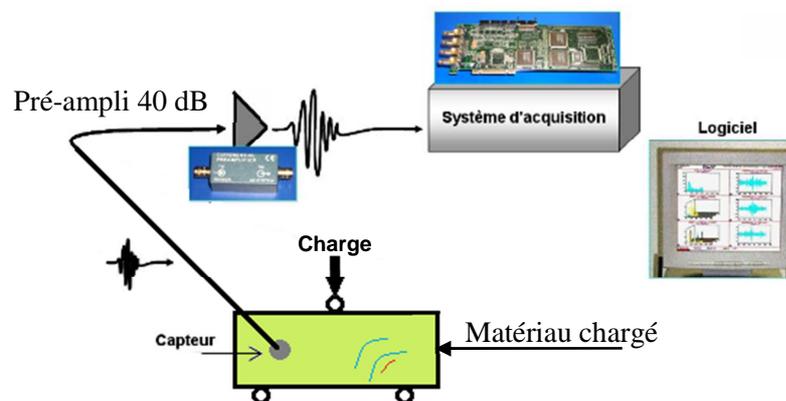


Figure 3.5. Dispositif expérimental de l'émission acoustique

Pour comparer l'activité acoustique des deux types de matériaux (sans et avec intégration), l'EA des échantillons non intégrés est suivie. Dans ce cas, le capteur de l'EA est collé avec la graisse silicone à la face supérieure de l'éprouvette, placé à 45 mm du bord de chaque éprouvette.

Le système d'acquisition EPA nécessite des réglages préliminaires pour certains paramètres de configuration permettant de déterminer les caractéristiques des signaux

acoustiques. Parmi ces paramètres de réglage, on trouve les fenêtres d'acquisition temporelles glissantes nommées Peak Definition Time (PDT), Hit Definition Time (HDT), Hit Lockout Time (HLT) (Fig. 3.6) :

- Le PDT : fixé à  $50\mu\text{s}$ , permet de déterminer le pic de plus forte amplitude et le temps de montée de la salve d'EA. Cette fenêtre débute au premier dépassement de seuil et est reconduite si un nouveau maximum est mesuré dans le PDT.
- Le HDT : fixé à  $100\mu\text{s}$ , permet de déterminer la fin de la salve et donc sa durée. Cette fenêtre est reconduite à chaque dépassement de seuil. Si aucun dépassement de seuil n'est présent dans le HDT, alors la fin de la salve est définie par le dernier dépassement de seuil. Le HDT doit être aussi court que possible pour éviter d'avoir deux salves considérées comme une seule.
- Le HLT : fixé à  $400\mu\text{s}$ , permet d'exclure d'éventuelles réflexions tardives dans les signaux d'EA. Le HLT débute à la fin du dernier HDT. Ces valeurs vont définir la manière dont seront calculés les paramètres dans les signaux d'EA.

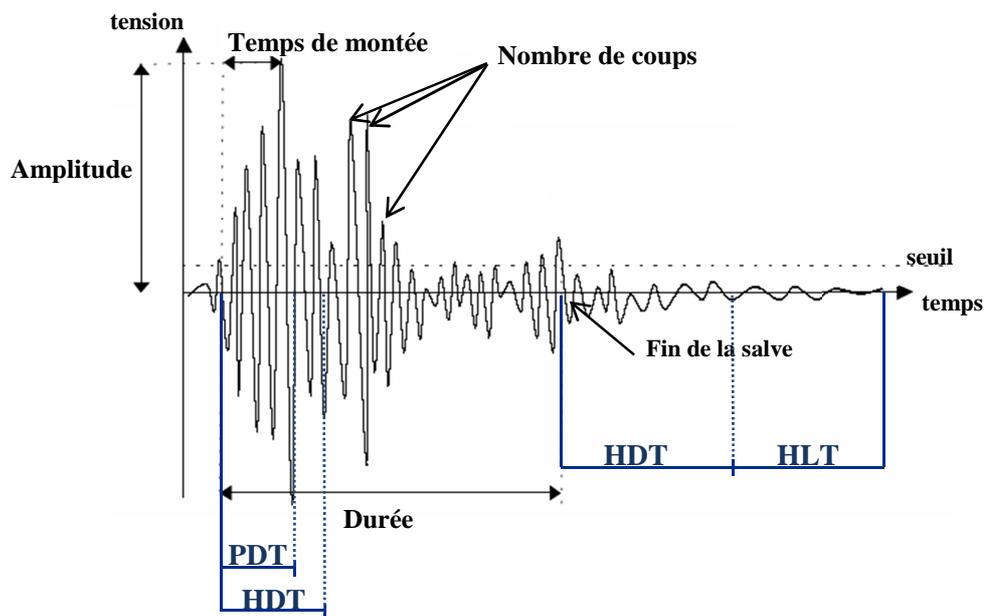


Figure 3.6. Principaux paramètres mesurés sur une salve d'émission acoustique

Un autre paramètre important à régler avant tout essai est le seuil d'acquisition du système. Rappelons que le seuil permet de ne pas enregistrer le bruit de fond et que sa valeur influe sur la détermination des paramètres d'une salve. Le seuil d'acquisition doit être déterminé avant le lancement de chaque essai en utilisant une procédure de "casser de mine" (Fig. 3.7) [21]. Ce test permet d'estimer la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau ainsi que la détection du temps d'arrivée et de la fin des signaux

d'EA. Ce seuil est généralement fixé à une valeur légèrement supérieure au bruit de fond. Pour les matériaux composites, le seuil d'acquisition des signaux est compris entre 38 et 45 dB. La distribution d'amplitude a pour intervalle 0-100 dB (0 dB correspond à 1  $\mu$ V en sortie du transducteur et 100 dB correspond à 10  $\mu$ V).

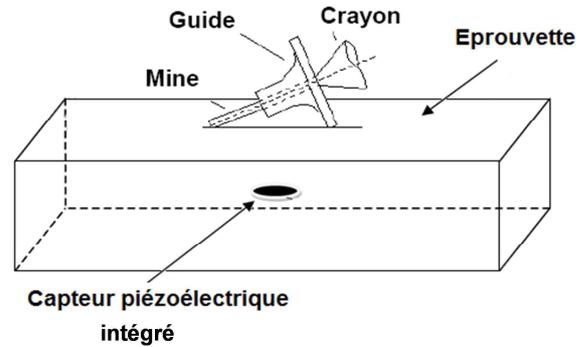


Figure 3.7. Principe de la calibration du système de l'EA: procédure de "casser de mine"

Plusieurs descripteurs temporels sont calculés par le système d'acquisition pour chaque salve d'EA (Fig. 3.6) à savoir l'amplitude maximale du signal, l'énergie, la durée du signal, le nombre de coups (nombre de franchissements du seuil de détection par le signal sur toute sa durée), le temps de montée (temps qui sépare le premier dépassement de seuil et l'amplitude crête du signal), etc. Ces paramètres sont utilisés par la suite pour la classification des différents signaux acoustiques qui représentent chacun un type d'endommagement.

### 3.4. Classification des signaux de l'EA par la méthode des $k$ moyennes

Avant d'appliquer l'algorithme de classification et afin d'avoir le meilleur résultat, le nombre de classes est optimisé en prenant la valeur minimale du facteur  $R_{DB}$  [45] par balayage d'un nombre de classes, dans une gamme allant de 2 à 5 avec 30 itérations. On obtient la valeur du nombre de classes en se basant sur la plus faible valeur du coefficient de Davies et Bouldin  $R_{DB}$  [45] qui est défini comme suit:

$$R_{DB} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max \left( \frac{d_i + d_j}{d_{ij}} \right)$$

Où  $k$ ,  $d_i$ ,  $d_j$  et  $d_{ij}$  sont respectivement, le nombre de classes, la distance moyenne dans la classe  $i$ , la distance moyenne dans la classe  $j$  et la distance moyenne entre les classes  $i$  et  $j$ .

La méthode de classification utilisée dans ce travail est celle des  $k$ -moyennes [43] sous le logiciel Noesis [111], en se basant sur cinq paramètres qui sont l'amplitude, l'énergie, le temps de montée, la durée et le nombre de coups. Dans notre problématique, un échantillon

contient  $N$  signaux d'EA. Chaque signal est représenté par un vecteur  $X$  constitué de  $n$  paramètres  $(x_1, \dots, x_n)$ . A la fin de la classification, on obtient des classes notées  $C_k$  dont chacune contient un ensemble de  $n$  signaux d'EA ayant des caractéristiques proches.

Les étapes de l'algorithme des  $k$ -moyennes sont [43,44]:

- 1) Choix du nombre  $k$  de classes (cluster).
- 2) Initialisation des centres des  $k$  classes pour chaque classe  $C_k$  de façon aléatoire ou en les définissant manuellement.

Pour tous les signaux d'EA:

- 3) Calcul de la distance séparant chaque vecteur  $X$  (signal d'EA) aux centres des  $k$  classes.
- 4) Affectation des vecteurs d'entrée  $X$  à l'une des  $k$  classes en cherchant le minimum de la distance euclidienne entre le vecteur  $X$  et les centres des  $k$  classes,
- 5) Evaluation des nouveaux centres des  $k$  classes. A la fin de cette étape d'itération, tous les signaux d'EA sont affectés à une classe,
- 6) Si les centres des classes sont stables, alors l'algorithme a convergé et la procédure est terminée. Dans le cas contraire, les opérations de 3 à 5 sont répétées.

Après l'application de l'algorithme, les caractéristiques des formes d'ondes de chaque type de classe sont utilisées pour dégager les significations physiques de chaque classe.

### 3.5. Faisabilité de l'étude

Des travaux préliminaires sont réalisés pour démontrer la faisabilité d'incorporer des capteurs dans les matériaux composites. Une pastille métallique sous forme de disque, ayant différentes tailles (Tab. 3.2), est implantée dans le matériau stratifié unidirectionnel [0]<sub>24</sub>. Elle est placée approximativement au tiers de la longueur de l'éprouvette à partir du bord (Fig. 3.8), dans le plan neutre entre les plis. Les éprouvettes fabriquées ont pour dimensions : une longueur  $L = 150$  mm, une largeur  $l$  de 20 mm et 30 mm et une épaisseur  $e = 8$  mm. Ces échantillons sont testés en flexion trois-points en statique jusqu'à la rupture avec une vitesse de déplacement de 2 mm/mn.

Tableau 3.2. Dimensions des pastilles métalliques implantées au sein du matériau

Pastille métallique	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Diamètre (mm)	-	5		10	14	
Epaisseur (mm)	-	0,5	1	1	0,5	1

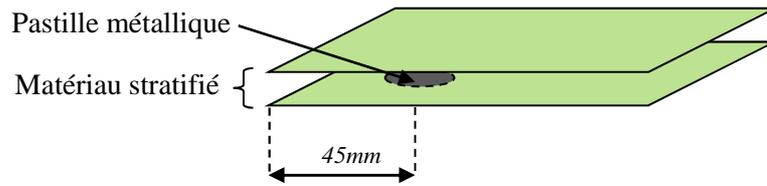


Figure 3.8. Eprouvette avec insert métallique dans la masse

Les figures 3.9 représentent la variation de la charge en fonction du déplacement des éprouvettes de largeur 20 mm (Fig 3.9.a) et de largeur 30 mm (Fig 3.9.b), incorporées avec les pastilles métalliques de différentes tailles. Elles comparent les résultats obtenus dans les composites avec et sans implantation de pastilles métalliques. Nous constatons que le comportement mécanique de l'ensemble des échantillons testés est linéaire jusqu'à la rupture qui est de type fragile. La charge et le déplacement à la rupture diminuent lorsque la taille de la pastille augmente. Cette diminution est beaucoup plus importante dans le cas des éprouvettes à faible largeur (Fig 3.9.a). Une légère dégradation des propriétés statiques est constatée dans le cas des éprouvettes de largeur de 30 mm incorporées par des pastilles métalliques.

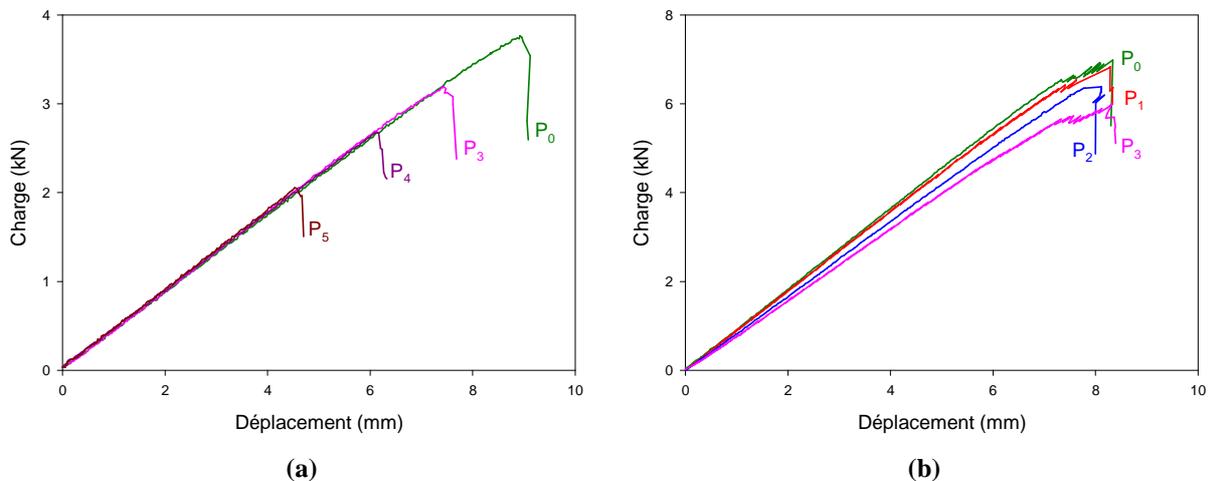


Figure 3.9. Courbes charge-déplacement déduites des essais de flexion trois-points sur les matériaux incorporés par des disques métalliques : a) Eprouvettes de largeur 20 mm et b) Eprouvettes de largeur 30 mm

Les tableaux 3.3 et 3.4 donnent les propriétés mécaniques obtenues dans les échantillons testés en statique. La rigidité des différents types de stratifiés avec et sans intégration est identique. Une dispersion est observée au niveau de la charge et le déplacement à la rupture. En effet, nous observons une diminution significative de 3,7 à 2 kN pour la charge et de 8,9 à 4,5 mm pour le déplacement dans le cas des éprouvettes avec une largeur de 20 mm. Pour cette raison, nous avons augmenté la largeur des échantillons de 20 à 30 mm et nous avons diminué les dimensions des pastilles implantées en utilisant des disques de dimensions plus

faibles ( $P_{1-3}$ ). Nous obtenons dans ce cas des résultats plus acceptables en termes de la charge à la rupture (entre 6 et 7 kN) et le déplacement à la rupture (de l'ordre de 8,3 mm).

En général, l'intégration de la pastille métallique dans le matériau influe en particulier sur la charge et le déplacement à la rupture qui diminuent en augmentant la taille du disque. Il est donc nécessaire que les éléments incorporés dans le matériau soient de plus petite taille afin de réduire leur influence sur le comportement mécanique de la structure. Notons également que l'influence de l'épaisseur de la pastille est plus important que le diamètre. Dans la suite du chapitre nous utilisons des échantillons de 30 mm de largeur avec des capteurs piézoélectriques implantés dont les dimensions sont données dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.3. Caractéristiques mécaniques déduites des essais statiques sur des éprouvettes de largeur 20 mm**

Stratifié	$P_0$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
Charge à la rupture (kN)	3,7	3,2	2,7	2
Déplacement à la rupture (mm)	8,9	7,4	6,2	4,5
Rigidité (kN/mm)	0,4	0,4	0,4	0,4

**Tableau 3.4. Caractéristiques mécaniques déduites des essais statiques sur des éprouvettes de largeur 30 mm**

Stratifié	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Charge à la rupture (kN)	7	6,8	6,4	6
Déplacement à la rupture (mm)	8,3	8,3	8,1	8,3
Rigidité (kN/mm)	0,9	0,9	0,9	0,9

### 3.6. Résultats des essais de flexion appliqués aux matériaux unidirectionnels intégrés par capteur piézoélectrique

#### 3.6.1. Résultats des essais statiques

##### 3.6.1.1. Comportement mécanique

Les résultats des essais statiques sur les matériaux stratifiés unidirectionnels sont reportés dans la figure 3.10-a. Cette figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour les trois types de matériaux: matériau sans capteur intégré (NI), matériau instrumenté avec le petit capteur (IP) et matériau instrumenté avec le grand capteur (IG). La figure montre que le comportement mécanique des trois types d'éprouvettes est similaire. Les courbes charge-déplacement font apparaître d'abord un comportement linéaire des poutres

jusqu'à des charges assez élevées, puis un comportement non linéaire jusqu'à une charge maximale. La charge décroît ensuite progressivement, lorsque le déplacement augmente, jusqu'au moment où une chute assez rapide de la charge se produit. Du point de vue endommagement, nous avons observé des ruptures de fibres suivies de la rupture induite dans la face au contact de l'appui central. Le tableau 3.5 représente les caractéristiques mécaniques obtenus dans les essais de flexion 3-points en statique pour l'ensemble des stratifiés. Nous observons que les valeurs des caractéristiques mécaniques de l'éprouvette intégrée avec le petit capteur (IP) sont du même ordre de grandeur que celles de l'éprouvette sans intégration (NI). Les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette intégrée avec le grand capteur (IG) sont légèrement inférieures. L'intégration des capteurs au sein des matériaux influe surtout sur la charge et le déplacement à la rupture qui diminuent lorsque la taille du capteur augmente. Alors que la valeur de la rigidité est identique pour l'ensemble des matériaux. La rupture des éprouvettes est observée loin du capteur comme le montre la figure 3.10-b.

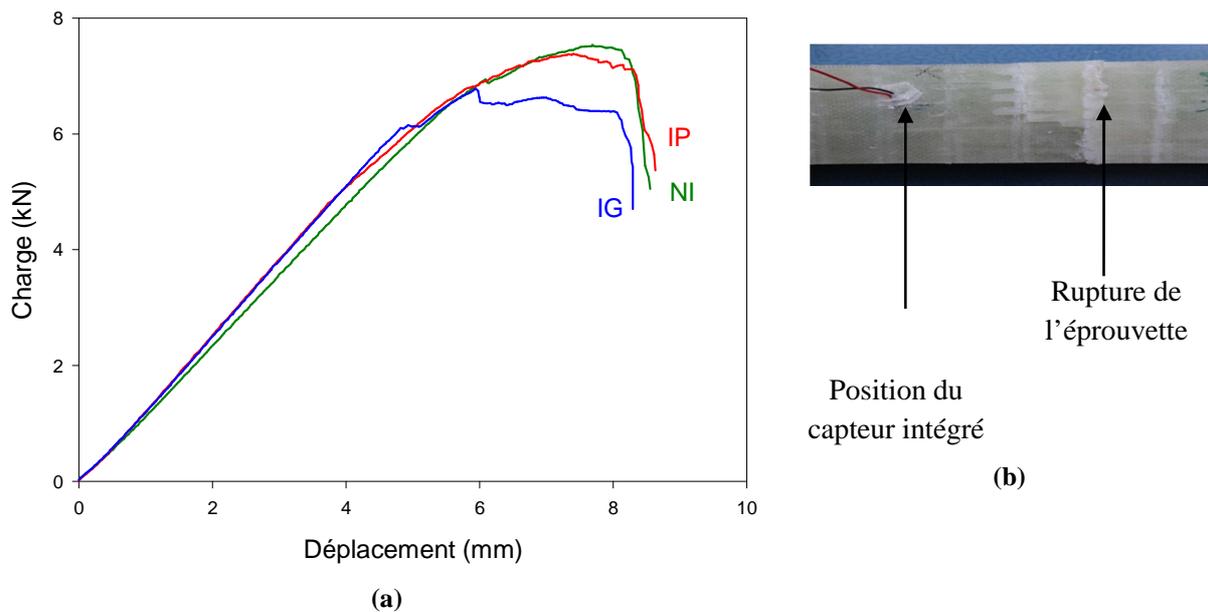


Figure 3.10. a) Courbes charge-déplacement déduites des essais de flexion statique sur les trois types de matériaux (NI), (IP) et (IG) et b) rupture d'une éprouvette avec capteur intégré

Tableau 3.5. Caractéristiques mécaniques des différentes éprouvettes unidirectionnelles sollicitées en statique en flexion 3-points

Stratifié	NI	IP	IG
Charge à la rupture (kN)	7,5	7,4	6,6
Déplacement à la rupture (mm)	7,7	7,4	7
Rigidité (kN/mm)	1,2	1,2	1,2

### 3.6.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Le traitement des signaux acoustiques est réalisé à l'aide du logiciel Noesis, en utilisant la méthode non supervisée des  $k$ -moyennes. Le nombre de classes est optimisé en prenant la valeur minimale du critère de Davies et Bouldin  $R_{DB}$  [45] par balayage de 2 à 5 classes. Par exemple, selon le facteur  $R_{DB}$ , le regroupement optimal est obtenu avec trois classes pour les matériaux NI et IP. Cela correspond à la valeur minimale du coefficient de Davies et Bouldin comme le montre la figure 3.11 (cas du matériau NI).

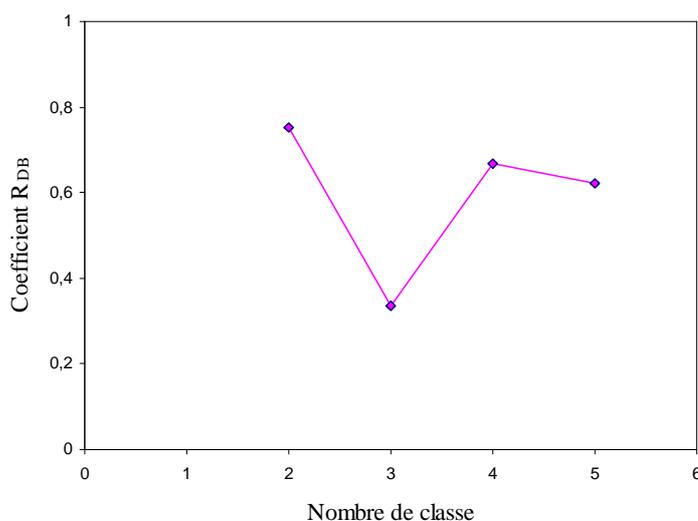


Figure 3.11. Critère de Davies et Bouldin en fonction du nombre de classes dans le cas d'une éprouvette sans capteur intégré (NI)

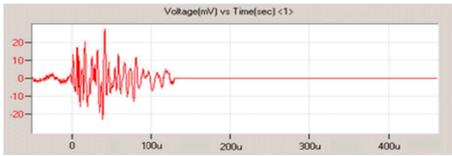
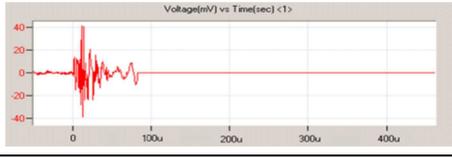
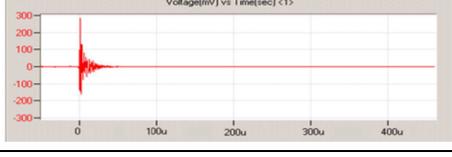
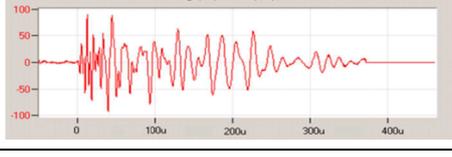
Afin de pouvoir associer chaque classe obtenue en sortie de l'algorithme de classification aux mécanismes d'endommagement du matériau stratifié à fibres de verre/résine époxyde, les caractéristiques des formes de chaque classe sont prises en compte [5,46,47]. Selon ces études, différents mécanismes d'endommagement sont identifiés: fissuration matricielle (caractérisé par les signaux du classe A), décohésion fibre-matrice (classe B), rupture des fibres (classe C) et le délaminage inter plis (classe D : observé pour les composites à plis croisés). L'étude des différents signaux collectés au cours des différents types d'essais a permis d'identifier la forme d'onde de chaque mécanisme d'endommagement dans les composites stratifiés (Tab. 3.6).

La signature acoustique de la fissuration matricielle (classe A) est caractérisée par une forme d'onde de durée moyenne, un temps de montée assez lent, une faible amplitude et une énergie relativement faible. Les signaux de la classe B sont caractérisés par des temps de montée assez courts et des amplitudes ainsi que des énergies plus élevées. Les signaux de la classe C ont une durée très courte. Ils sont aussi caractérisés par des temps de montée ainsi que des temps de décroissance relativement courts avec des amplitudes et des énergies assez

importantes. Pour les signaux de délaminage, la forme d'onde est caractérisée par une durée très longue, un temps de montée lent et elle est assez énergétique.

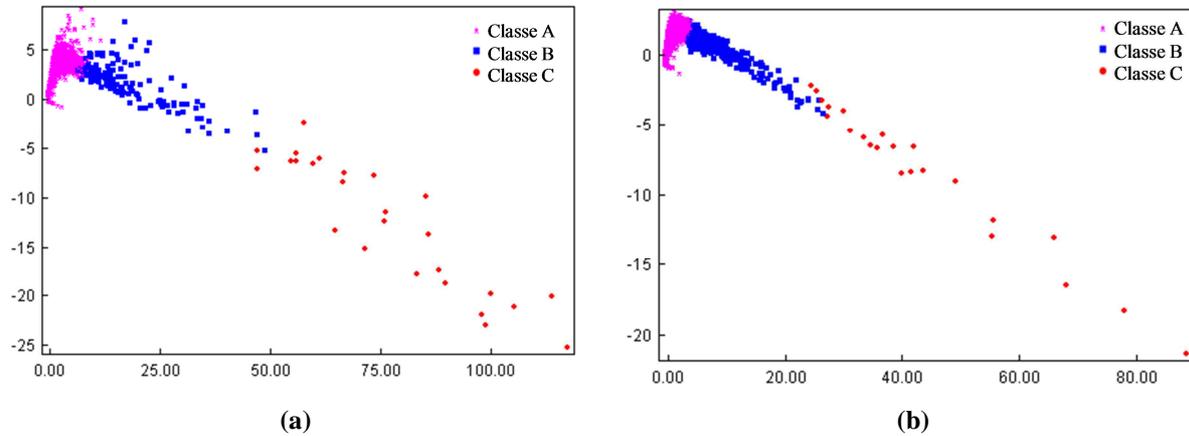
Ce classement est effectué afin d'identifier les salves acoustiques émises par les différents types d'endommagement et pour comparer l'évolution de ces différents mécanismes dans les matériaux étudiés au cours des essais.

**Tableau 3.6. Forme des signaux d'EA des mécanismes d'endommagement obtenus généralement pour les matériaux stratifiés**

Mécanisme d'endommagement	Forme du signale
Fissuration de la matrice (classe A)	
Décohésion fibre-matrice (classe B)	
Rupture de fibres (classe C)	
Délaminage (classe D)	

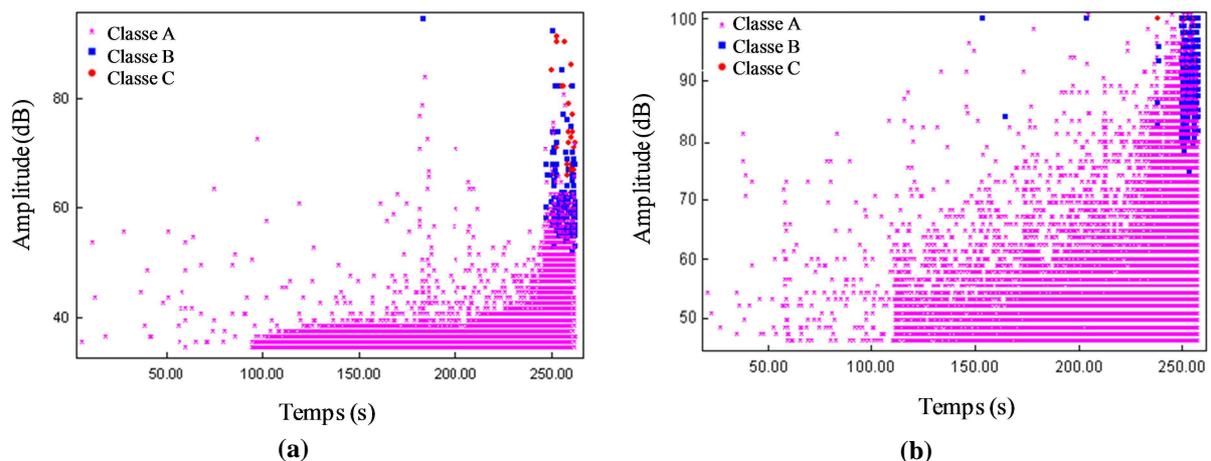
Dans la suite de ce chapitre, seuls les résultats des éprouvettes sans capteur intégré (NI) et avec le petite capteur (IP) sont présentés. Les figures 3.12 à 3.14 représentent respectivement une Analyse en Composantes Principales (ACP), la distribution d'amplitude en fonction du temps et la chronologie d'appariation des mécanismes d'endommagement identifiés. Ces figures illustrent une comparaison de la classification des signaux d'EA pour les deux types de composites unidirectionnels avec et sans capteur intégré (IP et NI), sollicités en flexion statique. Pour les deux matériaux étudiés, la classification des signaux d'EA met en évidence la présence de trois classes. La première classe obtenue contient des signaux dont l'amplitude est comprise entre 42 et 65 dB. Ces signaux proviennent des microfissurations matricielles (signaux de type A). La deuxième classe contient des signaux d'amplitude comprise entre 55 et 85 dB. Ces signaux qui apparaissent juste après les microfissurations de la matrice, sont probablement issus des décohésions des interfaces fibres/résine (signaux de type B). La dernière classe (type C) contient des signaux très énergétiques avec des amplitudes au-dessus de 85 dB. Ces signaux se réfèrent à la rupture des fibres.

L'Analyse en Composantes Principales (Fig. 3.12) est réalisée afin de visualiser les résultats de la classification des signaux dans un sous-espace à deux dimensions. Cette représentation montre que la plupart des signaux sont concentrés et met en évidence la présence de trois classes qui sont bien identifiés.



**Figure 3.12. Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode des k-moyennes pour les matériaux unidirectionnels testés en flexion statique: a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)**

Durant ces essais, la charge est portée jusqu'à la rupture, de sorte que la progression de l'endommagement dépend de l'augmentation du niveau de la contrainte appliquée. On remarque que l'activité acoustique des éprouvettes se situe principalement autour des amplitudes 40 et 65 dB, durant les 3/4 de l'essai (Fig. 3.13). En fin d'essais, la distribution d'amplitude devient très importante et atteint les 100 dB. Dans le cas du matériau intégré (IP), les événements de haute amplitude ont commencé plus tôt que dans le matériau non intégré (NI), à peu près à mi-parcours au milieu du test (Fig. 3.13-b).



**Figure 3.13. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps au cours des essais de flexion en statique pour les matériaux unidirectionnels : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)**

Une fois les modèles sont achevés en termes de mécanismes d'endommagement, le temps d'apparition de chaque événement acoustique est stocké. Il est possible donc de tracer la chronologie d'apparition des événements fournis par les différents mécanismes d'endommagement (Fig. 3.14). Pour les deux type d'éprouvettes, la fissuration de la matrice (classe A) est le mécanisme d'endommagement le plus dominant. Elle commence dès le début de l'essai et se propage jusqu'à la rupture du matériau. Le détachement des fibres de la matrice ou décohésion (classe B) constituant le site privilégié de l'initiation de l'endommagement, apparaît approximativement au milieu de l'essai. La rupture de fibres (classe C) apparaît à la fin de l'essai. Il est à noter que le nombre de salves dans le cas du matériau IP est plus élevé que celui observé pour le matériau NI.

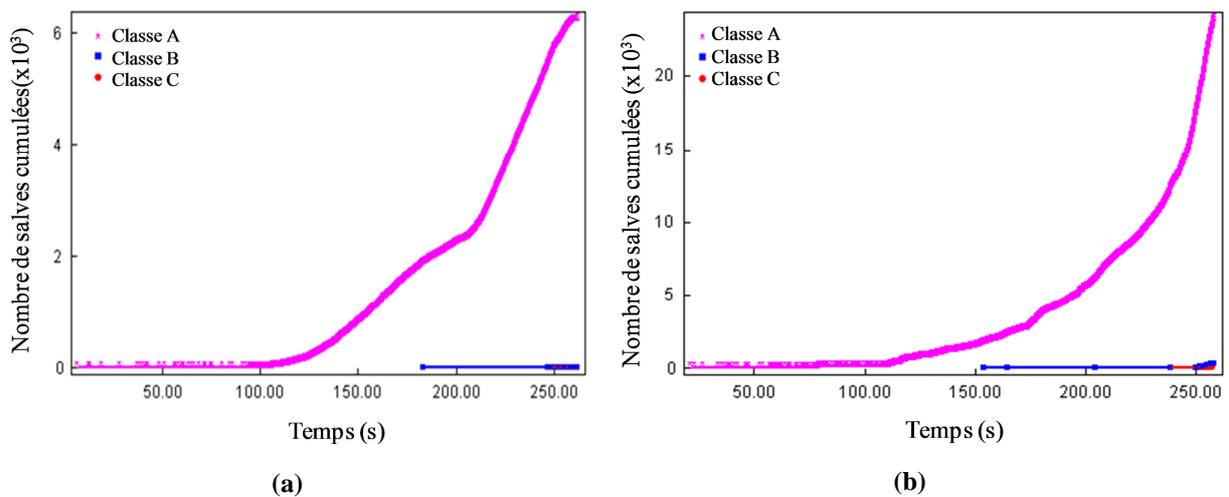


Figure 3.14. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion en statique pour les matériaux unidirectionnels : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 3.6.1.3. Observation du capteur implanté dans le matériau après rupture

L'observation par microscope optique d'une éprouvette stratifiée intégrée après un essai de flexion 3-point en statique est présentée dans la figure 3.15. Cette éprouvette est coupée transversalement au niveau du capteur implanté. Cette observation montre que le capteur piézoélectrique est bien enrobé de résine et qu'il n'a pas de cavité vide qui peut constituer une zone privilégiée d'initiation de microfissuration.

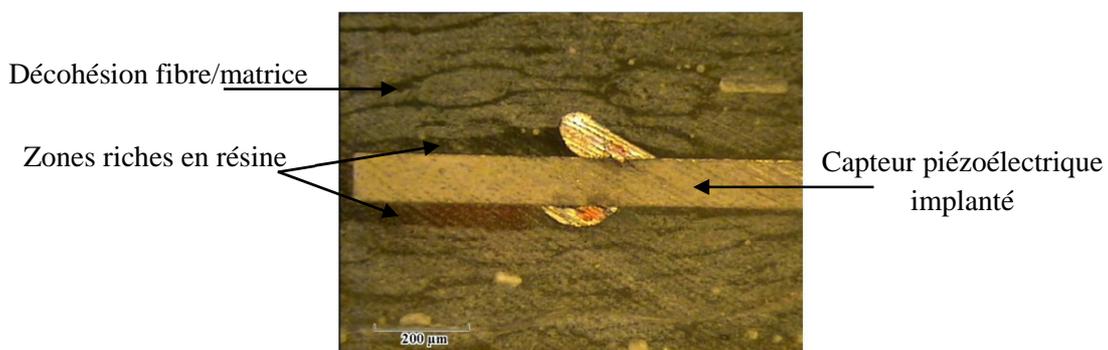


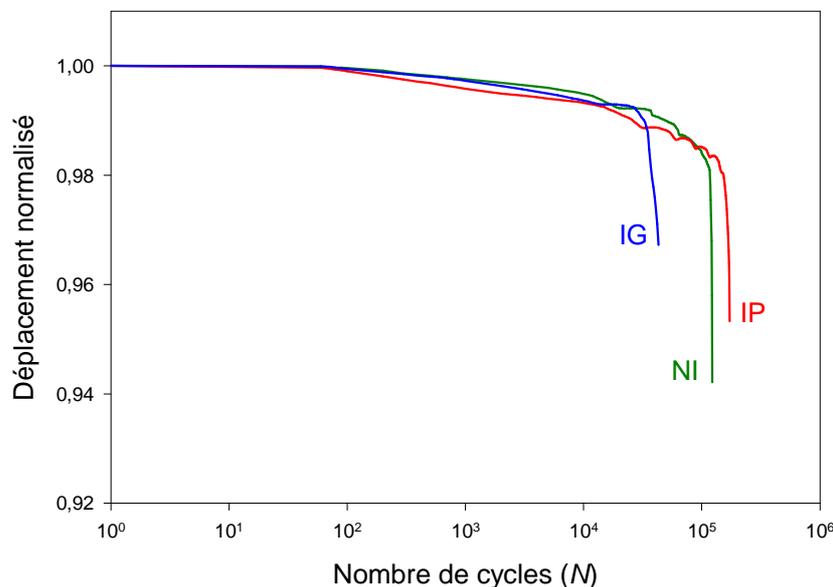
Figure 3.15. Micrographie obtenue par microscope optique de la section transversale autour du capteur piézoélectrique implanté dans une éprouvette stratifiée testée en flexion 3-point après rupture

### 3.6.2. Résultats des essais de fatigue cyclique

Le phénomène de fatigue cyclique du matériau se caractérise par sa rupture après l'application d'un grand nombre de cycle de chargement dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture statique du matériau. Ce phénomène est rencontré fréquemment dans de nombreux domaines industriels qui mettent en jeu des sollicitations cycliques, des sollicitations par vibration, etc.

#### 3.6.2.1. Comportement mécanique

Au cours des essais de fatigue cyclique, effectués avec une charge sinusoïdale égale à  $5 \pm 0,7$  kN avec une fréquence de 5 Hz, nous avons enregistré l'évolution du déplacement maximum  $d_{max}$  en fonction du nombre de cycles. Cette évolution constitue l'une des méthodes les plus utilisées pour suivre la progression de l'endommagement par fatigue des composites. Dans la figure 3.16, nous avons représenté l'évolution de la rigidité (mesurée par le rapport  $d_{0max}/d_{max}$  où  $d_{0max}$  représente le déplacement maximum au cours du premier cycle) en fonction du nombre de cycles pour les trois types de matériaux unidirectionnels testés en fatigue. L'ensemble des éprouvettes testées ont rompus avant 1 million de cycles.



*Figure 3.16. Evolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles au cours des essais de flexion en fatigue pour les trois types d'éprouvettes unidirectionnelles NI, IP et IG*

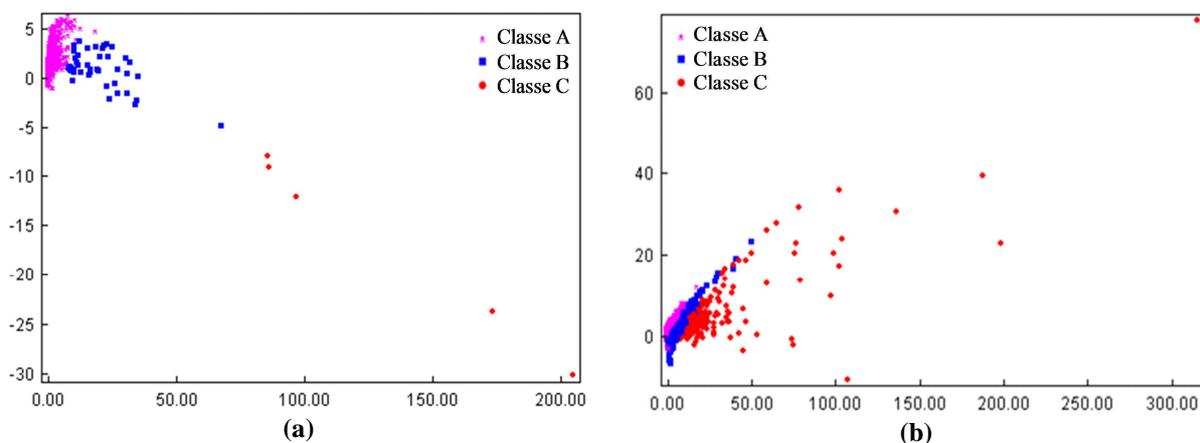
L'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles pour les trois types de matériaux se fait d'une manière similaire. Pour l'ensemble des matériaux, la perte de rigidité jusqu'à la rupture des éprouvettes se déroule en trois phases:

- Dans la première phase se manifeste une diminution très rapide dès les premiers cycles, correspondant à 20% de la durée de vie des éprouvettes,
- Dans la deuxième phase, la diminution devient ensuite progressive correspondant à 80% de la durée de vie des éprouvettes,
- Dans la troisième phase, qui est courte, la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture des éprouvettes.

L'analyse des résultats montre aussi que la durée de vie de l'éprouvette a diminué avec l'implantation du grand capteur alors que l'éprouvette avec le petit capteur intégré a une durée de vie du même ordre de grandeur que celle de l'éprouvette sans capteur intégré.

### 3.6.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

De la même manière que dans le cas des essais statique, la classification des signaux d'EA recueillis au cours des essais de fatigue sont reportés dans les figures 3.17 à 3.19. L'analyse de ces figures permet d'identifier trois classes qui correspondent à trois types d'endommagement (classe A, B et C). La répartition de ces classes ainsi que leurs densités sont différentes (Fig. 3.17).



**Figure 3.17. Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode des k-moyennes pour les matériaux unidirectionnels testés en flexion en fatigue: a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)**

Pour les deux types de matériaux, l'activité acoustique au cours des essais de fatigue est divisée en trois phases (Fig. 3.18): dans la première phase, l'activité acoustique est très importante dès les premiers cycles. Cette phase présente l'initiation et la propagation des microfissures. Dans la deuxième phase, on observe une diminution de l'activité acoustique due à la propagation stable au cours de la fatigue des microfissures. Cette partie couvre approximativement toute la durée de vie du matériau. Enfin, dans la dernière phase qui est très courte, l'activité acoustique redevient très importante. Cette phase correspond à la propagation

rapide des microfissures. Les fissures deviennent plus localisées entraînant la rupture des fibres et par la suite la rupture totale du matériau.

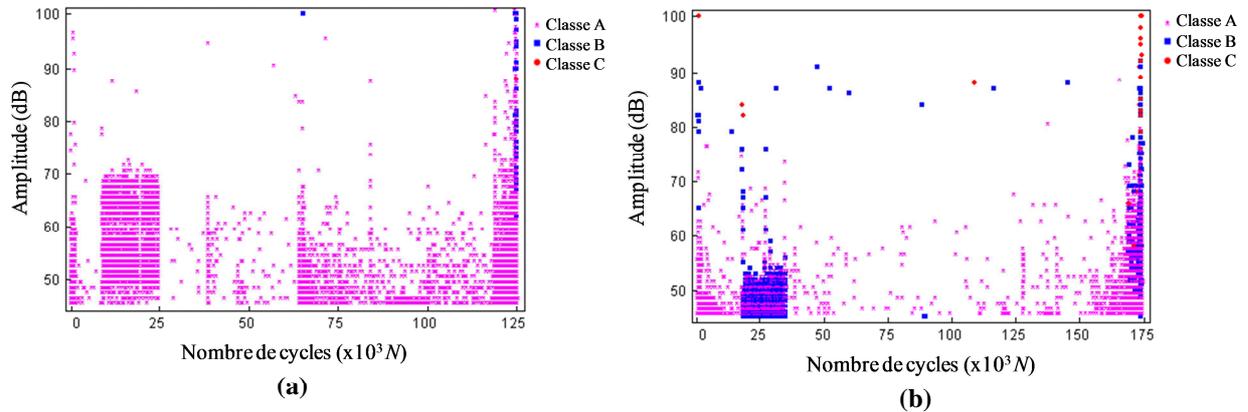


Figure 3.18. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du nombre de cycles au cours des essais de flexion en fatigue pour les matériaux unidirectionnels : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

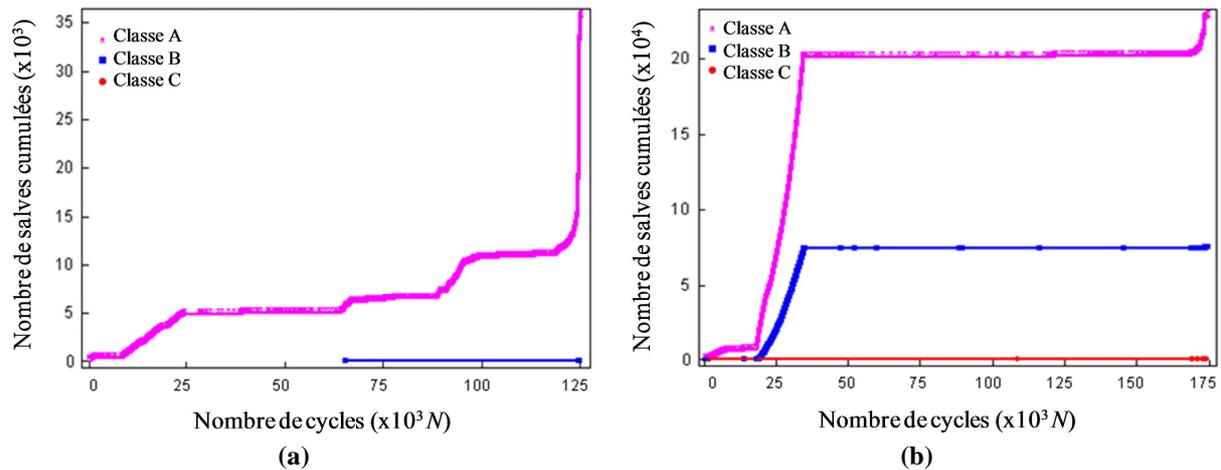


Figure 3.19. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion en fatigue pour les matériaux unidirectionnels : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec petit capteur (IP)

Dans le cas du matériau intégré (Fig. 3.19-b), la fissuration matricielle (classe A) est quasiment accompagnée dès le début de la décohésion (classe B) et de la rupture de fibre (classe C); ce qui n'est pas le cas pour le matériau non intégré (NI) (Fig. 3.19-a). Cette concentration de l'activité acoustique est due à la concentration de contraintes dès le début de l'essai de fatigue. Ces mécanismes se propagent ensuite durant l'essai, provoquant à la fin la rupture des composites. La chronologie d'apparition des différents mécanismes d'endommagement expliquent clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein du composite. Cet avantage réside par le fait que la détection des modes d'endommagement précoces dont leurs emplacements chronologiques n'étaient pas détectés par les capteurs collés à la surface (Fig. 3.19-a), faisant ainsi révéler les performances du

composite instrumenté vis-à-vis de sa réponse envers l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques.

La comparaison de l'activité acoustique dans les deux types de matériaux montre que cette activité est beaucoup plus intense dans les échantillons intégrés que dans les échantillons sans capteur intégré (de  $3,5 \cdot 10^4$  à  $25 \cdot 10^4$  salves acoustiques).

### 3.6.3. Résultats des essais de fluage

#### 3.6.3.1. Comportement mécanique

Le fluage traduit la capacité de certains matériaux à se déformer au cours du temps sous l'action d'une contrainte mécanique constante à une température constante. En fluage, la contrainte est inférieure à la résistance mécanique du matériau, de sorte que la rupture ne se produit pas lors de l'application de la charge. On doit attendre un temps suffisamment long pour que la déformation cumulative puisse finalement aboutir à une rupture catastrophique.

Les essais de fluage sont effectués sur des éprouvettes identiques à celles testées en statique avec une charge constante égale à 5 kN ( $\approx 70\%$  de la charge à la rupture en statique). Une étude comparative des composites avec et sans capteurs piézoélectriques intégrés est donnée sur la figure 3.20. Cette figure représente la variation du déplacement en fonction du temps de fluage pour les trois matériaux (NI, IP et IG). Le déplacement est rapporté à la valeur du déplacement initial mesuré à  $t=0$  (début du fluage).

Les résultats obtenus montrent que les variations des déplacements en fonction du temps sont similaires mais avec des durées d'essais différentes. Les éprouvettes avec capteurs intégré IG et IP ont rompus au bout de 2h30mn et 3h respectivement, alors que la rupture n'a pas été atteinte au delà de 3h30mn dans le cas du matériau sans capteur intégré (NI). Dans le cas des éprouvettes intégrées (IP et IG), la rupture brutale des composites est atteinte après une forte perte de la rigidité (caractérisée par le rapport  $d_0/d$ ). Les résultats de ces essais montrent clairement le comportement viscoélastique des matériaux composites à base polymère. Pour les éprouvettes avec capteurs intégrée, l'évolution temporelle du déplacement se déroule en trois phases distinctes:

- **Phase I:** c'est une phase courte nommée fluage primaire. Dans cette zone, l'application de la charge à l'instant zéro provoque une déformation élastique instantanée,

- **Phase II:** dans cette phase, appelée fluage secondaire, la déformation augmente progressivement en fonction du temps. Cette zone est très étendue dans le temps et représente la partie dominante durant tout l'essai de fluage,
- **Phase III:** cette phase finale, nommée fluage tertiaire, est caractérisée par une accélération brutale et continue du taux de déformation. Elle est associée aux microfissures plus actives jusqu'à la rupture totale du matériau.

Il est à noter que l'incorporation du capteur au sein du composite entraîne une dégradation significative des propriétés mécaniques ainsi qu'une réduction de la durée de vie du matériau qui dépend de la taille du capteur.

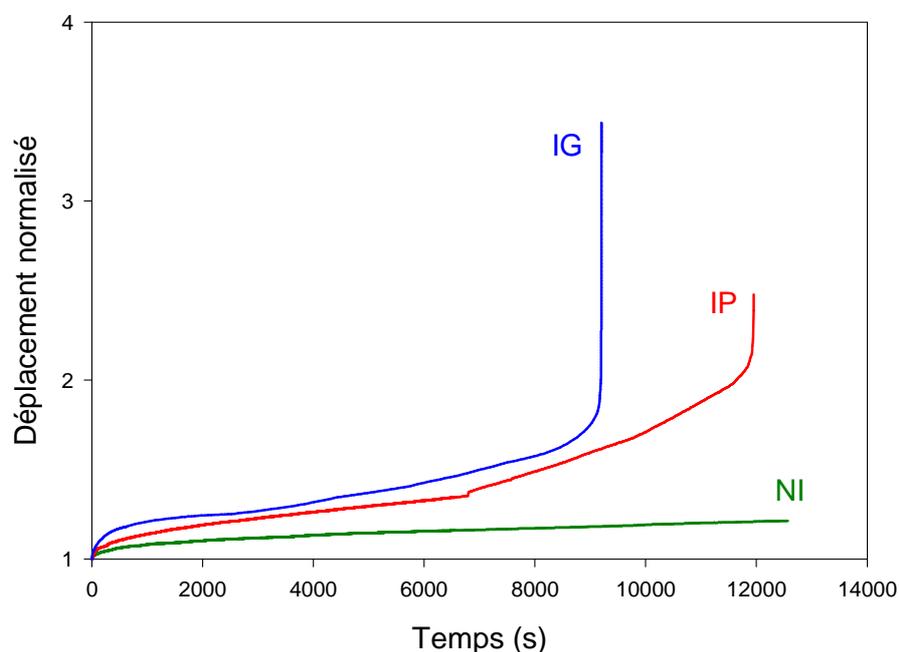


Figure 3.20. Evolution du déplacement en fonction du temps au cours des essais de flexion en fluage pour les trois types d'éprouvettes unidirectionnelles NI, IP et IG

### 3.6.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

L'analyse statistique multi-variable des données d'EA, obtenues au cours des essais de fluage sur les matériaux unidirectionnels avec et sans capteur intégré (IP et NI), est représentée dans les figures 3.21 à 3.23. Ces figures donnent l'ACP (Fig. 3.21), la distribution de l'amplitude en fonction du temps (Fig. 3.22) et la chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement (Fig. 3.23).

Comme précédemment, dans le cas des essais de fluage, nous avons observé là aussi la présence de trois modes d'endommagement (Fig. 3.21).

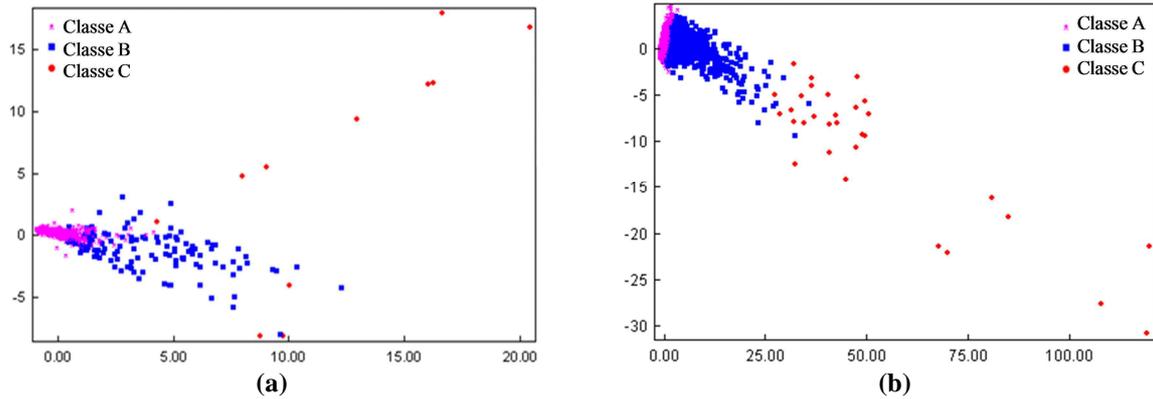


Figure 3.21. Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode des k-moyennes pour les matériaux unidirectionnels testés en fluage: a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

Généralement, la répartition de l'activité acoustique obtenue au cours d'un essai de fluage en flexion trois-points se déroule en trois phases, ce qui est le cas pour le matériau intégré (IP) qui a rompu au cours de l'essai (Fig. 3.22-b):

- Dans la première phase, l'activité acoustique est très importante dès le début de l'essai. Cette activité correspond à l'initiation et la multiplication des microfissurations au sein de l'éprouvette. L'amplitude de ces signaux est comprise entre 40 et 100 dB.
- Dans la deuxième phase, nous observons une diminution de l'activité acoustique. Cette phase est due à la propagation de la microfissuration et correspond à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette.
- Enfin dans la dernière phase, l'activité acoustique redevient très importante et très énergétique, et l'amplitude atteint pour quelques salves les 100dB. Cette phase, très courte, correspond à la propagation rapide de la fissuration qui devient plus localisée, entraînant ainsi la rupture de l'éprouvette. L'activité acoustique de cette phase engendre des signaux couvrants toutes les gammes d'amplitudes, correspondant visiblement aux trois mécanismes d'endommagement (classes A, B et C).

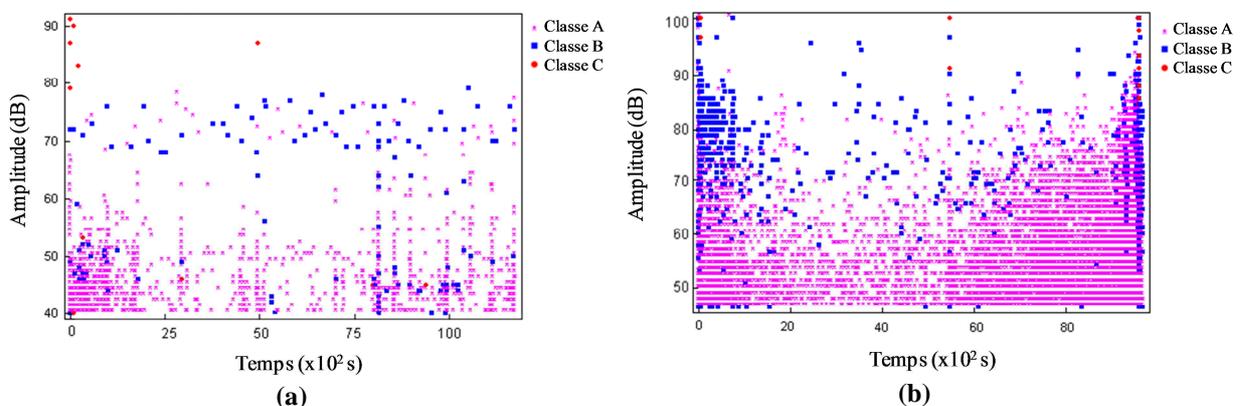


Figure 3.22. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps au cours des essais de fluage pour les matériaux unidirectionnels : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

La synthèse de ces résultats montre que la fissuration de la matrice (classe A) est le mécanisme d'endommagement le plus dominant dans les deux type de composites. Elle débute dès l'application de la contrainte mécanique. La décohésion fibre/matrice apparaît aussi au début des essais et leur nombre augmente progressivement pendant les essais (Fig. 3.23). Comparés aux mécanismes précédents, la rupture des fibres représente, cependant, un pourcentage très faible des évènements d'EA et n'apparaît principalement qu'au début et en fin des essais (cas du matériau intégré IP). Les essais de fluage ont montré que les évènements acoustiques de l'éprouvette instrumentée sont beaucoup plus nombreux que ceux de l'éprouvette non instrumentée (Fig.3.23).

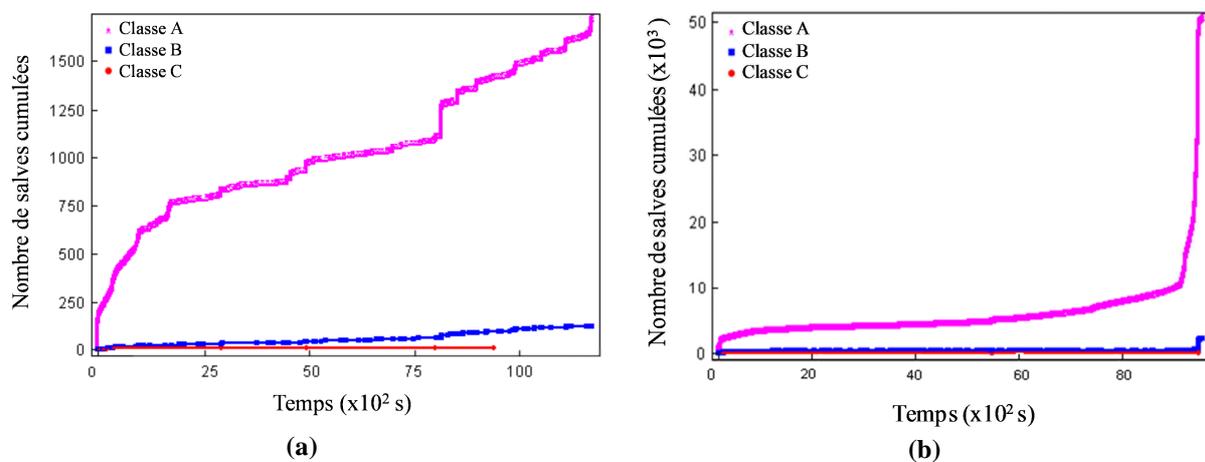


Figure 3.23. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de fluage pour les matériaux unidirectionnels : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI), b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 3.7. Résultats des essais de flexion appliqués aux composites stratifiés croisés intégrés par capteur piézoélectrique

#### 3.7.1. Résultats des essais statiques

##### 3.7.1.1. Comportement mécanique

Comme dans le cas des matériaux stratifiés unidirectionnels, trois types d'échantillons à plis croisés sont étudiés: matériau non instrumenté (NI), matériau instrumenté avec le petit capteur (IP) et matériau instrumenté avec le grand capteur (IG). Les résultats des essais de flexion trois-points en statique sur les matériaux stratifiés à plis croisés sont reportés sur la figure 3.24. Cette figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour les trois matériaux. Elle montre que le comportement des trois types d'éprouvettes est similaire. Ces courbes font apparaître d'abord un comportement linéaire des poutres jusqu'à des charges assez élevées, puis un comportement non linéaire jusqu'à une charge maximale. La charge décroît ensuite progressivement, lorsque le déplacement augmente, jusqu'au

moment où une chute assez rapide de la charge se produit. Du point de vue endommagement, nous avons observé de la fissuration des couches orientées à 90°, du délaminage entre les couches à 0° et à 90° et enfin des ruptures de fibres suivies de la rupture induite dans la peau au contact de l'appui central (Fig. 3.24-b). L'éprouvette intégrée avec un grand capteur IG a rompu avant les deux autres.

Dans le tableau 3.7 sont reportées les caractéristiques mécaniques statiques obtenus en flexion 3-points pour l'ensemble des stratifiés croisés. Nous observons que la valeur de charge à la rupture de l'éprouvette intégrée avec le petit capteur (IP) est légèrement inférieure à celle de l'éprouvette sans intégration (de l'ordre de 8%), alors que les valeurs de la rigidité et du déplacement à la rupture ont légèrement augmentées. Les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette intégrée avec le grand capteur (IG) sont inférieures à celles des autres éprouvettes. L'intégration des capteurs au sein des matériaux composites croisés influe surtout sur la charge et le déplacement à la rupture qui diminuent lorsque la taille du capteur augmente. La valeur de la rigidité a diminué de 18% entre le matériau sans intégration de capteur et celui intégré avec un grand capteur.

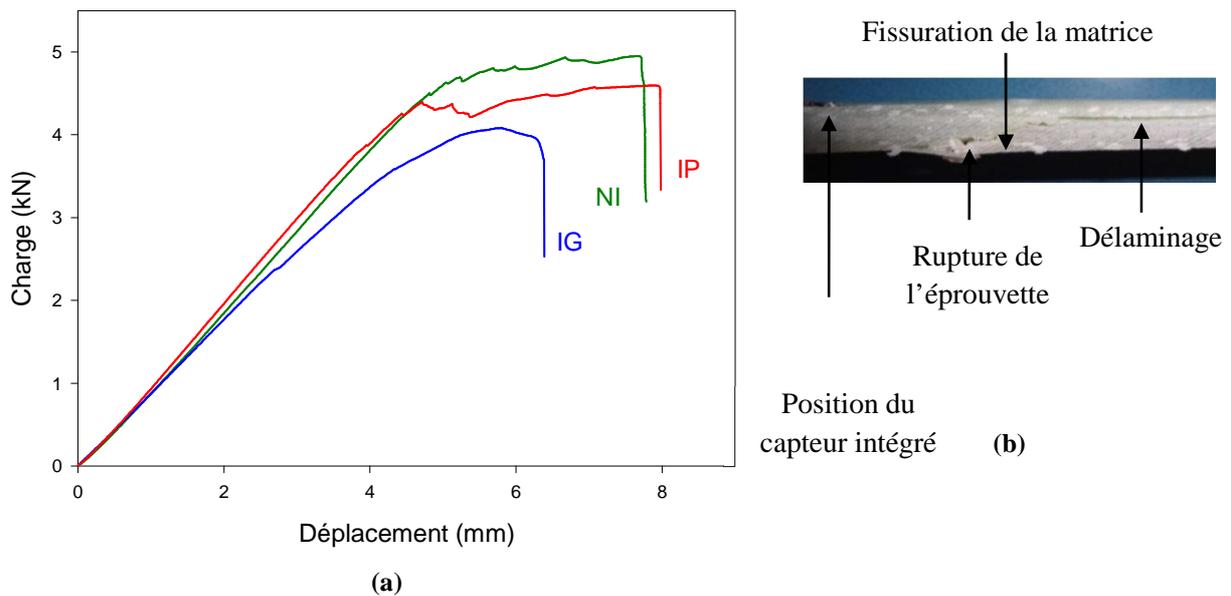


Figure 3.24. a) Courbes charge-déplacement déduites des essais de flexion statique pour les trois types d'éprouvettes croisées NI, IP et IG et b) Rupture d'éprouvette croisée intégrée par un essai de flexion

Tableau 3.7. Caractéristiques mécaniques des différents types d'éprouvettes en stratifiés croisés

Stratifié	NI	IP	IG
Charge à la rupture (kN)	5	4,6	4,1
Déplacement à la rupture (mm)	7,6	7,8	6,2
Rigidité (kN/mm)	0,9	0,96	0,9

### 3.7.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Dans cette partie, seuls les résultats de l'éprouvette sans capteur intégré (NI) et de l'éprouvette intégrée avec le petit capteur (IP) sont présentés. De la même façon que pour les matériaux unidirectionnels, les signaux acoustiques des stratifiés croisés sont analysés par la méthode de classification des  $k$ -moyennes. Les figures 3.25 à 3.27 donnent une comparaison des résultats de l'activité acoustique obtenue en flexion statique.

En plus des trois modes déjà étudiés dans le cas des matériaux unidirectionnels (fissuration matricielle (classe A), décohésion (classe B), rupture des fibres (classe C)), la classification des signaux acoustiques des matériaux croisés a mis en évidence la présence d'un quatrième mode d'endommagement de forme d'onde différente des autres, comme le montre l'analyse par ACP figure 3.25. Ce mode est le délaminage entre les couches  $0^\circ$  et  $90^\circ$  représenté par la classe D. Cette quatrième classe obtenue contient des signaux un peu plus énergétiques avec des amplitudes comprises entre 75 et 95 dB dans le cas du matériau NI et de 90 à 100 dB dans le cas du matériau IP (Fig. 3.26).

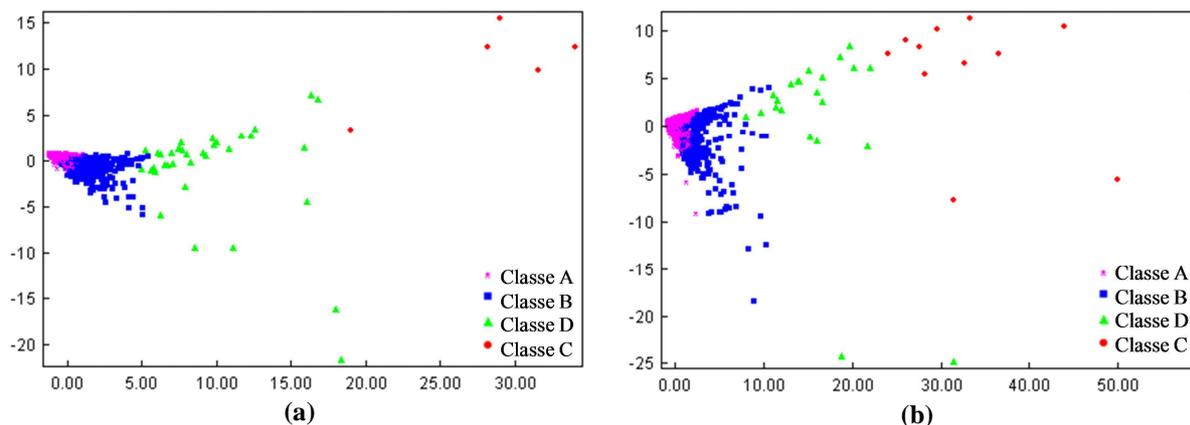


Figure 3.25. Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode des  $k$ -moyennes pour les matériaux croisés testés en flexion statique: a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

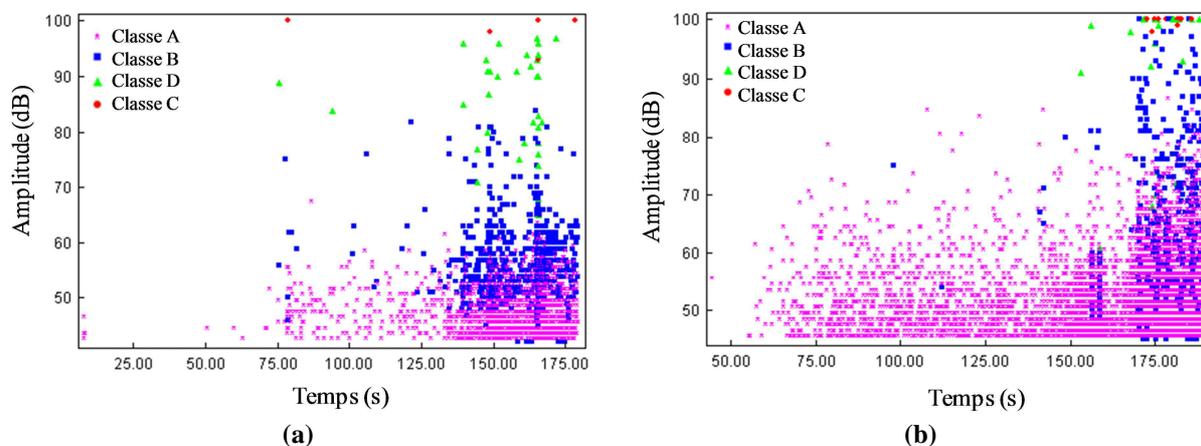


Figure 3.26. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps au cours des essais de flexion en statique pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

Les résultats présentés dans la figure 3.27 montrent que la fissuration transverse de la matrice (classe A) est le premier mode d'endommagement qui apparaît au début de l'essai dans les deux stratifiés, sa propagation est sa multiplication se prolongent jusqu'à la rupture des éprouvettes. La décohésion fibres/matrice (classe B) semble présenter le deuxième mode d'endommagement qui apparaît après la fissuration transverse et dont le nombre d'événements correspondant augmente continuellement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La décohésion est plus précoce et augmente rapidement dans le matériau stratifié avec capteur intégré (IP) que celui sans capteur intégré (NI). Le délaminage (classe D) et la rupture de fibres (classe C) apparaissent en même temps au milieu de l'essai et continuent à se propager et à se multiplier conduisant ainsi à la rupture des éprouvettes.

La comparaison des résultats obtenus dans les deux matériaux (sans et avec implant), permet de montrer que l'activité acoustique du matériau intégré est plus importante que le matériau non intégré, le nombre de salves cumulées est de  $3.3 \cdot 10^6$  dans NI alors qu'il est de  $8.5 \cdot 10^6$  dans PI.

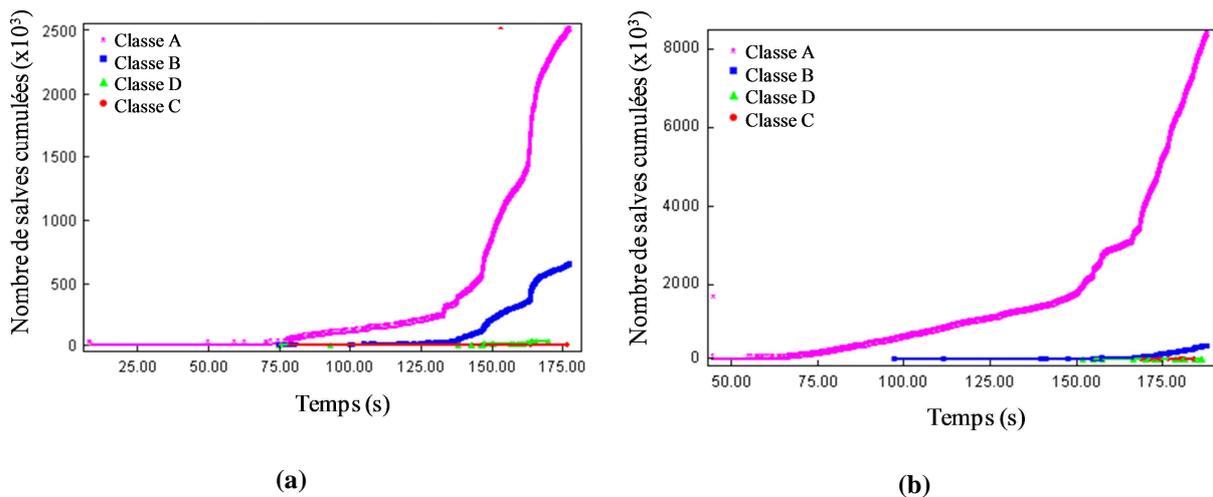


Figure 3.27. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion en statique pour les matériaux croisés: a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 3.7.2. Résultats des essais de fatigue cyclique

#### 3.7.2.1. Comportement mécanique

Les essais de fatigue cyclique sont effectués sur des éprouvettes identiques à celles testées en statique avec une charge maximale appliquée de 3 kN (elle représente 70% de la charge à rupture en statique) et une amplitude de 0.5 kN (elle représente 10% de la charge à la rupture en statique). L'évolution de la rigidité (caractérisée par le rapport  $d_{0max}/d_{max}$  où  $d_{0max}$

représente le déplacement maximum au cours du premier cycle) en fonction du nombre de cycles est présentée dans la figure 3.28 avec une échelle semi logarithmique.

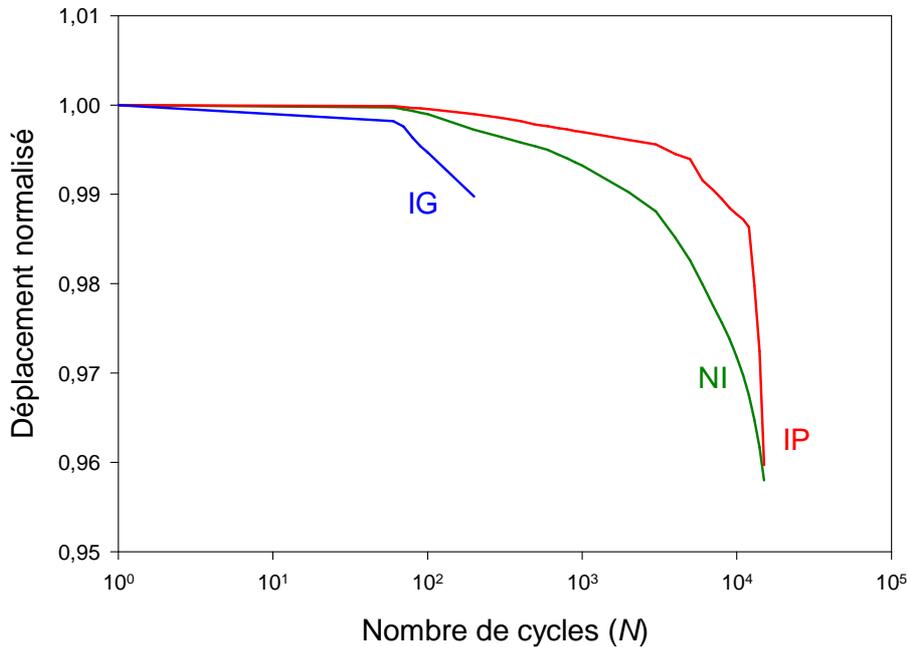
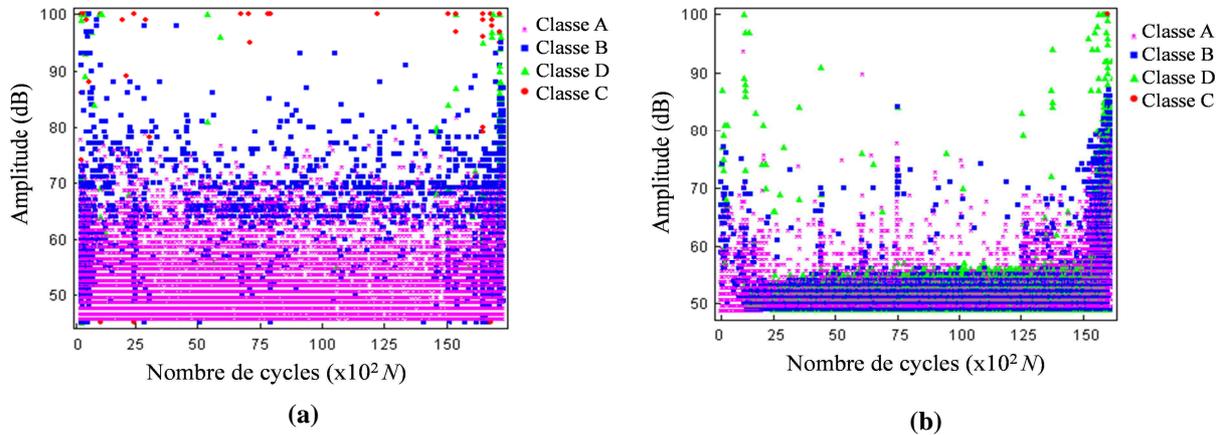


Figure 3.28. Evolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles au cours des essais de fatigue pour les trois type d'éprouvettes croisées NI, IP et IG

Les résultats obtenus montrent que toutes les éprouvettes testées ont rompu. La rupture brutale des trois composites s'est produite après une faible réduction de la rigidité qui est de l'ordre de 1%. Les éprouvettes sans capteur intégré (NI) et avec un petit capteur intégré (IP) ont pratiquement la même durée de vie qui est nettement supérieure à celle de l'éprouvette avec un grand capteur intégré (IG). Comme dans le cas des matériaux unidirectionnels, les résultats des stratifiés croisés montrent que la perte de rigidité jusqu'à la rupture des éprouvettes évolue en trois phases : une première phase se manifeste une diminution rapide dès les premiers cycles, correspondant à 20% de la durée de vie des éprouvettes ; suivi d'une deuxième phase, où la diminution devient progressive correspondant à 80% de la durée de vie des éprouvettes ; enfin une troisième phase, qui est très courte, où la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture des éprouvettes. Il est à noter aussi que dans le cas du matériau intégré avec un petit capteur (IP), la durée de vie du stratifié unidirectionnel est de l'ordre de  $17.10^4$  alors qu'elle n'est que de  $15.10^3$  dans le stratifié croisé.

### 3.7.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

De la même manière que dans le cas des essais statique, la classification des signaux d'EA recueillis au cours des essais de fatigue sont reportés dans les figures 3.29 et 3.30. Ces figures synthétisent les résultats obtenus.



**Figure 3.29.** Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du nombre de cycles au cours des essais de flexion en fatigue pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

L'analyse de ces résultats a permis d'identifier les différentes classes correspondant aux différents types d'endommagement. Dans les deux cas, la fissuration matricielle (classe A) est quasiment accompagnée dès le début par la décohésion fibre/matrice (classe B) qui constitue le site privilégié de l'initiation l'endommagement. Ces mécanismes d'endommagement se propagent ensuite le long des fibres sous forme de fissures intra-laminaires ou délaminage (classe D) et se développent dans les plis adjacents ou à l'interface de ces plis, provoquant avec la rupture des fibres, la rupture finale des matériaux.

L'augmentation du nombre de salves cumulés est de  $33.10^3$  à  $59.10^3$  des différents mécanismes d'endommagement entre le matériau sans intégration (NI) et celui intégré avec un petit capteur (IP) (Fig. 3.30), explique clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein du composite. Cet avantage réside dans le fait de la détection expérimentale des modes d'endommagement qui n'étaient pas détectés par les capteurs de surface (Fig. 3.30-a), faisant ainsi révéler les performances du composite instrumenté vis-à-vis sa réponse envers l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques.

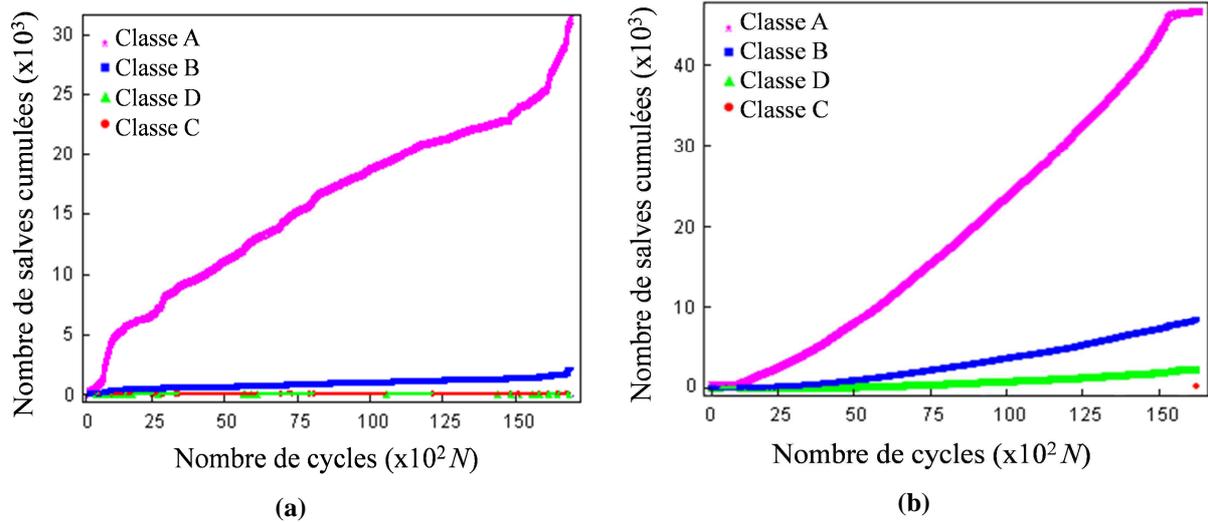


Figure 3.30. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion en fatigue pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 3.7.3. Résultats des essais de fluage

#### 3.7.3.1. Comportement mécanique

De la même façon que dans le cas des matériaux unidirectionnels, les composites stratifiés croisés sont testés en flexion trois-points en fluage. Ces essais sont effectués sur des éprouvettes identiques à celles testées en statique avec une charge égale à 3 kN ( $\approx 70\%$  de la charge à la rupture en statique). Dans la figure 3.31, nous avons présenté avec une échelle semi logarithmique, l'évolution du déplacement en fonction du temps de fluage, pour les trois types de matériaux croisés étudiés (NI, IP et IG). Le déplacement est rapporté au déplacement initial mesuré à  $t=0$ .

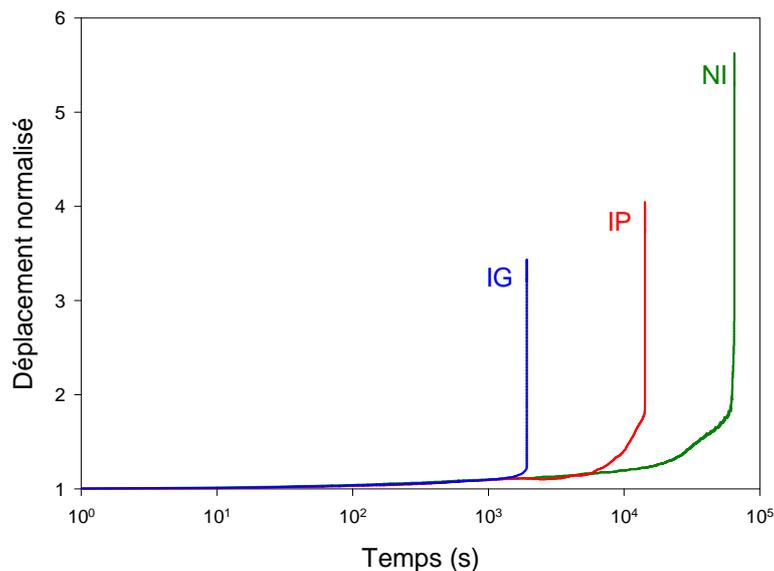


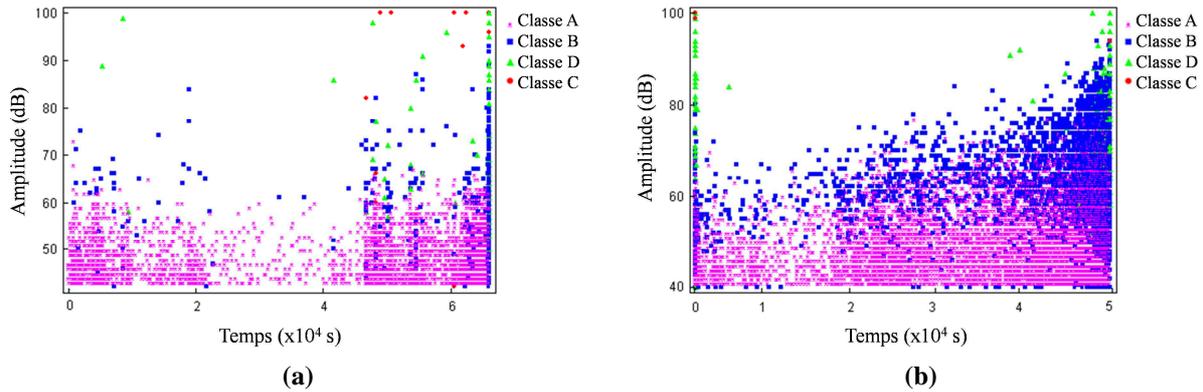
Figure 3.31. Evolution du déplacement en fonction du temps au cours des essais de fluage pour les trois types d'éprouvettes NI, IP et IG

L'étude comparative des trois matériaux montre que les éprouvettes avec capteur intégré ont des comportements similaires à celle de l'éprouvette sans capteur, avec une durée de vie plus courte. La durée de vie est beaucoup plus réduite dans le matériau avec le grand capteur que le matériau avec le petit capteur. Il est à noter que l'incorporation du capteur au sein du composite entraîne une dégradation significative de ses propriétés mécaniques dans le cas des essais de fluage. Ces essais manifestent très clairement le comportement viscoélastique des matériaux composites à base polymère. L'évolution du déplacement en fonction du temps se décompose en deux parties distinctes :

- **Zone I** : c'est une zone très étalée dans le temps. Elle est la plus dominante durant tout l'essai de fluage. Les mécanismes d'endommagement qui se produisent dans cette zone contrôlent le fluage.
- **Zone II** : c'est une zone de fluage accélérée, caractérisée par une accélération brutale et continue de la vitesse de déformation (courbe convexe vers le bas). Elle est associée à l'endommagement croissant allant jusqu'à la rupture du matériau.

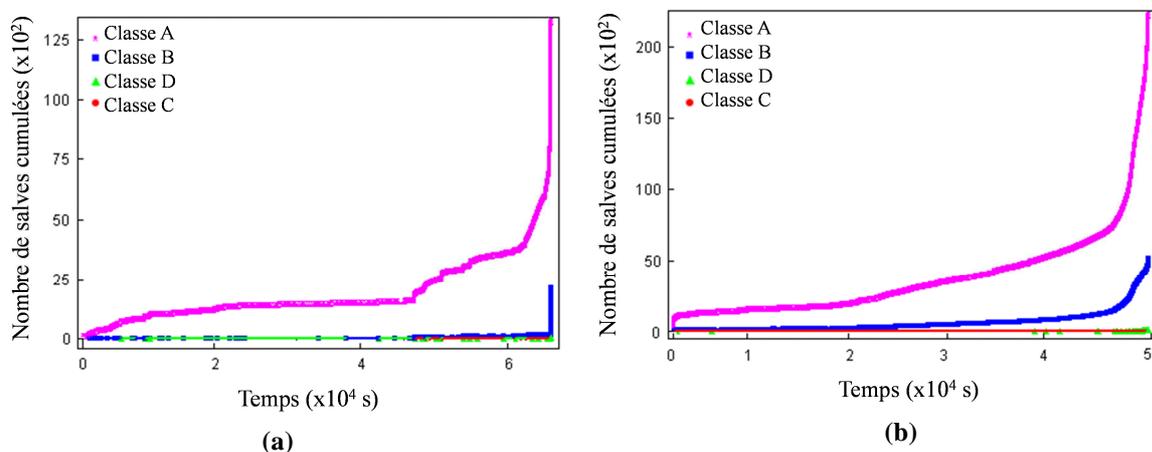
### 3.7.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Dans cette partie, les résultats de l'analyse statistique multi-variable des données de l'EA, obtenues au cours des essais de fluage des composites croisés avec et sans capteur intégré (IP et NI), sont reportés dans les figures 3.32 et 3.33. Ces figures donnent respectivement l'amplitude et le nombre de signaux collectés en fonction du temps. On constate que l'activité acoustique du matériau intégré est beaucoup plus intense que celle du matériau non intégré (Fig. 3.32). Pour les deux matériaux, la classification des différents salves acoustiques montre que la distribution de l'amplitude se déroule en trois phases: Dans la première phase, l'activité acoustique est très importante dès le début de l'essai, où l'amplitude des signaux est comprise entre 40 et 100 dB. Dans la deuxième phase, nous observons une diminution de cette activité qui correspond à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette. Et finalement dans la dernière phase, très courte, l'activité acoustique redevient très importante et très énergétique et l'amplitude atteint par fois les 100 dB. Cette phase correspond à la propagation rapide de la fissuration qui devient plus localisée entraînant ainsi la rupture de l'éprouvette.



**Figure 3.32.** Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps au cours des essais de flexion en fluage pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

Dans les essais de fluage, nous avons aussi observé la présence de quatre mécanismes d'endommagement dans les matériaux croisés. Les résultats montrent que les fissurations matricielles (classe A) est le type d'endommagement le plus prépondérant. Ces fissures débutent dès l'application de la contrainte mécanique et correspondent à beaucoup plus de salves que les autres mécanismes. Les fissurations matricielles sont quasiment accompagnées dès le début par des détachements des fibres de la matrice ou décohésions. Leurs nombres augmentent progressivement pendant les essais. Les délaminages ainsi que les ruptures des fibres représentent cependant un pourcentage plus faible des évènements d'EA.



**Figure 3.33.** Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion en fluage pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 3.8. Conclusions

Dans ce chapitre, l'effet de l'implant piézoélectrique sur des composites stratifiés est étudié sous chargement en flexion. La comparaison des résultats des différents types d'essais (statique, fluage et fatigue) sur trois type de matériaux (avec et sans intégration de capteur) nous amènent à conclure que l'incorporation de l'instrumentation au sein du composite

provoque une faible dégradation de ses propriétés mécaniques, si les dimensions du capteur sont très faibles par rapport à celles de la structure étudiée. D'une manière générale, dans les essais statique, nous avons remarqué que cette intégration influe surtout sur la charge et le déplacement à la rupture alors que la rigidité reste identique. Pour les essais en fatigue cyclique, les résultats montrent qu'un matériau intégré avec un petit capteur a pratiquement la même résistance à la fatigue qu'un matériau non intégré. Pour le fluage, l'incorporation du capteur au sein du composite entraîne une dégradation significative de ses propriétés mécaniques.

Pour le suivie de l'endommagement par EA, la comparaison des résultats montre que l'activité acoustique du matériau intégré est plus importante que celle du matériau non intégré. L'analyse et l'observation des signaux d'EA conduit à l'identification des signatures acoustiques des différents modes d'endommagement dominant dans les matériaux composites stratifiés unidirectionnels et croisés.

## **Chapitre 4 :**

# **Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Matériaux Composites Stratifiés en Traction**

## Résumé

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors des essais de traction en statique, en fatigue et en fluage effectués sur des composites stratifiés du type  $[0]_{12}$  et  $[0_3/90_3]_s$  avec et sans intégration de capteur d'EA. Deux tailles de capteur piézoélectrique (P et G) sont considérées dans le cas des matériaux instrumentés dans la masse. Une comparaison est tout d'abord menée en termes de comportement mécanique afin de voir l'impact de l'intégration sur l'intégrité des matériaux étudiés. Ensuite, une identification des signatures acoustiques de chaque mécanisme d'endommagement dans les deux types de matériaux (avec et sans intégration) est présentée. D'une manière générale, l'intégration du piézo-électrique dans les composites provoque une faible dégradation de ses propriétés mécanique. L'analyse et l'observation des signaux d'EA en fonction du type d'échantillon, ont permis de définir les principaux signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de matériau composite. Là aussi l'activité acoustique montre clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein du composite. Cet avantage réside dans le fait de la détection expérimentale des modes d'endommagement précoces et leur chronologie d'apparition, faisant ainsi révéler les performances du composite instrumenté vis-à-vis de sa réponse envers l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopique.

## 4.1. Introduction

Le type de test le plus utilisé pour mesurer les propriétés mécaniques d'un matériau est l'essai de traction. Dans la recherche, on applique ce type d'essai pour la caractérisation de nouveaux matériaux et pour fournir un modèle de base de l'information sur la résistance des matériaux : c'est un test de spécification des matériaux. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que la rigidité, la résistance à la traction et l'allongement après rupture.

L'étude de l'endommagement des matériaux intelligents et son évaluation non destructive par émission acoustique ne peuvent se faire sans l'étude préalable des matériaux en question depuis leur élaboration, au cours des sollicitations mécaniques appliquées durant leur cycle de vie et jusqu'à leur rupture finale. Dans ce chapitre nous proposons d'analyser le comportement en traction en statique, en fatigue et en fluage des composites stratifiés à fibres unidirectionnelles et à fibres croisées avec et sans instrumentation. Une comparaison sera menée tout d'abord en termes de comportement mécanique afin de voir l'impact de l'intégration sur l'intégrité des matériaux étudiés. Ensuite, une identification des signatures acoustiques de chaque mécanisme d'endommagement dans les deux types de matériaux (avec et sans intégration) est dirigée. Comme dans les essais de flexion, avant d'appliquer la méthode d'implant piézoélectrique aux matériaux étudiés, nous proposons de vérifier la faisabilité de l'implant des capteurs à l'intérieur d'un matériau composite et de contrôler l'effet de l'insertion d'un objet externe au sein du composite. Nous commençons notre étude par l'insertion de disques métalliques de différentes tailles dans le matériau. Ainsi, l'effet de la taille de la pastille métallique sur le comportement et sur les propriétés mécanique sera analysé en termes de comparaison avec les résultats obtenus dans des composites non instrumentés. Par la suite, nous proposons d'effectués des essais de traction sur des éprouvettes sans intégration qui seront désignées par NI et des éprouvettes avec capteurs piézoélectriques intégrés de différentes tailles qui seront désignées par IP (avec petit capteur) et IG (avec grand capteur). Les essais seront menés en statique, en fluage et en fatigue cyclique. Les résultats obtenus dans les différents matériaux instrumentés par implant piézoélectrique intégrés dans la masse ou collés à la surface des composites seront analysés en termes de comportement mécanique et sensibilité de l'émission acoustique aux mécanismes d'endommagement au cours des essais.

## 4.2. Mise en œuvre des composites stratifiés destinés aux essais de traction

Les matériaux préparés pour les essais de traction sont des composites stratifiés unidirectionnels et croisés de séquence d'empilement  $[0]_{12}$  et  $[0_3/90_3]_s$  respectivement. La mise en œuvre de ces matériaux est réalisée au sein du laboratoire (LAUM) de la même façon que les échantillons préparés pour les essais de flexion. Au cours de la mise en œuvre des matériaux, le capteur piézoélectrique est implanté au milieu entre les couches du matériau dans le plan neutre, placé au centre de chaque éprouvette (Fig. 4.1).

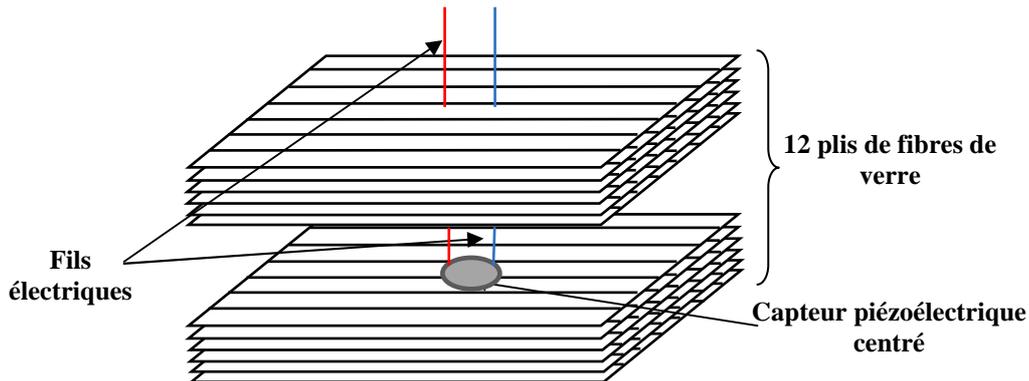


Figure 4.1. Composite stratifié instrumenté par un capteur piézoélectrique utilisé pour les essais de traction

Les dimensions des capteurs incorporés sont les mêmes que celles utilisées dans les essais de flexion. Trois types de matériaux sont élaborés: matériau non instrumenté (NI), matériau instrumenté avec le petit capteur (IP) et matériau instrumenté avec le grand capteur (IG). A partir des plaques de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ , des éprouvettes parallélépipédiques (Fig. 4.2) sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté. Les éprouvettes utilisées pour les essais de traction ont une longueur  $L_2 = 250 \text{ mm}$ ; une largeur  $b_2 = 30 \text{ mm}$  et une épaisseur  $e_2 = 3,5 \text{ mm}$ .

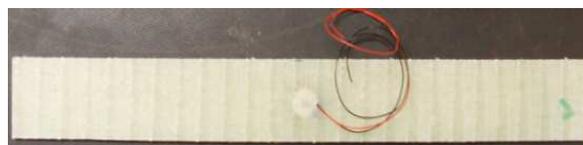


Figure 4.2. Eprouvette intégrée par un capteur piézoélectrique utilisée pour les essais de traction

## 4.3. Dispositif expérimental

Les éprouvettes sont sollicitées en traction avec une distance entre mors égale à 150 mm. Les essais sont effectués sur une machine hydraulique universelle type INSTRON modèle 8516 de capacité 100 kN, dont le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur (Fig. 4.3).



*Figure 4.3. Dispositif expérimental de l'essai de traction sur une éprouvette intégrée*

Afin de vérifier la répétabilité des résultats, trois à cinq échantillons sont testés pour chaque matériau. Les essais statiques sont effectués avec une vitesse de déplacement de 1 mm/min. Au cours de ces essais, l'évolution de la charge et du déplacement est enregistrée. Les tests de fatigue sont menés en contrôlant le signal de la force avec une forme d'onde sinusoïdale et une fréquence de 10 Hz. La valeur moyenne de la charge appliquée est de 50% avec une amplitude de 10% de la charge à la rupture en statique. Pour les essais de fluage, les éprouvettes sont testées avec un chargement constant de 70% de la charge à la rupture en statique dans un état isotherme. Pour ces essais, l'évolution du déplacement en fonction du temps est enregistrée.

Le suivi et l'analyse de l'endommagement sont réalisés par la technique d'émission acoustique avec le système d'acquisition (EPA) de la même manière que dans le cas des essais de flexion.

#### **4.4. Faisabilité de l'étude de traction**

Des travaux préliminaires pour démontrer la faisabilité d'incorporer un corps étranger dans les matériaux composites sont réalisés. Des pastilles métalliques sous forme de disque de différentes tailles (Tab. 4.1) sont implantées au milieu des plis du matériau composite (Fig. 4.4).

*Tableau 4.1 : Dimensions des pastilles métalliques implantées au sein du matériau composite*

Pastille métallique	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
Diamètre (mm)	-	5		10	
Epaisseur (mm)	-	0,5	1	0,5	1

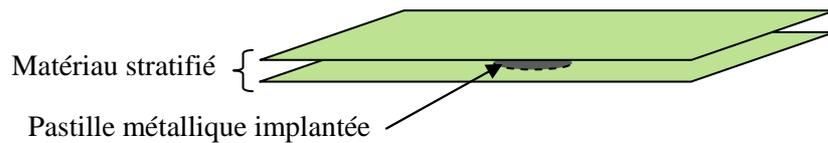


Figure 4.4. Eprouvette avec insert métallique dans la masse utilisée pour les essais de traction

Les éprouvettes sont chargées en traction jusqu'à la rupture. La figure 4.5 donne l'évolution de la charge en fonction du déplacement. Cette figure présente une étude comparative des résultats obtenus dans un composite sans intégration ( $P_0$ ) et ceux obtenus dans des composites avec intégration des pastilles ( $P_{1-4}$ ).

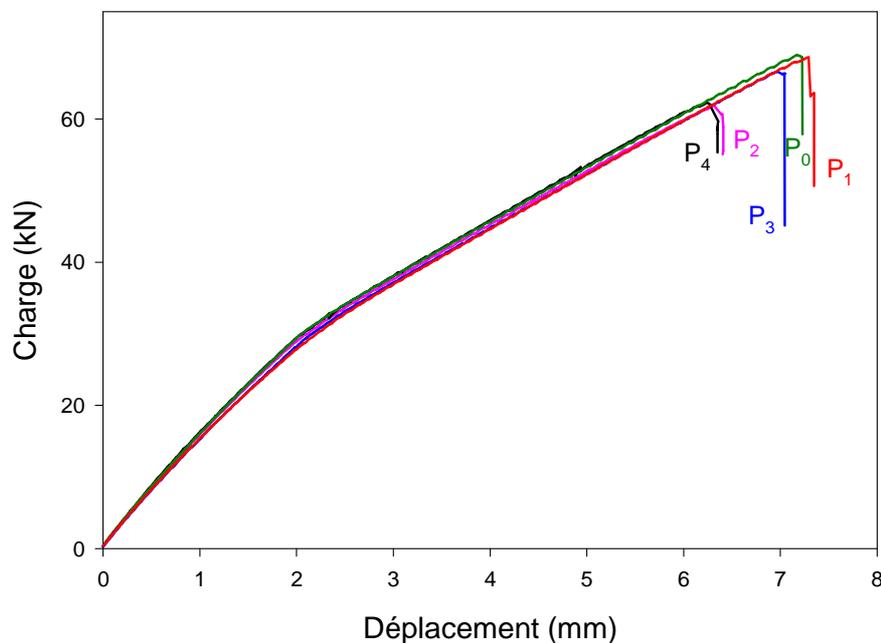


Figure 4.5. Courbes charge-déplacement déduites des essais de traction statique sur les matériaux intégrés par des disques métalliques

Nous constatons que le comportement mécanique de l'ensemble des échantillons testés présente deux zones. Une première zone caractérisant la partie élastique du matériau permettant de déterminer les caractéristiques élastiques du matériau. Une deuxième zone aussi linéaire jusqu'à la rupture qui est de type fragile. Le changement de la linéarité entre les deux zones met en évidence un début d'endommagement par le développement de microfissures au sein du matériau. La charge et le déplacement à la rupture diminuent lorsque la taille de la pastille augmente. Une légère dégradation des propriétés statiques est constatée dans le cas des éprouvettes incorporées par des pastilles métalliques.

Le tableau 4.2 donne les caractéristiques mécaniques déduites des essais statiques.

**Tableau 4.2. Caractéristiques mécaniques des différents types d'éprouvettes intégrés par des disques métalliques**

Stratifié	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
Charge à la rupture (kN)	69	68,6	62	67	62
Déplacement à la rupture (mm)	7,2	7,3	6,3	7	6,2
Rigidité (kN/mm)	15	15,5	15,5	15,6	15

Pour chaque éprouvette, la rigidité est déterminée dans la première partie de la zone linéaire des courbes. En augmentant les dimensions des pastilles, la rigidité diminue légèrement alors que la charge et le déplacement à la rupture diminuent d'une manière assez significative. Cette diminution est due aux défauts engendrés par la présence de la pastille dans le matériau de manière hétérogène dans les différentes éprouvettes. Afin de réduire l'influence des disques implantés, sur l'intégrité de la structure, il est nécessaire d'utiliser des disques de plus petite taille. Nous notons également que l'influence de l'épaisseur des composants implantés est plus important que le diamètre.

## **4.5. Résultats des essais de traction appliqués aux matériaux unidirectionnels intégrés par capteur piézoélectrique**

### **4.5.1. Résultats des essais statiques**

#### **4.5.1.1. Comportement mécanique**

Les résultats des essais de traction en statique sur les matériaux stratifiés unidirectionnels (UD) sont reportés sur la figure 4.6-a. Cette figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour trois type de matériaux: matériau non intégré (NI), matériau intégré avec le petit capteur (IP) et matériau intégré avec le grand capteur (IG). La figure montre que le comportement des trois types d'éprouvettes est similaire et que l'éprouvette (IP) a résisté beaucoup plus que l'éprouvette (NI), par contre l'éprouvette (IG) atteint la rupture avant les deux autres matériaux. Les trois courbes charge/déplacement présentent trois zones:

- La première zone : pour les faibles déplacements, où les trois courbes sont confondues, les échantillons ont un comportement linéaire élastique, cette partie permet de mesurer les caractéristiques élastiques des matériaux testés,
- La deuxième zone est aussi linéaire, mais caractérisée par l'initiation et le développement des microfissures dans le matériau et couvre plus de 65% du comportement,
- La zone finale correspond à la rupture fragile du matériau.

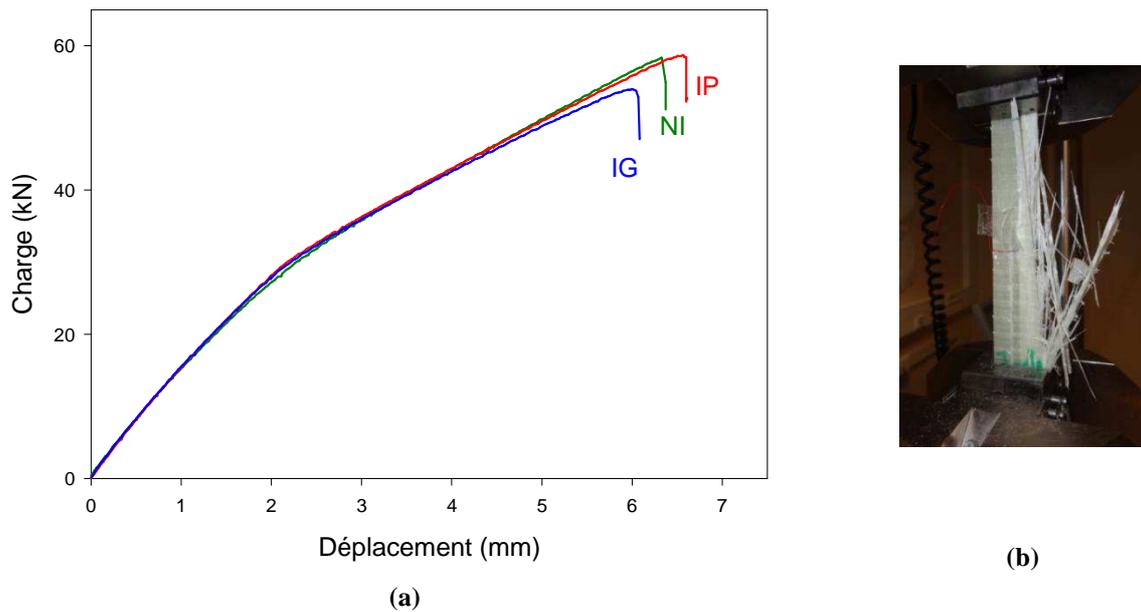


Figure 4.6. a) Courbes charge-déplacement déduites des essais de traction en statique sur les trois types de matériaux unidirectionnels (NI), (IP) et (IG) et b) Eprouvette intégrée après la rupture

La figure 4.6-b représente une éprouvette intégrée rompue sous chargement en statique. Sur cette éprouvette, différents mécanismes d'endommagement sont observés : des décohésions et des ruptures des fibres.

La charge et le déplacement à la rupture ainsi que la rigidité sont déterminés pour l'ensemble des stratifiés UD et sont donnés dans le tableau 4.3. La comparaison des résultats des deux éprouvettes intégrées par rapport à ceux de l'éprouvette non intégrée montre que la rigidité est quasi-identique pour tous les types des échantillons, la résistance et le déplacement à la rupture sont plus élevés dans le matériau IP.

Tableau 4.3. Caractéristiques mécaniques des différents types d'éprouvettes unidirectionnelles sollicitées en traction statique

Stratifié	NI	IP	IG
Charge à la rupture (kN)	58	59	54
Déplacement à la rupture (mm)	6,3	6,6	6
Rigidité (kN/mm)	15	15	14,8

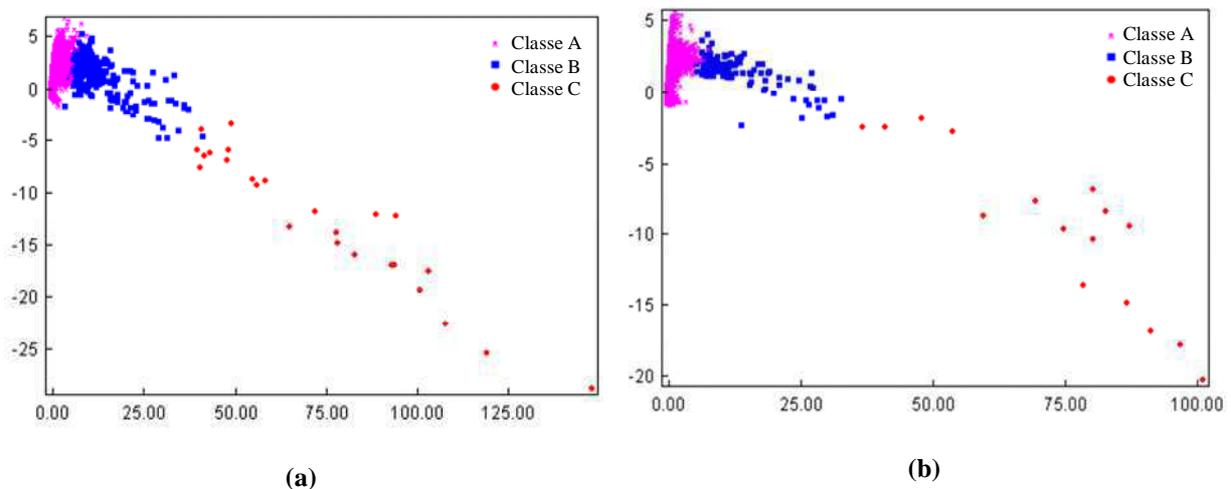
#### 4.5.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Afin de pouvoir relier les signaux acoustiques collectés aux mécanismes d'endommagement potentiels d'un matériau, nous avons appliqué la classification multiparamétrique des  $k$ -moyennes [111]. Cette méthode permet de suivre l'évolution de

chaque mécanisme au cours des essais de traction dans les matériaux avec et sans capteur intégré.

Les figures 4.7 à 4.9 illustrent une comparaison de la classification des signaux d'EA des deux types de composites UD avec et sans capteur intégré (IP et NI). Ces figures donnent une Analyse en Composantes Principales (ACP) (Fig. 4.7), la distribution d'amplitude en fonction du temps (Fig. 4.8) et la chronologie d'appariation des mécanismes d'endommagement identifiés (Fig. 4.9). En traction dans l'axe des fibres, trois modes d'endommagement interviennent: fissuration de la matrice (classe A), la décohésion fibre-matrice (classe B) et la rupture de fibres (classe C). Les formes d'ondes des différents signaux sont quasiment identiques à celles obtenues en flexion.

La représentation de l'ACP (Fig. 4.7) montre le regroupement des signaux en trois classes. Chaque classe est bien définie, avec une concentration très importante pour les classes A et B qui représentent respectivement la fissuration de la matrice et la décohésion fibre/matrice.



**Figure 4.7. Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode des k-moyennes pour les matériaux unidirectionnels testés en traction statique: a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)**

Dans les essais statique, la charge est augmentée progressivement jusqu'à la rupture, de sorte que la progression de l'endommagement dépend de l'augmentation du niveau de la contrainte appliquée. Durant trois quarts des essais, la réponse acoustique des échantillons est principalement localisée autour des amplitudes 40 et 65 dB pour le matériau NI et entre 40 et 70 dB dans le cas du matériau IP (Fig. 4.8). A contrainte élevée, la distribution d'amplitude devient très importante entre 40 et 100 dB. Il est à noter que dans le cas de l'éprouvette IP, on observe, au début du test, l'apparition des événements de haute amplitude (Fig.4.8-b).

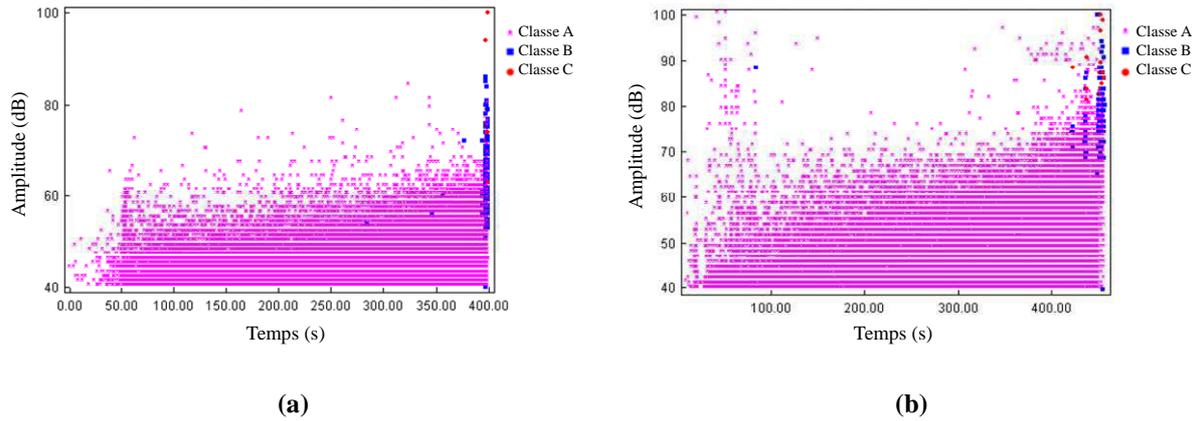


Figure 4.8. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps au cours des essais de traction en statique pour les matériaux unidirectionnels : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

La chronologie d'apparition de chaque mécanisme est donnée dans la figure 4.9. Cette visualisation montre que pour les deux type d'éprouvettes, la fissuration de la matrice (classe A) est le mécanisme le plus dominant, il commence dès le début de l'essai et se propage jusqu'à la rupture du matériau. Les microfissurations de la matrice se développent ensuite perpendiculairement aux fibres et entraînent des décohésions aux interfaces. Ces derniers apparaissent trop tôt dans le cas du matériau IP par rapport à ceux du matériau NI. Des zones de concentration de contraintes se forment aux interfaces et provoquent la rupture de fibres qui conduisent à la rupture finale du matériau. Le nombre de salves cumulés du matériau IP ( $73.10^3$ ) est plus élevé que celui observé dans le matériau NI ( $64.10^3$ ).

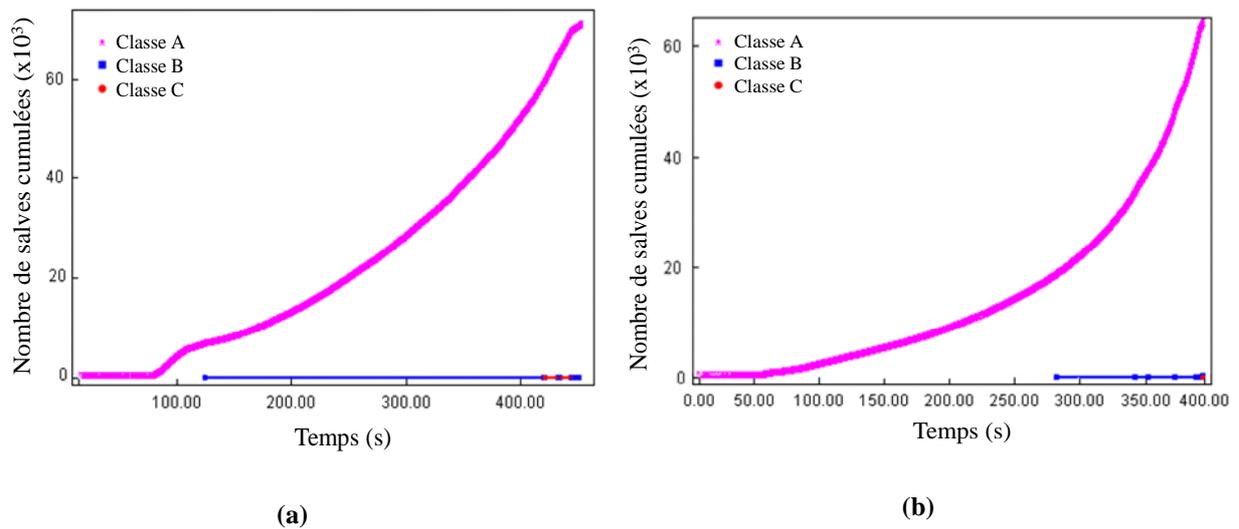


Figure 4.9. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de traction en statique pour les matériaux unidirectionnels : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 4.5.1.3. Observation des faciès de rupture

L'observation par microscope optique d'une éprouvette stratifiée intégrée, après un essai de traction en statique, est présentée dans la figure 4.10. L'éprouvette est découpée transversalement au niveau du capteur piézoélectrique implanté dans la masse. Cette observation montre que la zone entourant le capteur piézoélectrique n'est pas endommagée : aucune fissure n'est observée au alentour du capteur. On observe la fissuration de la matrice accompagnée par la décohésion fibre/matrice dans des zones loin du capteur.

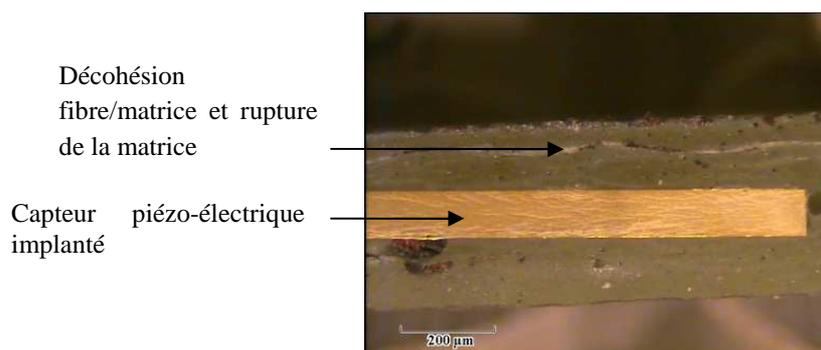


Figure 4.10. Micrographies obtenues par microscope optique de la section transversale autour du capteur piézoélectrique implanté dans une éprouvette stratifiée testé en traction après rupture

## 4.5.2. Résultats des essais de fatigue cyclique

### 4.5.2.1. Comportement mécanique

Les essais de fatigue cyclique sont effectués sur des éprouvettes identiques à celles testées en statique avec un niveau de chargement égal à  $30 \pm 6$  kN (une valeur moyenne de 50% et une amplitude 10% de la charge à la rupture en statique). Au cours des essais de fatigue, nous avons enregistré l'évolution du déplacement maximum  $d_{max}$  en fonction du nombre de cycles. Dans la figure 4.11, nous avons reporté avec une échelle semi logarithmique, l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles. La rigidité est évaluée par le rapport des déplacements  $d_{0max}/d_{max}$  (où  $d_{0max}$  est le déplacement obtenu dans le premier cycle). Pour les différents types de matériaux UD étudiés, le comportement en fatigue est similaire. La perte de la rigidité jusqu'à la rupture des éprouvettes se déroule en trois phases: dans la première phase (dès les premiers cycles) se manifeste une diminution très rapide de la rigidité. Dans la deuxième phase qui correspond à la quasi-totalité de la durée de vie du matériau, cette diminution devient très lente. Enfin dans la troisième phase courte, la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture des éprouvettes. La comparaison des résultats montre que les deux matériaux intégrés ont une durée de vie légèrement inférieure que celle du matériau non intégré.

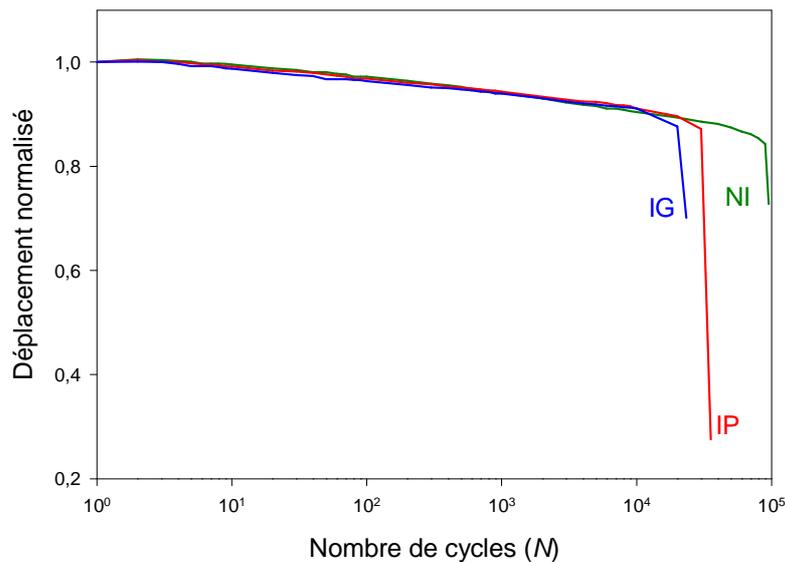


Figure 4.11. Evolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles au cours des essais de traction en fatigue pour les trois type d'éprouvettes NI, IP et IG

#### 4.5.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

La classification des signaux d'EA recueillis au cours des essais de fatigue sont reportés dans les figures 4.12 et 4.13. Pour les essais de fatigue, la classification des différents signaux recueillis mis en évidence la présence de trois classes qui sont la fissuration de la matrice (classe A), la décohésion fibre-matrice (classe B) et la rupture de fibres (classe C).

Les résultats obtenus pour les deux types des matériaux (IP et NI) montrent que l'évolution de l'activité acoustique en fonction du nombre de cycles se déroule en trois phases (Fig. 4.12): dans la première phase, l'activité acoustique est très importante dès les premiers cycles, cette activité correspond à l'initiation et la multiplication des microfissurations au sein des éprouvettes. Dans la deuxième phase, nous observons une diminution de cette activité, cette phase est due à la propagation de la microfissuration et correspond à la quasi-totalité de la durée de vie des éprouvettes. Enfin dans la dernière phase, très courte, l'activité acoustique redevient très importante. Cette phase correspond à la propagation rapide de la fissuration qui devient plus localisée. Dans cette zone on remarque que la concentration des signaux de la fissuration de la matrice et la décohésion fibre/matrice entraîne, en fin des essais, quelques signaux de rupture des fibres conduisant ainsi à la ruine totale des éprouvettes.

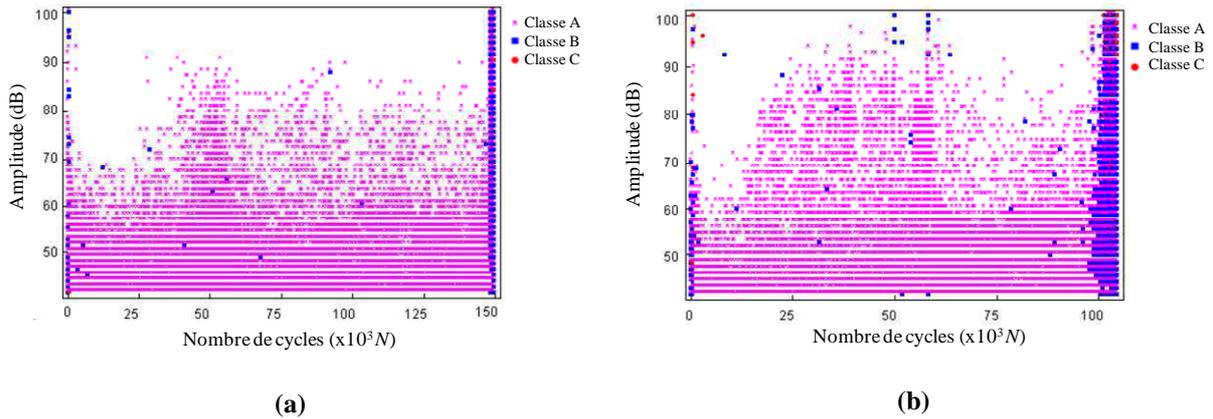


Figure 4.12. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du nombre de cycles au cours des essais de traction en fatigue pour les matériaux unidirectionnels : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

La comparaison de l'activité acoustique dans les deux types de matériaux (Fig. 4.13) montre qu'elle est beaucoup plus intense dans l'éprouvette instrumentée que dans l'éprouvette non instrumentée. Le nombre de salves cumulés pour le matériau IP est plus élevé que celui observé dans le cas du matériau NI ( $33 \cdot 10^4$  à  $21,5 \cdot 10^4$ ).

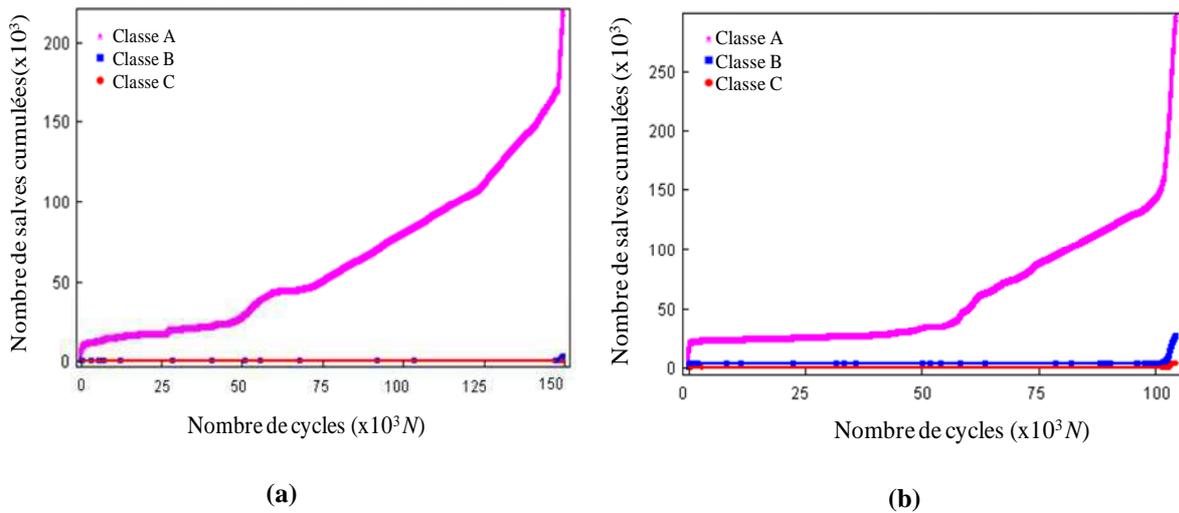


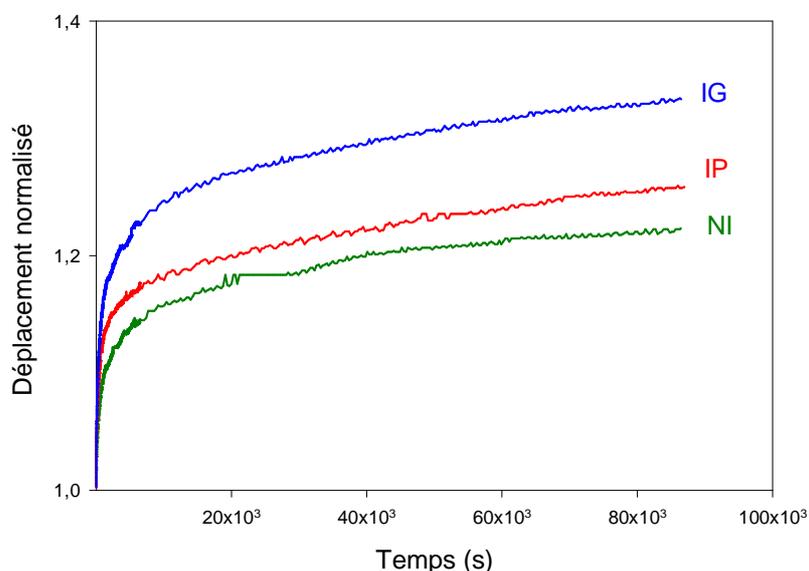
Figure 4.13. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de traction en fatigue pour les matériaux unidirectionnels : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 4.5.3. Résultats des essais de fluage

#### 4.5.3.1. Comportement mécanique

Les essais de traction en fluage sont effectués sur des composites identiques à ceux testés en statique et en fatigue cyclique. Une étude comparative sur les matériaux composites UD avec et sans capteur piézoélectrique intégré, est présentée dans la figure 4.14. Cette figure illustre l'évolution du déplacement ( $d/d_0$ ) en fonction du temps. Les essais de fluage sont

effectués avec un niveau de chargement égal à 40 kN (ce qui représente 70% de la charge à la rupture en statique).



**Figure 4.14.** Evolution du déplacement en fonction du temps au cours des essais de traction en fluage pour les trois types d'éprouvettes unidirectionnels NI, IP et IG

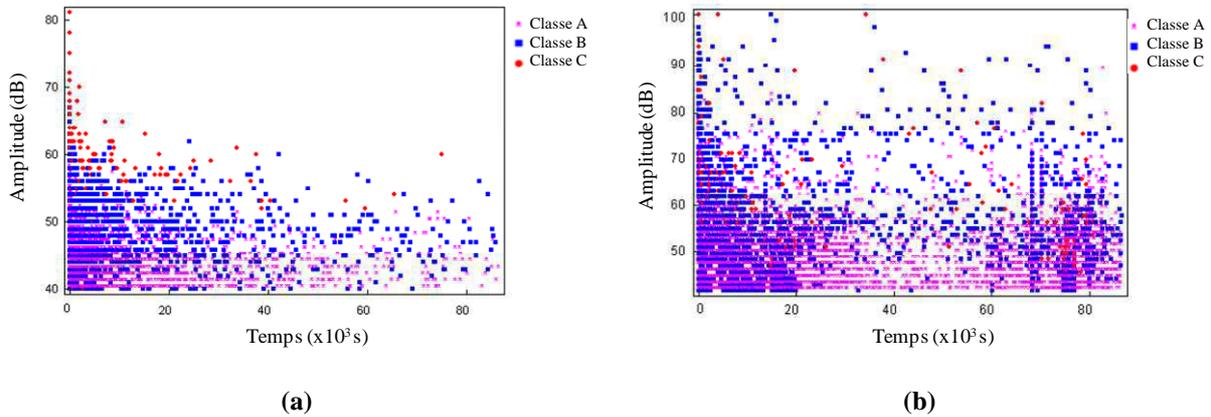
Durant 25 heures de chargement, aucune rupture complète n'est constatée pour les trois éprouvettes. Les résultats montrent clairement le comportement similaire des trois matériaux (NI, IP et IG) avec un déplacement plus élevé dans le cas du matériau avec un grand capteur intégré (IG). Les courbes du matériau IP et du matériau NI sont très voisines, mettant ainsi en évidence l'effet négligeable du petit capteur sur le comportement mécanique du matériau instrumenté.

#### 4.5.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Les signaux d'EA recueillis au cours des essais de fluage sont classifiés par la méthode des *k*-moyennes. Les résultats de cette classification sont représentés sur les figures 4.15 et 4.16. Les éprouvettes n'ayant pas été rompues, nous n'avons observé que les deux premières phases de l'activité acoustique dans l'essai de fluage. Elles correspondent à trois modes d'endommagement (fissuration de la matrice (classe A), décohésion fibre-matrice (classe B) et rupture de fibres (classe C)). Comme dans le cas des essais statique, ces trois modes se manifestent durant les essais comme suit:

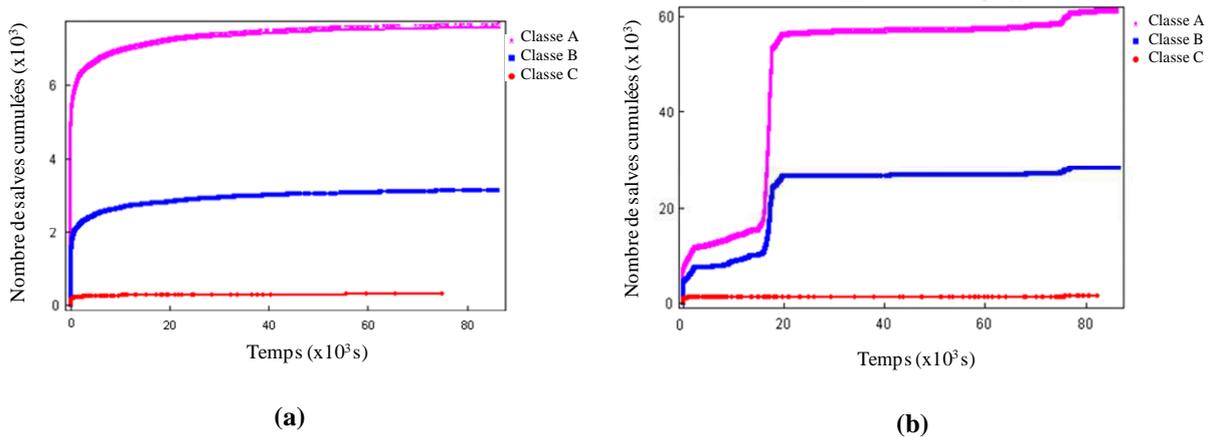
- Pour la première phase correspondant au chargement instantané jusqu'à la valeur de maintien, nous observons une activité acoustique très importante couvrant les trois mécanismes d'endommagement ;

- Dans la deuxième phase correspondant au début du fluage jusqu'à la fin de l'essai, on observe une diminution de l'activité acoustique. Dans cette phase, seul deux mécanismes d'endommagement sont mis en évidence avec une amplitude entre 40 et 60 dB pour l'éprouvette NI et une amplitude qui atteint parfois les 80 dB pour l'éprouvette IP.



**Figure 4.15.** Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps au cours des essais de traction en fluage pour les matériaux unidirectionnels : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

La comparaison de l'activité acoustique pour les deux matériaux NI et IP montre que cette activité est beaucoup plus intense et plus importante dans l'éprouvette IP que dans l'éprouvette NI. Le nombre d'événement acoustique dans l'éprouvette instrumentée est 10 fois plus que celui dans l'éprouvette non instrumentée (Fig 5.16).



**Figure 4.16.** Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de traction en fluage pour les matériaux unidirectionnels : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

## 4.6. Résultats des essais de traction appliqués aux matériaux croisés intégrés par capteur piézoélectrique

### 4.6.1. Résultats des essais statiques

#### 4.6.1.1. Comportement mécanique

La figure 4.17-a donne les courbes charge/déplacement déduites des essais effectués sur les trois types d'éprouvettes testées: éprouvette non instrumentée (NI), éprouvette instrumentée avec le petit capteur (IP) et éprouvette instrumentée avec le grand capteur (IG).

Comme dans le cas des matériaux UD, les courbes présentent deux zones linéaires légèrement différentes. La première zone représente un comportement élastique du matériau pour des faibles déplacements, permettant de mesurer les caractéristiques élastiques des matériaux testés. La deuxième zone est aussi linéaire jusqu' à la rupture qui est de type fragile. Cette zone est caractérisée par l'initiation et le développement des microfissures dans le matériau. On constate que les composites instrumentés atteignent leur rupture avant le composite non instrumenté.

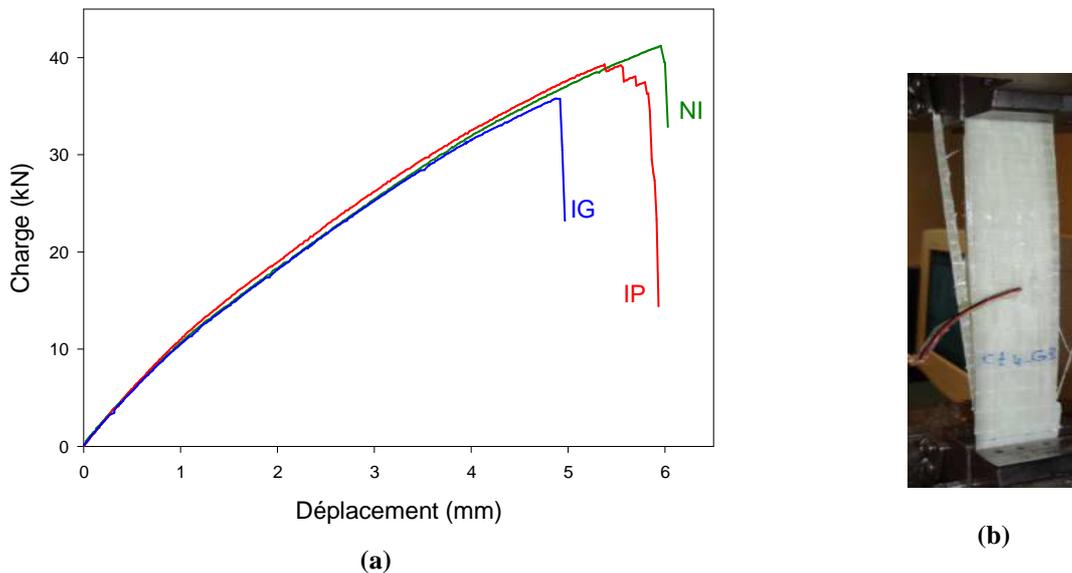


Figure 4.17. a-Courbes charge-déplacement déduites des essais de traction statique pour les trois type d'éprouvettes croisées NI, IP et IG et b) éprouvette intégrée après la rupture

Le tableau 4.4 présente les caractéristiques mécaniques déduites de ces essais. La charge et le déplacement à la rupture diminuent d'une manière assez significative avec l'augmentation de la taille du capteur piézoélectrique (diminution de 12% pour la charge et de l'ordre de 20% pour le déplacement dans le cas du matériau IG). Dans le cas du matériau IP, la charge ainsi que le déplacement ont légèrement diminué. Dans les deux cas, la rigidité semble n'est pas affectée par l'insertion du capteur dans le matériau.

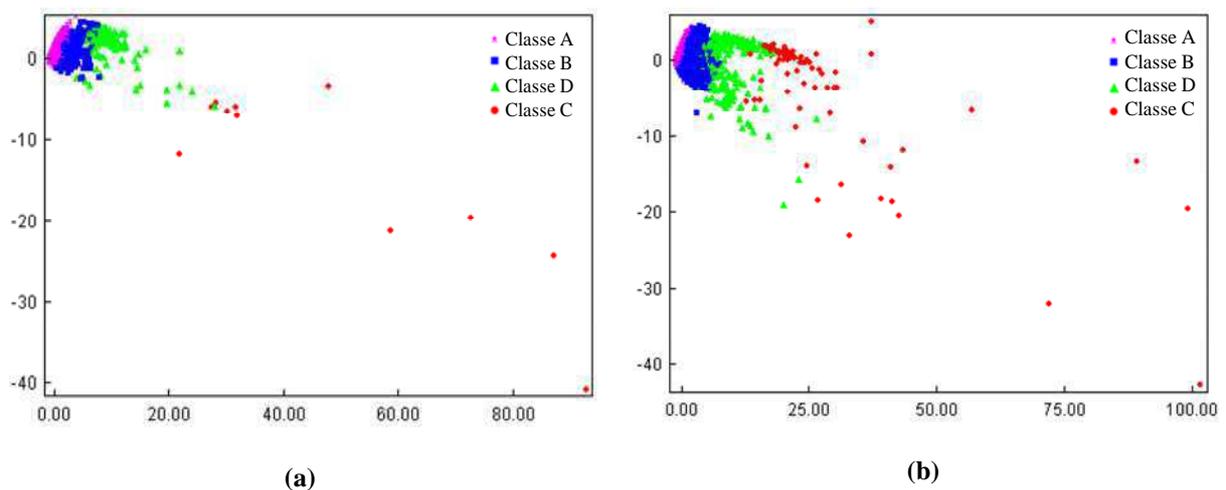
**Tableau 4.4. Caractéristiques mécaniques des différents types d'éprouvettes croisées**

Stratifié	NI	IP	IG
Charge à la rupture (kN)	41	40	36
Déplacement à la rupture (mm)	6	5,6	4,9
Rigidité (kN/mm)	10	10,6	10

#### 4.6.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

De la même manière que dans le cas des matériaux unidirectionnels, les figures 4.18 à 4.20 donnent une comparaison des résultats de la classification de l'activité acoustique obtenue pour les deux matériaux croisés (NI et IP), en terme d'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Fig. 4.18), distribution d'amplitude en fonction du temps (Fig. 4.19) et chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement (Fig. 4.20).

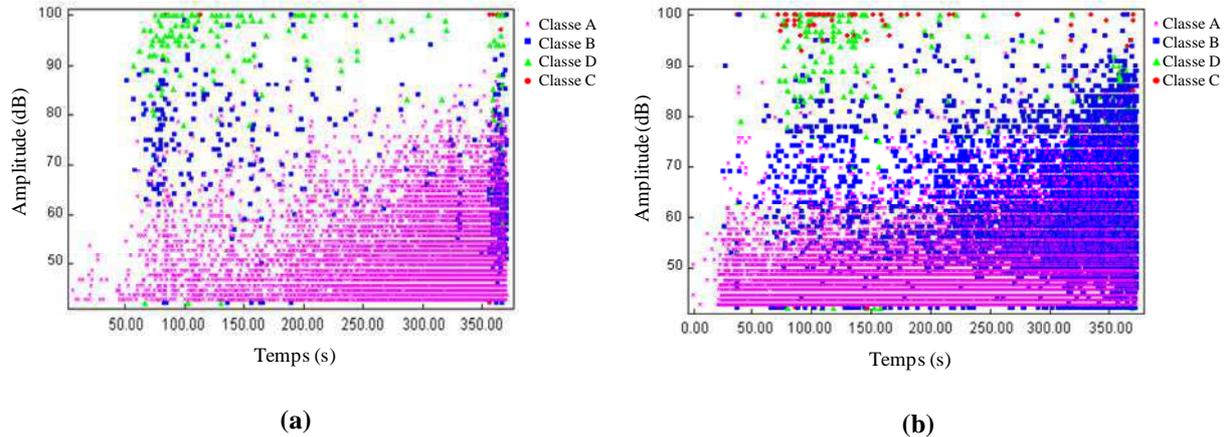
Comme dans le cas des essais de flexion sur les composites à plis croisés, en plus des trois modes déjà étudiés dans le cas des matériaux unidirectionnels (fissuration de la matrice (classe A), la décohésion fibre-matrice (classe B) et la rupture de fibres (classe C)), la classification appliquée aux salves d'EA recueillies met en évidence la présence d'un quatrième mode d'endommagement, qui est le délaminage (classe D). La représentation de l'ACP (Fig. 4.18) montre que la plupart des signaux sont concentrés. Cette représentation montre la présence des quatre classes qui sont bien identifiés.



**Figure 4.18. Visualisation par ACP de la classification des signaux d'EA obtenue par la méthode des k-moyennes pour les matériaux croisés testés en traction statique: a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)**

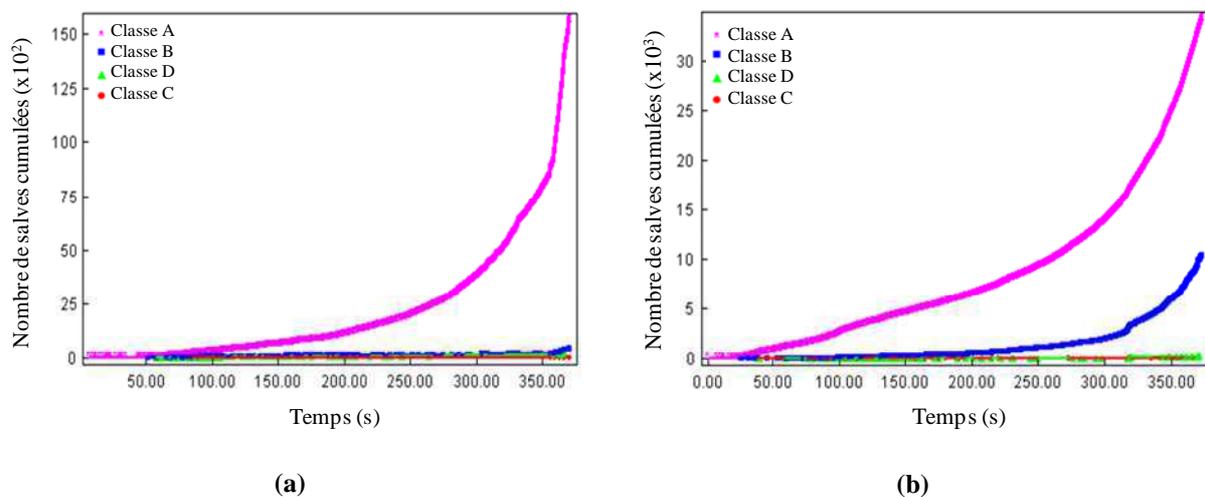
Les résultats de la figure 4.19 font apparaître des signaux avec des amplitudes élevées qui peuvent atteindre parfois les 100 dB dès le début de l'essai des deux matériaux. Dans le cas

du matériau intégré (Fig. 4.19-b), où les événements acoustiques d'amplitude élevée ont commencés un peu plus tôt que le matériau non intégré, nous observons l'apparition simultanée des quatre modes d'endommagement, l'amplitude des évènements se situe entre 40 et 100 dB avec une activité acoustique plus importante de la fissuration matricielle et la décohésion.



**Figure 4.19.** Distribution de l'amplitude des signaux d'EA en fonction du temps au cours des essais de traction en statique pour les matériaux croisés : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

La chronologie d'apparition des différents mécanismes d'endommagement (Fig. 4.20), pour les deux matériaux étudiés (NI et IP), montre que la fissuration de la matrice (classe A) est le mécanisme le plus dominant. Ce mécanisme commence dès le début des essais, et implique beaucoup plus d'événements acoustiques. La présence du capteur de l'EA au sein de la structure favorise surtout la présence des signaux de fissuration matricielle ainsi que de décohésion. Le nombre de salves acoustique dans le cas du matériau IP est plus élevé que celui observé dans le matériau NI ( $46.10^3$  pour le IP et  $17.10^3$  pour NI).



**Figure 4.20.** Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de traction en statique pour les matériaux croisés : a) épreuve stratifiée non instrumentée (NI) et b) épreuve stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

## 4.6.2. Résultats des essais de fatigue cyclique

### 4.6.2.1. Comportement mécanique

Les essais de fatigue cycliques sont effectués sur des éprouvettes croisées identiques à celles testées en statique avec un niveau de chargement égal à  $20 \pm 4$  kN (ce qui représente une valeur moyenne de la charge de 50% et une amplitude de 10 % de la charge à la rupture en statique). Dans la figure 4.21, nous avons reporté avec une échelle semi logarithmique, l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles des trois matériaux croisés étudiés (NI, IP et IG). De point de vue comparaison entre stratifiés croisés et stratifiés unidirectionnels, nous remarquons la même tendance du comportement mécanique, cependant, le matériau à fibres unidirectionnelles résiste beaucoup plus que le matériau à fibres croisées. Pour le matériau non instrumenté (NI), à niveau de chargement et amplitude équivalents, la durée de vie du stratifié unidirectionnel est de l'ordre  $10 \cdot 10^4$  cycles alors que celle du stratifié croisé est de l'ordre de  $5 \cdot 10^4$  cycles. Comme pour les composites unidirectionnels, les résultats de fatigue des composites croisés montrent que la perte de la rigidité jusqu'à la rupture des éprouvettes se déroule en trois phases : une première phase avec une diminution très rapide de la rigidité, caractérisée par l'initiation et la multiplication des microfissures dans le composite dans les premiers cycles. Dans la deuxième phase, cette diminution devient progressive, caractérisée par une propagation stable des microfissures et représente 80% de la durée de vie du matériau et dans la phase finale, la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture des éprouvettes. Cette phase est caractérisée par des fissures beaucoup plus localisées conduisant à des macro-fissures, du délaminage et à la rupture des fibres et donc une rupture totale de l'éprouvette. La comparaison des résultats des trois composites à fibres croisées (NI, IP et IG) montre que la durée de vie de l'éprouvette diminue lorsque la taille du capteur augmente. La durée de vie du matériau NI est de l'ordre de  $33 \cdot 10^3$  cycles alors que celle du matériau IP est de l'ordre de  $9,5 \cdot 10^3$  cycles et celle du matériau IG est de l'ordre  $7 \cdot 10^3$  cycles.

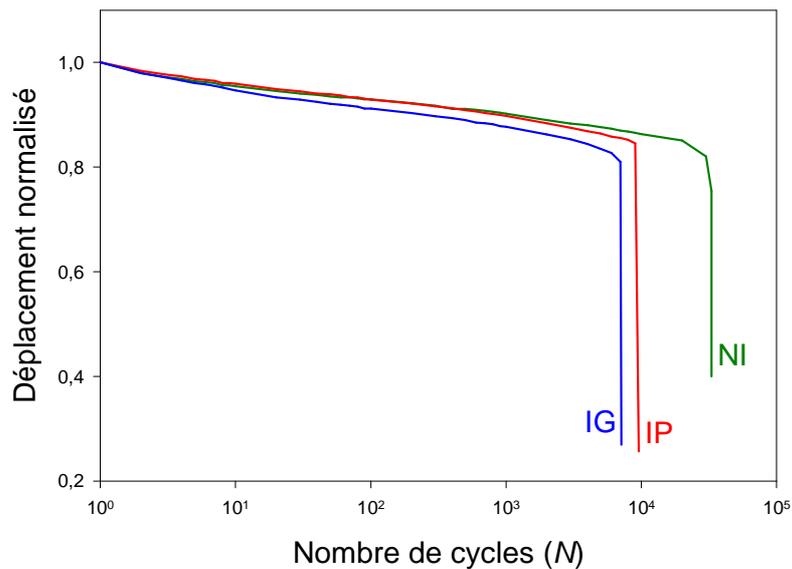


Figure 4.21. Evolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles au cours des essais de fatigue pour les trois type d'éprouvettes croisées NI, IP et IG

#### 4.6.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

De la même manière que dans le cas des essais statique, la classification des signaux d'EA recueillis au cours des essais de fatigue, est donnée dans les figures 4.22 et 4.23. La classification des signaux d'EA collectés montre que les stratifiés croisés présentent quatre modes d'endommagement comme déjà observés dans le cas des essais statique (la fissuration de la matrice (classe A), la décohésion fibre-matrice (classe B), la rupture des fibres (classe C) et le délaminage (classe D)).

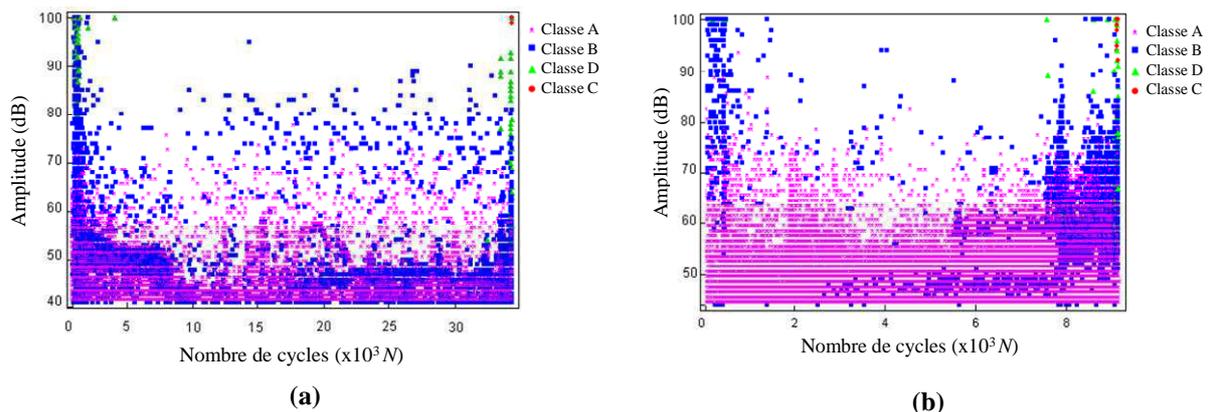


Figure 4.22. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du nombre de cycles au cours des essais de traction en fatigue pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

Pour les deux types de matériaux, trois zones de distribution de l'amplitude peuvent être identifiées (Fig. 4.22):

- Pour la zone I dès les premiers cycles, l'activité acoustique est très importante et correspond à l'initiation et la multiplication des microfissurations au sein du matériau. La fissuration de la matrice apparaît en même temps que la décohésion fibre-matrice et quelques signaux de délaminage pour le matériau NI. Pour le matériau IP, la fissuration de la matrice apparaît dès le début suivie de la décohésion,

- Pour la zone II, qui représente à peu près 80% de la durée de l'essai, nous observons une diminution de l'activité acoustique, cette phase est prédominée par la propagation stable de la microfissuration matricielle,

- Dans la zone III, très courte, où l'activité acoustique redevient très importante, les fissurations transverses se propagent et se multiplient rapidement, ce qui provoque des délaminages inter-plies suivie en fin de l'essai de quelques signaux de rupture de fibres qui conduisent à la ruine finale du matériau.

La comparaison de l'activité acoustique dans les deux types de matériaux, montre qu'elle est plus importante dans l'éprouvette instrumentée que dans l'éprouvette non instrumentée (Fig. 4.23).

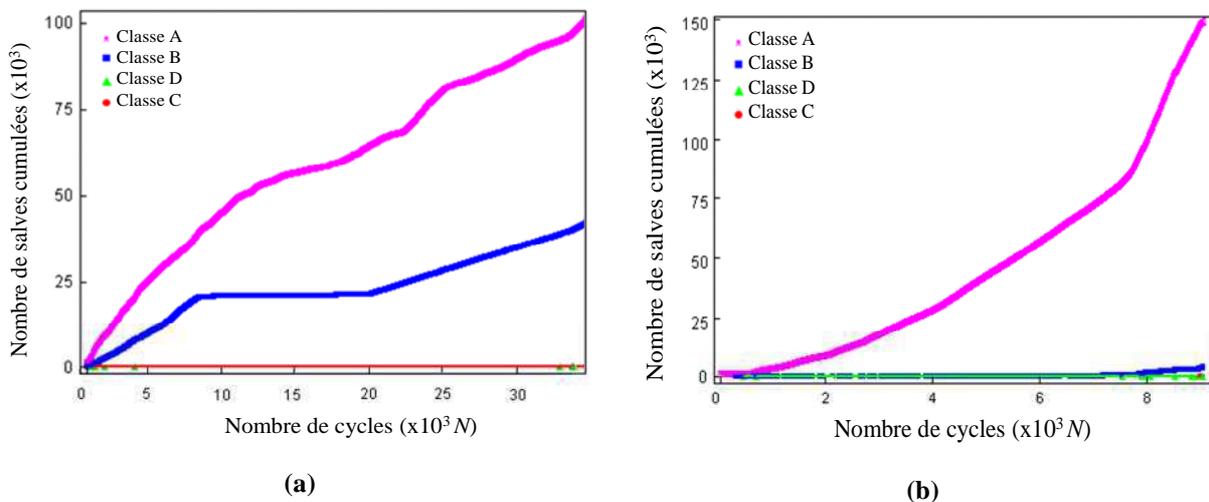


Figure 4.23. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de traction en fatigue pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)

### 4.6.3. Résultats des essais de fluage

#### 4.6.3.1. Comportement mécanique

Une étude comparative du comportement des composites stratifiés croisés avec et sans capteur intégré testés en fluage est présentée dans la figure 4.24. Cette figure illustre l'évolution de la déformation ( $d/d_0$ ) en fonction du temps en utilisant une échelle semi-logarithmique. Les essais de fluage sont effectués avec un niveau de chargement égal à 28 kN

(correspondant à 70% de la charge à la rupture en statique). Nous remarquons que l'ensemble des échantillons ont rompus. L'échantillon intégré avec le petite capteur (IP) a résisté beaucoup plus que le matériau non intégré (NI) alors que le matériau IG intégré avec un grand capteur a atteint la rupture avant les deux autres. L'évolution du déplacement en fonction du temps pour l'ensemble des courbes peut être divisée en deux zones:

- Une première zone très étendu dans le temps qui représente la partie dominante lors de l'essai. Cette zone est associée à la multiplication et la propagation stable de l'endommagement ;
- Une deuxième zone caractérisée par une accélération brutale du taux de déformation. Elle est associée à l'endommagement plus actif jusqu'à la rupture finale du matériau.

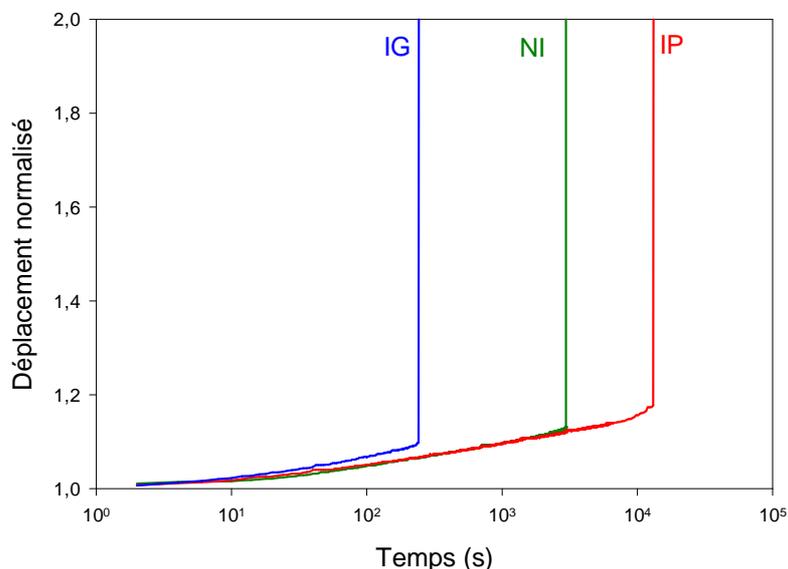


Figure 4.24. Evolution du déplacement en fonction du temps au cours des essais de fluage pour les trois types d'éprouvettes croisées NI, IP et IG

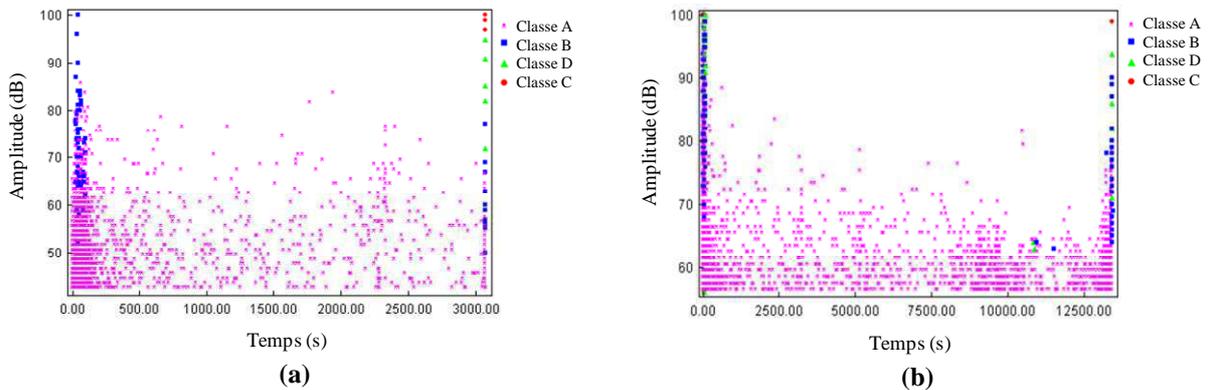
#### 4.6.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

La classification des signaux d'EA recueillis au cours des essais de fluage effectués sur les stratifiés croisés avec et sans capteur intégré (IP et NI) est présentée dans les figures 4.25 et 4.26. La rupture est atteinte par les deux éprouvettes (NI et IP), leur activité acoustique est divisée en trois phases:

- Dans la première phase, au début de l'essai, l'activité acoustique est très concentrée et les amplitudes des signaux sont dans la plage de 40 à 100 dB. Cette zone correspond à la phase de chargement qui est très courte. Cette phase couvre l'ensemble des modes d'endommagement.

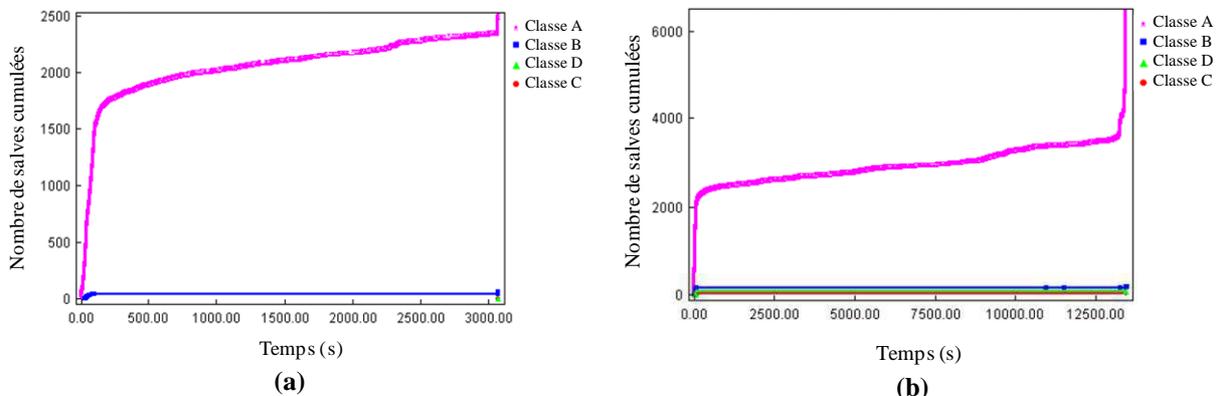
- Dans la deuxième phase, on remarque une diminution de l'activité acoustique où les amplitudes des signaux sont entre 40 à 75 dB. Cette phase est due à la propagation des microfissures, et correspond à la quasi-totalité de la durée de vie des matériaux.

- Dans la troisième phase, l'activité redevient très énergique avec des signaux qui atteignent 100 dB d'amplitude. L'activité acoustique de cette phase couvre toute l'ensemble des gammes d'amplitudes et correspond à plusieurs mécanismes d'endommagement.



**Figure 4.25. Distribution de l'amplitude des signaux d'EA en fonction du temps au cours des essais de traction en fluage pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)**

Pour les deux matériaux (NI et IP), le nombre de salves cumulées en fonction du temps (Fig. 4.26) montre que la fissuration de la matrice (classe A) est le mécanisme le plus dominant, il commence dès le début de l'essai et implique beaucoup plus d'événements. La classe A est accompagnée dès le début de l'essai par la classe B (la décohésion). Le délaminage et la rupture de fibre apparaissent en fin d'essai dans le cas du matériau NI et en début et en fin d'essai dans le cas du matériau IP et provoque la rupture du matériau dans les deux cas. Comme on l'a déjà vu dans les essais de traction en statique et en fatigue cycliques, dans le cas des essais de fluage, le nombre de salves cumulées pour le matériau intégré est plus élevé que le nombre de salves dans le matériau non intégré.



**Figure 4.26. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de traction en fluage pour les matériaux croisés : a) éprouvette stratifiée non instrumentée (NI) et b) éprouvette stratifiée instrumentée avec le petit capteur (IP)**

## 4.7. Conclusions

L'effet de l'intégration du capteur piézoélectrique sur l'intégrité et la réponse mécanique en traction des matériaux composites stratifiés à fibres unidirectionnelles et à fibres croisées sont présentés. D'une manière générale, l'intégration du capteur piézo-électrique dans les composites provoque une faible dégradation des propriétés mécanique lorsque sa taille reste fiable. Nous avons surtout constaté que les composites instrumentés atteignent leur rupture avant les composites non instrumentés. Cependant, dans certain cas (essai statique sur le matériau UD et dans le fluage sur le matériau croisé), nous avons remarqué que le matériau intégré avec le petit capteur peut résister plus que le matériau non intégré.

Dans ce travail nous avons aussi effectué un suivi par émission acoustique de l'évolution des mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés avec et sans capteurs intégrés au cours des essais de traction. L'analyse et l'observation des signaux d'EA en fonction du type d'échantillon, ont permis de définir les principaux signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de matériau composite: fissuration matricielle, décohésion, délaminage et rupture de fibres. De point de vue comparaison entre matériau instrumenté et matériau non instrumenté, l'activité acoustique montre clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein du composite. Cet avantage réside dans le fait de la détection expérimentale des modes d'endommagement précoces et leur chronologie d'apparition, faisant ainsi révéler les performances du composite instrumenté vis-à-vis à sa réponse envers l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques.

## **Chapitre 5 :**

# **Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Matériaux Composites Sandwichs**

## Résumé

Dans ce chapitre, l'effet de l'implant piézoélectrique sur le comportement mécanique des composites sandwichs est étudié. Les résultats des essais de flexion trois-points en statique et en fatigue cyclique, effectués sur des échantillons de composites sandwichs avec et sans intégration de capteurs d'émission acoustique sont présentés. Une comparaison est menée tout d'abord en termes de comportement mécanique afin de voir l'impact de l'intégration sur les propriétés mécaniques de ces matériaux. Ensuite, les signatures acoustiques des différents mécanismes d'endommagement sont identifiées et ont montré la présence de quatre modes d'endommagement pour chaque type de matériau sandwich: fissuration de l'âme, fissuration matricielle des peaux, décohésion interfaciale peaux/âme et rupture de fibres. Activité acoustique est plus importante dans le cas du matériau instrumenté par capteur intégré et montre clairement la sensibilité de l'émission acoustique aux mécanismes d'endommagement de ce type de matériau.

## 5.1. Introduction

Une structure composite sandwich résulte de l'assemblage par collage de deux semelles ou peaux minces (de faibles épaisseurs) constituées de matériaux possédant de bonnes caractéristiques en traction (haute résistance et haut module) et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité possédant de bonnes propriétés en cisaillement. Ces matériaux connaissent un essor important, tant dans les applications les utilisant, que dans les technologies les mettant en œuvre. Ils sont ainsi largement utilisés dans tous les secteurs industriels et notamment les transports, la marine, le nautisme, l'aéronautique, l'aérospatial, les sports et loisirs, l'industrie lourde, le génie civil et l'armée. Leur consommation ne cesse d'augmenter. Les sandwichs présentent un intérêt pour les applications qui requièrent à la fois rigidité et légèreté. D'une manière générale, on trouve les matériaux sandwichs dans toutes les applications où le rapport rigidité en flexion/masse volumique apparente de la structure doit être le plus élevé. Lors de la sollicitation en flexion des matériaux sandwichs, plusieurs modes d'endommagement sont observés. Ces endommagements peuvent aussi survenir à la suite des imperfections dans le processus de fabrication, soit résulter des charges externes au cours de la vie d'opération, comme l'impact par des objets étrangers, etc. Ces modes d'endommagement peuvent interagir entre eux et aboutir à une défaillance prématurée de la structure en matériau sandwich. Ainsi, dans ce chapitre nous proposons d'analyser le comportement en flexion en statique et en fatigue cyclique des composites sandwichs avec et sans instrumentation. Une comparaison sera menée tout d'abord en termes de comportement mécanique afin de voir l'impact de l'intégration sur l'intégrité des matériaux étudiés. Ensuite, une identification des signatures acoustiques de chaque mécanisme d'endommagement dans les deux types de matériaux (avec et sans intégration) sera effectuée. Enfin, les résultats obtenus dans les différents matériaux sandwichs instrumentés par implant piézoélectrique intégrés dans la masse ou collés à la surface seront analysés en termes de sensibilité de l'émission acoustique aux mécanismes d'endommagement au cours des essais.

## 5.2. Mise en œuvre des matériaux composites sandwichs

Les matériaux considérés dans ce chapitre, sont des composites sandwichs, fabriqués au laboratoire (LAUM) en utilisant la technique du sac (moulage sous vide). Ces matériaux sont constitués de deux peaux en stratifiés croisés à fibres de verre et résine époxyde au milieu desquelles se trouve une âme en mousse PVC. Une séquence d'empilement du type  $[0_2/90_2]_s$  est choisie pour les peaux de ces matériaux. L'âme en mousse utilisée est fabriquée à partir de

polychlorure de vinyle (PVC) de masse volumique égale à  $60 \text{ kg/m}^3$ . Elle est fournie par la société Airex et commercialisée par la société SICOMIN en panneaux de  $200 \times 120 \text{ cm}^2$  de surface et 20 mm d'épaisseur. L'élaboration des matériaux sandwichs est effectuée en une seule étape: la mise en œuvre des peaux et l'adhésion peaux/âme se font en même temps (Fig. 5.1).

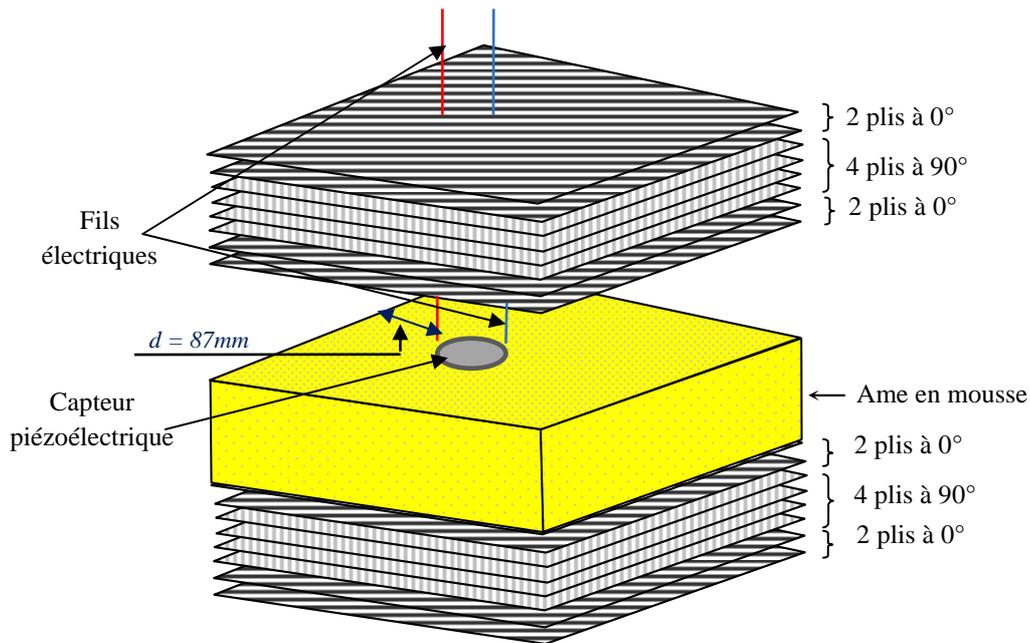


Figure 5.1. Mise en œuvre du matériau sandwich

Les mêmes capteurs piézo-électrique Pz 27 (Petit (P) et Grand (G)), utilisés pour les matériaux stratifiés, sont implantés au cours de la mise en œuvre des matériaux sandwichs. Pour chaque éprouvette, un capteur est placé entre la peau supérieure et l'âme en produisant un trou de la même taille que chaque capteur implanté, ce dernier est placé au tiers de la longueur à partir du bord de chaque éprouvette (Fig. 5.1).

Les constituants sont imprégnés à température ambiante, moulé sous vide entre le moule et le contre moule à une dépression de 30 kPa pendant 10 heures. Avant tout test, les plaques sont laissées à température ambiante pendant 2 à 3 semaines afin de permettre une polymérisation complète de la résine époxyde. Des éprouvettes en matériau sandwich de formes parallélépipédiques sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir des plaques de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ . Ces éprouvettes ayant une longueur  $L = 300 \text{ mm}$ , une largeur  $b = 40 \text{ mm}$  et une épaisseur  $e = 25 \text{ mm}$ .

### 5.3. Dispositif expérimental

Dans le but d'étudier l'effet de l'intégration du capteur sur le comportement mécanique des matériaux sandwichs et pour mettre en évidence les phénomènes d'endommagement en fonction du temps, nous avons effectué des essais de flexion trois-points sur des échantillons en sandwich avec et sans capteur implanté. Les essais de flexion en statique et en fatigue cyclique sont réalisés selon la norme ASTM D790-86 jusqu'à la rupture des matériaux avec une distance entre appuis de 250 mm (Fig. 5.2-b). A température ambiante, les essais sont effectués sur la même machine utilisée pour les matériaux stratifiés (INSTRON modèle 8801) dont le contrôle et l'acquisition des données sont effectués par ordinateur. La charge appliquée est contrôlée avec la cellule de force de 10 kN. Le déplacement est mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement linéaire (LVDT). Le dispositif expérimental est donné dans la figure 5.2-a.

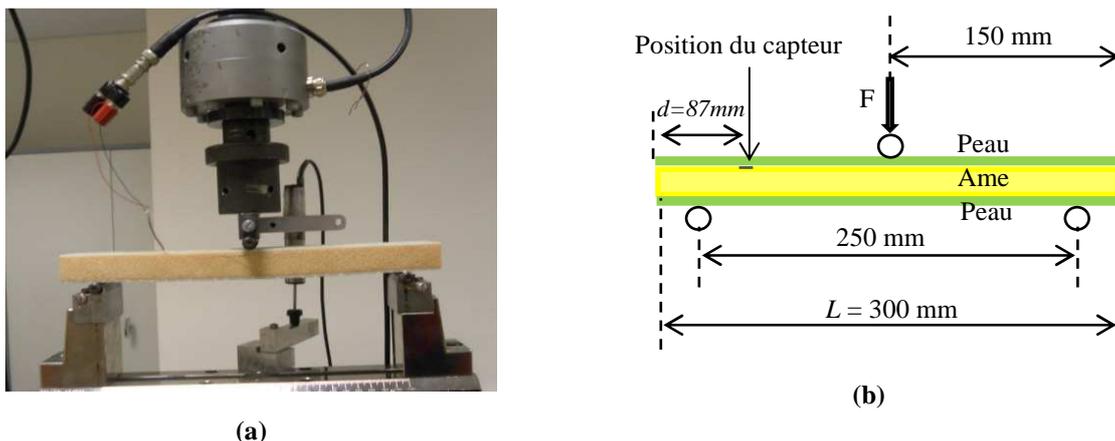


Figure 5.2. a) Essai de flexion 3-points sur une éprouvette en matériau sandwich intégrée et b) Schéma de principe de l'essai de flexion 3-points

Pour les essais en statique, les échantillons sont chargés avec une vitesse de déplacement de 5 mm/min. La charge et le déplacement des échantillons sont enregistrés durant l'essai. Les essais de fatigue sont menés en contrôlant le déplacement. La forme d'onde est sinusoïdale d'une fréquence de 5 Hz. Le déplacement moyen  $d_{moy}$  est maintenu constant, et représente 30% du déplacement à la rupture en statique. Une amplitude de déplacement de 15% du déplacement à la rupture en statique est imposée. Entre trois et cinq éprouvettes sont testées pour chaque type de matériau et pour chaque cas de charge.

Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de la mesure d'EA avec le système d'acquisition (EPA). Dans le cas du capteur collé à la surface, le capteur de l'EA est collé sur la peau supérieure de l'éprouvette, il est placé à 87 mm du bord de chaque éprouvette.

## 5.4. Résultats

### 5.4.1. Résultats des essais statiques

#### 5.4.1.1. Comportement mécanique

La figure 5.3-a représente une comparaison des résultats des trois types d'éprouvettes sandwichs testées en flexion statique : éprouvette non instrumentée (NI), éprouvette instrumentée avec le petit capteur (IP) et éprouvette instrumentée avec le grand capteur (IG). Cette figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement. La comparaison des résultats montre que le comportement des trois types d'éprouvettes est similaire. L'éprouvette avec petit capteur (IP) atteint la rupture au même niveau de charge et de déplacement que l'éprouvette sans capteur (NI) alors que l'éprouvette avec grand capteur (IG) atteint la rupture avant les deux autres.

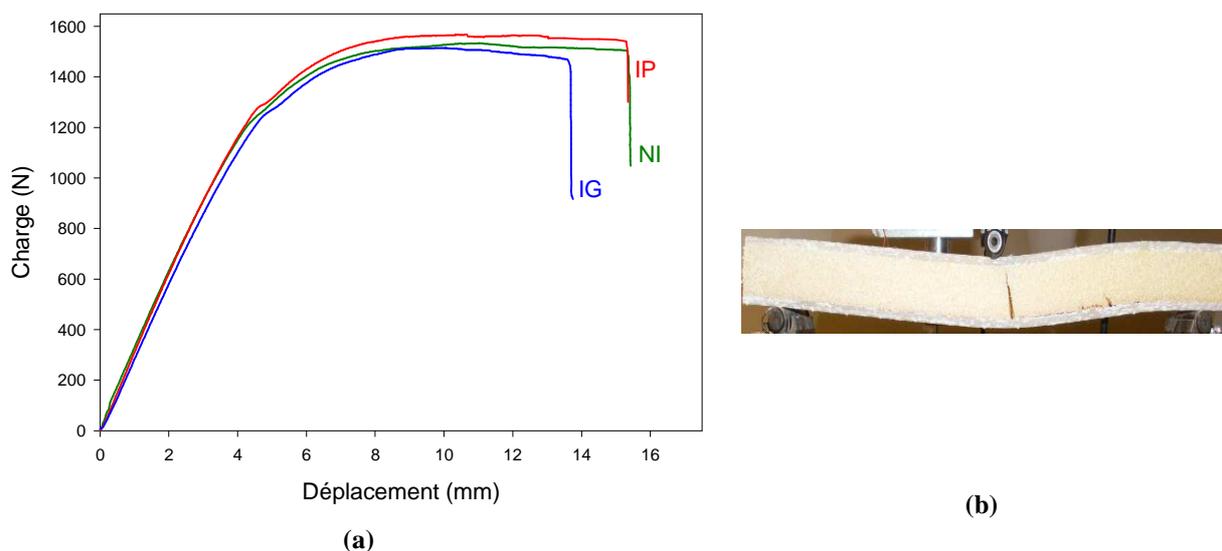


Figure 5.3. a) Courbes charge-déplacement déduites des essais de flexion en statique pour les trois types d'éprouvettes sandwichs NI, IP et IG et b) rupture d'une éprouvette avec capteur intégré

Les courbes charge-déplacement pour les trois types de matériaux font apparaître trois zones distinctes:

- La première zone caractérisée par un comportement linéaire des poutres pour les faibles déplacements et correspond à un comportement élastique réversible. Elle permet de mesurer les caractéristiques élastiques des poutres en matériau sandwich en flexion trois points,
- La seconde zone présente un comportement non linéaire, la charge croît progressivement lorsque le déplacement augmente. Ce comportement est caractérisé par la compression de l'âme due au chargement appliqué et localisé sur la peau supérieure

conduisant à l'éclatement des cellules de l'âme en mousse PVC. Cette zone dépend essentiellement des propriétés de l'âme.

- Dans la dernière zone, la charge décroît progressivement lorsque le déplacement augmente, jusqu'au moment où une chute assez rapide de la charge se produit conduisant à la rupture finale des éprouvettes.

Du point de vue endommagement, nous avons observé tout d'abord une fissuration des couches à 90°, puis lorsque la charge augmente, des ruptures de fibres suivies de la rupture induite dans la peau au contact de l'appui central. Quelques fois, il a été observé une rupture par cisaillement de l'âme due à une décohésion entre la peau et l'âme. L'initiation de ces mécanismes d'endommagement ainsi que la rupture des éprouvettes sont observées loin de la position du capteur intégré comme le montre la figure 5.3-b.

La charge et le déplacement à la rupture ainsi que la rigidité des échantillons testés sont déterminés. Le tableau 5.1 représente les caractéristiques mécaniques obtenues en flexion 3-points des différents types de matériau. Nous observons que les valeurs des caractéristiques mécaniques de l'éprouvette intégrée avec le petit capteur (IP) sont du même ordre de grandeur que celles de l'éprouvette sans intégration (NI). Les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette intégrée avec le grand capteur (IG) sont légèrement inférieures. La rigidité de l'éprouvette IP présente une légère réduction de 4%, alors qu'une réduction de 13% est observée pour l'éprouvette IG. L'intégration des capteurs au sein des matériaux influe surtout sur la charge et le déplacement à la rupture qui diminuent lorsque la taille du capteur augmente.

*Tableau 5.1. Caractéristiques mécaniques des différents types d'éprouvettes*

Sandwich	NI	IP	IG
Charge à la rupture (N)	1532,6	1566	1514,5
Déplacement à la rupture (mm)	15.5	15.5	13.8
Rigidité (N/mm)	329	317	286

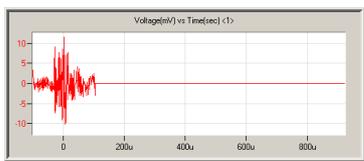
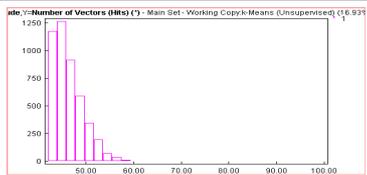
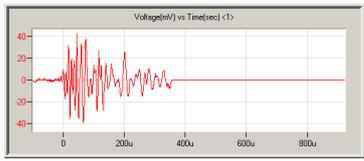
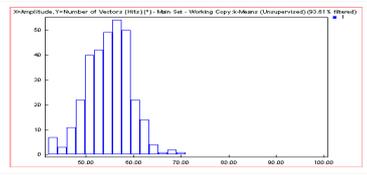
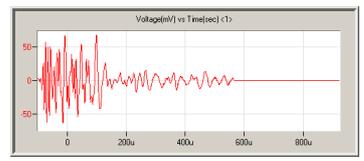
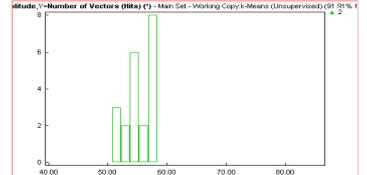
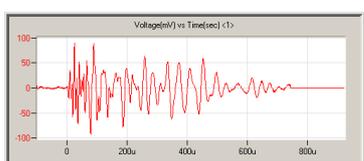
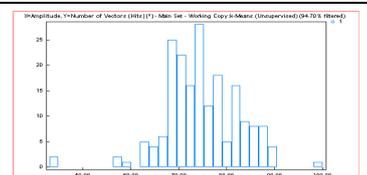
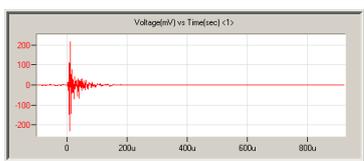
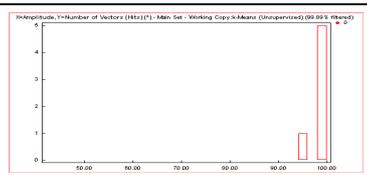
#### **5.4.1.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement**

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'étude par émission acoustique des mécanismes d'endommagement des matériaux plus complexes qui sont des sandwichs constitués de deux peaux en stratifié et d'une âme en mousse PVC. Ce sont des composites dont les mécanismes d'endommagement sont moins maîtrisés. Par ailleurs, il existe peu d'étude sur l'évaluation non destructive de ces matériaux. L'objectif de cette partie est donc d'étudier l'endommagement de la structure en matériau sandwich à partir des signaux d'EA

collectés. Pour cela, la connaissance des signaux acoustique qui correspond aux mécanismes d'endommagement dans un matériau composite sandwich est nécessaire.

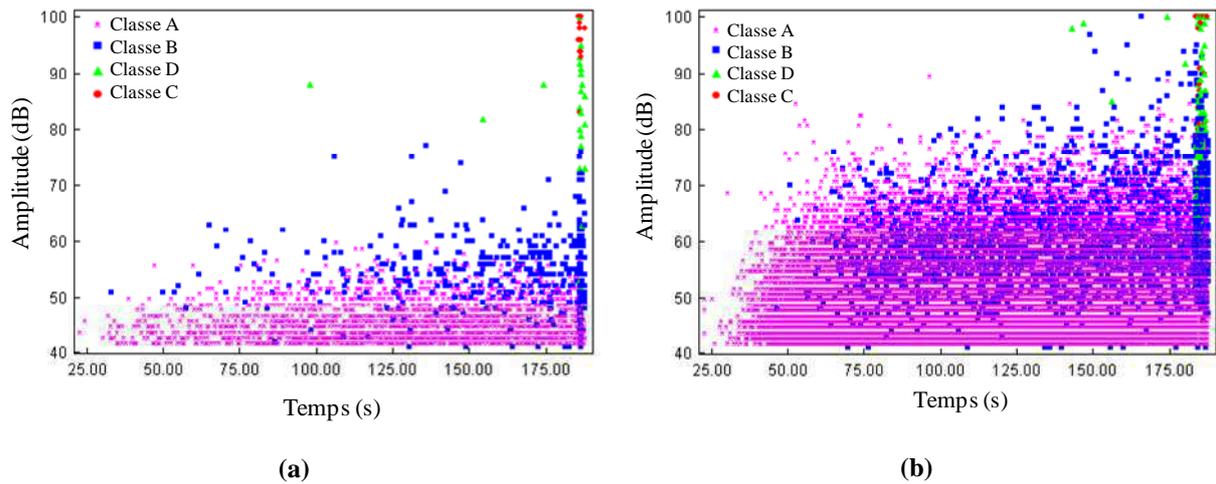
Au cours des essais statiques en flexion 3-points, une synthèse des principaux paramètres temporels, calculés sur les salves d'EA en fonction des différents types d'endommagement, est effectuée. La classification par la méthode des  $k$  moyennes est appliquée en prenant cinq classes. Afin de pouvoir associer chaque classe obtenue en sortie de l'algorithme de classification aux mécanismes d'endommagement correspondant: fissuration de la mousse, fissuration matricielle, décohésion interfaciale, délaminage et rupture de fibres. Les caractéristiques des formes de chaque classe sont prises en compte. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.2. Ce tableau donne la distribution d'amplitude ainsi que la forme d'onde pour chaque type de signal.

**Tableau 5.2. Distributions d'amplitude et formes d'onde des différents mécanismes d'endommagement dans un matériau sandwich.**

Mécanisme d'endommagement	Forme d'onde du signal	Distribution de l'amplitude pour chaque classe
Fissuration de l'âme (Classe A)		
Fissuration matricielle (Classe B)		
Délaminage (Classe E)		
Décohésion interfaciale (Classe D)		
Rupture de fibres (Classe C)		

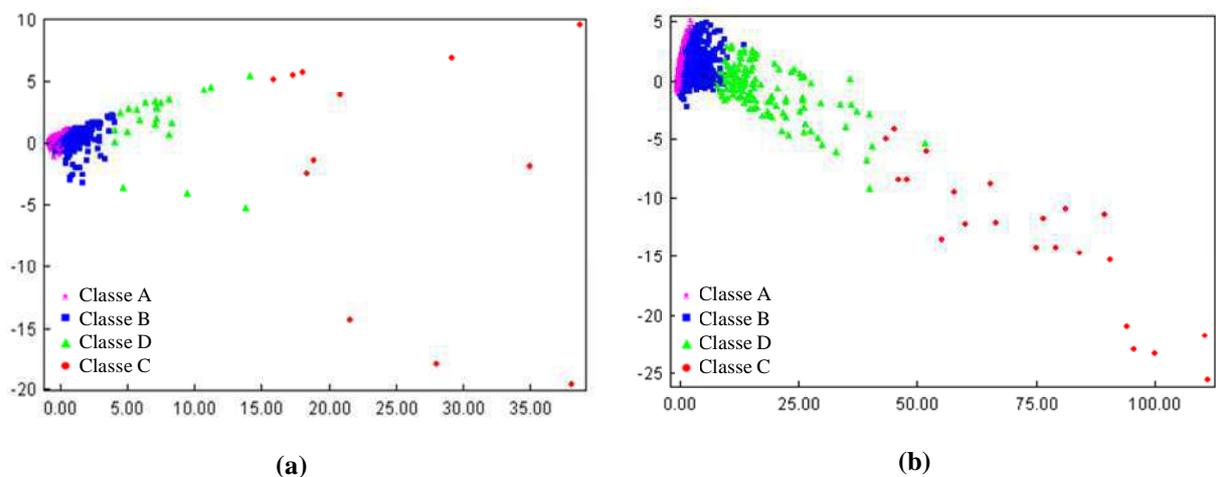
Basé sur des travaux effectués au laboratoire [115] et ceux de Quispitupa et *al.* [7,8] et d'après les formes d'onde obtenues, la signature acoustique de la fissuration de l'âme (classe A) est caractérisée par des formes d'onde de durée moyenne, un temps de montée assez lent, de faible amplitude et une énergie relativement faible. Pour les signaux de la classe B de la fissuration de la résine, les formes d'onde sont légèrement différentes de ceux de la classe A, avec un temps de montée ainsi qu'un temps de décroissance assez lents et des amplitudes et des énergies plus élevées. Pour les formes d'onde de la classe E (le délaminage), elles ont presque les mêmes caractéristiques que les formes d'onde de la classe B. Pour les signaux de la décohésion interfaciale (classe D), les formes d'onde sont caractérisées par une durée très longue, un temps de montée lent, une amplitude plus élevée et ils sont assez énergétiques. Les signaux de la classe C (rupture de fibres) ont une durée très courte, ils sont caractérisés par un temps de montée et un temps de décroissance très courts avec des amplitudes et des énergies assez importantes.

L'analyse des différents paramètres temporels ainsi que les formes d'onde pour chaque classe montrent que les classes B et E ont des paramètres d'EA ainsi que des formes d'ondes très proches. En plus, la classe E a un nombre de salves très négligeable devant le nombre de salves de la classe B. Une nouvelle classification est donc appliquée aux signaux d'EA avec quatre classes correspondant aux quatre mécanismes d'endommagement: fissuration de l'âme (classe A), fissuration matricielle (classe B), décohésion interfaciale (classe D) et rupture de fibres (classe C). Un exemple de la nouvelle distribution d'amplitude en fonction du temps est illustré dans la figure 5.4-a. Cette figure présente la classification des signaux d'EA recueillis au cours de l'essai de flexion statique sur le matériau sandwich sans capteur intégré (NI). Les signaux de classe A, d'amplitude entre 41 et 60 dB, correspondent à la fissuration de l'âme. Les signaux de classe B, d'amplitude entre 41 et 78 dB, proviennent de la fissuration matricielle. La classe D qui contient des signaux d'amplitude comprise entre 72 et 93 dB, ces salves apparaissent juste après les microfissurations de la résine, ils sont probablement issus des décohésions interfaciales peau/âme. La classe C qui contient des signaux dont l'amplitude est supérieure à 92 dB et qui sont très énergétiques est associée à la rupture des fibres.



**Figure 5.4.** Distribution de l'amplitude des signaux de l'EA en fonction du temps au cours des essais de flexion en statique pour les matériaux sandwichs : a) éprouvette non instrumentée (NI) et b) éprouvette instrumentée avec le petit capteur (IP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement sont reportées dans les figures 5.5 et 5.6 respectivement. L'ACP (Fig. 5.5) est réalisée toujours afin de visualiser les résultats dans un sous-espace à deux dimensions. La représentation montre la présence de quatre classes qui sont bien identifiées.



**Figure 5.5.** Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode des k-moyennes pour les matériaux sandwichs testés en flexion en statique: a) éprouvette non instrumentée (NI) et b) éprouvette instrumentée avec le petit capteur (IP)

Dans les essais statiques appliqués aux matériaux sandwichs avec et sans intégration de capteur piézoélectrique, la charge est augmentée progressivement jusqu'à la rupture totale du matériau, de sorte que la progression de l'endommagement dépend du niveau de chargement croissant. Il est à noter que l'activité acoustique des échantillons se situent principalement autour des amplitudes entre 40 et 60 dB pour l'éprouvette non instrumentée (NI) et entre 40 et 75 dB pour l'éprouvette avec capteur intégré (IP) durant les trois quarts de l'essai de flexion

(Fig. 5.4). Après un chargement important, la distribution d'amplitude devient très importante et l'amplitude des signaux atteint parfois les 100 dB.

La comparaison de la distribution d'amplitude pour les deux types de matériaux montre que dans le cas du composite IP, les événements d'amplitude élevée ont commencé plus tôt pour le sandwich instrumenté (IP) que le sandwich sans capteur intégré (NI) (Fig. 5.4-b).

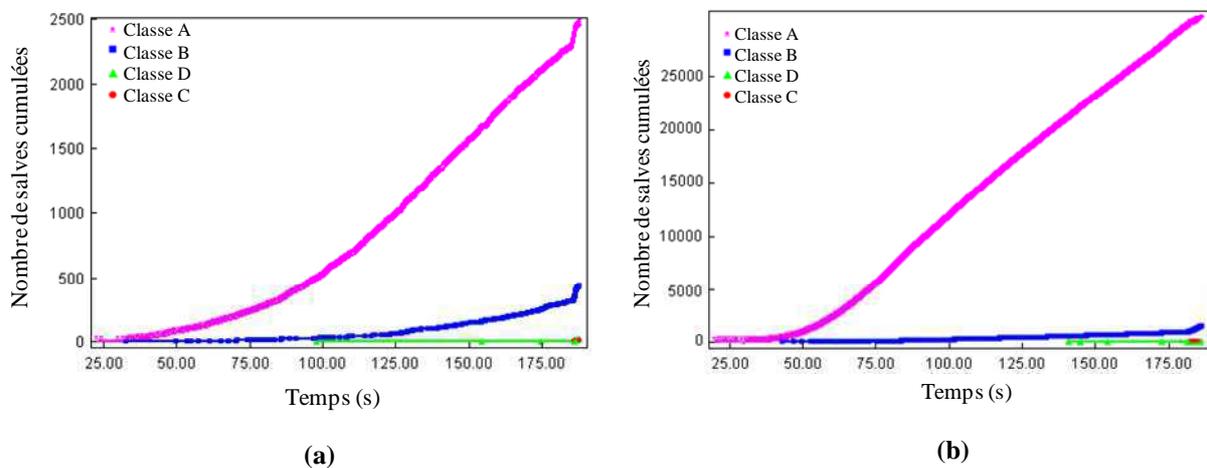
La classification a permis également de détecter l'initiation et l'évolution de chaque mécanisme d'endommagement (Fig. 5.6-a) :

i) La fissuration de l'âme en mousse (classe A), en raison de la faible capacité à supporter des charges. Elle apparaît dès le début des essais et représente un pourcentage très important (80%) des événements d'EA.

ii) Elle est suivie par la fissuration matricielle (classe B), en raison du comportement fragile de la matrice en résine époxyde.

iii) Au milieu de l'essai apparaît la décohésion de l'interface peau/âme (classe D), en raison de l'action double (flexion et transfert de charge en cisaillement entre l'âme et la peau).

iv) A la fin de l'essai, on observe des signaux de la rupture de fibres (classe C) suivie par rupture en cisaillement dans l'âme provoquant ainsi la rupture catastrophique du matériau.



**Figure 5.6. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion en statique pour les matériaux sandwichs : a) éprouvette non instrumentée (NI) et b) éprouvette instrumentée avec le petit capteur (IP)**

L'âme en mousse PVC est caractérisée par des propriétés amortissantes importantes, ce qui provoque l'absorption des ondes acoustique. Pour cette raison, nous avons intégré le capteur de l'EA à l'intérieur du matériau sandwich entre la peau et l'âme. L'augmentation du nombre de salves cumulés de  $3.10^3$  à  $32.10^3$  (Fig. 5.6) des différents mécanismes d'endommagement entre matériau instrumenté et non instrumenté, explique clairement

l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein de l'âme du sandwich. Cet avantage réside dans le fait de la détection expérimentale des modes d'endommagement qui n'étaient pas détectés par le capteur de surface (Fig. 5.6-a).

#### 5.4.1.3. Observation des faciès de rupture

Afin de vérifier que l'implantation du capteur n'affecte pas fortement l'intégrité du matériau, des micrographies par microscope optique sont effectuées après rupture. Cette observation est réalisée sur une coupe transversale au niveau du capteur implanté dans une éprouvette en matériau sandwich intégrée et testée en statique est donnée dans la figure 5.7. Cette observation a permis de visualiser nettement les zones entourant le capteur implanté et mis en évidence que le capteur piézoélectrique est enrobé en haut par la peau en stratifié et en bas par l'âme en mousse. Les zones qui entourent le capteur ne sont pas affectées, on observe la décohésion en haut du capteur et du côté de l'âme, le capteur est encore bien collé. Les mécanismes d'endommagement les plus prépondérants pour cette zone de l'éprouvette sont la fissuration de la matrice et la décohésion peau/âme.

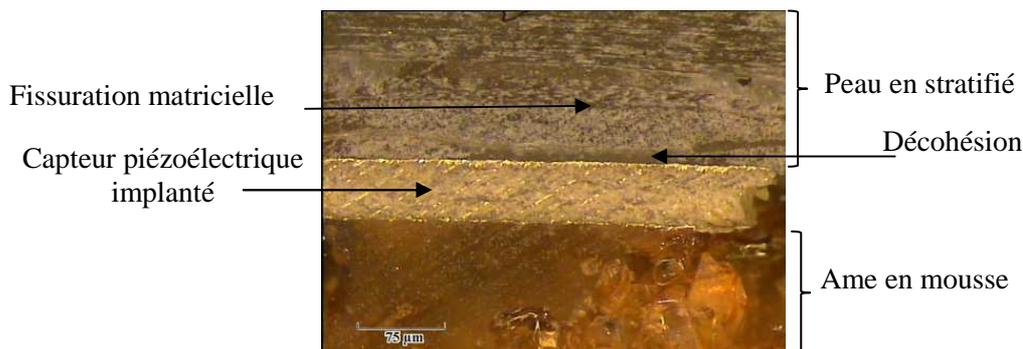


Figure 5.7. Micrographie obtenue par microscope optique de la section transversale autour du capteur piézoélectrique implanté dans une éprouvette en matériau sandwich après rupture

### 5.4.2. Résultats des essais de fatigue cyclique

#### 5.4.2.1. Comportement mécanique

Au cours des essais de fatigue cyclique effectués avec un déplacement imposé égal à  $4 \pm 2$  mm ( $30\% \pm 15\%$  du déplacement à la rupture en statique), nous avons enregistré l'évolution de la charge maximale  $F_{max}$  en fonction du nombre de cycles. Sur la figure 5.8, nous avons reporté l'évolution de la perte de la charge maximale (charge maximale  $F_{max}$  rapportée à celle obtenue dans le premier cycle  $F_{0max}$ ) en fonction du nombre de cycles de fatigue pour les mêmes échantillons que ceux testés en statique : éprouvette sans capteur intégré (NI), éprouvette avec petit capteur intégré (IP) et éprouvette avec grand capteur intégré (IG).

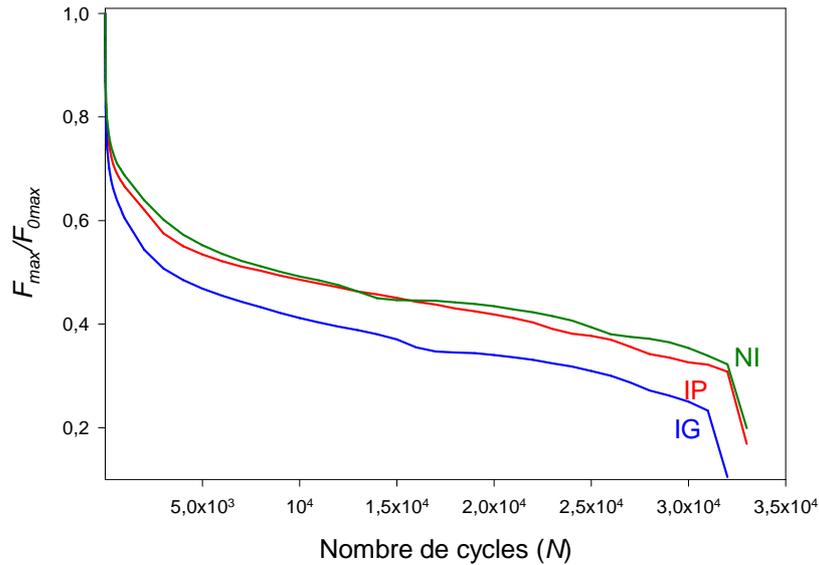


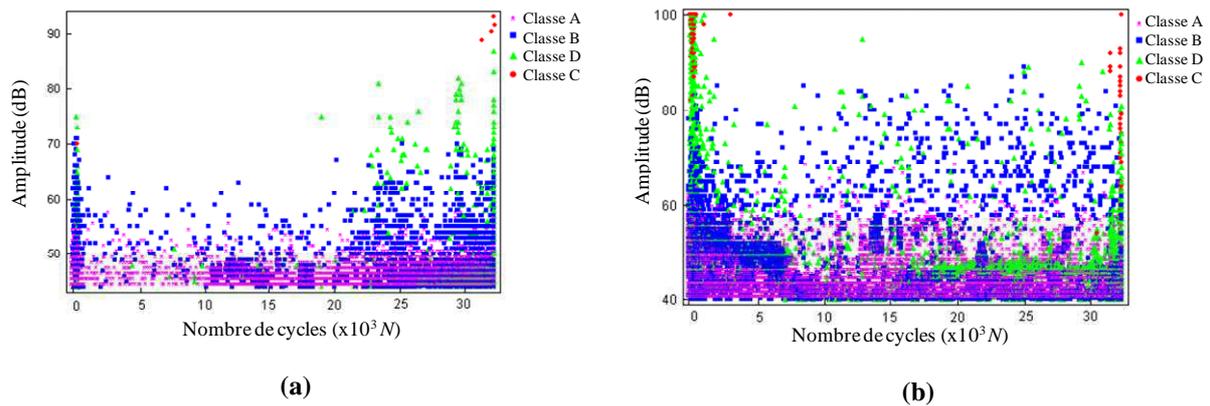
Figure 5.8. Evolution de  $F_{max}/F_{0max}$  en fonction du nombre de cycles au cours des essais de fatigue pour les trois types d'éprouvettes sandwichs NI, IP et IG

La comparaison des résultats obtenus montre que le comportement en fatigue des éprouvettes des trois matériaux est similaire. Comme constaté par de nombreux auteurs [112-114], l'évolution de la rigidité du matériau sandwich en fatigue cyclique, représentée par la perte de la charge jusqu'à la rupture (Fig. 5.8), est divisée en trois phases: dans un premier temps se manifeste une diminution rapide de la rigidité dès les premiers cycles caractérisée par l'initiation et la multiplication d'endommagement. Dans la deuxième phase qui correspond à la quasi-totalité de la durée de vie du matériau, la diminution devient plus lente et correspond à une propagation stable des mécanismes d'endommagement. Enfin dans la troisième phase très courte, la perte de la rigidité s'accélère brutalement correspondant à la rupture des fibres entraînant la rupture de la peau supérieure et de l'âme provoquant ainsi la rupture totale du matériau.

La durée de vie de l'éprouvette IP est du même ordre de grandeur que celle de l'éprouvette NI, par contre, l'éprouvette IG a une durée de vie légèrement inférieure. Nous remarquons aussi que le taux de dégradation de l'éprouvette IG est supérieur à celui des éprouvettes NI et IP.

#### 5.4.2.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

L'analyse des résultats de la classification des signaux d'EA recueillis au cours des essais de fatigue sur les composites sandwichs avec et sans capteur intégré (IP et NI), est présentée sur les figures 5.9 et 5.10.



**Figure 5.9. Distribution de l'amplitude des signaux d'EA en fonction du nombre de cycles au cours des essais de flexion en fatigue pour les matériaux sandwichs : a) épreuve non instrumentée (NI) et b) épreuve instrumentée avec le petit capteur (IP)**

Comme pour les essais statiques, dans le cas des essais de fatigue, nous avons observé la présence des mêmes mécanismes d'endommagement à savoir : la fissuration de l'âme (classe A), la fissuration matricielle (classe B), la décohésion interfaciale (classe D) et la rupture de fibres (classe C). La distribution de l'amplitude en fonction du nombre de cycles représenté dans la figure 5.9, montre que l'activité acoustique est divisée en trois zones:

- Dans la première zone (du début de la fatigue jusqu'à  $\approx 10^3$  cycles), l'activité acoustique est très importante. Les amplitudes de ces signaux sont dans l'intervalle de 40 à 75 dB pour l'éprouvette NI et de 40 à 100 dB pour l'éprouvette IP. Cette activité correspond à l'initiation et à la multiplication des microfissures dans la partie supérieure de l'âme en compression juste en dessous de l'appui central de chargement à une distance de 3 à 5 mm de l'interface entre la peau supérieure et l'âme, accompagnés par la fissuration de la résine dans la peau supérieure. La fissuration de l'âme conduit à la décohésion de l'interface peau/âme en particulier dans la zone de compression près de la fissure (localisée à proximité du point d'application de la charge). La décohésion de l'interface et la rupture de fibres sont révélés par une activité acoustique d'amplitude un peu plus élevée.

- Dans la deuxième zone, on observe une diminution de l'activité acoustique avec des signaux d'amplitude entre 40 à 65 dB pour l'éprouvette NI et entre 40 à 85 dB pour l'éprouvette IP. Cette phase est due à la propagation de trois modes d'endommagement: la fissuration de l'âme, la décohésion interfaciale et la fissuration de la matrice. Cette phase constitue 80% de la durée de vie en fatigue du matériau.

- Dans la troisième zone, l'activité acoustique redevient très significative et très énergique où l'amplitude peut atteindre les 100 dB. Cette phase, très courte, correspond à la propagation rapide des microfissures qui deviennent plus localisées. Dans cette partie, on observe la

création de la décohésion de l'interface entre l'âme et la peau inférieure le long de la longueur de l'éprouvette qui entraîne une rupture par cisaillement de l'âme en mousse et provoque ainsi la rupture finale de l'éprouvette en fin de l'essai. L'activité acoustique de cette phase couvre toutes les gammes d'amplitudes et correspondent à la propagation de plusieurs mécanismes d'endommagement. Pour l'éprouvette intégrée, tous les modes d'endommagement apparaissent du début et continuent jusqu'à la fin de l'essai.

La comparaison des matériaux avec et sans intégration de capteur montre que la fissuration de l'âme (classe A) est le mécanisme le plus dominant (Fig. 5.10). En outre, il est à noter que le capteur implanté a une excellente capacité de détection des signaux d'émission acoustique : le nombre de salves cumulées évolue de  $87.10^3$  pour le matériau sans capteur intégré (NI) à  $172.10^3$  pour le matériau avec un petit capteur intégré (IP).

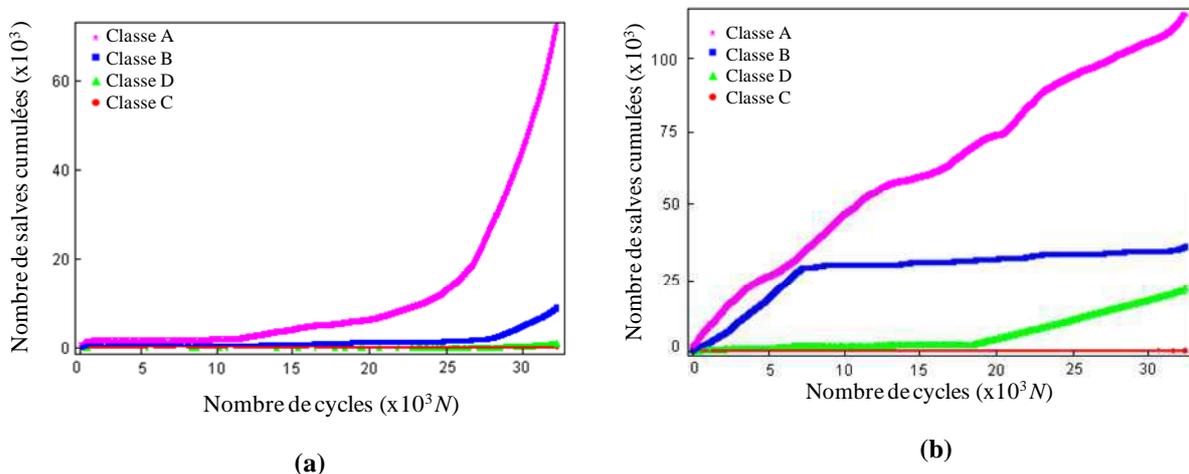


Figure 5.10. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de flexion en fatigue pour les matériaux sandwichs : a) éprouvette non instrumentée (NI) et b) éprouvette instrumentée avec le petit capteur (IP)

## 5.5. Conclusions

Dans ce chapitre, l'effet de l'intégration du capteur sur le matériau sandwich est étudié. La comparaison des résultats des différents type d'essais de flexion (statique et fatigue) pour les deux matériaux avec et sans intégration de capteur est réalisée. Les résultats obtenus montre que l'incorporation du piézoélectrique au sein du matériau sandwich provoque une faible dégradation de ses propriétés mécaniques et diminue légèrement sa durée de vie en fatigue.

La classification des signaux d'EA montre la présence de quatre modes d'endommagement pour chaque type de matériau sandwich : fissuration de l'âme du sandwich, fissuration matricielle des peaux, décohésion interfaciale peau/âme et rupture de fibres avec une activité acoustique plus importante dans le cas du matériau instrumenté par capteur intégré.

## **Chapitre 6 :**

# **Contrôle de Santé Intégré par Emission Acoustique des Structures en Matériaux Composites**

## Résumé

Dans ce chapitre, l'influence de l'intégration de plusieurs capteurs dans des structures en matériaux composites est étudiée. Des plaques et des structures de formes simples, constituées de composites stratifiés et de matériaux sandwichs, sont considérées. Le comportement mécanique, l'activité acoustique ainsi que la localisation des sources d'endommagement dans différentes structures avec et sans implants piézoélectriques sont comparés. L'analyse des résultats obtenus a permis de mieux cerner l'influence de l'impact de l'intégration des capteurs sur le comportement mécanique des différentes structures soumises à différentes sollicitations. Ensuite, l'analyse et l'observation des signaux d'EA ont permis de définir les principaux signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de matériau composite (stratifié et sandwich). De point de vue comparaison entre structures instrumentées et non instrumentées, l'activité acoustique est plus importante dans le cas du matériau instrumenté. La localisation des sources d'endommagement a montré que les événements acoustiques sont apparus loin des positions des capteurs intégrés.

## **6.1. Introduction**

Le développement récent des techniques de contrôle de santé intégré ouvre de nouvelles perspectives afin de garantir l'intégrité des structures en matériaux composites. En effet, la présence permanente de capteurs au sein d'une structure fournit des informations bien précises sur son état de santé (localisation et taille du défaut), aussi régulièrement qu'on le souhaite, de façon automatique et sans intervention humaine. Ces procédés constituent un premier pas vers les structures dites «intelligentes».

Pour localiser un défaut dans un matériau par la technique d'EA, il est nécessaire d'utiliser au moins deux capteurs piézoélectriques. Les signaux issus de plusieurs capteurs, permettent de détecter et localiser les sources d'endommagement comme le délaminage dans les plaques et des structures en matériaux composites. Dans les chapitres précédents, nous avons étudié les potentialités et l'effet de l'intégration des capteurs piézoélectriques pour des cas simples (poutres). L'étude de cet effet peut être également appliquée à des structures plus complexes. L'objectif de la présente étude est consacré à l'application de la méthode d'implant piézoélectrique à des structures 2D et 3D de formes simples en matériaux composites stratifiés et sandwichs. L'analyse du comportement mécanique, de l'activité acoustique et la localisation des sources d'endommagement dans les plaques et dans les structures en composites stratifiés et sandwichs avec et sans implants piézoélectriques seront effectuées. Les résultats obtenus à partir des essais classiques effectués sur les différentes structures avec et sans intégration seront comparés. L'analyse des résultats expérimentaux permettra de mieux cerner l'influence de l'impact de l'intégration des capteurs sur le comportement mécanique des structures soumis à différentes sollicitations. Ensuite, la technique d'émission acoustique sera utilisée pour identifier et localiser les mécanismes d'endommagement de ces structures au cours du chargement.

## **6.2. Application de l'implant piézoélectrique à une structure 2D (plaque) en matériaux composites**

### **6.2.1. Mise en œuvre des plaques**

Les plaques étudiées dans ce chapitre sont des composites stratifiés à plis croisés, associée à une âme en PVC pour les sandwichs. La fabrication de ces plaques de dimensions  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  est réalisée au sein du laboratoire (LAUM). Le dosage utilisé est de 50% du taux de fibres de verre de densité  $300 \text{ g/m}^3$  et de 50% du taux de résine époxyde et une âme en

mousse PVC de  $60 \text{ kg/m}^3$  de masse volumique. La mise en œuvre des plaques est réalisée par moulage sous vide (technique du "sac"). Les différentes couches sont stratifiées et imprégnées à température ambiante, puis moulées sous vide entre le moule et le contre moule après l'interposition de divers tissus de moulage. L'interposition d'un moule et d'un contre moule permet de contrôler l'épaisseur des plaques réalisées. L'ensemble est ensuite mis sous vide (dépression de 30 kPa) dans une poche pendant 8 heures à température ambiante. Quatre capteurs piézo-électriques Pz27 de petite taille (0,5 mm d'épaisseur et 5 mm de diamètre) sont implantés dans chaque plaque. Les plaques ainsi fabriquées sont exposées à température ambiante pendant 2 à 3 semaines afin d'avoir une polymérisation complète de la résine époxyde. La figure 6.1 donne les dimensions de la plaque étudiée ainsi que la position des capteurs dans les plaques.

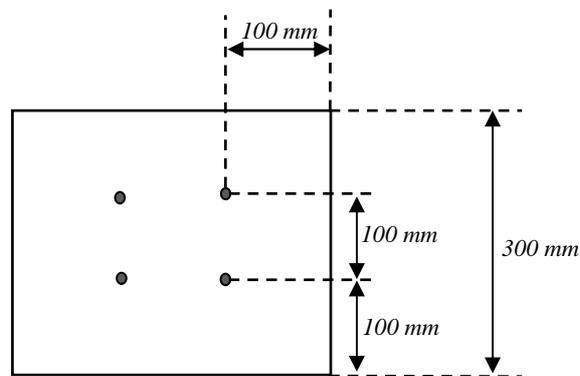


Figure 6.1. Dimensions des plaques étudiées et positions des capteurs d'EA

Deux types de matériaux composites sont considérés:

- Plaques en composite stratifié croisé de séquence d'empilement  $[0_6/90_6]_s$  (Fig 6.2-a) d'épaisseur 7 mm.
- Plaques en composite sandwich constitué de deux peaux en stratifié croisé  $[0_2/90_2]_s$  et une âme en mousse PVC (Fig. 6.2-b) d'épaisseur 25 mm.

Les capteurs piézo-électriques Pz 27 sont implantés au cours de la mise en œuvre des matériaux. Dans le cas des plaques stratifiées, les capteurs sont placés entre les plis dans le plan neutre du matériau. Dans le cas des plaques sandwichs, les capteurs sont placés entre la peau supérieure et la mousse en produisant un petit trou de la même taille que le capteur implanté.

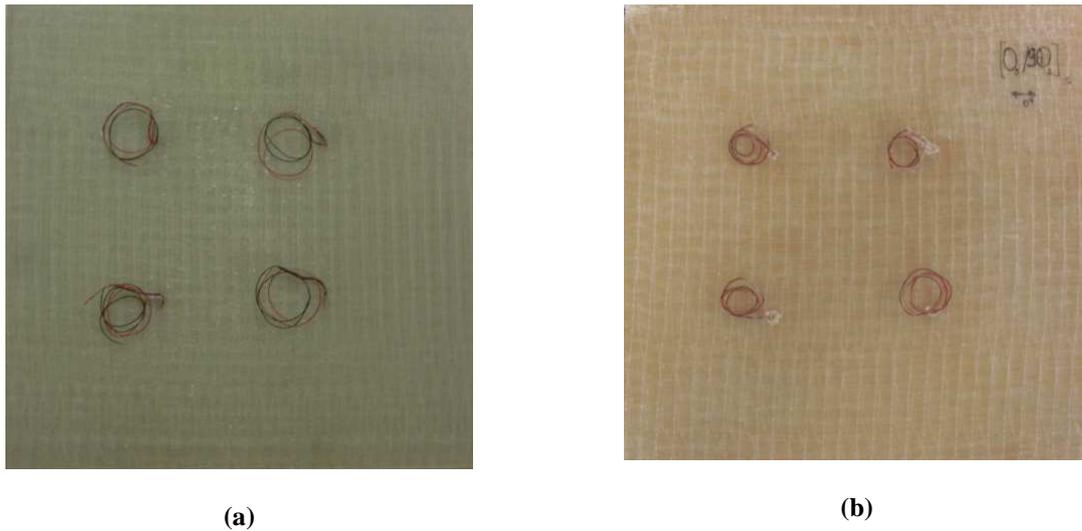


Figure 6.2. Plaques en matériaux composites avec quatre implants piézoélectriques : a) composite stratifié et b) matériau sandwich

### 6.2.2. Dispositif expérimental

Les plaques en appuis simples sur quatre cylindres sont sollicitées en flexion statique à l'aide d'une bille de diamètre 56 mm, montée dans la cellule de force comme le montre la figure 6.3. Les essais sont effectués sur une machine hydraulique universelle de type INSTRON modèle 8801 munie d'une cellule de force de 100 kN dont le pilotage et l'acquisition des données sont effectués par ordinateur. Les plaques sont testées en statique jusqu'à la rupture avec une vitesse de déplacement de 2 mm/min dans le cas du matériau stratifié et de 5 mm/min dans le cas du matériau sandwich. La charge et le déplacement de chaque plaque sont enregistrés au cours des essais.

Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de la mesure d'émission acoustique avec le système d'acquisition (EPA). Dans le cas des plaques non intégrées, les quatre capteurs d'EA sont collés avec une graisse silicone sur la surface de la plaque dans les mêmes positions que les capteurs implantés dans la masse.

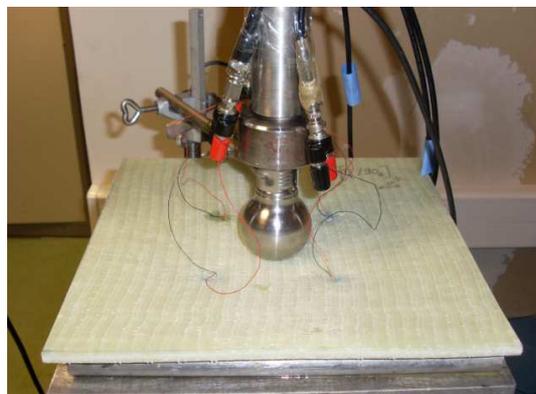


Figure 6.3. Essai de flexion d'une plaque stratifiée avec 4 capteurs intégrés

L'un des objectifs de ce chapitre est de localiser la zone où se produit l'endommagement au sein du matériau. Pour avoir une localisation plane (2D), nous avons donc utilisé 4 capteurs piézoélectriques dans le cas des plaques. La méthode la plus utilisée consiste à mesurer les différences de temps d'arrivées ( $\Delta t$ ) d'un même signal à plusieurs capteurs. La mesure des ( $\Delta t$ ) est généralement déclenchée par l'arrivée de l'onde d'émission acoustique au premier capteur atteint, et clôturée par son passage au dernier capteur. Lorsque la différence de temps d'arrivée d'un même signal à deux capteurs donnés est connue, le lieu des points auquel appartient la source est défini par :  $Vx(\Delta t) = cte$  Où  $V$  est la vitesse de propagation des ondes dans le matériau.

### 6.2.3. Résultats des essais sur les plaques en matériau stratifié

#### 6.2.3.1. Comportement mécanique

Le comportement des deux types de plaques stratifiées avec et sans intégration (IP et NI) est reporté dans la figure 6.4. Cette figure donne les courbes force-déplacement déduites des essais statiques. Sur ces courbes, nous observons d'abord un comportement élastique linéaire permettant de déterminer les caractéristiques élastiques des matériaux, puis une augmentation de la rigidité des matériaux qui conduit à une augmentation prononcée de la charge pour un déplacement supérieur à 10 mm. Enfin, un plateau à force constante pour des valeurs de déplacement élevées jusqu'à la rupture finale des plaques, qui s'explique par le fait que l'on atteint la charge maximale de poinçonnement du stratifié sous l'effet de la charge localisée. Les résultats obtenus dans les deux plaques stratifiées avec et sans intégration de capteurs sont similaires. Nous avons reporté dans le tableau 6.1 les caractéristiques mécaniques déduites des essais de flexion effectués sur les deux plaques (NI et IP). Ce tableau donne les valeurs de la charge et du déplacement à la rupture ainsi que la rigidité des matériaux. Ces résultats montrent que l'implantation de capteurs d'EA au sein du matériau n'affecte ni la charge, ni le déplacement à la rupture, alors qu'une réduction notable de la rigidité est observée.

*Tableau 6.1. Caractéristiques mécaniques des plaques stratifiées avec et sans implants piézoélectriques*

Plaque	NI	IP
Charge à la rupture (kN)	35	35,3
Déplacement à la rupture (mm)	29	32
Rigidité (kN/mm)	0,6	0,4

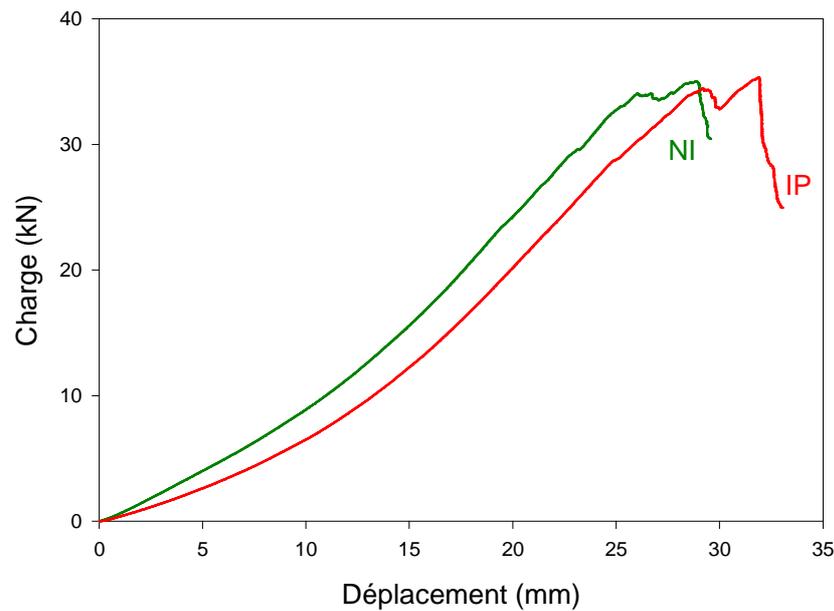


Figure 6.4. Courbes charge-déplacement déduites des essais de flexion en statique sur les deux plaques stratifiées avec et sans intégration (IP et NI)

### 6.2.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Les signaux acoustiques collectés au cours des essais sont analysés par la méthode de classification des  $k$  moyennes. La figure 6.5 présente les résultats de la classification en termes de distribution d'amplitude en fonction du temps. On distingue la présence des quatre modes d'endommagement dans les plaques en matériau stratifié: la fissuration matricielle (classe A), la décohésion de l'interface fibre/matrice (classe B), le délaminage inter-plis (classe D) et la rupture des fibres (classe C).

La distribution de l'amplitude en fonction du temps pour la plaque non instrumentée (Fig. 6.5-a) montre que l'initiation de l'endommagement est causée par la fissuration de la matrice. Cependant, les résultats obtenus dans la plaque avec capteurs intégrés (Fig. 6.5-b) mis en relief l'initiation et l'évolution des fissurations dû à la décohésion en même temps que la fissuration matricielle. Ces deux mécanismes d'endommagement se propagent par la suite le long des fibres et entraînent le délaminage entre les plis suivie par la rupture des fibres. La propagation de ces quatre modes d'endommagement entraîne par la suite la rupture finale de la plaque.

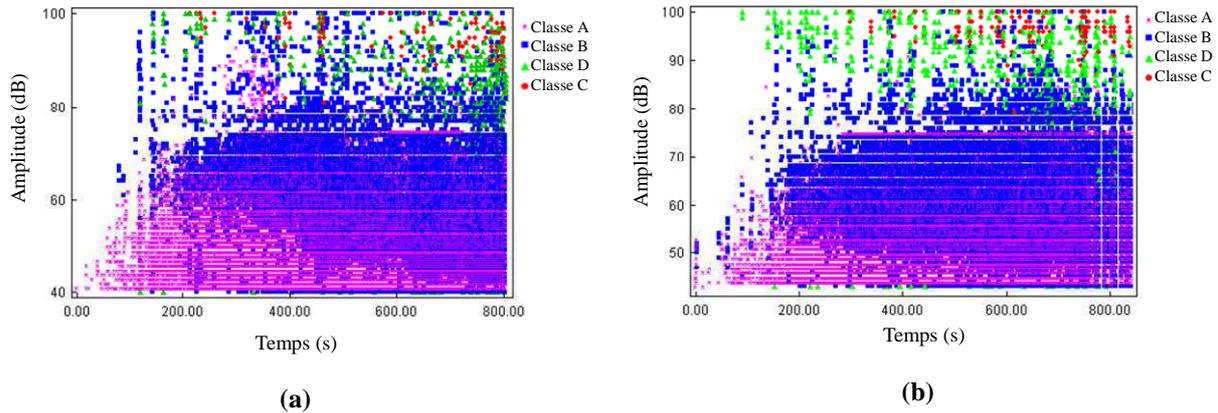


Figure 6.5. Distribution de l'amplitude des signaux d'EA en fonction du temps au cours des essais de flexion en statique pour les deux plaques en stratifié: a) plaque non intégrée (NI) et b) plaque intégrée (IP)

En suivant l'évolution de chaque mécanisme d'endommagement dans les deux plaques (instrumentée et non instrumentée), nous remarquons que la décohésion et le délaminage sont observés dans le matériau avec capteurs intégrés (IP) avant qu'ils apparaissent dans le matériau sans capteurs intégrés (NI). L'apparition précoce de quelques signaux explique clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein du composite. Cet avantage réside dans le fait de la détection expérimentale des modes d'endommagement précoces dont leurs emplacements chronologiques n'étaient pas détectés par les capteurs de surface, faisant ainsi révéler les performances du composite instrumenté vis-à-vis à sa réponse envers l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques. Le nombre de salves cumulées évolue de  $30 \cdot 10^4$  pour le matériau NI à  $33 \cdot 10^4$  pour le matériau IP.

### 6.2.3.3. Localisation des sources d'endommagement

La localisation des événements d'émission acoustique, détectés au cours des essais statiques pour les deux plaques (NI et IP) en matériau stratifié, est donnée dans la figure 6.6. Cette figure donne les positions des événements en fonction de  $X$  et  $Y$  qui représentent les coordonnées de la longueur des plaques étudiées suivant les axes  $x$  et  $y$ . La plupart des événements sont localisés sur la surface entre les quatre capteurs. Nous avons observé qu'au début du chargement, les événements d'émission acoustique apparaissent autour de la zone où la charge est appliquée. Après, une distribution plus dispersée des événements est observée au cours de l'essai. Juste avant la rupture, la majorité de ces signaux est concentrée dans la zone de rupture (point d'application de la charge). La comparaison des résultats obtenus dans les deux plaques (NI et IP) montre une activité plus intense dans le cas du matériau avec capteurs intégrés (IP). Il est à noter que le point le plus intéressant issu de ces résultats : c'est la

localisation des sources d'endommagement loin des positions des capteurs intégrés (figure 6.6-b), ce qui confirme que l'implant de capteurs ne fragilise pas ou peu la structure intégrée.

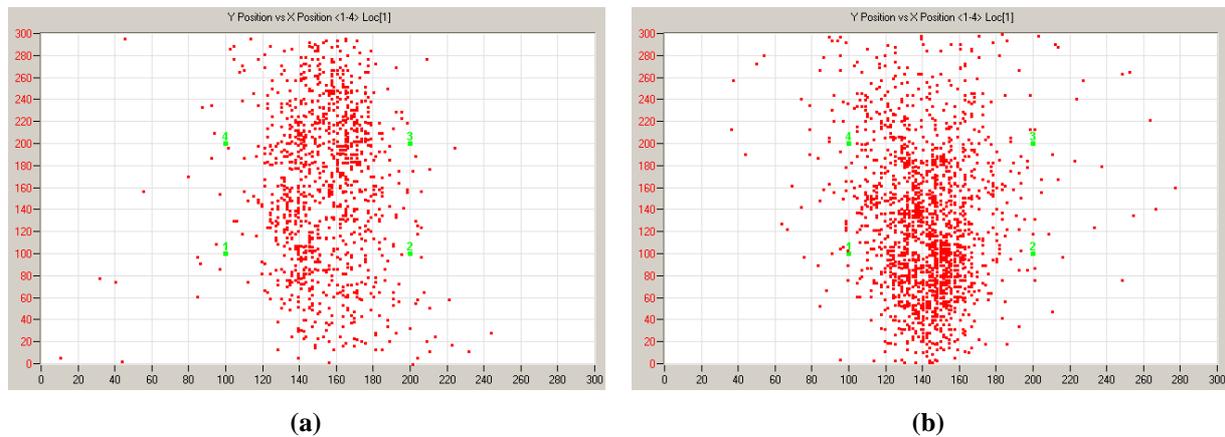


Figure 6.6. Localisation des événements acoustiques au cours des essais de flexion en statique pour les deux plaques en stratifié: a) plaque non intégrée (NI) et b) plaque intégrée (IP)

## 6.2.4. Résultats des essais sur les plaques en matériau sandwich

### 6.2.4.1. Comportement mécanique

Le comportement des deux types de plaques en matériaux sandwichs avec et sans intégration (IP et NI) est reporté dans la figure 6.7. Cette figure donne les courbes force-déplacement déduites des essais statiques en flexion. Sur ces courbes nous constatons d'abord un comportement linéaire pour les faibles déplacements, correspondant à un comportement élastique réversible et permettant de mesurer les caractéristiques élastiques des plaques en matériau sandwich en flexion ponctuelle. Ensuite, une augmentation de la rigidité des plaques qui conduit à une augmentation prononcée de la charge pour des déplacements supérieurs à 5 mm. Ce comportement est caractérisé par la compression de l'âme due au chargement appliqué et localisé sur la peau supérieure, conduisant à l'écrasement des cellules de l'âme en mousse PVC, entraînant ainsi à une légère augmentation de la rigidité de la plaque, jusqu'au moment où une chute assez rapide de la charge se produit conduisant à la rupture de la peau supérieure. Enfin, la charge augmente progressivement lorsque le déplacement augmente jusqu'à la rupture finale de la plaque induite par la rupture en cisaillement de l'âme et celle de la peau inférieure.

Nous avons reporté dans le tableau 6.2 les caractéristiques mécaniques déduites des essais de flexion effectués sur les deux plaques en matériau sandwich (NI et IP). Ce tableau donne les valeurs de la charge, du déplacement à la rupture ainsi que la rigidité des matériaux. Les valeurs des caractéristiques mécaniques de plaques avec et sans capteurs sont très proches

voire identiques. L'intégration des capteurs au sein des plaques en matériaux sandwichs n'influe pas sur le comportement mécanique tant que la taille des capteurs reste négligeable par rapport aux dimensions des plaques. Il est à noter que la rupture des plaques est observée loin des capteurs.

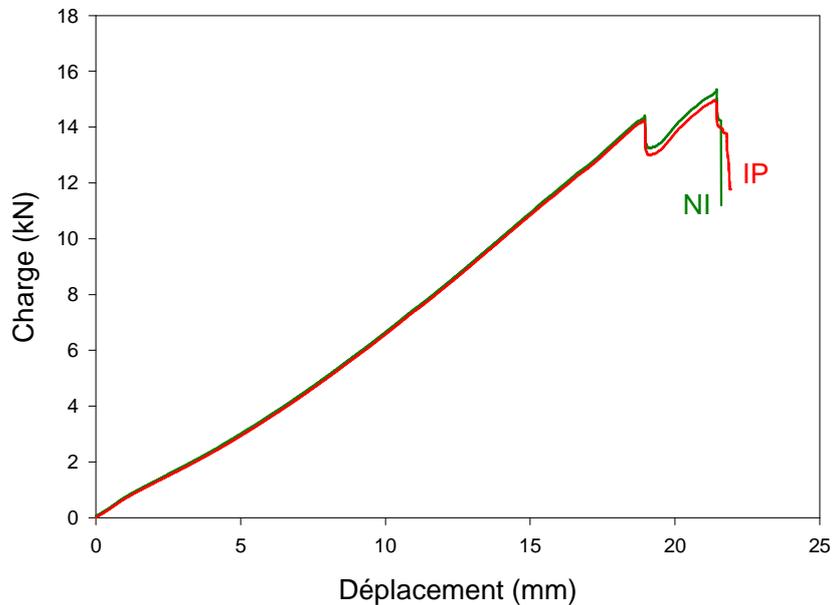


Figure 6.7. Courbes charge-déplacement déduites des essais de flexion en statique sur les deux plaques sandwichs avec et sans intégration (IP et NI)

Tableau 6.2. Caractéristiques mécaniques des plaques sandwichs avec et sans implants piézoélectriques

Plaque	NI	IP
Charge à la rupture (kN)	15,3	15
Déplacement à la rupture (mm)	21,4	21,4
Rigidité (kN/mm)	0,7	0,7

#### 6.2.4.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Les signaux acoustiques collectés au cours des essais statique sur les plaques en matériaux sandwichs sont analysés par la méthode de classification des  $k$  moyennes. La figure 6.8 présente les résultats de la classification en termes de distribution d'amplitude en fonction du temps. Comme dans le cas des poutres en matériau sandwich, on distingue dans le cas de la plaque, la présence de quatre modes d'endommagement : qui sont la fissuration de l'âme en mousse (classe A), la fissuration matricielle des peaux (classe B), la décohésion interfaciale peau/âme (classe D) et la rupture des fibres (classe C).

La distribution de l'amplitude en fonction du temps (Fig. 6.8-a) montre que l'initiation de l'endommagement dans la plaque en matériau sandwich non instrumentée est gouvernée par

quelques signaux de la fissuration de l'âme, suivie d'abord par les signaux de la fissuration matricielle, ensuite par la décohésion interfaciale et enfin la rupture des fibres. Cependant, le comportement du composite sandwich instrumenté (Fig. 6.8-b) met d'abord en relief l'initiation et l'évolution des fissures dans l'âme suivie par l'évolution de la fissuration matricielle des peaux et de la décohésion peau/âme qui se développent en même temps. Ces modes d'endommagement se propagent ensuite tout au long des essais jusqu'au vieillissement des plaques entraînant ainsi l'apparition de la rupture des fibres et provoquant la rupture totale des plaques sandwichs.

Dans le cas du matériau intégré, l'apparition précoce de quelques évènements acoustiques explique clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein de la structure sandwich. Le nombre de salves cumulées évolue de  $23,5 \cdot 10^4$  dans le cas du matériau NI à  $31 \cdot 10^4$  dans le cas du matériau IP.

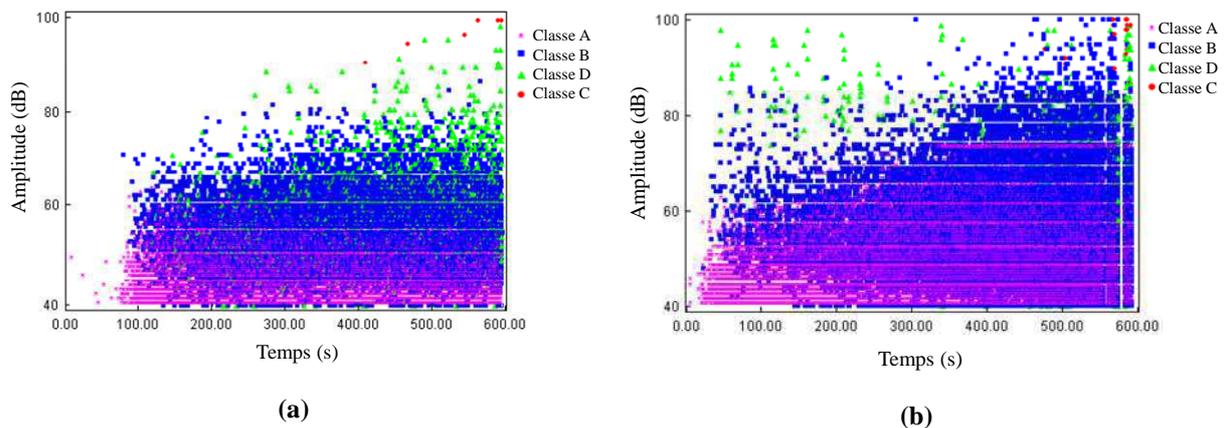


Figure 6.8. Distribution de l'amplitude des signaux d'EA en fonction du temps au cours des essais de flexion en statique pour les plaques en sandwich : a) plaque non intégrée (NI) et b) plaque intégrée (IP)

### 6.2.4.3. Localisation des sources d'endommagement

La localisation des évènements de l'EA collectés au cours des essais statiques sur les deux plaques en matériau sandwich (NI et IP) est donnée dans la figure 6.9. Nous avons remarqué qu'au début du chargement, les évènements acoustiques apparaissent au centre de la plaque autour de la zone d'application de la charge. Ensuite, ces signaux sont devenus plus dispersés jusqu'à la fin de l'essai. Là aussi, la comparaison des résultats des deux plaques NI et IP montre une activité plus importante dans le cas du matériau instrumenté IP.

Dans le cas des plaques sandwichs, les résultats montrent aussi que les sources d'endommagement sont loin des positions des capteurs intégrés (Fig. 6.9-b), ce qui confirme que l'implantation des capteurs ne fragilise pas la plaque en matériau sandwich.

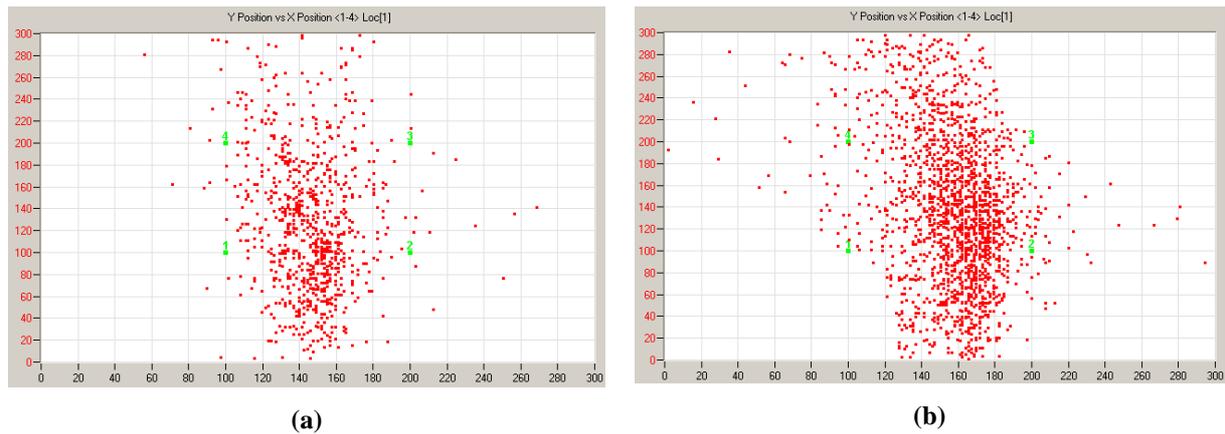


Figure 6.9. Localisation des événements acoustiques au cours des essais de flexion en statique pour les deux plaques en sandwich: a) plaque non intégrée (NI) et b) plaque intégrée (IP)

### 6.3. Application de l'implant piézoélectrique aux structures 3D en matériau composite

#### 6.3.1. Mise en œuvre des structures 3D

Des structures de forme simple sont fabriquées au laboratoire par la technique du "sac" (paragraphe 2.2.1 du chapitre 2). La figure 6.10 donne la forme et les dimensions des structures étudiées ainsi que les positions des capteurs d'EA. Les structures sont constituées de composites stratifiés croisés de séquence d'empilement  $[0_6/90_6]_s$  et d'épaisseur 8 mm. Trois capteurs piézo-électriques (Pz 27) sont implantés au cours de la mise en œuvre dans le cas de la structure avec capteurs intégrés. Ils sont placés au milieu des plis, dans le plan neutre de la structure. La figure 6.10-b donne une photographie de la structure fabriquée avec implants piézoélectriques.

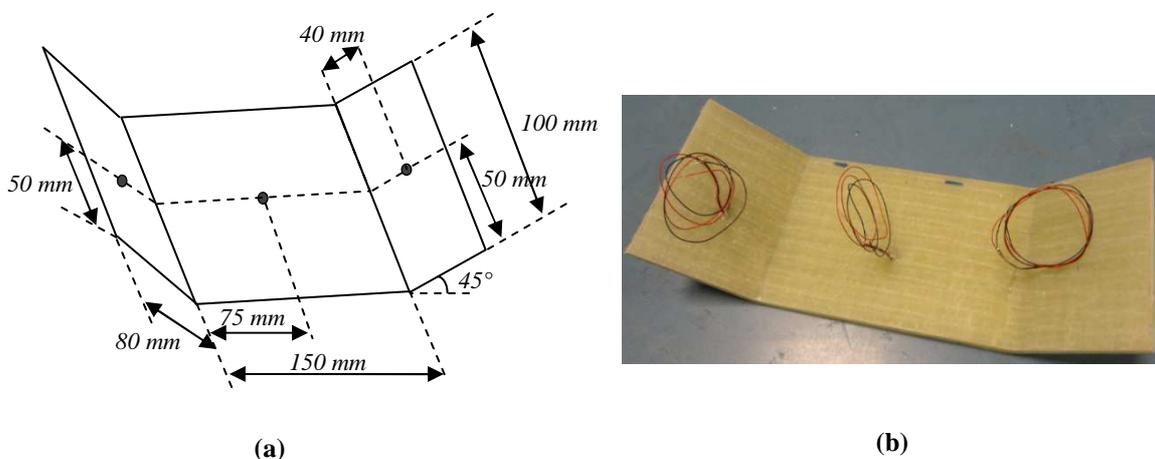


Figure 6.10. a) Géométrie de la structure étudiée et b) Structure en stratifié avec 3 capteurs intégrés

### 6.3.2. Dispositif expérimental

Les structures fabriquées sont sollicitées en compression. Les essais sont effectués avec une machine hydraulique universelle de type INSTRON munie d'une cellule de force de 100 kN. Les structures sont testées en statique jusqu'à la rupture avec une vitesse de déplacement de 2 mm/min. La charge et le déplacement sont enregistrés au cours des essais.



*Figure 6.11. Essai de compression sur une structure en composite stratifié intégrée*

Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de la mesure d'émission acoustique avec le système d'acquisition (EPA). Dans le cas de la structure non instrumentée, les trois capteurs d'EA sont collés sur la surface avec la graisse silicone dans les mêmes positions que ceux de la structure avec capteurs intégrés.

### 6.3.3. Résultats des essais sur les structures 3D

#### 6.3.3.1. Comportement mécanique

La figure 6.12-a donne l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour les deux types de structures avec et sans intégration (IP et NI). Les résultats de cette figure montrent que pour les deux structures, le comportement est quasi-linéaire avec une rupture de type fragile. La structure avec capteurs intégrés atteint la rupture après la structure sans capteurs intégrés mais avec une charge à la rupture légèrement plus faible. La figure 6.12-b montre l'un des coins de la structure avec capteurs intégrés après rupture, nous observons bien des zones de décohésion entre les plis  $0^\circ$  et  $90^\circ$  (délaminage).

Le tableau 6.3 présente les caractéristiques mécaniques obtenues à partir des résultats d'essais des deux structures sans capteurs intégrés (NI) et avec capteurs intégrés (IP). L'intégration des capteurs d'EA dans la masse a affecté légèrement la structure. La résistance de la rupture s'est dégradée de 10% alors que le déplacement ultime a augmenté. L'implant

des piézoélectriques a surtout influé sur la rigidité de la structure qui a diminué de 20 % (de 0,47 à 0,37 kN/mm).

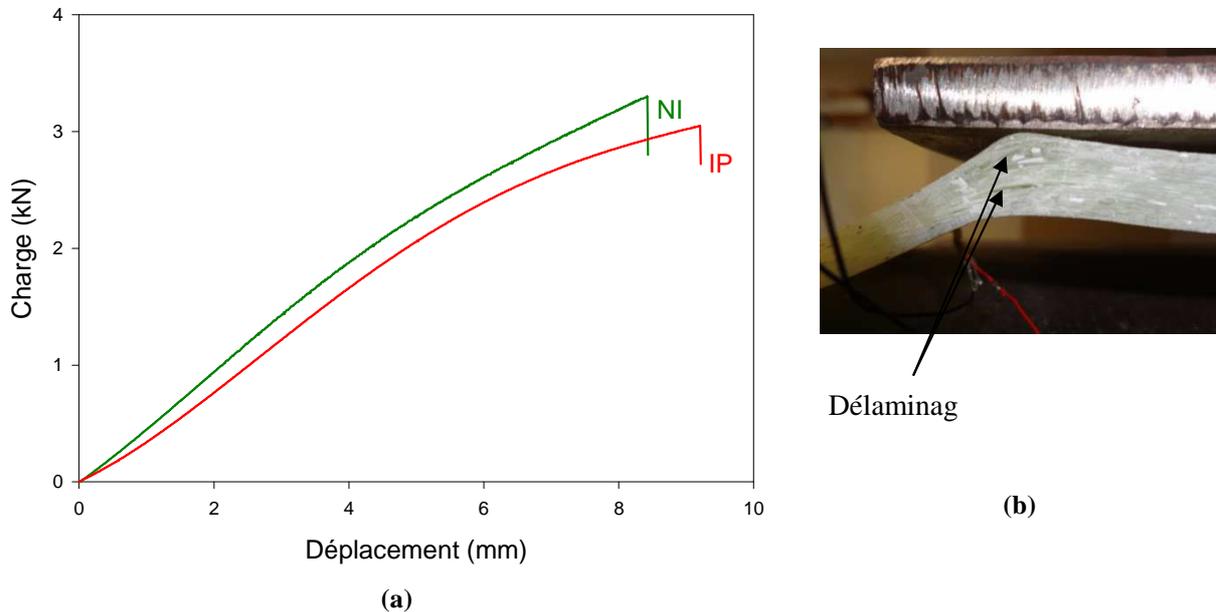


Figure 6.12. a) Courbes charge-déplacement déduites des essais de compression sur les deux structures stratifiées avec et sans intégration (IP et NI) et b) Délaminage dans les raccordements de la structure

Tableau 6.3. Caractéristiques mécaniques des structures en matériau composite stratifié avec et sans implants piézoélectriques

Structure	NI	IP
Charge à la rupture (kN)	3,3	3
Déplacement à la rupture (mm)	8,4	9,2
Rigidité (kN/mm)	0,47	0,37

### 6.3.3.2. Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Les signaux acoustiques, collectés au cours des essais sur les deux structures, sont classifiés par la méthode de classification des  $k$  moyennes. La figure 6.13 présente les résultats de cette classification. Pour les deux structures, les résultats obtenus mettent en évidence la présence des quatre mécanismes sources d'endommagement: la fissuration matricielle (classe A), la décohésion de l'interface fibre/matrice (classe B), le délamination inter-plis (classe D) et la rupture des fibres (classe C).

La distribution d'amplitude en fonction du temps, donnée dans la figure 6.13, montre que la fissuration matricielle (classe A) est le premier mode d'endommagement observé pour les deux structures (NI et IP) et représente le mécanisme le plus dominant dans les deux cas.

Après un temps assez long, quelques signaux de la décohésion et du délaminage sont apparus en même temps dans les deux structures. Ces trois mécanismes d'endommagement se propagent et se développent le long des fibres provoquant ainsi leur rupture entraînant la rupture catastrophique des structures en composite.

La comparaison du nombre de salves cumulées dans les deux matériaux (NI et IP) montre que le nombre de signaux collectés est de  $5.10^3$  salves dans la structure non instrumentée et de  $20.10^3$  salves dans la structure instrumentée.

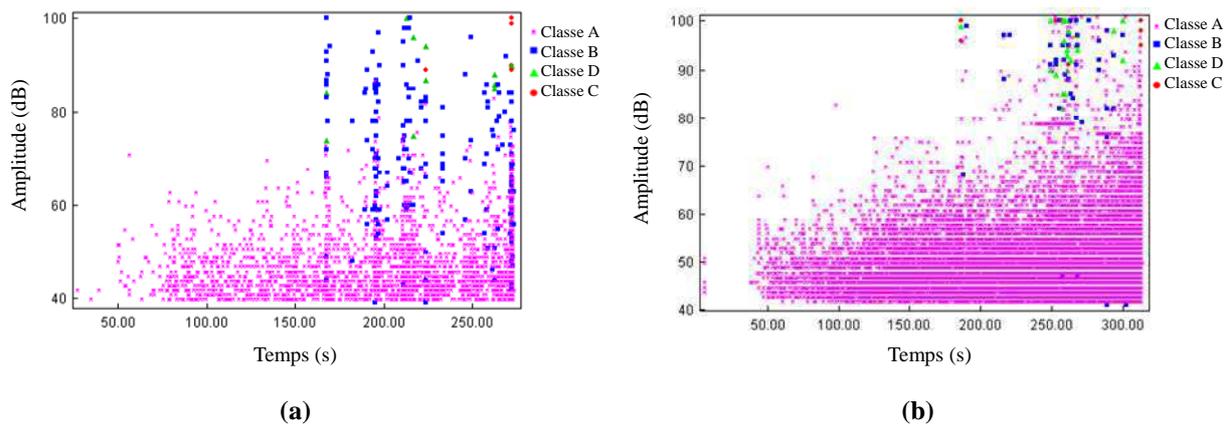


Figure 6.13. Distribution de l'amplitude des signaux d'EA en fonction du temps pour les deux structures en stratifié : a) structure non intégrée (NI) et b) structure intégrée (IP)

### 6.3.3.3. Localisation des sources d'endommagement

La figure 6.14 présente la localisation plane (longueur et largeur) des sources d'émission acoustique par rapport aux positions des capteurs dans les deux structures étudiées (NI et IP). Au début du chargement, nous avons observé l'apparition des événements acoustiques dans la zone d'application de la charge. Au cours de l'essai, ces signaux sont devenus plus dispersés. En fin d'essai juste avant la rupture, nous avons constaté une accélération de l'activité acoustique et notamment au niveau des raccords dans les structures. Ces signaux représentent surtout des signaux dus au délaminage des couches et caractérisent les zones de rupture (Fig. 6.12.b).

La comparaison des résultats des deux structures NI et IP montre une activité plus intense dans le cas du matériau IP, localisée surtout dans les raccords de la structure. Il à noter que ces résultats montrent que la localisation des sources d'endommagement se situe loin des positions des capteurs intégrés (Fig. 6.14), ce qui confirme que l'implantation des capteurs ne constitue pas une zone potentielle d'initiation d'endommagement et donc ne fragilise pas la structure instrumentée.

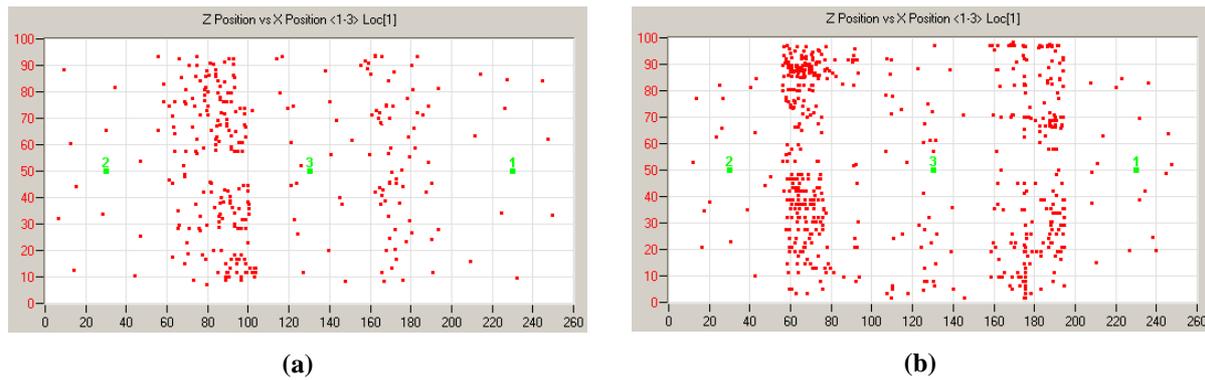


Figure 6.14. Localisation des événements acoustiques au cours des essais de compression dans les deux structures en stratifié: a) structure non intégrée (NI) et b) structure intégrée (IP)

## 6.4. Conclusions

Dans ce chapitre, l'implant piézoélectrique est appliqué à des structures 2D et 3D en matériaux composites stratifié et sandwich. La réponse mécanique des différentes structures est étudiée. D'une manière générale, l'intégration des capteurs piézoélectriques au sein du composite provoque une faible dégradation de ces caractéristiques mécaniques. Cette intégration influe surtout sur la rigidité de la structure. Cependant, nous avons remarqué qu'une structure instrumentée peut résister plus qu'une structure non instrumentée. Nous avons aussi suivi et localisé, par émission acoustique, l'évolution des mécanismes d'endommagement dans les structures avec et sans capteurs intégrés. Au cours des essais, l'analyse et l'observation des signaux d'EA ont permis de définir les principales signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de structures composite (stratifié et sandwich). De point de vue comparaison entre matériau instrumenté et matériau non instrumenté, l'activité acoustique est plus importante dans le cas du matériau instrumenté. La localisation des sources d'endommagement a montré que les événements acoustiques sont apparus loin des positions des capteurs intégrés ce qui confirme que l'implantation des capteurs ne constitue pas de zone privilégiée d'endommagement et donc ne fragilise pas la structure en matériau composite.

## **Chapitre 7:**

# **Conclusion générale**

Dans ce travail, nous avons tenté d'insérer au sein des matériaux composites des capteurs piézoélectriques de faibles dimensions. Un problème important demeure: l'étape particulièrement délicate de leur mise en œuvre qui fait engendrer des discontinuités et des défauts. Lorsque ces matériaux sont soumis à des sollicitations mécaniques, ces discontinuités contribuent à l'initiation de l'endommagement et à une perte des caractéristiques mécaniques de l'élément structural. L'objectif principal du travail a été donc l'étude du comportement mécanique, l'identification, l'évaluation et le suivi des mécanismes d'endommagement par émission acoustique au cours de différents types de sollicitations : traction, flexion en statique, en fatigue et en fluage sur des matériaux composites : stratifiés et sandwichs avec et sans capteur intégré.

La première partie de cette étude s'est concentrée sur l'effet de l'intégration du capteur piézoélectrique au sein des composites stratifiés à fibres de verre/résine époxyde, sollicités en flexion 3-points et en traction. Le comportement mécanique des composites avec et sans capteur intégré ne montre aucune différence dans la forme des courbes d'essais. L'intégration du capteur au sein des matériaux a affecté sensiblement la charge et le déplacement à la rupture. La rigidité reste identique pour tous les types de matériaux. La rupture des éprouvettes est observée loin des positions du capteur. Pour les essais de fatigue cyclique, l'analyse des résultats montre que le matériau avec capteur intégré a une durée de vie du même ordre de grandeur que celle du matériau sans capteur intégré. Dans les essais de fluage, les résultats obtenus montrent que l'incorporation du capteur au sein du composite ne change pas le comportement mais réduit légèrement ses propriétés mécaniques.

La contribution de la technique de contrôle par émission acoustique (EA) dans la définition des différents modes d'endommagement identifiés au cours des essais est discutée. L'analyse et l'observation des signaux d'EA conduisent à l'identification des signatures acoustiques des différents modes d'endommagement dominant dans les matériaux composites à fibres de verre/résine époxyde. En général, pour les matériaux unidirectionnels, on constate trois modes d'endommagement : la fissuration de la matrice, la décohésion fibres-matrice et la rupture de fibres. En plus de ces trois modes, la classification des signaux acoustiques des composites à plis croisés a mis en évidence la présence d'un quatrième mode d'endommagement qui est le délaminage entre les couches  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . La comparaison de l'activité acoustique dans les deux types de matériaux (avec et sans intégration) montre que

l'activité acoustique est beaucoup plus importante dans les échantillons avec capteur intégré que dans les échantillons sans capteur intégré.

Par la suite, cette étude a été étendue à l'analyse de l'effet de l'insertion du capteur d'EA dans les matériaux composites sandwichs. Les résultats des essais statiques effectués sur les composites sandwichs montrent que la charge à la rupture du matériau avec capteur intégré est légèrement supérieure à celle du matériau sans capteur intégré, alors qu'une légère réduction de la rigidité est constatée. Dans les essais de fatigue cyclique, la comparaison des résultats montre que le matériau avec capteur intégré a le même comportement en fatigue que celui sans intégration avec des durées de vie très proches. Pour l'activité acoustique, nous avons observé la présence de quatre modes d'endommagement : fissuration de l'âme, fissuration matricielle, décohésion interfaciale et rupture de fibres. La comparaison des matériaux avec et sans intégration de capteur montre que la fissuration de l'âme est le mécanisme d'endommagement le plus dominant. En outre, il est à noter que le capteur implanté a une excellente capacité de détection des signaux d'émission acoustique : le nombre de salves cumulés dans les matériaux à capteur intégré est plus élevé que celui observé dans le matériau sans capteur intégré.

Finalement, l'implant piézoélectrique a été appliqué à des structures 2D et 3D en matériaux composites stratifiés et sandwichs. La réponse mécanique des différentes structures est étudiée. D'une manière générale, l'intégration du piézoélectrique au sein des structures composites provoque une faible dégradation de ces caractéristiques mécaniques. Cette intégration influe surtout sur la rigidité des structures. Cependant, nous avons remarqué qu'une structure instrumentée peut résister plus qu'une structure non instrumentée. Le suivi et la localisation de l'endommagement dans ces structures avec et sans capteurs intégrés ont été aussi réalisés par la technique d'EA. Au cours des essais, l'analyse et l'observation des signaux d'EA ont permis de définir les principales signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de matériau composite (stratifié et sandwich). De point de vue comparaison entre matériau instrumenté et matériau non instrumenté, l'activité acoustique est plus importante dans le cas des structures instrumentées. Enfin, la localisation des sources d'endommagement a montré que les événements acoustiques sont apparus loin des positions des capteurs intégrés, ce qui confirme que l'implantation des capteurs ne fragilise pas ou peu la structure.

Cette étude nous amène à formuler les conclusions suivantes :

- Les résultats de cette étude confirment que les capteurs piézoélectriques peuvent être incorporés avec succès dans différents matériaux composites (stratifiés unidirectionnels, croisés et sandwichs) sans affecter significativement le comportement mécanique de ces matériaux.

- Dans le cadre de la comparaison en termes de conditions d'acquisition avec capteurs intégrés et capteurs collés à la surface du matériau, les formes des signaux restent identiques pour des phénomènes semblables au sein du matériau, car elles sont directement liées à la nature de la source de l'endommagement.

- L'intégration de l'instrumentation au sein de la composition structurale du matériau favorise la détection de l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques précoces dont leurs emplacements chronologiques n'étaient pas ou peu validés dans la littérature. Néanmoins ces avantages sont limités par une légère dégradation des propriétés mécaniques des matériaux en question.

- La localisation des sources d'endommagement a montré que les événements acoustiques sont apparus loin des positions des capteurs intégrés, ce qui confirme que l'implantation des capteurs ne fragilise pas ou peu la structure.

Ces résultats permettent l'utilisation de la technique d'émission acoustique détectée par capteurs piézoélectriques implantés dans la masse, comme base d'un système de surveillance de santé structurale (Structural Health Monitoring) efficace.

En perspective il serait très intéressant de :

- Réduire au maximum les dimensions des capteurs piézoélectriques de manière à limiter les effets nocifs de leur intégration au sein du matériau et donc de limiter l'impact de l'insertion du capteur sur les propriétés mécaniques.

- Identifier l'endommagement diffus par un système embarqué, ce qui permet de résoudre les problèmes de couplage capteur-structure.

---

## **REFERENCES**

---

- [1] R.G. Loewy, Recent developments in smart structures with aeronautical applications. *Smart Materials and Structures*, 1997; 6: 11–42.
- [2] M. Assarar, Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs, Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans-France 2007.
- [3] J.M. Berthelot, Matériaux composites-Comportement mécanique et analyse des structures, 3<sup>ème</sup> édition. Paris Editions Tech. & Doc., 1999.
- [4] H. Nechad, 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, France, 2004.
- [5] M. Moevus, N. Godin, M. R'Mili, D. Rouby, P. Reynaud, G. Fantozzi, G. Farizy, Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiC<sub>f</sub>/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering. *Composites Science and Technology*, 2008; 68: 1258–65.
- [6] N. Godin, S. Huguet, R. Gaertner, Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites. *NDT&E International*, 2005; 38: 299-309.
- [7] A. Quispitupa, B. Shafiq, F. Just, D. Serrano, Acoustic emission based tensile characteristics of sandwich composites. *Composites Part B engineering*, 2004; 35; 563–71.
- [8] B. Shafiq, A. Quispitupa, Fatigue characteristics of foam core sandwich composites. *International Journal of Fatigue*, 2006; 28; 96–102.
- [9] D. Zenkert, Handbook of Sandwich Construction, EMAS Publishing, West Midlands, UK, 1997.
- [10] N. Kulkarni, H. Mahfuz, S. Jeelani, L.A. Carlsson, Fatigue crack growth and life prediction of foam core sandwich composites under flexural loading. *Composite Structures*, 2003; 59: 499–505
- [11] D. Zenkert and M. Vikstrom, Shear cracks in foam core sandwich panels: Nondestructive testing and damage assessment. *Journal of Composites Technology & Research*, 1992; 14, No.2: 95–103.
- [12] M. Shaira, Caractérisation non destructive de la transformation martensitique de l'acier 304L induite par déformation cyclique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, Lyon 2006
- [13] J. Roget, Essai non destructif par l'émission acoustique. Mise en œuvre et application. AFNOR, CETIM Center technique des industries mécaniques. Paris : AFNOR, 1988, 196p.
- [14] A. Marec, Contrôle de santé 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, Le Mans, France, 2008.
- [15] A.G. Beattie, Acoustic emission, principles and instrumentation. *Journal of Acoustic Emission*, 1983; 95–128.
- [16] K. Yamaguchi, H. Oyaizu, J. Johkaji, Acoustic Emission: Current Practice and Future Directions. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1991, 123p.
- [17] K. Ono, Trends of recent acoustic emission literature. *Journal of Acoustic Emission*, 1994; 12:177–98.
- [18] S.M.C. Van Bohemen, An acoustic emission study of martensitic and bainitic transformation in carbon steel, Thèse de doctorat, Netherlands: Delft University of Technology, 2004.

- [19] S. Huguet, 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, France, 2002.
- [20] R. Berbaoui, Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère, Thèse de doctorat à université du Maine, Le Mans-France, 2010.
- [21] A. Nielsen, Acoustic Emission Source based on Pencil Lead Breaking. *The Danish Welding Institute Publication*, 1980; 80: p15.
- [22] S-C. Woo, N-S. Choi, Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events. *Composites Science and Technology*, 2007; 67: 1451–58.
- [23] M. Giordano, A. Calabro, C. Esposito, A. D'Amore, L. Nicolais, An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials. *Composites Science and Technology*, 1998; 58: 1923–28.
- [24] C. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission events. *Composites Science and Technology*, 2004; 64:819-27.
- [25] J. Bohse, Damage analysis of polymer matrix composites by acoustic emission testing, *Proc. Of European WG on AE*, Berlin, 2004; 339-48.
- [26] S. Barré, M.L. Benzeggagh, On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology*, 1994; 52: 369-76
- [27] N. Ativitavas, T. Fowler, T. Pothisiri, Acoustic emission characteristics of pultruded fiber reinforced plastics under uniaxial tensile stress, in: *Proceedings of European WG on AE*, Berlin, 2004; 447–54.
- [28] M. Johnson, Waveform based clustering and classification of AE transients in composite laminates using principal component analysis. *NDT&E International* 2002; 35: 367–76.
- [29] M.L. Benzeggagh, S. Barre, B. Echalié, R. Jacquemet, Etude de l'endommagement de matériaux composites à fibres courtes et à matrice thermoplastique. *AMAC Journées Nationales Composites*, Paris, 1992; 8: 703–14.
- [30] O. Chen, P. Karandikar, N. Takeda, T. Kishi, Acoustic emission characterization of a glass-matrix composite. *Non destructive Testing and Evaluation*, 1992; 8-9: 869–78.
- [31] S.-T. Kim, Y.-T. Lee, Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method. *Materials Science and Engineering*, 1997; 234: 322–26.
- [32] G. Kotsikos, J. T. Evans, A. G. Gibson, J. Hale, Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber reinforced polyester laminates. *Polymer Composites*, 1999; 20(5): 689–96.
- [33] O. Ceysson, M. Salvia, L. Vincent, Damage mechanisms characterization of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis. *Scripta Materialia*, 1996; 34 (8) : 1273–80.
- [34] H. Nechad, A. Helmstetter, R. El Guerjouma, D. Sornette, Creep ruptures in heterogeneous materials. *Physical Review Letters*, 2005; 94.

- [35] R. El Guerjouma, J.C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, Non-destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission. *Advanced Engineering Materials*, 2001; 3:601–08.
- [36] A. Marec, J.H. Thomas, R. El Guerjouma, Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008; 22 (6): 1441–64.
- [37] A. Marec, J.H. Thomas, R. El Guerjouma, Investigation of damage mechanisms of composite materials : multivariable analysis based on temporal and wavelet features extracted from acoustic emission signals, *Proc. CFA Acoustics'08*, Paris, 2008, 597–601.
- [38] R. Berbaoui, A. Marec, J.H. Tomas, A. El Mahi, R. El Guerjouma, Investigation of damage mechanisms of polymer concrete: Multivariable analysis extracted from acoustic emission signals. *NDTCE Conference*. Nantes, France June 30th-July 3rd, 2009.
- [39] R. Berbaoui, A. El Mahi, R. El Guerjouma, Etude de l'endommagement et de la rupture des matériaux granulaires base polymère en fluage par émission acoustique. *19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique à Marseille (CFM 2009)* du 24 au 28 août 2009.
- [40] N. Godin, S. Huguet, R. Gaertner, L. Salmon, Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composites using supervised and unsupervised classifiers. *NDT&E International* 2004; 37: 253–64.
- [41] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, D. Villard, Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. *Composites Science and Technology*, 2002; 62: 1433–44.
- [42] T. Kohonen, Self-organized network. *Proceedings of the IEEE*, 1990; 43: 59–69.
- [43] A. Likas, N. Vlassis, J. Verbeek, The global k-means clustering algorithm. *Pattern Recognition* 2003; 366 (2): 451–61.
- [44] M. K. Ng, A note on constrained k-means algorithms. *Pattern Recognition*, 2000; 33, n°3: 515–19.
- [45] D.L. Davies, D.W. Bouldin, A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1979; 1: 224–27.
- [46] V. Kostopoulos, T.H. Loutas, A. Kontsos, G. Sotiriadis, Y.Z. Pappas, On the identification of the failure mechanisms in oxide/oxide composites using acoustic emission. *Nondestructive Testing and Evaluation Int.*, 2003; 36: 571–80.
- [47] S. Momon, M. Moevus, N. Godin, M. R'Mili, P. Reynaud, G. Fantozzi, G. Fayolle, Identification de la signature acoustique des différents mécanismes sources lors d'essais de fatigue sur CMC : Application de classificateur supervisé et non supervisé. *Comptes rendus des JNC 16 - Toulouse* 2009.
- [48] B. Chapuis, Contrôle Santé Intégré par méthode ultrasonore des réparations composites collées sur des structures métalliques, Thèse de doctorat, ONERA : Université Paris. Diderot (Paris 7), Paris-France 2010.
- [49] T. Monnier, Ondes de Lamb dans les milieux stratifiés: application à la surveillance in situ et en temps réel de l'endommagement de structures composites, Thèse de doctorat, l'INSA de Lyon, France, 2001.
- [50] P. BLANQUET, Etude de l'endommagement des matériaux composites aéronautiques à partir de techniques ultrasonores. Thèse de doctorat: Université de Valenciennes, France, 1997.

- [51] K. Ha, A combined piezoelectric composite actuator and its application to wing/blade tips, Thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology, Georgia, États-Unis, December 2005.
- [52] J. M. Coleman, Fatigue behavior of a quasi-isotropic graphite/epoxy laminate embedded with a piezoelectric sensor, Thèse de doctorat, Air force institute of technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, États-Unis 1997.
- [53] Y. Huang, Development of self-monitoring structural composites with integrated sensing networks, Thèse de doctorat, University of California, San Diego, États-Unis, 2008.
- [54] WB. Spillman, JS. Sirkis, PT. Gardiner, Smart materials and structures: what are they?. *Smart Materials and Structures*, 1996; 5: 247–54.
- [55] L. Ye, Y. Lu, Z. Su, G. Meng, Functionalized composite structures for new generation airframes: a review. *Composites Science and Technology*, 2005; 65:1436–46.
- [56] S. Egusa, N. Iwasawa, Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities. *Smart Materials and Structures*, 1998; 7 (4): 438–445.
- [57] J. Dupont, Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris- France, 2002.
- [58] B. Delobelle, F. Thiebaud, D. Chapelle, D. Perreux, V. Placet, R. Ferrière, Insertion d'une fibre optique dans une structure composite. *Comptes Rendus des JNC 16*, Toulouse-France 2009.
- [59] B. Qi, M. Bannister, X. Liu, A. Michie, L. Rajasekera, B. Ashton, Response of an embedded fibre bragg grating to thermal and mechanical loading in a composite laminate. *Materials Forum*, 2004; 27: 93–100.
- [60] S. Mall, S.B. Dosedely, M.W. Holz, The performance of graphite–epoxy composite with embedded optical fibers under compression. *Smart Materials and Structures*, 1996; 5: 209–15.
- [61] Y. Meyer, Contrôle actif de micro-composants électroniques, Thèse de doctorat, Université de Franche- Comté, Besançon-France, 2005.
- [62] S.S. Kessler, Piezoelectric-Based In-Situ Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring Systems, Thèse de doctorat, Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts-États-Unis, 2002.
- [63] H. Matt, Structural Diagnostics of CFRP Composite Aircraft Components by Ultrasonic Guided Waves and Built-In Piezoelectric Transducers, Thèse de doctorat, University of California, San Diego, États-Unis.
- [64] E.-Gu Lee, J.-K. Lee, W.-Y. Jang, J.-G. Lee, Ji-Y. Kim, Domain switching characteristics of preferentially oriented lead zirconate titanate thin films. *Journal of Materials Science Letters*, 2000; 19 (21): 1917-1919.
- [65] H.-B. Park, C.-Y. Park, Y.-S. Hong, K. Kim, S.-J. Kim, Structural and dielectric properties of PLZT ceramics modified with lanthanide ions. *Journal of the American Ceramic Society*, 1999; 82 (1): 94–102.
- [66] S. Egusa, N. Iwasawa, Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities, *Smart Materials and Structures*, 1998; 7 (4): 438–45.
- [67] B.L. Wang, J.C. Han and S.Y. Du, Electroelastic fracture dynamics for multilayered piezoelectric materials under dynamic anti-plane shearing. *International Journal of Solids and Structures*, 2000; 37 (38): 5219–31.

- [68] S. S. Livneh, V. F. Janas, A. Safari, Development of fine scale PZT ceramic fiber/polymer shell composite transducers. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995; 78 (7): 1900–06.
- [69] H.N. Bar, M.R. Bhat, C.R.L. Murthy, Identification of failure modes in GFRP using PVDF sensors: ANN approach. *Composite Structures*, 2004; 65: 231–37.
- [70] E. Moulin, J. Assaad, C. Delebarre, Piezoelectric transducer embedded in composite plate: Application to Lamb wave generation. *Journal of Applied Physics*, 1997; 82 (5): 2049–55.
- [71] T. Monnier, Y. Jayet, P. Guy, J.C. Baboux, The piezoelectric implant method: implementation and practical applications. *Smart Materials and Structures*, 2000; 9:267–72.
- [72] M. Lam, Formalisme d’octet appliqué à la propagation d’ondes dans des milieux piézoélectriques inhomogènes, Université de Tours, France, 2008.
- [73] S.W. Case, G.P. Carman, Compression Strength of composites containing embedded sensors or actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1994; 5: 4–11.
- [74] P. Padma Kumar, B.V. Soma Sekhar, K. Balasubramaniam, C.V. Krishnamurthy, B. Maxfield, In-situ damage detection in plate structures using PWAS and non-contact LASER doppler velocimeter. *Review of Quantitative Non destructive Evaluation*, 2007; 26: 1509–15.
- [75] Y. Chen, Y. Wen, P. Li, Characterization of PZT ceramic transducer embedded in concrete. *Sensors and Actuators A* 2006; 128: 116–24.
- [76] C. Tamiatto, Conception et analyse du comportement d’un composite à capteur intégré en fibres de carbone pour la détection in-situ des endommagements d’une structure verre-résine, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 1998.
- [77] R. M. Measures, Smart composite structures with embedded sensors. *Composites Engineering*, 1992; 2 (5-7): 597–618.
- [78] Y. Fan, M. Kahrizi, Characterization of a FBG strain gage array embedded in composite structure. *Sensors and Actuators A*, 2005; 121: 297–305.
- [79] S. Mall, T.L. Hsu, Electromechanical fatigue behavior of graphite/epoxy laminate embedded with piezoelectric actuator. *Smart Materials and Structures*, 2000; 9:78–84.
- [80] M. Lin, F.K. Chang, The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics. *Composites Science and Technology*, 2002; 62:919–39.
- [81] X.P. Qing, S.J. Beard, A. Kumar, H-L. Chan, R. Ikegami, Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures. *Composites Science and Technology*, 2006; 66: 1694–1702.
- [82] S.M. Yang, C.C. Hung, K.H. Chen, Design and fabrication of a smart layer module in composite laminated structures. *Smart Materials and Structures*, 2005; 14:315–20.
- [83] F. Côté, P. Masson, N. Mrad, V. Cotoni, Dynamic and static modelling of piezoelectric composite structures using a thermal analogy with MSC/NASTRAN. *Composite Structures*, 2004; 65:471–84.
- [84] G.S. Agnes, S. Mall, Structural integrity issues during piezoelectric vibration suppression of composite structures. *Composites: Part B*, 1999; 30: 727–38.
- [85] V. G. M. Annamdas, Y. Yang, C. K. Soh, Impedance based Concrete Monitoring using Embedded PZT Sensors. *International journal of civil and structural engineering*, 2010; 1(3):414–24.
- [86] C.A. Paget, K. Levin, C. Delebarre, Actuation performance of embedded piezoceramic transducer in mechanically loaded composites. *Smart Materials and Structures*, 2002; 11:886–91.

- [87] JB. Ihn, FK. Chang, Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: II. Validation using riveted joints and repair patches. *Smart Materials and Structures*, 2004; 13: 621–30.
- [88] F. Ghezzi, S. Nemat-Nasser, Effects of embedded SHM sensors on the structural integrity of glass fiber/epoxy laminates under in-plane loads, *Sensor Systems and Networks: Phenomena. Technology and Applications for NDE and Health Monitoring*, 2007; 6530: 1-6.
- [89] IM. De Rosa, F. Sarasini, Use of PVDF as acoustic emission sensor for in situ monitoring of mechanical behaviour of glass/epoxy laminates. *Polymer Testing* 2010; 29:749–58.
- [90] S. Mall, J.M. Coleman, Monotonic and fatigue loading behavior of quasi-isotropic graphite/epoxy laminate embedded with piezoelectric sensor. *Smart Materials and Structures*, 1998; 7(6): 822–32.
- [91] M. Yocum, H. Abramovich, A. Grunwald, S. Mall, Fully reversed electromechanical fatigue behavior of composite laminate with embedded piezoelectric actuator/sensor. *Smart Materials and Structures*, 2003; 12:556–64.
- [92] X.P. Qing, S.J. Beard, A. Kumar, T. K. Ooi and F.K. Chang, Built-in sensor network for structural health monitoring of composite structure. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007; 18: 39–49.
- [93] Z. Su, X. Wang, Z. Chen, L. Ye, D. Wang, A built-in active sensor network for health monitoring of composite structures. *Smart Materials and Structures*, 2006; 15: 1939–49.
- [94] F. Ghezzi, AF. Starr, DR. Smith, Integration of networks of sensors and electronics for structural health monitoring of composite materials. *Advances in Civil Engineering*, 2010; 2010:1–13.
- [95] F. Ghezzi, Y. Huang, S. Nemat-Nasser, Onset of resin micro-cracks in unidirectional glass fiber laminates with integrated SHM sensors: experimental results. *Structural Health Monitoring*, 2009; 6: 477–91.
- [96] HP. Konka, MA. Wahab, K. Lian, Sandwich structures with smart composite face skin. *International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011*, Denver, Colorado, USA 11-17 November 2011.
- [97] W. J. Elspass, J. Kunzmann, M. Flemming, D. Baumann, Design, manufacturing and verification of piezoceramics embedded in fiber-reinforced thermoplastics, *Smart Structures and Materials: Smart Structures and Integrated Systems*, 1995; 2443: 327–33.
- [98] N. W. Hagood, E.F. Crawley, J. de Luis, E.H. Anderson, Development of integrated components for control of intelligent structures. *Smart materials, structures, and mathematical issues*, U.S. Army Research Office Workshop, pp. 80–104, Blacksburg, VA, USA, Sep. 1988.
- [99] C.A. Paget, K. Levin, Structural integrity of composites with embedded piezoelectric ceramic transducer, *Smart Structures and Materials 1999: Smart Structures and Integrated Systems*, 1999; 3668: 306–13.
- [100] S. Bourasseau, P. Blanquet, D. Coutellier, M. Dupont, M. Pernice, C. Delebarre, A. Thiriot, T. Demol, Integration of optical fibers and piezoelectric ceramics in composite materials. *3rd International Conference on Intelligent Materials and 3rd European Conference on Smart Structures and Materials*, Pierre-F. P. Gobin, Editor, Proceedings of SPIE, 2779, pp. 180–85, Apr. 1996.
- [101] T.E. Neary, D.R. Huston, J. Wu, W.B. Spillman, In-situ damage monitoring of composite structures. *Smart Structures and Materials: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, 1996; 2718: 202–17.

- [102] B.S. Shen, M. Tracy, Y.-S. Roh, F.-K. Chang, Built-in piezoelectrics for processing and health monitoring of composite structures. *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1996; 1310: 390–97.
- [103] E.F. Crawley, J. de Luis, Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, 1987; 25: 1373–85.
- [104] S. Mall, Integrity of graphite/epoxy laminate embedded with piezoelectric sensor/actuator under monotonic and fatigue loads. *Smart Materials and Structures*, 2002; 11: 527–33.
- [105] F.-K. Chang, S. Beard, Active damage detection in filament wound composite tubes using built-in sensors and actuators. *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 1997; 8(10): 891–97.
- [106] M. Lin, A. Kumar, X. Qing, S J. Beard, Advances in utilization of structurally integrated sensor networks for health monitoring in commercial applications. *Smart Structures and Materials: Smart Structures and Integrated Systems*, 2002; 4701: 167-176.
- [107] M. Lin, X. Qing, A. Kumar, S J. Beard, SMART Layer and SMART Suitcase for structural health monitoring applications. *Smart Structures and Materials, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 2001; 4332: 98-106.
- [108] EF. Crawley, AA. Bent, DJ. Warkentin, NW. Hagood, Recent progress in intelligent materials system. *Journal Matériaux et Techniques*, 1994; 12: 31–7.
- [109] SP. Joshi, WS. Chan, Fabrication and curing of laminates with multiple embedded piezoceramics sensors and actuators. ADPA/AIAA/ASME/SPIE, *Conference on Active Materials and Adaptive Structures*, 1992; 701–5.
- [110] Ferroperm Piezoceramics Catalogue: <http://www.ferroperm-piezo.com>.
- [111] NOESIS software, Advanced Acoustic Emission Data Analysis Pattern Recognition and Neural Networks Software, 2004.
- [112] A. El Mahi, M.K. Farooq, S. Sahraoui, A. Bezazi, Modelling the flexural behaviour of sandwich composite materials under cyclic fatigue. *Materials and Design*, 2004; 199–208.
- [113] M.K. Farooq, Mechanical behaviour of sandwich composite material under static and cyclic fatigue, Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans-France, 2003.
- [114] A. Bezazi, A. El Mahi, J-M. Berthélot, B. Bezazi, Experimental analysis of behavior and damage of sandwich composite materials in three-point bending. Part 2. Fatigue test results and damage mechanisms. *Strength of Materials*, 2009; 41: 257–67.
- [115] F. Koussa, Evaluation par émission acoustique de l'endommagement des matériaux sandwichs, Rapport Master2R, Université du Maine, 2009.

---

---

**Sujet** : *Comportement mécanique et caractérisation par implant*

*piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite*

**Etablissements** : Faculté des Sciences et Techniques du Maine

&

Faculté des Sciences de Sfax

---

---

## **Résumé :**

Ce travail de thèse porte sur le contrôle de santé intégré par émission acoustique des matériaux composites stratifiés et sandwichs. Le capteur d'EA est d'une part implanté dans la masse du matériau et d'autre part collé à la surface de ce dernier. Une première étude est consacrée à l'étude de l'influence de l'implant piézoélectrique dans le volume du matériau sur le comportement et les caractéristiques mécaniques en statiques, en fatigue cyclique et en fluage sous sollicitations en traction et en flexion. Les signaux d'émission acoustique sont collectés au cours des essais sur les différents matériaux. Les mécanismes d'endommagement de chaque matériau sont identifiés et caractérisés en utilisant une analyse multiparamétrique ( $k$ -moyennes) des signaux collectés. La dynamique de chaque mécanisme est suivie jusqu'à la rupture permettant de discriminer les mécanismes les plus critiques conduisant à la rupture du matériau. Une étude comparative des signaux d'EA entre matériau instrumenté en surface et celui instrumenté en volume avec insertion d'élément piézoélectrique est également menée. Elle a montré que les matériaux avec capteurs intégrés sont plus sensibles à l'émission acoustique, améliorant ainsi l'identification des mécanismes d'endommagement et le contrôle de santé intégré des matériaux composites étudiés. Enfin, la dernière partie du travail a été consacrée à l'étude de l'influence de l'intégration de plusieurs capteurs dans des structures en composites stratifiés et sandwichs. L'analyse des résultats expérimentaux et l'observation des signaux d'EA obtenus dans ces structures soumises à différentes sollicitations ont permis de définir les principales signatures acoustiques des différents modes d'endommagement prépondérants dans chaque type de structure. La localisation des sources d'endommagement a mis en évidence que les événements acoustiques sont apparus loin des positions des capteurs intégrés. De point de vue comparaison entre matériau instrumenté et matériau non instrumenté, l'activité acoustique montre clairement l'avantage de l'intégration de l'instrumentation au sein du composite. Cet avantage réside dans le fait de la détection expérimentale des modes d'endommagement précoces et leur chronologie d'apparition, faisant ainsi révéler les performances du composite instrumenté vis-à-vis à sa réponse envers l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques.

---

**Mots-clé** : *Composites intelligents, implant piézoélectrique, traction, flexion 3-point, statique, fatigue, fluage, endommagement, émission acoustique, k-moyennes.*

---