



**HAL**  
open science

## Caractérisation des endommagements d'un composite Carbone/PA12 par émission acoustique

F. Philip, Nathalie Godin, Stéphanie Deschanel, J. M. Leroy, F. Grosjean,  
Joel Courbon

► **To cite this version:**

F. Philip, Nathalie Godin, Stéphanie Deschanel, J. M. Leroy, F. Grosjean, et al.. Caractérisation des endommagements d'un composite Carbone/PA12 par émission acoustique. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.211. hal-00597092

**HAL Id: hal-00597092**

**<https://hal.science/hal-00597092>**

Submitted on 31 May 2011

**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.

# Caractérisation des endommagements d'un composite Carbone/PA12 par émission acoustique

## *Identification of damage sources in thermoplastic composites (Carbon/PA12) through acoustic emission analyses*

F. Philip<sup>1,2\*</sup>, N. Godin<sup>1</sup>, S. Deschanel<sup>1</sup>, J. M. Leroy<sup>2</sup>, F. Grosjean<sup>2</sup>, J. Courbon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: Université de Lyon, INSA-Lyon, MATEIS, 7 Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France

<sup>2</sup> : IFP Énergies nouvelles, BP3 69360 Solaize, FRANCE

\*florent.philip@gmail.com

### Résumé

Cet article porte sur la caractérisation de l'endommagement par émission acoustique d'un matériau composite carbone / polyamide 12 (PA12) à fibres longues. L'objectif de ce travail est de discriminer en temps réel les différents types d'endommagement au sein du composite afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu qui conduisent à la ruine de la structure. Une technique de classification supervisée a été utilisée. L'intérêt de cette technique est de pouvoir établir à partir d'une bibliothèque de signaux déjà labellisés une classification et une labellisation automatique des signaux en temps réel.

### Abstract

This article focuses on the damage characterization by acoustic emission of carbon / polyamide 12 (PA12) long fiber composite used by IFP Energies nouvelles for the development of hybrid tubes which are steel tubes reinforced with a composite. The objective of this work is to discriminate in real time the different types of damage in the composite to better understand the mechanisms involved and leading to the rupture of the structure. A supervised classification technique was used. The advantage of this technique is to establish from a library of signals previously labeled a classification and an automatic labeling of the signals in real time.

**Mots Clés :** Composite carbone polyamide, émission acoustique, identification, endommagement, thermoplastiques  
**Keywords:** Carbon composite polyamide, acoustic emission, identification, damage, thermoplastic

## 1. Introduction

L'objectif de ce travail est la discrimination des processus d'endommagement conduisant à la dégradation du matériau composite carbone / polyamide 12 (PA12) à fibres continues utilisé par IFP Énergies nouvelles pour le développement de « tubes frettés » qui sont des tubes en acier renforcés par un composite. Pour répondre à cette problématique, l'émission acoustique (EA) qui est une technique expérimentale de contrôle non destructif permettant de détecter en temps réel l'endommagement de matériaux sous sollicitation est une technique bien adaptée. En effet, les mécanismes d'endommagement s'accompagnent de libération d'énergie sous forme d'ondes acoustiques. Des capteurs résonnants ou large bande, disposés à la surface de la structure permettent d'enregistrer les salves d'EA [1-2]. Pour le composite carbone/PA12 les mécanismes d'endommagement attendus sont : décohésion, fissuration transverse, délaminage, rupture de fibres. L'objectif principal de notre analyse est de développer une méthode de classification supervisée en créant une bibliothèque de signaux labellisés (chaque signal est associé à un mécanisme d'endommagement connu) permettant d'identifier en temps réel la nature du mécanisme source.

Dans le cadre de cette analyse, nous faisons les hypothèses suivantes :

- Les différents mécanismes sources conduisent à des libérations d'énergie différentes (énergie et vitesse) se traduisant par des formes d'ondes différentes.
- L'énergie des signaux et par conséquent les différents descripteurs (amplitude, fréquence, nombre de coups...) sont en relation directe avec l'énergie libérée par le mécanisme source. L'énergie dépend notamment de la taille de la source et de l'énergie élastique stockée avant le déclenchement de la source.

- Les signaux sont altérés par la propagation. Cependant, cette coloration des signaux ne gomme pas les différences liées à la source. En effet, si les signaux sont différents à la source alors les signaux reçus par les capteurs sont différents.

Basée sur l'expérience dans la segmentation des données d'EA du laboratoire MATEIS [3-6], une technique de classification non supervisée a tout d'abord été entreprise sur des essais élémentaires. Cependant, les résultats de ce type de classification ne furent pas concluants. Godin [7] a montré que les algorithmes de classification utilisés, K-moyennes et optimisation du critère de Davies et Bouldin [8] par algorithme génétique, ne sont pas toujours appropriés pour des classes qui se chevauchent ou qui sont très déséquilibrées en nombres de signaux. Nous avons donc fait le choix d'une classification supervisée basée sur l'algorithme des K plus proches voisins. L'intérêt de cette technique est de pouvoir établir à partir d'une bibliothèque de signaux déjà labellisés une classification et une labellisation automatique des signaux en temps réel. La probabilité d'appartenance du signal à une classe est ensuite évaluée, donnant un indice de confiance à la labellisation.

Afin de développer cet outil de classification supervisée, nous devons tout d'abord construire une bibliothèque des signaux labellisés. La méthodologie mise en place pour la création de cette bibliothèque est de réaliser des essais mécaniques sur des éprouvettes modèles afin de créer un mécanisme source largement majoritaire. Pour cela, des essais mécaniques instrumentés par EA ont été effectués sur des éprouvettes avec différentes orientations de plis.

## 2. Techniques expérimentales

### 2.1 Essais expérimentaux

Le matériau étudié est un composite à fibres longues de carbone et à matrice thermoplastique PA12 fabriqué par Suprem SA. Quatre types d'éprouvettes ayant toutes une longueur utile de 150 mm ont été étudiées (Fig. 1) :

- $[0^\circ]$  : ruban de section 1,2 mm x 11,5 mm dont les fibres sont orientées dans l'axe du chargement,
- $[\pm 45^\circ]_s$  et  $[\pm 67,5^\circ]_s$  : éprouvettes de section 1 mm x 25 mm avec quatre plis dont les fibres ont respectivement une orientation de  $\pm 45^\circ$  et  $\pm 67,5^\circ$  par rapport à l'axe de chargement ,
- $[90^\circ]_s$  : éprouvettes de section 2 mm x 20 mm.

Des tests de traction à température ambiante ont été effectués sur une machine Instron équipée d'une cellule d'effort de 100 kN. La vitesse de déplacement de la traverse est fixée à 1 mm/min.

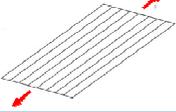
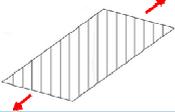
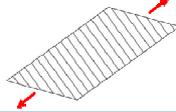
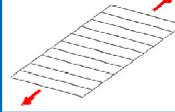
Empilement	$[0^\circ]$	$[\pm 45^\circ]_s$	$[\pm 67,5^\circ]_s$	$[90^\circ]_s$
Schématisation				
Sollicitation principale	fibres	interfaces entre plis en cisaillement	matrice interfaces fibres/matrice	interfaces fibres/matrice matrice
Contrainte à rupture	2000 MPa	200 MPa	50 MPa	35 MPa

Fig. 1 : Types d'éprouvettes testées

### 2.2 Émission acoustique

Les éprouvettes sont instrumentées en émission acoustique avec des capteurs résonants Micro 80 de la société EPA (bande de fréquence 150kHz-1MHz) couplés au matériau par une colle silicone CAF33. L'acquisition est effectuée à l'aide du système d'acquisition PCI2 (Euro Physical

Acoustic), avec une préamplification de 40dB. Le seuil de détection est fixé à 32dB. Les vitesses de propagation des ondes acoustiques au sein du matériau sont mesurées dans la direction de sollicitation sur les quatre éprouvettes  $[0^\circ]$ ,  $[+/-45^\circ]_s$ ,  $[+/-67,5^\circ]_s$  et  $[90^\circ]$ . Leurs valeurs sont respectivement égales à 9600m/s, 3440m/s, 2600m/s, 1800m/s. A l'aide de deux capteurs et des vitesses de propagation des ondes acoustiques, il est alors possible de localiser (linéairement) les salves acoustiques, appelées alors évènements. Un premier filtrage consiste à ne conserver que les évènements localisés entre les deux capteurs placés sur la partie utile de l'éprouvette, ce qui permet d'éliminer les bruits mécaniques pouvant provenir de la machine de traction et des mors de serrage. Les signaux enregistrés lors de la rupture macroscopique sont également écartés. Par ailleurs, une erreur d'acquisition a été remarquée lors des essais de ruptures : certains signaux sont mal décrits par le système d'acquisition, les descripteurs de ces signaux n'étant pas correctement calculés. Ces signaux qui sont caractérisés par un temps de montée supérieur à 100 $\mu$ s, sont donc également filtrés. Leur nombre est faible (1 à 5% de l'ensemble des signaux d'un essai) et ils apparaissent à contrainte élevée. Leur filtrage n'a donc pas d'impact sur l'analyse des signaux présentée ci-dessous.

### 3. Traitement des données d'EA

Les dix huit descripteurs réels disponibles pour les salves acoustiques sont : 1- temps de montée en  $\mu$ s, 2- log(nombre de coups), 3- durée en  $\mu$ s, 4- amplitude en dB, 5- fréquence moyenne en kHz, 6- nombre de coups au pic, 7- fréquence de réverbération en kHz, 8- fréquence de montée en kHz, 9- log(énergie absolue), 10- temps de montée relatif en  $\mu$ s, 11- durée/amplitude, 12- temps d'extinction en  $\mu$ s, 13- angle de montée, 14- angle de descente, 15- tps de mont./tps de desc., 16- log(énergie relative), 17- nombre de coups au pic relatif, 18- amplitude/fréquence.

La plupart des descripteurs ont une distribution exponentielle, ce qui les rend difficilement comparables avec d'autres descripteurs comme l'amplitude ou la fréquence apparente, qui ont des distributions gaussiennes ou suivant une loi normale. On a donc choisi d'utiliser le logarithme népérien de façon à ce que leur distribution se rapproche d'une loi gaussienne (Fig. 2).

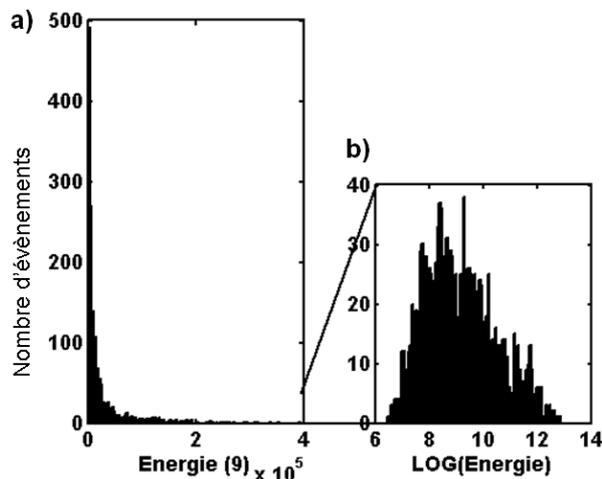


Fig. 2 : Histogramme de a) l'énergie, b) logarithme népérien de l'énergie.

#### 3.1 Standardisation:

Une standardisation (Eq.1) des données est effectuée sur l'ensemble des essais afin de conserver la même moyenne et le même écart-type pour tous les descripteurs. Le descripteur standardisé  $\tilde{X}_{np}$  est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\tilde{X}_{np} = \frac{X_{np} - \overline{X}_p}{E_p}, \quad (\text{Eq. 1})$$

avec:  $X_{np}$  le descripteur  $p$  de la salve acoustique  $n$ ,  $E_p$  l'écart type des valeurs du descripteur  $p$  et  $\bar{X}_p$  la valeur moyenne du descripteur  $p$ . Les histogrammes de deux descripteurs standardisés (amplitude et nombre de coups) sont présentés en Fig. 3.

### 3.2 Mesure de similitude : calcul de distance

L'évaluation de la similitude entre deux signaux d'EA  $X_i$  et  $X_{i'}$  est basée sur le calcul de la distance euclidienne (Eq. 2).

$$d(\tilde{X}_i, \tilde{X}_{i'}) = \left( \sum_{j=1}^p (\tilde{X}_{ij} - \tilde{X}_{i'j})^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{Eq. 2})$$

avec :  $p$  le nombre de descripteurs,  $j$  descripteur du signal.

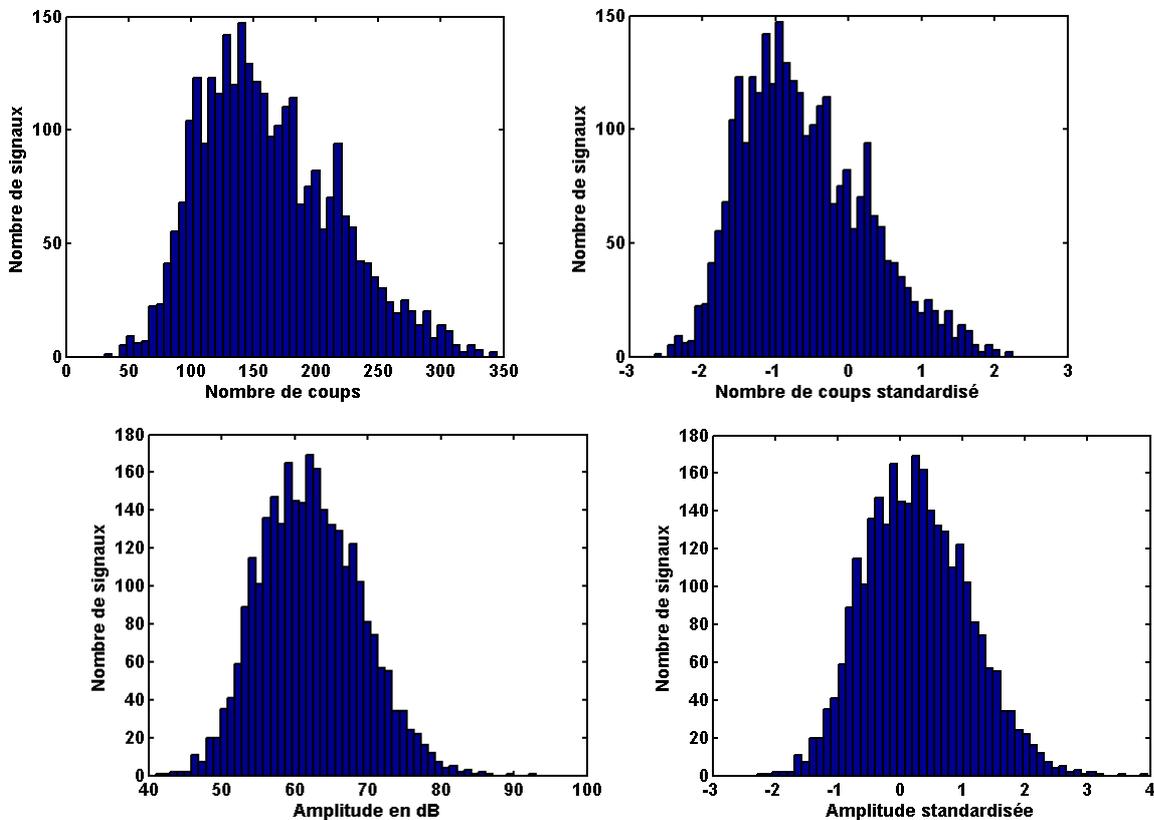


Fig. 3 : Effet de la standardisation sur les données

### 3.3 Matrice de corrélation

Afin d'optimiser la classification des données d'EA, il est important d'affiner la description des signaux en sélectionnant les descripteurs. En effet, dans ce type d'analyse, le choix des descripteurs des données est primordial : il influence directement le résultat de la classification. Il est inutile et redondant d'utiliser deux descripteurs trop fortement corrélés. La méthode de sélection choisie est basée sur le calcul des corrélations entre les descripteurs afin d'éviter d'utiliser plusieurs variables contenant la même information. La matrice des corrélations est :

$$R = \frac{1}{N-1} \tilde{X}' . \tilde{X} , \tag{Eq.3}$$

avec : N le nombre de données et  $\tilde{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & \dots & \dots & x_{np} \end{bmatrix}$  la matrice dont les lignes représentent les signaux et les colonnes représentent les descripteurs.

Le Tab. 1 représente la corrélation entre les descripteurs. Seules les valeurs extrêmes caractérisant une très grande corrélation (>0.9) ou une forte corrélation négative (<-0,9) sont répertoriées.

Descripteur 1	Descripteur 2	Coefficient de corrélation
log(Energie absolue)	log(Energie relative)	0,9996
Durée	Temps d'extinction	0,992
Fréquence moyenne	Fréquence de réverbération	0,98
Temps montée relative	Temps montée / Temps descente	0,9916
Durée / Amplitude	Temps d'extinction.	0,88
Temps d'extinction	angle de descente	-0,921
Durée	angle de descente	-0,91
Temps de montée	angle de montée	-0,894

Tab. 1. Valeurs remarquables de corrélation entre plusieurs descripteurs réels

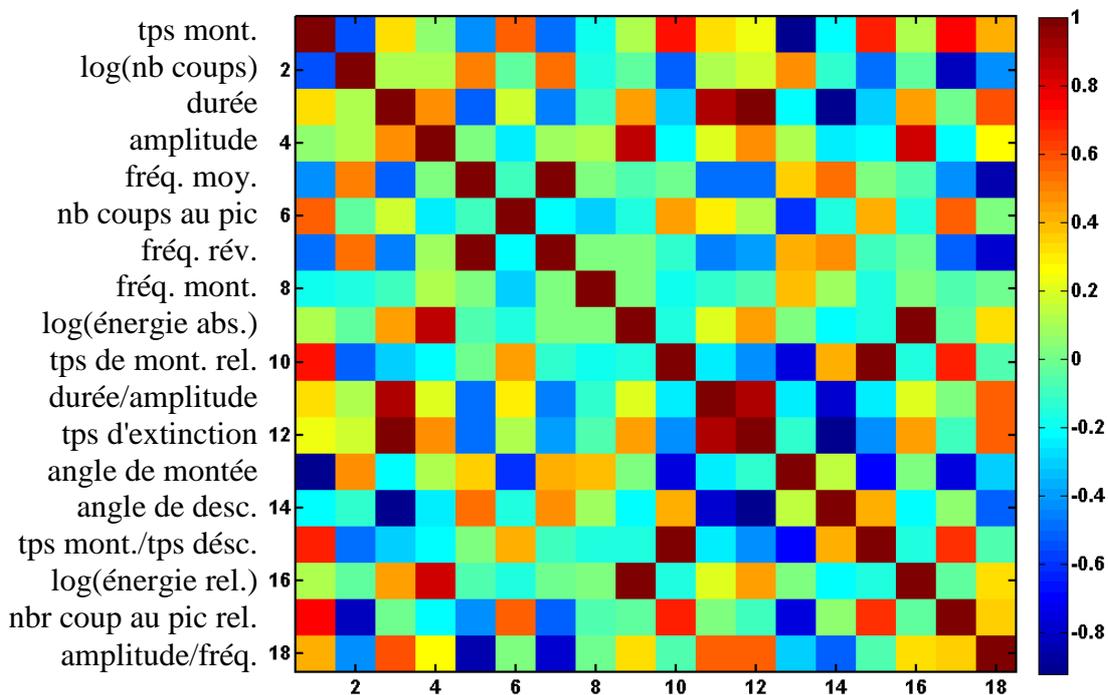


Fig. 4 : Matrice de corrélation des 18 descripteurs

La Fig. 4 présente la matrice de corrélation entre chaque descripteur, le niveau de corrélation étant indiqué par une échelle de couleur. On retrouve les descripteurs corrélés présentés dans le Tab. 1 pour les couleurs rouge foncé et bleu foncé. Pour la description des signaux de la bibliothèque, seuls les descripteurs pertinents et peu corrélés entre eux seront conservés.

#### 4. Création de la bibliothèque de signaux et classification supervisée

Une technique de classification supervisée (k plus proches voisins [3, 9]) est utilisée. Cette méthode nécessite une bibliothèque de signaux déjà labellisés. La Fig. 5 représente les différentes étapes de la classification supervisée. Le premier travail est de construire la bibliothèque. Ainsi elle sera obtenue à partir des signaux collectés lors des essais élémentaires. Pour les essais à [0°] l'émission acoustique est associée majoritairement à des ruptures de fibres alors que l'endommagement majoritaire des orientations [+/-45°] et [67,5°] est respectivement le délaminage et la décohésion fibre/matrice. Pour les essais à [90°], seuls dix signaux ont été acquis à cause de la rupture très rapide des éprouvettes. Ce sont les signaux de rupture macroscopique (très fortes énergies) associés à la coalescence de décohésions fibre/matrice et de rupture matricielle transverse. Ils ne seront donc pas inclus dans la bibliothèque.

Une fois la bibliothèque constituée, la classification des signaux provenant d'un essai est réalisée par comparaison des signaux de cet essai à ceux de la bibliothèque.

##### 4.1 Classement d'un signal par les K plus proche voisins

Pour une salve « inconnue » le principe de l'algorithme de classification est alors d'attribuer cette dernière à la classe de signaux de la bibliothèque dont elle a le plus grand nombre de plus proches voisins, en comparant le signal à tous les signaux de la bibliothèque. Le nombre de voisins est déterminé préalablement par l'utilisateur (voir 4.3). Une fois cette valeur définie, il suffit pour chaque signal d'EA de calculer sa distance euclidienne avec tous les signaux de la bibliothèque et de chercher ses k plus proches voisins. Le signal sera labellisé en évaluant la classe majoritaire parmi les plus proches voisins

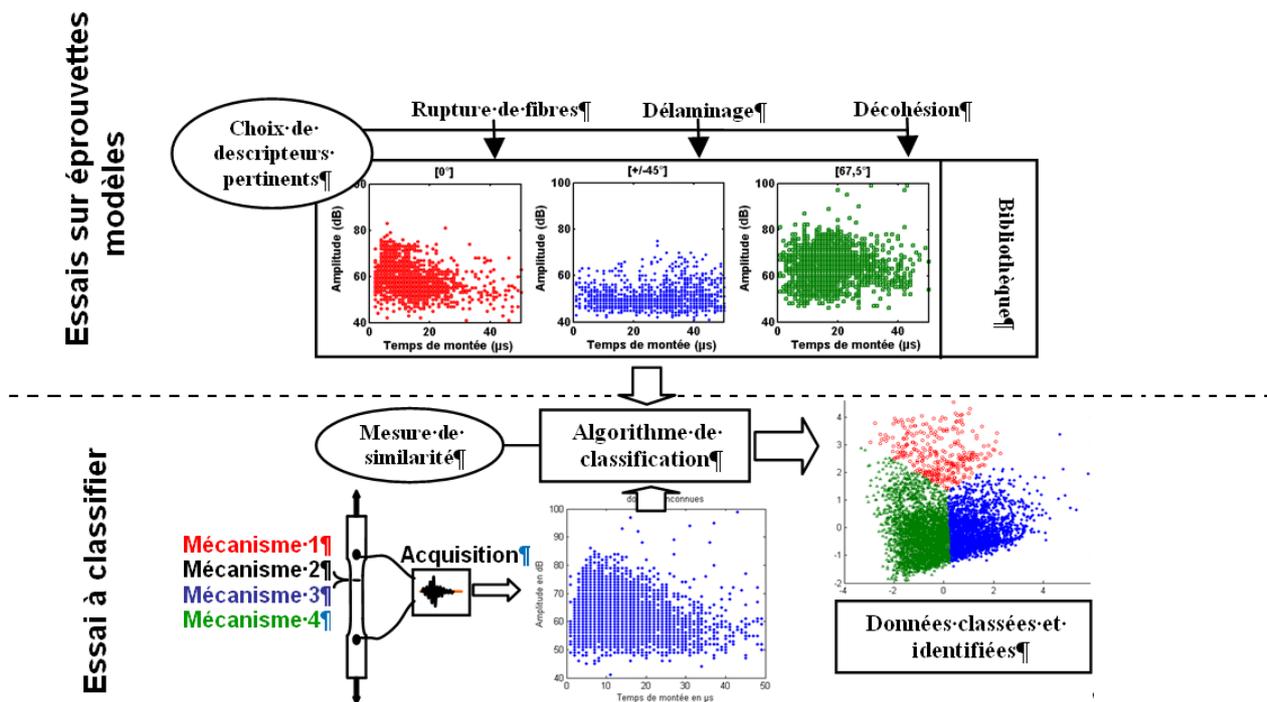


Fig. 5 : Étapes d'une classification supervisée appliquée aux données d'EA

## 4.2 Probabilité d'appartenance

Cet algorithme de classification (les  $k$  plus proches voisins) nous permet de définir par la suite une probabilité d'appartenance de la salve à chacune des classes et surtout à sa classe d'affectation. Cette probabilité est définie comme le rapport entre le nombre de voisins appartenant à une classe divisé par le nombre total de plus proches voisins. Cet estimateur nous donnera un indice de confiance pour l'attribution d'un signal à un mécanisme d'endommagement.

## 4.3 Méthode du leave-one-out

Pour cette technique des  $k$  plus proches voisins, il est nécessaire de déterminer le nombre  $k$  de plus proches voisins permettant la meilleure classification possible. Cette détermination est réalisée à l'aide d'un calcul d'erreur à partir de la méthode du « leave one out ». Elle consiste à retirer successivement chaque signal déjà classé de la base de référence. Pour ce signal extrait, on évalue sa classe en appliquant la méthode des  $k$  plus proches voisins. Pour cela, on calcule sa distance avec tous les signaux de la base de référence et on cherche ses  $k$  plus proches voisins. La classe correspondant à la majorité de ses  $k$  plus proches voisins lui est attribuée.

Pour chaque valeur de  $k$  ( $1 < k < 25$ ) les étapes de calcul sont les suivantes :

- 1) la bibliothèque est divisée en deux parties A et B, B ne contient qu'un signal à classer (mais signal déjà labellisé),
- 2) on recherche ses  $k$  plus proches voisins dans A à partir d'un calcul de distance euclidienne. On détermine la classe à laquelle appartient B,
- 3) on détermine si B est correctement classé,
- 4) on répète les étapes de 1 à 3 jusqu'à ce que toutes les salves de la bibliothèque aient été isolées dans B,
- 5) on évalue le pourcentage d'erreur pour chaque valeur de  $k$  en faisant le rapport du nombre de signaux non correctement classés sur le nombre total de signaux de la bibliothèque.

On sélectionne la valeur de  $k$  qui conduit au plus faible taux d'erreur. Une fois que la valeur  $k$  du nombre de plus proches voisins est déterminée, il suffit pour chaque signal d'EA de calculer sa distance euclidienne avec tous les signaux de la bibliothèque et de chercher ses  $k$  plus proches voisins (dans notre cas ses 13 plus proches voisins). Le signal sera labellisé en évaluant la classe majoritaire parmi les 13 voisins.

## 5. Résultats et discussion

En traçant la densité des signaux projetée dans les différents plans des descripteurs (Fig 6, Fig 7 et Fig. 8), on observe que les descripteurs qui différencient le plus les essais élémentaires sont l'amplitude, le temps de montée, le nombre de coups et la fréquence d'initiation. Ce sont donc des descripteurs pertinents. De plus, ces descripteurs sont peu corrélés entre eux, et ne représentent donc pas la même information. On retient ainsi ces quatre descripteurs pour la description des signaux de la bibliothèque. Les signaux seront donc décrits par les paramètres standardisés suivant : amplitude, nombre de coup, temps de montée, fréquence moyenne et la fréquence d'initiation.

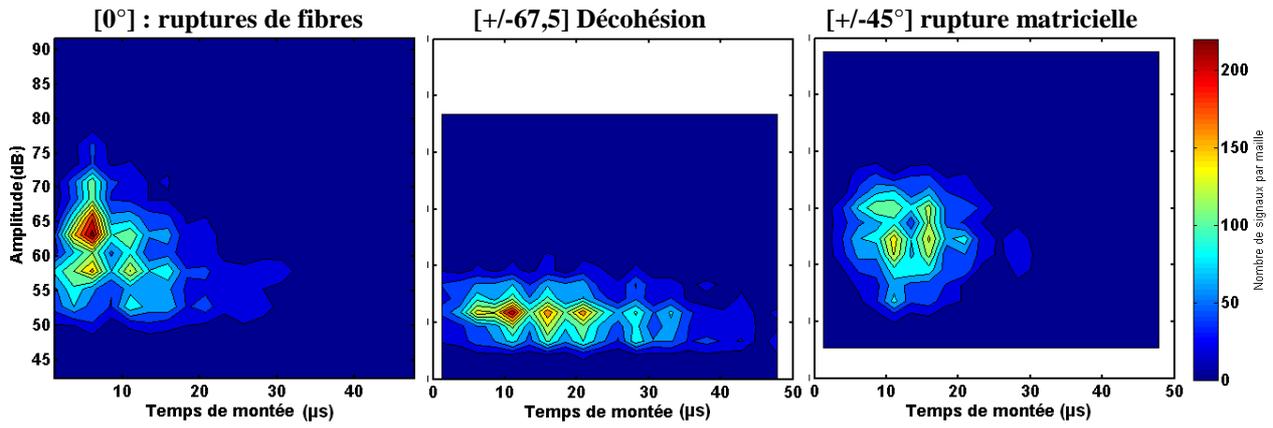


Fig. 6 : Densité des évènements acoustiques pour les trois essais élémentaires, projetés dans le plan temps de montée / amplitude

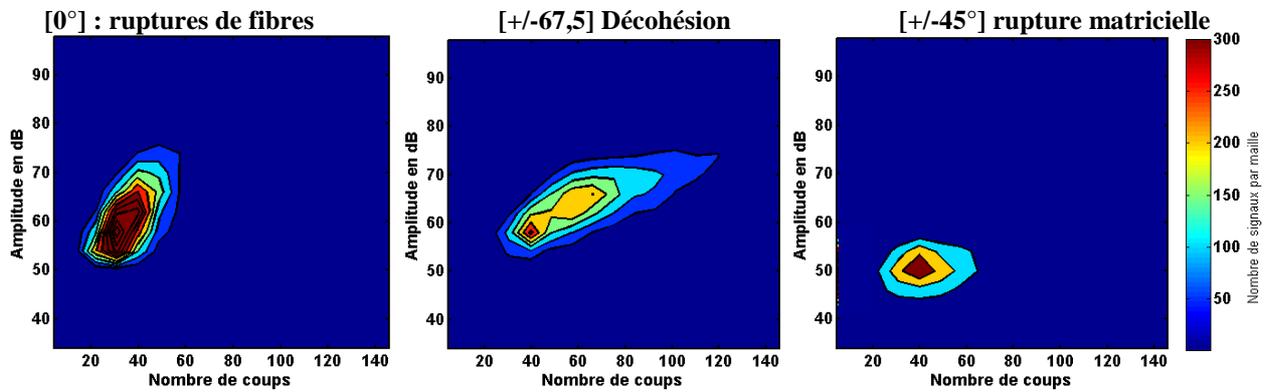


Fig. 7 : Densité des évènements acoustiques pour les trois essais élémentaires, projetés dans le plan nombre de coups / amplitude

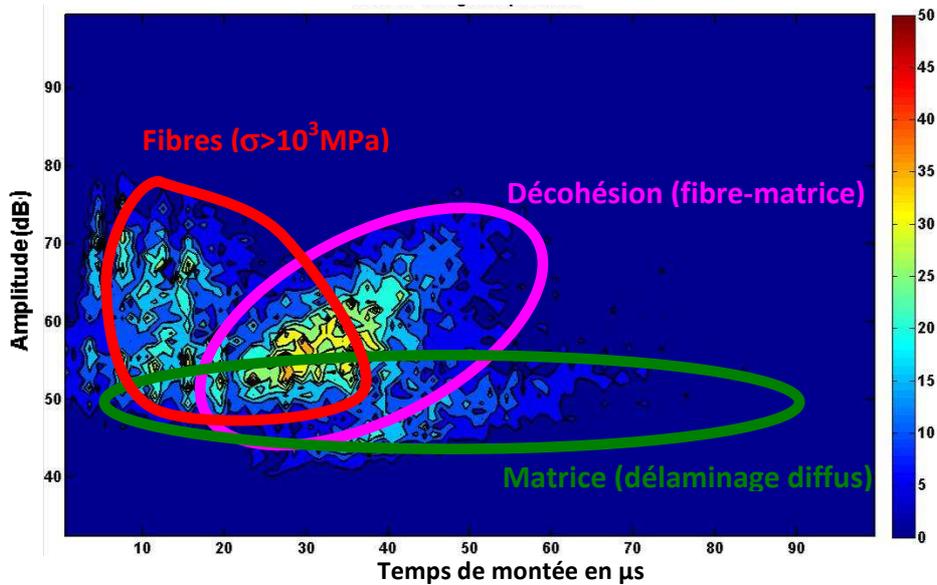


Fig. 8 : Densité de signaux de tous les essais réalisés dans le plan des descripteurs (temps de montée, amplitude)

### 5.1 Création de la bibliothèque : base de signaux labélisés

Pour la création de la bibliothèque, un essai à  $[0^\circ]$  permet de d'obtenir la partie de la bibliothèque associée aux ruptures de fibres, un essai à  $[+/-45^\circ]$  est utilisé pour créer la partie de la bibliothèque associé à la rupture matricielle, et enfin un essai à  $[+/-67,5^\circ]$  pour la décohésion fibre matrice. Cette bibliothèque comporte 11393 signaux, les trois classes ont le même poids (elles contiennent environ le même nombre de signaux). Sur chacun des signaux de cette bibliothèque nous appliquons la méthode du leave-one-out avec  $k=13$  afin d'isoler les signaux qui ne sont pas affectés à leur classe d'origine (Tab2). Cela va nous permettre de créer la bibliothèque qui est réalisée en conservant uniquement les signaux classés dans leur classe initiale. 1554 signaux sont donc écartés. Ceux-ci correspondent à des sources minoritaires qui sont activées. Par exemple pour un essai à  $0^\circ$ , on ne peut pas exclure des décohésions et du délaminage. Cette bibliothèque filtrée est utilisée par la suite.

	4576 signaux [0°]	4392 signaux [45°]	3979signaux [67,5°]
% de signaux prédit à [0°]	86,5%	8,9%	3,6%
% de signaux prédit à [45°]	8,7%	85,7%	4%
% de signaux prédit à [67,5°]	4,8%	5,4%	92,4%

Tab. 2 Résultats du leave-one-out.

### 5.2 Application

Nous avons testé l'algorithme de classification supervisée sur différents essais (Tab. 3) n'ayant pas servi à créer la bibliothèque.

Le premier essai est un essai de traction sur une éprouvette d'orientation  $0^\circ$ . 80% des signaux de cet essai sont attribués à la rupture de fibre.

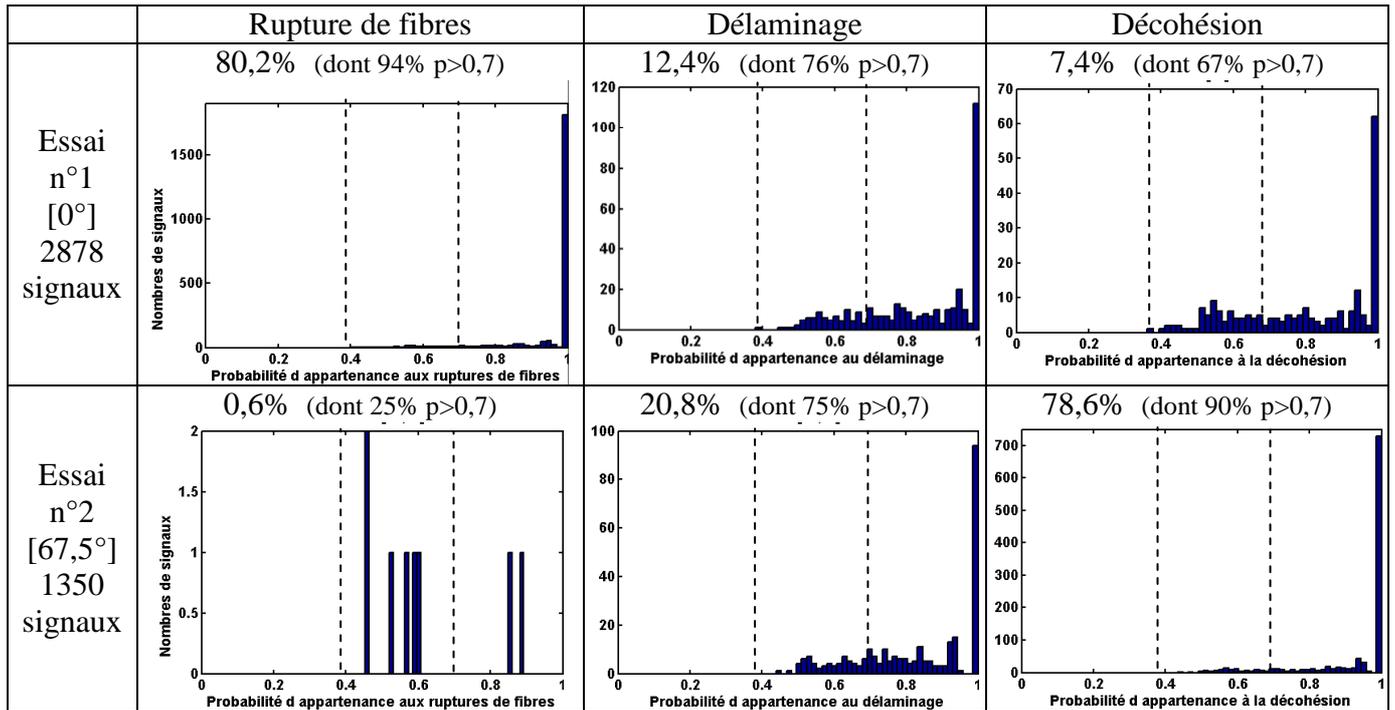
Le second essai est réalisé sur une éprouvette orientée à  $[+/-67,5^\circ]$  et une nouvelle fois 80% des signaux sont affectés à l'endommagement majoritaire attendu : la décohésion.

Pour chaque classe de signaux, nous avons représenté la distribution de la probabilité d'appartenance (Tab. 3). On remarque que la majorité des signaux sont clairement labélisés, c'est-à-dire affectés à une classe avec une probabilité d'appartenance supérieure à 0,7 (correspondant à 9 voisins sur 13 appartenant à la classe d'affectation). Pour les probabilités d'appartenance comprises entre 0,38 (correspondant à 5 voisins sur 13 appartenant à la classe d'affectation) et 0,7 on peut alors parler de classification floue : la classification de ces signaux reste incertaine.

### 6. Conclusion

La méthode de classification supervisée a été développée pour réaliser une classification automatique des données d'EA. Cette méthode permet de définir une probabilité d'appartenance pour chaque signal classé. La classification réalisée avec les descripteurs réels standardisés permet d'identifier les différents types d'endommagements jusqu'à la rupture du matériau.

Les résultats obtenus sont très prometteurs. Il reste à appliquer cette méthode sur un cas plus complexe, c'est à dire sur des essais où plusieurs endommagements sont activés, ce qui nous permettrait de valider la démarche.



Tab. 3 Résultats de classification pour deux essais.

## Références

- [1] Ono K. "Acoustic emission, Encyclopedia of Acoustics", Wiley (1997)
- [2] Beattie A.G. "Acoustic emission, principles and instrumentation", Journal of Acoustic Emission (1/2), 95-128 (1983)
- [3] Godin N. "Clustering of acoustic emission signals collected during tensile test on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers", NDT&E International 37, pp. 253-264, 2004.
- [4] Huguet S. "Application de classificateurs aux données de l'émission acoustique: identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans des composites à matrice polymère", Thèse de doctorat, 2002.
- [5] Moevus M, Godin N., Roubly D., R'Mili M., Reynaud P, Fantozzi G, Farizy G. "Analyse of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiC/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile curves". "Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering". Comp Sci Technol, 68, 1258-1265. 2008.
- [6] Philip F., Godin N., Deschanel S., Leroy J. M., F. Grosjean, R. Estevez, J. Courbon. "Identification of damage sources in thermoplastic composites (Carbon/PA12) through acoustic emission analyses based on pattern recognition", ECCM14 Budapest, 2010.
- [7] Godin N. "Identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement et prévision de la durée de vie des matériaux composites." Aussois 2011
- [8] Davies DL., Bouldin DW. "A cluster separation measure." IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol 1 pp. 224-227. (1979).
- [9] Hattori K., Takahashi M. "A new nearest-neighbor rule in the pattern classification problem" Pattern Recognition, Volume 32, Issue 3, Pages 425-432, 1999