



**HAL**  
open science

## **Etude du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde : apport de l'analyse temps-fréquence des signaux acoustiques**

Nicolas Guel, Nathalie Godin, Pascal Reynaud, Olivier Caty, Chloé

Dupleix-Couderc

### ► **To cite this version:**

Nicolas Guel, Nathalie Godin, Pascal Reynaud, Olivier Caty, Chloé Dupleix-Couderc. Etude du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde : apport de l'analyse temps-fréquence des signaux acoustiques. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. <hal-01621585>

**HAL Id: hal-01621585**

**<https://hal.science/hal-01621585v1>**

Submitted on 23 Oct 2017

**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.



HAL Authorization

# Etude du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde : apport de l'analyse temps-fréquence des signaux acoustiques

## *Mechanical behavior of oxide/oxide CMC: contribution of time-frequency analysis based on acoustic emission signals*

Nicolas Guel<sup>1,2,3</sup>, Nathalie Godin<sup>2</sup>, Pascal Reynaud<sup>2</sup>, Olivier Caty<sup>3</sup>, Chloé Duplex-Couderc<sup>1</sup>

1 : IRT Saint-Exupéry  
Esplanade des Arts et Métiers, F-33405 Talence Cedex  
e-mail : [nicolas.guel@irt-saintexupery.com](mailto:nicolas.guel@irt-saintexupery.com), [chloe.duplex-couderc@irt-saintexupery.com](mailto:chloe.duplex-couderc@irt-saintexupery.com)

2 : Université de Lyon, INSA de Lyon, MATEIS, CNRS UMR-5510  
7 avenue Jean Capelle, F-69621 Villeurbanne Cedex  
e-mail : [nathalie.godin@insa-lyon.fr](mailto:nathalie.godin@insa-lyon.fr), [pascal.reynaud@insa-lyon.fr](mailto:pascal.reynaud@insa-lyon.fr)

3 : LCTS CNRS UMR-5801, Université de Bordeaux  
3 allée de la Boétie, F-33600 Pessac  
e-mail : [caty@lcts.u-bordeaux.fr](mailto:caty@lcts.u-bordeaux.fr)

### Résumé

Les matériaux composites à matrice céramique (CMC) oxyde, de par leurs propriétés thermiques et mécaniques, sont voués à être insérés dans les nouvelles générations de moteurs d'aviation civile. Une étude de l'endommagement mécanique de ces matériaux est effectuée via un suivi en émission acoustique. Une approche signal est mise en place afin de caractériser l'activité acoustique. L'analyse des formes d'onde de chaque signal permet de définir de nouveaux descripteurs. Ces descripteurs apportent notamment des informations supplémentaires sur le contenu fréquentiel des signaux. L'analyse temps-fréquence des formes d'onde permet d'établir différentes classes de signaux d'émission acoustique, dans l'optique de les associer avec des mécanismes d'endommagement du matériau (rupture de fibres, fissuration matricielle, décohésion fibre-matrice).

### Abstract

*Due to their thermo-mechanical properties, ceramic matrix composites (CMC) are intended for new generation of civil aircraft engines. Mechanical damage of these materials is monitored by acoustic emission. A signal approach is set in order to characterize acoustic activity. The study of signal waveforms lead to the implementation of new descriptors. These descriptors give additional information on signal frequency spectrum. Time-frequency analysis allows to distinguish several class of acoustic emission signal, with a view to associate them with damage mechanisms of this material (fiber failure, matrix crack, fiber-matrix debonding).*

**Mots Clés :** Composites à matrice céramique, émission acoustique, mécanismes d'endommagement  
**Keywords:** Ceramic matrix composites, acoustic emission, damage mechanisms

## 1. Introduction

Les composites à matrice céramiques (CMC) présentent d'excellentes propriétés thermomécaniques en comparaison des matériaux métalliques. Grâce à leurs caractéristiques, ces matériaux sont envisagés pour des applications dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Parallèlement aux CMC base carbure, les CMC oxyde, matériaux à plus faible coût, sont étudiés dans le but d'être introduits dans les arrière-corps des moteurs d'avions. Leur développement nécessite une compréhension précise de leur endommagement. C'est dans ce contexte que l'IRT Saint-Exupéry a lancé un projet « CMC oxyde voie liquide » afin d'étudier le comportement mécanique de composites à matrice céramique à tissage bidimensionnel.

Afin de suivre en temps réel l'endommagement du matériau, l'émission acoustique (EA) est utilisée lors de cette étude. Les signaux d'émission acoustique résultent de phénomènes de libération d'énergie au sein du matériau. Une première approche est basée sur l'étude de la dynamique de l'endommagement, de l'analyse de la libération d'énergie ou de l'évolution du nombre de sources actives. Une seconde analyse, basée sur l'extraction de descripteurs sur les formes d'onde numérisées, permet de structurer les données en classes afin d'identifier la signature acoustique des différents mécanismes d'endommagement [1], [2]. Cette seconde approche constitue la majeure partie de cette étude. Des essais de traction monotone à température ambiante sont effectués sur des composites à matrice céramique oxyde à tissage bidimensionnel. Deux sens de sollicitation sont étudiés : des essais de traction dans le sens des fibres (essais à  $0/90^\circ$ ) et des essais de traction à  $\pm 45^\circ$  par rapport à l'orientation des fibres. Seuls les résultats provenant d'essais de traction dans le sens des fibres seront présentés dans ce papier. Dans ce travail, une approche basée signal est développée afin d'analyser les signaux d'émission acoustique.

## 2. Procédure expérimentale

### 2.1 Description du matériau

Le matériau composite à matrice céramique oxyde étudié est composé de fibres en alumine (Nextel 610 – 3M) et d'une matrice aluminosilicate microporeuse. La matrice microporeuse est obtenue par frittage de poudre. Cette microporosité améliore la déviation des fissures aux interfaces fibre-matrice dans le but d'obtenir un matériau avec un comportement endommageable [3], [4]. Le procédé de fabrication induit des macroporosités ainsi que des fissures de retrait présentes à l'état initial dans la matrice (Fig. 1). Le matériau est composé de 12 plis tissés en satin de 8 (8HS), le tissage est effectué à partir de mèches composées de fibres. Le taux volumique de fibres est compris entre 45 et 50%. Les éprouvettes de traction sont obtenues par usinage des plaques réalisées. Des éprouvettes haltères sont utilisées avec une partie utile de 30 mm x 16 mm et une épaisseur de 2,5 mm.

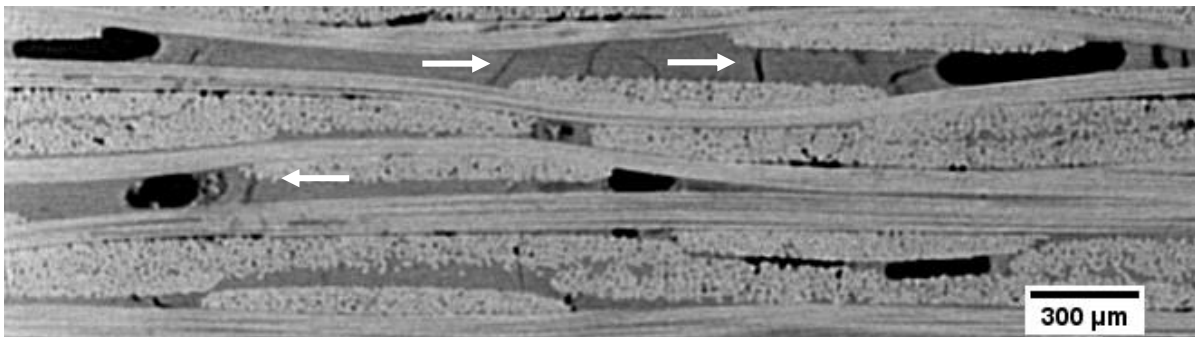


Fig. 1. Reconstruction tomographique en 2D d'un composite à matrice céramique oxyde (N610/Aluminosilicate). Les fissures de retrait se situent principalement dans la matrice, entre les plis 2D.

### 2.2 Protocole d'essai

Les essais de traction sont réalisés à température ambiante avec une machine de traction hydraulique MTS 810. Les essais sont réalisés en déplacement imposé jusqu'à rupture de l'éprouvette. La déformation est mesurée via un extensomètre à couteaux collé sur une face de l'éprouvette, la distance entre les couteaux est de 25 mm.

L'activité acoustique est détectée à l'aide de capteurs piézoélectriques (picoHF – MistrasGroup) permettant une acquisition jusqu'à des fréquences supérieures à 1MHz. Des capteurs (nano30 – MistrasGroup), présentant une meilleure sensibilité pour des fréquences inférieures à 750 kHz, sont également utilisés. Les capteurs sont disposés dans la partie utile de l'éprouvette, distant de 50 mm sur une face de l'éprouvette. Le couplage capteur-matériau est assuré par de la graisse à vide. Avant d'être analysés par le système d'acquisition (PCI-2, MistrasGroup), les signaux passent via un

préamplificateur avec un gain de 40 dB et une bande passante de 20 à 1200 kHz. Le seuil d'acquisition des signaux est fixé à 40 dB. La vitesse de propagation des ondes, estimée à partir de génération de sources Hsu-Nielsen (rupture de mines de crayon) est fixée à 6800 m.s<sup>-1</sup> dans le sens des fibres. En raison de l'atténuation du matériau, entre 10 et 15% des signaux sont localisés. Les analyses sont effectuées sur l'ensemble des signaux enregistrés.

La forme d'onde de chaque signal est enregistrée par le système d'acquisition. La fréquence d'échantillonnage est fixée en fonction de la plage de fréquence du capteur. La forme d'onde est numérisée sur une période de 2000 µs après sa détection.

### 3. Définition des descripteurs basés sur les formes d'onde

Dans le cadre de cette étude, toutes les formes d'onde sont numérisées. Le début du signal est évalué à l'aide du premier dépassement de seuil. L'énergie  $\Delta E$  enregistrée pendant un intervalle de temps  $\Delta t$  est comparée à l'énergie cumulée  $E_{cumul}$  depuis le début du signal. Si  $\Delta E(t_i) < 0,01\% * E_{cumul}(t_i)$ , alors  $t_i$  est considéré comme la fin du signal. Cela permet notamment de s'affranchir de la résonance du capteur. A partir de ces formes d'onde, plusieurs descripteurs sont définis à partir des travaux de Morizet [2].

Dans le domaine temporel, les descripteurs traditionnels sont calculés : amplitude, durée, énergie, temps de montée, auxquels viennent s'ajouter le nombre de franchissement de zéro, le barycentre temporel et la décroissance temporelle. L'entropie de Shannon  $H$  de chaque signal est calculée à partir des formes d'onde (**Eq. 1**),  $P(x_i)$  étant la probabilité qu'une composante du signal X prenne la valeur  $x_i$ . Dans notre cas,  $x_i$  correspond à des intervalles d'amplitudes. Plus un signal est complexe, plus la valeur de l'entropie sera élevée.

$$H(s) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2(P(x_i)) \quad (\text{Eq. 1})$$

Le spectre fréquentiel des signaux est déterminé par la méthode de Welch [5] (**Fig. 2**). Soient  $A_i(f_i)$  la densité spectrale pour la fréquence  $f_i$ ,  $BF$  le barycentre fréquentiel,  $f_{inf}$  et  $f_{sup}$  les bornes de la plage fréquentielle étudiée, dans notre cas ]0 ; 1200 kHz] :

- L'étalement spectral (*spectral spread*) correspond à l'écart-type de la distribution spectrale (**Eq. 2**),

$$ES = \sqrt{\frac{\sum_{f_i=f_{inf}}^{f_{sup}} A_i(f_i) \cdot (f_i - BF)^2}{\sum_{f_i=f_{inf}}^{f_{sup}} A_i(f_i)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

- La dissymétrie spectrale (*spectral skewness*) traduit de l'écart du spectre vis-à-vis d'une distribution normale centrée sur le barycentre fréquentiel (**Eq. 3**),

$$DS = \frac{1}{ES^3} \frac{\sum_{f_i=f_{inf}}^{f_{sup}} A_i(f_i) \cdot (f_i - BF)^3}{\sum_{f_i=f_{inf}}^{f_{sup}} A_i(f_i)} \quad (\text{Eq. 3})$$

- Le coefficient d'aplatissement (*spectral kurtosis*) mesure la répartition de l'énergie autour du barycentre fréquentiel (**Eq. 4**), ce coefficient vaut 0 dans le cas d'une distribution normale.

$$CA = \frac{1}{ES^4} \frac{\sum_{f_i=f_{inf}}^{f_{sup}} A_i(f_i) \cdot (f_i - BF)^4}{\sum_{f_i=f_{inf}}^{f_{sup}} A_i(f_i)} \quad (\text{Eq. 4})$$

- La fréquence d'ouverture correspond à la fréquence à partir de laquelle 5% de l'énergie a été détectée ]0;  $f_{ouv}$ ],

- La fréquence de coupure indique la fréquence pour laquelle 95% de l'énergie a été détectée  $]0; f_{coup}]$ .

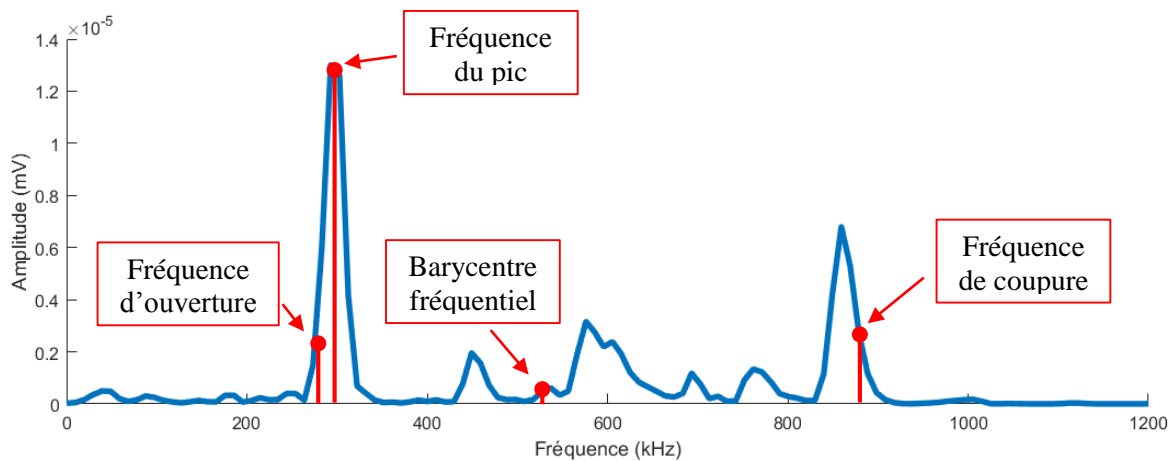


Fig. 2. Spectre fréquentiel d'un signal d'émission acoustique avec la représentation des différentes fréquences caractéristiques.

Le tableau 1 résume les descripteurs calculés à partir des formes d'onde (**Tab. 1**).

Descripteur	Unité	Descripteur	Unité
Amplitude	dB	Dissymétrie	-
Durée	$\mu\text{s}$	Aplatissement	-
Energie	aJ	Pente	$\text{kHz}^{-1}$
Franchissement de zéro	-	Fréquence de coupure	kHz
Temps de montée	$\mu\text{s}$	Etalement (/pic)	kHz
Barycentre temporel	$\mu\text{s}$	Dissymétrie (/pic)	-
Décroissance temporelle	-	Aplatissement (/pic)	-
Puissance partielles (x4)	%	Fréquence d'ouverture	kHz
Barycentre fréquentiel	kHz	Energie des paquets d'ondelette (x8)	%
Fréquence au pic	kHz	Entropie de Shannon	-
Etalement	kHz		

Tab. 1. Descripteurs calculés à partir des formes d'onde avec l'unité correspondante

#### 4. Résultats et discussion

Trois essais de traction monotone dans le sens des fibres ont été réalisés afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats. Le début de l'activité acoustique coïncide avec la perte de linéarité de la courbe contrainte-déformation, à 0.1 en déformation normée  $\bar{\epsilon}$  (**Fig. 3.a**). L'activité acoustique peut également être caractérisée à partir de l'évolution de l'énergie cumulée (**Fig. 3.b**). Une augmentation de l'énergie cumulée est observée à partir de  $\bar{\epsilon} = 0.45$  en déformation normée. Un saut énergétique s'effectue à  $\bar{\epsilon} = 0.85$ . Ce phénomène, qui ne se traduit pas par une augmentation du nombre de signaux, correspond à une perte de module importante sur la courbe contrainte-déformation. Il est donc probable que les informations contenues dans les signaux amènent à une meilleure compréhension du comportement mécanique du matériau et des mécanismes d'endommagement qui le régissent.

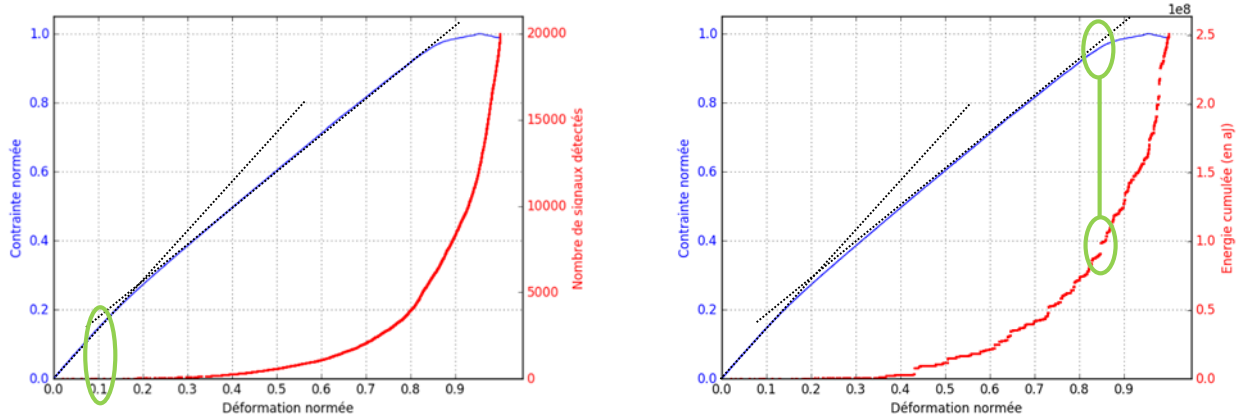


Fig. 3. a) Evolution du nombre de signaux d’émission acoustique cumulé ; b) Evolution de l’énergie cumulée des signaux en fonction de la déformation normée  $\bar{\epsilon}$  – essai de traction dans l’axe des fibres de CMC oxyde/oxyde à tissage bidimensionnel [0/90°] (capteurs picoHF).

L’analyse des descripteurs fréquentiels a permis de faire une distinction de catégories de signaux à partir des fréquences d’ouverture et de coupure (**Fig. 4.a**). Trois classes de signaux se distinguent par des fréquences d’ouverture et de coupure très différentes avec les capteurs picoHF (**Fig. 4.a**). La différenciation des signaux s’avère moins évidente avec les capteurs nano30 du fait de leur plage de sensibilité plus restreinte (**Fig. 4.b**). L’étude du contenu fréquentiel des signaux va s’effectuer avec les capteurs picoHF.

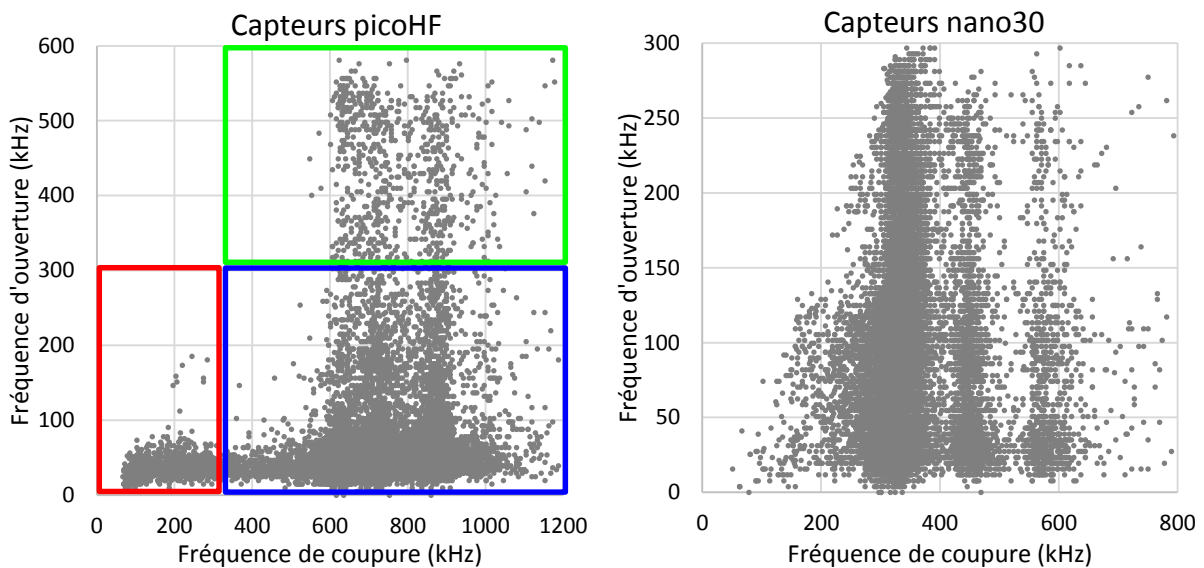


Fig. 4. Répartition des signaux d’émission acoustique en fonction de leur fréquence d’ouverture et de fermeture ; a) capteurs picoHF ; b) capteurs nano30 - essai de traction dans l’axe des fibres de CMC oxyde/oxyde à tissage bidimensionnel [0/90°]

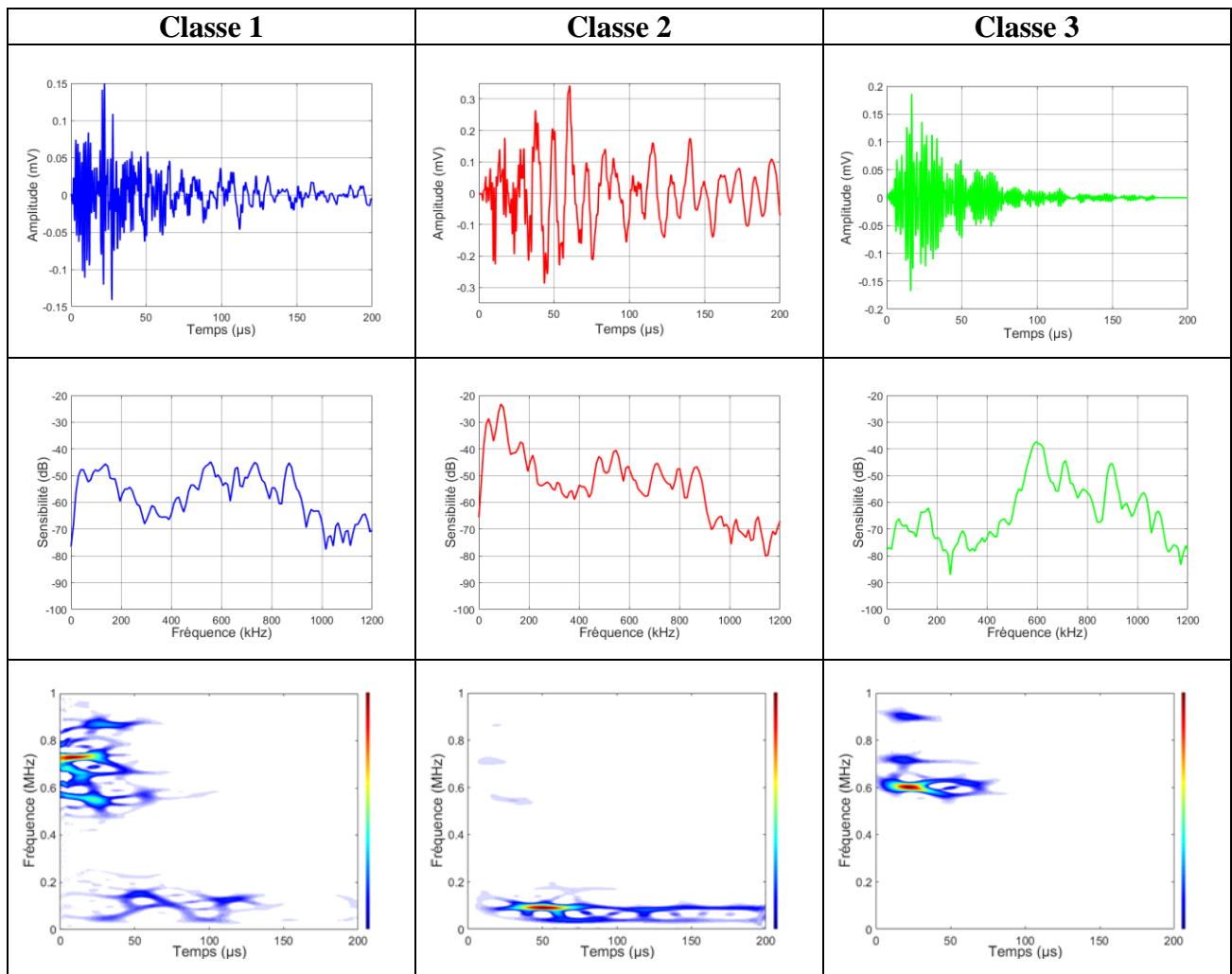
La majeure partie des signaux se trouve dans la classe 1 (bleu – 86% des signaux) qui présente des fréquences d’ouverture inférieures à 300 kHz et des fréquences de coupure allant de 300 à 1200 kHz. La classe2 (rouge – 6% des signaux) est caractérisée par un contenu fréquentiel inférieur à 300 kHz. A l’inverse, les signaux de la classe 3 (vert – 8% des signaux) possèdent 95% de leur spectre fréquentiel dans la plage 300 – 1200 kHz. Les fréquences caractéristiques des classes obtenues sont présentées en **Tab. 2**.

	Classe 1 (bleu)	Classe 2 (rouge)	Classe 3 (vert)
<b>Barycentre fréquentiel</b>	382 kHz	83 kHz	608 kHz
<b>Fréquence au pic</b>	256 kHz	60 kHz	596 kHz

Tab. 2. Barycentre fréquentiel et fréquence au pic médian des groupes de signaux provenant des essais de traction dans l'axe des fibres de CMC oxyde/oxyde à tissage bidimensionnel [0/90°]

En parallèle, des analyses de classification non supervisée des signaux ont été menées. Ces classifications ont comme données d'entrée les descripteurs des signaux listés en **Tab. 1**. Les classifications sont basées sur l'emploi de dendrogramme, d'analyses en composantes principales et de méthode des k-moyennes optimisées à l'aide d'un algorithme génétique [6], [7]. Les classes obtenues sont similaires à celles déterminées avec les fréquences d'ouverture et de coupure à plus de 95%.

Les descripteurs temporels des groupes de signaux ont été analysés de sorte à voir si ces disparités de contenu fréquentiel se retrouvent dans le domaine temporel. Les signaux hautes fréquences (classe 3) se caractérisent par des durées relativement courtes, contrairement aux signaux de basses fréquences (classe 2) qui présentent des durées longues ainsi qu'un nombre de franchissement de zéro faible (**Tab. 3 et 4**).



Tab. 3. Représentation des formes d'onde, des spectres fréquentiels et des cartographies temps-fréquence de signaux caractéristiques des classes obtenues

Les relations entre caractéristiques fréquentielles et temporelles sont observées sur les cartographies temps-fréquence des signaux via une distribution de Wigner-Ville lissée (**Tab. 3**). La classe 2 est

caractérisée par un contenu fréquentiel bas qui se maintient sur des longues durées. Les signaux de la classe 3 possèdent des fréquences très élevées qui sont activées sur de courtes durées. Les cartographies des signaux de la classe 1 sont constituées d'un domaine temps-fréquence similaire à la classe 3 (haute fréquence, faible durée – en vert), mais également de basses fréquences sur des durées plus importantes.

Des différences sont également observées sur les spectres fréquentiels, la classe 2 se caractérise par une asymétrie gauche marquée, alors que les signaux de la classe 3 possèdent une légère asymétrie droite. Les signaux de la classe 1 présentent des spectres étalés, à l'inverse de la classe 2 qui se caractérise par une distribution spectrale étroite et pointue (coefficient d'aplatissement élevé) ; ce qui corrobore les observations en **Fig. 4.a**.

Bien que des descripteurs temporels (durée, énergie) laissent apparaître des différences entre les classes (**Tab. 4.**), le recouvrement de ces classes dans le domaine temporel empêche d'avoir une distinction des catégories de signaux aussi nette que celle présentée en **Fig. 4.a**. Les valeurs médianes des descripteurs de chaque classe sont présentées ci-dessous.

Descripteur	Classe 1 (bleu)	Classe 2 (rouge)	Classe 3 (vert)
Durée	154 $\mu$ s	227 $\mu$ s	78 $\mu$ s
Amplitude	55 dB	52 dB	58 dB
Energie	321 aJ	303 aJ	634 aJ
Franchissements de zéros	126	49	143
Etalement spectral	234 kHz	83.9 kHz	128 kHz
Dissymétrie spectrale	0.15	5.29	-0.55
Coefficient d'aplatissement	2.85	37.0	9.18
Entropie de Shannon	5.27	5.71	5.14

Tab. 4. Valeurs médianes de descripteurs temporels et fréquentiels pour les 3 classes de signaux

La localisation des sources en cours d'essai montre que les trois classes sont représentées. L'évolution du nombre de signaux cumulés en cours d'essai de chaque classe atteste d'un ordre d'apparition différent en fonction des classes de signaux. Bien que leur nombre soit moins élevé, les signaux hautes fréquences (classe 3) apparaissent plus tôt que les signaux des classes 1 et 2 (**Fig. 5.**). Leur activation s'effectue dès  $\bar{\epsilon} = 0,3$  alors que les classes 1 et 2 s'activent plus progressivement avec une forte augmentation pour 0,8 en déformation normée. L'augmentation du nombre de signaux des classes 1 et 2 semble être consécutive à l'activation des signaux de la classe 3.

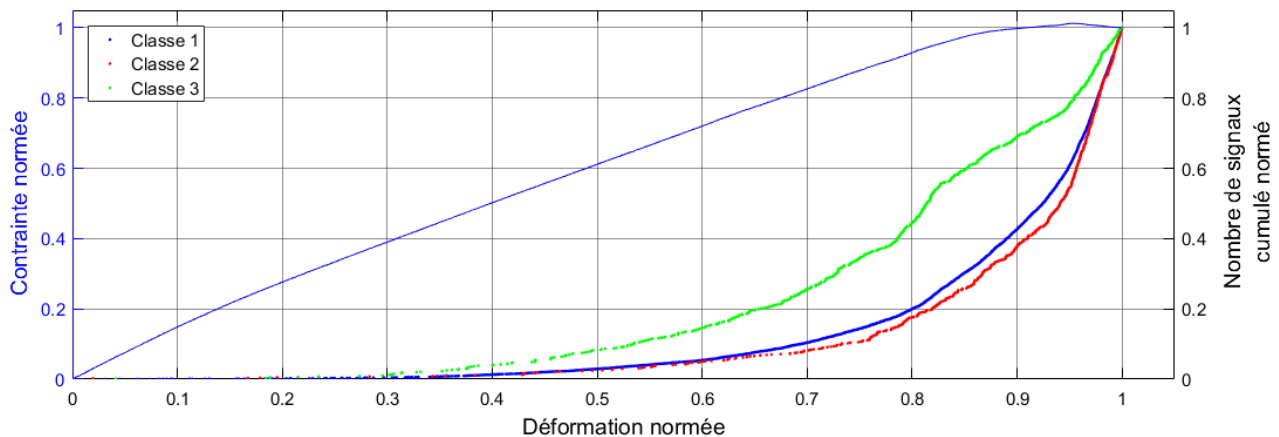


Fig. 5. Evolution du nombre de signaux cumulés par classe en fonction de la déformation normée  $\bar{\epsilon}$  lors d'un essai de traction dans l'axe des fibres de CMC oxyde/oxyde à tissage bidimensionnel  $[0/90^\circ]$

## 5. Conclusion

L'approche signal de l'émission acoustique montre la richesse des informations contenues dans les formes d'onde, tant dans le domaine temporel que fréquentiel. L'utilisation de capteurs avec une grande plage de sensibilité, couplée à l'emploi de descripteurs fréquents tels que la fréquence d'ouverture et de coupure, permet de distinguer plusieurs catégories de signaux sans passer par des algorithmes de classification. Les classes de signaux obtenues mettent en relief les disparités dans le contenu fréquentiel ainsi que dans le domaine temporel qui existent entre les différentes classes. Les analyses temps-fréquence ont notamment permis de distinguer les composantes des différentes classes de signaux.

Les classes de signaux obtenues font ressortir des dynamiques différentes au cours des essais, avec notamment une activation des signaux hautes fréquences plus rapide. Des études complémentaires sont nécessaires afin d'associer ces classes de signaux à des mécanismes d'endommagement. Ces mécanismes sont multiples au sein des CMC oxyde à tissage bidimensionnel : fissuration matricielle, propagation de fissures de retrait, décohésion fibre-matrice, décohésion inter-plis, ruptures des fibres... Des essais in-situ sous  $\mu$ -tomographe avec suivi en émission acoustique ont été réalisés dans l'optique de relier l'activité acoustique à l'endommagement de la microstructure, ces essais sont en cours d'analyse. De plus, les essais de traction à  $\pm 45^\circ$  par rapport à l'orientation des fibres favorisent certains mécanismes d'endommagement tels que la fissuration matricielle et la décohésion fibre-matrice [4]. Le suivi en émission acoustique de ces essais apporte donc des informations supplémentaires quant aux cinétiques d'endommagement des composites à matrice céramique oxyde.

## Références

- [1] E. Maillet, « Identification des Mécanismes d'endommagement et prévision de la durée de vie des composites à matrice céramique par émission acoustique », Lyon, INSA, 2012.
- [2] N. Morizet, N. Godin, J. Tang, E. Maillet, M. Fregonese, et B. Normand, « Classification of acoustic emission signals using wavelets and Random Forests : Application to localized corrosion », *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 70-71, p. 1026-1037, mars 2016.
- [3] F. W. Zok et C. G. Levi, « Mechanical properties of porous-matrix ceramic composites », *Adv. Eng. Mater.*, vol. 3, n° 1-2, p. 15-23, 2001.
- [4] C. Ben Ramdane, « Etude et modélisation du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde », Bordeaux, 2014.
- [5] P. Welch, « The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms », *IEEE Trans. Audio Electroacoustics*, vol. 15, n° 2, p. 70-73, 1967.
- [6] M. Moevus, « Mécanismes d'endommagement, émission acoustique et durée de vie en fatigue statique du composite SiC-[Si-B-C] aux températures intermédiaires », INSA de Lyon, 2007.
- [7] A. Sibil, « Comportement thermomécanique et endommagement de nouveaux réfractaires verriers à très haute teneur en zircon: investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et émission acoustique », Lyon, INSA, 2011.