

Définition de nouveaux indicateurs d'endommagement en fatigue cyclique pour les CMC : vers la prévision de la durée de vie

E. Racle¹, N. Godin¹, P. Reynaud¹, M. R'Mili¹, G. Fantozzi¹,
C. Rakotoarisoa², V. Herb³, M. Kaminski⁴

1 : INSA de Lyon, laboratoire MATEIS, 7 avenue Jean Capelle,
69621 Villeurbanne cedex

2 : Snecma – Groupe Safran
Rond Point René Ravaud, 77550 Moissy Cramayel

3 : Herakles - Groupe Safran
Les Cinq Chemins, 33185 Le Haillan, France

4 : ONERA
29 avenue de la Division Leclerc
92322 Chatillon

Résumé :

Les matériaux composites à matrice céramique (CMC) semblent être des matériaux très prometteurs pour les nouvelles générations de propulseurs civils du fait de leur faible densité et leur grande ténacité en température. Il est donc nécessaire de connaître et de comprendre les mécanismes d'endommagement de ce type de matériau, et particulièrement pour des sollicitations de longues durées. Dans ce but des essais de fatigue cyclique et statique sont réalisés en température ($T=450^{\circ}\text{C}$). En raison de la complexité des modes d'endommagement, il est indispensable de développer des moyens de suivi des mécanismes d'endommagement en temps réel. Cette étude propose d'utiliser l'émission acoustique comme indicateur d'endommagement, au travers de deux approches. D'une part l'identification de la signature acoustique d'un mécanisme d'endommagement permet sa détection en temps réel et l'évaluation de sa criticité. D'autre part, en considérant l'énergie acoustique de manière globale et en la comparant à l'énergie mécanique, il est possible de déterminer en temps réel différents niveaux d'endommagement caractéristiques du matériau.

Abstract :

Ceramic matrix composites (CMC) seem to be adequate materials to design new generation of civil aircraft engines because of their low density and high tensile strength at high temperature. That is why damage mechanisms have to be identified, through static and cyclic fatigue tensile tests. The high complexity of these mechanisms makes that it is necessary to use real-time monitoring techniques. The present paper proposes the use of acoustic emission as damage evolution indicator through two approaches. First clustering of acoustic emission makes it possible to get a real-time detection of damage phenomena. Besides the energy of acoustic signals can be considered globally for a real-time detection of different damage levels in the material. Those techniques will be applied on fatigue tensile tests of SiCf/[Si-B-C] materials.

Mots clefs : Composites à matrice céramique, émission acoustique, endommagement, durabilité

1 Introduction

La durabilité et la fiabilité sont deux facteurs clés dont la maîtrise est essentielle en vue de l'utilisation des composites à matrice céramique (CMC) pour des applications aéronautiques. Il est nécessaire pour cela de pouvoir estimer la durée de vie des structures en service. Cela requiert de quantifier l'endommagement mais aussi d'identifier les différents mécanismes qui en sont à l'origine. L'Emission Acoustique (EA) est une technique qui permet de répondre à cette problématique en permettant la détection, et l'identification en temps réel des événements précurseurs à la ruine d'une structure. Elle consiste à enregistrer et à analyser les ondes élastiques transitoires créées dans le matériau lorsqu'il y a endommagement. Plusieurs approches peuvent être envisagées: une approche individuelle basée sur les techniques de reconnaissance de forme en utilisant la signature acoustique de chaque signal pour le relier à un mécanisme d'endommagement [1,2], ou une approche plus globale, collective de l'activité [3,4] en considérant principalement l'énergie acoustique. Dans ce travail, l'approche globale de l'analyse de l'émission acoustique est privilégiée.

Des essais de fatigue cyclique incrémentale sont réalisés en température sur des composites à matrice céramique ainsi que des essais de fatigue statique incrémentale. Dans cette étude, de nouveaux indicateurs d'endommagement sont définis. Le premier repose sur le couplage des données mécaniques et des données acoustiques en évaluant le rapport entre l'énergie mécanique et l'énergie acoustique tout au long de l'essai [5]. Un deuxième indicateur, défini à partir de l'énergie moyenne des signaux acoustiques, permet de quantifier la sévérité des sources enregistrées. De plus, un indicateur noté R_{CD} correspondant au ratio entre l'énergie acoustique enregistrée lors de la mise en charge et celle enregistrée lors de la phase de décharge est introduit. Ces indicateurs permettent de mettre en évidence des temps critiques ou des temps caractéristiques permettant de prévoir la durée de vie.

2 Matériau et protocole expérimental

Le matériau utilisé dans le cadre de cette étude est produit par Safran – Herakles. Il s'agit d'un composite à fibres SiC Nicalon recouvertes d'une interphase de PyC sur lesquelles une matrice [Si – B – C] est déposée par infiltration chimique en phase liquide et gazeuse. Le taux volumique de fibres est compris entre 35 et 40 %. Le matériau est usiné sous la forme d'éprouvettes haltères, avec une zone utile de 60 mm x 16 mm et une épaisseur de 3,7 mm.

Pour les essais de fatigue statique et cyclique en température, le niveau de charge est incrémental. La charge augmente d'un même incrément (6% de la charge à rupture en traction) toutes les 160 h pour les essais de fatigue statique. Le module élastique est évalué toutes les 24 h à l'aide d'un cycle de décharge/recharge. La déformation est mesurée par un extensomètre INSTRON hautes températures installé sur la tranche de l'éprouvette. Les essais de fatigue cyclique sont quant à eux conduits sur une machine de traction hydraulique INSTRON 8502. Le pilotage est effectué en asservissement de ~~en~~ force. La déformation est mesurée par un extensomètre capacitif hautes températures dont les couteaux en alumine sont en contact avec la surface de l'éprouvette. La charge est augmentée tous les 10^6 de cycles du même incrément de charge que celui utilisé en fatigue statique. Le rapport de charge est nul et la fréquence de 2 Hz.

L'acquisition de l'émission acoustique est effectuée au moyen de capteurs piézoélectriques (micro-80, Mistras Group) reliés à un système d'acquisition (Mistras Group), entre lesquels est interposé un préamplificateur de gain 40 dB, de bande passante 20-1200 kHz (Mistras Group). Le couplage est assuré par une graisse à vide. Le seuil d'acquisition est fixé à 45 dB pour les essais de traction et de fatigue statique, et à 56 dB pour les essais de fatigue cyclique. Seuls les événements localisés dans la zone utile de l'éprouvette sont pris en compte.

3 Définition des indicateurs d'endommagement

La « Sentry Function » [5] ((Eq. 1) est définie de la manière suivante.

$$f = \ln\left(\frac{U_s}{U_a}\right) \quad (\text{Eq. 1})$$

où U_s est l'énergie de déformation et U_a l'énergie acoustique.

L'énergie de déformation est calculée par intégration de l'aire sous la courbe force-déplacement. Il ne sera considéré que les phases de traction proprement dites, les boucles décharge/recharge ainsi que l'activité acoustique enregistrée durant ces cycles ne seront pas pris en compte. L'énergie acoustique est calculée par le cumul de l'énergie acoustique de chaque événement localisé entre le début de l'essai et la déformation souhaitée.

La sévérité est définie comme l'énergie moyenne des signaux, elle correspond à chaque instant t à l'énergie cumulée divisée par le nombre de signaux enregistrés.

Pour comparer l'évolution de l'énergie acoustique libérée durant les phases de mise en charge et de décharge, le rapport R_{CD} entre l'énergie acoustique cumulée respectivement durant les phases de mise en charge et durant les phases de décharge est évalué.

4 Résultats

Ces indicateurs permettent de mettre en évidence les différents stades d'endommagement du matériau. Pour les essais de fatigue incrémentale, la « Sentry Function » met en évidence différents régimes dans le comportement du matériau (Fig. 1 et 2). Une augmentation brutale de l'énergie acoustique est observée dans la zone 2 pour les essais en fatigue cyclique, très certainement liée à une sollicitation au-delà de la limite de fatigue. Enfin une variation rapide apparaît en fin d'essai liée aux premières ruptures de fibres. Pour les essais de fatigue statique, le comportement de cette fonction est très différent de celui obtenu en fatigue cyclique, il est proche de celui obtenu pour un essai de traction. Pour ce mode de sollicitation, on peut également noter en fin d'essai une évolution de la fonction liée aux ruptures de fibres.

Pour les essais de fatigue cyclique, l'activité acoustique émise durant la phase de charge et de décharge est comparée en utilisant le calcul de la sévérité et le ratio R_{CD} . L'évolution de la sévérité met en évidence une phase durant laquelle la sévérité des signaux acoustique enregistrés au cours du chargement devient prépondérante par rapport à celle enregistrée durant les phases de décharge (Figure 3). Pour les tous les niveaux de chargement, la sévérité des signaux est importante durant les premiers cycles, et diminue ensuite rapidement. Ensuite, cette énergie moyenne est globalement stable, pour les phases de chargement comme pour les phases de déchargement, tant que le niveau de contrainte est inférieur ou égale à 120 MPa. Lorsqu'il est de 140 MPa, l'énergie moyenne des signaux émis pendant les chargements va croître jusqu'à la fin de l'essai.

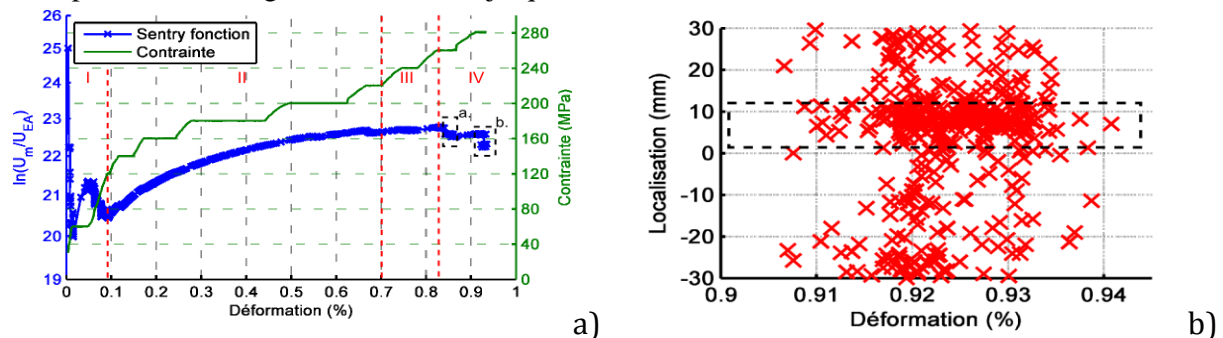


Fig. 1.a) Evolution de la « Sentry fonction » pour un essai de fatigue statique incrémentale et b) localisation des signaux enregistrés au cours de la phase IV. (en pointillé la zone de rupture)

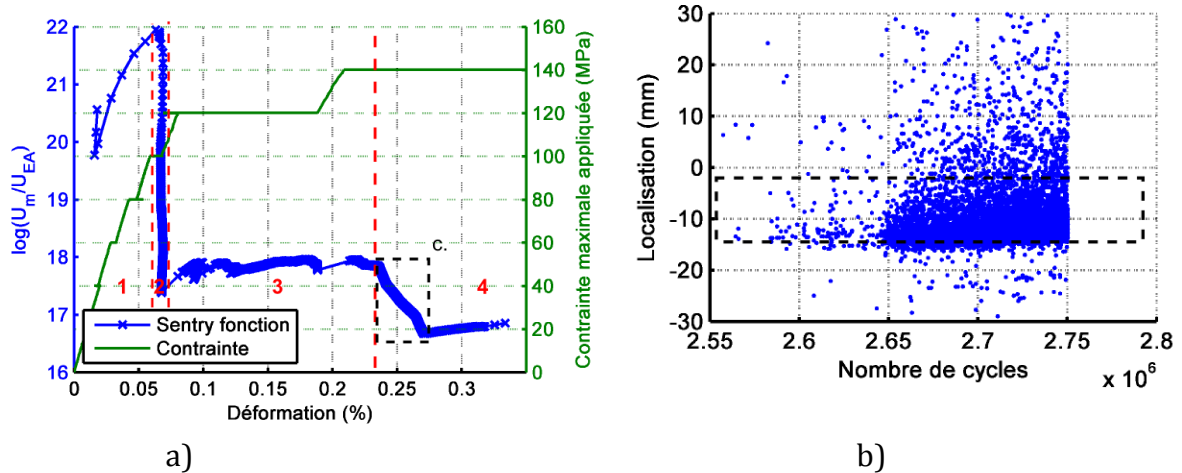


Fig. 2 : a) Evolution de la « Sentry fonction » et de la contrainte en fonction de la déformation durant un essai de fatigue cyclique incrémentale et b) localisation des signaux enregistrés au cours de la phase 4. (en pointillé la zone de rupture)

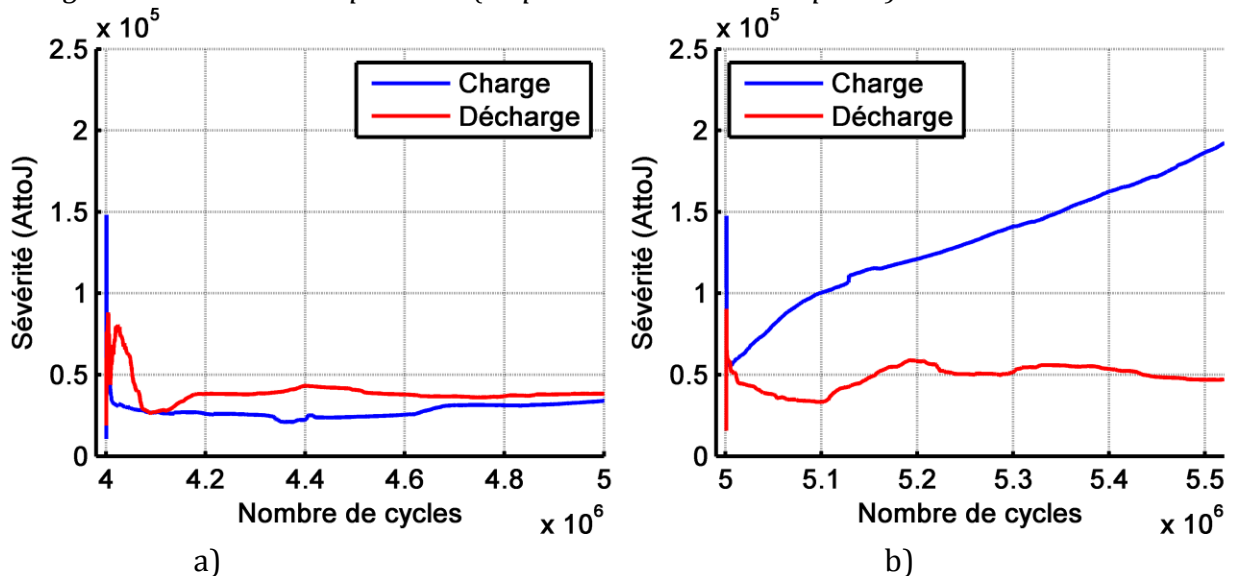


Fig. 3 : Sévérité des signaux d'EA émis durant les phases de charge et de décharge en fonction du nombre de cycle en fatigue cyclique pour deux niveaux de chargements a) 120 MPa et b) 140 MPa

Le rapport R_{CD} est calculé pour les différents niveaux de chargement. Lorsque le chargement cyclique a une contrainte maximale inférieure à 80 MPa, la libération d'énergie acoustique durant les phases de chargement est supérieure à celle enregistrée durant les phases de déchargement durant les premiers cycles. Ensuite le rapport tend à se rapprocher de la valeur 1, l'activité durant les phases de mise en charge et de décharge est équivalente.

A partir de 100 MPa, l'activité peut être décomposée en trois phases pour chaque niveau de chargement. Dans un premier temps, le rapport R_{CD} est largement supérieur à 1. L'énergie enregistrée est consécutive à la fissuration matricielle générée au cours de la mise en charge. Durant la seconde phase, l'activité émise à la décharge devient prédominante et le rapport tend alors vers 0. Enfin dans un troisième temps, l'énergie libérée durant les phases de mise en charge augmente et le rapport passe au-dessus de 1. Ceci montre que les effets du chargement cyclique sont tout d'abord visibles durant les phases de décharge. Ensuite lorsque le rapport est stable et voisin de 1, l'activité générée durant les deux phases est similaire. Enfin dans le troisième temps, l'activité prédominante durant les phases de mise en charge indique la présence de mécanisme d'endommagement supplémentaire. De plus, il est à noter que le deuxième régime identifié par cet indicateur présente une durée qui diminue avec l'augmentation du niveau de chargement, pour être quasi-nulle lorsque la contrainte atteint 140 MPa.

Ceci montre que le dernier mécanisme qui apparaît est lié au nombre de cycle mais aussi à la contrainte appliquée. Il est alors fort probable que ce dernier régime (noté 3) soit un régime critique pour le matériau.

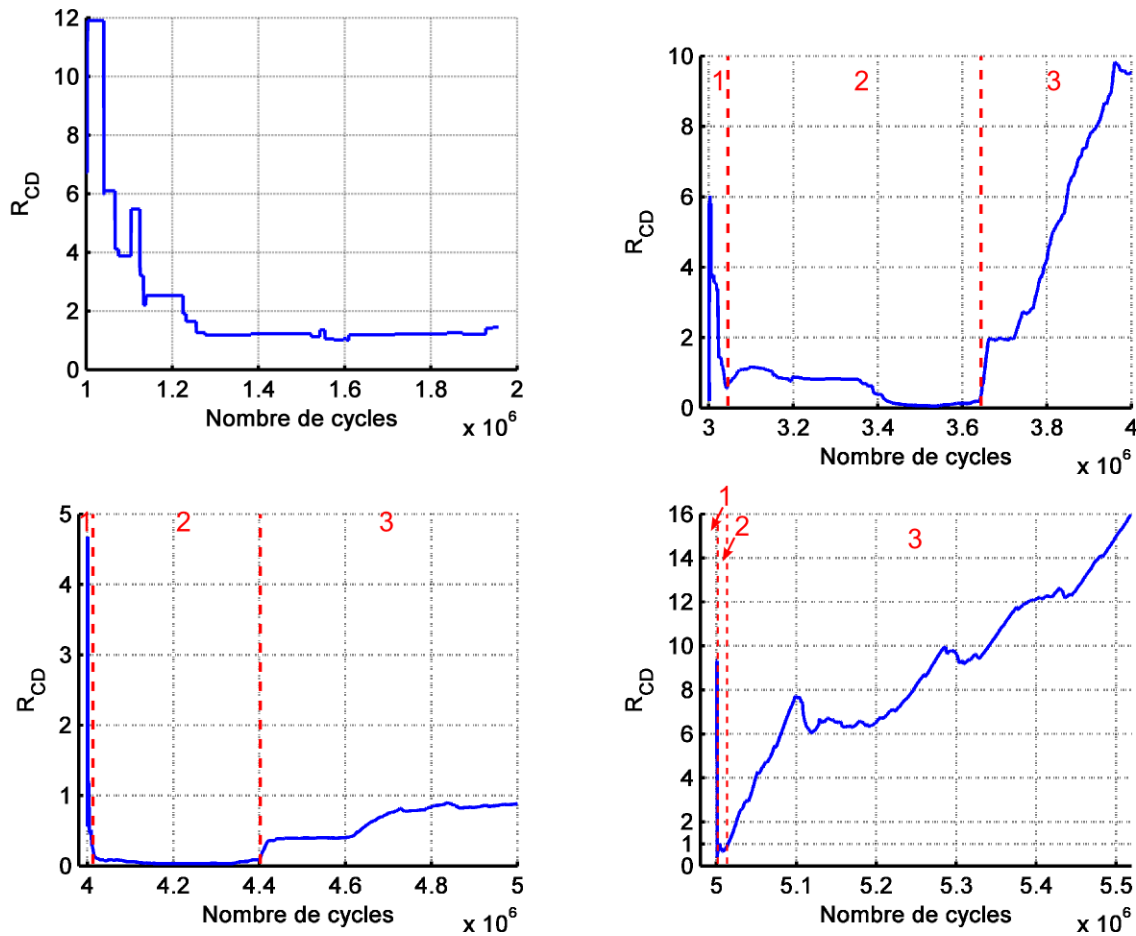


Fig. 4 : Evolution du rapport R_{CD} en fonction du nombre de cycles pour un essai de fatigue cyclique à différents niveaux de chargement. a) 60 MPa, b) 100 MPa, c) 120 MPa et d) 140 MPa.

Ces indicateurs permettent d'avoir une bonne connaissance du niveau d'endommagement du matériau et d'identifier des phases critiques. De plus ces fonctions calculables en temps réel ouvrent des perspectives intéressantes en identifiant des temps caractéristiques utilisables pour la prévision de la durée de vie.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Snecma et Herakles pour leur collaboration. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du PRC « Composites », projet de recherche financé par la DGAC, impliquant le Groupe SAFRAN, l'ONERA et le CNRS.

Références

- [1] M. MOEVUS, N. GODIN, M. R'MILI, D. ROUBY, P. REYNAUD, G. FANTOZZI and G. FARIZY. « Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si-BC] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering » *Composites Science and Technology* 68(6): 1258-1265. 2008.

-
- [2] S. MOMON, N. GODIN, P. REYNAUD, M. R'MILI, and G. FANTOZZI. « Unsupervised and supervised classification of AE data collected during fatigue test on CMC at high temperature. ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011.
- [3] S. MOMON, M. MOEVUS, M. R'MILI, P. REYNAUD, G. FANTOZZI and G. FAYOLLE. « Acoustic emission and lifetime prediction during static fatigue tests on ceramic-matrix-composite at high temperature under air. ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41(7): 913-918. 2010.
- [4] E. MAILLET, N. GODIN, and M. R'MILI, P. REYNAUD, J. LAMON and G. FANTOZZI. « Analysis of Acoustic Emission energy release during static fatigue tests at intermediate temperatures on Ceramic Matrix Composites: Towards rupture time prediction». *Composites Science and Technology*. 72 pp 1001–1007. 2012.
- [5] G. MINAK and A. ZUCHELLI, Damage evaluation and residual strength prediction of CFRP laminates by means of acoustic emission techniques, *Composite Materials Research Progress*. NovaScience Publishers, New York, pp 167-209.