

Apport de l'émission acoustique pour la modélisation de l'endommagement des composites à matrice céramique

N. Godin¹, M. R'Mili¹, P. Reynaud¹, G. Fantozzi¹, G. Fayolle²

1. INSA de Lyon, laboratoire MATEIS, 7 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne cedex
2. Herakles - Groupe Safran Les Cinq Chemins, 33185 Le Haillan, France

Résumé :

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 et d'établir leur chronologie. L'Emission Acoustique (EA) est une technique qui permet de répondre à cette problématique. En effet, les mécanismes d'endommagement s'accompagnent de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement lors d'essais de fatigue sous air à 500°C d'un composite SiC_f/[Si-B-C] à matrice auto-cicatrisante et de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu. La cinétique de la fissuration matricielle et des ruptures de fibre a été identifiée par analyse statistique multi variables des données d'EA. De plus, les effets d'atténuation liés à la croissance de l'endommagement ont été pris en compte dans l'analyse de l'énergie des sources acoustiques. Cela a permis de déterminer un coefficient d'atténuation B sensible à l'ouverture des fissures. Cette méthode constitue en elle-même une nouvelle méthode de suivi. Ainsi, cette nouvelle approche rend possible le suivi de la dynamique de la fissuration matricielle ainsi que de l'ouverture des fissures qui a priori ne génère pas d'émission acoustique. Les informations obtenues permettent d'alimenter ou de valider des modèles mécaniques d'endommagement.

Abstract :

Ceramic matrix composites (CMC) are interesting structural materials for high temperature applications, owing to their good mechanical properties at elevated temperatures. SiC_f/SiC composites have been developed for aeronautic and aerospace applications. Detection and analysis of acoustic emission (AE) are powerful means for identification of damage phenomena and monitoring of their evolution. It is generally accepted that the energy of an AE signal represents a part of the energy released at the source. The recorded AE signal energy is affected by distance of wave propagation, energy attenuation due to damage. By using the energy recorded by two sensors, it is possible to evaluate energy attenuation (noted B) in real-time. For ceramic matrix composites under static fatigue loading, a significant increase of energy attenuation is observed during the first half of tests. This increase is associated to transverse matrix crack opening.

Mots clefs: CMC, Emission acoustique, Endommagement mécanique, Durabilité

1 Introduction

Les composites à matrice céramique (CMC) et plus particulièrement les composites SiC_f / [Si-B-C] sont des candidats très intéressants pour de nombreuses applications à haute température, dont les nouvelles

générations de moteurs d'avions civils, nécessitant une très longue durée de vie en conditions de service. L'endommagement de ces matériaux composites est un point clé pour la maîtrise de la durabilité et de la fiabilité des pièces en service [1-2]. Il est nécessaire non seulement de quantifier l'endommagement mais aussi d'identifier les différents mécanismes qui en sont responsables et d'établir leur chronologie. En effet, dans les composites, il y a plusieurs modes d'endommagement (fissuration matricielle, rupture de fibres, décohésion...) liés à leur structure et aux caractéristiques des constituants. L'émission acoustique (EA) permettant de détecter et de suivre en temps réel l'endommagement au sein d'un matériau composite ou d'une structure apparaît alors comme un outil complémentaire aux investigations microstructurales et à la modélisation mécanique. Deux approches sont développées au laboratoire MATEIS. Une première approche basée sur l'analyse individuelle des signaux afin de relier chaque signal à un mécanisme d'endommagement. Cela permet d'identifier en temps réel le mode d'endommagement à partir des données d'EA et d'estimer sa sévérité. Ce travail est basé sur l'utilisation de classificateurs. Ces outils de classification vont simplifier les données d'EA en rendant l'interprétation plus aisée. Pour cela une méthodologie a été développée au laboratoire [3-5]. La chronologie d'apparition des différents mécanismes peut ensuite être utilisée afin de valider des modèles mécaniques ou comme donnée d'entrée de ces mêmes modèles. Une deuxième approche consiste à traiter l'émission acoustique dans sa globalité et à analyser l'aspect collectif en se basant sur une observable pertinente de l'endommagement, à savoir l'énergie acoustique [6-7]. Il est communément admis que l'énergie d'un signal d'émission acoustique est proportionnelle à l'énergie de l'endommagement source l'ayant créé. Il est alors nécessaire d'évaluer avec précision l'énergie des sources d'EA pour envisager une analyse fine de la libération d'énergie. Il est donc indispensable de quantifier l'atténuation liée à la croissance de l'endommagement. La seconde méthode développée représente une nouvelle approche du traitement des données d'EA, en prenant en compte l'état d'endommagement du matériau. Cela a permis de définir à l'aide de l'émission acoustique un coefficient d'atténuation B permettant une évaluation globale de la croissance de l'endommagement.

2 Protocole expérimental et traitement des données d'EA

2.1.1 Matériaux

Des essais de durée de vie ont été conduits sous air, en fatigue statique, à 450°C pour des composites SiCf/[Si-B-C] développés par Herakles-Groupe Safran. A l'issue de ces essais, des analyses microstructurales ont été effectuées afin de visualiser les endommagements microstructuraux. Pendant chaque essai, l'émission acoustique est enregistrée en temps réel par un système d'acquisition MISTRAS 2001, grâce à deux capteurs piézo-électriques. Le couplage capteur/guide d'ondes et guide d'ondes/éprouvette est réalisé par de la graisse silicone (graisse à vide). Seules les données localisées le long de la partie utile de l'éprouvette sont analysées.

2.1.2 Analyse des données d'EA par analyse statistique multivariable [8].

Chaque signal d'émission acoustique peut être décrit par plusieurs paramètres (amplitude, énergie, durée, temps de montée, fréquence moyenne ...), dont certains peuvent être corrélés et donc redondants. Il est donc nécessaire de choisir judicieusement ces descripteurs. Ils doivent être peu corrélés et en nombre suffisant pour ne pas perdre d'information sur les signaux mais pas trop nombreux pour ne pas alourdir les calculs ou fausser l'importance relative de chaque paramètre. Pour chaque signal d'émission acoustique, 18 descripteurs ont été définis. Ces descripteurs sont normalisés afin de ramener tous les paramètres dans l'intervalle [-1; 1]. Une analyse en composante principale (ACP) est ensuite réalisée afin de trouver une nouvelle base de vecteurs propres non corrélés par combinaisons linéaires des 8 descripteurs sélectionnés permettant ainsi de se ramener à un nouvel espace orthogonal. On peut alors réduire cet espace par exemple à 4 dimensions en conservant plus de 95% de l'information. La segmentation des données s'effectue avec l'algorithme des k-moyenne optimisé par un algorithme génétique. Le nombre de classes de signaux étant inconnu a priori, on fait varier ce nombre entre 2 et 10 avec 30 itérations pour avoir le meilleur résultat possible. La meilleure classification est celle qui permet de minimiser le coefficient de Davies et Bouldin[8].

2.1.3 Définition du coefficient d'atténuation B

L'énergie acoustique enregistrée par chaque capteur peut être écrite de la façon suivante [9] :

$$E_1(n) = E_s(n) \cdot A_1 \cdot e^{-B[L+x(n)]} \quad (1)$$

$E_s(n)$ est l'énergie libérée par la source n sous la forme d'ondes élastiques. En raison de différences de couplage entre capteurs et surface ou de réponse en fréquence des capteurs, l'énergie enregistrée par deux capteurs situés à égale distance de la source n peut être différente. A_1 correspond ainsi à la proportion de l'énergie de la source enregistrée par le capteur 1. $L+x(n)$ est la distance de propagation entre la source n et le capteur 1. Enfin, B est le coefficient d'atténuation du milieu de propagation. Il peut évoluer sous l'effet de la croissance de l'endommagement. L'atténuation peut être évaluée en calculant le rapport des énergies reçues aux deux capteurs pour chaque source n . Afin d'identifier directement le coefficient d'atténuation B , $X(n)$ est défini comme le logarithme népérien du rapport des énergies. Il s'exprime comme suit :

$$X(n) = \ln \frac{E_1(n)}{E_2(n)} = \ln \frac{A_1}{A_2} - 2 \cdot B \cdot x(n) \quad (2)$$

Le rapport A_1/A_2 représente l'effet relatif de l'acquisition, c'est-à-dire la fraction de l'énergie de la source n enregistrée par le capteur 1 par rapport à celle enregistrée par le capteur 2. Le second terme représente l'effet de la propagation qui dépend de la position $x(n)$ de la source n et du coefficient d'atténuation B . Ces deux paramètres peuvent être identifiés en calculant $X(n)$ pour différentes sources localisées dans la zone utile car X est une fonction linéaire de la position x . Comme le coefficient d'atténuation B est sensible à la croissance de l'endommagement, l'évaluation des paramètres d'atténuation est réalisée pour des intervalles de temps successifs (Fig. 1).

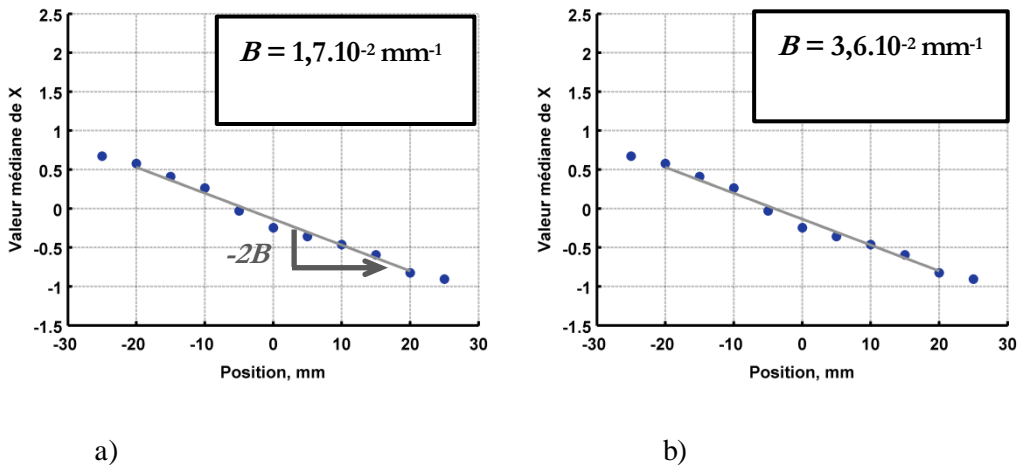


Fig. 1. Valeur médiane de X dans chaque intervalle en fonction de sa position et approximation linéaire a/ pour les 2000 premières sources d'EA ($t < 500$ s), b/ pour les 2000 dernières sources d'EA ($t > 15$ h) générées lors de l'essai de fatigue statique à 500°C - $\sigma/\sigma_r = 0,95$ [9].

3 Identification du scénario d'endommagement

L'application du critère de Davies et Bouldin conduit à retenir quatre classes pour les essais sur le composite sollicité en fatigue statique [4]. Les classes sont notées A, B, C, D par ordre décroissant d'énergie. Les signaux de la classe A sont les plus énergétiques. Les signaux de la classe B se distinguent par une énergie plus faible, un temps de montée relatif plus grand et par une fréquence moyenne plus élevée que pour la classe A. Les classes C et D présentent sensiblement la même énergie, mais se distinguent par le temps de montée : la classe C correspond au temps de montée le plus court, alors que la classe D a le temps de montée le plus long. La Fig. 2a donne un exemple des activités des différentes classes en fonction de la déformation, obtenues pour un essai de fatigue statique réalisé à 500°C. Pendant la mise en charge, les classes A et C sont ici les plus actives, avec une activité très forte dès la sortie du domaine de comportement linéaire. Ensuite l'activité ralentit jusqu'à pratiquement disparaître. Les classes B et D apparaissent un peu après les classes A et C, et leur activité ralentit moins vite. Ensuite, pendant le maintien sous charge constante, les classes A et C sont très peu actives alors que les classes B et D ont une activité importante par unité de déformation. Les classes A et C sont respectivement associées à la fissuration du seal-coat et de la matrice inter-fils (c1), et à la fissuration des fils transverses (c2). Ces deux types de fissuration se produisent principalement au début de la non linéarité et tendent à une saturation lors de la mise en charge. Ces classes ne sont presque pas représentées pendant la phase de maintien car la matrice est déjà saturée en fissures et se décharge de plus en plus. La classe B est associée à la fois à la fissuration des fils longitudinaux (c3) et aux ruptures de fibres. Cette fissuration se produit après les deux premières (c1 et c2), et tend également vers une saturation mais plus tardivement [10]. Pendant le maintien sous charge constante, la majorité des signaux de type B provient certainement des ruptures de fibres. Celles-ci peuvent se produire suite à des transferts de charge aux interfaces fibre/matrice qui évoluent dans le temps, et suite à une propagation sous critique des défauts préexistants [11]. Quant à la dernière classe de signaux D, elle est associée aux décohésions (c4) et glissements aux interfaces fibre-matrice. Ces mécanismes sont consécutifs à la création de fissures c3 dans les fils longitudinaux et à des ruptures de fibres. De plus les décohésions peuvent progresser dans le temps par volatilisation du pyrocarbone en présence de dioxygène. Il est donc cohérent que la classe D soit très active pendant la phase de maintien sous charge constante.

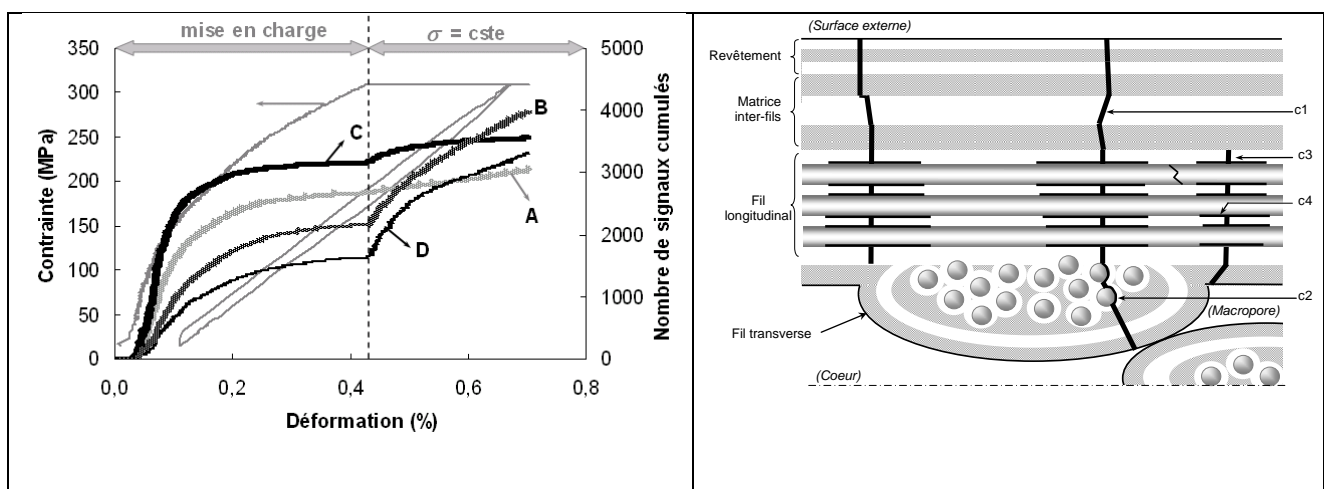


Fig. 1 : a) Activité des classes en fonction de la déformation pour un essai à 500°C b) Schéma représentant les différents mécanismes d'endommagement du composite.

Les classes B et D sont les plus actives en fatigue statique, car elles correspondent principalement aux ruptures de fibres (classe B) et aux phénomènes d'interfaces (classe D). La fissuration de la matrice inter-fils (classe A) et des fils transverses (classe C) s'est produite principalement pendant la mise en charge. La représentation de l'activité des différentes classes en énergie cumulée normalisée fait ressortir une reprise d'activité des classes A et B en fin d'essai, ce qui avait été observé sur les essais de traction à température ambiante. Les signaux de type A de forte énergie qui apparaissent en fin d'essai correspondent à des ruptures de fils, et les signaux de type B à des ruptures de fibres.

4 Analyse globale de la libération d'énergie

L'évolution du coefficient d'atténuation B est présentée Fig. 3 pour un essai de fatigue statique réalisé à 500°C - $\sigma/\sigma_r = 0,95$. Sa valeur initiale, correspondant aux 2000 premières sources d'EA, vaut environ $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$. Une légère augmentation est observée pendant le chargement initial jusqu'à 12 minutes. L'éprouvette est ensuite déchargée afin d'évaluer l'endommagement causé par le premier chargement. Cela résulte en une diminution du coefficient d'atténuation B jusqu'à environ sa valeur initiale. La phase de fatigue statique débute autour de 30 minutes. Le coefficient d'atténuation B croît de manière significative jusqu'à 15 heures d'essai où il atteint un plateau ($3,6 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$). Pour tous les essais, indépendamment des conditions de chargement, la légère augmentation du coefficient d'atténuation B observée durant la mise en charge initiale est négligeable devant celle se produisant pendant la phase de fatigue. Ainsi, le coefficient d'atténuation B reste relativement constant pendant la première heure d'essai. Cependant, les contraintes maximales appliquées lors de la première mise en charge sont significativement différentes et entraînent donc des degrés de fissuration matricielle différents. Ainsi, la valeur du coefficient d'atténuation B ne peut pas être reliée seulement au nombre de fissures matricielles générées. Durant la première heure d'essai, le coefficient d'atténuation B dépend de la présence de la charge. Il diminue lors de la décharge et reprend la valeur maximale précédente à la fin de la recharge (Fig. 2). Par conséquent, le coefficient d'atténuation B est sensible à l'ouverture des fissures [9].

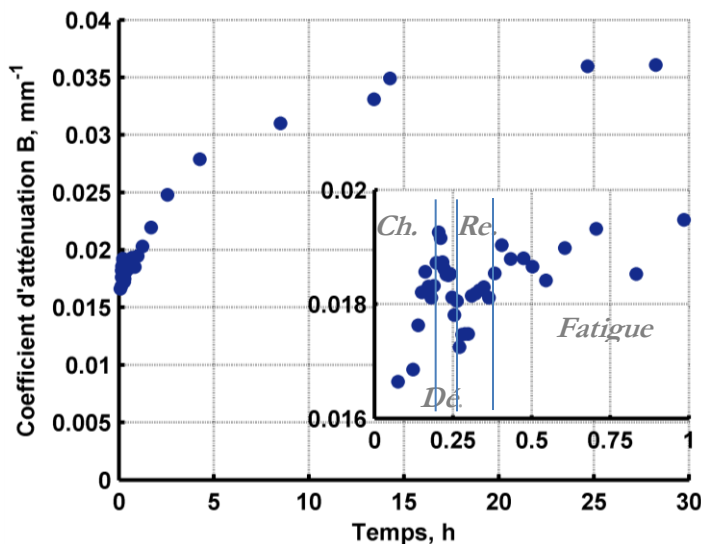


Fig 3. Evolution du coefficient d'atténuation B durant un essai de fatigue statique à 500°C - $\sigma/\sigma_r = 0,95$. La vue de détail représente le chargement initial (*Ch.*) suivi de la séquence de décharge-recharge (*Dé.-Re.*) précédant la phase de fatigue

Pour tous les essais réalisés à 500°C , le coefficient d'atténuation B croît de manière significative durant la première moitié des essais puis atteint un plateau autour de 50% du temps à rupture. L'augmentation est attribuée à l'ouverture des fissures matricielles. En fatigue statique sous air, le flux d'oxygène accédant à l'interphase et aux fibres est également contrôlé par l'ouverture des fissures matricielles. Le plateau observé sur l'évolution du coefficient d'atténuation B indique que l'ouverture des fissures atteint un niveau d'équilibre autour de 50% du temps à rupture. Par conséquent, le suivi de l'évolution du coefficient d'atténuation B constitue un indicateur supplémentaire pour le suivi de l'endommagement. L'évolution caractéristique du coefficient d'atténuation B permet également d'envisager la détection d'un plateau sur la courbe comme indicateur pour l'évaluation de la durée de vie restante. L'évolution de B met en évidence un point caractéristique se situant à environ 50% du temps à rupture. Jusqu'à ce point critique, les fissures matricielles s'ouvrent, induisant un flux d'oxygène de plus en plus important au sein du composite. Au-delà

de 50% du temps à rupture, le comportement mécanique est contrôlé par les fibres qui rompent par fissuration sous-critique.

5 Conclusion

L'analyse des données d'EA collectées lors d'essai de fatigue en température a permis d'isoler la chronologie d'apparition des différents mécanismes d'endommagement en détectant notamment les ruptures de fibres en fatigue statique. La prise en compte de l'effet de l'endommagement sur l'énergie acoustique a permis de définir un coefficient B d'atténuation, le suivi de l'évolution de cette grandeur sensible à l'évolution de l'ouverture des fissures appuie la définition d'un temps critique ou temps caractéristique au voisinage de 50 % de la durée de vie. L'évaluation de l'énergie et de son atténuation en fonction de l'état d'endommagement du matériau constitue en elle-même une nouvelle méthode de suivi. En effet, l'augmentation de la valeur du coefficient d'atténuation est attribuée à l'ouverture des fissures matricielles. Le coefficient d'atténuation est évalué uniquement à partir de l'énergie des sources d'EA générées par le matériau. Cette nouvelle approche du traitement des données d'EA permet une mesure globale de l'endommagement en considérant les milliers de sources d'EA générées au cours de l'essai comme autant de mesures locales de l'état de santé du matériau. Ainsi, cette nouvelle approche rend possible le suivi de l'ouverture des fissures qui a priori ne génère pas d'émission acoustique.

Références bibliographiques

- [1] Gauthier W. Rupture différée en fatigue statique, aux températures intermédiaires (< 800°C), de fils et de fibres à base de carbure de silicium. *Thèse Physico-chimie de la Matière Condensée*. 2006. Bordeaux: Université Bordeaux I. pp. 108.
- [2] Loseille O. Prédiction de la durée de vie des composites à matrice céramique auto cicatrisante, en fatigue statique, à haute température ($\leq 800^\circ\text{C}$). *Thèse de doctorat. Université Bordeaux I* (2010)
- [3] Moevus M, Rouby D, Godin N, R'Mili M, Reynaud P, Fantozzi G, Farizy G. Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiC/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part I: Damage patterns and acoustic emission activity. *Composites Science and Technology* 68 1250-57 (2008)
- [4] Moevus M, Rouby D, Godin N, R'Mili M, Reynaud P, Fantozzi G, Farizy G. Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiC/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering. *Composites Science and Technology* 68 1258-65 (2008)
- [5] Momon S, Godin N, Reynaud P, R'Mili M, Fantozzi G. Unsupervised and supervised classification of AE data collected during fatigue test on CMC at high temperature. *Composites Part A* 43 254-260 (2012)
- [6] Momon S, Moevus M, Godin N, R'Mili M, Reynaud P, Fantozzi G, Fayolle G. Acoustic emission and lifetime prediction during static fatigue tests on ceramic matrix composites at high temperature under air. *Composites Part A* 41 913-918 (2010)
- [7] Maillet E., Godin N., R'Mili M., Reynaud P., Lamon J., Fantozzi G. 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(9), 1001-1007 (2012)
- [8] Sibil A, Godin N, R'Mili M, Maillet E, Fantozzi G. Optimization of acoustic emission data clustering by a genetic algorithm method. *Journal of Nondestructive Evaluation* 31(2) 169-180 (2012)
- [9] Maillet E. Identification des mécanismes d'endommagement et prévision de la durée de vie des composites à matrice céramique par émission acoustique *Thèse de doctorat. Université Lyon INSA de Lyon* (2012)
- [10] Guillaumat L. Microfissuration des CMC: relation avec la microstructure et le comportement mécanique. *Thèse Sciences des Matériaux*. 1994. Bordeaux: Université Bordeaux I.
- [11] Forio P, Lavaire F, Lamon J. Delayed failure at intermediate temperatures (600°C-700°C) in air in silicon carbide multifilament tows. *J Am Ceram Soc*. 2004. Vol. 87. n°5. pp. 888-893.