



**HAL**  
open science

## Détermination de la durée de vie lors d'essais de fatigue statique en température sur CMC à l'aide de l'émission acoustique : Application de la loi de Benioff

E. Maillet, Nathalie Godin, Mohamed R'Mili, Pascal Reynaud, Gilbert Fantozzi, J. Lamon, G. Fayolle

### ► To cite this version:

E. Maillet, Nathalie Godin, Mohamed R'Mili, Pascal Reynaud, Gilbert Fantozzi, et al.. Détermination de la durée de vie lors d'essais de fatigue statique en température sur CMC à l'aide de l'émission acoustique : Application de la loi de Benioff. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.42. hal-00597913

**HAL Id: hal-00597913**

**<https://hal.science/hal-00597913>**

Submitted on 2 Jun 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.

# Détermination de la durée de vie lors d'essais de fatigue statique en température sur CMC à l'aide de l'émission acoustique : Application de la loi de Benioff

## *Acoustic emission-based approach for the lifetime prediction of CMC during static fatigue tests at high temperature: Applicability of the Benioff law*

E. Maillet<sup>1</sup>, N. Godin<sup>1</sup>, M. R'Mili<sup>1</sup>, P. Reynaud<sup>1</sup>, G. Fantozzi<sup>1</sup>, J. Lamon<sup>1</sup> et G. Fayolle<sup>2</sup>

1 : INSA-Lyon, MATEIS CNRS UMR5510  
F – 69621 Villeurbanne

e-mail : emmanuel.maillet@insa-lyon.fr, nathalie.godin@insa-lyon.fr

2 : SAFRAN Snecma Propulsion Solide  
F – 33185 Le Haillan

### Résumé

Les composites à matrice céramique (CMC) sont des matériaux très prometteurs pour des applications structurales à hautes températures, dont les nouvelles générations de moteurs d'avions civils. Les durées de vie attendues en conditions de service sont de plusieurs dizaines de milliers d'heures, ce qui les rend inaccessibles par des essais de laboratoire. Ainsi, cet article propose une méthode de prévision de la durée de vie d'éprouvettes en CMC basée sur la détection des signes précurseurs de la rupture. Dans le cas des CMC, la complexité des phénomènes impliqués nécessite de développer une approche permettant une observation en temps réel de l'endommagement du matériau. L'émission acoustique (EA) apparaît ainsi comme une technique adaptée. A partir d'essais de fatigue statique réalisés à 450°C et 500°C sur des composites SiC<sub>f</sub> / [Si-B-C], une approche basée sur l'EA a donc été développée. L'étude de la libération d'énergie associée aux événements d'EA a montré qu'un temps caractéristique existe entre 50 et 60% du temps à rupture, après lequel la libération d'énergie peut être simulée par une loi de type puissance telle la loi de Benioff.

### Abstract

Ceramic matrix composites (CMCs) are promising materials for high temperature structural applications, such as new generations of civil aircraft engines. Expected lifetimes under service conditions are of tens of thousands of hours, which make them unattainable using laboratory tests. Thus, the present paper proposes an approach to lifetime prediction based on the detection of early signs of failure. In CMCs, the complexity of phenomena involved requires real-time data on material damage. For that purpose, Acoustic Emission (AE) is a suitable technique. From static fatigue tests performed at 450°C and 500°C on SiC<sub>f</sub> / [Si-B-C] composites, an AE-based approach was developed. The study of the energy release related to AE events showed that a characteristic time exists between 50 and 60% of the rupture time, after which the energy release could be approximated by a power law such as the Benioff law.

**Mots Clés :** Emission acoustique ; Composites à matrice céramique ; Durabilité ; Loi de Benioff

**Keywords:** Acoustic emission; Ceramic matrix composites; Durability; Benioff law

## 1. Introduction

Grâce à leur faible densité et à leurs bonnes propriétés mécaniques, conservées jusqu'à très hautes températures, les Composites à Matrice Céramique (CMC) sont des matériaux très prometteurs pour des applications dans le domaine de l'aéronautique. Le développement de matrices auto-cicatrisantes permet de réduire considérablement l'exposition des fibres à l'oxygène, ralentissant ainsi les effets de l'oxydation, première cause de rupture des fibres en fatigue statique à haute température. Pour les applications visées en aéronautique, les durées de vie souhaitées sont de plusieurs dizaines de milliers d'heures, ce qui les rend inaccessibles par des essais de laboratoire.

Cet article propose une approche basée sur l'Emission Acoustique (EA) pour prévoir en temps réel la durée de vie restante lors d'essais de fatigue statique. Cela permettra de réduire la durée des essais tout en ayant une estimation précise de la durée de vie. L'Emission Acoustique est une technique basée sur l'enregistrement et l'analyse des ondes élastiques transitoires générées lors de l'endommagement d'un matériau. Elle permet une observation en temps réel de la création et de l'évolution de l'endommagement. Dans le cas des CMC, Moevus et al. [1] ont déterminé la signature acoustique des différents mécanismes grâce à des techniques de reconnaissance de formes.

Des analogies ont été proposées entre sismologie et émission acoustique. En fait, les deux sont fondées sur l'étude de la distribution spatiale d'événements précurseurs et de la libération d'énergie associée. La prévision d'apparition des séismes est une problématique très ancienne. On peut citer par exemple les travaux d'Omori datant de 1895 [2] sur l'étude de l'apparition des répliques consécutives à un séisme majeur. En 1954, Gutenberg et Richter [3] introduisirent une loi décrivant la relation entre la magnitude des séismes et leur fréquence d'apparition, relation observée par la suite sur un grand nombre de cas de tremblements de terre. En 1962, Mogi et al. [4] réalisèrent des essais sur échantillons de roches instrumentés en émission acoustique et observèrent la relation entre fréquence et amplitude des signaux d'EA décrite par la loi de Gutenberg-Richter, initiant ainsi le lien entre émission acoustique et sismologie. De nombreuses études ont suivi et ont confirmé que les observations réalisées sur les séismes étaient similaires à celles réalisées lors d'essais de rupture en laboratoire [5-6]. Egalement dans le domaine de la sismologie, Bufe et Varnes [7] ont montré que dans la région critique, la libération d'énergie des événements précurseurs d'un séisme peut être décrite par une loi puissance, appelée loi de Benioff, fonction du temps restant avant la secousse principale.

Tout d'abord, une énergie équivalente des sources d'EA est définie, qui permet de pallier les effets d'atténuation liés à la distance de propagation. La libération d'énergie associée aux événements d'EA est ensuite analysée par deux méthodes. La première porte sur la détection de la reprise d'activité grâce au coefficient d'émission  $R_{AE}$  [8] et la seconde s'intéresse à la sélection des données d'EA en termes spatial et temporel en vue d'une approximation par la loi de Benioff.

## 2. Matériau et procédure expérimentale

Le matériau, développé par SAFRAN Snecma Propulsion Solide, est composé d'une matrice [Si-B-C] déposée par infiltration chimique en phase vapeur sur des fibres SiC Hi-Nicalon et une interface de pyrocarbone. La fraction volumique de fibres est comprise entre 35 et 40%. Les échantillons, de type haltère, ont une épaisseur de 4,5 mm et une zone utile de 16 mm de largeur et 60 mm de longueur.

Les essais de fatigue statique ont été réalisés sur une machine d'essai pneumatique spécialement conçue pour assurer une grande stabilité lors d'essais de très longue durée tout en limitant le bruit environnant. Avant le chargement, chaque échantillon est amené à la température souhaitée (450°C ou 500°C) à une vitesse de 20°C/min, puis maintenu à cette température pendant une heure afin d'obtenir une répartition homogène dans la zone utile. L'éprouvette est ensuite soumise à une contrainte dont la valeur est choisie entre 45 et 95% de la contrainte à rupture du matériau, déterminée au préalable pour chaque lot par un essai de traction monotone. La vitesse de chargement est 10 N/s. Une première décharge est effectuée dès que la contrainte a atteint la valeur choisie pour la fatigue statique afin d'évaluer l'endommagement dû au chargement initial. Ensuite, pendant la phase de fatigue, des cycles de décharge/recharge sont réalisés toutes les 24 heures pour suivre l'évolution du module d'Young. Pour les mesures de force et déplacement, la machine est équipée d'une cellule de force de 25 kN et un extensomètre est installé sur l'éprouvette. Enfin, le temps à rupture est enregistré.

### 3. Emission Acoustique

#### 3.1. Instrumentation

Deux capteurs piézoélectriques (micro-80, Physical Acoustics Corporation) sont installés sur la surface du matériau, à 190 mm l'un de l'autre, dans des logements prévus à l'intérieur des mors. Le couplage entre chaque capteur et le matériau est assuré par de la graisse à vide. Les capteurs sont ensuite connectés au système d'acquisition (MISTRAS 2001) via un préamplificateur (gain 40 dB, gamme de fréquence 20-1200 kHz). Le seuil d'acquisition est réglé à 32 dB. Pour chaque signal d'EA, le temps et les valeurs de contrainte et déformation sont enregistrés, ainsi que 9 descripteurs de la forme d'onde (temps de montée, nombre de coups, durée, amplitude, fréquence moyenne, nombre de coups au pic, fréquence de montée, fréquence de descente, énergie absolue).

#### 3.2. Localisation

Connaissant la distance séparant les deux capteurs et la vitesse de propagation des ondes, la position des sources est déduite de la mesure de la différence de temps d'arrivée aux deux capteurs des signaux issus de la même source. Comme seulement deux capteurs sont utilisés, la position déterminée correspond à une position équivalente le long de l'axe reliant le centre des capteurs.

La vitesse de propagation des ondes a été déterminée avant essai par ruptures de mines suivant la procédure de Hsu-Nielsen et est égale à 9500 m/s. Dans le cas des CMC, Morscher [9] a montré que la diminution de la vitesse de propagation en cours d'essai est liée à la diminution du module d'Young, déterminé à partir des boucles de décharge/recharge. La vitesse est donc corrigée par le facteur  $\gamma$  défini comme la racine carrée du rapport du module sécant des boucles sur le module initial. La zone étudiée correspond à la partie de l'éprouvette à section constante (16 x 4,5 mm<sup>2</sup>). C'est un intervalle de  $\pm 30$  mm autour du centre de l'éprouvette (pris comme origine de l'axe de localisation). Les événements localisés pendant les phases de décharge ne sont pas pris en compte, car supposément associés à des phénomènes de frottement. L'influence du filtrage sur l'étude de la libération d'énergie sera discutée par la suite.

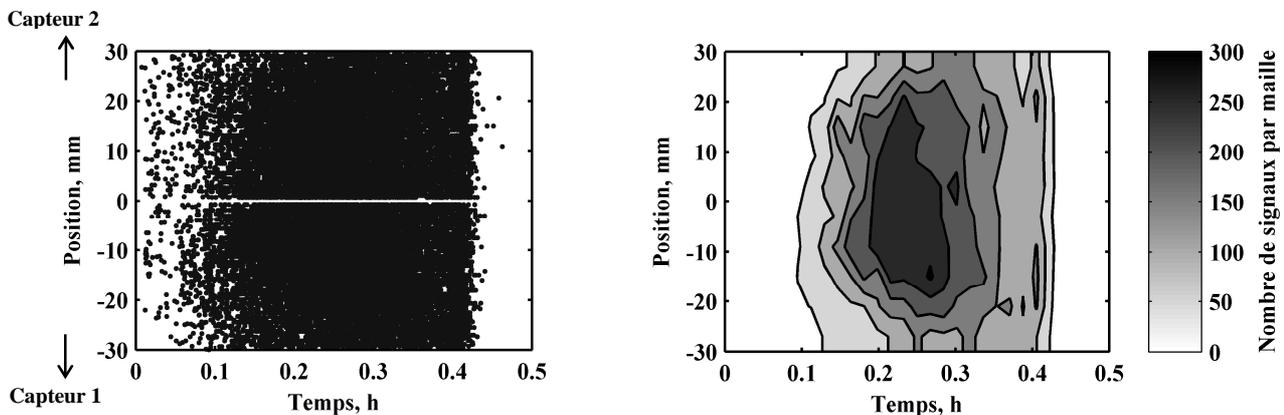


Fig. 1. Deux représentations de la position des événements d'EA en fonction du temps.  
Essai de fatigue à 450°C,  $\sigma/\sigma_r = 0,71$

En règle générale, l'activité d'EA est illustrée en représentant chaque événement par un point dans le plan Position - Temps (Fig. 1, à gauche). Pendant la première mise en charge, l'activité est très importante. Cependant, à partir de cette représentation, il n'est pas possible d'observer de quelle manière se répartit réellement l'activité d'EA. Un nouveau mode de représentation a donc été développé. Temps et position sont découpés en intervalle de largeur constante formant ainsi une grille sur la représentation par points. Le nombre d'événements est ensuite compté dans chaque maille de la grille et représenté par une échelle de niveaux de gris (Fig. 1, à droite). On observe ainsi que l'activité se concentre autour de 0,25 h et est homogène dans l'intervalle [-20 ; 20].

### 3.3. Energie

Il est communément admis que l'énergie d'un signal d'émission acoustique est proportionnelle à l'énergie associée au dommage l'ayant créé. Pendant la propagation dans le matériau, le signal d'EA est affecté par la distance de propagation et l'endommagement, induisant une atténuation significative de l'énergie.

Afin de caractériser l'énergie de chaque source d'EA, il est nécessaire de tenir compte de l'énergie reçue par chacun des deux capteurs, et ce pour supprimer les effets d'atténuation liés à la distance de propagation. Il convient avant cela de comparer l'énergie reçue par les deux capteurs. En effet, en raison de différences de couplage entre capteur et surface du matériau et de réponse en fréquence du capteur, pour une même source située à distance égale, l'énergie du signal reçu par chacun des deux capteurs peut être significativement différente. L'intervalle considéré pour la comparaison est un intervalle de  $\pm 5$  mm autour du centre de la zone utile. La distance de propagation est donc en moyenne équivalente pour rejoindre les deux capteurs et la comparaison s'affranchit ainsi des effets d'atténuation liés à la distance. Afin de ne pas intégrer d'effets d'atténuation liés à l'endommagement, l'intervalle étudié est réduit au début de la mise en charge initiale (déformation inférieure à 0,1%). A partir de la localisation des signaux d'EA, on vérifie que l'endommagement est limité et uniformément réparti pendant cette phase. La fonction de répartition d'énergie, tracée pour les deux capteurs, pour les signaux correspondant aux sources localisées au début de la mise en charge dans l'intervalle de  $\pm 5$  mm autour du centre de la zone utile, permet de mettre en évidence, dans certains essais, un écart notable entre les deux capteurs (Fig. 2, à droite) alors que pour d'autres essais les fonctions de répartition sont bien superposées (Fig. 2, à gauche). Cet écart est attribué principalement à une différence de couplage entre capteurs et surface du matériau.

En vue de corriger cet écart, il est considéré que, statistiquement, les deux capteurs étant situés à la même distance de l'intervalle considéré, ils doivent recevoir des proportions équivalentes de signaux des différents niveaux d'énergie. Cela revient à superposer les fonctions de répartition d'énergie dans l'intervalle considéré précédemment, qui sera appelé intervalle de recalage. Pour chaque signal  $n$  reçu par le capteur  $i$ , l'énergie centrée réduite  $E_i^*$  s'écrit :

$$E_i^*(n) = \frac{E_i(n) - med_{rec,i}}{\sigma_{rec,i}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Où  $E_i(n)$  est l'énergie du signal  $n$  reçu par le capteur  $i$  et  $med_{rec,i}$  et  $\sigma_{rec,i}$  sont respectivement la valeur médiane et l'écart-type de l'énergie des signaux reçus par le capteur  $i$  pour les sources localisées dans l'intervalle de recalage.

Afin de faciliter l'exploitation des valeurs d'énergie corrigées, l'énergie normalisée est calculée comme suit :

$$E_i'(n) = \frac{E_i^*(n) - \min\{E_i^*, E_j^*\}}{\max\{E_i^*, E_j^*\} - \min\{E_i^*, E_j^*\}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Où les valeurs minimale et maximale sont calculées en considérant l'énergie centrée réduite aux deux capteurs pour toutes les sources localisées pendant l'essai complet.

La fonction de répartition de l'énergie normalisée est tracée pour les sources localisées dans l'intervalle de recalage pour les deux essais déjà considérés sur la figure précédente (Fig. 3). On peut observer une bonne superposition des courbes correspondant aux deux capteurs, pour chacun des deux essais.

A partir de l'observation des fonctions de répartition d'énergie liées à des sources localisées dans différents intervalles à l'intérieur de la zone utile, il apparaît que pour différentes valeurs de probabilité (25%, 50% et 75%), le niveau d'énergie associé décroît de manière exponentielle avec l'augmentation de la distance de propagation. Les mêmes observations sont faites sur l'énergie normalisée, qui peut ainsi être exprimée de la manière suivante :

$$E_i'(n) = A(n).e^{-B.x_i(n)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Où  $A(n)$  est lié directement à l'énergie de la source  $n$  et  $B$ , lié au milieu de propagation mais indépendant de l'énergie de la source, traduit l'atténuation liée à la distance de propagation  $x_i(n)$  entre la source  $n$  et le capteur  $i$ .

Comme les valeurs d'énergie ont été normalisées,  $A(n)$  peut être supposé égal pour les deux capteurs. De plus,  $B$  est inchangé car le milieu de propagation est identique. L'énergie équivalente est ainsi définie comme la racine carrée du produit des énergies normalisées reçues aux deux capteurs pour chaque source. Elle est indépendante de la position de la source,  $A(n)$  étant lié à l'énergie de la source et le terme exponentiel étant constant ( $L$  représente la distance séparant les deux capteurs).

$$K(n) = \sqrt{E_i'(n) \times E_j'(n)} = A(n).e^{\frac{-BL}{2}} \quad (\text{Eq. 4})$$

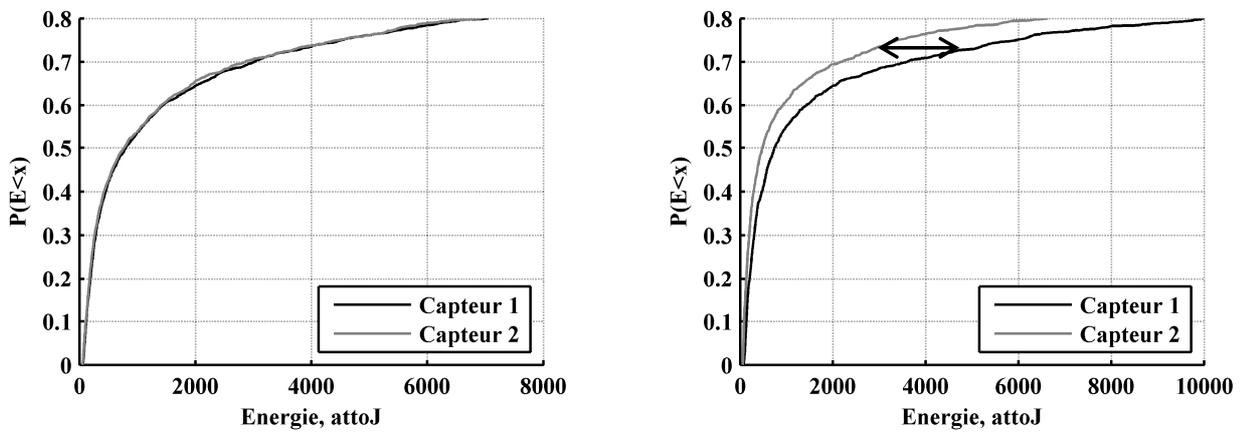


Fig. 2. Fonctions de répartition d'énergie - Essais de fatigue à 500°C  
A gauche : Essai à  $\sigma/\sigma_r = 0,95$ . A droite : Essai à  $\sigma/\sigma_r = 0,44$

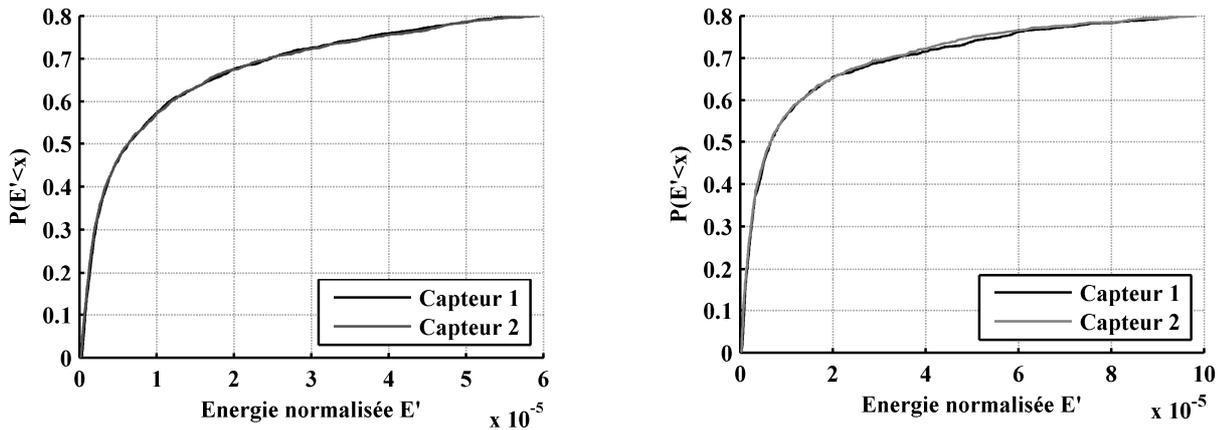


Fig. 3. Fonctions de répartition d'énergie normalisée - Essais de fatigue à 500°C  
A gauche : Essai à  $\sigma/\sigma_r = 0,95$ . A droite : Essai à  $\sigma/\sigma_r = 0,44$

#### 4. Libération d'énergie

L'énergie équivalente est utilisée comme mesure de l'activité d'émission acoustique. Pour tous les essais traités, l'activité globale est assez comparable et est composée de trois phases distinctes. Pendant la première mise en charge, l'activité est très importante. Elle décroît ensuite et est relativement faible pendant une durée qui peut atteindre plusieurs centaines d'heures selon le niveau de contrainte appliquée. Enfin, avant la rupture, une reprise de l'activité est généralement observée.

#### 4.1. Coefficient d'émission $R_{AE}$

Le coefficient d'émission  $R_{AE}$  [8] correspond à l'incrément d'énergie libérée  $\Delta E$  pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ , divisé par l'énergie libérée pendant la mise en charge initiale  $E_{ch}$ . Il s'écrit comme suit, pour l'intervalle  $i$  :

$$R_{AE} = \frac{1}{E_{ch}} \frac{\Delta E(i)}{\Delta t(i)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Dans l'étude initiale par Momon et al. [8], tous les événements localisés dans la zone utile étaient considérés, et pour chacun d'eux l'énergie reçue par le capteur le plus proche. Ensuite, le calcul du  $R_{AE}$  était effectué à intervalle de temps constant.

Deux modifications majeures ont été apportées à la méthode de calcul. Tout d'abord, le nombre d'événements est une mesure directe de l'activité d'émission acoustique. Il semble donc plus pertinent d'effectuer le calcul à intervalle de nombre d'événements constant. Ensuite, calculer le coefficient d'émission  $R_{AE}$  seulement pour des intervalles consécutifs induit une incertitude relativement élevée qui correspond à la largeur de l'intervalle considéré. Ainsi, l'intervalle de calcul est translaté d'un incrément de nombre d'événements inférieur à la largeur de l'intervalle, afin que deux intervalles de calcul successifs soient en partie superposés. Le calcul du coefficient d'émission  $R_{AE}$  est donc réalisé sur un intervalle de nombre d'événements assez grand pour permettre une bonne stabilité du calcul, à chaque incrément de nombre d'événements, choisi assez petit pour permettre une bonne définition de l'évolution du coefficient d'émission  $R_{AE}$ . Enfin, le calcul est réalisé en utilisant l'énergie équivalente des sources.

#### 4.2. Application de la loi de Benioff

##### *Loi de Benioff*

D'après la théorie du point critique, si un séisme est un point critique alors ses précurseurs suivent des lois d'échelle caractéristiques. Ses lois sont applicables dans la région critique et prennent la forme suivante :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k.(t_r - t)^{-\gamma} \quad (\text{Eq. 6})$$

Où  $\varepsilon$  est une mesure de l'activité sismique,  $t_r$  est le temps d'apparition de la secousse principale et  $\gamma$  et  $k$  sont des constantes.  $\gamma$  est un exposant critique souvent relié à des propriétés fractales du matériau.

La loi de Benioff, introduite par Bufe et al. [7] pour décrire l'augmentation locale de l'activité sismique avant une secousse principale, correspond à l'intégrale de l'équation précédente.

$$\varepsilon = A + B.(t_r - t)^{1-\gamma} \quad (\text{Eq. 7})$$

Où  $A$ ,  $B$  et  $\gamma$  sont des constantes. Dans leur étude, l'activité sismique était décrite par la déformation de Benioff cumulée définie comme suit :

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} E_i^q \quad (\text{Eq. 8})$$

Où  $E_i$  est l'énergie du  $i^{\text{ème}}$  événement apparaissant à l'instant  $t$ , et  $q$  vaut  $1/2$ .

Dans une précédente étude, la loi de Benioff a été appliquée à l'analyse de la libération d'énergie liée aux événements d'EA localisés pendant des essais de fatigue statique sur CMC [8]. Elle est réécrite ici, afin que les paramètres  $\gamma$  et  $\psi$  soient indépendants de la valeur de déformation de Benioff cumulée à rupture, celle-ci pouvant varier très nettement d'un essai à l'autre. Dans la relation suivante,  $\Omega(t)$  est la déformation de Benioff cumulée,  $K_i$  est l'énergie équivalente du  $i^{\text{ème}}$  événement d'EA et  $\Omega_r$  est la valeur de déformation de Benioff cumulée au moment de la rupture.

$$\Omega(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} \sqrt{K_i} = \Omega_r \left[ 1 - \frac{\psi}{1-\gamma} (t_r - t)^{1-\gamma} \right] \quad (\text{Eq. 9})$$

### *Sélection des données à traiter - Méthode du cercle optimal*

La méthode du cercle optimal, développée par Bowman et al. [10], a pour objectif de déterminer la région critique autour de l'épicentre d'un séisme majeur. En effet, comme évoqué au début de cette partie, les lois caractéristiques ne s'appliquent, par définition, que dans la région critique. Ici, cette méthode est également employée pour déterminer le temps à partir duquel la libération d'énergie est bien décrite par la loi de Benioff.

Pour cela, la libération d'énergie est approchée par la loi de Benioff et par une fonction linéaire (de type  $\Omega(t) = \alpha.t + \beta$ ) qui sert de référence. Les valeurs de  $t_r$  et  $\Omega_r$  sont supposées connues. L'approximation revient à ajuster les paramètres  $\gamma$  et  $\psi$  dans le cas de la loi de Benioff et  $\alpha$  et  $\beta$  dans le cas de l'approximation linéaire. Le paramètre  $c$  est ensuite défini comme le rapport de l'erreur quadratique moyenne de l'approximation par la loi de Benioff sur l'erreur quadratique moyenne de l'approximation linéaire. L'utilisation de la loi de Benioff sera pertinente si la valeur du paramètre  $c$  est inférieure à 0,5, indiquant que l'erreur induite en approchant les données par cette loi est deux fois plus petite que celle induite par une approximation linéaire. La libération d'énergie observée est très sensible à deux paramètres, le diamètre de la zone considérée autour du lieu de la secousse principale et l'intervalle de temps pris en compte avant cette secousse principale.

Ici, la méthode du cercle optimal est employée pour déterminer la région critique au niveau spatial et temporel. Deux paramètres sont optimisés, la distance  $d$  entre chaque borne de l'intervalle spatial considéré et le point de rupture et le temps  $t_s$  à partir duquel la libération d'énergie est bien décrite par la loi de Benioff. Le paramètre  $c$  est calculé pour différentes valeurs de  $d$  et  $t_s$ . Chaque jeu de données étudié correspond aux événements d'EA localisés dans l'intervalle  $[x_r - d ; x_r + d]$ , où  $x_r$  est le point de rupture, pendant l'intervalle de temps  $[t_s ; t_r]$ .

## **5. Résultats**

### **5.1. Coefficient d'émission $R_{AE}$**

Le coefficient d'émission  $R_{AE}$  a été calculé pour 7 essais de fatigue statique (2 essais à 450°C et 5 à 500°C). La largeur de l'intervalle de calcul est fonction de l'activité globale, et en moyenne le nombre d'événements par intervalle représente entre 2 et 4% du nombre d'événements localisés pendant les 5 premières heures d'essai. L'incrément est fixé à 50 événements afin d'obtenir une bonne définition de l'évolution du coefficient d'émission  $R_{AE}$ .

Dans chaque cas, un minimum apparaît clairement en cours d'essai. Le temps correspondant à ce minimum est reporté en fonction du rapport de la contrainte appliquée sur la contrainte à rupture du matériau (Fig. 4). Ces résultats sont représentés par des astérisques. Le minimum du coefficient d'émission  $R_{AE}$  apparaît en moyenne à 55% du temps à rupture, avec un écart-type relativement élevé (14% du temps à rupture), principalement à cause des deux valeurs extrêmes obtenues pour les essais à 71 et 79% de la contrainte à rupture. Dans l'essai à 79% de la contrainte à rupture, le minimum est observé exceptionnellement avant le début de la deuxième phase de libération d'énergie quasi linéaire qui pour cet essai était prédominante (entre 30 et 80% du temps à rupture).

Le calcul du coefficient d'émission  $R_{AE}$  a été réalisé pour comparaison avec ou sans les événements localisés au cours des cycles de décharge/recharge, et avec l'énergie équivalente ou l'énergie reçue par le capteur le plus proche. Aucune différence significative n'a été observée sur l'évolution du coefficient d'émission en cours d'essai. En effet, la libération d'énergie demeure prédominante pendant les phases de maintien à contrainte constante. De plus, le coefficient d'émission  $R_{AE}$  traduit l'activité globale dans la zone utile, ce qui explique que les résultats soient équivalents en considérant l'énergie reçue par le capteur le plus proche ou l'énergie équivalente qui donne une image plus précise de l'énergie de la source.

Ainsi, il est intéressant d'observer que l'étude du coefficient d'émission  $R_{AE}$  permet de révéler l'existence d'un temps caractéristique dans la libération d'énergie liée aux événements d'EA, par un traitement simple des données, envisageable en temps réel.

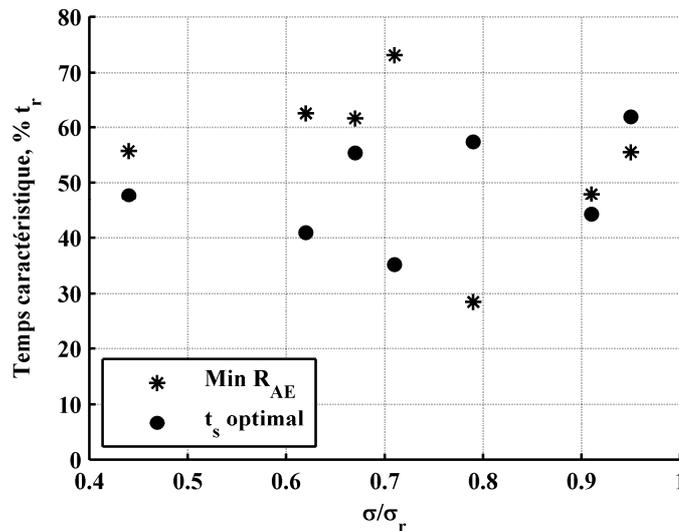


Fig. 4. Temps caractéristique de la libération d'énergie en fonction du niveau de contrainte

## 5.2. Application de la loi de Benioff

La méthode du cercle optimal a été appliquée aux 7 mêmes essais de fatigue statique à 450°C et 500°C. Pour chacun d'entre eux, connaissant le lieu de la rupture, 5 valeurs de  $d$  sont considérées : 5, 10, 15 et 20 mm ainsi qu'une dernière permettant de traiter l'ensemble des événements localisés dans la zone utile. Pour chaque intervalle, le paramètre  $c$  ainsi que le coefficient de détermination  $R^2$  de l'approximation par la loi de Benioff sont calculés pour toutes les valeurs possibles de  $t_s$  dans l'intervalle [10 ; 90] % du temps à rupture. Les valeurs optimales de  $d$  et  $t_s$  sont choisies de manière à maximiser la qualité de l'approximation par la loi de Benioff ( $R^2$  maximal) tout en s'assurant de la pertinence de cette approximation par rapport à une approximation linéaire (valeur faible de  $c$ ). L'évolution du paramètre  $c$  en fonction de  $t_s$  est représentée pour trois essais (Fig. 5). Le minimum apparaît clairement dans chaque cas après une première phase durant laquelle la valeur du paramètre  $c$  décroît très nettement, jusqu'à environ 40% du temps à rupture. Ensuite, dans certains cas, le paramètre  $c$  augmente directement après le minimum, et dans d'autres, il se maintient à une valeur faible pendant un temps assez long. Ce second cas de figure correspond aux essais pour lesquels la deuxième phase de libération d'énergie quasi-linéaire est prédominante et donc la transition vers la troisième phase de libération est moins facile à détecter. La valeur de  $t_s$  optimale est également représentée sur la figure précédente (Fig. 4). En moyenne,  $t_s$  est situé à 49% du temps à rupture, avec un écart-type de l'ordre de 10% du temps à rupture. Il y a donc diminution à la fois de la valeur moyenne du temps caractéristique et de l'écart-type. De plus, la valeur de  $t_s$  n'excède pas 62% du temps à rupture.

Il est important de noter également que pour 4 essais sur les 7 réalisés, la meilleure approximation est obtenue en considérant l'ensemble des événements localisés dans la zone utile. En revanche, pour les 3 autres essais, la meilleure approximation est obtenue en considérant un intervalle réduit autour du point de rupture ( $d$  égale à 10 ou 15 mm). Il est possible d'observer de manière fine la répartition de l'activité acoustique au cours des essais. En plus de la représentation en nombre d'événements par maille, on peut représenter le nombre cumulé d'événements par intervalle de position (Fig. 6). Sur la figure de gauche correspondant à un essai de fatigue statique à 450°C et  $\sigma/\sigma_r = 0,62$ , le trait plein blanc correspond au lieu de la rupture et les deux lignes en pointillés à l'intervalle de  $\pm 15$  mm autour de la rupture. On observe ainsi que la majorité de l'activité d'EA est localisée à l'intérieur de cet intervalle, ce qui explique pourquoi la méthode du cercle optimal a retenu  $d = 15$  mm comme valeur optimale. Sur la figure de droite en revanche, correspondant à un

essai de fatigue à 500°C et  $\sigma/\sigma_r = 0,44$ , une part très significative de l'activité d'EA est localisée loin de la rupture, d'où la prise en compte de l'ensemble des événements par la méthode du cercle optimal pour l'approximation par la loi de Benioff.

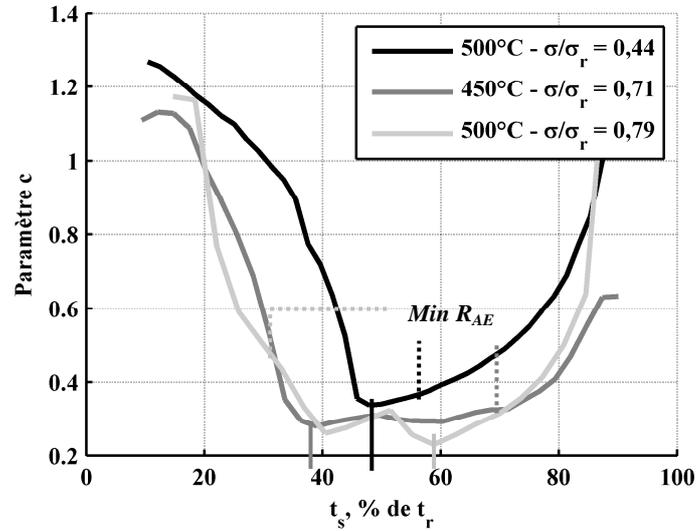


Fig. 5. Evolution du paramètre  $c$  en fonction de  $t_s$  pour trois essais

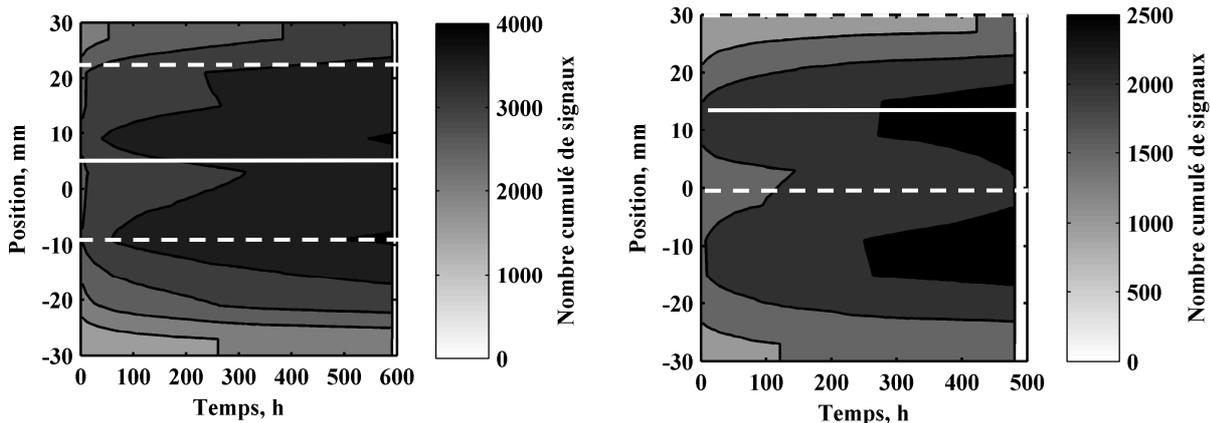


Fig. 6. Nombre cumulé de signaux par intervalle de position au cours de l'essai de fatigue.  
A gauche : Essai à 450°C,  $\sigma/\sigma_r = 0,62$ . A droite : Essai à 500°C,  $\sigma/\sigma_r = 0,44$

## Conclusion

Dans cet article, une méthode de prévision de la durée de vie des CMC en fatigue statique, basée sur l'étude de l'énergie des événements d'EA, est présentée. Tout d'abord, une énergie équivalente des sources d'EA est définie, qui permet de s'affranchir des effets d'atténuation liés à la distance de propagation dans le matériau.

L'approche développée ensuite permet de mettre en évidence un temps caractéristique pour la libération d'énergie liée aux événements d'émission acoustique. Celui-ci se manifeste par une valeur minimale du coefficient d'émission  $R_{AE}$  ainsi que par une valeur minimale du paramètre  $c$  avec la méthode du cercle optimal. Cela conduit à un rapport constant entre temps caractéristique et temps à rupture, de l'ordre de 0,5. Cette loi nécessite maintenant d'être démontrée.

La méthode du cercle optimal a aussi mis en évidence que la loi de Benioff ne s'applique que si l'intervalle considéré autour du point de rupture est assez grand pour contenir la majorité de l'activité d'EA. Cela souligne l'aspect coopératif de l'endommagement dans les CMC et apporte une première explication aux liens se dessinant entre sismologie et suivi de l'endommagement des

CMC par émission acoustique. L'étude d'autres indicateurs tirés de la sismologie pourra permettre d'enrichir la compréhension des mécanismes d'endommagement et la prévision de la durée de vie en fatigue.

## Remerciements

Les auteurs remercient SAFRAN Snecma Propulsion Solide et le CNRS pour le financement de ces travaux.

## Références

- [1] Moevus, M., Godin, N., R'Mili, M., Rouby, D., Reynaud, P., Fantozzi, G., Analysis 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. *Compos. Sci. Technol.* 68(6), 1258-65, 2008.
- [2] Omori, F., On the after-shocks of earthquakes. *Journal of the College of Science, Imperial University, Japan* 7(2) 111-200, 1895.
- [3] Gutenberg, B., Richter, C.F., Seismicity of the Earth, second edition. *Princeton Press*, 1954.
- [4] Mogi, K., Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena. *Bull Earthq. Res. Inst.* 40 125-173, 1962.
- [5] Lei, X., Satoh, T., Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage. *Tectonophysics* 431 97-111, 2007.
- [6] Li, Y.H., Liu, J.P., Zhao, X.D., Yang, Y.J., Experimental studies of the change of spatial correlation length of acoustic emission events during rock fracture process. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sc.* 47 1254-1262, 2010.
- [7] Bufe, C.G., Varnes, D.G., Predictive modeling of the seismic cycle of the Greater San Francisco Bay Region. *J. Geophys. Res.* 98, 9871-9883, 1993.
- [8] 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 composite at high temperature under air. *Composites: Part A* 41 913-918, 2010.
- [9] Morscher, G.N., Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite. *Compos. Sci. Technol.* 59(1999) 687-697, 1998.
- [10] Bowman, D.D., Ouillon, G., Sammis, C.G., Sornette, A., Sornette, D., An observational test of the critical earthquake concept. *J. Geophys. Res.* 103(B10), 24359-24372, 1998.