



HAL
open science

Etude des endommagements sur Composites à Matrice Céramiques par des essais in-situ sous microtomographie X

Vincent Mazars, Olivier Caty, Guillaume Couégnat, Amine Bouterf, Stéphane Roux, Sébastien Denneulin, Gerard Louis Vignoles

► **To cite this version:**

Vincent Mazars, Olivier Caty, Guillaume Couégnat, Amine Bouterf, Stéphane Roux, et al.. Etude des endommagements sur Composites à Matrice Céramiques par des essais in-situ sous microtomographie X. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621621

HAL Id: hal-01621621

<https://hal.science/hal-01621621>

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.

Étude des endommagements sur Composites à Matrice Céramiques par des essais in-situ sous microtomographie X

Damage investigation of 3D woven ceramic matrix composites from X-ray in-situ tests

Vincent Mazars^{1,3}, Olivier Caty¹, Guillaume Couégnat¹, Amine Bouterf², Stéphane Roux², Sébastien Denneulin³,
Gérard L Vignoles¹

1 : LCTS
Univ. de Bordeaux/CNRS/CEA/SAFRAN CERAMICS
3 allée de la Boétie, F-33600 Pessac
e-mail : mazars@lcts.u-bordeaux.fr, caty@lcts.u-bordeaux.fr, couegnat@lcts.u-bordeaux.fr et vignoles@lcts.u-bordeaux.fr

2 : LMT
ENS Paris-Saclay/CNRS/Univ. Paris-Saclay
61 av. President Wilson, F-94235 Cachan
e-mail : amine.bouterf@lmt.ens-cachan.fr et stephane.roux@lmt.ens-cachan.fr

3 : SAFRAN CERAMICS
F-33185 Le Haillan
e-mail : sebastien.denneulin@safrangroup.com

Résumé

Les composites à matrice céramique (CMCs) font l'objet d'un développement actif afin de remplacer les alliages métalliques actuellement utilisés dans les parties chaudes des moteurs d'avions civils. Cela doit permettre d'améliorer l'efficacité des moteurs et de réduire l'impact environnemental. Pour identifier les faiblesses du matériau et mieux connaître leur comportement sous contraintes thermomécanique, des essais de traction in-situ sous rayonnement synchrotron sont réalisés à température ambiante et à 1250°C. Les mécanismes d'endommagement du matériau au cours du chargement peuvent ainsi être identifiés. La corrélation d'image volumique est utilisée comme outil d'analyse de la fissuration, en particulier via l'étude des discontinuités dans les champs mécaniques. Des modèles éléments finis sont par ailleurs construits directement à partir des images à l'échelle mésoscopique afin de recréer numériquement les essais expérimentaux. Nos résultats ont permis de mettre en avant une corrélation entre le tissage du matériau et l'apparition de la fissuration. Il ressort en particulier que les plans de toisons transverses constituent des lieux privilégiés d'amorçage de la fissuration, ce qui est cohérent avec les zones de surcontraintes calculés dans le domaine élastique par le calcul éléments finis.

Abstract

Ceramic matrix composites (CMCs) are actively developed to replace metal alloys currently used in the hot parts of civil aircraft engines. This should improve engine efficiency and reduce environmental impact. The objective of the present study is to identify the weaknesses of the material under service. For this purpose, in situ tensile tests under synchrotron radiation are carried out at room temperature and at 1250°C. The damage mechanisms of the material under loading are identified. Digital volume correlation is used for analyzing cracks, in particular by studying discontinuities within the displacements fields. Finite element models are constructed directly from the tomographic images at the mesoscopic scale to reproduce numerically the experiments. Our results reveal a strong correlation between the weaving of the material and cracks initiation. It appears that transverse yarns planes act as stress concentrators and are the preferred places for crack initiation, which is consistent with the calculated stress fields.

Mots Clés : Essais in-situ, Tomographie, Corrélation d'image volumique, Éléments finis, Composites SiC/SiC

Keywords : In-situ tests, Tomography, Digital Volume Correlation, Finite elements, SiC/SiC composites

1. Introduction

Les constructeurs de moteurs aéronautiques civils sont soumis à de nouvelles normes en terme de bruit et de pollution. Pour répondre à ces exigences, l'un des leviers technologiques concerne le choix des matériaux afin d'augmenter la température de fonctionnement et donc les rendements moteurs. Les composites à matrice céramique (CMCs) sont des matériaux haute performance qui présentent

une bonne tolérance aux dommages, une faible masse volumique et qui conservent d'excellentes propriétés thermomécaniques à haute température. Ces caractéristiques en font des matériaux de choix pour remplacer les alliages métalliques dans les parties chaudes des moteurs aéronautiques [1]. Afin de prédire le comportement du matériau en service, les modèles numériques doivent s'appuyer sur des observations fines de la microstructure ainsi que sur une bonne compréhension des phénomènes d'endommagement aux différentes échelles. Les essais macroscopiques ne suffisent généralement pas à établir le lien entre l'architecture du matériau et les mécanismes d'endommagement.

Le couplage entre les essais mécaniques et la μ CT X se révèle particulièrement intéressant pour identifier les mécanismes d'endommagements au sein d'un matériau [2], [3]. La dimension in-situ est nécessaire pour l'étude de matériaux tels que les CMC qui présentent de faibles déformations du fait de la refermeture des fissures lors du déchargement [4]. L'analyse des images permet d'obtenir des données quantitatives tridimensionnelles sur les cinétiques d'endommagement. Cela a été en particulier réalisé sur des minicomposites à matrice céramique à température ambiante [5], [6] et à haute température [7].

La corrélation d'image volumique (DVC) peut être utilisée afin d'identifier les mécanismes d'endommagement au cours du chargement. Basée sur la conservation du niveau de gris, la DVC consiste à appliquer un champ de déplacement à l'image de référence afin de minimiser la différence entre l'image de référence et l'image déformée corrigée par le champ de déplacement. Les champs de déplacements sont interpolés sur une base éléments finis, ce qui assure leur continuité. Les discontinuités de l'image déformée, telles que les fissures, peuvent donc être identifiées grâce à l'étude locale des résidus de corrélation [8], [9], [10], [11].

Afin d'apporter une explication physique à l'apparition des premiers endommagements, des calculs éléments finis (EF) sont réalisés sur les images acquises par μ CT. Les calculs sont effectués à l'échelle mésoscopique, ce qui est un bon compromis entre la prise en compte de l'architecture du matériau tout en restant acceptable du point de vue du temps de calcul.

L'objectif de l'étude présentée ici est de détecter l'apparition des endommagements via l'étude des résidus de corrélation et de mettre en évidence la relation entre les lieux privilégiés de la fissuration et les surcontraintes calculées sur un modèle EF basé image.

2. Essais expérimentaux

Le matériau étudié est un composite SiC/SiC à matrice MI (Melt Infiltration) développé par le groupe Safran. Deux essais de traction in-situ ont été réalisés sur la ligne ID19 à l'ESRF à une résolution de $1 \mu\text{m}$, l'un à température ambiante et l'autre à 1250°C . Le dispositif de traction est présenté Fig. 1. Les éprouvettes utilisées sont de type haltère et présentent une partie utile de $10 \times 2 \times 3.2 \text{ mm}^3$. Le chauffage de l'éprouvette est réalisé par effet Joule.

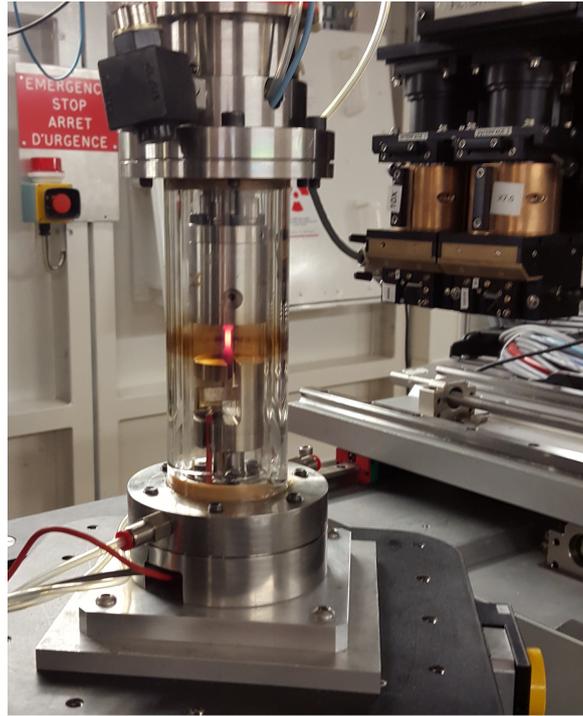


Fig. 1. Dispositif expérimental utilisé pour les essais in-situ sur la ligne ID19. L'éprouvette est chauffée à 1250°C.

3. Étude des résidus de corrélation

Une identification des mécanismes d'endommagement est proposée par corrélation d'image volumique (DVC) avec le code C8R développé par le LMT Cachan. Une approche de régularisation est utilisée, permettant aux champs cinématiques calculés d'être mécaniquement admissibles, ce qui améliore les résultats de DVC sur les matériaux présentant de faibles niveaux de déformations [12]. Les calculs sont réalisés sur des sous-volumes de l'image.

La Fig. 2 (b) présente les résidus de corrélation après seuillage (en rouge) superposés à l'architecture du matériau (en gris) à différents incréments de charge sur un sous-volume du matériau (Fig. 2 (a)). On voit sur cette figure l'apparition et la propagation d'une fissure matricielle dans un croisement de fils. A partir de $0.7 \sigma_R$ (σ_R correspondant à la contrainte à rupture obtenue expérimentalement), des ruptures de fibres se développent de part et d'autre de la fissure matricielle principale. La Fig. 2 (c) présente un zoom sur des ruptures de fibres, soulignant la possibilité d'extraire individuellement les ruptures de fibres. Des données quantitatives telles que les cinétiques de fissuration et les cinétiques de ruptures de fibres peuvent ainsi être extraites et serviront de données d'entrée à des modèles d'endommagement.

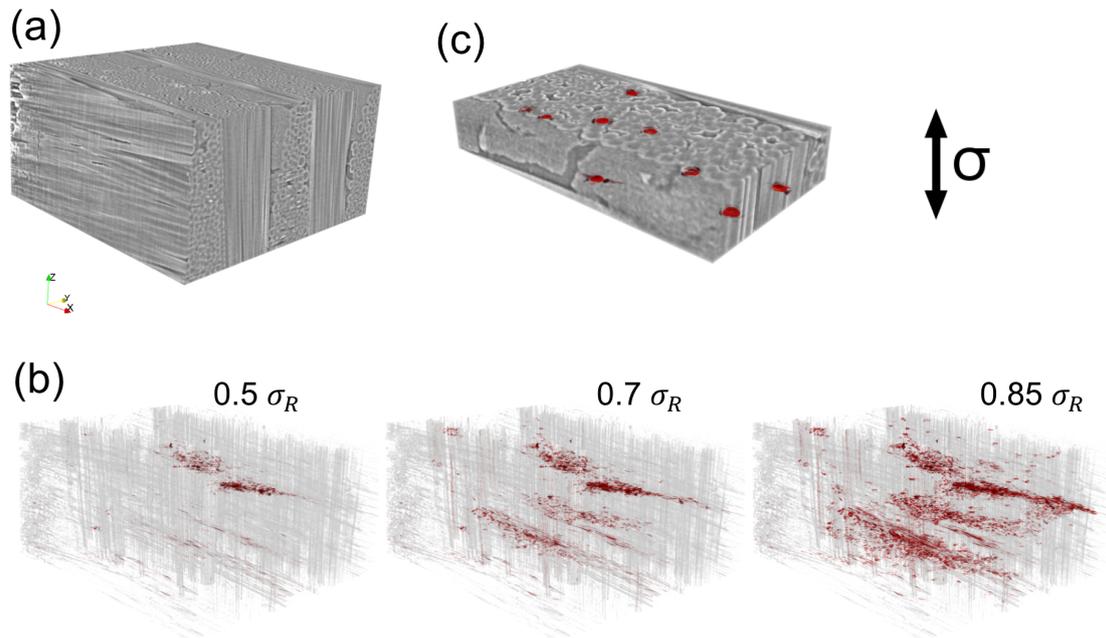


Fig. 2. (a) : Sous-volume de l'image. (b) : Résidus de corrélation seuillés (en rouge) superposés à l'architecture du matériau (en gris) au cours du chargement. (c) : Zoom sur des ruptures de fibres.

4. Modélisation basée image

Les images sont utilisées comme support au calcul éléments finis (EF). Les coefficients d'absorption de la matrice et des torons étant très proches, il n'est pas possible de différencier les torons de la matrice simplement par seuillage des niveaux de gris. Des algorithmes basés sur les champs d'orientation de l'image sont donc utilisés. Le tenseur de structure est défini comme $\nabla f \otimes \nabla f$ où ∇f représente le gradient de l'image. Le vecteur propre associé à la plus faible valeur propre du tenseur de structure permet d'obtenir en chaque voxel la direction de plus faible variation de niveau de gris, c'est-à-dire la direction des fibres. Il est ainsi possible de séparer les torons de la matrice.

Les images labélisées sont ensuite maillées à l'aide d'un Marching Cube puis transformés en maillage tétraédrique avec le logiciel GHS3D développé par l'INRIA [13]. Les directions d'anisotropie des renforts sont obtenues avec la ligne moyenne de chaque toron. La matrice est quant à elle considérée isotrope. Les propriétés des constituants retenues pour le modèle EF à température ambiante sont résumées Tab. 1 d'après les études de la littérature sur un matériau similaire [14]. Les conditions aux limites du modèle sont calculées sur la partie supérieure et inférieure de l'éprouvette par DVC et appliquées au modèle élément fini.

La Fig. 3 présente une coupe du matériau au cours du chargement où les fissures principales sont surlignées en noir (Fig. 3 (a)). Les champs de déformations d'un calcul élastique dans le sens de la traction calculés par EF sont représentés sur la même coupe du matériau (Fig. 3 (b)). La dissymétrie du réseau de fissuration observée expérimentalement se retrouve dans les champs de déformations. Cela s'explique principalement par le fait que les mors de la machine sont situés relativement loin de la zone utile. Par conséquent, le chargement effectivement appliqué aux extrémités de la partie utile de l'éprouvette n'est pas un chargement de traction parfait.

Il ressort par ailleurs que les plans de torons transverses présentent des déformations plus importantes, ce qui est cohérent avec l'initiation préférentielle des fissures dans ces zones.

	E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Yarn	320	149	149	59.6	59.6	64.8	0.176	0.176	0.15
Matrix	310			132.5			0.17		

Tab. 1. Propriétés à l'échelle mésoscopique utilisées pour le calcul EF à température ambiante. E et G sont exprimés en GPa and ν est le coefficient de Poisson. Les valeurs sont tirées de [14].

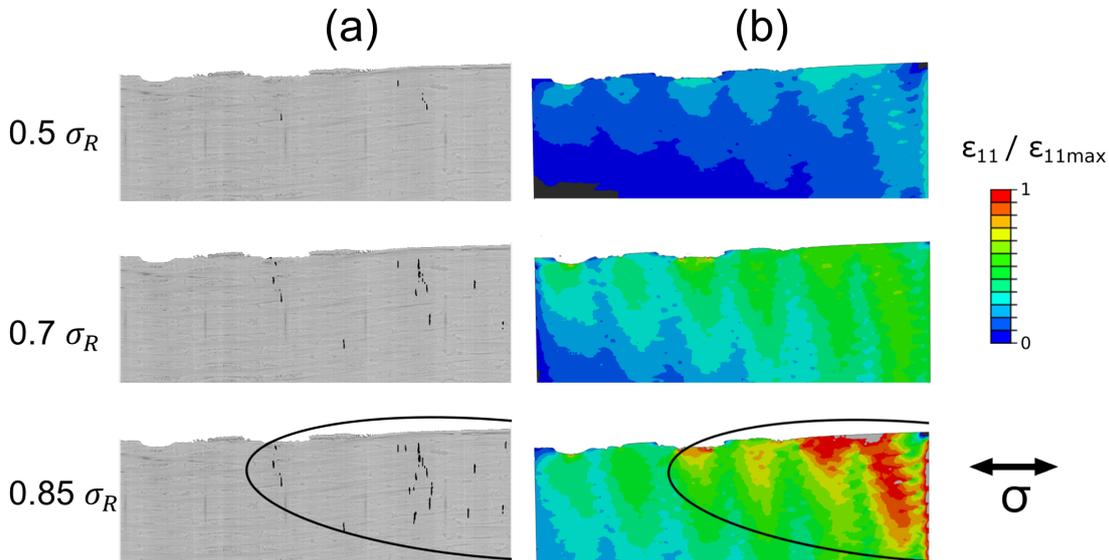


Fig. 3. (a) : Visualisation de la fissuration sur une coupe du matériau au cours du chargement. (b) : Comparaison avec le champ de déformation dans la direction de traction calculés par EF. Les résultats montrent la dyssimétrie du réseau de fissuration et du champ de déformation.

5. Conclusions

Le dispositif expérimental permet de réaliser des essais in-situ sous micro-tomographie X aux températures de service du matériau. L'étude des résidus de corrélation de DVC se révèle particulièrement efficace pour détecter les mécanismes d'endommagement au sein de la structure. Il a en particulier été observé que les premières fissures matricielles apparaissent dans les plans de torons transverses avant de propager aux autres constituants jusqu'à créer des macro-fissures. Les zones de faiblesse sont consistantes avec les calculs réalisés par EF qui présentent des déformations maximales dans les plans de fils transverses. Des travaux sont en développement pour introduire l'endommagement dans les modèles EF, de façon discrète ou par une approche continue de l'endommagement. Cela doit permettre non seulement d'identifier les premières zones de fissuration, mais également de comprendre l'effet de l'endommagement sur la redistribution locale des contraintes.

Remerciements

Les auteurs remercient le groupe Safran pour le financement de la thèse CIFRE de Vincent Mazars, Jérôme Pailhes de l'I2M pour la conception de la machine de traction ainsi que Elodie Boller avec qui les tomographies ont été réalisées sur la ligne ID19 de l'ESRF.

Références

- [1] P. Spriet, G. Habarou « Applications of CMCs to Turbojet Engines : Overview of the SEP Experience », in : Ceramic and Metal Matrix Composites, vol. 127 of *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, , pp. 1267–1276, 1996.

- [2] E. Maire, P. Withers « Quantitative X-ray tomography », *International Materials Reviews* Vol. 59 n° 1, pp. 1–43, 2014.
- [3] J. Y. Buffiere, E. Maire, J. Adrien, J. P. Masse, E. Boller « In Situ Experiments with X-ray Tomography : an Attractive Tool for Experimental Mechanics », *Experimental Mechanics* Vol. 50 n° 3, pp. 289–305, 2010, ISSN 1741-2765.
- [4] R. Böhm, J. Stiller, T. Behnisch, M. Zschehyge, R. Protz, S. Radloff, M. Gude, W. Hufenbach « A quantitative comparison of the capabilities of in situ computed tomography and conventional computed tomography for damage analysis of composites », *Composites Science and Technology* Vol. 110, pp. 62 – 68, 2015, ISSN 0266-3538.
- [5] C. Chateau, L. Gélébart, M. Bornert, J. Crépin, E. Boller, C. Sauder, W. Ludwig « In situ X-ray microtomography characterization of damage in SiCf/SiC minicomposites », *Composites Science and Technology* Vol. 71 n° 6, pp. 916 – 924, 2011, ISSN 0266-3538.
- [6] O. Caty, P. Ibarroule, M. Herbreteau, F. Rebillat, E. Maire, G. L. Vignoles « Application of X-ray computed microtomography to the study of damage and oxidation kinetics of thermostructural composites », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms* Vol. 324, pp. 113 – 117, 2014, ISSN 0168-583X, 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures.
- [7] H. A. Bale, A. Haboub, A. A. MacDowell, J. R. Nasiatka, D. Y. Parkinson, B. N. Cox, D. B. Marshall, R. O. Ritchie « Real-time quantitative imaging of failure events in materials under load at temperatures above 1,600 C », *Nature materials* Vol. 12 n° 1, pp. 40–46, 2013.
- [8] S. Roux, J. Réthoré, F. Hild « Digital image correlation and fracture : an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2D and 3D cracks », *Journal of Physics D : Applied Physics* Vol. 42 n° 21, pp. 214004, 2009.
- [9] P. Leplay, J. Réthoré, S. Meille, M.-C. Baietto, J. Adrien, E. Maire « Analyse d'un test in situ de double-torsion par tomographie X et corrélation d'images 3D », in : 10e colloque national en calcul des structures, Giens, France, , pp. Clé USB, 2011.
- [10] A. Bouterf, S. Roux, F. Hild, J. Adrien, E. Maire, S. Meille « Digital Volume Correlation Applied to X-ray Tomography Images from Spherical Indentation Tests on Lightweight Gypsum », *Strain* Vol. 50 n° 5, pp. 444–453, 2014.
- [11] A. Bouterf, J. Adrien, E. Maire, X. Brajer, F. Hild, S. Roux « Failure Mechanisms of Plasterboard in Nail Pull Test Determined by X-ray Microtomography and Digital Volume Correlation », *Experimental Mechanics* Vol. 56 n° 8, pp. 1427–1437, 2016, ISSN 1741-2765.
- [12] T. Taillandier-Thomas, S. Roux, T. F. Morgeneyer, F. Hild « Localized strain field measurement on laminography data with mechanical regularization », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms* Vol. 324, pp. 70 – 79, 2014, ISSN 0168-583X, 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures.
- [13] INRIA « Automatic mesh generation and adaptation methods GAMMA », *Online* : <https://www-roc.inria.fr/gamma/gamma/Accueil/index.en.html> Vol. (25/08/2016), pp. , 2015.
- [14] S. Mital, B. Bednarczyk, S. Arnold, J. Lang « Modeling of Melt-Infiltrated SiC/SiC Composite Properties », Tech. Rep. NASA/TM-2009-215806, E-17069, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, United States, 2009.