

CONCEPTION D'UN ESSAI MULTIAXIAL *IN SITU* POUR CARACTÉRISER LE COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE DE PIÈCES EN CMC

Léonard Turpin ^{a,b,c}, Olivier Caty ^a, Stéphane Roux ^b, Sébastien Denneulin ^c, Éric Martin ^a

^a LCTS – CNRS, CEA, SAFRAN, Univ. de Bordeaux – 3, allée de la Boétie, 33 600 Pessac –
{turpin,caty,martin}@lcts.u-bordeaux.fr

^b LMT – ENS Paris-Saclay, CNRS, Univ. Paris-Saclay – 61, av. du Président Wilson, 94 235 Cachan Cedex –
stephane.roux@ens-paris-saclay.fr

^c Safran Ceramics – 105, av. Marcel Dassault, 33 700 Mérignac

Mots-clés : Micro-tomographie, Composite à Matrice Céramique (CMC), endommagement local, propriétés mécaniques locales, structures tissées complexes

Résumé

Les composites à matrice céramique conservent de bonnes propriétés mécaniques à très haute température. Ils présentent donc un grand intérêt pour un usage dans les zones chaudes des moteurs d'avion. Toutefois leur structure est complexe et il est important, particulièrement dans les zones singulières, de pouvoir observer, comprendre et modéliser leur comportement thermomécanique. La machine d'essais présentée ici est conçue pour reproduire in situ des chargements représentatifs de ceux auxquels les pièces sont soumises. Elle est fortement instrumentée pour pouvoir alimenter les modèles à l'aide d'une approche par champ complet.

1 Introduction

Les Composites à Matrice Céramique (CMC), notamment les SiC/SiC (fibres et matrice de carbure de silicium) étudiés ici, sont dits thermostructuraux car la variation de leurs propriétés mécaniques avec la température est limitée en comparaison de celle des métaux [1, 2, 3]. Leur utilisation en remplacement des super-alliages, dans les zones chaudes des turboréacteurs permettra une augmentation de leur température de fonctionnement et un gain de masse qui entrainera une augmentation significative de rendement. Ces composites sont des tissés 3D où l'armature du renfort fibreux est conçue pour assurer leur bon comportement mécanique. Celui-ci, résultant d'une microstructure complexe, nécessite une caractérisation expérimentale fine en particulier pour la validation de modèles numériques.

Les caractères multi-échelle, inhomogène et anisotrope du matériau obligent à s'écarter des moyens expérimentaux conventionnels et à développer des essais innovants fortement instrumentés en mesure d'alimenter des modèles qui peuvent être eux-mêmes multi-échelles et fondés sur la structure du matériau [4, 5]. Lors d'essais *in situ*, la tomographie par rayon X, alliée à la corrélation d'images volumiques (DVC) [6, 7], permet de mesurer les champs de déplacement au sein de l'éprouvette. Des essais de tractions ont déjà montré le potentiel de cette approche [8], notamment sur les CMC à haute température [9, 10].

Cette article présente un moyen d'essai développé pour étudier, à des températures de l'ordre de 1000°C, des chargements qui reproduisent ceux des pièces en service. La mesure de champs complets permet d'identifier avec un seul essai des propriétés dont l'obtention par une approche conventionnelle aurait nécessité de nombreux essais ou se serait montrée impossible. L'objectif est d'alimenter les modèles de comportement et d'étudier l'endommagement car le critère de dimensionnement de ces pièces est le "premier" endommagement.

2 Étude du problème

Des machines d'essai multiaxial *in situ* ont déjà été développées, par ex. des essais de double torsion [11] ou de traction biaxiale sur film mince [12]. L'essai dont il est question ici se rapproche plus d'un essai technologique. La fabrication des CMC étant longue et coûteuse, il a été décidé de travailler sur deux types d'éprouvettes (fig. 1) : la première (fig. 1a), complexe, est issue d'une pièce industrielle et présente un grand intérêt du fait de la complexité du tissage dans la zone d'étude ; la seconde (fig. 1b) est une cornière qui permettra essentiellement

d'étudier des chargements hors plan. La figure 1 montre aussi l'implantation de ces éprouvettes au sein de la cellule d'essai qui est identique pour les deux types d'éprouvette.

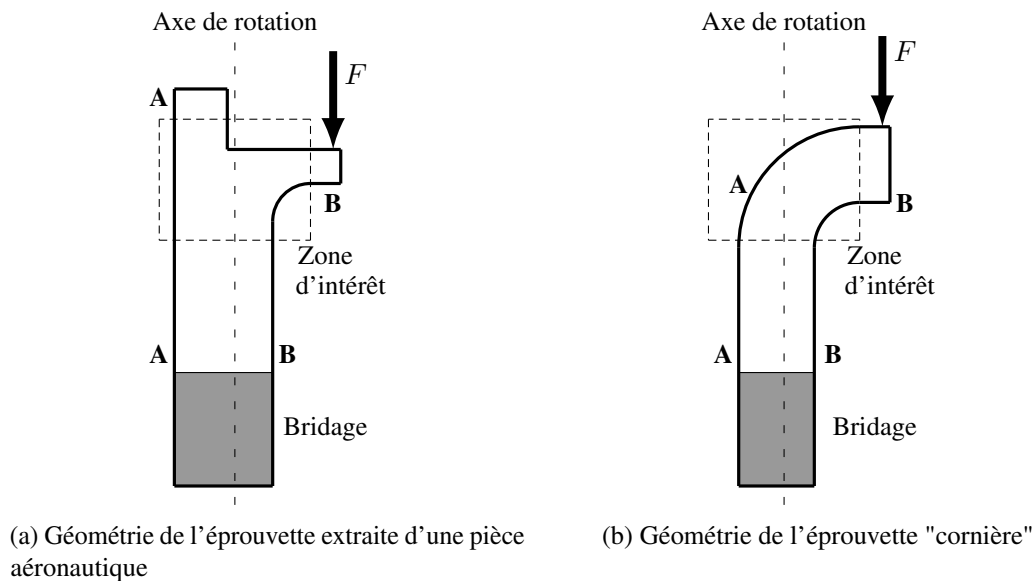


FIGURE 1 – Géométrie des éprouvettes étudiées. Elles sont bridées dans leur partie basse et le chargement mécanique F est appliqué de manière à solliciter la zone d'intérêt. Les faces A-A et B-B sont resp. chaude et froide, créant ainsi un gradient thermique. La zone d'intérêt (en pointillés) correspond à la fenêtre de tomographie.

L'encombrement de la cellule est limité par l'utilisation sous tomographe. Aussi le chargement mécanique est appliqué par un seul actionneur et c'est la conjugaison de la géométrie des éprouvettes et d'un champ thermique inhomogène qui confère au chargement son caractère multiaxial. La face chaude est chauffée par une résistance constitué d'un wafer de silicium de faible épaisseur (absorption des rayons X comparable à celle du SiC), la face froide est soumise à une convection forcée, permettant ainsi de maîtriser le gradient thermique généré. On se limite, dans un premier temps, à des études à l'équilibre thermique car la mesure du champ thermique lors de l'acquisition tomographique présente des difficultés d'instrumentation.

La principale difficulté des essais sous tomographe résulte du temps d'acquisition des images (de l'ordre de 90 min sur un tomographe de laboratoire) qui oblige à limiter le nombre de paliers de chargement et, ainsi, à prendre le risque de ne pas observer les phénomènes qui recherché comme l'apparition et la propagation de fissures. Un suivi de l'activité acoustique de la pièce permet de redéfinir les paliers de chargement au cours de l'essai.

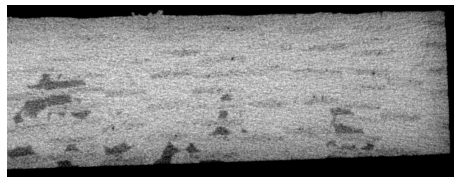
Enfin, le programme de pilotage de la machine d'essai dialogue avec celui du tomographe afin de pouvoir automatiser l'essai.

3 Exploitabilité des tomographies

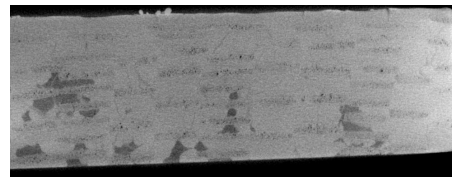
Les éprouvettes étudiées ici sont d'une section de l'ordre de 100 mm^2 . Elle est plus importante que celles étudiées précédemment [10]. Afin d'obtenir une bonne résolution (env. $8 \mu\text{m}/\text{px}$), on se place au plus près du tube à rayon X, en limitant l'encombrement radial de la machine. Il est important de s'assurer de l'exploitabilité de ces tomographies par DVC. En corrélation d'images l'information utilisée est la texture de l'image qui dans notre cas est celle du matériau. Celle-ci est moins contrastée lorsque l'épaisseur de matériau traversée par les rayons X augmente ce qui devient un facteur limitant. L'incertitude du champ de déplacement calculé est directement liée à son niveau de bruit.

Deux solutions sont généralement utilisées pour fermer la chaîne d'effort des machines *in situ* dans la zone traversée par le faisceau. La première est l'utilisation d'un portique fixe : seuls les mors de la machine sont tournants lors de l'acquisition. Il s'agit de la solution idéale mais elle est difficile à mettre en œuvre car il faut assurer un asservissement très précis entre les mors inférieur et supérieur. Elle doit être conçue pour une ligne de tomographie spécifique et est donc peu polyvalente. La seconde est une machine en rotation, fixée sur la platine

du tomographe et munie d'une fenêtre cylindrique [9, 10]. Cette solution est plus simple. La fenêtre a toutefois comme effet de diminuer le flux qui traverse l'éprouvette et donc d'augmenter le rapport signal sur bruit de l'image. Elle ajoute également un bruit supplémentaire par ses imperfections (fig. 2).



(a) Tomographie d'une éprouvette entourée d'une fenêtre de verre. Le rapport signal sur bruit est, $SNR = 30.8$



(b) Tomographie d'une éprouvette sans fenêtre de verre. $SNR = 51.9$

FIGURE 2 – Influence de la présence de la fenêtre cylindrique pour fermer la chaîne d'effort. Pour obtenir de meilleurs résultats par corrélation d'images, il est important de réduire le bruit des tomographies en faveur de la texture de l'image.

La solution sélectionnée est un portique tournant. Cinématiquement, elle est équivalente à la solution avec une fenêtre tubulaire, les mors n'ont donc pas à être asservis en rotation. Toutefois, ce portique traverse le faisceau. Il existe donc certains secteurs angulaires où les informations sur l'objet scanné sont absentes. Pour les réduire, la section du portique doit être la plus petite possible, l'ensemble des actionneurs est donc déporté sur la partie basse de la machine dont on trouvera la structure générale en figure 3. L'éprouvette est accessible ce qui permet d'assurer simplement une bonne mise en position.

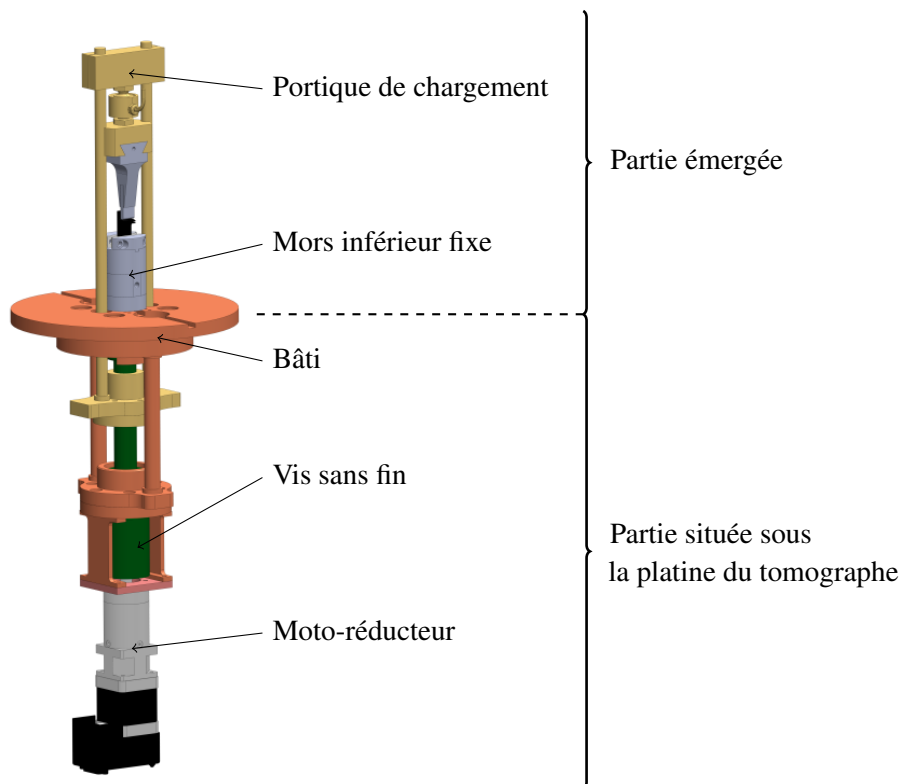


FIGURE 3 – Schéma de la solution proposée pour la cellule de chargement. La fenêtre cylindrique des versions précédentes est remplacée par un portique de faible section. L'actionneur est déporté sous la platine du tomographe pour libérer la zone d'observation.

L'absence de certains secteurs angulaires crée des artefacts lors de la reconstruction tomographique. Cette problématique est courante en tomographie électronique. Un outil de reconstruction, utilisant la toolbox ASTRA [13], est développé pour implémenter un algorithme de reconstruction par projection itératives (IRR) [14] intégrable à

l'algorithme d'exploitation.

4 Conclusion et perspectives

Un nouveau moyen est développé pour réaliser, à haute température, des essais multiaxiaux. La spécificité de ces essais a conduit à la proposition d'une solution originale et polyvalente. Elle fournira, grâce à la corrélation d'images intégrée, des données pour des modèles basés images complexes [5] qui seront utilisées à des fins de validation et de recalage. C'est le principal objet du développement des algorithmes à venir. La souplesse du moyen d'essai et l'appropriation de l'ensemble de la chaîne de traitement des images permettra l'implémentation d'approches innovantes comme la DVC fondée sur les projections [15].

Remerciements

Ce projet est financé par Safran Ceramics dans le cadre du Projet de Recherche Concerté (PRC) MECACOMP et par l'ANRT dans le cadre d'un contrat CIFRE.

Références

- [1] R. Naslain, "Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors : an overview," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, pp. 155–170, 2004.
- [2] G. Camus, C. Lorette, R. Pailler, F. Rebillat, B. Reignier, and F. Teyssandier, "Matériaux composites à matrice céramique et à renfort par fibres longues," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. N4803 V2, 2016.
- [3] B. N. Cox, H. A. Bale, M. Begley, M. Blacklock, B.-C. Do, T. Fast, M. Naderi, M. Novak, V. P. Rajan, R. G. Rinaldi, R. O. Ritchie, M. N. Rossol, J. H. Shaw, O. Sudre, Q. Yang, F. W. Zok, and D. B. Marshall, "Stochastic virtual tests for high-temperature ceramic matrix composites," *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2014.
- [4] V. Mazars, *Étude des endommagements sur CMC par une approche de modélisation micro-méso alimentée par des essais in-situ*. PhD thesis, Université de Bordeaux, France, 2018.
- [5] J. Benezech, *Modélisation du comportement thermomécanique à l'échelle mésoscopique de zones singulières de pièces aéronautiques en CMC*. PhD thesis, Université de Bordeaux, France, en cours.
- [6] S. Roux, F. Hild, P. Viot, and D. Bernard, "Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam," *Composites Part A*, vol. 39, pp. 1253–1265, 2008.
- [7] F. Hild, A. Bourtef, L. Chamoin, H. Leclerc, F. Matthieu, J. Neggers, F. Pled, Z. Tomičević, and S. Roux, "Toward 4D mechanical correlation," *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, vol. 3 (1), pp. 1–26, 2016.
- [8] E. Maire, L. Salvo, P. Cloetens, and M. Di Michiel, "Tomographie à rayon X appliquée à l'étude des matériaux," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. IN20 V1, 2004.
- [9] H. A. Bale, M. Blacklock, M. R. Begley, D. B. Marshall, B. N. Cox, and R. O. Ritchie, "Characterizing three-dimensional textile ceramic composites using synchrotron X-ray micro-computed-tomography," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 95, pp. 392–402, 2012.
- [10] V. Mazars, O. Caty, G. Couégnat, A. Bourtef, S. Roux, S. Denneulin, J. Pailhès, and G. L. Vignoles, "Damage investigation and modeling of 3D woven ceramic matrix composites from X-ray tomography in-situ tensile tests," *Acta Mater.*, vol. 140, pp. 361–371, 2017.
- [11] P. Leplay, J. Réthoré, S. Meille, M.-C. Baietto, J. Adrien, and E. Maire, "Analyse d'un test in situ de double-torsion par tomographie X et corrélation d'images 3D," *10^e colloque national en calcul des structures*, Giens, France, May 2011.
- [12] G. Géandier, S. Djaziri, P. Goudeau, E. Le Bourhis, P.-O. Renault, D. Thiaudière, F. Hild, and D. Faurie, "Development of a synchrotron biaxial tensile device for *in-situ* characterization of thin films mechanical response," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 81, 2010.
- [13] W. Van Aarle, W. J. Palenstijn, J. De Beenhouwer, T. Altantzis, S. Bals, K. J. Batenburg, and J. Sijbers, "The ASTRA Toolbox : a platform for advanced algorithm development in electron tomography," *Ultramicroscopy*, vol. 157, pp. 25–47, 2015.
- [14] M. Nassi, W. R. Brody, B. P. Medoff, and A. Macovsky, "Iterative reconstruction-reprojection : An algorithm for limited data cardiac-computed tomography," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-29(5), pp. 331–341, 1982.
- [15] C. Jailin, A. Bourtef, M. Poncelet, and S. Roux, "*In-situ* μ CT-scan mechanical tests : Fast 4D mechanical identification," *Exp. Mech.*, 2017.