

Modélisation et caractérisation d'un composite à matrice céramique revêtu sous chargements multi-physiques extrêmes

Modeling and characterization of a coated ceramic matrix composite subjected to extreme multiphysics loading

Victor Herbert¹, Frédéric Laurin¹, Thibaut Archer¹, Antoine Débarre¹, Thomas Vandellos², Simon Arnal²

1 : DMAS, ONERA, Université Paris-Saclay,
92320 Châtillon, France
e-mail : victor.herbert@onera.fr

2 : SAFRAN Ceramics, a technology platform of Safran Tech,
33185 Le Haillan, France

Résumé

Ces travaux s'inscrivent dans le développement des prochaines générations de moteurs d'avion par SAFRAN. Afin de réduire l'empreinte environnementale de l'industrie aéronautique, l'une des solutions est d'augmenter la température de combustion des gaz dans les moteurs. Pour cela, de nouveaux matériaux doivent être introduits. Parmi eux les composites à matrice céramique (CMC) sont prometteurs. Cependant, caractériser ces matériaux dans des conditions proches de celles d'utilisation (température supérieure à 1200°C, atmosphère oxydante) est complexe. Pour répondre à cette problématique, l'ONERA a récemment développé un nouveau banc couplant chargement mécanique (traction), thermique (chauffage laser) et à environnement contrôlé (atmosphère neutre ou oxydante) qui permet de se rapprocher des conditions d'utilisation tout en gardant une maîtrise importante des conditions aux limites et un suivi de l'essai grâce à la multi-instrumentation utilisée (détection de l'endommagement par émission acoustique, mesure de champs thermique et cinématique). L'analyse des mesures effectuées, mise en relation avec des simulations éléments finis dans une démarche de dialogue essais-calculs a permis d'étudier l'impact des chargements et des états de contraintes sur l'endommagement du CMC.

Abstract

This study is part of the development of the next generation of aircraft engines from SAFRAN. In a perspective to reduce the impact from the aeronautic industry on the environment, one of the solutions is to increase the combustion temperature of gases in engines. For this, new materials must be introduced, among them, ceramic matrix composites (CMC) are promising. However, characterize these materials under conditions close to those in use (temperature above 1200°C, oxidizing atmosphere) is complex. To address this issue, the ONERA recently acquired a new mechanical (traction), thermal (laser heating) and controlled environment (neutral atmosphere or not, control of the humidity level) test bench which should bring closer to the conditions of use while maintaining control over boundary conditions and allow test monitoring thanks to the multi-instrumentation (damage detection using acoustic emissions, thermal and kinematic field measurement). Analysis of measurements, correlated with finite element simulations in a dialogue between testing and calculation allowed us to study the impact of the loads and the stress states of the CMC.

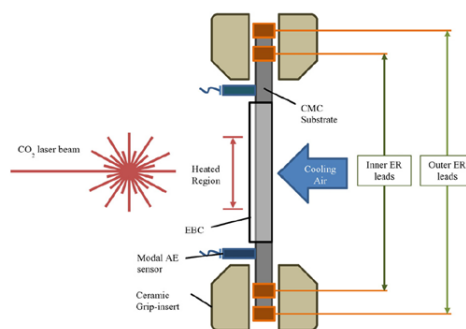
Mots Clés : Composites à matrice céramique, thermomécanique, essai haute température, modèle d'endommagement, oxydation

Keywords : Ceramic matrix composites, thermomechanics, high-temperature testing, damage model, oxidation

1. Introduction

La réduction de l’empreinte carbone du trafic aérien est un enjeu majeur des acteurs de l’aéronautique pour permettre à la filière de prospérer. Ainsi, l’un des axes identifié pour atteindre ces objectifs repose sur l’augmentation de la température de combustion des gaz au sein des moteurs et donc sur l’augmentation de la température de fonctionnement des pièces. C’est dans ce contexte que sont développés les composites à matrice céramique (CMC), notamment à base de carbure de silicium (SiC), pour les prochaines générations de moteur.

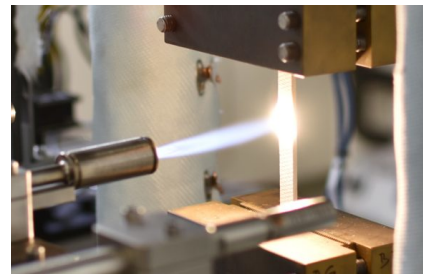
En effet, ces matériaux permettent un gain de masse important tout en garantissant une bonne résistance mécanique dans des conditions sévères de température [1]. Si des campagnes d’essais élémentaires ont été menées sur ces matériaux, réaliser des essais de caractérisation se rapprochant de l’environnement représentatif est beaucoup plus complexe. Les pièces peuvent en effet évoluer à des températures supérieures à 1200°C, être chargées mécaniquement et faire face aux gaz de combustion corrosifs.



(a) Montage pour un essai de cyclage laser sous charge-mécanique [2]



(b) Banc MAATRE de l'institut P' [3]



(c) Banc à flamme de l'IRT Saint Exupéry [4]

FIG. 1. – Différents bancs haute température

Pour réaliser ces essais complexes, plusieurs essais existent déjà, on retrouve :

- Du cyclage thermique en four en présence de vapeur d'eau [5]. Particulièrement utilisé pour le développement des barrières environnementales (EBC pour Environmental Barrier Coating) sur composite à matrice céramique (CMC), il a l'avantage de permettre une très bonne maîtrise des conditions d'essai.
- Du cyclage laser sous chargement mécanique (cf. Fig. 1a). Ce moyen permet un couplage fort entre sollicitations mécaniques et thermiques avec l'impact de gradients thermiques. Une des limites réside dans la connaissance du chargement mécanique réel appliqué, d'où l'utilisation des mesures de champs thermomécaniques comme de la corrélation d'images numériques [6].
- Des bancs à flamme (cf. Fig. 1c). Cet essai permet un couplage fort en thermomécanique et en oxydation. Néanmoins la difficulté de maîtriser la température et les conditions environnementales est

limitante pour déterminer le lien entre les chargements imposés et les mécanismes d'endommagement observés.

- Des brûleurs haute pression (cf. Fig. 1b) permettent de représenter au mieux des conditions de combustion : haute pression (16 atm) et vitesse de gaz élevée (850 m/s). La maîtrise de la sollicitation thermique peut cependant être compliquée (maîtrise des gradients thermiques).

Tous ces moyens ont déjà permis le développement de matériaux actuellement utilisés mais mettent en avant un point bloquant de la caractérisation : la représentativité des essais se fait généralement au détriment du niveau de compréhension de l'essai.

En effet, la compréhension des essais hautement représentatifs est réduite par la maîtrise des conditions aux limites et/ou par la difficulté de la mise en place d'une instrumentation suffisante. À l'inverse, les essais de caractérisation élémentaires dont le suivi est plus simple ne sont pas toujours pertinents par rapport à une application donnée et ne permettent pas la montée en maturité d'une technologie. Pour répondre à ces problématiques, l'ONERA a récemment développé le banc SIMBA.

2. Le banc SIMBA

Le banc SIMBA (cf. Fig. 2) est un banc d'essai thermique et mécanique sous atmosphère contrôlée. Pour cela, le banc est équipé d'un laser CO₂ de 3kW permettant de réaliser une chauffe avec gradients thermiques, d'une machine de traction électromécanique de 20 kN et d'une enceinte permettant de maîtriser le milieu lors de l'essai (vide, azote, argon, vapeur d'eau). Ces sollicitations couplées doivent ainsi permettre de se rapprocher de l'environnement moteur en zone chaude.

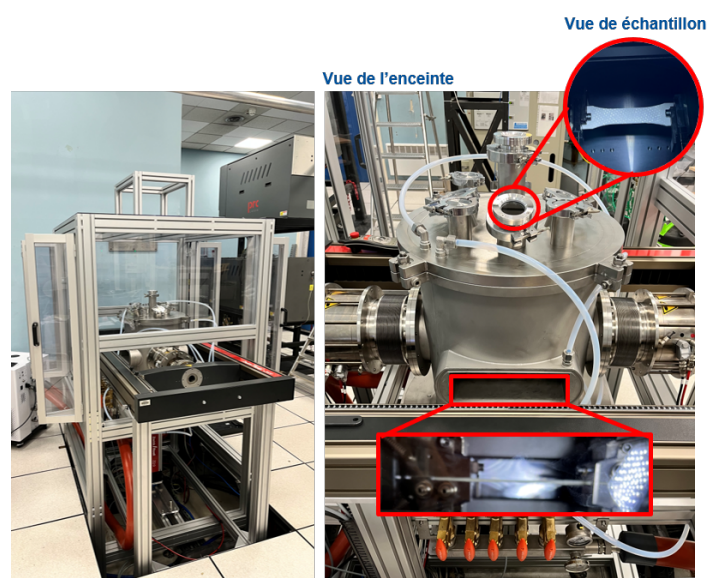


FIG. 2. – Banc d'essai SIMBA multi-instrumenté

L'utilisation d'un laser permet une bonne maîtrise de la sollicitation thermique, notamment grâce à un accès direct de la zone chauffée, ce qui peut faire défaut avec une flamme. Aussi, les mors de la machine de traction peuvent être refroidis grâce à un fluide calo-porteur permettant une maîtrise de leur température pendant la chauffe. Des thermocouples seront apposés afin de mesurer leur température.

En plus de permettre de réaliser des essais en environnement complexe, le banc SIMBA se distingue par la possibilité de réaliser un suivi renforcé des essais grâce à de la multi-instrumentation qui peut être mise en place. En effet, grâce aux nombreux hublots présents sur l'enceinte, un suivi optique (stéréo-corrélation, infra-rouge) peut être mis en place sur toutes les faces des éprouvettes. Il est également possible de suivre l'endommagement grâce à des capteurs acoustiques placés sur les échantillons.

3. Premier essai de validation

La prise en main du banc étant complexe, une montée en difficulté progressive des essais est nécessaire. Pour la première série d'essais, l'objectif est d'endommager le matériau (un CMC oxyde/oxyde) jusqu'à atteindre une rupture totale de l'éprouvette. Pour cela, il a été décidé de réaliser un essai thermomécanique en 3 étapes comme illustré sur la figure 3.

- Une première étape de pré-charge, pilotée en effort avec une amplitude inférieure à 100N. Elle a pour but de permettre un allongement libre de l'éprouvette lors de l'étape de chauffe.
- Une seconde étape de montée en température, à l'aide du laser et jusqu'à atteindre une température proche de 1000°C. Une stabilisation du déplacement pourra être une condition de passage à l'étape suivante de chargement mécanique.
- Une troisième étape de traction incrémentale (+1 kN) avec un maintien de charge court jusqu'à rupture de l'éprouvette.

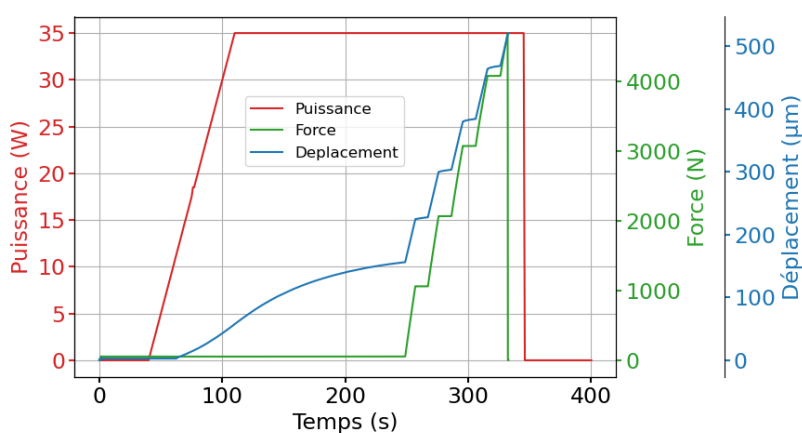


FIG. 3. – Présentation du premier essai

Il est intéressant de noter ici que la rupture a lieu dans la zone utile de l'éprouvette (cf. Fig. 4) ce qui renforce notre confiance sur le bon déroulement de l'essai. En revanche, la contrainte à rupture calculée pour la rupture de l'éprouvette est inférieure à la contrainte de rupture atteinte lors d'essais avec chauffage en four et donc sans gradient thermique.

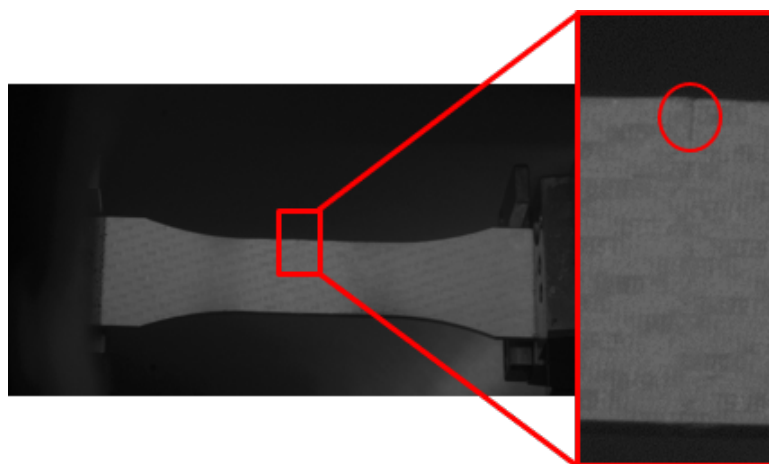


FIG. 4. – Localisation de la fissure à l'origine de la rupture de l'éprouvette

Par rapport à l'instrumentation mise en place, la figure 5 permet de faire une comparaison des champs thermique pendant le palier précédent (cf. Fig. 5a) et juste avant rupture (cf. Fig. 5b) qui permet d'identifier une surchauffe locale sous le faisceau laser. Ce résultat est caractéristique d'un délaminage à cœur du matériau [7] qui induit une résistance thermique plus élevée et donc une élévation de température en surface.

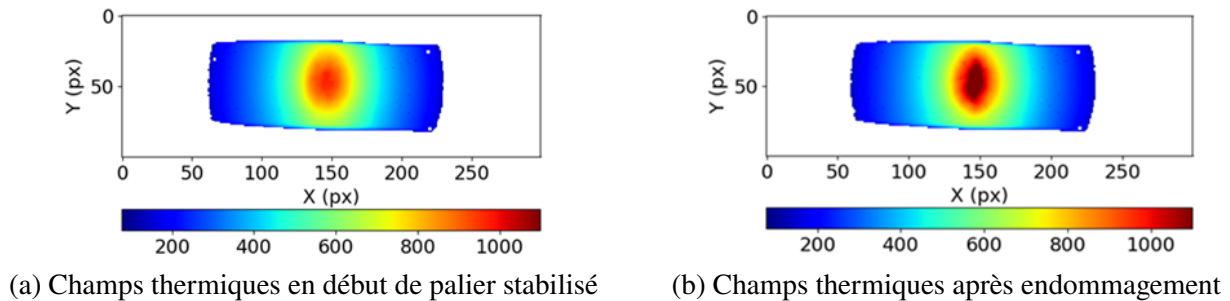


FIG. 5. – Champs thermiques au cours de l'essai

Il semblerait donc que pour cet essai que l'endommagement commence sous forme d'un délaminage à cœur avant qu'une rupture nette dans la zone utile apparaisse. Des observations post-mortem complémentaires sont en cours pour tenter de confirmer ce scénario.

4. Dimensionnement des prochains essais par simulations éléments finis

À la suite de ce premier essai, un travail de calculs numériques est réalisé via des simulations par éléments finis sur *Abaqus*. La suite des essais étant réalisée sur un CMC SiC/SiC, ces simulations ont pour but d'une part d'estimer les chargements nécessaire pour endommager le matériau et d'autre part d'anticiper les zones d'endommagement préférentielles.

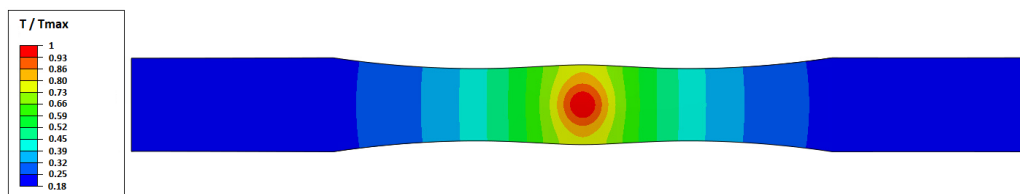


FIG. 6. – Champ de température obtenu par simulation d'un laser gaussien

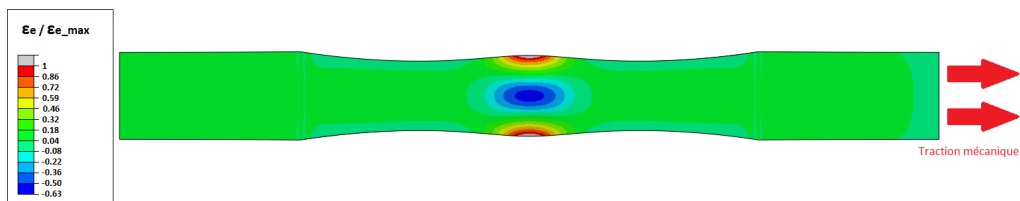


FIG. 7. – Déformation élastique normalisée de l'éprouvette

Pour cette simulation, il a été décidé de réaliser un modèle thermo-élastique pur. Ainsi, seule l'apparition de l'endommagement peut être déterminée. Dans la suite de l'étude, un modèle d'endommagement (ODM pour ONERA Damage Model) sera introduit de manière à pouvoir suivre l'évolution de l'endommagement au cours de l'essai.

Ici, le modèle nous permet d'identifier les zones d'endommagement préférentielles comme étant celles sur les bords de l'éprouvette les plus proches du point d'application du laser. A noter que le gradient thermique induit par le laser entraîne une dissymétrie des contraintes (la flexion induite provoque des contraintes de traction sur la face supérieure et de compression sur la face inférieure) et donc une dissymétrie de l'endommagement. L'endommagement apparaît donc dans un premier temps au niveau de la face supérieure, il sera donc nécessaire d'instrumenter en priorité cette face lors de la prochaine série d'essais.

5. Conclusion

Ce premier essai a permis de mettre en évidence l'intérêt du banc et de valider ses différents composants qui étaient pour la première fois utilisés ensemble. La maîtrise des conditions d'essais obtenue semble satisfaisante pour aller vers une modélisation avancée du comportement sous chargement complexe.

Notons que les résultats présentés seront à confirmer sur un plus grand nombre d'essais pour vérifier la répétabilité. Néanmoins, les contraintes à rupture obtenues lors des deux essais sont très proches mais surtout nettement inférieures à des résultats obtenus sur un matériau similaire [8] lors d'essai de traction en four. De plus, le mécanisme obtenu lors de ces essais où un délaminage semble s'initier à cœur du matériau, sous la tâche laser, a déjà été observé dans la littérature [9] lors d'essais sous chauffage laser sur des CMC SiC/SiC.

Enfin, la pertinence du modèle de modélisation par éléments finis choisi doit être vérifié lors d'une prochaine série d'essais et dans tous les cas sera amélioré par l'ajout du modèle d'endommagement ODM [10].

Remerciements

Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme ATLAAS, cofinancé par la DGAC, SAFRAN et l'ONERA.

Références

- [1] J. Dever, M. Nathal, J. DiCarlo « Research on High-Temperature Aerospace Materials at NASA Glenn Research Center », *Journal of Aerospace Engineering* Vol. 26, pp. 500–514, 2013.
- [2] G. N. Morscher, M. P. A. and D. Zhu « Mechanical properties and real-time damage evaluations of environmental barrier coated SiC/SiC CMCs subjected to tensile loading under thermal gradients », *Surf. Coat. Technol.* Vol. 284, pp. 318-326, 2015.
- [3] B. Legin, J. Cormier, F. Mauget, Y. Pannier, J. Grandidier, T. Reve « Mécanismes de dégradation du système CMC/EBC sous sollicitation thermomécanique complexe », 2019.
- [4] IRT-Saint-Exupéry « Fin du projet CMC en service autour du développement d'un banc d'essai pour des tests de matériaux composite à matrice céramique », 2022.
- [5] B. T. Richards, K. A. Young, F. de Francqueville, S. Sehr, M. R. Begley, H. N. G. Wadley « Response of ytterbium disilicate–silicon environmental barrier coatings to thermal cycling in water vapor », *Acta Materialia* Vol. 106, pp. 1–14, 2016.
- [6] M. Berny, T. Archer, P. Beauchêne, A. Mavel, F. Hild « Displacement Uncertainty Quantifications in T3-Stereocorrelation », *Experimental Mechanics*, Vol. 61, pp. 771–790, 2021.
- [7] L. Lebel « Fissuration d'un composite à matrice céramique dans une application de pièce statique de turbine à gaz », Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal, 2016.
- [8] A. Débarre « Comportement mécanique à haute température d'un composite alumine/alumine », Ph.D. thesis, thèse de doctorat dirigée par Boussuge, Michel Sciences et génie des matériaux Université Paris sciences et lettres 2021, 2021.
- [9] T. W. et al. « Thermal-mechanical behavior of a SiC/SiC CMC subjected to laser heating », *Compos. Struct.* Vol. 210, pp. 179–188, 2019.
- [10] F. Laurin, N. Tableau, M. Kaminski, Z. Aboura, F. Bouillon « Validation of the ONERA Damage Model through comparisons with multi-instrumented structural tests on interlock woven ceramic matrix composites », 2014.