



HAL
open science

Mesure de longueur de fissure d'interface en température entre une barrière environnementale et un substrat composite à matrice céramique

Pierre Bertrand, Cédric Huchette, Thibaut Archer, Thomas Vandellos,
François Hild

► To cite this version:

Pierre Bertrand, Cédric Huchette, Thibaut Archer, Thomas Vandellos, François Hild. Mesure de longueur de fissure d'interface en température entre une barrière environnementale et un substrat composite à matrice céramique. JNC23: Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606801

HAL Id: hal-04606801

<https://hal.science/hal-04606801>

Submitted on 10 Jun 2024

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.

Mesure de longueur de fissure d'interface en température entre une barrière environnementale et un substrat composite à matrice céramique

Interfacial crack length measurement at high temperature between environmental barrier coating and ceramic matrix composite

Pierre BERTRAND^{1,2,3}, Cédric HUCHETTE², Thibaut ARCHER², Thomas VANDELLOS¹, François HILD³

1 : Safran Ceramics
Rue de Touban, 33185 Le Haillan
e-mail : thomas.vandellos@safrangroup.com

2 : DMAS, ONERA, Université Paris Saclay
29 Av. de la Division Leclerc, 92320 Châtillon
e-mail : pierre.bertrand@onera.fr cedric.huchette@onera.fr thibaut.archer@onera.fr

3 : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay
4 Av. des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette
e-mail : Francois.HILD@ens-paris-saclay.fr

Résumé

Les travaux présentés concernent l'étude d'un Composite à Matrice Céramique (CMC) destiné aux parties chaudes des moteurs d'avion. Ces matériaux ne pouvant être utilisés seuls en environnement moteur, la présence d'un revêtement faisant office de barrière environnementale [1] est indispensable. Les phénomènes d'écaillage du revêtement sont critiques puisque le CMC se retrouve exposé à l'environnement moteur, ce qui réduit considérablement sa durée de vie. L'objectif de ces travaux est d'accroître la compréhension des phénomènes de fissuration au niveau de l'interface CMC/EBC afin de prédire la durée de vie du système. Pour cela un essai de flexion 4 points sans pré-fissure est réalisé. Il permet de faire amorcer une fissure dans le revêtement puis de la faire bifurquer et propager le long de l'interface. Ces essais ont été réalisés à température ambiante ainsi qu'à 1 050°C. L'instrumentation des essais avec des caméras en lumière visible a permis l'exploitation des essais à température ambiante grâce à la corrélation d'images et la mise en place d'un dialogue essais/calculs. Cette analyse permet de localiser les fissures présentes dans le système, d'identifier la longueur de fissure et de calculer le taux de restitution d'énergie critique au cours du chargement.

Abstract

The present work concerns the study of a Ceramic Matrix Composite (CMC) intended to be used in hot sections of aircraft engines. As these materials cannot be used alone in engine environments, the presence of a coating acting as an environmental barrier [1] is essential. Coating spallation is critical since the CMC would be exposed to engine environment, which considerably reduces its lifetime. The objective of this work is therefore to increase the understanding of cracking at CMC/EBC interfaces in order to predict the lifetime of the system. Four-point flexural tests with no precrack were conducted. They enable cracks to be initiated through the coating, then delamination and propagation along the interface. These tests were carried out at room temperature and 1 050°C. The instrumentation of the tests with visible light cameras allowed for the analysis of the tests at room temperature thanks to digital image correlation as well as comparisons between experimental and numerical results to locate crack tips and to calculate the interface toughness the loading.

Mots Clés : Composite à matrice céramique, barrière environnementale, énergie d'adhérence, corrélation d'images numériques, dialogue essais/calculs

Keywords : Ceramic matrix composite, environmental barrier coating, adhesion energy, digital image correlation, test/computation dialogue

1 Introduction

Les composites à matrice céramique (CMC) sont considérés par les motoristes aéronautiques comme une option intéressante pour être utilisée dans les parties chaudes des nouvelles générations de moteur. En effet, leurs propriétés mécaniques à haute température et leur faible densité permettent de rendre les moteurs plus performants et de réduire l'impact environnemental du transport aérien. Pour ces applications, des CMC à base de carbure de silicium (SiC/SiC) sont utilisés en raison de leur

stabilité jusqu'à 1 300°C [1]. Cependant, ces matériaux sont vulnérables à la présence de vapeur d'eau qui conduit à la récession du SiC [2]. C'est pourquoi, un revêtement jouant le rôle de barrière environnementale (EBC pour *Environmental Barrier Coating*) est déposé par projection thermique sur le substrat en CMC [3]. Dans cette étude, le système illustré en Fig. 1 est constitué d'un revêtement épais en disilicate d'yttrium (DSY), d'une sous-couche d'accroche en silicium (Si) qui assure la liaison entre le CMC et l'EBC et d'une couche d'oxyde (SiO₂) entre le silicium et l'EBC se formant lors de la projection du revêtement. Nous nous concentrons sur la caractérisation de l'adhésion entre le substrat et l'EBC afin de prévenir des phénomènes d'écaillage qui se traduisent par la perte d'une partie du revêtement. Il s'agit d'un phénomène critique qui réduit la durée de vie des pièces. Dans la littérature, de nombreux travaux ont déjà été effectués sur la caractérisation de l'adhésion sur des systèmes en alliages métalliques revêtus d'une barrière thermique[3][4]. Sur la base de ces travaux, l'essai de flexion 4 points avec rainure et une contre plaque collée sur le revêtement semble être une option intéressante pour caractériser le taux de restitution d'énergie critique de l'interface d'un système CMC/EBC [5]. Cependant, l'utilisation d'une contre plaque collée sur le revêtement devient difficilement applicable dans le cas où l'essai est réalisé à haute température du fait de l'activation possible du fluage du matériau métallique utilisé et de la capacité de la colle à résister à ces niveaux de température. De plus, dans le but d'étudier la propagation d'une fissure à l'interface avec cet essai, la contre-plaque voire la barrière thermique, doivent être préalablement rainurées et requiert une bonne maîtrise de l'usinage de cette rainure (en particulier de sa profondeur). Enfin la propagation de la fissure à l'interface apparaît instable avec un nombre de propagation de la fissure limité. Afin de contourner ces difficultés, un test de flexion 4 points a été mis en place sur un système CMC/EBC sans contre plaque métallique. Il présente l'intérêt (i) d'être réalisable à chaud dans un four et (ii) de favoriser, dans un premier temps, l'amorçage d'une fissure dans le revêtement qui bifurque ensuite à l'interface puis se propage le long de l'interface d'intérêt.

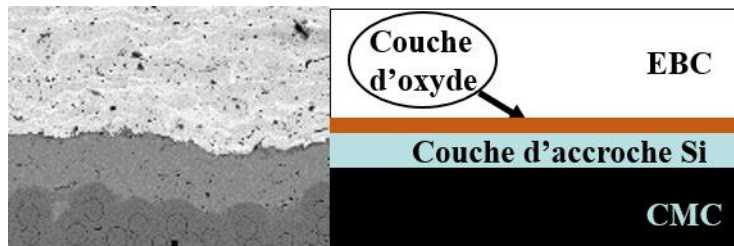


Fig. 1. Système CMC/EBC étudié

Le paragraphe 2 décrit le montage et l'instrumentation utilisée. Cet essai multi instrumenté est réalisé à température ambiante dans un premier temps pour valider l'approche et la comparer à des données existantes [5]. Afin de localiser la position de la pointe de fissure dans le système et de suivre sa propagation au niveau de l'interface, les essais sont analysés grâce à la mesure de champs cinématiques par corrélation d'images numériques (CIN). Par la suite, la mise en place d'un dialogue essais/calculs permet de déterminer le taux de restitution d'énergie critique (G_c) de l'interface au cours de l'essai. Cette procédure d'analyse d'essai est décrite plus en détail dans le paragraphe 3. Elle est ensuite validée en comparant les courbes force/déplacement obtenues expérimentalement et numériquement (paragraphe 4). Enfin, l'utilisation de cet essai et de sa méthode d'analyse a été mise en œuvre à haute température avec un essai à 1 050°C. Les résultats obtenus sont discutés dans le paragraphe 5. Dans ces travaux, l'échelle de caractérisation des propriétés de fissuration de l'interface est macroscopique. Ainsi, tous les mécanismes d'endommagement présents à une échelle inférieure (rugosité des interfaces, bifurcation de la fissure) ne sont pas considérés séparément mais uniquement dans un formalisme global qui consiste à considérer une seule fissure à l'interface qui prend en compte tous les phénomènes observés à l'échelle de la rugosité sans les modéliser de manière explicite.

2 Moyens expérimentaux et instrumentation

Des essais de flexion 4 points sont réalisés sur le système CMC revêtu sans pré-fissure. Notons que le revêtement est positionné du côté des rouleaux extérieurs. Ces essais sont pilotés en déplacement avec une vitesse de chargement de 0.25 mm/min . Deux caméras permettent d’observer la tranche de l’éprouvette recouverte d’un mouchetis de peinture. Des mires tridimensionnelles en forme d’escalier sont positionnées sur l’éprouvette afin de faciliter l’étalonnage des caméras de [6] (Fig 2).

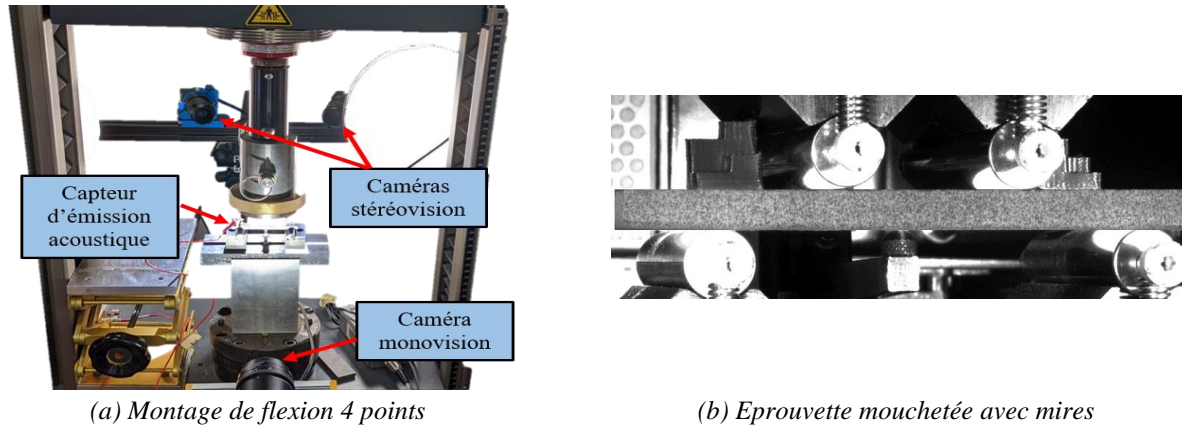


Fig. 2. Montage de l’essai de flexion 4 points à température ambiante avec l’instrumentation associée

La réponse macroscopique sur la courbe force-déplacement (Fig. 3a) illustre les différentes phases observées au cours du chargement :

- dans un premier temps, une phase de chargement élastique linéaire est observée correspondant à la mise en charge de l’éprouvette bilame,
- ensuite une chute d’effort apparaît. Cette dernière est liée à la fissuration transverse du revêtement sous l’effet de la flexion. En effet, une fissure s’amorce en surface du revêtement et se propage dans l’épaisseur de ce dernier jusqu’à bifurquer à l’interface CMC/EBC,
- enfin une dernière phase non-linéaire apparaît. Elle correspond à la propagation de deux fissures le long de l’interface, de part et d’autres de la fissure initiale.

Des premiers calculs de corrélation d’images globale [7] permettent de localiser la fissure à l’interface marquée par une discontinuité du champs de déplacement comme illustré sur la Fig. 3b à l’aide des résidus de corrélation.

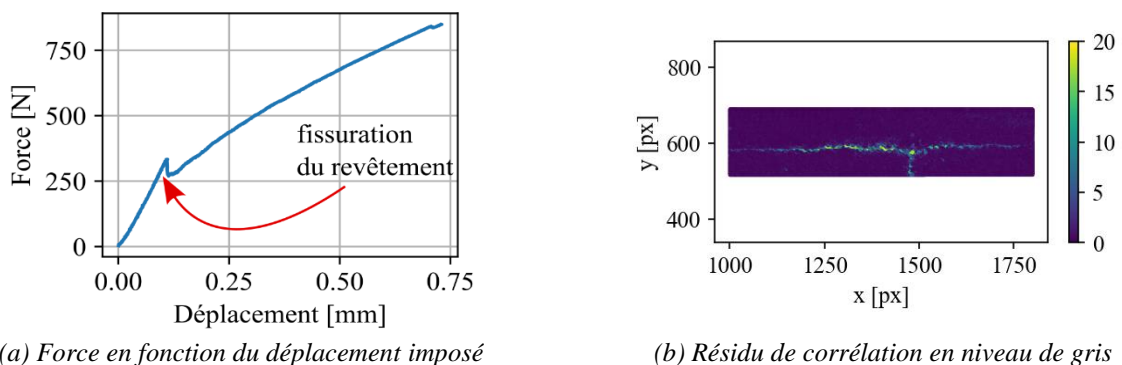


Fig. 3. Réponse macroscopique et champ de résidu mettant en évidence la présence de fissures dans le revêtement et à l’interface

3 Caractérisation de la propagation d'une fissure à l'interface par dialogue essai/calcul

3.1 Identification de la longueur de fissure

Les méthodes d'estimation de longueur de fissure au sens géométrique reposent sur des mesures d'écart de déplacement et sur une valeur seuil [8]. Or, dans le cadre de cette étude, l'approche macroscopique se concentre sur les effets mécaniques de la présence d'une fissure sur les champs cinématiques alentours et c'est pourquoi une approche de type FEMU (*Finite Element Model Updating*) [9] est ici proposée. En effet, elle repose sur l'influence de la présence d'une fissure sur les champs cinématiques estimés à l'aide d'un calcul éléments finis pour lequel les conditions aux limites proviennent de mesures expérimentales. La minimisation de l'écart entre les champs de déplacement obtenus pour différentes longueurs de fissure et ceux issus de la CIN permet d'identifier une longueur de fissure optimale pour chacune des images enregistrées durant l'essai. La fonction coût φ à minimiser s'écrit sous la forme :

$$\varphi^2 = \sum_{i=1}^N (U_{Xi_{calc}} - U_{Xi_{exp}})^2 + (U_{Zi_{calc}} - U_{Zi_{exp}})^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

où U_X et U_Z correspondent respectivement aux composantes horizontales et verticales des déplacements nodaux. La méthode d'identification de la longueur de fissure est réalisée en plusieurs étapes comme illustré sur la Fig. 4 pour un niveau de chargement et est ensuite répétée sur toutes les images acquises durant l'essai. Dans un premier temps, un modèle local est construit autour de la fissure. Les conditions aux limites sont appliquées par des déplacements issus de la CIN grâce à une approche de zoom structural [10] tandis que la fissure de longueur initiale L_0 est insérée dans le maillage par dédoublement de nœuds. À partir de ce modèle, la fonction coût (Eq. 1) est évaluée puis un nouveau calcul est effectué avec une variation Δl de la longueur de fissure. La longueur de fissure identifiée pour un niveau de chargement donné (*i.e.*, pour une image) correspond à la valeur pour laquelle φ atteint un minimum.

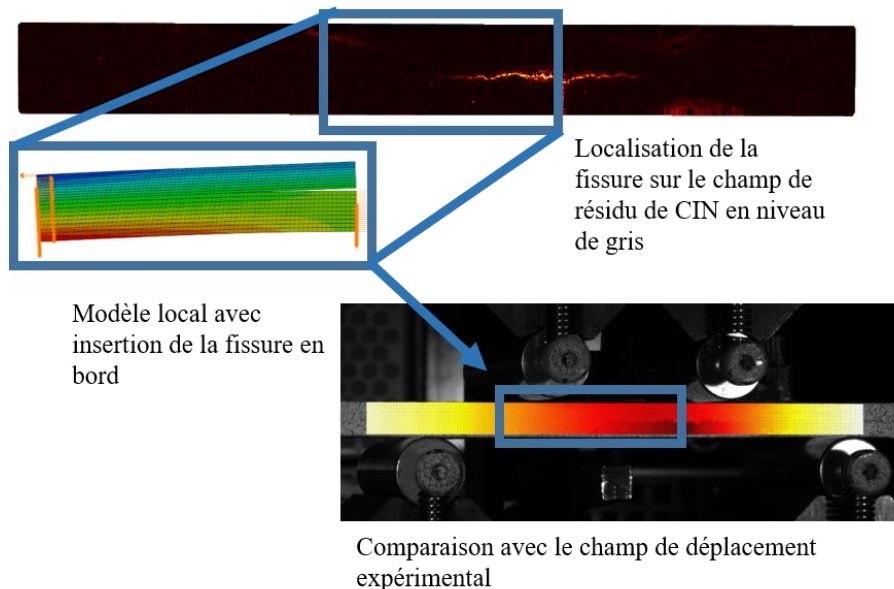


Fig. 4. Boucle de dialogue essai/calcul permettant l'identification de la longueur de fissure

3.2 Calcul du taux de restitution d'énergie critique

La longueur de fissure identifiée est utilisée pour calculer le taux de restitution d'énergie G au sens de Griffith [11]. Si la fissure se propage de manière stable, cette valeur correspond au taux de restitution d'énergie critique qui est une propriété intrinsèque de l'interface. Une analyse menée sur

la variation de G par rapport à la variation de la longueur fissurée a montré que cette valeur était négative ce qui prouve que la propagation est stable. L'essai de flexion 4 points sans pré-fissure sur bi-matériau n'est pas un essai normalisé pour l'analyse de la propagation d'une fissure à l'interface et une méthode de caractérisation normalisée n'est donc pas disponible. Des modèles analytiques existent pour ce type d'essai mais les hypothèses associées sont trop fortes par rapport à l'essai réalisé dans cette étude [12] notamment vis-à-vis de la position de la fissure dans l'EBC ou de son évolution considérée comme symétrique. Une méthode numérique basée sur une intégrale de contour [13] est donc retenue pour l'estimation de G_c . Le calcul est effectué sur 10 contours entourant la position de la pointe de fissure identifiée précédemment afin de converger sur la valeur de G_c . Les conditions aux limites sont appliquées à partir des déplacements issus de la CIN sur le modèle local présenté en Fig 3. L'évolution de G_c en fonction de la longueur de fissure sur deux essais est tracée sur la Fig. 5.

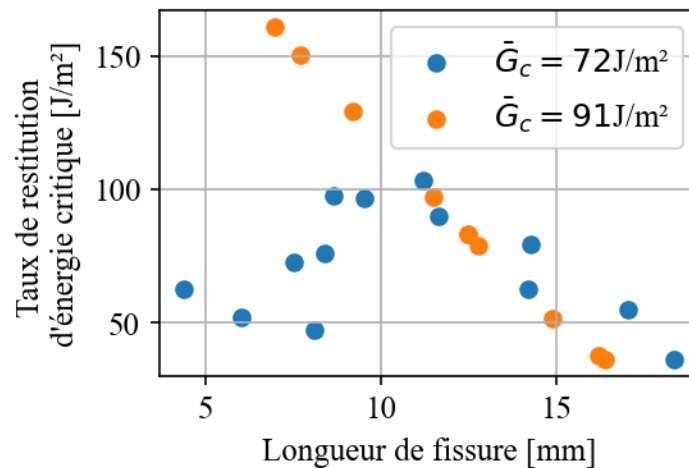


Fig. 5. Evolution du taux de restitution d'énergie critique en fonction de la longueur de fissure

On observe que le taux de restitution d'énergie critique n'est pas constant durant la propagation de la fissure. Pour expliquer ce résultat, des analyses *post-mortem* ont été menées et ont montré que la fissure d'interface n'est pas localisée à une interface préférentielle (par exemple à l'interface CMC/Si) mais qu'elle bifurque et branche dans les différents constituants. De plus, il serait intéressant de calculer la mixité de mode qui peut changer durant la propagation au cours du chargement de flexion 4 points ce qui peut avoir un impact sur la valeur de G_c . Toutefois, dans le cadre d'une analyse macroscopique décrite précédemment, une valeur moyenne du taux de restitution d'énergie critique de 82 J/m^2 est cohérente avec des travaux déjà menés sur ces systèmes [5].

4 Validation de la méthode d'identification de la longueur de fissure

La méthode d'identification de la longueur de fissure présentée dans le paragraphe 3.1 est validée en comparant la force mesurée par la cellule de force de la machine avec la résultante calculée par éléments finis du système CMC revêtu sous un chargement de flexion 4 points. Le calcul est effectué sur un maillage en deux dimensions avec une hypothèse de déformation plane en modélisant l'ensemble de l'éprouvette. Les conditions aux limites sont appliquées à partir des déplacements issus de la CIN au niveau des nœuds correspondants aux 4 points d'appuis. Deux fissures sont insérées dans le maillage par dédoublement de nœuds (*i*) dans le revêtement et (*ii*) à l'interface, vers la gauche et vers la droite à partir de la bifurcation. Les longueurs de fissures horizontales à droite et à gauche sont mises à jour pour chaque cas de chargement (*i.e.* pour chaque image) avec les valeurs identifiées dans le paragraphe 3.1. Les forces de réaction simulées et expérimentales sont comparées en Fig. 6.

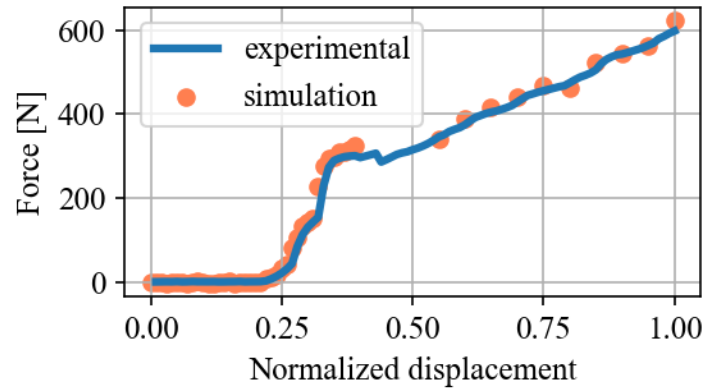
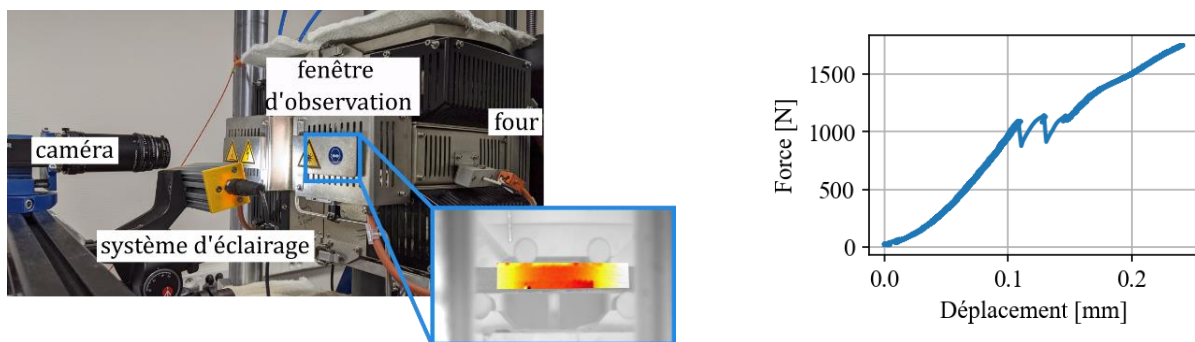


Fig. 6. Comparaison de la réponse force/déplacement entre les essais et la simulation

La bonne corrélation observée entre l'essai et les calculs permet de valider la stratégie de modélisation macroscopique de la fissuration de l'interface ainsi que la méthode d'identification de la longueur de fissure. De plus, ce résultat montre que le choix d'une modélisation 2D semble suffisante pour décrire les effets de la fissuration sur la réponse macroscopique.

5 Description de l'essai de flexion 4 points réalisé à haute température

A la suite de ces analyses à température ambiante, un essai de flexion 4 points est réalisé en four à $1\ 050^{\circ}\text{C}$. L'essai est instrumenté avec une caméra positionnée à l'extérieur du four et sur laquelle un filtre infrarouge est ajouté afin d'observer la tranche de l'éprouvette. Une peinture haute température est utilisée afin de réaliser un mouchetis pour permettre ensuite l'exploitation par CIN. Le montage et l'instrumentation associée est illustré en Fig. 7a. Dans un premier temps, l'éprouvette est positionnée dans le four et maintenue avec une pré-charge de 20 N. Dans un second temps, une rampe de montée en température de $300^{\circ}\text{C}/h$ est imposée en maintenant la pré-charge. Une fois la température de $1\ 050^{\circ}\text{C}$ atteinte, le système est maintenu à cette température pendant 20 min afin d'homogénéiser les conditions de chargement thermique. Enfin, un chargement mécanique est appliqué par un asservissement en force avec une rampe de $200\ \text{N}/\text{min}$. Les résultats de cet essai montrent un comportement similaire à celui observé à température ambiante. Sur la courbe force/déplacement en Fig. 7b, deux chutes de forces sont observées, chutes qui sont la conséquence de l'apparition de deux fissures transverses dans l'EBC atteignant l'interface. Ces observations sont confirmées par les champs de déplacement issus de la CIN sur lesquels des discontinuités sont présentes dans les zones les plus sollicitées en flexion. De plus, la CIN a permis d'observer une bifurcation à l'interface d'une des deux fissures et sa propagation. Cet essai semble donc adapté pour faire propager une fissure à l'interface du système CMC revêtu à haute température. En revanche, la méthode mise en place dans le paragraphe 4, n'a pas pu être achevée en raison d'un écaillage de la peinture durant la phase de chargement mécanique, rendant impossible l'identification d'une longueur de fissure. Ce point met en évidence l'importance de la qualité des données issues de la CIN en température où des problèmes expérimentaux comme les brumes de chaleurs, la tenue du mouchetis ou la non conservation des niveaux de gris peuvent apparaître.



(a) Montage et instrumentation de l'essai de flexion 4 points à haute température

(b) Courbe force/déplacement de l'essai réalisé à haute température

Fig.7. Illustration de la configuration de l'essai de flexion 4 points réalisé à haute température et de la courbe force/déplacement associée

6 Conclusions et perspectives

Ces travaux ont permis de caractériser le taux de restitution d'énergie critique en étudiant la phase de propagation d'une fissure à l'interface d'un système CMC/EBC lors d'essais de flexion 4 points. Ce type d'essai présente l'avantage d'être réalisable à haute température et demande une préparation moins contraignante que des essais de caractérisation d'adhésion sur des systèmes similaires [4], [5]. En effet, la présence d'une contre plaque ou d'une entaille avant d'appliquer le chargement n'est plus requise. La CIN permet l'exploitation des essais et la mise en place d'un dialogue essai/calcul pertinent pour notre application. A l'aide d'une FEMU dont les conditions aux limites sont issues des mesures cinématiques, les longueurs de fissures mesurées assurent un effet mécanique comparable sur le champ de déplacement simulé à celui mesuré expérimentalement. Le taux de restitution d'énergie critique est alors déduit à l'aide d'une intégrale de contour et les valeurs obtenues sont cohérentes avec celles fournies dans la littérature sur des configurations d'essais différentes à température ambiante. Cette confrontation avec les données de la littérature conforte et valide la démarche proposée.

Sur la base des travaux à température ambiante, un essai similaire a pu être réalisé à haute température avec des mécanismes de fissuration similaires, ce qui nous permet de valider le protocole d'essais. Ainsi, une fissure est créée dans l'EBC puis elle bifurque et se propage le long de l'interface. En revanche, cet essai n'a pas pu être exploité de la même manière que les essais à température ambiante. En effet, l'instrumentation n'a pas permis de mesurer les déplacements par CIN sur toute la zone d'intérêt en raison d'un écaillage précoce de la peinture. La suite des travaux consistera à étendre la démarche de caractérisation mise en place à température ambiante sur des essais à chaud.

Remerciements

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet ATLAAS, projet de recherche français cofinancé par la DGAC, l'ONERA et le groupe SAFRAN.

Références

- [1] J. DiCarlo, H. Yun, G. Morscher, et R. Bhatt, « SiC/SiC Composites for 1200°C and above », *Handbook of Ceramic Composites*, déc. 2004.
- [2] K. L. More, P. F. Tortorelli, L. R. Walker, N. Miriyala, J. R. Price, et M. van Roode, « High-Temperature Stability of SiC-Based Composites in High-Water-Vapor-Pressure Environments », *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 86, n° 8, p. 1272-1281, 2003.
- [3] J. G. Thakare, C. Pandey, M. M. Mahapatra, et R. S. Mulik, « Thermal Barrier Coatings—A State of the Art Review », *Met. Mater. Int.*, vol. 27, n° 7, p. 1947-1968, juill. 2021.

- [4] Thèse de doctorat J.-R. Vaunois, « Modélisation de la durée de vie des barrières thermiques, par le développement et l'exploitation d'essais d'adhérence », Université de Grenoble, 2006.
- [5] Thèse de doctorat M. Fernandez, « Mécanismes d'endommagement pilotant la durée de vie d'une barrière environnementale », Université de Bordeaux, 2020.
- [6] Thèse de doctorat M. Berny, « High-temperature tests for ceramic matrix composites: from full-field regularised measurements to thermomechanical parameter identification », Paris-Saclay, 2020.
- [7] F. Hild et S. Roux, « Comparison of Local and Global Approaches to Digital Image Correlation », *Exp Mech*, vol. 52, n° 9, p. 1503-1519, nov. 2012.
- [8] S. Feld-Payet, G. Le Besnerais, V. Bonnand, D. Pacou, et L. Thiercelin, « Crack path tracking from full field measurements: A novel empirical methodology », *Strain*, vol. 56, n° 2, p. e12333, 2020.
- [9] E. Pagnacco, A.-S. Caro-Bretelle, et P. Jenny, « Parameter Identification from Mechanical Field Measurements using Finite Element Model Updating Strategies », in *Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2013, p. 247-274.
- [10] C. Obbink-Huizer, « Use submodeling in Abaqus to focus on region of larger model ». <https://info.simuleon.com/blog/using-submodeling-in-abaqus-to-focus-on-a-region-of-interest-in-a-larger-model>.
- [11] A. Griffith, *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Royal Society of London, 1921.
- [12] P. G. Charalambides, J. Lund, A. G. Evans, et R. M. McMeeking, « A Test Specimen for Determining the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces », *Journal of Applied Mechanics*, vol. 56, n° 1, p. 77-82, mars 1989.
- [13] J. R. Rice, « A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks », *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, n° 2, p. 379-386, juin 1968.