



HAL
open science

Comportement en matage de composites à matrice céramique oxyde/oxyde

Marion Broutelle, Frederic Lachaud, Chloé Dupleix-Couderc, Alain Daidié

► **To cite this version:**

Marion Broutelle, Frederic Lachaud, Chloé Dupleix-Couderc, Alain Daidié. Comportement en matage de composites à matrice céramique oxyde/oxyde. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623684

HAL Id: hal-01623684

<https://hal.science/hal-01623684>

Submitted on 25 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.

Comportement en matage de composites à matrice céramique oxyde/oxyde

Bearing behavior of an oxide/oxide ceramic matrix composite

M. Broutelle^{1,2}, F. Lachaud², C. Duplex-Couderc¹, A. Daidié³

1 : IRT Saint-Exupéry
118 route de Narbonne – CS44248, 31432 Toulouse Cedex 4, France
e-mail : marion.broutelle@irt-saintexupery.com, chloe.duplex-couderc@irt-saintexupery.com

2 : Institut Clément Ader
UMR CNRS 5312, ISAE-SUPAERO, Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées
3 rue Caroline Aigle 31400 Toulouse Cedex 4, France
e-mail : frederic.lachaud@isae.fr

3 : Institut Clément Ader
UMR CNRS 5312, INSA de Toulouse, Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées
3 rue Caroline Aigle 31400 Toulouse Cedex 4, France
e-mail : alain.daidie@insa-toulouse.fr

Résumé

Le comportement mécanique des liaisons boulonnées en composite à matrice céramique oxyde/oxyde a été caractérisé à l'aide d'essais de matage et d'une modélisation numérique. Les endommagements observés lors de la campagne d'essais sont similaires à ceux se développant lors du matage des composites à matrice organiques : flambement des fibres, ruptures matricielles, délaminages et bandes de cisaillement. Des essais interrompus ont montré que ces différents endommagements sont présents dès le pic de matage. La simulation numérique permet de modéliser à l'échelle du pli la dégradation des propriétés mécaniques du matériau. Les lois d'endommagements ont été implémentées sous le logiciel Abaqus, les paramètres mécaniques nécessaires étant identifiés par des essais de caractérisation matériau. Les résultats de la simulation montrent une bonne corrélation avec les essais. En effet, la modélisation permet de retrouver les différentes phases du matage sur la courbe de comportement, et les cartographies d'endommagement sont cohérentes avec les observations expérimentales.

Abstract

The mechanical behavior of a bolted joint made of ceramic matrix composite has been characterized through bearing tests and a numerical modelling. The damage observed experimentally are similar to those usually seen in organic matrix composites: fiber buckling, matrix breakage, ply delamination and shear bands. Interrupted tests showed that the damage appeared before the bearing peak. The modelling of the material mechanical properties degradation is made at the ply scale. Damage constitutive laws have been implemented on Abaqus, and characterization trials were conducted in order to identify the necessary mechanical parameters. A good correlation between experimental trials and digital correlation has been found. Indeed, the digital behavior curve shows the same phases that the experimental ones, and digital damage cartographies are coherent with the experimental observations.

Mots Clés : Composite à matrice céramique, jonction boulonnée, mécanismes d'endommagement

Keywords: Ceramic matrix composite, bolted junction, damage mechanisms

1. Introduction

Les impératifs environnementaux et économiques actuels nécessitent l'introduction de nouveaux matériaux dans les structures aéronautiques. Les composites à matrice céramique (CMC) sont de bons candidats pour l'arrière corps des moteurs : en effet, ils permettent un gain de masse important tout en étant aussi voire plus résistants que les alliages métalliques utilisés jusqu'à présent. Pour des températures de l'ordre de 700°C, les CMC oxyde/oxyde présentent des avantages par rapport au CMC à base de carbure de silicium : leurs propriétés mécaniques ne sont pas dégradées par l'oxydation, leur fabrication est moins coûteuse et plus rapide [1]. La spécificité de ces matériaux repose sur leur matrice microporeuse. En effet, le taux de microporosité élevé de cette dernière permet de retarder l'arrivée des fissures au niveau des fibres et augmente donc la durée de vie du

matériau. Bien que les fibres et la matrice soient des constituants fragiles, on obtient alors un matériau présentant un caractère endommageable.

Dans ce contexte, l'Institut de Recherche Technologique Saint-Exupéry, en collaboration avec l'Institut Clément Ader, a débuté un projet de recherche sur les CMC oxyde/oxyde. Le but est de développer un matériau à la fois performant et peu onéreux, et d'étudier ses performances mécaniques, notamment en caractérisant les endommagements se développant dans les liaisons boulonnées en CMC oxyde/oxyde.

Cette étude porte en particulier sur le comportement en matage des CMC oxyde/oxyde. A notre connaissance, aucun résultat n'a été publié sur le matage des CMC oxyde/oxyde. La méthodologie établie s'est basée, en première approche, sur la littérature existante pour les composites à matrice organique. La rupture en matage est le mode privilégié de rupture des liaisons. Il s'agit d'une dégradation progressive au cours de laquelle le boulon vient écraser la paroi interne de l'alésage, et où le transfert de charge reste possible même après l'apparition des premiers endommagements. Les endommagements généralement relevés sont des micro-flambages des fibres, des délaminages ainsi que des bandes de cisaillement traversant l'épaisseur du matériau [2-3]. Des comparaisons entre des composites tissés et des composites unidirectionnels ont montré que les endommagements menaient à une chute d'efforts plus brutale pour les tissés au moment de la rupture en matage [4-5].

Cette étude repose à la fois sur une phase expérimentale et sur une étude numérique. Les essais de matage permettent de décrire les différents endommagements lors de cette sollicitation et ont pour but la mise en place d'un scénario d'endommagement. L'objectif de la simulation numérique est d'intégrer ces mécanismes dans une modélisation 3D de la jonction avec le logiciel Abaqus. Cette modélisation facilite l'analyse des essais et permet la prévision du comportement des liaisons boulonnées sur des cas non testés expérimentalement.

2. Matériau étudié

Le matériau étudié est un composite à matrice céramique oxyde/oxyde (CMC ox/ox) constitué de fibres longues en alumine (NextelTM 610) et d'une matrice en alumine. Il s'agit d'un composite tissé 2D avec une armure satin de 8. Ce matériau est élaboré par injection de la matrice à travers les plis de tissus fibreux. Un frittage partiel est ensuite réalisé afin d'obtenir la microporosité désirée. Il est alors nécessaire de contrôler le taux de microporosité ainsi que la taille et la répartition des micropores. Il faut noter que ce procédé d'élaboration génère des macropores ainsi que des fissures matricielles dans le matériau.

2.1 Comportement mécanique

Les CMC oxyde/oxyde présentent une bonne résistance à l'endommagement malgré le fait que leurs différents constituants (fibres et matrice) aient un comportement fragile. Ce caractère endommageable est rendu possible grâce au concept de matrice faible : le taux de microporosité élevé de la matrice a pour effet de favoriser la propagation des fissures dans ce milieu plutôt que dans les fibres. Ainsi, lors d'une sollicitation mécanique, les fissures initiées dans la matrice sont déviées à l'interface fibre/matrice, ce qui confère un caractère endommageable au matériau et permet d'augmenter sa durée de vie.

Le comportement d'un composite NextelTM610/alumine uniquement constitué de plis orientés à 0° est décrit dans [6]. Les courbes de comportement d'une traction cyclée à 0° et à 45° sont présentées en Fig. 1 et Fig. 2. Si les premiers endommagements qui apparaissent semblent être les microfissurations matricielles, la ruine du matériau en traction est causée par des délaminages intra-plis [6].

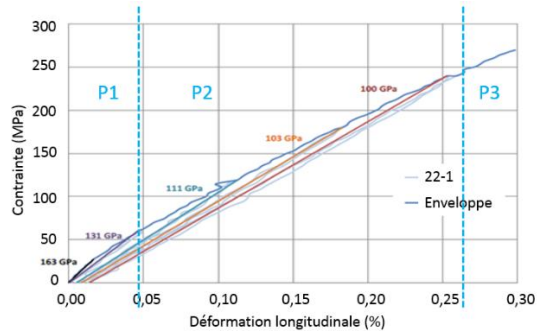


Fig. 1 : Traction cyclée à 0° [6]

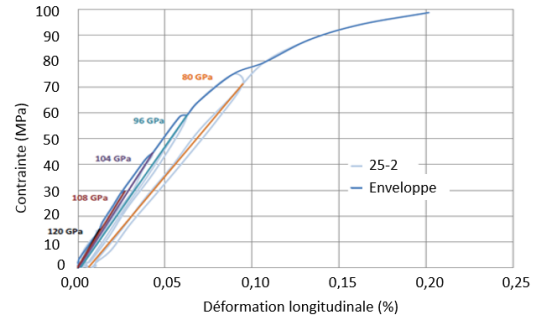


Fig. 2 : Traction cyclée à 45° [6]

Dans le sens des fibres, le comportement peut être délimité en trois phases : un domaine linéaire élastique relativement bref (P1), un deuxième domaine quasi-linéaire dans lequel se produisent les premiers endommagements (P2), et enfin une perte de cette quasi-linéarité annonçant la rupture du matériau (P3) [6]. A 45°, le comportement endommageable du matériau est encore plus marqué, ce qui s'explique par la prépondérance du rôle de la matrice dans cette configuration. On observe également un phénomène d'hystérésis ainsi que des déformations résiduelles [6].

Des essais de traction cyclée ont également été faits à l'Institut Clément Ader. Ils ont été réalisés sur une machine Instron 100 kN pilotée en déplacement, à une vitesse de chargement de 0.1 mm/min. Le matériau testé est également un CMC oxyde/oxyde Nextel™610/alumine, mais l'empilement est différent. Il s'agit d'un empilement [0/45/90/-45/0]_s, ce qui correspond à la configuration des éprouvettes de matage.

Cinq essais de traction ont été réalisés et la Fig. 3 montre l'une des courbes obtenues. La contrainte est obtenue grâce aux données du capteur d'effort de la machine tandis que les déformations sont relevées à partir d'une jauge de déformation.

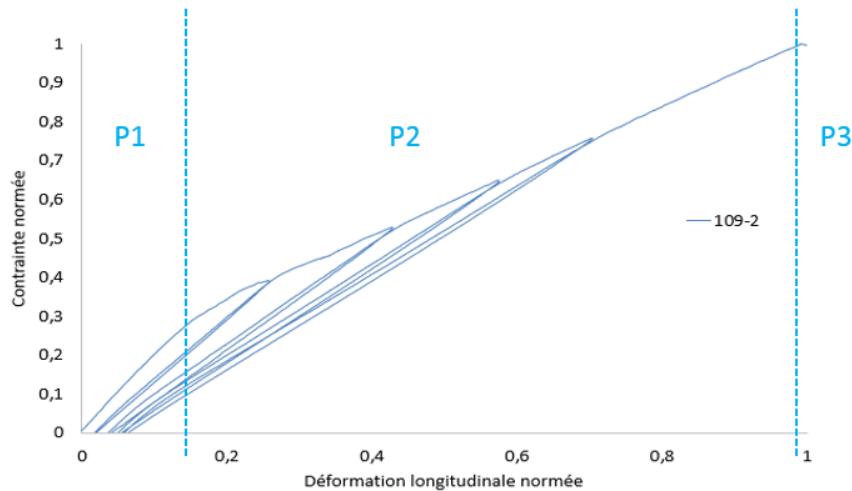


Fig. 3 : Traction cyclée à 0°, empilement [0/45/90/-45/0]_s

On retrouve comme dans [6] un comportement bilinéaire, avec un domaine élastique (P1) suivi d'un domaine endommageable (P2). On remarque une inflexion de la courbe juste avant la rupture, mais le domaine P3 semble plus réduit pour cet empilement que pour celui testé dans [6].

Les cycles réalisés permettent de visualiser les contraintes résiduelles et le phénomène d'hystérésis, probablement dû aux frottements entre les fibres et la matrice. On peut supposer que ce frottement n'est pas très important, car les boucles d'hystérésis ont une amplitude assez faible qui diminue au cours des cyclages.

2.2 Modèle d'endommagement du matériau

Des lois de comportement ont été créées puis implémentées dans le logiciel Abaqus, afin de modéliser le comportement mécanique du CMC oxyde/oxyde. Il s'agit d'une modélisation de

l'endommagement, à l'échelle du pli, adaptée des modèles développés par [4] et [7]. Ce modèle permet de décrire la dégradation du matériau au travers de plusieurs critères de ruine, chaque critère f_i étant associé à un type d'endommagement pouvant survenir dans le matériau :

- Endommagement en traction sens chaîne (Eq. 1)

$$f_1(\sigma, d) = \left(\frac{\langle \tilde{\sigma}_{11} \rangle}{\sigma_{11}^{RT}} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{12}^2 + \tilde{\sigma}_{13}^2}{(\sigma_{12}^R)^2} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

- Endommagement en traction sens trame (Eq. 2)

$$f_2(\sigma, d) = \left(\frac{\langle \tilde{\sigma}_{22} \rangle}{\sigma_{22}^{RT}} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{12}^2 + \tilde{\sigma}_{23}^2}{(\sigma_{12}^R)^2} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

- Endommagement en compression sens chaîne (Eq. 3)

$$f_3(\sigma, d) = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{11}}{\sigma_{11}^{RC} + \langle \tilde{\sigma}_{33} \rangle_- \tan(\eta)} \right)^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

- Endommagement en compression sens trame (Eq. 4)

$$f_4(\sigma, d) = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{22}}{\sigma_{22}^{RC} + \langle \tilde{\sigma}_{33} \rangle_- \tan(\eta)} \right)^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

- Endommagement en cisaillement plan (Eq. 5)

$$f_5(\sigma, d) = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{12}}{\sigma_{12}^{RS} + \langle \tilde{\sigma}_{33} \rangle_- \tan(\varphi)} \right)^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

- Endommagement en délaminage (Eq. 6)

$$f_6(\sigma, d) = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{33}}{\sigma_{33}^{RT}} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{13}}{\sigma_{13}^{RS} + \langle \tilde{\sigma}_{33} \rangle_- \tan(\varphi)} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{23}}{\sigma_{23}^{RS} + \langle \tilde{\sigma}_{33} \rangle_- \tan(\varphi)} \right)^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

Ces différents critères sont ensuite couplés via une matrice (Eq. 7-8) qui permet de calculer des variables d'endommagement d_i . On obtient alors une variable d'endommagement par direction de sollicitation. Elles ont pour effet d'abattre les propriétés élastiques du matériau et de simuler la dégradation progressive du pli du composite.

$$\phi_i = 1 - \exp \left(\frac{\langle 1 - f_i^{m_i} \rangle}{m_i} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 8})$$

Un effet visqueux est également ajouté dans le but d'éviter les effets de localisation et de supprimer la dépendance du modèle au maillage. Enfin, une pseudo-plasticité est intégrée au modèle afin de représenter le comportement du matériau lors d'une sollicitation en cisaillement. Le couplage plasticité/endommagement est réalisé en intégrant la contrainte effective dans la loi de plasticité. Les paramètres m_i (permettant de définir l'évolution des endommagements), $\tan \eta$ (confinement de la rupture en compression en présence d'un écrasement hors-plan) et $\tan \varphi$ (frottements après la décohésion fibre/matrice lors d'une compression transverse) sont obtenus par des corrélations essais/calculs.

3. Comportement en matage

3.1 Dispositif expérimental

Les essais de matage ont été réalisés à l'Institut Clément Ader sur une machine Instron 100 kN pilotée en déplacement, à une vitesse de chargement de 0.1 mm/min.

L'éprouvette trouée est en CMC oxyde/oxyde et l'action du boulon est représentée par un axe en acier ajusté de diamètre 6.35 mm.

Les essais de matage sont classiquement des essais de traction, le bas de l'éprouvette étant maintenu fixe tandis qu'un effort de traction est exercé sur l'axe. Cette méthode a pour inconvénient d'encombrer la zone en bord de trou et provoque une perte d'information (notamment pour une exploitation via la corrélation d'image). Dans le cadre de ces travaux, il a été décidé d'adapter le montage et de procéder à un essai en compression, ce qui permet une meilleure observation des cartographies de déplacement et de déformation (Fig. 4b). Dans cette configuration, l'axe est fixe et l'éprouvette est entraînée en compression. Une étude précédente [8] a validé la pertinence de ces essais en compression en montrant que les endommagements induits étaient similaires pour les deux configurations d'essais (traction et compression).

Les différents essais effectués (compression simple, compression cyclée et essais arrêtés) ont été instrumentés de jauges de déformation et suivis par de la corrélation d'image.

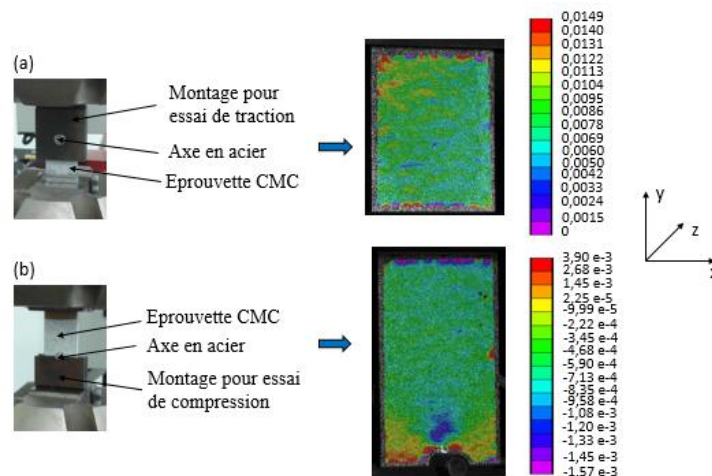


Fig. 4 : Montages d'essai et déformation ε_{yy} observée en corrélation d'image : (a) traction, (b) compression

3.2 Résultats expérimentaux

Le comportement global du matériau est présenté en Fig. 5. Les courbes ont été adimensionnées par rapport à la valeur de l'effort au pic de matage. Six essais de matage ont été réalisés. Les éprouvettes testées possèdent toutes la même géométrie et le même empilement.

Si on exclut la courbe 108-4, les valeurs caractéristiques sont répétables, que ce soit pour la raideur initiale (écart type de 4,6%) ou pour la contrainte au pic (écart type de 4,8%).

Les courbes de comportement observées lors des différents essais permettent de distinguer cinq phases successives en matage. Lors de la première phase, jusqu'à environ 60% de l'effort au pic, le matériau a un comportement linéaire élastique. Puis, la formation des premiers endommagements entraîne une perte de la linéarité ainsi qu'une diminution de la raideur. La contrainte maximale atteinte (contrainte pic de matage) est immédiatement suivie d'une chute brutale de l'effort, comportement typique des composites tissés lors d'une sollicitation en matage [4-5]. Comme pour les CMO, la rupture en matage n'est pas catastrophique, la dernière phase consistant en un palier au cours duquel le transfert d'effort reste possible.

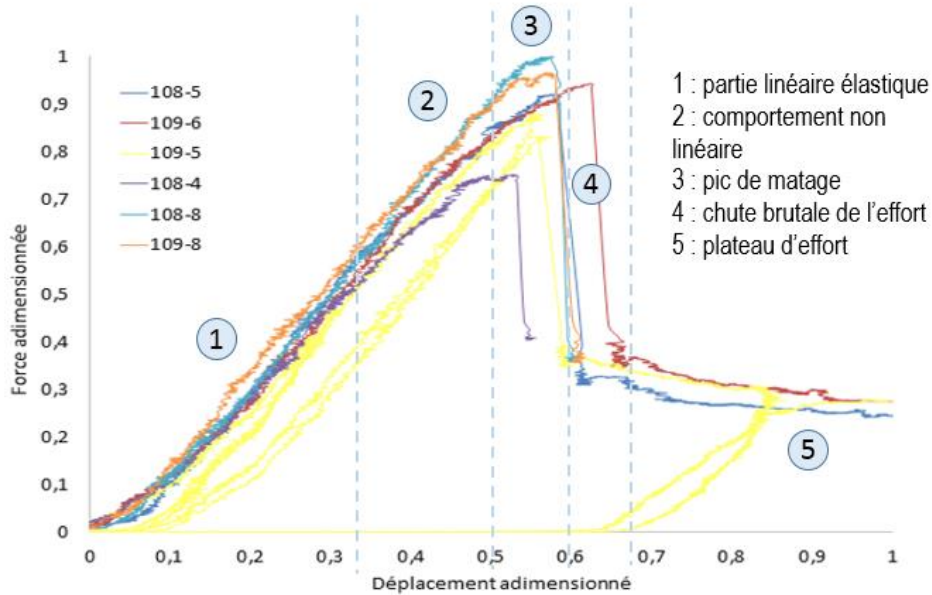


Fig. 5 : Courbes de comportement en matage

Les cartographies de corrélation d'image permettent de localiser les endommagements (Fig. 6). On remarque que la concentration des endommagements se produit tôt dans l'essai, dès l'approche du pic de matage. Les éprouvettes présentent alors deux zones distinctes : une zone sans endommagement et une zone endommagée située au-dessus du trou. Celle-ci a une étendue de l'ordre de grandeur du diamètre de l'alésage.

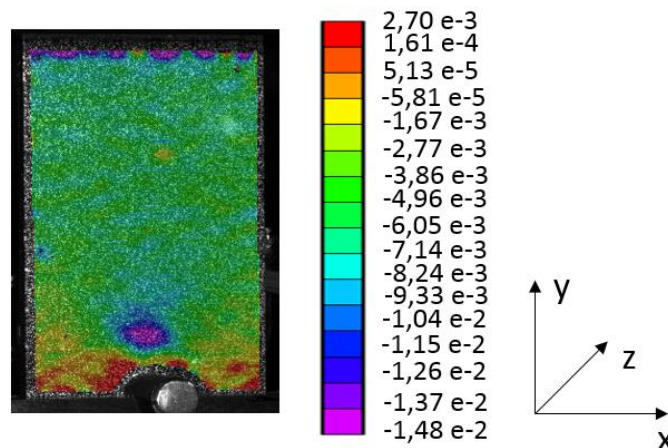


Fig.6 : Cartographie des déformations ϵ_{yy} après le pic de matage

Ces différents endommagements peuvent être décrits grâce à des observations post-mortem au MEB et en tomographie. On relève ainsi des flambements de fibres à 0° (Fig. 7a), des ruptures matricielles (ruptures par bloc, Fig. 7b), des délaminages (Fig. 7c et 7d) et enfin des bandes de cisaillement traversant l'épaisseur du composite (Fig. 7d). Il s'agit du même type d'endommagements que ceux survenant dans des CMO tissés lors d'une sollicitation en matage.

Cependant, la taille importante des blocs de matrice rompue semble être caractéristique du comportement en matage des CMC oxyde/oxyde.

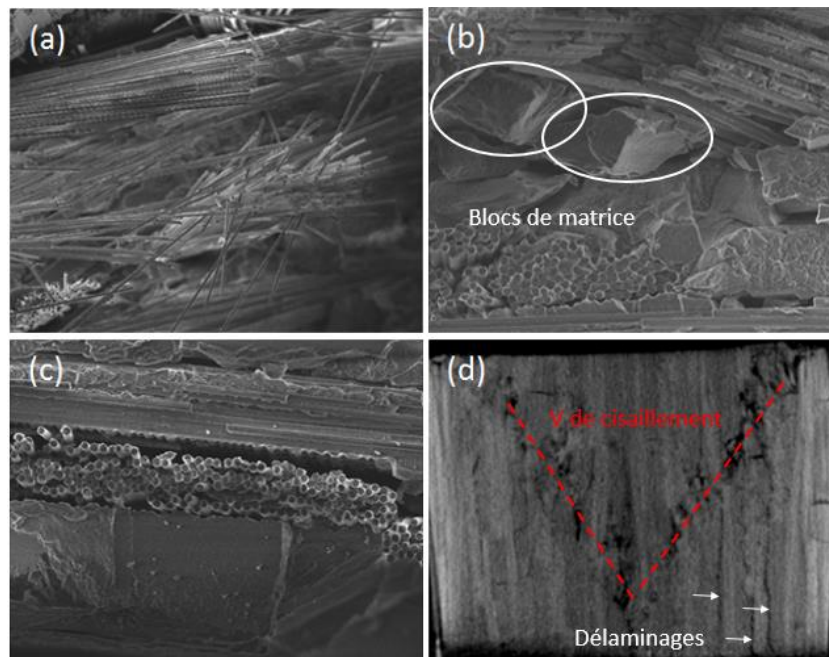


Fig. 7 : Endommagements en matage : (a) rupture des fibres (MEB), (b) rupture par bloc de la matrice (MEB), (c) délaminage inter-plis (MEB), (d) bandes de cisaillement (tomographie)

La réalisation d'essais interrompus à différents niveaux d'effort permet de mettre en place une chronologie de ces endommagements. On remarque ainsi que la majorité des endommagements apparaît au pic de matage, bien que l'on puisse discerner quelques délaminages dans les premières phases de l'essai. Afin de statuer sur l'origine de ces délaminages (solicitation mécanique ou défauts dus à la fabrication), de nouveaux essais de matage interrompus doivent être réalisés.

3.3 Simulation numérique

La simulation numérique de l'essai de matage est faite à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis Abaqus Standard. Le calcul réalisé est un calcul non linéaire implicite résolu via l'algorithme de Newton-Raphson.

L'axe est modélisé par une coque rigide possédant les propriétés matériau de l'acier. L'éprouvette CMC est modélisée pli à pli. Le maillage du composite est constitué par des éléments hexaédriques d'ordre 1. Les éléments proches du trou sont endommageables (loi d'endommagement présentée au paragraphe 2.2) tandis que le reste de l'éprouvette possède un comportement purement linéaire, afin de réduire le temps de calcul.

Le contact entre l'éprouvette et l'axe est un contact conventionnel avec un coefficient de frottement de 0,1. Les conditions aux limites sont représentatives de l'essai de matage en compression : axe encastré et déplacement imposé sur la partie haute de l'éprouvette (Fig. 8).

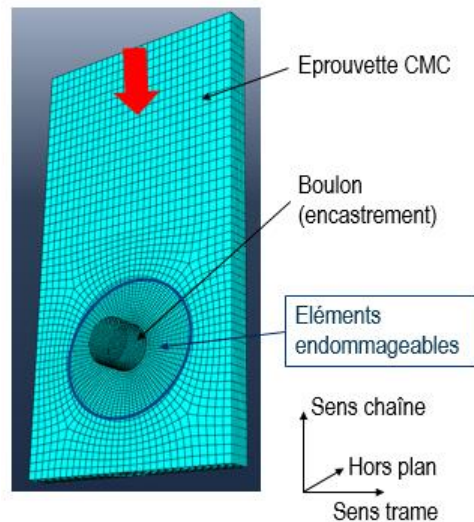


Fig. 8 : Maillage et conditions limites de la simulation de l'essai de matage

Une comparaison entre une courbe expérimentale et la simulation numérique a été réalisée (Fig. 9). Les données expérimentales sont issues des essais de matage présentés précédemment, à l'exception des données de l'éprouvette 108-4 qui avait des résultats inférieurs aux autres. Les courbes ont été recalées en déplacement en prenant en compte la raideur de la machine de traction. On retrouve bien les cinq phases de matage attendues sur la courbe numérique. Les raideurs initiales sont presque similaires à celles trouvées expérimentalement (écart de 2,6%), ainsi que la valeur de l'effort au pic (écart de 3,2%). Cependant, la forme de la chute d'effort et la valeur du plateau ne correspondent pas tout à fait. Il sera possible d'améliorer cette simulation numérique en recalant les paramètres du calcul grâce à de nouveaux essais élémentaires.

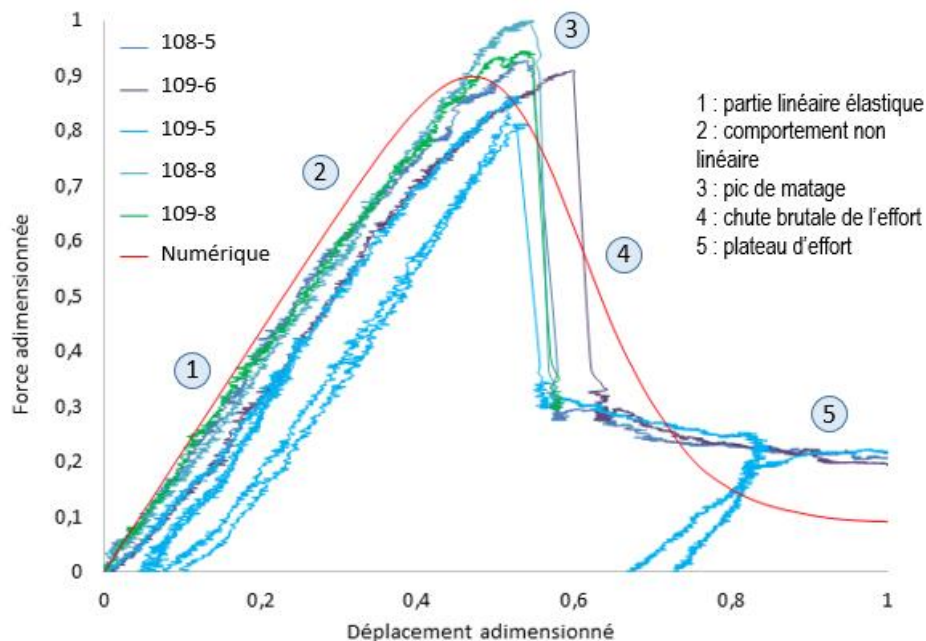


Fig. 9: Comparaison des courbes expérimentales et numériques

Les cartographies des endommagements numériques d_1 , d_4 et d_5 ont été relevées pour des points situés dans chacune des cinq phases du matage (Fig. 10). Conformément à ce qui a été observé au MEB et en tomographie, les endommagements se développent dès les premières phases de l'essai. On observe des endommagements en compression, en cisaillement et hors-plan (délaminages) au niveau du pic de matage. On remarque également que les plis à 0° sont ceux qui s'endommagent en premier, en particulier les plis extérieurs (surtout pour le délaminage). Comme constaté pour les essais, les endommagements en cisaillement traversent tout l'épaisseur du composite. Les endommagements numériques semblent correspondre à ceux observés lors de la campagne d'essai.

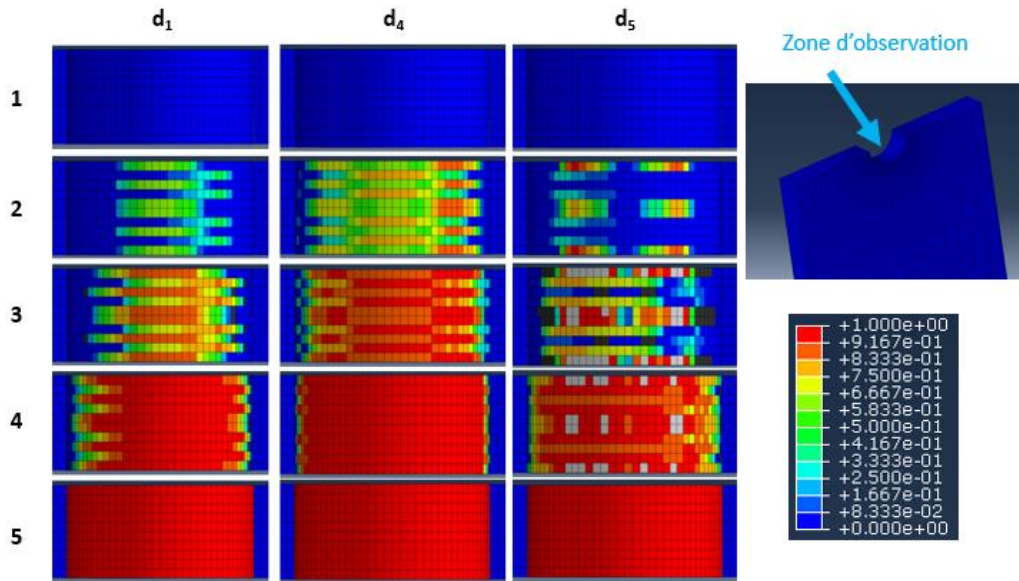


Fig. 10 : Cartographies des variables d'endommagement numériques pour les cinq phases de matage

4. Conclusion

Une étude du comportement en matage des composites CMC oxyde/oxyde a été réalisée en couplant des observations expérimentales et une modélisation numérique. Le mécanisme de dégradation recherché pour les jonctions boulonnées est la rupture en matage, qui assure une rupture progressive de la liaison.

Les essais de matage ont permis de mettre en place un premier scénario d'endommagement pour les jonctions boulonnées. Si les endommagements relevés sont similaires à ceux classiquement observés pour les CMO, des différences ont pu être observées, notamment sur la taille des blocs de matrice endommagée en compression. Le suivi des essais par corrélation d'image a montré que la localisation des endommagements en bord de trou se produit dès les premières phases de l'essai. Les endommagements sont alors concentrés sur une zone d'une taille proche du diamètre de l'alésage et le reste de l'éprouvette conserve son intégrité.

Les lois d'endommagement implémentées dans Abaqus ont été validées à l'aide d'une comparaison essais/calcul. Ces lois permettent de simuler le couplage des endommagements dans le composite et la dégradation progressive des propriétés des plis. Le suivi de l'endommagement se fait alors via des variables d'endommagement numériques. Les mécanismes d'endommagements simulés numériquement correspondent à ceux observés lors des essais : endommagement en compression des fibres et de la matrice, délaminages et cisaillement dans tout l'épaisseur du composite.

Le modèle numérique pourra être amélioré à l'aide de nouveaux essais de caractérisation mécanique, afin de se rapprocher encore davantage du comportement expérimental. D'autres essais de matage sont également prévus. De nouveaux essais interrompus seront réalisés afin de valider et d'affiner le scénario d'endommagement développé. De plus, l'influence de nouveaux paramètres sera testée, comme la géométrie des éprouvettes ou encore la séquence d'empilement du matériau.

Références

- [1] KA. KELLER, G. JEFFERSON, RJ. KERANS « Oxide-oxide composites ». *Handbook of Ceramic Composite*, pp. 377-421, 2005.
- [2] W. XIAO, T. ISHIKAWA, « Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (Part I: experimental investigation) ». *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 1022-1031, 2005.
- [3] PP. CAMANHO, S. BOWRON, FL. MATTHEWS, « Failure mechanisms in bolted CFRP ». *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 17, pp. 205-233, 1998.
- [4] G. ALDEBERT, « Analyse du comportement mécanique des assemblages boulonnés composites à renforts tissés ». *Thèse de l'Université de Toulouse*, 2013.

- [5] C. SOLA, « Contribution à l'étude du comportement en matage, en statique et en fatigue, de stratifiés carbone/époxy ». *Thèse de l'Université de Toulouse*, 2016.
- [6] C. BEN RAMDANE, « Etude et modélisation du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde ». *Thèse de l'Université de Bordeaux*, 2014.
- [7] A. MATZENMILLER, J. LUBLINER, RL. TAYLOR, « A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites ». *Mechanics of Materials*, Vol. 20, pp. 125-152, 1995.
- [8] M. BROUTELLE, F. LACHAUD, C. DUPLEIX-COUDERC, A. DAIDIE « Comportement en matage de composites à matrice céramique oxyde/oxyde ». *JA 2016 SF2M*, 2016.