

FEtude du comportement d'assemblages boulonnés de structures CMC oxyde/oxyde : Instrumentation et modélisation

Study of bolted junction behavior of CMC oxide/oxide structures: Instrumentation and modelling

F. Bouillon¹, M. Guerder^{1,2}, T.Vandellos¹, F.Dupé¹

1 : Safran Ceramics, a technology platform of Safran Tech,
105 avenue Marcel Dassault 33700 Mérignac , France
e-mail : florent.bouillon@safrangroup.com

2 Safran Aircraft Engine, Site de Villaroche,
Rond point René Ravaut Réau, F-77550 Moissy-Cramayel , France

Résumé

L'utilisation des matériaux composites à matrice céramique (CMC) dans les ensembles propulsifs implique nécessairement l'utilisation de technologies de jonctions entre le matériau CMC et les pièces métalliques [1]. Pour cela, les liaisons boulonnées sont classiquement utilisées. Elles sont des solutions technologiques intéressantes, du fait de leur robustesse et leur capacité à assurer des montages et démontages successifs au cours de la vie de l'avion. Ces jonctions doivent assurer leurs fonctions dans l'ensemble des conditions d'utilisations en vol et pendant la durée de vie complète de la pièce. L'expérience en service montre qu'elles sont souvent un point sensible de nos structures. C'est pourquoi il est nécessaire d'analyser, de comprendre et de modéliser les technologies d'assemblages afin de maîtriser le comportement en service. Une étude en quatre étapes (étude des mécanismes élémentaires, étude du serrage, essais technologiques et essai échelle 1) est présentée. L'utilisation et les apports de la multi-instrumentation et de la modélisation sont mis en avant.

Abstract

The use of ceramic matrix composite materials (CMC) in propulsion assemblies necessarily involves the use of joining technologies between the CMC material and metal parts. For this purpose, bolted connections are traditionally used. They are interesting technological solutions, due to their robustness and their ability to ensure successive assemblies and disassemblies during the life of the aircraft. These junctions must perform their functions under all in-flight operating conditions and for the full life of the part. In-service experience shows that they are often a sensitive point in our structures. It is therefore necessary to analyze, understand and model assembly technologies in order to control in-service behavior. A 4-step study (study of elementary mechanisms, study of clamping, technological tests and scale 1 test) is presented. The use and the advantages of multi-instrumentation and modelling are highlighted.

Mots clés : oxyde / oxyde, fixation, modélisation

Keywords : oxide /oxide , bolted , sizing

1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites à matrice céramique (CMC) en général et des composites oxyde / oxyde (COX) en particulier dans les ensembles propulsifs est un axe majeur recherché par de nombreux motoristes pour l'amélioration des performances (Fig.1). L'intégration des pièces CMC dans ces systèmes [ref 9], passe par des règles de conception spécifiques qu'il faut être en mesure de justifier pour supporter la certification. Ces pièces sont généralement soumises à des niveaux et des gradients de températures importants, mais elles sont également sollicitées mécaniquement. L'interfaçage de ces pièces CMC avec le reste du moteur généralement métallique reste un point délicat que les motoristes majeurs comme SAFRAN analysent avec précautions. Ces contraintes imposent nécessairement l'utilisation de technologies de jonctions entre le matériau CMC et les pièces métalliques [1]. Pour cela, les liaisons boulonnées sont classiquement utilisées. Elles sont des solutions technologiques intéressantes, de par leur robustesse et leur capacité à assurer des montages et démontages successifs au cours de la vie de l'avion. Ces jonctions doivent assurer leurs fonctions dans l'ensemble des conditions d'utilisations en vol et pendant la durée de vie complète de la pièce. L'expérience en service montre qu'elles sont souvent un point sensible de nos structures. C'est pourquoi il est nécessaire d'analyser, de comprendre et de modéliser les technologies d'assemblages afin de maîtriser le comportement en service.



Fig. 1 - Pièce sortie moteur en CMC Oxyde-Oxyde GE

L'objectif de ce papier est de présenter les dernières avancées réalisées sur cette problématique dans le cadre des COX. Les règles pour la conception des assemblages sont souvent issues des métaux et ont été adaptées aux composites à matrice organique (CMO). Elles doivent donc être redéfinies et validées pour les COX en prenant en compte la spécificité de ces matériaux, c'est-à-dire leur mode de fabrication, leur comportement et leur mode d'endommagement.

La démarche suivie au cours de cette étude est basée sur quatre grandes étapes. La première consiste à étudier les mécanismes élémentaires, puis d'étudier les conditions de serrage d'une liaison, d'analyser des essais technologiques multi instrumentés et enfin de confronter ces résultats à un essai échelle 1 de structure.

2. Présentation du matériau de l'étude

Le matériau utilisé dans cette présentation est constitué d'une matrice en alumine renforcée de plis tissés 2D en fibres Nextel 610TM. Le comportement mécanique du COX est directement lié au comportement de la matrice microporeuse, lui-même induit par les conditions de frittage (ref [2]). Le degré de microporosité et donc la densification de la matrice permet d'assurer le rôle de déviation de fissures.

La coupe morphologique (Fig. 2) montre que le matériau a été conçu pour limiter les macroporosités en comparaison à d'autres matériaux COX (ref [3], [4], [11] & [12]). Lors de sollicitations mécaniques, les macropores peuvent à la fois jouer un rôle dans l'absorption de fissures, mais également agir comme des sites préférentiels d'initiation en particulier sur des mécanismes de types matage.

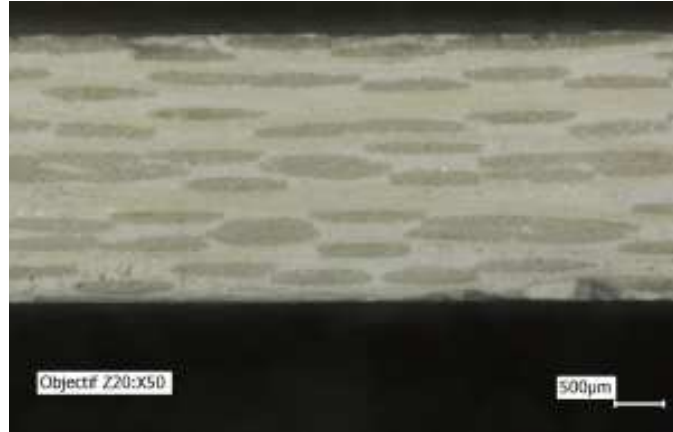


Fig. 2. Coupe morphologique du matériau de l'étude après mise en œuvre

Grâce à la maîtrise de la microporosité dans le matériau, la courbe de comportement (Fig 3) conserve un comportement élastique endommageable classique des composites COX.

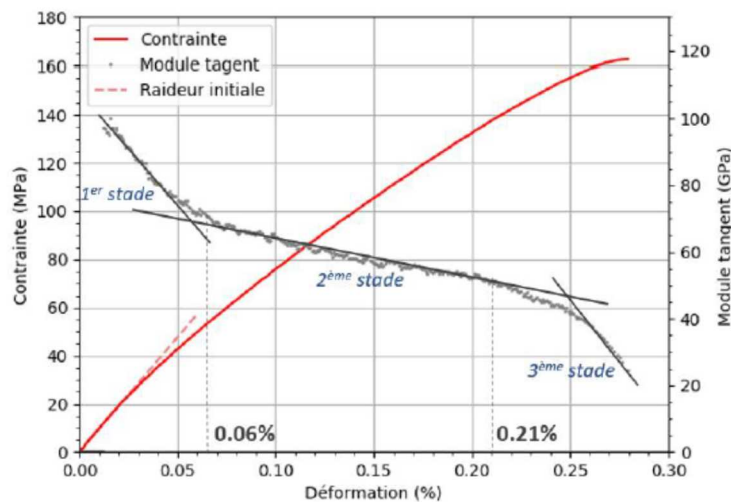


Fig. 3. Courbe de comportement mécanique du matériau en traction ref [13]

3. Analyse des mécanismes élémentaires

Les principaux mécanismes de ruine des liaisons boulonnées (ref [14]) sont bien connus et sont dans l'ensemble identiques aux autres matériaux (Fig 4). Néanmoins leurs cinétiques et leurs effets sont spécifiques aux matériaux COX.

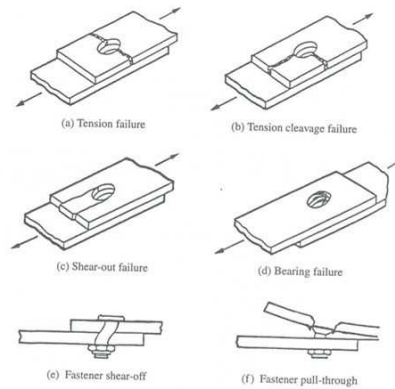


Fig. 4. Mécanisme de ruine d'une liaison boulonnée ref [14]

Dans le cas de ces matériaux, il est possible à iso-géométrie de privilégier un mécanisme ou l'autre en fonction des conditions d'élaboration comme le montre la Fig 5.

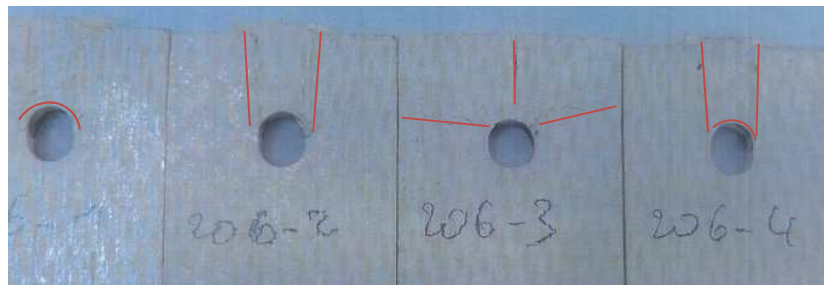


Fig. 5. Différents mécanismes de ruine en fonction des conditions d'élaborations

Le matage étant un mécanisme primordial pour le comportement des liaisons (ref [6] & [7]), il est en général intéressant de le privilégier par rapport à d'autres mécanismes pour rendre les liaisons plus robustes. Dans le papier, on se concentrera sur l'étude de ce mécanisme. De nombreux montages d'essais de matage ont été imaginés ref [6] [15]. Dans notre étude, un montage dit « fenêtre ouverte » a été utilisé afin d'exploiter la Corrélation d'Image Numérique (CIN) et l'émission acoustique (EA) ref [5].



Fig. 6. Vu d'ensemble du moyen d'essai et de son instrumentation

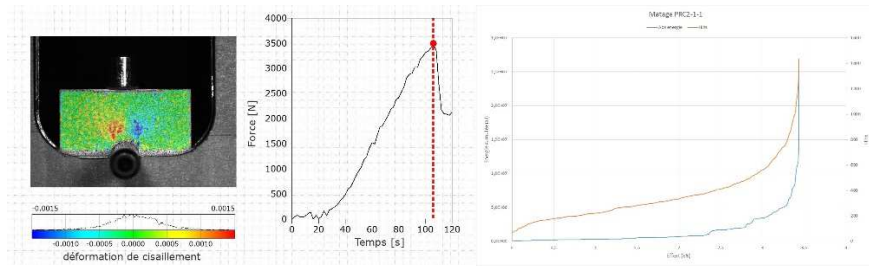


Fig. 7. CIN et Signaux EA

Une modélisation éléments finis (EF) de l’essai est mise en place afin de décrire le comportement au matage. Cette étape est indispensable pour représenter le comportement de la liaison. Pour cela on s’appuie sur un modèle d’endommagement macroscopique continu, décrit dans les ref [3] et ref [8], nommé ODM (Onera Damage Model).

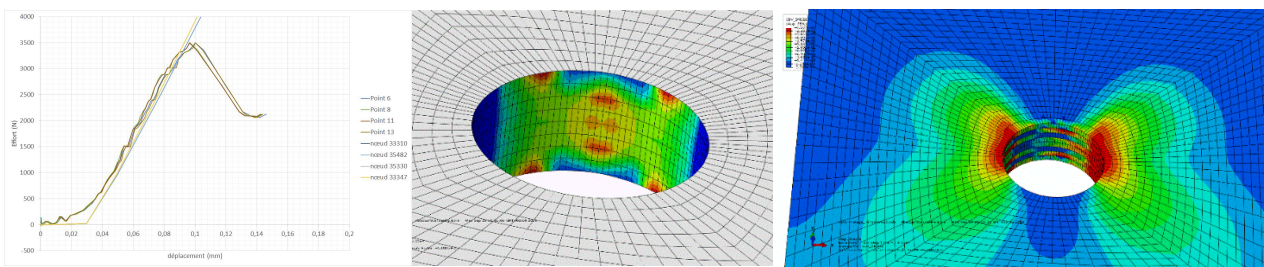


Fig 8 : Résultats de calcul ODM sur l’essai de matage fenêtre ouverte a) comparaison essai calcul des déplacements b) pression de contact c) endommagement matriciel pour F_{max} dans la direction des efforts

L’analyse détaillée de l’essai (CIN, EA , modèle) a permis de déterminer les seuils des différents mécanismes mais aussi de mettre en avant la capacité d’un COX sollicité au matage à reprendre des efforts après le pic de contraintes maximum. Cette propriété, aussi présente en générale sur les composites à matrice organique, est intéressante pour concevoir des liaisons robustes et tolérantes aux chargements extrêmes.

4. Conditions de serrage d’une liaison et premier glissement

La structure spécifique de la matrice microporeuse limite la capacité de serrage sans endommagement (Fig 9). D’autre part, un effort de serrage minimum est indispensable pour empêcher le déplacement relatif entre les substrats sous des chargements de type fatigue.

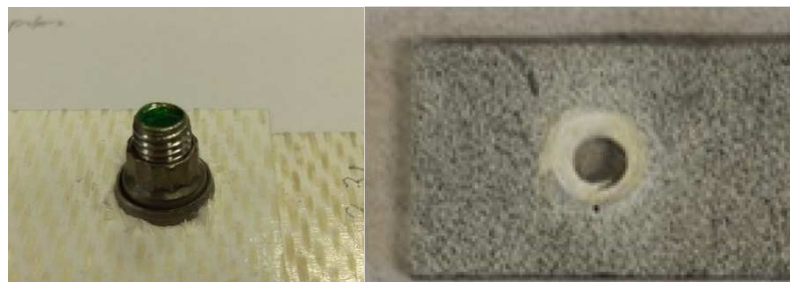


Fig. 9. Endommagement sous tête lié au serrage

La courbe théorique d'un essai de traction décrit dans les ref [1] & [10] est présentée dans la Fig 10. L'effort de serrage influence essentiellement le niveau de transition entre la zone 1 & la zone 2, et donc le point de glissement.

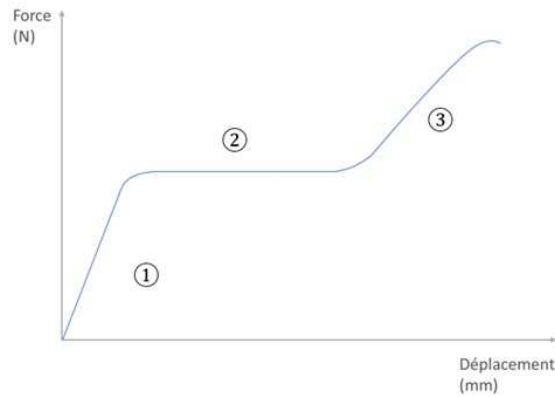


Fig. 10. Courbe schématique théorique d'un comportement en traction de la liaison

- ① Phase élastique
- ② Phase de glissement
- ③ Phase d'endommagement puis de rupture du CMC

La formule théorique pour le couple de serrage est

$$C = K \times F + C_F \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

- C le couple de serrage (N.m)
- K le coefficient de serrage (m)
- F la tension (N)
- C_F le couple de freinage (N.m)

Afin de valider le niveau de chargement appliqué sur la structure, des essais avec des fixations instrumentées ont été réalisés. L'objectif était de déterminer et de maîtriser l'effort de serrage en incluant les dispersions qui sont principalement liées à la connaissance des coefficients de frottement entre les pièces (Fig 11).



Fig. 11. a) Vis instrumentées et b) Etalonnage associé

5. Essais technologiques d'une liaison

L'objectif de ces essais est de valider des designs de liaison et de contribuer à la mise en place d'une méthodologie de justification (i.e. certification). Ces méthodologies s'appuient sur la bonne maîtrise de la comparaison essai/calcul (Fig 12).

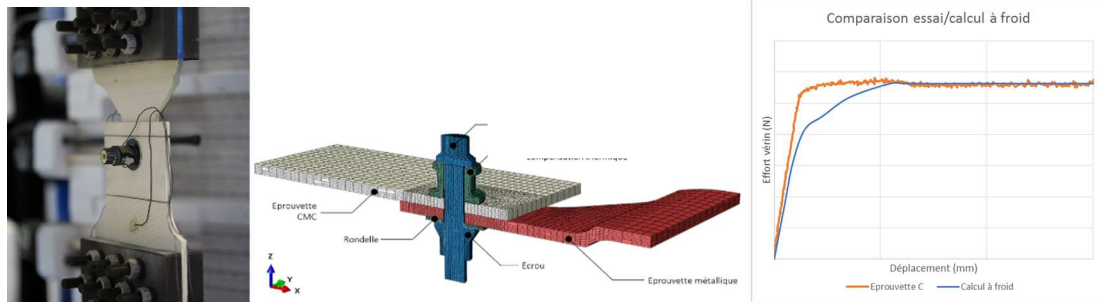


Fig 12. Approche de modélisation d'une liaison mécanique a) éprouvette b) maillage EF de l'éprouvette c) comparaison effort déplacement calcul essai

L'un des avantages de la CIN utilisée est de reconstruire des courbes effort-déplacement en se focalisant sur le déplacement de l'assemblage (Fig 13). Ceci permet (i) de corriger les déformations induites par la souplesse machine et (ii) d'améliorer les comparaisons aux modélisations éléments finis.

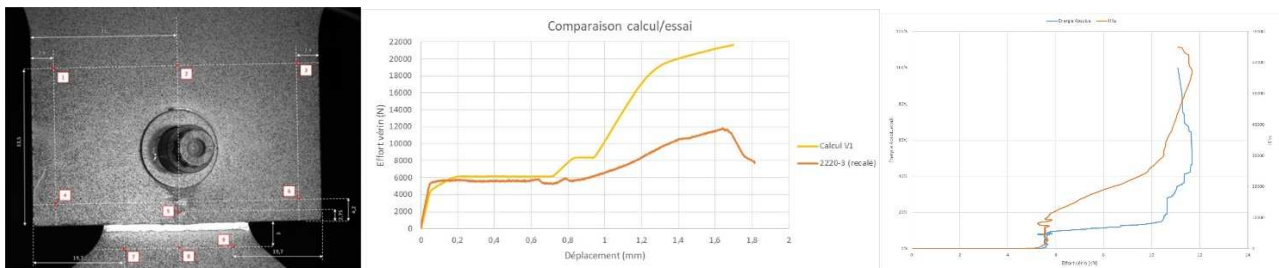


Fig 13. Utilisation de la CIN pour établissement de la courbe effort - déplacement a) dépouillement CIN b) Comparaison effort déplacement calcul essai (la corrélation est ici assurée dans la phase 1 et 2) c) Signaux d'émission acoustique

En complément l'émission acoustique est utilisée pour déterminer les seuils des différents mécanismes (ref 16). L'apparition des premiers signaux est liée à l'activation de la phase de glissement. Dans un deuxième temps l'évolution de la dynamique (changement pente de la courbe) est associée à l'apparition des mécanismes d'endommagement du matériau.

Le modèle EF est mis en place sur la base d'un modèle volumique avec des éléments d'ordre 1 (Fig 14). Des conditions de contacts glissants avec frottements sont écrites entre toutes les pièces. L'extrémité de l'éprouvette en oxyde est encastrée, tandis que l'extrémité de l'éprouvette métallique est pilotée en déplacement. Une condition de symétrie est appliquée sur toutes les faces se trouvant dans le plan de symétrie (blocage des déplacements selon Y). La mise sous tension de la vis est modélisée par un chargement de type « Bolt Load ». La force appliquée vaut l'effort de serrage calculé à partir des résultats du paragraphe 4.

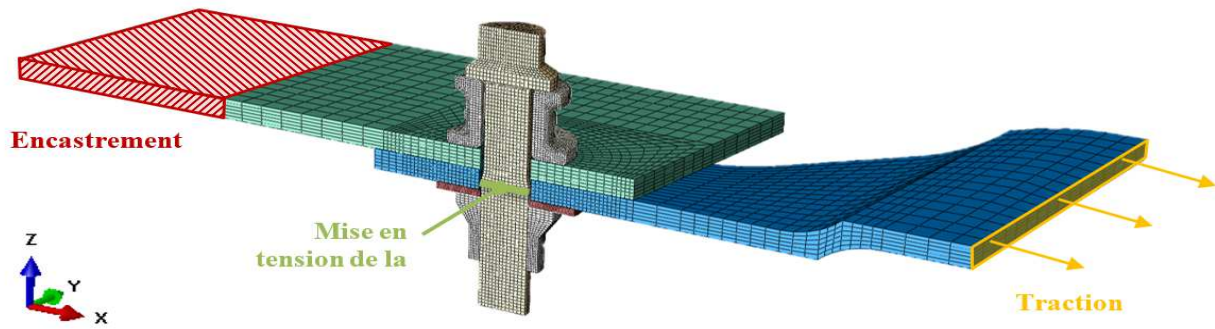


Fig 14. Approche de modélisation d'une liaison mécanique schéma des conditions aux limites et chargement du modèle

Les Fig 12 et 13 montrent le bon niveau de recalage entre les essais et le modèle pour le début de la courbe. Les erreurs sur la raideur et sur le premier glissement sont inférieures à 5%. Pour modéliser la fin de la courbe il est nécessaire d'introduire dans le modèle l'endommagement du matériau ce qui est possible par l'utilisation du modèle ONERA Damage Model (ODM) identifié sur la base des essais présentés au paragraphe 3.

Néanmoins, trois niveaux ont été identifiés sur la base de ces essais :

- Premier glissement
- Début de l'endommagement
- Effort maximum à rupture

Ils seront comparés à l'essai échelle 1 pour démontrer le conservatisme de l'approche.

6. Application sur structures

L'un des objectifs de l'essai échelle 1 est de comprendre le fonctionnement des liaisons sur une structure de révolution et la répartition entre les fixations. L'essai est réalisé sur un banc spécialement conçu afin de s'approcher des sollicitations élémentaires vues en vol par la pièce (Fig 15).



Fig 15. Essai échelle 1 sur structure

Un modèle éléments finis d'ensemble intégrant les résultats précédents, mais aussi les contraintes de taille du modèle est mis en place (Fig 16). L'objectif est de valider l'approche pour une utilisation dans un développement.

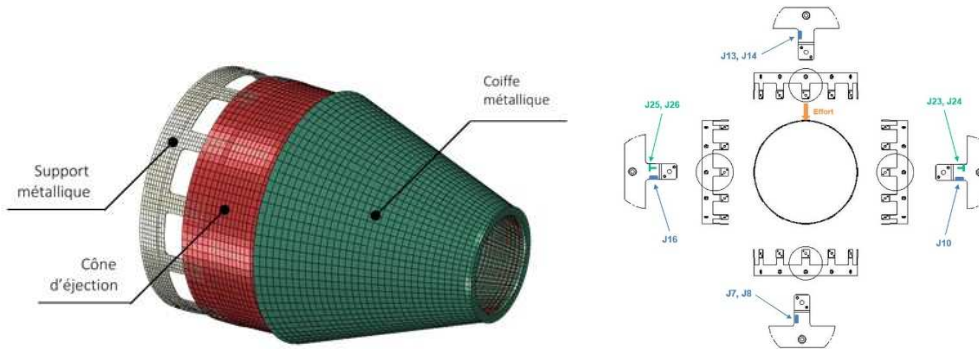


Fig 16.a) Modélisation de l'essai échelle 1 sur structure b) instrumentation pour déterminer les flux d'efforts

La campagne d'essai est constituée de trois chargements successifs (10 KN, 16 KN et rupture). Le modèle EF est validé en raideur par rapport aux résultats d'essais. Les efforts durant l'essai dans les zones de fixation sont mesurés à l'aide de jauges de déformation permettant de remonter aux flux d'efforts et ainsi de dimensionner les zones de jonctions.

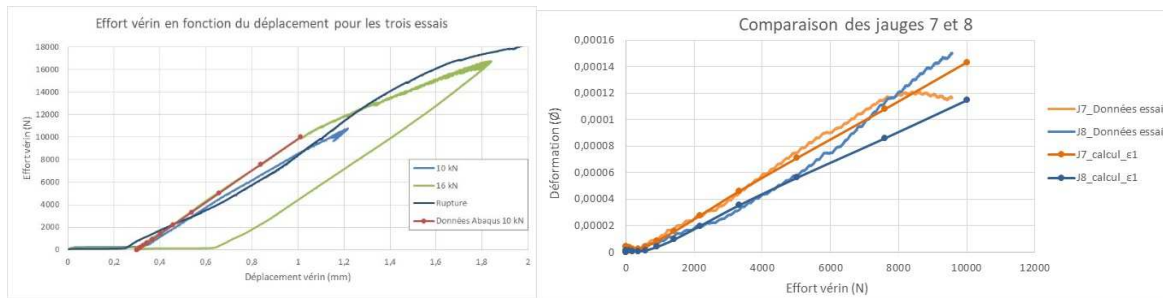


Fig 17.a) Comparaison efforts déplacement entre essai et modèle b) Comparaison des flux d'efforts fixations

Le niveau de rupture, comparé à notre prévision d'essai est plus élevé avec un niveau important de conservatisme (environ un facteur 2) qu'il conviendra d'affiner dans la suite de nos travaux.

7. Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés ont permis sur la base d'un matériau COX amélioré, élaboré par SAFRAN, de renforcer la compréhension des mécanismes de ruine élémentaires mis en œuvre dans une liaison mécanique. De plus l'effet du serrage sur le comportement de liaison a été étudié afin de déterminer des critères spécifiques adaptés aux matériaux COX. L'analyse d'un essai technologique a été réalisé pour montrer la pertinence de la technologie avant de l'intégrer dans une structure échelle 1. La pyramide d'essais mise en place sert de base à l'élaboration d'une méthode de justification. Ces méthodes sont basées sur une exploitation de l'instrumentation (CIN et EA). Une modélisation basée sur un modèle d'endommagement (ODM) a été employée sur les essais matériau et doit être mise en œuvre sur les essais structures.

Bien que ces premiers résultats soient intéressants l'étude des liaisons boulonnées nécessite encore de nombreux travaux. Une amélioration du modèle semble nécessaire pour affiner la modélisation du comportement au matage. L'étude du comportement de ces liaisons en fatigue, bien que commencée, reste à poursuivre et à croiser avec les travaux en cours sur le comportement en fatigue de la ref [8]. Enfin le comportement de ces jonctions en vibration est aussi un axe à travailler.

Remerciements

Ces travaux s’inscrivent dans le cadre du PRC MécaComp, projet de recherche financé par la DGAC, impliquant le Groupe SAFRAN, l’ONERA et le CNRS. Les auteurs souhaitent remercier l’ensemble des collègues du groupe SAFRAN qui ont contribué à l’étude, mais aussi l’ensemble des acteurs académiques qui supportent le groupe SAFRAN dans le développement des technologies CMC.

Références

- [1] F. BOUILLON et al, « Modélisation d’assemblages boulonnés de structures CMC tissées 3D à l’aide du modèle ODM et comparaison avec des essais multi-instrumentés », Comptes Rendus des JNC 19, 2015
- [2] R. SIMON, « Progress in processing and performance of porous-matrix oxide/oxide composites ». Int. J. Appl. Ceram. Technol., 2, pp. 141-149, 2005.
- [3] C. BEN RAMDANE, « Etude et modélisation du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde ». Thèse de doctorat, 2014.
- [4] N. GUEL, et al., « Etude du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde : apport de l’analyse temps-fréquence des signaux acoustiques ». Journées Nationales sur les Composites, 2017.
- [5] N. GUEL, et al., « Etude du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde : apport des essais in-situ (MEB, Tomo- X synchrotron) sur la compréhension de l’émission acoustique sur structures macroscopiques », Workshop CND - AMAC – Bordeaux, 2018
- [6] M. Broutelle, and al «Mechanical behavior of oxide/oxide ceramic matrix composite bolted joints», ECCM, 2018
- [7] M. Broutelle, et al, « Comportement en matage de composites à matrice céramique oxyde/oxyde », JNC20, 2017.
- [8] O. Sally et al, “Fatigue lifetime modeling of oxide/oxide composites”, 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design, 2017
- [9] F. Bouillon, A. Candéau, F. Dupé, G. Mecuson, P. Metge, R. Etchart-Salas, « Développement et certification d’un échappement de turboréacteur en CMC pour l’aviation civile », Matériaux 2014, Montpellier. 27 novembre 2014.
- [10] T. Vandellos, F. Bouillon, A. Candéau, B. Legin, E. Voland, F. Laurin, Z. Aboura. « Sizing of bolted junctions for 3D woven ceramic matrix composites structures using ONERA damage model and comparisons with multi-instrumented tests », 20th International Conference on Composites Materials, Copenhagen (ICCM20), <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM20proceedings/papers/paper-1218-4.pdf> , 19-24 Juillet 2015.
- [11] E. Volkmann, et al., « Assessment of three oxide/oxide ceramic matrix composites: mechanical performance and effects of heat treatments », Composites: Part A, 68, pp. 19-28, 2015.
- [12] F. Zok, et al., « Mechanical properties of porous-matrix ceramic composites », Advanced Engineering Materials, 3, No 1-2, 2001.
- [13] E. Marin, F. Bouillon, O. Caty, et E. Martin Comportement mécanique d’un composite oxyde/oxyde, poster JNC 21 Bordeaux , 2019
- [14] C. Y Niu M, « AIRFRAME stress analysis and sizing » second edition Honk Kong commilit press LTD 1999
- [15] G. Portemont, J Berthe, A Deudon & FX Irisarri, «Static and dynamic bearing failure of carbon/epoxy composite joints», composites structure 2018
- [16] B. Legin, Z. Aboura, P. Feissel & F. Bouillon, « Analyse par multi-instrumentation du comportement mécanique d’un assemblage boulonné en composite à matrice céramique : approche acoustique », Comptes Rendus des JNC 19, 2015