

Essais multiaxiaux traction-torsion sur composites à renforts 3D : identification de l'enveloppe des premiers endommagements et des mécanismes associés.

Multiaxial tensile-torsion loading on 3D woven carbon fiber reinforced plastic composite: identification of the first damage envelope and associated damage

N. Tableau¹, Z. Aboura², K. Khellil², F. Laurin³ and J. Schneider¹

1 : Safran aircraft engines Rond Point René Ravaud-Réau, 77550, Moissy Cramayel, France. Mail: nicolas.tableau@safrangroup.com

2 : Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval UMR CNRS FRE 2012 CS60319 60203 Compiègne Cedex. Mail zoheir.aboura@utc.fr

3 : Onera, 29 Avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon, France. Mail: frederic.laurin@onera.fr

Résumé

Cette étude porte sur l'identification expérimentale de la première enveloppe d'endommagement d'un composite tissé 3D à matrice époxy, soumis à des chargements multiaxiaux. Des tests simultanés de traction et de torsion sur des barres rectangulaires ont été réalisés pour induire différents états de contraintes multiaxiales de traction dans le plan et de cisaillement hors du plan (enveloppes σ - τ). Pour permettre l'identification des enveloppes, l'apparition des premiers endommagements a été évaluée grâce à la corrélation de diverses techniques de mesure d'investigation complémentaires, telles que la corrélation d'images numérique, l'émission acoustique (AE) et les observations microscopiques in situ. De plus, un processus spécifique de réduction des données a été utilisé pour gérer une quantification précise de l'état de contrainte induite par les charges multiaxiales. Sur la base de ces travaux, les enveloppes σ_{11} - τ_{13} et σ_{22} - τ_{23} ont été identifiées sur un matériau composite à matrice polymère et renfort tissé 3D. À l'aide d'observations microscopiques, les mécanismes d'endommagement (type et localisation) liés aux charges multiaxiales ont été identifiés. De plus, grâce aux champs de déformation mesurés par la stéréo corrélation d'images, des relations particulières entre les chargements multiaxiaux et l'architecture tissée en 3D ont été établies.

Abstract

This study focuses on the experimental identification of the first damage envelope in a 3D woven composite with polymer matrix, under multi-axial loadings including combined in-plane tension and out-of-plane shear loadings ($\sigma - \tau$ envelopes). Simultaneous Tensile-Torsion tests on rectangular bars were performed to induce different multi-axial stress states. To enable envelopes identification, onset of the first damage has been evaluated thanks to the correlation of various and complementary investigation measurement techniques, such as Stereo-Digital Image Correlation (Stereo-DIC), Acoustic Emission (AE) and in-situ microscopic observations. In addition, a specific data reduction process has been used to manage accurate quantification of the stress state induced by the multi-axial loadings. Based on these findings, both $\sigma_{11} - \tau_{13}$ and $\sigma_{22} - \tau_{23}$ envelopes were identified on a 3D woven composite material with polymer matrix. Using microscopic observations, damage mechanisms (type and localization) related to the multi-axial loadings were identified. In addition, thanks to the strain fields measured by the Stereo-DIC on the material surface, particular relations between the multi-axial loadings and the 3D woven architecture have been established.

Mots Clés : Composite 3D, chargement multiaxial, enveloppe du premier endommagement, mécanismes d'endommagement

Keywords : 3D woven composite, Multi-axial loading, first damage envelopes, damage mechanisms

1. Introduction

L'utilisation d'architecture de renforcement 3D pour les matériaux composites induit un comportement mécanique et des mécanismes d'endommagement totalement différents des stratifiés composites 2D. Ainsi, la plupart des connaissances accumulées sur les stratifiés composites 2D concernant les méthodes de caractérisation, le comportement mécanique et les mécanismes de dégradation ne peuvent pas être directement transposées aux composites tissés 3D. En conséquence, un effort constant est actuellement réalisé en ce qui concerne la compréhension du comportement mécanique et des mécanismes d'endommagement associés aux composites tissés en 3D. La plupart de ces études concernent des charges uniaxiales quasi statiques [1] [2] [3], de fatigue et d'impact, mais très peu de travaux ont été réalisés chargements multiaxiaux sur des composites tissés en 3D [4],[5],[6]. Ces travaux de recherches s'attachent à étudier et analyser le comportement mécanique de composites tissés 3D à fibre de carbone et matrice époxy sous sollicitation multiaxiale traction-torsion. Ainsi, le premier objectif est de fournir une analyse complète du comportement mécanique des composites tissés 3D, en identifiant les mécanismes mis en jeu, leur nature et leur avènement en lien avec la mésostructure du matériau. Le second objectif concerne l'identification de l'enveloppe du premier endommagement en lien avec la mixité de chargement (traction pure, traction/torsion et torsion pure). La communauté scientifique a mis au point plusieurs tests visant à obtenir un état de contrainte multiaxial sur des matériaux composites. Les méthodes de test les plus courantes sont (i) des essais simultanés de traction axiale et de torsion sur des éprouvettes tubulaires (ii) des essais de traction biaxiaux appliqués aux bras d'un échantillon cruciforme plat et (iii) des essais Arcan. Malgré la complexité liée à la fois à la préparation des éprouvettes et à la préparation des tests, leur application sur des matériaux composites a permis d'identifier des enveloppes multiaxiales de rupture en traction et en cisaillement dans le plan. Cependant, ces tests ne permettent pas de déterminer simultanément l'état des contraintes de traction dans le plan et hors du plan. En fait, très peu de tests sont capables d'induire cet état de contrainte multiaxiale spécifique. Le test le plus courant consiste à introduire simultanément la flexion et la torsion sur la plaque composite. Un dispositif expérimental complexe est nécessaire pour introduire correctement les charges, et des précautions extrêmes doivent être prises concernant la conception des mors pour éviter tout effet de bord. Ainsi, dans cette étude, des charges simultanées de traction et de torsion sur des barreaux rectangulaires ont été préférées pour induire des contraintes de traction dans le plan et hors du plan du fait de sa relative simplicité. De plus, la torsion simple induit un état de contrainte de cisaillement pur et quasi constant sur les faces et les côtés des plaques torsadées. Cependant, des précautions extrêmes doivent être prises pour quantifier et contrôler l'état de contrainte multiaxiale induit. Le détail de l'approche expérimentale sera présenté. La complexité architecturale des matériaux 3D de l'étude nécessite l'utilisation d'une multiinstrumentation pour l'identification et le suivi des mécanismes d'endommagement. Ainsi, outre l'extensométrie classique, la stéréocorrélation d'images numériques est largement utilisée pour, d'une part, la mesure des angles de torsion au sein de la zone utile de l'éprouvette, et d'autre part, pour analyser l'évolution de champs de déformations hétérogènes en fonction de la mixité de la sollicitation, mais également en rapport avec la mésostructure du matériau. La technique de l'émission acoustique est également largement employée pour la détection de l'avènement des premiers endommagements. Enfin la vidéo microscopie in situ instrumente les tests afin d'identifier de manière robuste la localisation et le type des premiers endommagements induits.

2. Présentation des matériaux

Le matériau à l'étude est une résine époxy renforcée par un interlock tissé 3D constitué de fibres de carbone à module intermédiaire (IM). Ce matériau composite, fourni par le groupe Safran, est réalisé par RTM (Resin Transfert Moulding). Les dimensions du volume élémentaire représentatif (VER) de la préforme tissée en 3D le long de la direction des fils de chaîne (axe 1 de la figure 1), de la direction des fils de trame (axe 2) et de l'épaisseur (axe 3) sont comprises entre 20 et 40 mm. Il est à noter que VER est plutôt volumineux par rapport à d'autres composites tissés 2D.

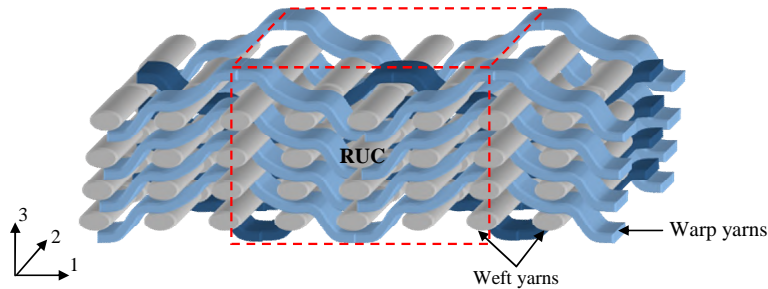


Figure 1 : Schématisation de la cellule élémentaire de l'interlock

3. Procédure expérimentale

a. Géométrie des éprouvettes.

Les éprouvettes utilisées sont sous forme de barreaux rectangulaires. Elles subiront un effort de traction et de torsion. La charge de traction F induit une contrainte constante σ sur toute la section du barreau définie par sa longueur notée L , sa largeur notée b et son épaisseur notée h . La relation entre F et σ est donnée ci-dessous :

$$\sigma = F / bh \quad (1)$$

Afin de réduire les concentrations de contraintes générées par l'introduction de l'effort, les éprouvettes sont dotées de talons en aluminium biseauté à 45°.

La torsion induit à la fois des contraintes de cisaillement sur la face et la tranche du barreau. En supposant un comportement homogène et orthotrope du matériau, la théorie de Lekhnitskii [7] permet de déterminer les contraintes de cisaillement selon les relations suivantes :

$$\tau_{xy} = \frac{M}{bh^2} k_1 \text{ et } \tau_{xz} = \frac{M}{bh^2} \sqrt{\frac{G_{xz}}{G_{xy}}} k_2 \quad (2)$$

M étant le moment de torsion appliqué, G_{xy} et G_{xz} les modules de torsion plan et hors plan, k_1 et k_2 sont les coefficients de St Venant. En actant sur la géométrie de l'éprouvette, soit en prenant une largeur b nettement supérieure à l'épaisseur h , il est possible de maximiser k_1 et minimiser k_2 , ce qui permet de faire intervenir principalement un seul état de cisaillement. Pour plus d'information sur ce point, le lecteur est invité à consulter les références [Lekhnitskii 7, Tableau et al 8].

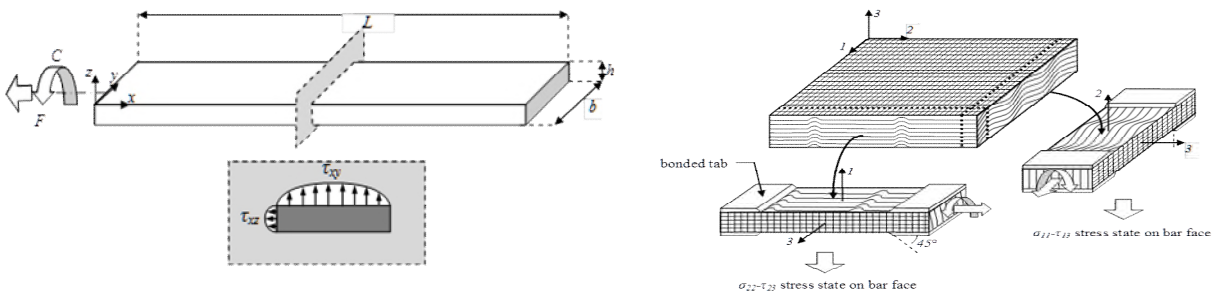


Figure 2 : Illustration de la forme géométrique des éprouvettes, les champs de contraintes générées et les plans de prélèvement des éprouvettes.

Les éprouvettes sont prélevées dans l'épaisseur des plaques afin d'accéder aux mesures des états de contraintes $\sigma_{11} - \tau_{13}$ et $\sigma_{22} - \tau_{23}$

b – Techniques d'investigations utilisées

Toutes les éprouvettes sont dotées de deux capteurs d'émissions acoustiques, ils présentent également au centre de leur face un mouchetis permettant un suivi, via la stéréo corrélation d'images numériques, la mesure de l'angle de torsion ainsi que les champs de déformations induits par le chargement. Un vidéomicroscope est positionné sur la face opposée à l'éprouvette afin d'observer les mécanismes d'endommagement et de s'assurer que l'on mesure bien les états de contraintes au premier endommagement. La figure 3 présente un exemple de l'éprouvette sur son montage d'essai.

c – Protocole d'essai

Afin d'identifier convenablement l'apparition et le développement des endommagements, un protocole de test spécifique a été mis au point. Ce protocole, résumé sur la figure 4, comprend une succession de chargements multiaxiaux incrémentaux destinés à augmenter progressivement les niveaux de contraintes de traction et de cisaillement dans l'éprouvette. L'émission acoustique est utilisée pour identifier les premiers événements, ce qui permet d'aller chercher le seuil d'endommagement. Les observations s'assurent de l'apparition des premières fissures. Les incréments de charges sont alors réduits afin de suivre avec précision l'évolution des mécanismes et comprendre les effets combinés des charges. Après chaque charge incrémentale, une décharge est effectuée puis un rechargement uni axial (traction seule puis torsion seule) est réalisée afin de mesurer les modules de Young et cisaillement, suite à l'introduction d'un éventuel endommagement.

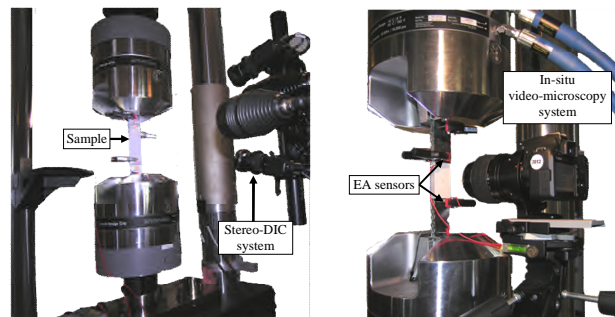


Figure 3 : Éprouvette et son instrumentation sur la machine traction/torsion

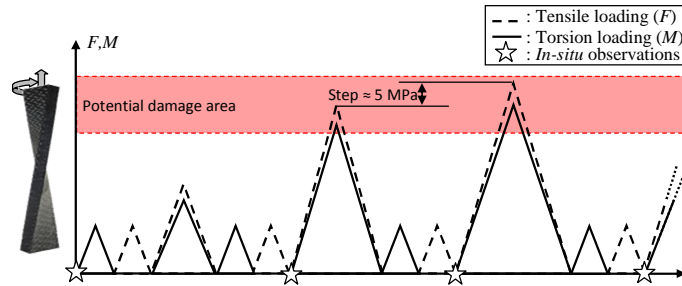
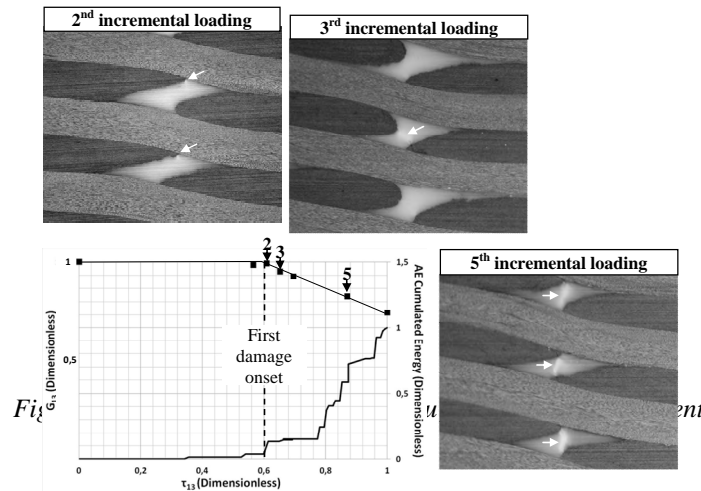


Figure 4 : Protocole de chargement en traction / torsion

4 Résultats et discussion

Le seuil d'endommagement est identifié en corrélant les résultats issus simultanément par chaque outil d'investigation (réponse mécanique du matériau, activité acoustique et micrographies in situ). La figure 5 illustre un exemple de chargements incrémentiels multiaxiaux effectués sur un échantillon soumis à un rapport de contrainte fixe ($\sigma / \tau = 3$). Ce test comprend un total de 6 charges. Après le troisième chargement, le module de cisaillement résiduel commence à décroître, ce qui indique un dommage potentiel sur le matériau. Simultanément, une activité acoustique notable est enregistrée, ce qui confirme le fait que des mécanismes d'endommagement importants commencent à se produire. Dans le même temps, les observations in situ permettent de déterminer le type de mécanisme d'endommagement et sa position dans le VER.



Dans ce qui suit, seuls les résultats issus des tests dans le plan (1-3) seront présentés. Les éprouvettes issues de ce plan ont été testées avec différents rapports positifs (σ_{11} / τ_{13}) afin de couvrir le premier quart de l'enveloppe. Les résultats issus de ces différents tests sont illustrés à la figure 6. Les mécanismes de dommages induits par des conditions de charge spécifiques (traction, torsion et traction / torsion) sont également illustrés. Parmi les mécanismes de dommages observés, plusieurs remarques peuvent être formulées.:

- Dans le cas de charges de traction pure (cas 1), la plupart des mécanismes d'endommagement sont des fissures matricielles, orientées à $+45^\circ$ (respectivement à -45°) localisées dans les descentes (respectivement dans les montées) des chemins des fils de chaîne.
- Dans le cas d'une charge de torsion pure (cas 2), la plupart des mécanismes d'endommagement sont des décollements entre les fils de chaîne et de trame. Ces

mécanismes se produisent sur l'ensemble du VER, notamment le long des ondulations des chemins des fils de chaîne.

- Dans le cas d'une charge simultanée traction-torsion (cas 3), les mécanismes d'endommagement consistent en une combinaison de fissures de la matrice et une décohésion entre les fils de trame et de chaîne. Contrairement aux endommagements induits séparément par les efforts de traction et de torsion, les mécanismes d'endommagement ne se produisent que lors de la descente du chemin des fils de chaîne. Les autres zones ne sont pas endommagées.

Nous remarquons donc, que lors d'un chargement en traction/torsion, les mécanismes d'endommagement ne s'additionnent pas de manière basique, mais que des zones sont totalement déchargées alors que d'autres zones se trouvent surchargées.

Pour comprendre ce phénomène, nous nous sommes appuyés sur les mesures de champs de déformations obtenus par stéréocorrélation d'images numériques. Ainsi les champs de déformation longitudinale (ε_{11}) et de cisaillement (γ_{13}) ont été mesurés lors des différents chargements. La figure 7 illustre ces champs pour un chargement de traction pur, cisaillement pur et un chargement combiné traction/cisaillement. Dans le but de comparer quantitativement l'évolution des déformations le long de la direction des fils de chaîne pour chaque type de chargement, des jauges virtuelles ont été appliquées sur chaque champ de déformation (trait noir plein superposé à chaque champ de déformation). Chaque valeur de ces jauges virtuelles couvre toute la largeur du barreau testé (c'est-à-dire toute l'épaisseur du composite tissé 3D). Enfin, le chemin du fil de chaîne est décrit en haut de chaque figure en pointillés afin de repérer les sommets et les creux des ondulations du tissage.

Comme on le voit sur la figure 7, tous les champs de contrainte montrent clairement une succession de séquences identiques suivant le sens de la chaîne. Le décalage entre chaque séquence répétée correspond exactement au VER du composite. Chaque type de chargement induit différents champs de déformation en lien avec la mésostructure:

- Le chargement en traction induit une déformation longitudinale quasi constante (ε_{11}) dans la direction des fils de chaîne. De plus, une composante de contrainte de cisaillement périodique (γ_{13}) apparaît. Cette composante supplémentaire peut être directement liée aux ondulations des fils de chaîne qui tendent à se réaligner dans le sens du chargement, induisant des mouvements de va-et-vient des colonnes de fils de trame. Ces mouvements relatifs induisent une contrainte de cisaillement locale entre chaque colonne de fils de trame. Sur l'ensemble du VER composite, cette composante de la contrainte de cisaillement est successivement négative sur les montées et positive sur les descentes du chemin des fils de chaîne. Elle pourrait expliquer les nombreuses fissures de la matrice orientées à $+45^\circ$ dans les montées et à -45° dans les descentes du chemin des fils de chaîne.
- La sollicitation de torsion induit une déformation de cisaillement quasi constante, ainsi qu'une composante de déformation longitudinale périodique (compression sur les montées et tension sur les descentes du chemin des fils de chaîne). Nous remarquons que le niveau de déformation de cisaillement est beaucoup plus important que dans le cas de la charge de traction.
- Une sollicitation simultanée en traction-torsion induit des champs de déformation presque équivalents à la somme algébrique de ceux induits individuellement par des charges de traction et de torsion. En conséquence, les déformations longitudinales périodiques induites par la torsion diminuent lors des montées et augmentent dans les descentes du fil de chaîne. Ainsi, un niveau de déformation longitudinal plus élevé apparaît dans les descentes alors qu'il est atténué dans les montées. En ce qui concerne les champs de déformation de

cisaillement, le même phénomène se produit. Les descentes du chemin des fils de chaîne sont fortement chargées tandis que les montées sont soulagées. Cette sommation des champs de déformation explique le fait que seules les zones comprises dans la descente du chemin des fils de chaîne concentrent l'endommagement.

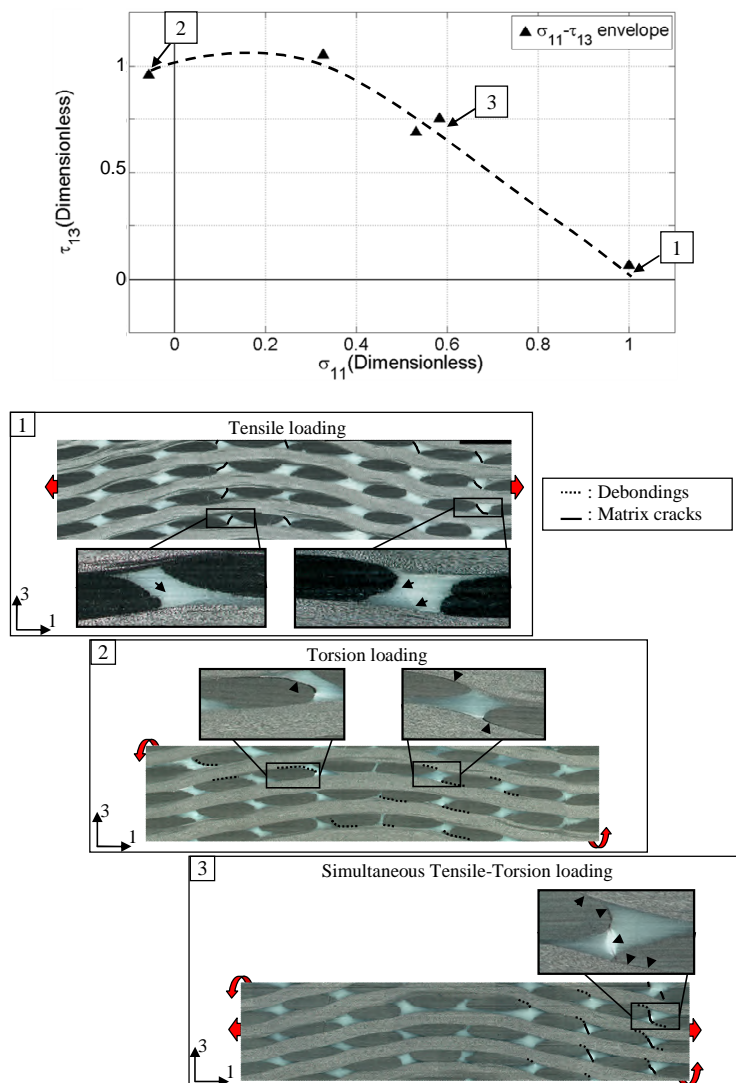


Figure 6 : Enveloppe du premier endommagement dans le plan (1,3) avec les mécanismes d'endommagements associés

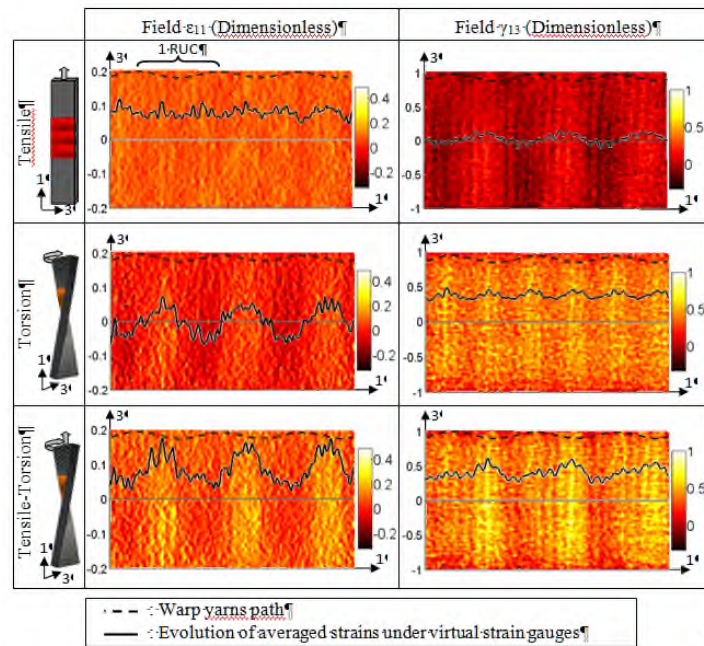


Figure 7 : Champs de déformation longitudinaux et de cisaillement mesurés en fonction de la nature de la sollicitation

5. Conclusion

Dans cette étude, une méthodologie expérimentale a été mise au point afin d'identifier expérimentalement l'enveloppe du premier endommagement d'un matériau composite à renfort tissé 3D soumis à un chargement biaxial traction/torsion. Cette méthodologie utilisant une multiinstrumentation (EA, CIN, observation in-situ) a permis d'identifier le seuil d'endommagement pour chaque rapport de chargement et le type d'endommagement induit. Il en ressort que la combinaison de chargement, d'un point de vue type et localisation, ne se résume pas à une addition des modes d'endommagement induit par chaque type de sollicitation. Ainsi il est apparu que la traction/torsion concentre les endommagements dans une zone bien précise du VER et décharger une autre zone, alors que les sollicitations pures génèrent des endommagements plus diffus.

L'explication de ce phénomène a été proposée grâce à l'exploitation des champs de déformations en relation avec la mésostructure du matériau. La prise en compte de la mésostructure est le paramètre clé pour la compréhension du comportement de ces matériaux sous chargement multiaxial.

Les résultats expérimentaux de cette étude sont actuellement utilisés pour identifier les paramètres multiaxiaux du modèle macroscopique phénoménologique ODM de l'ONERA (Onera Damage Model) [13] [27]

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Safran Aircraft Engines pour sa participation à ces travaux de recherches. Ce travail a été financé dans le cadre du projet de recherche français PRC Composites financé par la DGAC et associant le groupe SAFRAN, l'ONERA et le CNRS.

Références

- [1] B.N. Cox, M.S. Dadkhah, W.L. Morris, and J.G. Flintoff, "Failure mechanisms of 3D woven composites in tension, compression, and bending.," *Acta Metallica Materialia*, vol. 42, no. 12, pp. 3967-3984, 1994.
- [2] P.J. Callus, A.P. Mouritza, M.K. Bannisterb, and K.H. Leong, "Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites," *Composite part A : Applied science and manufacturing*, vol. 30, pp. 1277-1287, 1999.
- [3] C. El Hage, "Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel.," Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, PhD Thesis 2006.
- [4] C. Davy and D. Marquis, "A multiaxial failure criterion for a brittle orthotropic composite," *Material and design*, vol. 24, pp. 15-24, 2003
- [5] K. Behera and B.P. Dash, "Mechanical behavior of 3D woven composites," *Materials and Design*, vol. 67, pp. 261–271, 2015.
- [6] C. Davy and D. Marquis, "A multiaxial failure criterion for a brittle orthotropic composite," *Material and design*, vol. 24, pp. 15-24, 2003.
- [7] S.G. Lekhnitskii, *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, Holden-Day Inc., Ed. San Francisco, 1963
- [8] N. Tableau, Z. Aboura, K. Khellil, L. Marcin, and F. Bouillon, "Accurate measurement of in-plane and out-of-plane shear moduli on 3D woven SiC-SiBC material," *Composites Structures*, vol. 172, pp. 319-329, July 2017