HAL
open science

Suivi d'essais de fatigue bi-axiale sur des composites stratifiés

Damien Busca, Marina Fazzini, Bernard Lorrain, Sébastien Mistou, Moussa Karama, Marie-Laetitia Pastor

To cite this version:

Damien Busca, Marina Fazzini, Bernard Lorrain, Sébastien Mistou, Moussa Karama, et al.. Suivi d'essais de fatigue bi-axiale sur des composites stratifiés. 13ème colloque international francophone sur les "Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie" - CMOI2013, Nov 2013, Orléans, France. pp.1. hal-01025714

HAL Id: hal-01025714

https://hal.science/hal-01025714

Submitted on 21 Jul 2014

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.

Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)
OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID : 11868

To cite this version : Busca, Damien and Fazzini, Marina and Lorrain, Bernard and Mistou, Sébastien and Karama, Moussa and Pastor, Marie-Laetitia Suivi d'essais de fatigue bi-axiale sur des composites stratifiés. (2013) In: 13ème colloque international francophone sur les "Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie" - CMOI2013, 18 November 2013 - 22 November 2013 (Orléans, France).

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Suivi d'essais de fatigue bi-axiale sur des composites stratifiés

***D. Busca*[1], *M. Fazzini*[1], *B. Lorrain*[1], *S. Mistou*[1,2], *M. Karama*[1] *and M.L. Pastor*[3]**

(1) Université de Toulouse, INP,
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Laboratoire Génie de Production, 47 avenue d'Azereix, BP 1629 65016 TARBES CEDEX, FRANCE
(2) Nimitech Etudes, Parc Industriel de la Haute Bigorre, 1 Avenue des victimes du 11 juin 1944, 65200 BAGNERES DE BIGORRE, France
(3) Université de Toulouse, UPS, IUT Tarbes, Institut Clément Ader, 1 rue Lautréamont, BP 1624 65016 TARBES CEDEX

1. Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Beaucoup d'expériences ont été réalisées pour élaborer des modèles permettant de réaliser le dimensionnement très poussé de structures en composites. Cependant très peu d'essais ont été faits pour déterminer le comportement de ces matériaux sous un état de contraintes bi-axial dû à une sollicitation bi-axiale, et encore moins pour le comportement en fatigue bi-axiale. La machine de fatigue bi-axiale présente au LGP autorise la réalisation d'essais sur des éprouvettes bi-axiales. Un des challenges avec ces éprouvettes est d'obtenir un état de bi-axialité des contraintes dans la plus grande zone possible. Etant donnée l'absence de standard, un nouveau type d'éprouvette est conçu et fabriqué en utilisant un procédé innovant (LRI). Un dispositif d'essai spécifique est mis en place pour le suivi des essais. La stéréo-corrélation d'images semble un moyen approprié pour suivre ces essais car elle permet de mesurer le champ des déplacements sur la totalité de la surface de l'éprouvette. La thermographie Infrarouge est un moyen d'essai de plus en plus utilisé pour le suivi d'essais mécaniques, et en particulier en fatigue. Elle permet de détecter l'endommagement et aussi de quantifier les phénomènes thermomécaniques tels que l'hystérésis ou l'augmentation des contraintes dans le matériau. Elle propose aussi d'observer un champ de température sur la totalité de la surface de l'éprouvette. Une utilisation combinée de ces deux systèmes permet donc d'avoir accès à un nombre important de données pour le suivi complet des essais de fatigue sur ces matériaux.

2. Caractérisation du matériau de l'étude et du procédé de fabrication

Le matériau choisi pour l'étude est un composite carbone/époxy. Le procédé de fabrication choisi est l'infusion de résine liquide (LRI). Le but ici est de montrer la faisabilité d'une éprouvette spécifique pour réaliser des tests en bi-axial en utilisant un procédé innovant et de plus en plus utilisé dans l'industrie. Le principe de ce procédé est d'infuser la résine par voie liquide dans des tissus secs préalablement drappés. Dans notre cas, une étape préalable de pré-formage est nécessaire. Le tissu utilisé est un tissu poudré avec de la résine thermoplastique. Le pré-formage consiste à drapper les plis et leur faire subir un premier compactage tout en les chauffant. Le poudrage va alors permettre de lier les plis entre eux et limiter leur mouvement relatif lors de l'infusion.

Le tissu utilisé est un tissu carbone sergé pratiquement équilibré (presque les mêmes caractéristiques dans le sens chaîne et le sens trame) référencé sous le nom de Hexforce 48302. La résine est une résine époxy bi-composant spécialement fabriquée pour des procédés d'infusion fabriquée par Sicomin et référencée sous le nom SR1710.

Pour déterminer la validité d'un procédé, il est nécessaire de caractériser le matériau obtenu de différentes façons. La première est une caractérisation mécanique, qui va permettre de déterminer toutes les constantes de l'ingénieur du matériau, qui sont les modules d'élasticité (module d'Young et

de cisaillement) et les coefficients de Poisson. Pour cela, une série d'essais de traction dans le sens chaîne, le sens trame et à 45° ont été réalisés. Dans chaque cas, 5 éprouvettes normalisées ont été testées. La mesure des déplacements lors de ces essais a été effectuée simultanément en utilisant des jauges d'extensométrie et la corrélation d'images numériques (DIC). Les caméras pour la DIC ont été placées d'un côté de l'éprouvette, et un mouchetis a été dessiné sur la face correspondante. Les jauges ont été collées sur la face opposée de l'éprouvette. La comparaison de ces résultats a permis d'affirmer l'absence de phénomènes parasites, tels que la flexion, qui viendraient perturber les mesures. Ces essais ont permis de déterminer les constantes de l'ingénieur dans le plan du composite.

Pour avoir accès aux constantes hors du plan, des essais complémentaires par mesures de vitesses ultrasonores par contact ont été nécessaires. Pour réaliser ces mesures, il est nécessaire de posséder des coupons épais pour obtenir une précision suffisante dans la mesure de la vitesse des ondes ultrasonores. Pour cela, une éprouvette épaisse a été réalisée (60 plis de carbone). La totalité de ces essais ont permis d'avoir accès à toutes les constantes de l'ingénieur (Cf. Tableau 1) et de caractériser complètement le matériau.

E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
65500	69000	12000	0.06	0.17	0.17	3600	4530	4530

Tableau1
Constantes de l'ingénieur du matériau étudié

Le deuxième type de caractérisation a été une caractérisation morphologique, en déterminant les taux volumiques de porosité, de fibres et de résine. Pour cela, la méthode choisie a été la dissolution de résine par attaque chimique, qui est une méthode normalisée. Des échantillons ont été prélevés dans les plaques produites pour réaliser ces mesures. Les résultats obtenus montrent un faible taux volumique de porosité (de l'ordre de 2%), ce qui est un bon résultat pour le type de procédé choisi.

Enfin, le dernier type de caractérisation réalisé a été la mesure de la température de transition vitreuse (Tg). La méthode utilisée a été la mesure par enthalpie différentielle connue sous le nom de DSC. Les résultats obtenus montrent une Tg aux alentours de 87°C ce qui est conforme avec la température donnée dans la fiche technique de la résine.

3. Design d'une éprouvette spécifique pour des essais de traction bi-axiale

Le design des éprouvettes a été réalisé en utilisant la méthode de calcul par éléments finis. Certains types d'éprouvettes ont déjà été élaborés dans la littérature [1,2,4]. Ces géométries ont servi de base à l'élaboration du nouveau design d'éprouvettes.

La plupart des éprouvettes conçues possèdent une réduction de l'épaisseur dans la zone centrale. Un modèle en 3 dimensions a été donc préféré à un modèle plaque 2D pour bien représenter les singularités géométriques liées à cette variation de l'épaisseur. Devant les symétries liées au tissu, à l'empilement des plis et à la géométrie de l'éprouvette, le modèle traité ne représente qu'un huitième de l'éprouvette, en prenant en compte les symétries suivant les 3 plans principaux de l'espace. La validité de cette hypothèse a été vérifiée en conduisant les calculs sur un modèle représentant une éprouvette complète. Les résultats ont été identiques pour les deux modèles.

Les critères de design utilisés pour la conception de l'éprouvette ont été :

- Concentration des contraintes dans la zone centrale de l'éprouvette
- Rupture finale de l'éprouvette dans la zone centrale
- Zone centrale plane pour permettre la corrélation d'images
- Adaptabilité au procédé de fabrication (LRI)
- Adaptation aux mors de la machine d'essais

Différents paramètres ont été testés pour arriver à répondre à ces besoins. Les principaux ont été :

- Le nombre de plis dans la zone centrale ainsi que le nombre de plis de renfort utilisés

- La forme et la taille de la zone centrale

- La largeur des bras de l'éprouvette

- La forme du raccord entre les bras de l'éprouvette (angles de la zone centrale)

Le modèle réalisé possède un élément fini dans l'épaisseur du pli. Le maillage est raffiné aux alentours de la zone centrale et la taille des éléments augmente lorsque l'on s'approche la zone de l'éprouvette prise dans les mors de la machine d'essai. Les paramètres précédemment cités ont été testés indépendamment jusqu'à obtenir l'effet désiré.

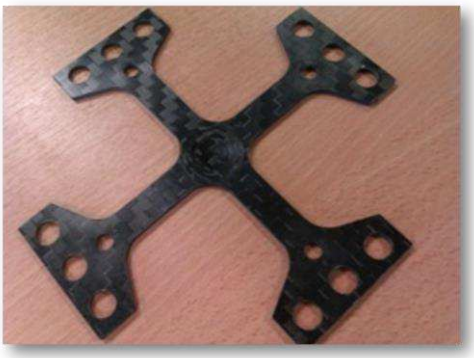

Figure 1
Nouveau design d'éprouvette cruciforme en composite

4. Fabrication de l'éprouvette

L'enjeu a été de réaliser une stratégie d'infusion qui permette de répondre à toutes les exigences de l'éprouvette, à savoir une épaisseur maitrisée pour assurer des taux de fibres et de résine constants et répétables, une intégration directe de la réduction de l'épaisseur de la zone centrale durant la phase d'infusion. Une stratégie a donc été mise au point avec l'aide de la société Nimitech études. Un moule spécifique a été conçu. Le principe est de réaliser une plaque possédant localement une réduction de l'épaisseur, dans laquelle l'éprouvette sera détourée. L'insertion de locatings dans les moule permettent de localiser précisément le détourage par rapport à la réduction d'épaisseur incluse dans la plaque.

5. Validation du modèle éléments finis

Cette étape consiste à réaliser un essai de traction bi-axiale sur l'éprouvette réalisée. Il s'agit lors de cet essai de rester dans le domaine élastique de l'éprouvette et de mesurer pour différents chargements les déplacements en fonction de l'effort appliqué. Une corrélation est ensuite faite avec le modèle éléments finis. Cette étape possède une double vocation car elle va servir en même temps à valider le modèle éléments finis et le design de l'éprouvette.

La mesure des déplacements se fait en utilisant la stéréo-corrélation d'images numériques. Le logiciel Aramis utilisé pour les calculs de stéréo-corrélation permet aussi de calculer les déformations en fonction des déplacements mesurés. Ces sont ces champs de déformations qui ont servi à la corrélation entre le modèle et l'expérience. Les résultats obtenus ont permis d'accepter le design de l'éprouvette ainsi que le modèle.

6. Le suivi d'essais de fatigue bi-axiale sur des matériaux composites

Dans cette partie, le but est d'arriver à élaborer une procédure de suivi d'essais mécaniques de fatigue bi-axiale mettant en jeu les éprouvettes précédemment conçues. L'idée est de collecter un maximum d'informations permettant d'analyser le comportement du matériau lors d'une sollicitation en fatigue.

Le premier moyen d'essai utilisé est la stéréo-corrélation rapide d'images numériques. La stéréo-corrélation d'images numériques est une méthode de mesure de champs de déplacements qui permet d'avoir accès aux déplacements en 3D de la surface d'un objet lors d'une sollicitation [4]. La stéréo-corrélation d'images numériques est en fait l'association de 2 concepts qui sont la stéréo-vision et la corrélation d'images numériques. L'idée de la stéréo-vision est de filmer la surface de l'objet en utilisant deux caméras placées sous deux angles différents. L'association d'images prises par les deux caméras à un instant donné permet d'avoir des données concernant la morphologie de cette surface en 3 dimensions. La corrélation d'image consiste à apparier deux images provenant de la même caméra prises à deux instants distincts, un état dit de référence et un état déformé, de comparer les variations de cette surface et d'en déduire les champs de déplacements en 2 dimensions. Il est nécessaire de réaliser un mouchetis sur la surface à mesurer pour permettre ces mesures.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la méthode de stéréo-corrélation rapide d'images numériques. Cette méthode consiste à utiliser deux caméras rapides pour acquérir les images. Lors d'une sollicitation dynamique, comme par exemple une sollicitation cyclique lors d'un essai de fatigue, il est intéressant d'obtenir des données tout au long d'un cycle de sollicitation sans avoir à stopper l'essai. L'utilisation de caméras rapides permet d'acquérir des images au cours de l'essai sans stopper la machine, même en utilisant des fréquences de sollicitation élevées. Avec ces caméras, la fréquence d'acquisition peut atteindre 5400 images/seconde en pleine résolution.

Le second moyen d'essai utilisé est la thermographie infrarouge. En effet, certains phénomènes qui entrent en jeu lors de la sollicitation en fatigue ont pour effet de dégager de la chaleur. Parmi ces phénomènes, nous pouvons citer la thermo-élasticité, l'endommagement ou l'hystérésis. Le fait de placer une caméra infrarouge permettra de capter en temps réel et pendant toute la durée de l'essai les variations de température à la surface du l'éprouvette testée sur la totalité de cette surface. Par la suite, une tentative d'attribution de ces variations de température à différents phénomènes thermo-mécaniques sera menée.

Lors de notre étude nous avons décidé de placer les deux systèmes de stéréo-corrélation et de thermographie infrarouge de part et d'autre de l'éprouvette testée pour les utiliser simultanément sur un même essai (Cf. figure 2). Une tentative de corrélation entre les deux méthodes pour l'identification de phénomènes physiques sera ensuite menée.

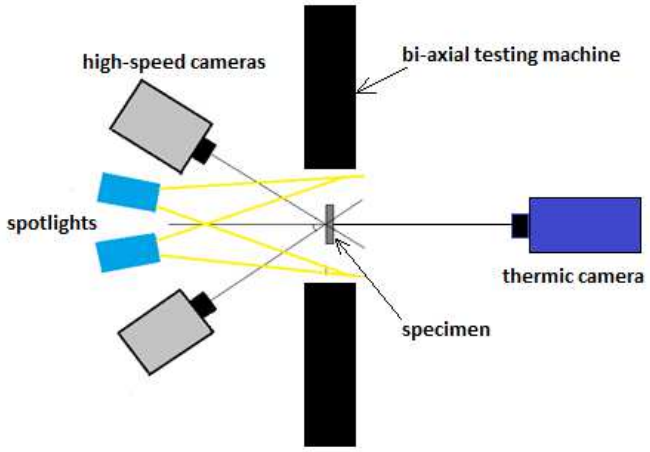

Figure 2
Dispositif pour le suivi d'essais de fatigue bi-axiale

7. Description de l'essai réalisé

L'essai réalisé est une sollicitation cyclique bi-axiale de l'éprouvette. L'éprouvette est sollicitée avec une force oscillant entre 2 et 8kN, à la fréquence de 5Hz. La durée totale de l'essai est 5000 cycles. L'éprouvette est sollicitée dans son domaine élastique, relativement loin de sa limite à rupture. Nous n'attendons donc pas de dommage sur cette éprouvette. Cet essai a pour vocation principale de stabiliser la procédure de suivi d'essai et pas de représenter un essai de fatigue en tant que tel.

Les deux systèmes de stéréo-corrélation d'images numériques et de thermographie infrarouge sont disposés de part et d'autre de la machine d'essai pour permettre de collecter des données simultanément. Le déclenchement de ces systèmes se fait automatiquement en utilisant un signal analogique envoyé par la machine d'essai.

Pour la stéréo-corrélation d'images numériques, le choix a été fait d'envoyer un signal de déclenchement tous les 50 cycles. Lorsque le système reçoit le signal, 50 images sont prises à la fréquence de 250Hz, ce qui implique que les 50 images permettent de couvrir un cycle de sollicitation complet. Il sera ainsi possible d'accéder aux déplacements sur la surface de l'éprouvette à n'importe quel moment du cycle.

Pour la thermographie infrarouge, le choix a été fait de maintenir une acquisition constante d'images. Le système est déclenché une fois en début de manipulation et une image est prise à chaque cycle, au même moment du cycle. Cela permet de mesurer l'évolution de la température au cours de l'essai pour une même sollicitation.

8. Résultats

Le but de mesurer les déplacements à la surface d'une éprouvette durant un essai de fatigue est de détecter une éventuelle baisse de de la rigidité du matériau qui serait un signe d'endommagement. Les mesures de déformations pour différents cycles au cours de l'essai sont présentées sur la figure 3. Il s'agit des déformations dans la direction X, parallèle au sens chaine, moyennées sur une petite zone située au centre de l'éprouvette.

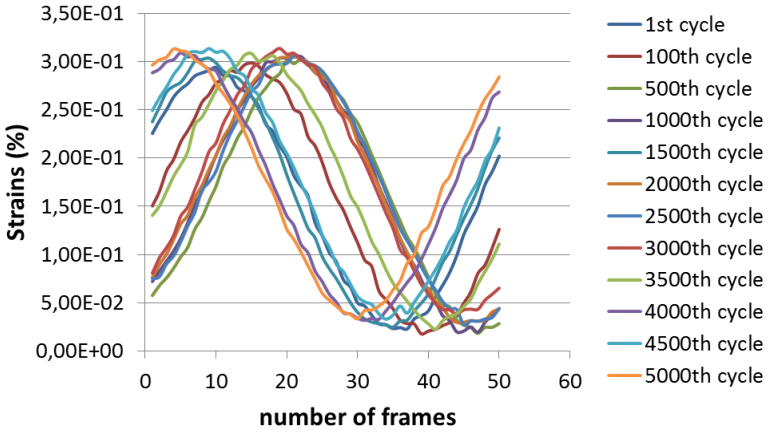

Figure 3
Evolution des déplacements mesurés pour différents cycles

IL est tout d'abord notable que les courbes ne se superposent pas parfaitement. Ce phénomène est explicable par le type de signal utilisé. En effet, les caméras sont déclenchées par un signal analogique envoyé par la machine. La faible précision de ce type de déclenchement entraine une faible variation du délai de déclenchement. Ceci n'est pas un problème car les 50 images prises permettent de reconstruire le cycle dans son intégralité. Cependant de ce fait, il n'est pas possible d'attribuer un numéro d'image à un moment précis du cycle. Ainsi, pour mesurer l'évolution des déplacements à un moment donné du cycle, en fonction du nombre de cycles effectué il faut aller chercher le point manuellement, ce qui est faisable avec une bonne précision.

Les résultats provenant de la thermographie infrarouge sont affichés sur la figure 4. Ici aussi il s'agit de la température moyenne sur une petite surface au centre de l'éprouvette.

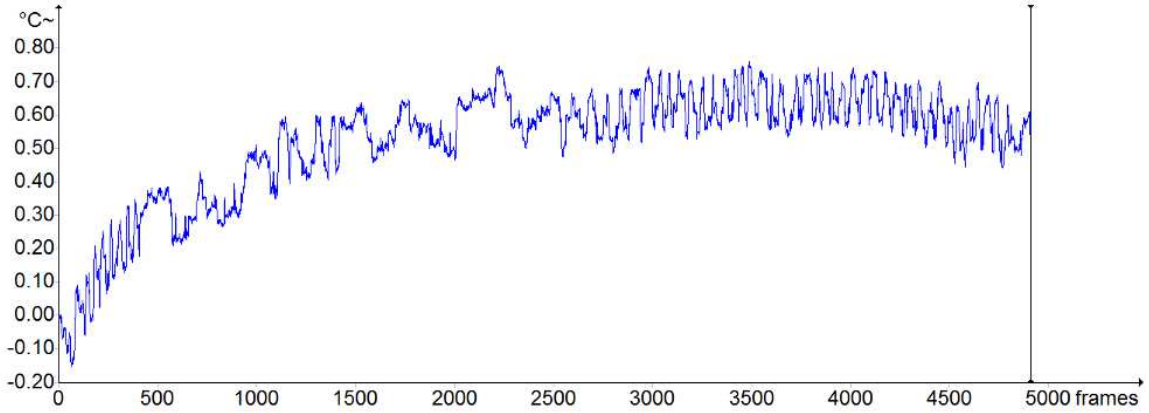

Figure 4
Evolution de la température au cours de l'essai

On note ici une augmentation globale de la température au d'environ 0.6°C avant stabilisation. Ce phénomène est classiquement observé durant des essais de fatigue et est fonction du rapport de charge appliqué [5]. On constate aussi que le signal est assez bruité. Ceci peut être expliqué par la méthode de déclenchement utilisée. Les images ne sont peut-être pas prises au même moment du cycle à cause d'un décalage éventuel entre la fréquence de déclenchement et la fréquence de sollicitation mécanique.

9. Conclusion

Une méthode spécifique de suivi d'essais en fatigue bi-axiale sur des matériaux composites a été ici présentée. Au préalable, une éprouvette a été conçue puis fabriquée. Cette méthode représente un outil puissant permettant de recueillir de nombreuses données pour l'analyse du comportement de matériaux composites. Cette méthode peut aussi être étendue à n'importe quel type de matériau. Certaines failles dans la méthode ont été identifiées, notamment le mode de déclenchement de la caméra thermique qui n'est peut-être pas adapté. Ceci fera l'objet d'améliorations lors d'études futures.

10. Bibliographie

1. A. ESCARPITA, H. ELIZALDE, R. RAMIREZ, E. LEDEZMA. S. PINHO. Modified cruciform specimen for bi-axial testing of fibre reinforced composites. *40° congreso de investigacion y desarrollo Mexico*, 232-232 , 2010

2. A. SMITS, D. VAN HEMELRIJCK, T. P. PHILIPPIDIS, A. CARDON, Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fiber reinforced composite laminates. *Composites science and technology, 66*, 964-975, 2006

3. R. BRAULT, T.DJILALI, M. FAZZINI. S. MISTOU. Bi-axial fatigue analysis by stereo-correlation measurement. *EPJ Web of Conferences 6, 16005* , 2010

4. E. LAMKANFI, W. VAN PAEPEGEM, A. MAKRIS. D. VAN HEMELRIJCK. J. DEGRIECK. C. RAMAULT. Strain distribution in cruciform specimens subjected to biaxial loading conditions - Part 1 - Two-dimentional versus 3-dimentional finite element model. *Polymer testing, 29*, 7-13, 2010

5. L. TOUBAL, Approches analytique et expérimentale de l'endommagement par fatigue d'un composite carbone/epoxy *thèse de l'Université Toulouse 3, Paul Sabatier, 2004*