

Méthode de grille : contribution à la conception d'une structure en matériaux composites en milieu industriel

Jérôme Molimard^(*), Alain Vautrin^(*), Jean-Marc Béraud^(**), Patrick Henrat^(**)

^(*) LTDS/UMR 5513/ECL/ENISE/ENSM.SE,
SMS, École des Mines de Saint-Étienne,
42023 Saint-Étienne cedex 2
^(**) Hexcel Reinforcements
38630 Les Avenières Laboratoire(s)
vautrin@emse.fr

Résumé :

L'objectif de ce papier est de contribuer à la diffusion des techniques de champ dans l'industrie mécanique. Les méthodes optiques de mesure de champs conduisent en effet à une connaissance quantitative des champs cinématiques à la surface des pièces et peuvent se révéler d'une aide efficace dans la phase de conception de structures en milieu industriel. La présente communication a pour but de souligner la richesse de cette approche à travers le cas pratique de la conception d'une structure originale, du type poutre en T, en matériaux composites hautes performances pour l'aéronautique. La première partie introduit la problématique des liaisons de préformes en vue de la réalisation de pièces complexes structurales en composites. La seconde partie présente l'essai technologique conçu permettant d'exercer une traction sur l'assemblage en T et de caractériser son comportement jusqu'à rupture, à condition toutefois de disposer d'une information quantitative et fiable. Le principe d'un essai instrumenté par grille a été retenu pour disposer d'informations suffisantes, globales et locales, et tester la faisabilité de la mise en œuvre de cette technique en milieu industriel. La troisième partie souligne la méthodologie expérimentale utilisée et l'apport de la méthode de champ tant en ce qui concerne la connaissance de l'essai que le comportement de la structure.

Abstract :

The objective is to focus on the particular application of the grid method to the design of a new parting composites for aircraft application. Optical full-field measurement methods deliver quantitative information on the deformation field of structures therefore they can be of first interest during the design phase of a new component. The particular case of an original T-beam made in composites is considered here. This type of component is quite new and testing is required to validate the solution, in that case the main point is the strength of the z-pins assembly of the fibrous preforms which is quite a novel design. The first part introduces the problem, in particular the z-pins assembly is described. The second part focuses on the experimental approach and the tensile test of the assembly is presented. In order to acquire knowledge on the assembly behaviour up to the failure the grid method is selected to obtain quantitative reliable data and localize the initial macro failure of the specimen. The third part is devoted to the experimental methodology and underline the interest of the approach both to improve the test and understand better the mechanical response of the structure.

Mots-clefs :

Méthode optique de champs, matériaux composites, assemblage

1 Introduction

1.1 Problématique

Les constructeurs aéronautiques font de plus en plus appel aux matériaux composites du type matrice polymère/fibres de carbone continues pour réduire la masse des avions. La pénétration de ces matériaux est passée de 20 % pour l'Airbus A340 à plus de 50 % pour le futur Boeing B787. La réduction des coûts de fabrication à qualité mécanique constante passe par une intégration forte des phases de conception et de fabrication : sélection concomitante des constituants, semi-produits et modes d'assemblage. La prévision des performances doit être souple pour une gamme de solutions données. Un essai représentatif du mode de sollicitation considéré comme le plus pénalisant permet une approche quantitative réaliste dans un contexte industriel. L'essai peut lui-même être en phase de développement lorsqu'il s'agit d'un système original.

Dans ce contexte, le travail porte sur la caractérisation mécanique du comportement de raidisseurs expérimentaux en Té, réalisés en composites (Hexcel Reinforcements), à l'aide d'un test d'arrachement. Une forme en Té induit une sollicitation complexe du matériau composite lui-même fortement hétérogène et anisotrope à l'échelle macroscopique. La question de l'identification des zones critiques est particulièrement difficile. Le Té est réalisé par injection d'une préforme fibreuse par de la résine, la conception de cette préforme est une phase cruciale.

La préforme est réalisée en assemblant par cloutage (*z-pinning*) plusieurs préformes élémentaires. Différents travaux expérimentaux ont porté sur l'effet du cloutage sur des structures composites. M. Grassi et al. (2003) montrent une augmentation de la rigidité dans la direction des clous, accompagnée toutefois d'une diminution des propriétés élastiques transverses. Mais surtout, l'apparition du premier endommagement est retardé en présence de clous (W. Yan et al., 2003). De même, la propagation de fissure est fortement freinée (C. Steeves et al., 1999). Cet avantage est prépondérant pour les structures nécessitant un haut niveau de sécurité. Mais ces propriétés dépendent de l'implantation des clous. Ivana Partridge et al. (2003) a montré l'influence leur orientation sur les limites d'utilisation de structures sandwich. Pour des composites à matrices polymères renforcées par fibres carbone (CFRP), la position des clous par rapport au fibres de renfort est essentielle. Des poches de résine peuvent apparaître (M. Grassi et al. (2003), les fibres se désaligner (C. Steeves et al. 1999). Des études par éléments finis ont également été menées, parfois en complément d'études expérimentales. Ce sont alors des modélisations de l'essai complet. Elles nécessitent la connaissance des propriétés élastiques dans l'épaisseur des matériaux et l'établissement d'un critère de rupture réaliste. Les données du critère de rupture sont parfois issus des essais eux-mêmes (R. Li et al., 2002 et 2003). Mais l'avantage des approches éléments finis réside dans la possibilité d'une analyse systématique de l'effet du cloutage, soit pour une configuration mécanique représentative d'un essai (W. Yan et al., 2003), soit avec une modélisation plus théoriques (Cartie et al., 2003).

Le présent article intègre une méthode optique de champ dans la phase de mise au point de la structure en Té et de l'essai de caractérisation, lui-même en phase de développement. La méthode de la grille utilisée mesure les déplacements d'une surface à l'échelle de la structure. Elle est particulièrement robuste et a pu être utilisée en milieu industriel. Un modèle éléments finis est utilisé pour évaluer l'état de déformations et de contraintes avant endommagement. In fine l'approche débouche sur une meilleure connaissance des zones critiques et identifie le mode critique d'endommagement.

1.2 Poutre en Té

La préforme fibreuse est constituée de quatre parties : deux pièces en L, une semelle et une tresse (Fig. 1). Elle mesure 650 mm de long. Chaque partie du Té est réalisée en superposant plusieurs séquences de nappes multiaxiales non-tissées de type NC2[®]. Pour construire la

semelle et les deux L, on utilise deux types de séquences : des empilements $45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ$ et $90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$. Les L comme la base sont constituées de 5 séquences alternées de chaque type d'empilement. Le voile et la base sont donc constitués de 10 empilements, soit 10 mm.

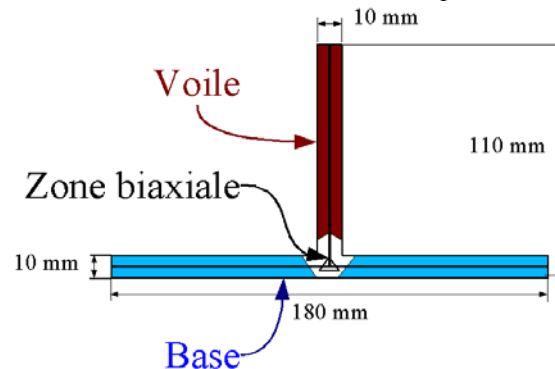


Figure 1 : assemblage en T standard (sans clou)

La zone centrale de la préforme est *a priori* une zone critique constituée par une tresse de fibres de carbone (zone biaxiale). Cette zone doit faire l'objet d'une attention particulière. Les rayons de courbure de 8 mm de part et d'autre du voile constituent aussi des zones sensibles. Compte-tenu de cette remarque, il a été proposé de renforcer la zone centrale en insérant verticalement dans la base des clous en fibres de carbone, de diamètre 0,75 mm sur 5 rangées. L'objectif final est l'optimisation de l'implantation des renforts pour réduire l'endommagement.

2 Méthode expérimentale

L'essai de caractérisation du T est un essai d'arrachement du voile jusqu'à apparition du premier endommagement (Fig. 2). La base du T est maintenue par deux plaques métalliques solidaires du bâti d'une machine de traction uniaxiale. Les conditions aux limites sont un encastrement de la base et une translation dans la direction du voile. La validité géométrique de ces conditions est contrôlée avant l'essai. En particulier, des vis de réglage permettent de plaquer les deux faces du mors mobile sans effort sur le voile ; une éprouvette instrumentée avec des jauges de déformation sur les faces latérales a permis de valider la procédure utilisée.

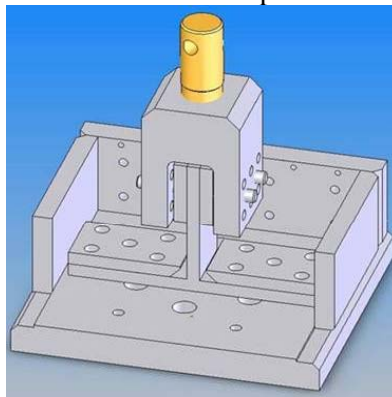


Figure 2 : montage d'arrachement en traction

La méthode de grille est une méthode optique permettant la mesure de champs de déplacements (Y. Surrel, 1994). Une grille croisée est collée sur l'échantillon (Fig. 3). Elle joue le rôle d'une porteuse de fréquence spatiale modulée en phase par les déplacements. Sous l'hypothèse de petits déplacements et de déplacements dans un plan x, y parallèle au capteur CCD, les champs de déplacements U_x et U_y sont proportionnels aux variations de phases entre

l'état initial et l'état déformé. Les facteurs de proportionnalité sont eux-mêmes proportionnels au pas de la grille suivant x et y respectivement.

La sensibilité de la méthode est donc liée au pas de la grille choisie. Sachant que la grille doit être décrite au minimum par trois pixels du capteur CCD, le champ couvert impose la sensibilité de la mesure. Dans ce qui suit, le pas de grille utilisé est de $254\ \mu\text{m}$ dans les deux directions x et y et s'étale sur 6 pixels de la caméra. Le champ couvert correspondant est donc de $55 \times 44\ \text{mm}^2$. La distance entre deux mesures statistiquement indépendantes (résolution spatiale) est de $0,51\ \text{mm}$ et la résolution de mesure $\sigma = 2,1\ \mu\text{m}$.

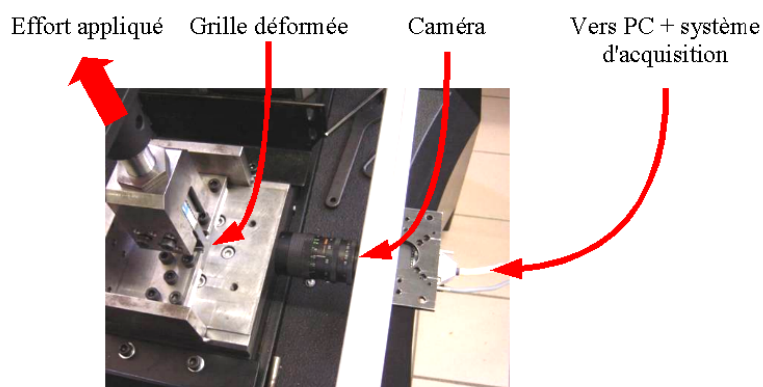
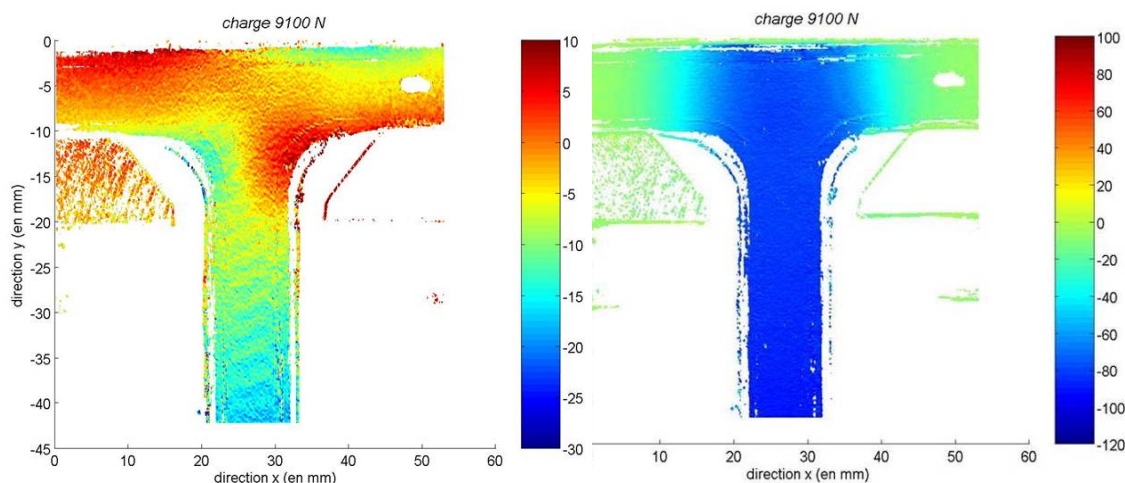


Figure 3 : Principe de la méthode de grille

Deux familles d'éprouvette ont été étudiées ; l'une dite standard et l'autre cloutée. Une grille est collée sur le champ de l'éprouvette. Trois jauges d'extensométrie unidirectionnelles, collées sur les grandes faces et le champ arrière, permettent de suivre de manière plus classique l'état de déformation. La vitesse de traction imposée est égale à $2\ \text{mm/min}$. L'essai est conduit jusqu'à la rupture de la liaison et le premier endommagement macroscopique est caractérisé par un crochet des courbes de déformations locales.

3 Analyse



Déplacement horizontal U_x

Déplacement vertical U_y

Figure 4 : Etat cinématique d'une éprouvette standard

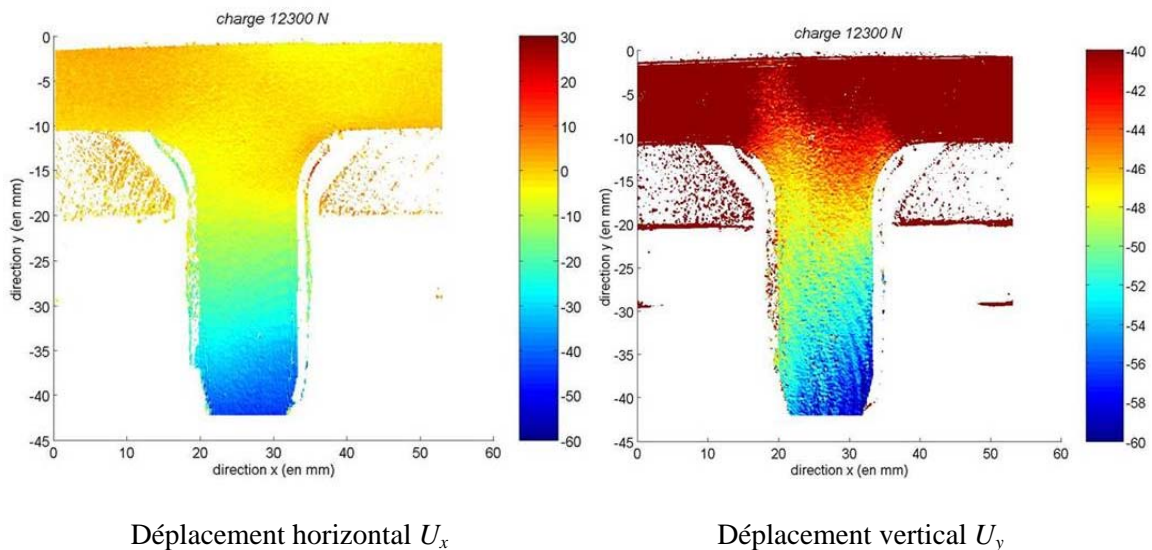
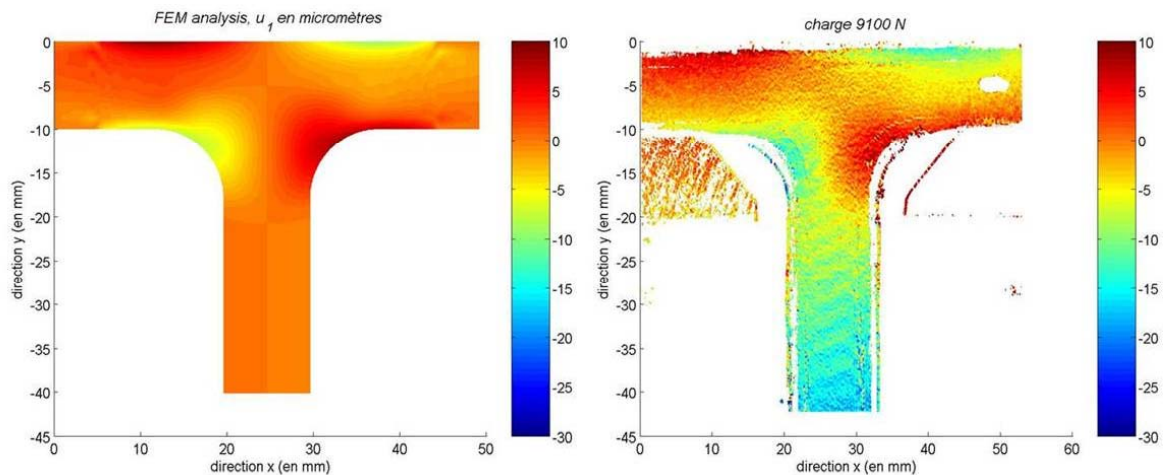


Figure 5 : Etat cinématique typique d'une éprouvette cloutée

Concernant l'éprouvette standard (Fig. 4), il apparaît que l'encastrement de la semelle n'est pas parfait (dilatation selon x), que les zones critiques sont bien situées dans les parties courbes (dilatations pratiquement symétriques) mais qu'une composante du déplacement suivant x existe. L'essai mécanique présente un défaut d'alignement et l'encastrement doit être repris. Les clous de liaison ont deux effets significatifs (Fig. 5) : limitation du déplacement U_x au pied du voile et accroissement de la rigidité locale.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques conduit *in fine* à une corrélation satisfaisante qui peut inciter à reprendre l'essai (Fig. 6) si une caractérisation mieux contrôlée et une évaluation plus fine des niveaux de premiers endommagements dans les zones de courbure sont nécessaires.

Figure 6 : Déplacements U_x ; (a) calculés par EF (Abaqus) et (b) expérimentaux

Après le premier endommagement, la méthode optique de champ permet de localiser la fissure. La figure 7 montre une discontinuité du déplacement horizontal, caractéristique d'une fissure travaillante apparue en limite de la zone de courbure droite. Une information importante pour la conception de cette pièce est que la zone centrale de la liaison, constituée d'une tresse,

n'est pas la zone la plus critique. La fissure macroscopique apparaît dans la même zone pour les éprouvettes standard et cloutée, cependant la fissure dans le cas clouté est plus proche du bord de l'éprouvette. Une analyse plus fine liant la localisation de la fissure à celle des clous devrait être entreprise.

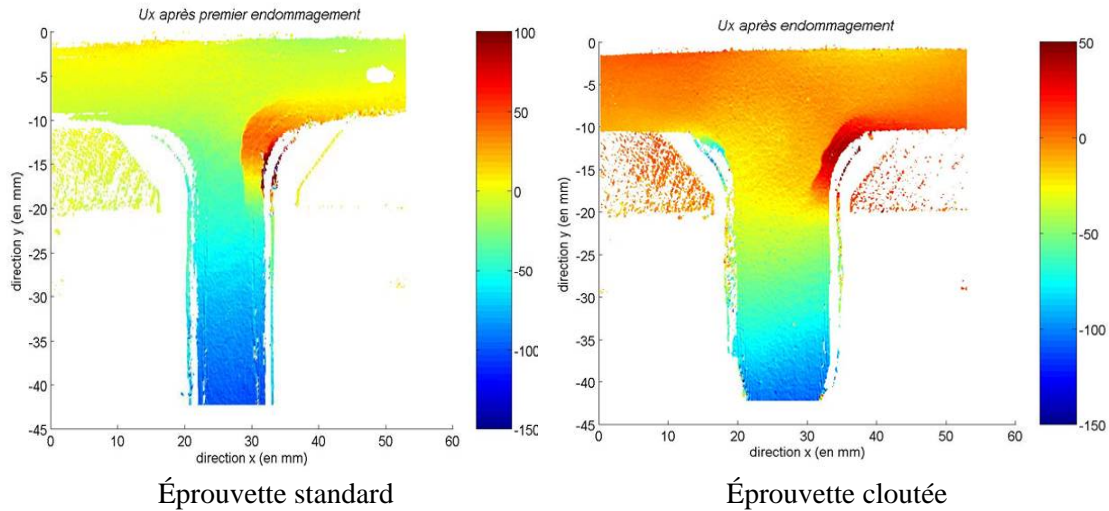


Figure 7 : Déplacement horizontal selon x après premier endommagement

4 Conclusions

L'application de la méthode de grille a très rapidement conduit dans cette phase d'essai préliminaire à la localisation des zones critiques sur une pièce complexe et à la correction de la configuration mécanique. Une corrélation avec une analyse EF a confirmé la cohérence des mesures et a ultérieurement permis de modifier l'organisation des préformes en vue de supprimer l'effet du rayon de courbure.

Références

- CARTIE D.D.R., PARTRIDGE I.K. 2003 Suppression of Propagation of delamination cracking in unidirectional composites by Z-fiber® pinning. *In application of Fracture Mechanics to polymer, adhesives and composites*,ESIS publication 33, Ed Moore.
- GRASSI M., ZHANG X. et MEO M. 2003 Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates. *Elsevier Comp. Part A : applied science and manufacturing* **33**, 1653-1664.
- LI R., KELLY D., NESS R. 2003 Application of a First Invariant Strain Criterion for Matrix Failure in Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, **37**,.1977-2000.
- LI R., KELLY D., CROSKY A. 2002 An evaluation of failure criteria for matrix induced failure in Composite Materials. *Elsevier Composite Structures*, **57**, 385-391.
- PARTRIDGE I. K., CARTIE D.D.R., BONNINGTON T. 2003 Manufacture and Performance of Z-pinned Composites. Ch 3 in *Advanced Polymeric Materials: Structure Property Relationships*, CRC PRESS, 103-138.
- STEEVES C.A., FLECK N.A.. 1999 In-plane properties of CFRP laminates containing through-thickness reinforcing rods (Z-pins). *Proceedings of ICCM12*, Paris, Juillet, 8 p.
- SURREL Y. 1994 Moiré and grid methods in optics. *SPIE*, **2342**, 213-220.
- YAN W., LIU H-Y., MAI Y-W. 2003 Numerical study on the mode I delamination toughness of z-pinned laminates. *Elsevier Comp. Science and Technology*, **63**, 1481-1493.