HAL
open science

Utilisation de la Corrélation d'Images Numériques et de la Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre pour la caractérisation mécanique de tubes obtenus par enroulement filamentaire = On the use of Digital Image Correlation and Equilibrium Gap Method for mechanical characterization of filament winding pipes

Laurent Crouzeix, Jean-Noël Périé, M. Torres, Bernard Douchin, Francis Collombet, H. Hernandez

To cite this version:

Laurent Crouzeix, Jean-Noël Périé, M. Torres, Bernard Douchin, Francis Collombet, et al.. Utilisation de la Corrélation d'Images Numériques et de la Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre pour la caractérisation mécanique de tubes obtenus par enroulement filamentaire = On the use of Digital Image Correlation and Equilibrium Gap Method for mechanical characterization of filament winding pipes. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00429798

HAL Id: hal-00429798

https://hal.science/hal-00429798v1

Submitted on 4 Nov 2009

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.

Utilisation de la Corrélation d'Images Numériques et de la Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre pour la caractérisation mécanique de tubes obtenus par enroulement filamentaire

On the use of Digital Image Correlation and Equilibrium Gap Method for mechanical characterization of filament winding pipes

L. Crouzeix[1], J.N. Périé[1], M. Torres[1], B. Douchin[1], F. Collombet[1], H. Hernández[2]

1 : ICA (Institut clément Ader)
Université de Toulouse ; INSA, UPS - 133C avenue de Rangueil, 31077 Toulouse CEDEX
Laurent.crouzeix@iut-tlse3.fr

2 : Instituto Politécnico Nacional
GAID - ESIQIE, UPALM, C.P. 07300, México

Résumé

Le procédé d'enroulement filamentaire crée un motif de tissage particulier à l'origine d'une hétérogénéité de comportement. L'objectif de ce travail est de proposer une démarche permettant d'établir à terme un lien entre l'architecture du matériau et le champ de propriétés mécaniques. Des tubes obtenus à partir de ce procédé sont multi instrumentés et testés dans un banc d'essais sur structures. Les spécimens sont équipés de jauges et la surface extérieure est suivie au moyen de deux paires de caméras CCD. Les essais sous sollicitations « simples » permettent d'obtenir des propriétés mécaniques macroscopiques moyennes. Les champs de déformation obtenus par stéréo Corrélation d'Images Numériques lors d'un essai combiné traction/flexion mettent en évidence une influence du motif local de tissage. L'idée est d'imposer ces mesures de champs en entrée d'une méthode inverse afin d'identifier des champs de contrastes de rigidité. Une déclinaison différences finies orthotrope de la Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre (MEQ) est ici utilisée. Dans un premier temps, la méthode d'identification est validée via l'utilisation de champs de déplacements simulés. Dans un second temps, la MEQ est appliquée sur des éprouvettes planes tissées, reproduisant le motif de tissage obtenu en enroulement filamentaire, sollicitées en traction. Les résultats confirment l'influence du motif de tissage sur les propriétés élastiques orthotropes.

Abstract

The filament winding process induces a particular winding pattern responsible for behaviour heterogeneities. The aim of this work is to propose an approach to establish link between the local architecture and the mechanical properties field. Pipes manufactured by using this process are multi instrumented and tested in a multiaxial testing facility. Strain gages are glued onto the specimens and two pairs of CCD cameras are monitoring the external surface. The set of "simple-loading" tests allows to get mean macroscopic mechanical properties. Strain fields measured by stereo digital image correlation during a combined traction/bending test bring to light the influence of the local winding pattern. The idea is now to use these full field measurements as entries of an inverse method in order to get fields of rigidity contrasts. A finite difference form of the Equilibrium Gap Method is here used. The identification procedure is validated by using simulated displacement fields. The EGM method is applied on flat specimens that represent the winding pattern created by filament winding submitted by tensile tests. Results confirm the influence of the winding pattern onto the elastic orthotropic properties.

Mots Clés : Enroulement filamentaire, essais structuraux, mesures de champs, méthode de l'écart à l'équilibre
Keywords : Filament winding, structural tests, full field measurement, Equilibrium Gap Method

1. Introduction

Les structures composites sont par nature hétérogènes. Ceci conduit bien souvent à des variations de comportement mécanique à différentes échelles qui peuvent être plus ou moins marquées. Dans certains cas, du simple fait par exemple de son architecture fibreuse, le concept de séparation d'échelles ne peut pas être mis en avant et les techniques d'homogénéisation classiques ne peuvent plus être appliquées. Le matériau peut par ailleurs présenter des singularités consécutives au procédé. Enfin, du fait du procédé d'élaboration et de la géométrie retenue, on ne peut parfois pas produire d'éprouvettes élémentaires représentatives et le matériau ne peut être étudié que dans sa structure mère. Les tubes obtenus par enroulement filamentaire étudiés dans ce travail présentent l'ensemble de ces complexités. Constituées de fibres de verre et d'une matrice époxy, ces structures sont destinées à être utilisées par l'IFREMER pour des recherches en eaux profondes.

L'enroulement filamentaire est l'un des plus anciens procédés d'élaboration de structures composites [7]. Destiné à la production de structures de révolution, il consiste en un bobinage d'un filament (ou d'une mèche constituée de plusieurs filaments) imprégné de résine sur un mandrin tournant autour de son axe (voir Fig. 1a). Dans l'enroulement par « voie humide », le filament de renfort (généralement verre ou carbone) est préimprégné avant son bobinage par la résine choisie (généralement époxyde) dans un bac de préimprégnation. La combinaison du mouvement de rotation du mandrin sur lequel s'enroule le filament et des déplacements du support fournissant le filament crée un tissage particulier. La superposition des différents filaments entre passes successives crée ici au niveau du pli un motif de tissage particulier. On peut notamment noter que le motif général est créé par la répétition d'un motif de base, appelé cellule élémentaire de tissage (Fig. 1b).

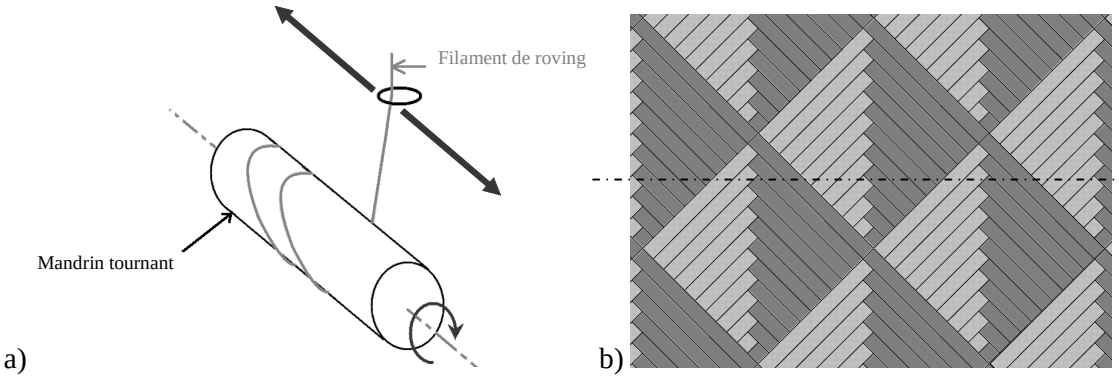

Fig. 1. a) Procédé d'enroulement filamentaire, b) motif de tissage produit par l'enroulement filamentaire

Les techniques de mesures de champs de déplacements permettent d'observer l'effet de contrastes de comportement mécanique entre les différentes zones d'une éprouvette composite et semblent adaptées à l'étude de structures produites par enroulement filamentaire. Peu de méthodes inverses basées sur ces mesures permettent d'évaluer ces variations, en particulier dans le cas de matériaux orthotropes. L'objectif de ce papier est de proposer une démarche permettant d'établir des cartes de champs de propriétés utilisables in fine pour le calcul de structures. Dans un premier temps, des essais réalisés sur tubes sont présentés, les résultats des mesures exploités et commentés. Dans un second temps, une déclinaison adaptée aux matériaux orthotropes de la Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre est proposée. Enfin, une première application à des éprouvettes planes tissées reproduisant le motif des tubes illustre l'apport de la méthode.

2. Essais structuraux sur tube

Afin de caractériser les propriétés mécaniques moyennes de tubes réalisés par enroulement filamentaire, un certain nombre d'essais structuraux sont conduits sur un tube. Le tube étudié a été produit de manière à mettre en avant l'influence du motif de tissage sur le comportement mécanique de ce type de structure [4-8]. Devant la difficulté de créer une éprouvette représentative simple et plane reprenant toutes les problématiques de ce type de tissage, l'objet des études mécaniques ne pouvait être que la structure elle-même. Il apparaît en effet difficile de réaliser une structure plane recréant la cellule en respectant les propriétés physico-chimiques de la structure réelle. L'éprouvette considérée est constituée de 14 plis de fibre de verre de type E présentée sous la forme d'un roving de 1200 tex (principalement pour des raisons économiques et d'approvisionnement) et d'une résine constituée d'un mélange d'araldite LY 5052 et d'un durcisseur HY 5052. L'épaisseur ainsi obtenue est d'environ 4.4 mm, pour une longueur de la zone courante de 280 mm et un diamètre intérieur de 125 mm. L'orientation des fibres se fait suivant un angle de ±55° par rapport à l'axe du tube obtenu (Fig. 2a). De plus, la programmation de la machine d'enroulement est conçue

de manière à superposer les motifs de tissage dans l'épaisseur d'un pli à l'autre, afin de maximiser l'influence de ces motifs sur le comportement mécanique (Fig. 2b).

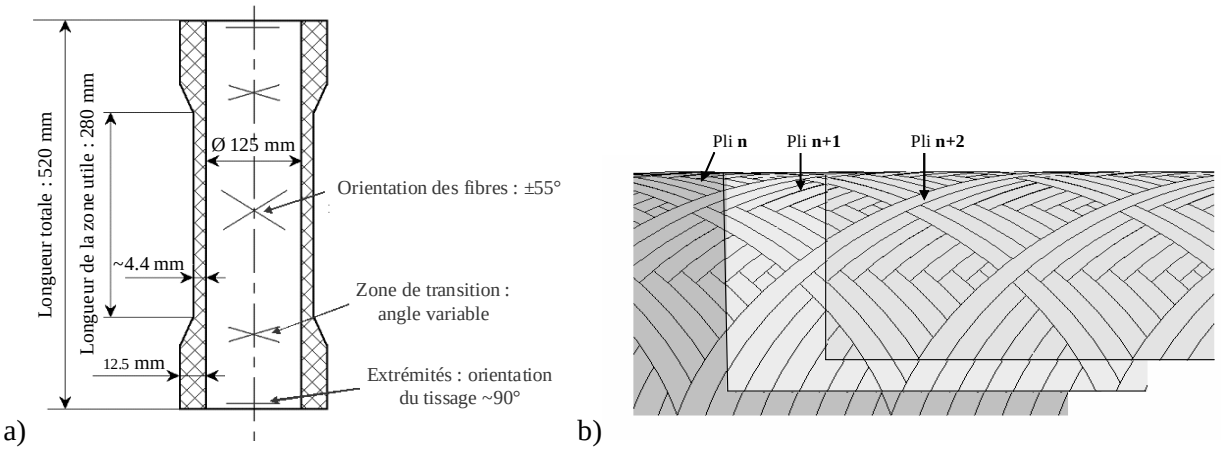

Fig. 2. a) Géométrie des tubes testés; b) superposition des motifs de tissage dans l'épaisseur.

Les essais mécaniques effectués sur ces éprouvettes sont répartis en deux familles : des essais "conventionnels" de traction, torsion et pression externe, ainsi que des essais combinés de torsion/flexion et traction/flexion. L'ensemble des essais effectués a été suivi par des jauges de déformation collées sur la face intérieure de l'éprouvette tubulaire, ainsi que par deux paires de caméras CCD filmant la face externe de l'éprouvette à deux échelles. Une paire de caméra observe une génératrice sur toute sa longueur (paire de caméras B, voir Fig. 3) alors que la deuxième paire s'intéresse au comportement d'une « cellule élémentaire » résultante du motif de tissage (paire de caméras A).

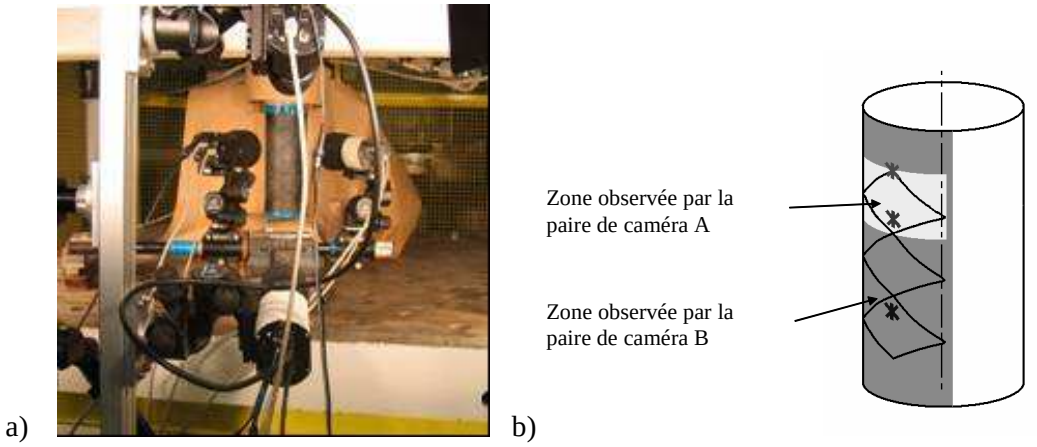

Fig. 3. a) essai multi instrumenté sur éprouvette tubulaire b) position relative des zones observées par mesures de champs.

Pour la paire de caméras A, la taille *S* de l'imagette (ZOI) est fixée à 31 x 31 px^2 et le pas *p* entre deux points de mesures à 10 px. La résolution de l'image *g* est estimée à 0.0802 mm/px, ce qui donne une résolution spatiale *S x g* de 2.48 mm. En ce qui concerne la paire de caméras B à l'échelle dite « macroscopique », la taille de fenêtre *S* est fixée à 25 x 25 px^2 et le pas *p* à 5 pixels. La résolution de l'image *g*, estimée à 0.183 mm/px, conduit à une résolution spatiale *S x g* de 4.56 mm.

Les essais de traction, torsion, combinés à un essai de pression externe effectué sur une éprouvette similaire testée en enceinte hyperbare par l'IFREMER, donnent accès à l'ensemble des propriétés mécaniques homogénéisées de l'éprouvette supposée homogène (Tab. 1). Cette identification, effectuée à partir des déformations moyennes mesurées lors de chacun des essais, est conduite par une optimisation multicritère, en considérant l'éprouvette constituée d'un matériau orthotrope hétérogène, possédant pour axes d'orthotropie la direction de l'axe du tube *z*, la direction radiale *r* et orthoradiale *θ*. Une seconde optimisation multicritère permet ensuite d'identifier les propriétés mécaniques du pli, en supposant l'éprouvette constituée de 14 couches orientées à ±55° et en cherchant les propriétés du pli élémentaire qui fournissent les propriétés homogénéisées les plus proches des propriétés identifiées, en utilisant les équations de la théorie classique des stratifiés. Un modèle E.F. de l'éprouvette tubulaire simulant l'ensemble des essais mécaniques effectués est construit en utilisant les propriétés mécaniques du pli élémentaire

identifiées. L'ensemble des résultats obtenus lors de ces deux identifications successives est résumé dans le Tab. 1.

Propriétés macroscopiques identifiées	Propriétés du pli identifiées	Cas de sollicitation	Déformations mesurées (10^{-6})	Déformations E.F. (10^{-6})
$E_z = 9{,}4$ GPa	$E_1 = 41{,}4$GPa	**Traction**	$\varepsilon_{zz} = 985$	$\varepsilon_{zz} = 933$
$E_\theta = 16{,}6$ GPa	$E_2 = 9{,}6$ GPa		$\varepsilon_{\theta\theta} = -391$	$\varepsilon_{\theta\theta} = -376$
$\nu_{z\theta} = 0{,}41$ GPa	$\nu_{12} = 0{,}25$ GPa	**Torsion**	$\varepsilon_{z\theta} = 3950$	$\varepsilon_{z\theta} = 3585$
$G_{z\theta} = 9{,}6$ GPa	$G_{12} = 3{,}6$ GPa	**Pression externe**	$\varepsilon_{zz} = -883$	$\varepsilon_{zz} = -905$
			$\varepsilon_{\theta\theta} = -2559$	$\varepsilon_{\theta\theta} = -2775$

Tab. 1. Résultats identifiés aux deux échelles (à gauche) et déformations mesurées et recalculées (à droite)

Les données obtenues permettent d'obtenir des valeurs de déformation simulées tout à fait comparables avec les valeurs mesurées. L'observation des champs de déformation mesurés par mesures de champs aux deux échelles d'observation ne démontre par ailleurs pas une forte variabilité des déformations en surface lors des essais de torsion et traction (Fig. 4a). Cependant, lors des essais combinant plusieurs types de sollicitations simultanément, des motifs de déformation apparaissent et semblent liés aux motifs de tissage locaux (Fig. 4b et 4c).

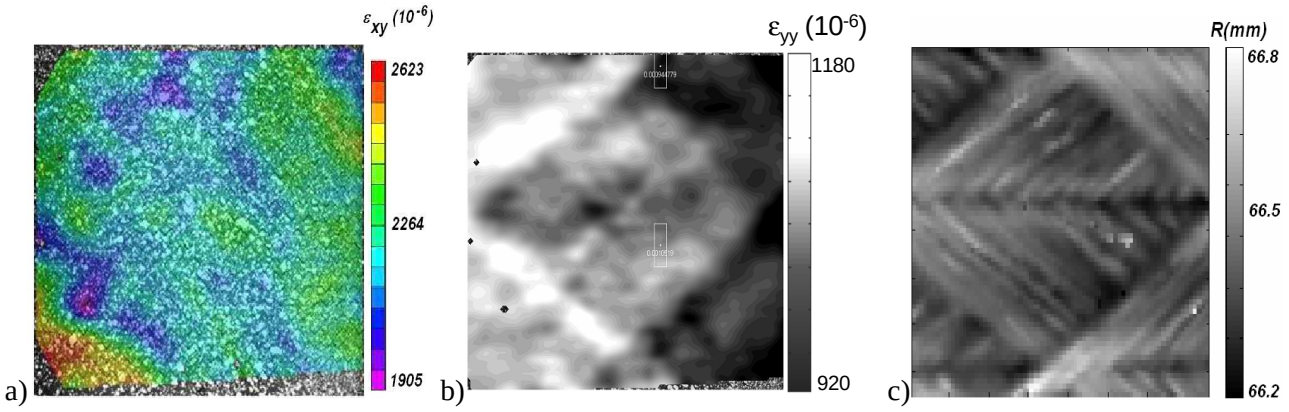

Fig. 4. a) champs de déformation de cisaillement mesuré lors d'un essai de torsion b) champ de déformation axiale mesuré lors d'un essai combiné de traction/flexion c) rayons locaux calculés par stéréovision

Les propriétés mécaniques de ce type de structures semblent non homogènes, et liées aux motifs de tissage issus du procédé particulier de l'enroulement filamentaire. Une procédure d'identification des champs de propriétés mécaniques hétérogènes à partir de mesures de champs de déplacements semble être une piste séduisante, notamment dans le but d'établir le lien entre les propriétés mécaniques locales et le motif de tissage local.

3. Identification de champs de propriétés mécaniques à partir de champs de déplacement : Méthode de l'écart à l'équilibre

Grâce aux développements de techniques de mesures de champs de déplacements fiables et polyvalentes, notamment liés à l'apparition de caméras CCD performantes et abordables [5-15], de nombreuses stratégies d'identification de propriétés mécaniques basées sur ce type d'informations sont proposées (notamment par la communauté française). La méthode de recalage par éléments finis (ou FEMU, [10-11]) permet par exemple de déterminer l'ensemble de propriétés élastiques macro d'un stratifié à partir d'un seul essai hétérogène. Générique, cette méthode est toutefois intrinsèquement itérative. D'autres méthodes dites « directes » existent comme la Méthode des Champs Virtuels [3-6]. Elle permet elle aussi d'identifier rapidement et sans utilisation de code de calculs par éléments finis des propriétés élastiques moyennes, voire des comportements non linéaires tels qu'une loi d'endommagement [1]. La plupart des méthodes proposées sont toutefois écrites pour l'identification de propriétés de matériaux au comportement homogène. Peu d'entre elles sont donc adaptées à l'étude de structures initialement hétérogènes. La Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre (MEQ) [2] permet, elle, de déterminer des champs de contrastes de propriétés élastiques (champ de module d'Young pour un matériau isotrope dans sa déclinaison initiale).

Dans sa forme discrétisée présentée dans [2], la pièce est découpée en éléments au sein desquels le contraste de propriété élastique est supposé homogène. L'écriture de l'équilibre sous une forme faible (EF), au passage d'un élément à l'autre, mène à l'élaboration de systèmes surdimensionnés. Les inconnues sont alors les contrastes dans les éléments, tandis que les données sont les déplacements mesurés (par exemple par CIN). La déclinaison de la MEQ, présentée ci après, étend l'approche aux matériaux orthotropes.

3.1 Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre en différences finies : application orthotrope

Dans ce travail, le nombre d'inconnues est donc porté à quatre par élément pour faire écho aux quatre paramètres élastiques caractéristiques d'un matériau orthotrope. Le système d'équations est ici, contrairement à la méthode précitée, construit à partir d'une approche différences finies. Ce choix limitatif a pour avantage d'obtenir des systèmes inversibles facilement malgré l'intégration de matrices de rigidité orthotropes dans les lois de comportement. De plus, par le sens « physique » des équations écrites, il est possible d'imaginer de nouvelles formes d'écriture de l'équilibre entre éléments adjacents. Cela permet d'augmenter le nombre d'équations et donc le nombre d'inconnues. Enfin, les logiciels de CIN évaluent classiquement les champs de déplacements sur une grille régulière et utilisent généralement des approches différences finies pour calculer les déformations. On garde de fait une cohérence entre l'outil de mesure et l'outil d'analyse. Sur cette grille régulière, on choisit un découpage de la surface de l'éprouvette filmée en cellules carrées et régulières. La connaissance des déplacements aux nœuds conduit, suivant les hypothèses considérées, à l'écriture de la déformation au sein de chacun des éléments. Trois écritures de l'équilibre sont utilisées pour faire intervenir un nombre suffisant d'équations.

A la manière de [2], le premier équilibre traduit concerne l'ensemble des frontières intérieures entre éléments adjacents. Au passage d'une frontière, écrire l'équilibre revient à imposer que le saut du vecteur contrainte normale doit être nul. En écrivant la contrainte en fonction des caractéristiques élastiques et des déformations dans les éléments adjacents, on obtient un lien entre les modules des deux éléments et les déplacements *mesurés*. Pour chaque cellule rectangulaire à l'intérieur du solide, on peut ainsi écrire 4×2 équations scalaires de la forme (eq. 1) :

$$\sum_{p=1}^{4} (K_{p(i,j)}.G_p(u_{i,j}, v_{i,j}) - K_{p(i+1,j)}.G_p(u_{i+1,j}, v_{i+1,j})) = 0 \qquad \text{(eq. 1)}$$

Dans ces équations $G_p(u_{i,j},v_{i,j})$ est une grandeur calculée uniquement à partir des déplacements mesurés au niveau des nœuds de l'élément i,j, $K_p(i,j)$ est fonction des propriétés mécaniques du matériau considéré. Deux autres types d'équilibre mécanique sont traduits : l'équilibre d'un élément interne au sein de la structure et l'équilibre d'un nœud interne liant quatre éléments adjacents. Ces équations d'équilibre peuvent aussi se mettre sous la forme de (1), mais elles impliquent plus d'inconnues. Le système ainsi formé pour les $4 \times n$ $K_p(i,j)$, où n représente le nombre total de cellules considérées, est résolu en pratique en recherchant des contrastes $\delta_p(i,j)$ par rapport à des rigidités de référence K_{p0} (eq. 2) :

$$K_{p(i,j)} = K_{p_o}(1 - \delta_{p(i,j)}) \qquad \text{(eq. 2)}$$

L'ensemble des écarts au module moyen $\delta_p(i,j)$ est déterminé en résolvant un système équivalent à l'aide d'un algorithme d'optimisation par gradients conjugués. Dans certains cas, les modules de référence peuvent être déterminés par comparaison entre données statiques simulées et mesurées (eg., des résultantes sur un bord).

3.2 Validation à l'aide de données simulées

Comme dans [2], la technique est validée par l'utilisation de champs cinématiques issus de simulations par E.F. Une famille de modèles EF est créée. Pour tous les modèles, une région d'intérêt (ROI) est maillée de façon régulière en éléments Q4. Dans chacun des éléments, on impose un jeu de propriétés mécaniques connu, mais non constant dans l'éprouvette virtuelle.

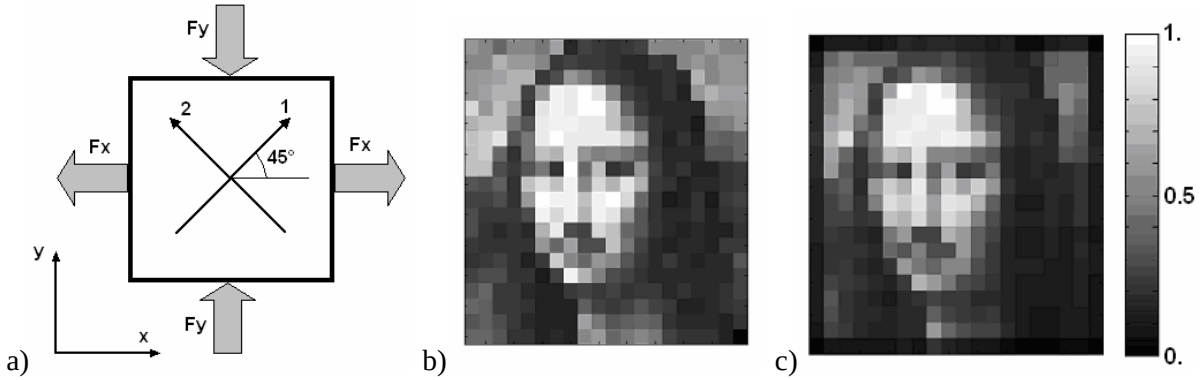

Fig. 5. a) configuration d'un essai biaxial virtuel b) champs de module de cisaillement imposé c) champs de module de cisaillement identifié.

Les déplacements nodaux obtenus sont alors utilisés en entrée de la méthode d'identification proposée, et permettent d'identifier des champs de propriétés mécaniques. On compare enfin les champs de propriétés mécaniques ainsi identifiés à ceux imposés dans l'approche par EF. Plusieurs types de sollicitations et de champs de propriétés sont testés : traction, essai biaxial, avec affectation d'un ou plusieurs modules. Une bonne corrélation entre champs imposés et simulés est obtenue.

4. Application de la MEQ à l'étude de plaques tissées

4.1 Eprouvettes planes et essais de traction

Des éprouvettes de traction sont fabriquées dans le but de reproduire, sous forme plane, l'architecture de tissage du tube (travail de stage de Mauricio Torres, 2008). Les filaments de roving sont placés manuellement un par un en respectant l'orientation des filaments dans la zone courante du tube considéré (ie à ±55°). L'ensemble a conduit à la réalisation de plaques mères (Fig. 6a) dans lesquelles sont découpées des éprouvettes de traction. Les éprouvettes sont constituées de deux plis symétriques dans l'épaisseur. Les essais de traction effectués sur ces éprouvettes sont multi-instrumentés. Une paire de caméras CCD est utilisée dans le but d'effectuer de la stéréo-corrélation d'images numériques (Fig. 6b).

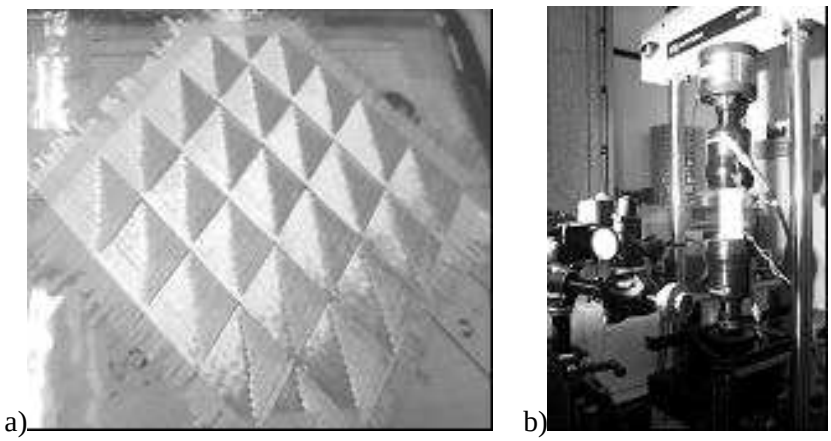

Fig. 6. a) Plaque mère tissée b) essai multi-instrumenté avec caméras CCD

Les essais de traction sont conduits jusqu'à rupture complète. Des champs de déplacements sont obtenus après stéréo corrélation à différents stades de chargement. Pour l'analyse des photos et le calcul des champs de déplacements, la taille de l'imagette (ZOI) *S* est fixée à 19 x 19 px^2 et le pas *p* entre deux points de mesures à 9 px. La résolution de l'image g est estimée à 0.13 mm/px, ce qui conduit à une résolution spatiale *S x g* de 2.47 mm. L'observation des champs de déplacement et de déformation avant l'apparition d'endommagements importants confirme les phénomènes entrevus lors des essais combinés effectués sur structures tubulaires : ces champs sont fortement hétérogènes, et semblent liés aux motifs locaux de tissage (Fig. 7).

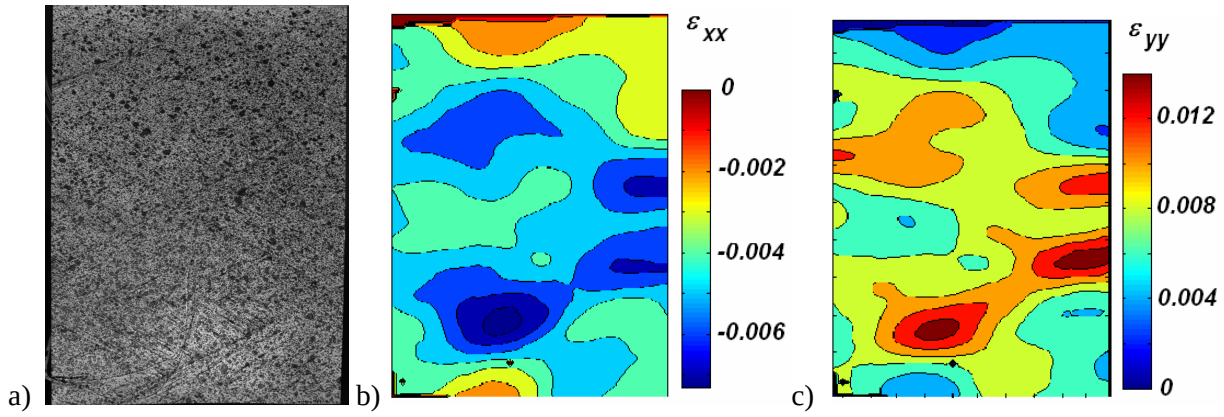

Fig. 7. a) éprouvette lors d'un essai de traction, b) et c) : champs de déformation horizontaux et verticaux

4.2 Application de l'EGM aux éprouvettes planes

Une première application de la méthode décrite précédemment pour l'identification de champs de propriétés orthotropes est effectuée sur les premiers champs de déplacements obtenus au cours de cette campagne d'essais. Les éprouvettes sont fabriquées avec des roving orientés à ±55° par rapport à la direction de traction. Le matériau est en conséquence supposé orthotrope hétérogène, avec un axe d'orthotropie fixé à 0° par rapport à la direction de traction et de géométrie de l'éprouvette. On suppose de plus un état de contraintes planes, et on vérifie l'absence de déflexions parasites. Les champs de déplacements obtenus en stéréo-corrélation via le logiciel Vic-3D® (avec une ZOI de 19 px et un pas de 9 px) sont utilisés en entrée de la méthode d'identification. Les résultats obtenus pour les quatre variables K_1, K_2, K_3 et K_4, en termes de contrastes de propriétés, sont présentés sur la Fig. 8 pour la dernière image avant apparition d'endommagement visible (en bas, de gauche à droite). Ils peuvent être comparés aux motifs de tissage déterminés par vision stéréoscopique (Fig. 8 en haut). Un lien apparaît donc entre les champs de propriétés identifiés et l'architecture locale du tissage.

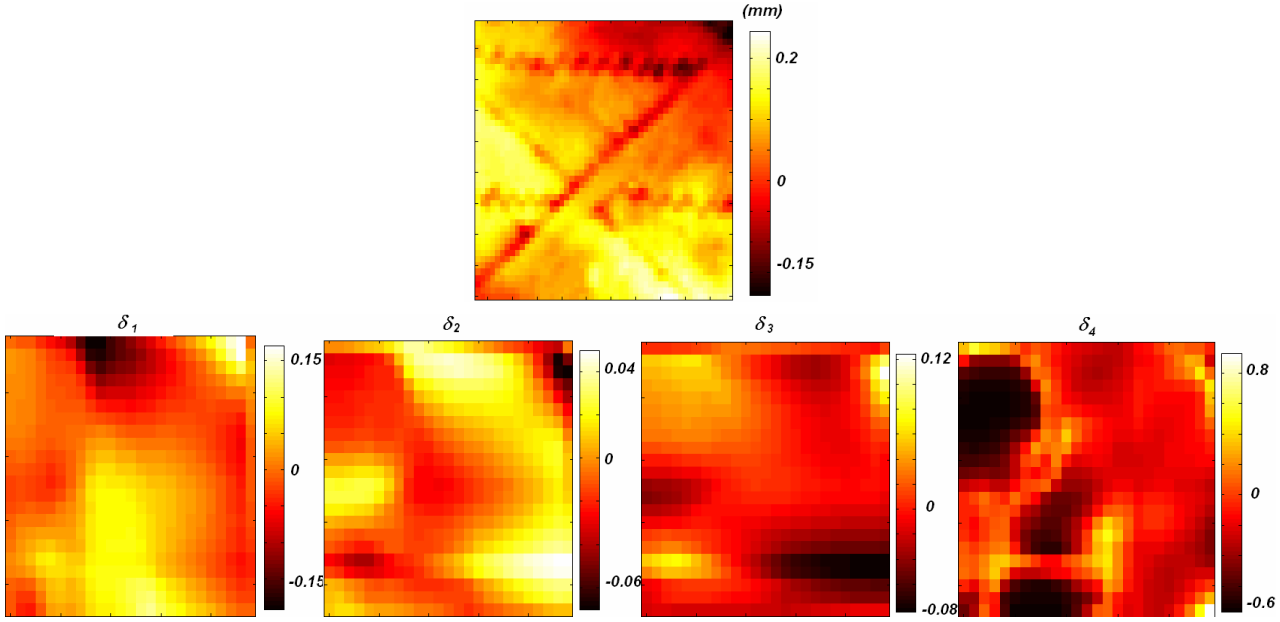

Fig. 8. Relief de l'éprouvette mesuré par stéréo-corrélation d'images numériques (en haut) et cartes d'hétérogénéités identifiées par la méthode (en bas) : de gauche à droite K_1, K_2, K_3 et K_4

Les champs de propriétés identifiés par la méthode décrite ici sont alors utilisés pour créer une simulation EF de l'essai considéré. Les déplacements mesurés par corrélation d'images numériques au niveau des lignes supérieures et inférieures sont imposés comme conditions aux limites, et les propriétés de chaque élément sont fournies par les cartes de modules identifiées par la méthode.

Malgré la faible représentativité des éprouvettes vis-à-vis du tube produit par enroulement filamentaire, notamment s'agissant du taux de fibres ou de la précision de placement des fibres, ces résultats illustrent le type de données que peuvent fournir des développements ultérieurs de la méthode ébauchée dans ce travail et appliquée au cas particulier d'une structure tubulaire tissée à ±55°.

5. Conclusion

L'influence du motif particulier de tissage dû au procédé d'enroulement filamentaire sur le champ de propriétés mécaniques de la structure tubulaire est étudiée. Pour cela, des essais sur une structure tubulaire verre/époxy produite par ce procédé sont effectués. Ces essais se classent en deux familles : des essais sous sollicitation « simple », de traction, torsion et pression externe, ainsi que des essais sous une combinaison de ces sollicitations. L'ensemble des essais sous sollicitation simple permet d'identifier des propriétés mécaniques moyennes, à l'échelle macroscopique comme à l'échelle du pli. Tous les essais réalisés ont été observés par des moyens optiques, afin d'obtenir des champs de déplacements et de déformation à la surface de l'éprouvette. L'observation de ces champs lors des essais combinés démontre une influence du motif de tissage sur les champs obtenus.

Une modification de la Méthode de l'Ecart à l'éQuilibre est proposée pour l'obtention de champs de propriétés orthotropes. Cette modification se base sur l'écriture des équilibres internes en différences finies, et utilise les champs de déplacements obtenus en surface des éprouvettes par corrélation d'image numérique. Elle permet d'obtenir des cartes de propriétés mécaniques pour les quatre propriétés orthotropes. La validité de la méthode est démontrée par l'utilisation de données simulées. La méthode permet en effet de retrouver des champs de propriétés imposés dans un modèle EF, par exploitation des déplacements calculés.

La méthode est enfin appliquée à des essais de traction sur des éprouvettes planes. Ces éprouvettes ont été tissées manuellement dans le but de reproduire le motif particulier de tissage de l'enroulement filamentaire. L'utilisation de champs de déplacements obtenus durant l'essai en entrée de la méthode d'identification fournit des champs de propriétés mécaniques, qui confirment l'influence du motif de tissage particulier sur les propriétés mécaniques locales.

Références

[1] H. Chalal, F. Meraghni, F. Pierron, M. Grédiac, "Direct identification of the damage behaviour of composite materials using the virtual fields method", *Composites: Part A*, Vol. 35, n°7-8, pp. 841-848, 2004.

[2] D. Claire, F. Hild, S. Roux, "A finite element formulation to identify damage fields: The equilibrium gap method", *Int. J. Num. Meth. Engng*., Vol. 61, n 2, pp. 189-208, 2004.

[3] M. Grédiac, F. Pierron, Y. Surrel, "Novel procedure for complete in-plane composite characterization using a single T-shaped specimen", *Exp.Mech*., vol. 39, n°2, pp. 142-149, 1999.

[4] D. Cohen "Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, n 12, pp. 1035-1047, 1997.

[5] D. Garcia, J.J. Orteu, L. Penazzi, "A Combined Temporal Tracking and Stereo-correlation Technique for Accurate Measurement of 3D Displacements: Application to Sheet Metal Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 736-742, 2002.

[6] M. Grédiac, E. Toussaint, F. Pierron, "Special virtual fields for the direct determination of material parameters with the virtual fields method: 1- Principle and definition*", International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, n°10, pp. 2691-2705, 2002.

[7] H.T. Hahn, D.W. Jensen, S.J. Claus, S.P. Pai, P.A. Hipp, "Structural design criteria for filament-wound composite shells", *NASA CR 195125*, pp. 0-167, 1994.

[8] H. Hernandez-Moreno, B. Douchin, F. Collombet, D. Choqueuse, P. Davies, "Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, n°3-4, pp. 1015-1024, 2008.

[9] C. Hochard, N. Lahellec, C. Bordreuil, "A ply scale non-local fibre rupture criterion for CFRP woven ply laminated structures", *Comp. Struct*., Vol. 80, n°3, pp. 321-326, 2007.

[10] L. Le Magorou, F. Bos, F. Rouge, "Identification of constitutive laws for wood-based panels by means of an inverse method", *Composites Science and Technology*, Vol 62, pp. 591-596, 2002.

[11] J. Molimard, R. Le Riche, A. Vautrin, J. R. Lee, "Identification of the four orthotropic plate stiffnesses using a single open-hole tensile test", *Exp. Mech*., Vol. 45, n°5, pp. 404-411, 2005.

[12] J.-N. Périé, S. Calloch, C. Cluzel, F. Hild, “Analysis of a Multiaxial Test on a C/C Composite by Using Digital Image Correlation and a Damage Model”, *Exp. Mech.,* Vol. 42, n°3, pp. 318-328, 2002.

[13] J. Rousseau, D. Perreux, N. Verdie, “The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes”, *Composites Science and Technology*, Vol. 59, n°9, pp. 1439-1449, 1999.

[14] H.S. Shin, P.S. Pande, “Identification of elastic constants for orthotropic materials from a structural test”, *Computer and Geotechnics*, Vol 30, pp. 571- 577, 2003.

[15] M.A. Sutton, W.JJ. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, S.R. McNeill, “Determination of displacements using an improved digital correlation method”, *Image and Vision Computing*, Vol 21, pp. 133-139, 1983.