



Etude tridimensionnelle des singularités de bord libre dans les composites stratifiés

Pauline Lecomte-Grosbras, Julien Réthoré, Nathalie Limodin, Jean-François
Witz, Mathias Brieu

► To cite this version:

Pauline Lecomte-Grosbras, Julien Réthoré, Nathalie Limodin, Jean-François Witz, Mathias Brieu.
Etude tridimensionnelle des singularités de bord libre dans les composites stratifiés. 11e colloque
national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01722061

HAL Id: hal-01722061

<https://hal.science/hal-01722061>

Submitted on 2 Mar 2018

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.

Public Domain

Etude tridimensionnelle des singularités de bord libre dans les composites stratifiés

Pauline LECOMTE-GROSBRAS¹, Julien RETHORE², Nathalie LIMODIN¹, Jean-François WITZ¹, Mathias BRIEU¹

¹ LML, pauline.lecomte@ec-lille.fr

² LaMCoS, INSA Lyon, julien.rethore@insa-lyon.fr

Résumé — Les composites stratifiés sont aujourd’hui très largement utilisés dans le monde industriel. En raison de leur architecture spécifique, des phénomènes singuliers peuvent être induits au voisinage des interfaces interlaminaires et entraîner la rupture précoce par délaminage de certaines séquences d’empilement. Les singularités de bords libres résultent d’effets combinés entre un bord libre et des hétérogénéités matériaux. Dans ce problème, les états mécaniques à analyser sont tridimensionnels. Ils pourraient être étudiés numériquement mais le rôle majeur joué par la microstructure est mal connu. Ceci a pour conséquence de rendre l’étude de ces variations délicate à la fois numériquement et expérimentalement. Il paraît alors incontournable de mener une analyse expérimentale utilisant des outils de caractérisation et de mesure donnant accès à des données tridimensionnelles.

Mots clés — composites, délaminage, tomographie aux rayons X, mesure de champs de déplacement

1 Introduction

Les composites stratifiés sont aujourd’hui très largement utilisés dans le monde industriel. L’optimisation de leur architecture leur confère un grand intérêt pour les applications dites à hautes performances. Ces matériaux peuvent être constitués d’un empilement de plis pouvant être obtenus à partir de plis unidirectionnels ou tissés au comportement orthotrope. En raison de leur architecture spécifique, des phénomènes complexes peuvent être induits au voisinage des interfaces interlaminaires et entraîner la rupture précoce par délaminage de certaines séquences d’empilement. Le délaminage est amorcé à proximité d’un bord libre ou d’une zone de modification de l’empilement [1]. L’amorçage du délaminage est ainsi une conséquence des singularités mécaniques apparaissant à proximité d’un bord libre.

Les singularités de bords libres résultent d’effets combinés entre un bord libre et des hétérogénéités matériaux. Même sous sollicitation simple, l’hétérogénéité crée un état de contrainte complexe, différent de celui obtenu pour un matériau homogène. Au voisinage d’un bord libre, satisfaire simultanément les équations d’équilibre et les conditions de bord libre conduit à l’activation localisée de termes de contraintes supplémentaires, à variation exponentielle [2, 3]. Ce phénomène, particulièrement exacerbé, dans les matériaux composites stratifiés, peut conduire à l’amorçage précoce du délaminage au niveau du bord libre. Même si la propagation du délaminage peut être traitée de manière satisfaisante, l’amorçage demeure une situation extrêmement complexe à analyser. Le caractère très localisé de ces effets donne un rôle majeur à la microstructure dans l’amorçage du délaminage.

Dans ce problème, les états mécaniques à analyser sont tridimensionnels. Ils pourraient être étudiés numériquement mais l’influence de la microstructure dans l’amorçage est mal connue. Ceci a pour conséquence de rendre l’étude de ces variations délicate à la fois numériquement et expérimentalement. Il paraît alors incontournable de mener une analyse expérimentale utilisant des outils de caractérisation et de mesure donnant accès à des données tridimensionnelles. Le travail présenté consiste en l’élaboration de techniques numériques d’analyse d’images adaptées à l’étude de champs de déplacements tridimensionnels à fort gradients localisés permettant de traiter des images acquises lors d’expérimentations dédiées. La cohérence des résultats confrontés à des analyses en surface est également mise en évidence.

2 Matériau et méthode

Le matériau utilisé pour l'étude est un composite stratifié constitué de fibres unidirectionnelles de verre E, de $20\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre, et de résine époxy M9 (fourni par la société Hexel). Des éprouvettes constituées de quatre plis unidirectionnels orientés suivant la séquence d'empilement $[15^\circ / -15^\circ]_s$, ont été fabriquées et sollicitées en traction uni-axiale. Cette séquence d'empilement a été choisie car elle conduit à des concentrations de contraintes de cisaillement σ_{xz} importantes (phénomène pouvant être démontré à partir de l'écriture des équations d'équilibre locales) au voisinage des interfaces des bords libres et des interfaces interlaminaires [4].

Avant de réaliser les essais, un scan 3D de référence de l'éprouvette dans l'état initial est réalisé par tomographie aux rayons X, à l'aide d'un microtomographe de laboratoire. Les réglages permettent de scanner un volume de $8 \times 3 \times 6\text{ mm}^3$ avec une taille de voxel de $4.5\text{ }\mu\text{m}$ de côté permettant d'observer convenablement la microstructure des éprouvettes formée par les fibres. La Figure 1 montre deux coupes du volume de l'éprouvette dans les plans (y,z) et (x,z) (voir Figure 2). L'orientation des fibres à 15° peut être observée dans le plan (y,z) alors que les interfaces interlaminaires sont observables dans le plan (x,y) , caractérisées par des zones de résine d'épaisseur localement plus importante.

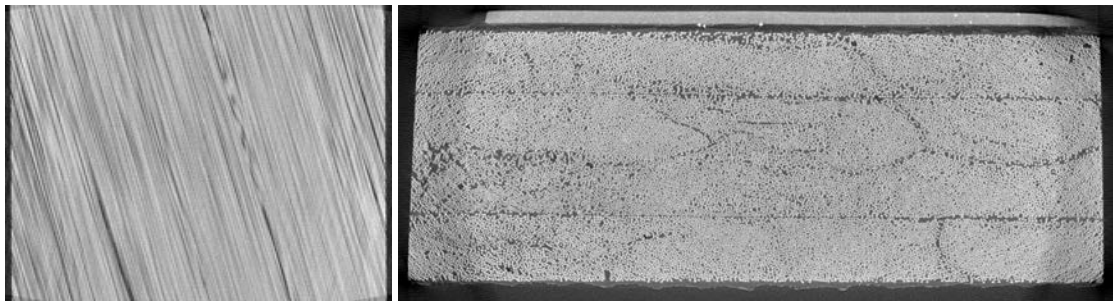


Fig. 1 – Coupes des images de tomographie aux rayons X dans les plans (y,z) et (x,y) .

Les éprouvettes sont ensuite sollicitées en traction uniaxiale suivant des phases de chargement/déchargement à des niveaux d'efforts croissants (Figure 2). Deux caméras équipées d'objectifs à fort grossissement permettent d'observer deux faces perpendiculaires de l'éprouvette tout au long de l'essai. A l'échelle

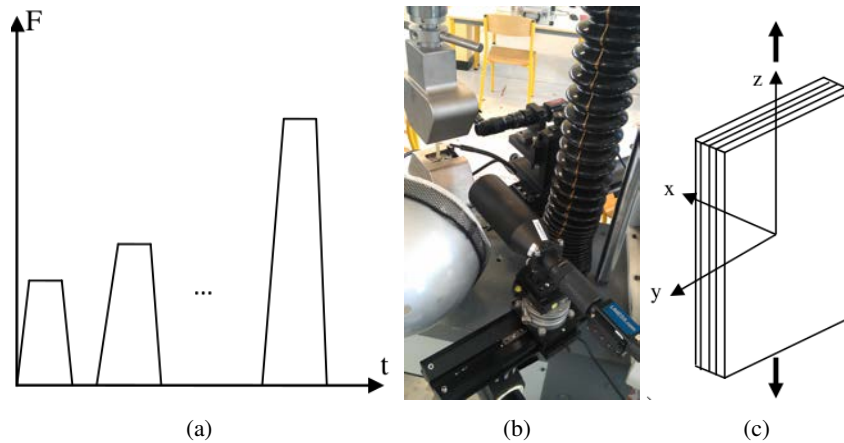


Fig. 2 – (a) chronologie de l'essai (b) montage expérimental (c) repère lié à l'éprouvette

macroscopique, le comportement est élastique linéaire jusqu'à rupture, le module d'Young équivalent de l'éprouvette dans la direction de traction a été caractérisé à 42 GPa et la déformation à rupture de l'ordre 0.9%, comme le montre la Figure 3. Cependant, même si à l'échelle macroscopique le comportement semble élastique linéaire jusqu'à rupture, l'amorçage d'endommagements de type délaminage apparaît de façon plus précoce au voisinage des interfaces interlaminaires et des bords libres. Afin de mettre en évidence ces phénomènes de bord libre à l'origine de l'amorçage du délaminage, des images 2D sont acquises sur les faces de l'éprouvette :

- à l'échelle mésoscopique (dans le (x,z)) afin de mettre en évidence les non linéarités et phénomènes

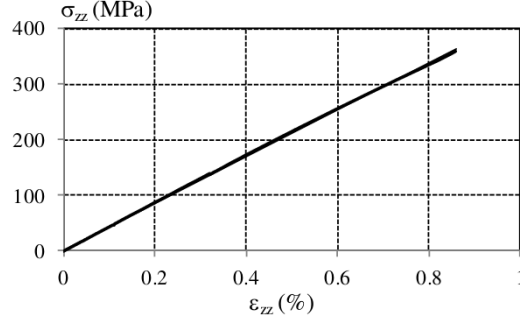


Fig. 3 – Comportement macroscopique du stratifié $[15^\circ / -15^\circ]_s$ en traction uniaxiale

résiduels aux interfaces interlaminaires,

- à l'échelle macroscopique (dans le plan (y, z)) afin de mettre en évidence la taille de la zone influencée par ces phénomènes.

Les images sont acquises à chaque phase de chargement / déchargement et analysée par Corrélation d'Images Numériques (CIN) par comparaison avec l'image initiale prise dans l'état non déformé. Pour permettre ces analyses un mouchetis de peinture a préalablement été déposé sur les zones observées. Ces analyses permettent d'une part de mettre en évidence les non linéarités locales et l'apparition de phénomènes résiduels et d'autre part d'établir une référence pour les mesures 3D. Lorsque des phénomènes résiduels sont observés, c'est-à-dire lorsque des gradients de déplacement sont mesurés en 2D à l'état déchargé au voisinage des interfaces interlaminaires, l'éprouvette est démontée de la machine de traction. Elle est de nouveau scannée par microtomographie aux Rayons X. Des mesures par Corrélation de Volumes Numériques (CVN) sont effectuées par comparaison entre le volume initial de l'éprouvette et le volume scannée dans l'état déformé, permettant ainsi de mettre en évidence la variation de ces gradients de déplacements locaux dans le volume en fonction de la distance au bord libre.

3 Corrélation d'images et de volumes numériques

3.1 Formulation

A partir des images de surface et des images volumiques de tomographie, une analyse par corrélation permet d'estimer les champs de déplacement entre deux états [5, 6]. La technique de corrélation utilisée est basée sur l'équation du flot optique :

$$f(x) = g(x + \mathbf{u}(x)) \quad (1)$$

où f et g sont les fonctions qui donnent les répartitions de niveaux de gris dans les images initiale et déformée et $\mathbf{u}$ le champ de déplacement inconnu. Dans l'écriture adoptée, les images et champs recherchés peuvent être 2D ou 3D. Le déplacement est décomposé en utilisant une base de fonctions de forme éléments finis $\{\phi_i\}_{i \in [1, n]}$ s'appuyant sur un maillage. Il vient :

$$\mathbf{u}(x) = \sum_{i \in [1, n]} \phi_i \mathbf{u}_i \quad (2)$$

En introduisant cette décomposition dans l'Eq. (1), une résolution de type moindre carrés non-linéaire est mise en place. Il en résulte, à chaque itération, la résolution d'un système linéaire pour obtenir l'incrément de déplacement $d\mathbf{U}$:

$$[\mathbf{M}] \{d\mathbf{U}\} = \{\mathbf{b}\}. \quad (3)$$

$d\mathbf{U}$ contient l'ensemble des incréments des $\mathbf{u}_i$, $\mathbf{M}$ est une matrice dont les composantes sont :

$$M_{nm} = \int \int_{\Omega} (\phi_n \cdot \nabla f)(\phi_m \cdot \nabla f) d\mathbf{x}, \quad (4)$$

et $\mathbf{b}$ un vecteur aux composantes définies par :

$$b_n^{(i)} = \int \int_{\Omega} (\phi_n \cdot \nabla f)(f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + [\phi] \{U\}^{(i)})) d\mathbf{x}. \quad (5)$$

Une modification des opérateurs a été adoptée de manière à réduire les coûts de calculs. En effet, c'est normalement $\nabla g(\mathbf{x} + [\phi]\{U\}^{(i)})$ qui intervient dans M et b et non ∇f . Mais alors que $\nabla g(\mathbf{x} + [\phi]\{U\}^{(i)})$ doit être recalculé à chaque itération, ∇f n'est calculé qu'une seule fois, à l'initialisation du processus de résolution. Ainsi, M et une partie de b ne seront calculés qu'une seule fois.

3.2 Performances

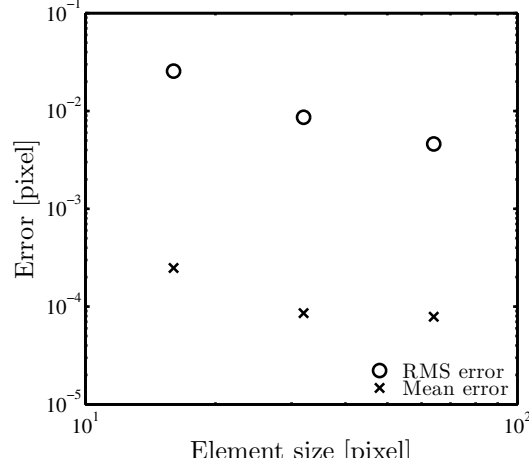


Fig. 4 – Erreur moyenne et écart type pour une translation rigide artificielle en fonction de la taille des éléments.

Dans un premier temps, les performances de l'algorithme présenté ci-dessus sont testées. Une image artificielle est créée en tradant l'image de référence de 0.5 voxel dans chaque direction. Des analyses de CVN sont menées avec des maillages réguliers pour des tailles d'éléments de 16, 32 et 64 voxels. La Figure 4 montre l'évolution de la valeur moyenne et de l'écart type de la différence entre le champ de déplacement calculé et le champ de déplacement appliqué artificiellement (0.5 voxel). L'erreur moyenne est très faible (environ 10^{-4} voxel) par rapport à l'incertitude (écart type). L'incertitude suit une loi puissance en fonction de la taille des éléments. Plus les éléments sont petits, moins il y a d'information disponible (de voxel), et plus la solution est bruitée. Il existe donc un compromis entre incertitude et résolution. La cinématique que nous cherchons à capturer est à la fois très localisée et à variation très importante. Il serait donc approprié de choisir des éléments de petites tailles. La contre-partie est une incertitude de mesure plus élevée.

3.3 Pré-conditionnement

Pour pallier cette difficulté de trouver un bon compromis entre incertitude et résolution, nous avons mis en place une stratégie de pré-conditionnement, permettant de contraindre la cinématique initialement permise par le maillage. De manière à capter les gradients du déplacement un maillage structuré mais non régulier est utilisé (cf. Figure 5). Ce maillage épouse les contours de l'échantillon. D'après les analyses 2D et d'après la littérature [7], le champ de déplacement résiduel présente des caractéristiques assez simples. Il s'agit de capturer des mouvements de corps rigide (défaut de repositionnement de l'échantillon dans le tomographe) et un déplacement suivant la direction de sollicitation. De plus, ce dernier est invariant suivant la direction de sollicitation (z). En revanche, des variations brutales sont attendues au niveau des interfaces suivant la direction x (suivant l'épaisseur) et à proximité du bord libre (suivant y , dans la largeur). Suivant x (suivant l'épaisseur), la taille des éléments est de 8 voxels et suivant y (suivant la largeur) elle varie entre 64 voxels à coeur et 6 voxels à proximité du bord libre.

De manière à contraindre la cinématique autorisée par le maillage, une méthode de pré-conditionnement est mise en place. Il s'agit, via un opérateur de projection P , de réduire le nombre de degrés de liberté possible. Ainsi, la cinématique autorisée est

$$\{U\} = [P]\{U^r\} \quad (6)$$

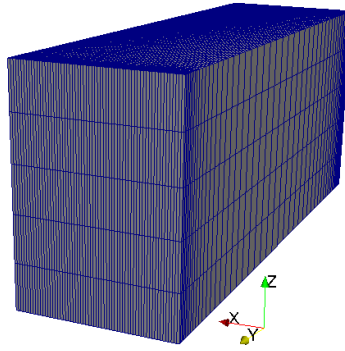


Fig. 5 – Maillage utilisé pour les analyses de CVN.

Le système à résoudre s'écrit alors :

$$[P]^T [M] [P] \{dU^r\} = [P]^T \{b\}. \quad (7)$$

En pratique, P contient deux translations globales (suivant x et y), trois rotations et il ne permet en plus qu'un déplacement nodal suivant z . P annule la variation de ce déplacement suivant z . Ainsi, l'utilisation d'informations *a priori* sur la cinématique permet via une technique de pré-conditionnement de résoudre en partie le compromis incertitude/résolution. Grâce à cette méthode, il est possible d'utiliser un maillage suffisamment raffiné dans les zones à fort gradient tout en conservant une incertitude de mesure acceptable.

4 Résultats

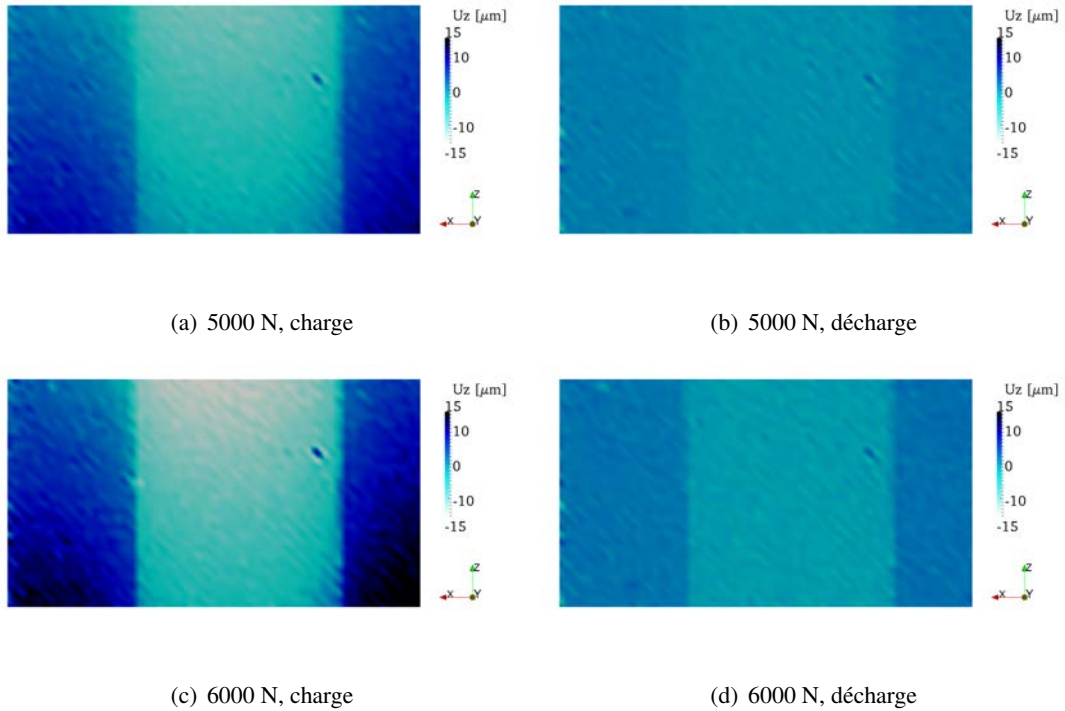


Fig. 6 – Champs de déplacement et de déplacement résiduels dans l'axe de sollicitation (z) en micromètres pour des charges de 5000 N et 6000 N.

La Figure 6 montre différents résultats obtenus par CIN. Les cartes données par les Figures 6(a) et 6(c) montrent les champs de déplacement à la charge pour des niveaux d'effort de 5000 N et 6000 N.

Une variation importante du déplacement est observée aux interfaces entre les plis comme le prédit l'étude analytique [2]. A la décharge suite à une charge préliminaire de 5000 N, la Figure 6(b) montre l'apparition d'un déplacement résiduel qui s'intensifie suite à une charge 6000 N. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par [4]. Le développement de ce champ de déplacement résiduel met en évidence l'existence de mécanismes de déformations irréversibles. La formation de micro-fissures interlaminaires peut être à l'origine de ce phénomène. L'utilisation d'images volumiques et de mesures de champs de déplacement 3D doit permettre de confirmer l'amorçage du délaminage en bord libre.

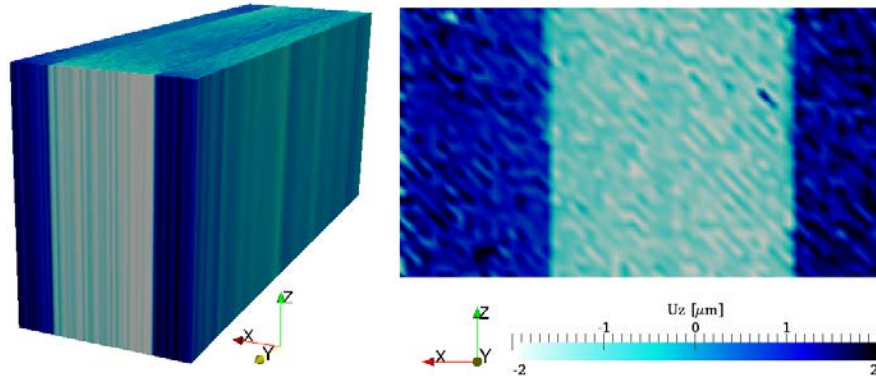


Fig. 7 – Comparaison des champs de déplacement résiduels en micromètres dans la direction de sollicitation après une charge à 6000 N. A gauche le champ obtenu par CVN, à droite celui obtenu par CIN sur la tranche de l'échantillon.

La Figure 7 montre la composante du champ de déplacement résiduel, suite à une charge de 6000 N, obtenue soit par CIN soit en volume par la stratégie de CVN proposée ci-dessus. Une très bonne cohérence est obtenue entre la mesure 2D et la mesure 3D au bord libre. La cohérence est obtenue à la fois sur les niveaux de déplacement mais également sur les sauts mesurés au niveau des interfaces entre plis d'orientations différentes. Pour rappel, dans les analyses 3D un voxel correspond à $4.5\mu\text{m}$ alors que dans les analyses 2D, un pixel correspond à $1.5\mu\text{m}$. Ainsi, l'amplitude des sauts du déplacement résiduel pour l'analyse 3D est inférieure au voxel. La Figure 8 montre une comparaison de ces champs de déplacement résiduel mesurés sur la surface libre. Ici encore, un excellent accord est obtenu entre les mesures 2D et 3D. Les sauts de déplacement aux interfaces entre plis d'orientations différentes sont quasiment identiques pour les deux mesures. Sur la Figure 9, la répartition volumique du déplacement résiduel

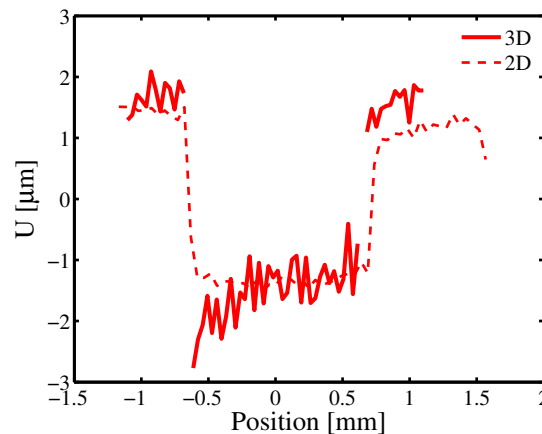


Fig. 8 – Comparaison des champs de déplacement résiduel moyens en micromètres dans la direction de sollicitation.

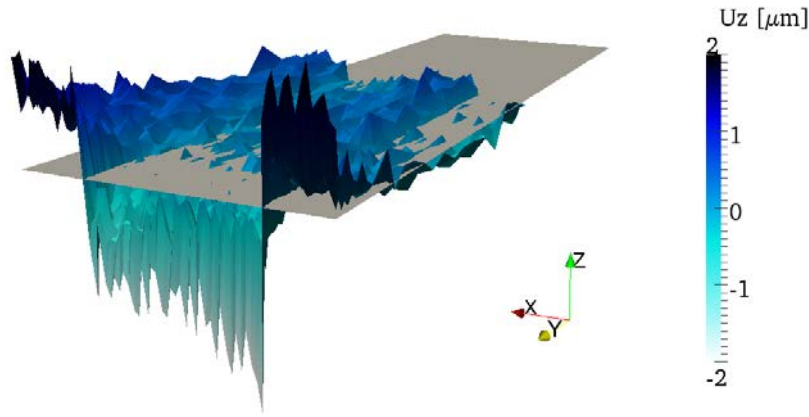


Fig. 9 – Répartition volumique du déplacement résiduels dans la direction de sollicitation.

dans la direction de sollicitation est tracée. Le caractère extrêmement localisé des effets de l'amorçage du délaminage est observé. En effet, la profondeur de la zone affectée peut être estimée à environ 1 mm. Ceci est confirmé par la Figure 10 qui montre l'évolution suivant y du saut de déplacement résiduel à l'interface entre deux plis d'orientations différentes. A cœur, ce saut peut être considéré comme nulle aux incertitudes de mesure près. En revanche, un saut de déplacement est observé sur une profondeur d'environ 1 mm près du bord libre.

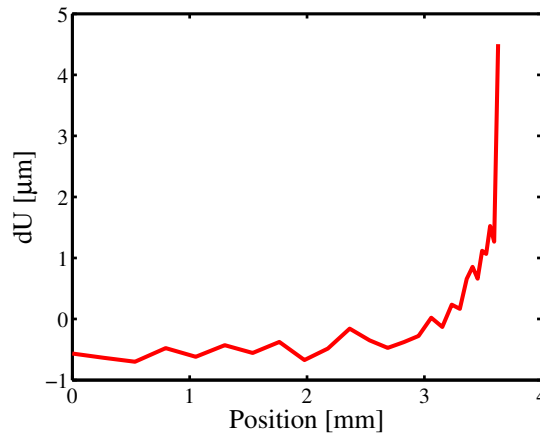


Fig. 10 – Evolution du saut de déplacement le long d'interface $+15^\circ / -15^\circ$.

5 Conclusion

Des sollicitations mécaniques simples, appliquées à certaines structures stratifiées, produisent des états de contrainte et de déformation tridimensionnels extrêmement complexes à proximité des bords libres. Ces états mécaniques complexes révèlent un caractère volumique jusqu'alors non étudié expérimentalement. Lors d'essais de traction uniaxiale sur des éprouvettes en composite fibres de verre résine époxy (séquence d'empilement $[15^\circ / -15^\circ]_s$), l'utilisation de CIN en surface met en évidence l'apparition de déplacements résiduels après sollicitation.

L'utilisation de la tomographie aux rayons X offre la possibilité d'étudier en 3D le phénomène d'amorçage du délaminage au voisinage des bords libres. Des images de tomographie aux rayons X sont reconstruites avant et après sollicitation mécanique. Grâce à la CVN, il est possible de caractériser la distribution volumique de déplacements résiduels induit par l'amorçage du délaminage. Le niveau très faible du déplacement à mesurer et le caractère très localisé de sa distribution au voisinage du bord

libre, rendent les versions usuelles de la CVN inopérantes. Une méthode de pré-conditionnement est proposée pour réduire la cinématique initialement admissible par le maillage utilisé. Cette méthode permet de résoudre en partie le compromis résolution / incertitude. Une mesure de champs de déplacements résiduels 3D est alors possible. Les résultats obtenus en 3D confirment les résultats obtenus en surface. Le caractère singulier du déplacement résiduel et sa localisation à proximité du bord libre ont été mesurés expérimentalement et confrontés aux résultats analytiques et numériques de la littérature. De plus, il est possible, grâce à cette investigation tridimensionnelle, d'estimer la profondeur de l'influence de l'amorçage du délaminage en bords libres sur les déplacements résiduels.

Remerciements

Nous souhaitons remercier chaleureusement, l'équipe Métal du laboratoire MATEIS de l'INSA de Lyon pour son soutien matériel et humain.

Références

- [1] CT. Herakovich. Edge effects and delamination failures. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 24(4) :245–252, 1989.
- [2] RB. Pipes and NJ. Pagano. Interlaminar stresses in composite laminates under uniform axial extension. *Journal of Composite Materials*, 4(4) :538–548, 1970.
- [3] NJ. Pagano and RB. Pipes. The influence of stacking sequence on laminate strength. *Journal of Composite Materials*, 5(1) :50–57, 1971.
- [4] P. Lecomte-Grosbras, B. Paluch, M. Brieu, G. De Saxcé, and L. Sabatier. Interlaminar shear strain measurement on angle-ply laminate free edge using digital image correlation. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 40(12) :1911–1920, 2009.
- [5] N. Lenoir, M. Bornert, J. Desrues, P. Bésuelle, and G. Viggiani. Volumetric digital image correlation applied to x-ray microtomography images from triaxial compression tests on argillaceous rock. *Strain*, 43(3) :193–205, 2007.
- [6] S. Roux, F. Hild, P. Viot, and D. Bernard. Three-dimensional image correlation from x-ray computed tomography of solid foam. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 39(8) :1253 – 1265, 2008. Full-field Measurements in Composites Testing and Analysis.
- [7] P. Lecomte-Grosbras, B. Paluch, and M. Brieu. Characterization of free edge effects : influence of mechanical properties, microstructure and structure effects. *Journal of Composite Materials*, 2012.