

Analyse du délaminage en statique et en fatigue dans un composite stratifié

Analysis of Delamination in static and fatigue in a laminated composite

Valentin Begin¹, Christian Hochard¹

1 : Equipe Matériaux et Structure - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique Marseille
LMA, UMR 7031 AMU - CNRS - Centrale Marseille
4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille Cedex 13
valentin.begin1@gmail.com et hochard@lma.cnrs-mrs.fr

Résumé

L'objectif de ce travail est d'analyser l'amorçage et la propagation du délaminage dans les composites stratifiés pour des chargements statique et de fatigue. L'analyse repose sur l'étude de stratifiés quasi-isotropes qui, quand ils sont sollicités en traction, présentent des contraintes hors-plan importantes sur les bords pouvant conduire à des endommagement inter-laminaire et délaminages. Pour des stratifiés constitués de plis tissés, il est possible de limiter le délaminage à une interface et de suivre la propagation du délaminage dans cette interface par corrélation d'images 3D, propagation qui peut être stable en fatigue et pour certaines directions de chargement. Cet essai original permet de mesurer simplement l'avancée du délaminage et donne l'occasion d'analyser l'influence de paramètres de fatigue tels que la fréquence, l'amplitude de cyclage ou encore la contrainte maximale, résultats expérimentaux présentés dans ce papier.

Abstract

The aim of this work is to analyze the initiation and propagation of delamination in laminated composites under static and fatigue loading. The analysis is based on the study of quasi-isotropic laminates which, when loaded in tension, exhibit significant out-of-plane edge stresses that can lead to inter-laminar damage and delamination. For laminates made up of woven plies, it is possible to limit delamination to an interface and to follow the propagation of delamination in this interface by 3D image correlation, which can be stable in fatigue for certain loading directions. This original test provides a simple way of measuring the progress of delamination, and enables analysis of the influence of fatigue parameters such as frequency, cycling amplitude and maximum stress, experimental results presented in the paper.

Mots Clés : Délaminage, Fatigue, Statique, Composites Stratifiés, Tissés

Keywords : Delamination, Fatigue, Static, Laminated Composites, Woven

1. Introduction

La rupture de structures composites stratifiées est due à de nombreux mécanismes agissants à différentes échelles. Dans certaines situations, le mécanisme de rupture majeur est le délaminage, amorcé et propagé par des contraintes hors-plan qui peuvent être importantes sur les bords. Les stratifiés quasi-isotropes sollicités en traction présentent des effets de bord qui dépendent de la nature des plis et des matériaux ainsi que de la direction de sollicitation. Une traction sur un stratifié $[0,90,45,-45]_s$ sollicité à 0° ou à 22.5° conduit à des contraintes hors-plan sur les bords très différentes. Cette propriété a été utilisée [1,2] pour comparer la tenue au délaminage de différents matériaux/plis (*Fig.1*) pour des chargements statiques. Dans le cas de plis UD Carbone/Epoxy, un modèle du pli seul en contrainte plane (comportement élastique avec un critère de rupture sens fibre, avec ou sans endommagement [3], ...) n'est pas suffisant pour décrire la rupture dans le cas d'une traction à 22.5° car les contraintes de cisaillement hors plan sont importantes et conduisent à une rupture prématurée (*Fig.1, essai en noir comparé au modèle en gris*). Avec les mêmes matériaux mais sous forme tissée, la différence entre les valeurs expérimentales et théoriques est réduite. Cela atteste d'une résistance au délaminage supérieure pour les stratifiés tissés par rapport aux unidirectionnels déjà observée à partir d'essais standards [4] (DCB, ENF...). Pour des plis tissés Verre/Epoxy, les contraintes hors-plan sont inférieures et le modèle du pli seul en contrainte plane (CP) s'approche du résultat expérimental. Enfin, dans le cas du tissé carbone/PEEK, un modèle en CP est suffisant car cette résine

présente une grande résistance au délaminage. Dans ce cas, comme le prévoit le modèle, le stratifié quasi-isotrope sollicité à 22.5 présente une résistance supérieure à celle observée pour une traction à 0° (Fig.1). Comme nous le verrons par la suite, pour des chargements de fatigue, même pour ce matériau qui présente une plus grande résistance aux contraintes hors plan, des délaminages sont observables et peuvent conduire à la rupture. Notons que le matériau tissé est adapté à l'analyse du comportement inter-laminaire : il est moins sensible à l'endommagement intra-laminaire (rupture transverse) qui peut conduire à des changements d'interface délaminatee tels qu'observés sur des stratifiés constitués de plis unidirectionnels, plus difficiles à suivre et à modéliser. D'autre part, comme cela l'a déjà été souligné dans [1,2], pour des stratifié quasi-isotrope qui présentent un coefficient de Poisson de l'ordre de 0.3, il est facile d'observer une zone délaminatee à partir de la mesure de la déformation transverse : le coefficient de Poisson d'une zone délaminatee est très supérieur à 0.3 pour un pli à 45° à l'extérieur et très inférieure pour un pli à 90° à l'extérieur. Comme nous le verrons par la suite, cet essai original permet de mesurer simplement l'avancée du délaminage et donne l'occasion d'analyser l'influence de paramètres de fatigue (fréquence, amplitude de cyclage).

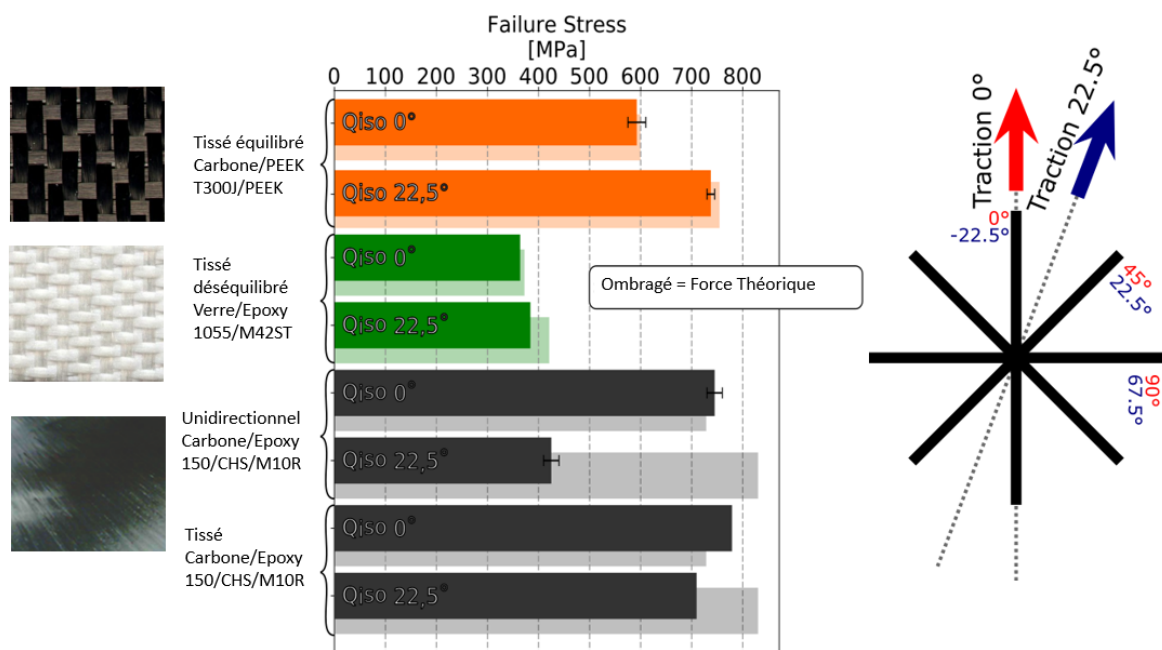


Fig. 1. Différence de Résistance entre résultats d'essais et modèle (CP) pour différents stratifiés quasi-isotropes $[0,90,45,-45]_s$ en traction dans les directions 0° et 22,5° [1]

Le tissé équilibré Carbone/PEEK (T300J/PEEK) choisi pour cette étude est utilisé par Airbus Helicopters (rotors). Des essais de traction simples en statique et en fatigue ont été menés sur des stratifiés tissés équilibrés quasi-isotrope Carbone/PEEK avec les orientations $[0,0,45,45]_s$ dans les directions 0°, 45° et 22.5°. Les différentes orientations du chargement permettent d'activer différents chargements hors-plan sur les bords. Un Mode II principalement (la contrainte σ_{33} est négative) pour une traction à 0°, un Mode Mixte I/II pour une traction à 45° et enfin un Mode III pur pour une traction à 22.5° (Fig.2). Pour ce stratifié $[0_2,45_2]_s$ (équivalent à $[0,90,45,-45]_s$ dans le cas des plis tissés), seule une interface entre les plis 0° et 45° de chaque côté du plan de symétrie peut délaminer. Se limiter à une seule interface permet une observation simplifiée du délaminage dont la propagation est généralement instable en statique mais peut être stable en fatigue, en particulier pour la traction à 22.5°. Pour ce cas de chargement, les influences des fréquences de chargement, du maximum et du rapport de chargement sont analysés d'un point de vue expérimental et les résultats sont présentés par la suite.

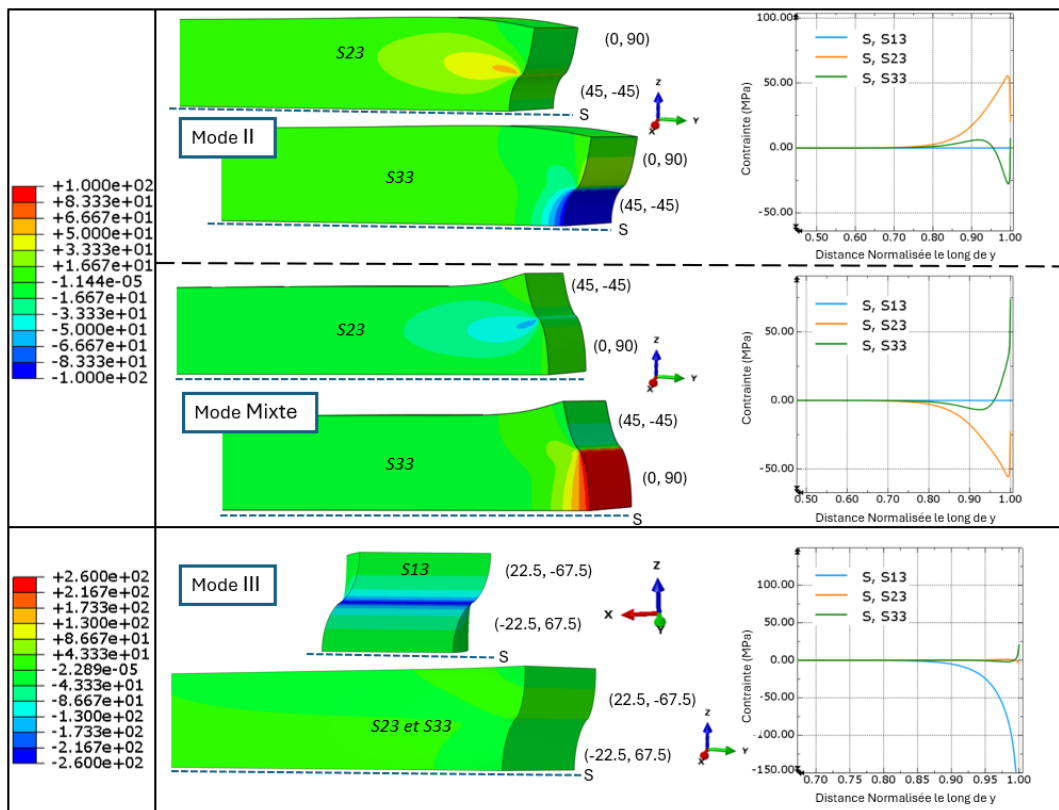


Fig. 2. Contraintes Hors Plan (calculs éléments finis ABAQUS) pour différentes interfaces d'un stratifié

2. Méthode Expérimentale

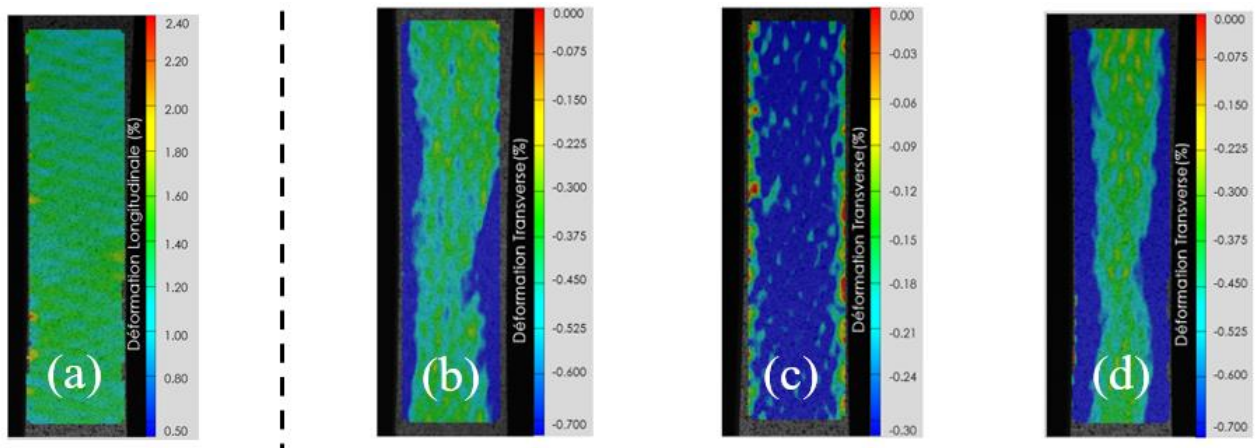


Fig. 3. Mesure des déformations longitudinales (a) et transverses (b,c,d) lors d'essais de traction en fatigue à 0,5Hz juste avant rupture à 80% $\sigma_{Rupture}$ sur des stratifiés Q-Iso (a) $[45_2, 0_2]_s$, (b) $[22.5_2, 67.5_2]_s$, (c) $[0_2, 45_2]_s$ et (d) $[45_2, 0_2]_s$

La méthode expérimentale consiste à observer le délaminage et son avancée au cours des essais de traction (statique, fatigue) à l'aide du système ARAMIS 3D. Ce dernier permet la mesure du champ de déformation sur l'échantillon par double corrélation d'images (DIC) (Fig.3). La déformation longitudinale reste homogène au sein de l'éprouvette au cours de l'essai (Fig.3a). Afin d'observer l'avancée du délaminage nous nous intéressons donc à la déformation transverse. Elle dépend du

coefficient de Poisson qui varie entre la zone délaminée et le reste du Q-iso (par exemple dans le cas d'une éprouvette sollicitée à 45° correspondant à une traction sur un stratifié [45₂,0₂]_s, le coefficient de Poisson de la zone délaminée va tendre vers 1 alors qu'il sera de 0,3 dans le reste du Q-iso, Fig.3d). Des essais en statique ont d'abord été réalisés pour obtenir les valeurs de contrainte de rupture ($\sigma_{Rupture}$) du matériau. Des essais de fatigue en traction ont ensuite été menés sur les différents échantillons. L'avancée du délaminage dans les stratifiés [0₂,45₂]_s est instable et plus difficile à analyser. La suite de l'étude se concentrera donc sur les deux autres orientations qui présentent des avancées du délaminage plus stables et mieux observable, en particulier pour la traction à 22.5° (ou traction sur stratifié [22.5₂,67.5₂]_s).

3. Résultats

La variation de la fréquence de cyclage lors des essais de fatigue a montré qu'une fréquence trop élevée entraînait une montée en température de l'échantillon. Cet échauffement est responsable d'une dégradation des propriétés mécaniques et une rupture plus rapide qu'à fréquence plus faible (Fig.4). Il est possible de refroidir mais les effets de bord qui conduisent à des déformations très localisées de niveaux très élevés ne permettent pas de connaître les températures localement.

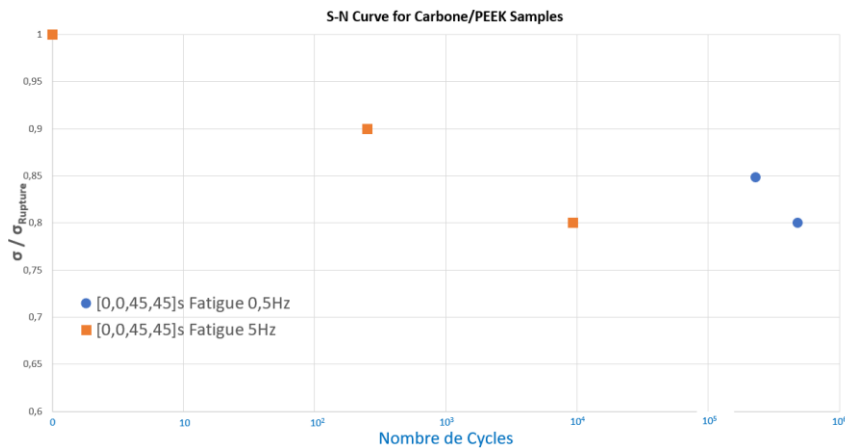


Fig. 4. Essais de Fatigue en Traction à différentes fréquences sur des éprouvettes de stratifié tissés Q-Iso Carbone/PEEK [0,0,45,45]_s pour différentes valeurs de $\sigma / \sigma_{Rupture}$ avec un ratio $R = \sigma_{Min} / \sigma_{Max} = 0,1$

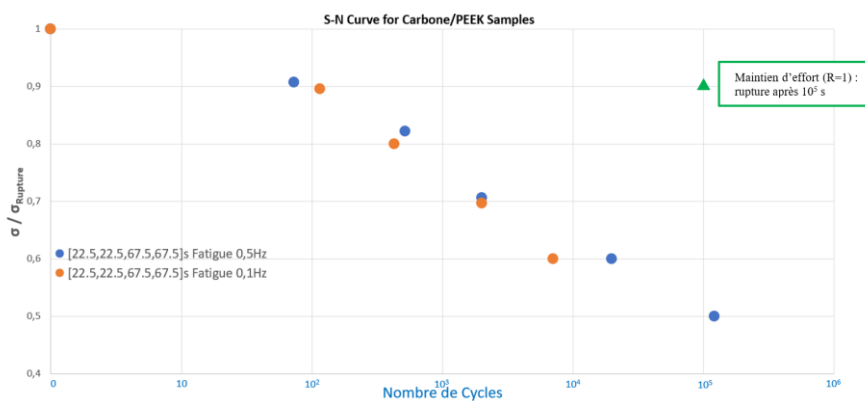


Fig. 5. Essais de fatigue en traction e à différentes fréquences sur des éprouvettes de stratifié tissés Q-Iso Carbone/PEEK [22.5,22.5,67.5,67.5]_s pour différentes valeurs de $\sigma / \sigma_{Rupture}$ avec un ratio $R = 0,1$

Afin de s'affranchir de cet aspect thermique difficilement contrôlable, des fréquences plus faibles (<0,5Hz) sont utilisées. En effet ces fréquences faibles influent moins sur le résultat des essais (Fig.5). Pour une fréquence de 0,1Hz et un plus faible chargement, les essais sont longs en temps (10⁵s pour le dernier point) et des effets visqueux peuvent s'ajouter. Ce phénomène est majeur dans le cas limite

du maintien en effort : une fois la valeur de contrainte maximale atteinte, l'échantillon est maintenu à ce niveau d'effort et une avancée du délaminage est observée au cours du temps jusqu'à rupture (triangle vert sur Fig.5). La fréquence intermédiaire de 0,5Hz est donc choisie pour la suite des essais.

La propagation du délaminage dans les échantillons à $[22.5_2,67.5_2]_s$ est stable et observable par suivi de la déformation transverse tant en statique qu'en fatigue (Fig.6). Cette avancée est plus importante dans le cas des essais de fatigue et est très probablement à l'origine de la rupture (les niveaux de chargement ne correspondent pas à la rupture sens fibre). Pour un chargement statique, il est possible d'observer une zone délaminée, plus petite, mais la rupture est probablement due au niveau élevée de contrainte dans le sens des fibres comme cela a été mentionné précédemment.

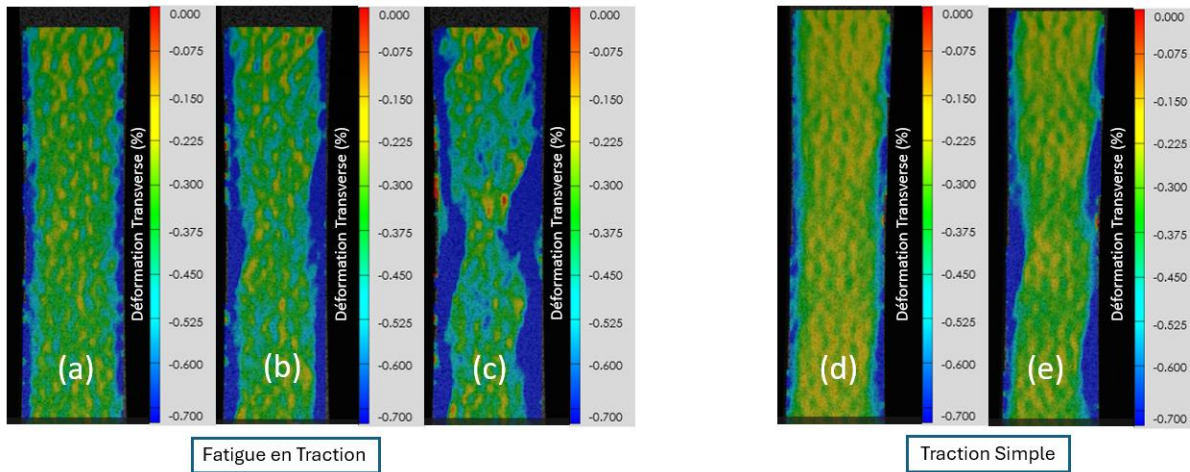


Figure 6 : Mesure des déformations transverses lors d'essais de fatigue en traction (avec $R = 0,1$ et $f = 0,5\text{Hz}$ à 65% de $\sigma_{Rupture}$) et traction simple sur un tissu Q -Iso Carbone/PEEK $[22.5_2,67.5_2]_s$. (a) Au premier cycle (b) à la moitié de l'essai (2385 cycles) et (c) juste avant rupture (4770 cycles). (d) à 80% de l'essai et (e) juste avant la rupture.

Finalement, l'amplitude de cyclage lors d'essais de fatigue en traction est analysée. Comme cela a déjà été observé pour les mécanismes d'endommagement matriciel intra-laminaire, l'amplitude a une influence majeure sur le nombre de cycles à rupture [5-6]. Le délaminage se propage plus lentement lorsque le ratio $R = \sigma_{Min} / \sigma_{Max}$ augmente (donc quand l'amplitude diminue, Fig.7). Cette influence de l'amplitude de cyclage en fatigue sur le délaminage des composites stratifiés fait l'objet de nombreuses études [7] et est également observable sur des assemblages de structures (collages) [8].

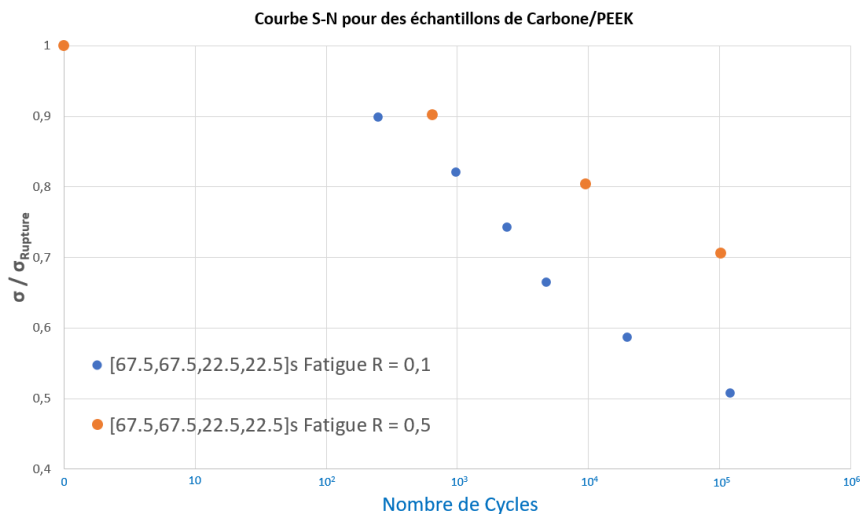


Fig. 7. Essais de Fatigue en Traction à différents ratios R sur des éprouvettes de stratifié tissés Q -Iso Carbone/PEEK $[67.5,67.5,22.5,22.5]_s$ pour différentes valeurs de $\sigma / \sigma_{Rupture}$

L'aspect numérique de cette analyse du délaminage sera abordé par calculs éléments finis sur le logiciel de simulation ABAQUS en utilisant la Méthode des Zones Cohésives. Cette méthode peut s'appliquer en statique et également être étendue en fatigue [9-11]. Ce type de modèle nécessite de simuler en 3D. Dans le cas particulier d'une éprouvette avec un bord droit sollicitée en traction, les contraintes ne varient pas suivant la direction de traction. Un seul élément suivant l'épaisseur est alors suffisant en déformation plane généralisée pour une traction à 0° ou à 45° (2,5D) ou en appliquant des conditions de périodicités (PBC) dans le cas du 22,5° (Fig.2).

4. Conclusions et Perspectives

Ce papier présente un essai original simple : traction sur un stratifié quasi-isotrope suivant différentes directions, qui permet d'analyser l'amorçage et la propagation de zone délaminées pour différents ratios de contraintes hors-plan en statique et en fatigue. L'observation du délaminage par la mesure de la déformation transverse a permis d'analyser l'influence de certains paramètres comme le mode de chargement, la fréquence et l'amplitude. L'amplitude semble jouer un rôle majeur en fatigue. Ces effets peuvent être approchés par des modèles phénoménologiques [6,9] mais ces derniers nécessitent l'identification de nombreux coefficients. Une première étude à l'échelle du polymère et en considérant des aspects physico-chimiques sera menée pour tenter d'alimenter ces modèles. Une piste passerait par une meilleure compréhension de l'effet de l'amplitude de cyclage sur les échauffements locaux de chaînes de polymères dans les zones de fortes contraintes entraînant une dégradation globale des propriétés mécaniques [12].

Références

- [1] Cocchi, Aldo « Analysis of Compressive Behaviour in Fibre Direction of Laminated Composite Structures in Presence of Matrix Degradation and Stress Concentrations », PhD 2020.
- [2] Valentin Begin, C. Hochard, A. Maurel-Pantel « Délaminage en température et en fatigue de composites stratifiés », JNC23 Besançon, 2023
- [3] P. Ladevèze, E. Le Dantec, "Damage modelling of the elementary ply for laminated composites", *Composites Science and Technology*, 43:257–267, 1992
- [4] C. Hochard, P.A. Aubourg and J.-P. Charles, "Modelling of the mechanical behaviour of woven-fabric CFRP laminates up to failure", *Composites Science and Technology*, 61:221-230, 2000
- [5] Thollon Yannick « Analyse du comportement à rupture de composites stratifiés constitués de plis tissés sous chargements statique et de fatigue », PhD 2009
- [6] Payan Juliette « Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue », PhD 2004
- [7] Rafiullah Khan, Rene Alderliesten, Saeed Badshah, Rinze Benedictus, "Effect of stress ratio or mean stress on fatigue delamination growth in composites : Critical review", *Composite Structures* 124 (2015) 214–227
- [8] D. Thevenet, R. Créac'hcadec, L. Sohier, J.Y. Cognard, "Experimental analysis of the behavior of adhesively bonded joints under tensile/compression–shear cyclic loadings", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 44 (2013) 15–25
- [9] A. Turon, J. Costa, P.P. Camanho, C.G. Dávila, "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 38, Issue 11, 2007
- [10] S. Safaei, A. Bernasconi, M. Carboni, L.M. Martulli, "A novel implementation of the cohesive zone model for the fatigue propagation of delamination in composites using a sequential static fatigue algorithm", *International Journal of Fatigue* 192 (2025) 108712
- [11] Iñigo Urcelay Oca, Brian Lau Verndal Bak, Albert Turon, Esben Lindgaard, "An ANSYS user cohesive element for the modelling of fatigue initiation and propagation of delaminations in composite structures", *Engineering Fracture Mechanics* 308 (2024) 110337
- [12] J. Richeton, S. Ahzi, L. Daridon and Y. Rémond, "Modeling of strain rates and temperature effects on the yield behavior of amorphous polymers", *J. Phys. IV France* 110 (2003) 39–44