



**HAL**  
open science

# Application de la mécanique de la rupture discrète à l'étude des interactions entre plis endommagés

Jean Vereecke, Christophe Bois, Jean-Christophe Wahl, Florian Lavelle,  
Bruno Desmars

► **To cite this version:**

Jean Vereecke, Christophe Bois, Jean-Christophe Wahl, Florian Lavelle, Bruno Desmars. Application de la mécanique de la rupture discrète à l'étude des interactions entre plis endommagés. JNC23 : Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606752

**HAL Id: hal-04606752**

**<https://hal.science/hal-04606752>**

Submitted on 10 Jun 2024

**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.

## Application de la mécanique de la rupture discrète à l'étude des interactions entre plis endommagés

### *Finite Fracture Mechanics application on interacted damaged plies*

Jean Vereecke<sup>1, 2</sup>, Christophe Bois<sup>1</sup> et Jean-Christophe Wahl<sup>1</sup>

1 : I2M Bordeaux, Université de Bordeaux, CNRS,  
351 Cours de la Libération, F-33400 Talence, France  
e-mail : jean.vereecke@u-bordeaux.fr

2 : Direction des Lanceurs, Centre National d'Études Spatiales (CNES)  
Paris, France

Dans un contexte de réduction des coûts et d'allègement des lanceurs spatiaux, le développement de réservoirs à ergols liquides en matériaux composites sans liner constitue un enjeu technologique. L'absence de liner d'étanchéité impose au composite de répondre aux critères fonctionnels de résistance et de perméabilité. Yokozeki et al. [1] met en évidence le lien entre l'endommagement des plis et l'évolution de la perméabilité, les mécanismes les plus critiques étant la fissuration transverse et le micro-délamination. Le développement d'un outil de prédiction des taux de fuite nécessite donc une compréhension fine de l'accumulation de l'endommagement dans chacun des plis.

L'accumulation de fissures transverses dans un pli unidirectionnel a été largement documentée dans la littérature. Un grand nombre de modèles analytiques ont été développés et ont permis de mieux comprendre et de mieux corrélés les prédictions avec l'expérience, en particulier pour les plis orientés à 90° par rapport à la direction de chargement. Cependant, les méthodes d'observation aux rayons X ont permis d'observer des scénarios d'interactions entre les plis endommagés. En effet la création d'une fissure dans un pli est quasi-instantanément suivie de l'apparition de fissures courtes dans le ou les plis adjacents. Ce phénomène n'a pas encore été bien compris et nécessite des études supplémentaires. Ces mécanismes sont pourtant critiques vis-à-vis de la perméabilité puisqu'ils constituent des chemins de fuite privilégiés pour les fluides stockés. Les observations tomographiques ont permis de mettre en évidence plusieurs scénarios d'interaction : le scénario dominé, dans lequel la fissure principale génère des fissures courtes dans un pli adjacent (Fig. 1a), et le scénario non dominé, où la fissuration des deux plis adjacents entre en compétition, se traduisant par des interactions mutuelles (Fig. 1b). Yokozeki et al. [2] met en évidence l'influence de l'orientation du pli, du chargement appliqué et de l'épaisseur du pli sur les effets d'interactions. Tous ces paramètres rendent une campagne d'essai fastidieuse, c'est pourquoi des outils de modélisation ont été développés pour la mise en place d'essais virtuels.

La modélisation proposée se focalise sur le scénario d'interaction dominé et s'appuie sur la mécanique de la rupture discrète (Finite Fracture Mechanics, FFM). Cette approche a été développée par Leguillon [3] puis alimentée par Cornetti [4] et repose sur un double critère de fissuration en résistance et en énergie. Dans ce cadre, l'initiation (ou la propagation) d'une fissure n'est permise que si la contrainte dans le pli dépasse la résistance du matériau et si l'énergie dissipée par la création de la fissure dépasse l'énergie de fissuration. La méthodologie est similaire à celle proposée par Garcia et al. appliquée à la fissuration transverse [5]. Un stratifié symétrique :  $[0/\theta/90]_s$ , contenant une fissure longue dans le pli à 90° est modélisé, puis

---

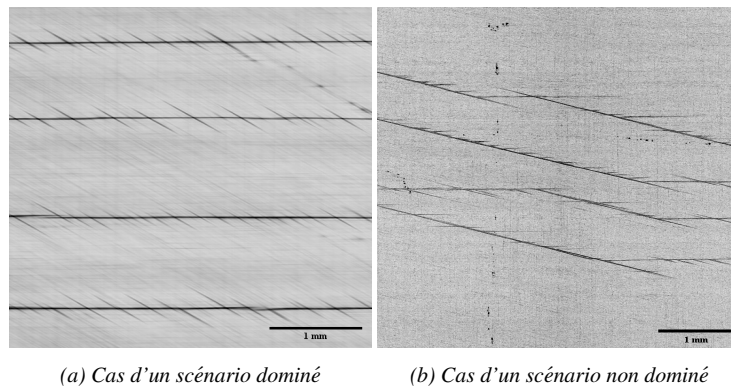


FIG. 1. – Projection dans l'épaisseur du stratifié de l'interface entre deux plis endommagés - Observations tomographiques

l'analyse des champs de contraintes et le calcul de l'énergie élastique est réalisé par éléments finis. Le but de la simulation est de réaliser une série de calculs à des niveaux d'endommagement croissants (par augmentation de la surface totale fissurée), et de comparer l'état de contrainte et les énergies restituées aux critères relatifs à la FFM.

La présence de la fissure dans le pli à  $90^\circ$  génère une concentration de contrainte à l'interface qui engendre une augmentation du taux de restitution d'énergie du pli adjacent. Cet effet permet de valider le double critère de fissuration sur une courte longueur de fissure. L'utilisation d'un modèle multi-fissuré permet de prendre en compte l'accumulation et le déchargement mutuel de ces fissures courtes afin de proposer une prédiction quantitative du taux de fissuration généré par interaction.

#### Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et ArianeGroup pour leur soutien.

#### Références

- [1] T. Yokozeki, T. Aoki, T. Ishikawa « Experimental Cryogenic Gas Leakage Through Damaged Composite Laminates for Propellant Tank Application », *Journal of Spacecraft and Rockets* Vol. 42 n° 2, pp. 363–366, 2005, ISSN 0022-4650, 1533-6794.
  - [2] T. Yokozeki, T. Aoki, T. Ishikawa « Consecutive matrix cracking in contiguous plies of composite laminates », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 42 n° 9-10, pp. 2785–2802, 2005, ISSN 00207683.
  - [3] D. Leguillon « Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch », *European Journal of Mechanics - A/Solids* Vol. 21 n° 1, pp. 61–72, 2002, ISSN 09977538.
  - [4] P. Cornetti, N. Pugno, A. Carpinteri, D. Taylor « Finite fracture mechanics : A coupled stress and energy failure criterion », *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 73 n° 14, pp. 2021–2033, 2006, ISSN 00137944.
  - [5] I. Garcia, B. Carter, A. Ingraffea, V. Mantic « A numerical study of transverse cracking in cross-ply laminates by 3D finite fracture mechanics », *Composites Part B : Engineering* Vol. 95, pp. 475–487, 2016, ISSN 13598368.
-