Développement d'une stratégie de modélisation du délaminage dans les structures composites stratifiées

Thomas VANDELLOS (DMSC/MSC)

Directeur de thèse : Eric MARTIN (LCTS)
Encadrant(s) ONERA : Nicolas CARRERE et Cédric HUCHETTE

Les matériaux composites représentent un atout majeur pour l'élaboration de structures aéronautiques résistantes et plus légères. Afin de répondre aux exigences des autorités de certification, les industriels doivent être capables aujourd'hui de démontrer les marges de sécurité ainsi que le mécanisme ayant conduit à la rupture final. Le délaminage (*i.e.* la décohésion de deux plis d'un stratifié) est l'un des modes d'endommagement critique des stratifiés, pouvant être amorcé à partir de faibles sollicitations hors-plan directes ou induites. Comprendre et modéliser les mécanismes de délaminage apparait donc un enjeu majeur afin d'augmenter la confiance dans le dimensionnement des structures composites. C'est pourquoi, l'objectif de ma thèse est de développer une stratégie de modélisation du délaminage dans les structures composites.

Cette stratégie repose sur trois aspects essentiels : *(i)* le développement de modèles permettant de décrire le délaminage, *(ii)* la définition d'une stratégie claire et robuste d'identification de ces modèles et *(iii)* de la mise en place d'une stratégie de calcul permettant de réduire les coûts associés (développée durant la 1^{re} année).

Afin de prédire l'amorçage et la propagation du délaminage dans des structures composites stratifiés, les modèles de zones cohésives (MZC) [1, 2] semblent être l'approche la plus adaptée. Toutefois, la plupart des modèles proposés dans la littérature et implantés dans les codes de calculs ne prennent pas en compte les spécificités propres au délaminage des composites stratifiés : *(i)* un seuil d'amorçage pouvant être décrit par un critère quadratique en contrainte avec un renforcement de la résistance de cisaillement en présence de contraintes normales de compression [3] et *(ii)* un critère de propagation en mode mixte adapté aux phénomènes observés dans les stratifiés [4]. Pour cela, un nouveau modèle de zone cohésive séparant clairement l'amorçage et la propagation, contrairement aux modèles de la littérature, est actuellement en cours de développement. Un critère de propagation en mode mixte spécifique aux stratifiés a déjà été implanté dans le code `ZéBuLoN`. Les travaux en cours consistent à associer à ce critère de propagation un critère d'amorçage en s'appuyant sur les résultats obtenus par ailleurs (thèse de J.-S. Charrier [3]).

Pour la seconde partie, une stratégie d'identification a été mise en place. Comme pour le modèle de zone cohésive, une séparation claire est établie entre amorçage et propagation. Tandis que l'identification de l'amorçage est basée sur des essais permettant de solliciter l'interface en mode pur et de valider le critère multiaxial développé [3], celle du critère de propagation s'appuie sur un essai de traction sur plaque rainurée, initialement développé à l'Onera afin d'étudier l'influence de l'endommagement intralaminaire sur la propagation du délaminage [5]. L'approche proposée consiste à identifier le critère de propagation à l'aide d'un seul essai (en exploitant l'évolution de la mixité du mode de cet essai). Pour cela, une méthodologie d'analyse de l'essai basée sur la méthode VCCT (Virtual Crack Closure Technique) a été développée. Cette méthode d'analyse a été complétée par une étude de sensibilité des paramètres mesurés lors de l'essai (déplacement, longueur de fissure, longueur utile, ...) afin d'améliorer la procédure expérimentale

et d'augmenter la confiance dans l'identification. Les premiers résultats obtenus sur une interface $0^\circ/90^\circ$ (voir figure 1) montrent que cet essai pourrait permettre une identification efficace des paramètres de propagation des MZC à condition d'avoir une information sur la ténacité en mode II.

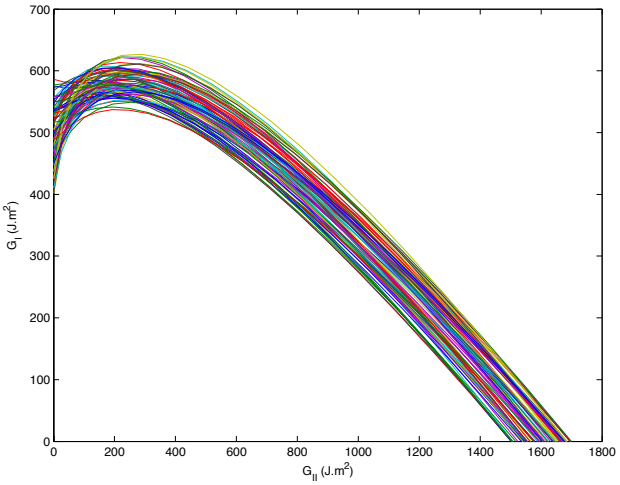

Figure 1 : *Identification des ténacités et des critères de propagation admissibles d'une interface $0^\circ/90^\circ$ par méta-modélisation de l'essai de traction sur plaque rainurée de T700GC/M21.*

Les travaux en cours se focalisent sur *(i)* l'application de cette méthode d'identification à des interfaces plus réalistes de composites aéronautiques $0^\circ/45^\circ$ et *(ii)* l'étude fine de l'influence de micro-délaminages (créés par des fissures transverses) sur la ténacité de l'interface (couplage inter/intralaminaire). Pour finir, l'ensemble de cette approche sera appliquée pour modéliser des essais semi-structuraux (plaques trouées, plaques entaillées, poinsonnement) afin d'évaluer la robustesse et les capacités prédictives de l'ensemble de la stratégie de modélisation mise en place.

Références

[1] Dugdale D.S., "Yielding of steel sheets containing slits", Journal of Mechanics and Physics of Solids, 8, 2, (1960), pp. 100-104.

[2] Barenblatt G.I., "Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle failure", Advances in Applied Mechanics, 7, (1962), pp. 55-129.

[3] Charrier J.S., Carrère N., Laurin F., Bretheau T., Goncalves-Novo E., Mahdi S "Proposition of 3D progressive failure approach and validation on tests cases", In proceeding of the 14^{th} European Conference on Composite Materials, Budapest (Hungary) 7-10 June of 2010.

[4] Benzeggagh M.L. et Kenane M., "Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus", Composites Sciences and Technology, 56, (1996), pp. 439-449.

[5] Huchette C., Guinot F. : "Experimental and numerical analysis on delamination growth in damaged composite material". In proceeding of the 13^{th} European Conference on Composite Materials, Stockholm (Sweden) 2-5 June of 2008.