



HAL
open science

Vers un modèle de zones cohésives adapté à l'étude du délaminage dans les composites stratifiés

Thomas Vandellos, Nicolas Carrere, Cédric Huchette, Eric Martin

► To cite this version:

Thomas Vandellos, Nicolas Carrere, Cédric Huchette, Eric Martin. Vers un modèle de zones cohésives adapté à l'étude du délaminage dans les composites stratifiés. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. <hal-00592922>

HAL Id: hal-00592922

<https://hal.science/hal-00592922v1>

Submitted on 3 May 2011

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.



HAL Authorization

Vers un modèle de zones cohésives adapté à l'étude du délaminage dans les composites stratifiés

T. Vandellos¹, N. Carrère¹, C. Huchette¹, E. Martin²

¹ Onera, 29 avenue de la Division Leclerc, 92322 Châtillon, France, thomas.vandellos@onera.fr

² LCTS, 3 allée de la Boétie, 33600 Pessac, France, martin@lcts.u-bordeaux1.fr

Résumé — Le délaminage, endommagement critique des composites stratifiés, peut être modélisé par les modèles de zones cohésives. Cet article propose dans un premier temps de mettre en évidence les points essentiels qu'un modèle de zones cohésives doit avoir pour décrire le délaminage dans les stratifiés carbone/époxy. Dans une seconde partie, une stratégie d'identification originale des paramètres de ce modèle est proposée. Cette stratégie permet de déterminer le critère d'amorçage et le critère de propagation en fonction du niveau d'endommagement intralaminare du stratifié.

Mots clefs — délaminage, modèle de zones cohésives, identification.

1 Introduction

Les composites stratifiés sont utilisés pour la fabrication de pièces aéronautiques, notamment les structures de classe A, car ils représentent un atout majeur pour l'allègement de ces structures tout en conservant une très bonne tenue mécanique. Néanmoins, dû au manque de confiance dans la modélisation des endommagements de ces matériaux, des facteurs de sécurité importants sont utilisés engendrant un surdimensionnement des structures. L'un des endommagements les plus critiques des composites stratifiés est le délaminage qui peut apparaître sous différents chargements comme par exemple des impacts à faible vitesse ou des sollicitations tridimensionnelles. Une perte des propriétés mécaniques de la structure et de la rigidité de cette dernière lorsqu'elle est soumise en compression sont les conséquences majeures du délaminage. C'est pourquoi un enjeu primordial pour les industries aéronautiques est l'amélioration de la modélisation de ce mécanisme d'endommagement.

Différents niveaux de modélisations peuvent être utilisés pour décrire le délaminage. Les critères de rupture [2,11], formulés en contrainte ou en déformation, sont classiquement utilisés pour décrire l'amorçage du délaminage. La propagation de ce délaminage peut être décrite grâce à la mécanique élastique linéaire de la rupture [1,5,10]. Il a été montré que pour décrire de façon correcte l'amorçage du délaminage, il est nécessaire de coupler ces deux types d'approches [6]. Les modèles de zones cohésives (MZC) [7,9] intègrent ces deux types de critères et ont l'avantage de décrire le délaminage même en présence de comportements non-linéaires (géométriques ou matériaux). La capacité de cette dernière approche à modéliser les deux aspects du délaminage permet de conclure que les MZC semblent être la méthode la plus adaptée pour l'étude du délaminage dans les calculs de structures. Cependant, une des limitations des MZC est l'identification des paramètres du modèle. De plus, bien qu'il existe de nombreux modèles dans la littérature [4,8,13,15], aucun d'entre eux ne semble avoir tous les ingrédients nécessaires pour l'étude du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy.

L'objectif de cette étude est (i) de mettre en avant les aspects nécessaires à une description précise du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy afin de pouvoir proposer un nouveau modèle de zones cohésives adapté et (ii) de proposer une stratégie d'identification des différents aspects de ce modèle. Pour cela, une présentation des modèles de zones cohésives et des améliorations souhaitées est proposée dans une première partie. Puis, dans une seconde partie, l'élaboration d'une procédure d'identification des paramètres liés à l'amorçage et à la propagation du délaminage est présentée. Cette stratégie prend également en compte le couplage inter/intralaminare (*i.e.* l'influence de l'endommagement des plis sur le délaminage).

2 Présentation des modèles de zones cohésives et des améliorations proposées

2.1 Rappel sur les modèles de zones cohésives

Les modèles de zones cohésives (MZC), basés sur la mécanique de l'endommagement, permettent de modéliser l'amorçage et la propagation d'une fissure grâce à des éléments d'interface insérés entre deux éléments solides classiques. Dans cette étude, ces éléments sont insérés entre deux plis afin de décrire le délaminage dans les stratifiés, comme illustré sur la Figure 1.

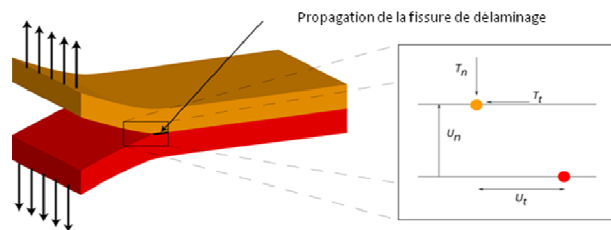


FIG. 1 – PROPAGATION DU DÉLAMINAGE SUR UN ESSAI DCB ET SA REPRÉSENTATION LOCALE

Le but des MZC est d'établir une loi de comportement endommageable entre les plis afin de décrire le délaminage. Pour cela, les MZC décrivent la relation entre les sauts de déplacements de deux nœuds initialement superposés $[u_i]$ ($i=1,2$ ou 3 selon le mode pur de rupture) et les efforts cohésifs associés T_i via une loi adoucissante décrivant l'endommagement progressif de l'interface jusqu'à sa rupture finale. Plusieurs formes de lois existent dans la littérature. Cependant, quelque soit la forme choisie, deux paramètres sont communément définie pour chaque mode de rupture : la contrainte interfaciale maximale σ_{\max}^i (*i.e.* l'effort cohésif maximum dans la relation liant les efforts cohésifs aux sauts de déplacement) et la ténacité, ou taux de restitution d'énergie critique, G_i^C (qui correspond à l'aire sous la courbe « effort cohésif/saut de déplacement »). De plus, afin de décrire le délaminage en mode mixte, c'est-à-dire sous une sollicitation comprise entre deux modes purs, un critère de rupture et un critère de propagation sont utilisés comme l'illustre la Figure 2.

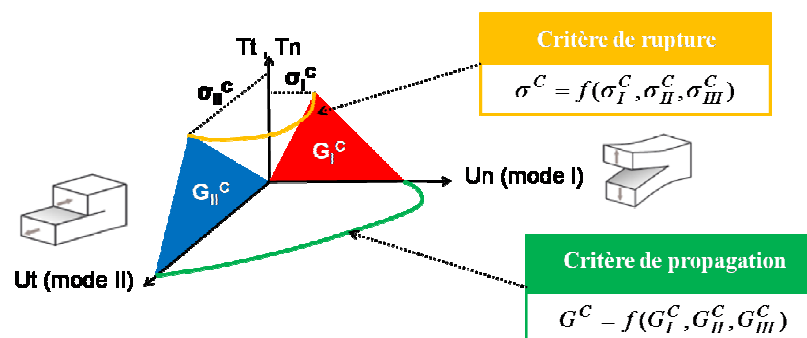


FIG. 2 – DESCRIPTION DES MODÈLES DE ZONES COHÉSIVES

2.2 Les améliorations proposées pour l'étude du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy

Afin de pouvoir étudier de manière précise le délaminage dans les stratifiés carbone/époxy, il semble nécessaire de proposer un modèle ayant (*i*) un critère d'amorçage décrivant un renforcement en compression/cisaillement, (*ii*) un critère de propagation adapté et (*iii*) la capacité de prendre en compte le couplage inter/intralaminaire (*i.e.* l'influence de l'endommagement des plis sur l'amorçage

et la propagation de la fissure). Même si certains modèles de zones cohésives proposent un critère de propagation adapté à l'étude des stratifiés carbone/époxy ou encore la prise en compte de l'endommagement intralaminare sur la propagation du délaminage, il n'existe pas encore de modèle complet pour l'étude de ce mécanisme d'endommagement.

Le premier point nécessaire à l'étude du délaminage réside dans un critère d'amorçage adapté. Comme certaines études le montrent [12], l'amorçage doit être décrit par un critère de rupture quadratique en contrainte avec prise en compte de l'influence de la compression sur la résistance en cisaillement. Ce critère est de la forme (équation 1):

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}(1-p\sigma_{33})}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

avec Z_t la résistance maximale en traction pur, S_{13} et S_{23} les résistances maximales pour les modes purs de cisaillement. p est un paramètre de forme identifié à partir des résultats expérimentaux. Afin de faciliter l'utilisation pratique de ce critère dans un code de calcul par éléments finis, le critère de rupture peut être réécrit comme illustré dans la Figure 3.

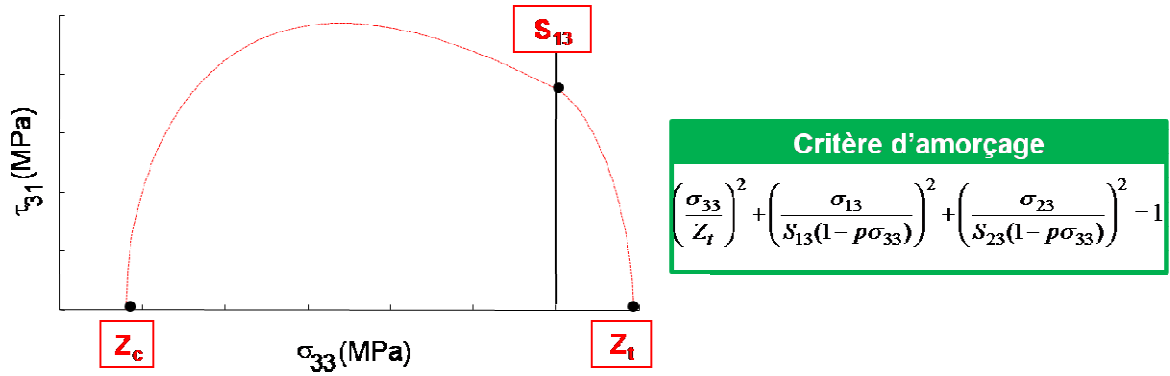


FIG. 3 – REPRÉSENTATION DANS LE PLAN (Σ_{33} , T_{13}) DU CRITÈRE DE RUPTURE ADAPTÉ À L'ÉTUDE DE L'AMORÇAGE DU DÉLAMINAGE DANS LES STRATIFIÉS CARBONE/ÉPOXY

Afin de décrire précisément la propagation du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy, un critère de propagation adapté est nécessaire. Là encore, de nombreuses études [11,16] ont permis de démontrer la nécessité d'utiliser l'un des deux critères suivants : le critère elliptique (équation 2) ou le critère de Benzeggagh-Kenane [14] (équation 3).

$$\left(\frac{G_I}{G_I^C}\right)^2 + \left(\frac{G_{II}}{G_{II}^C}\right)^2 + \left(\frac{G_{III}}{G_{III}^C}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

$$G_I^C + (G_{II}^C - G_I^C) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right) = G^C \quad (3)$$

avec G_I (respectivement G_{II} et G_{III}) le taux de restitution d'énergie du mode I pur (respectivement du mode II et du mode III), G_I^C (respectivement G_{II}^C et G_{III}^C) la ténacité du mode I pur (respectivement du mode II et du mode III) et G^C la ténacité de l'interface.

Pour finir, afin de décrire précisément le pattern associé au délaminage dans des cas structuraux où l'endommagement des plis et le délaminage peuvent interagir, comme par exemple lors d'impact sur le stratifié (voir Figure 4), le couplage inter/intralaminare doit être pris en compte. Pour cela, il est

primordial de pouvoir décrire la dégradation de l'interface en fonction du niveau d'endommagement des plis du stratifié. Cette description peut être faite de différentes manières : (i) en rajoutant une variable d'endommagement dans les modèles de zones cohésives traduisant l'endommagement des plis à prendre en compte au niveau de l'interface ou encore (ii) en dégradant les propriétés physiques de l'interface (σ_{\max}^i et G_i^C) en fonction du niveau de l'endommagement intralaminare.

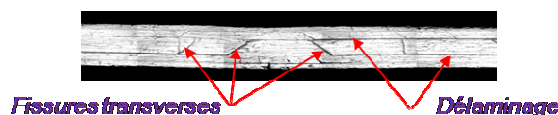


FIG. 4 – OBSERVATION DE L'INTERACTION DES ENDOMMAGEMENTS INTRALAMINAIRES ET DU DÉLAMINAGE DANS UN STRATIFIÉ CARBONE/ÉPOXY APRÈS UN ESSAI D'IMPACT

Les différents aspects présentés ci-dessus doivent être pris en compte pour décrire de façon satisfaisante le délaminage dans les composites stratifiés. Cependant, afin que ce modèle soit efficace, il est également nécessaire de pouvoir identifier l'ensemble des paramètres de ce modèle de manière robuste et objective. Une stratégie d'identification du critère d'amorçage et du critère de propagation en fonction du niveau d'endommagement intralaminare a donc été développée.

3 Développement d'une stratégie d'identification des paramètres d'un modèle de zones cohésives

3.1 Identification du critère de rupture

Afin de pouvoir identifier le critère de rupture proposant un renforcement en compression/cisaillement, une procédure a été proposée à l'Onera [12]. Cette dernière utilise un essai de flexion quatre points sur cornière et un essai d'ILSS (*i.e.* un essai de flexion trois points sur plaque courte) pour identifier les contraintes maximale en traction hors plan pur et en cisaillement pur. Afin de déterminer les résistances en mode mixte, des essais de pliage et de dépliage sur cornière sont exploités. Ces essais permettent de plus d'être représentatif des structures aéronautiques puisque l'on retrouve les cornières dans la poutre ventrale par exemple. Enfin, afin d'identifier le facteur p (qui est inversement proportionnel à la résistance en compression pur) permettant de déterminer la forme du critère, un essai de compression hors-plan sur plaque plane est utilisé. L'ensemble de cette procédure peut également être effectuée en présence d'endommagement intralaminare permettant ainsi de déterminer le critère de rupture en fonction du niveau d'endommagement du stratifié. La Figure 5 résume l'ensemble de la procédure d'identification du critère de rupture.

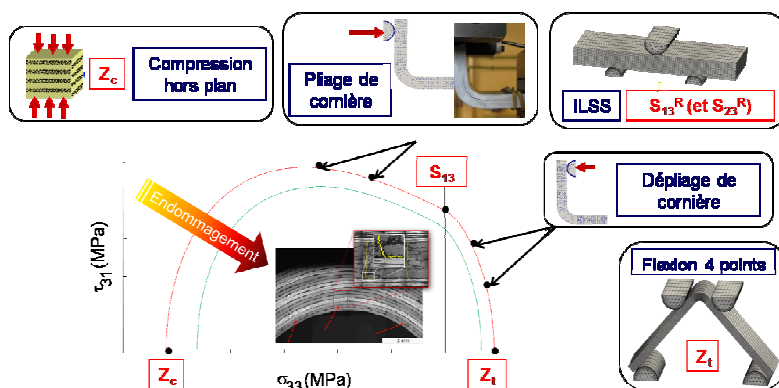


FIG. 5 – PRÉSENTATION DE LA PROCÉDURE D'IDENTIFICATION DU CRITÈRE DE RUPTURE ADAPTÉ À L'ÉTUDE DE L'AMORÇAGE DU DÉLAMINAGE DANS LES STRATIFIÉS CARBONE/ÉPOXY

3.2 Identification du critère de propagation

Afin de déterminer les ténacités d'une interface, une procédure utilisant différents essais classiques de la rupture est généralement utilisée. Un essai DCB (Double Cantilever Beam) et un essai ENF (End-Notched Flexure) sont exploités pour identifier le taux de restitution d'énergie critique en mode I et en mode II. Afin de caractériser la propagation du délaminage en mode mixte, l'essai MMB (Mixed-Mode Bending) est le plus utilisé car il permet d'étudier différentes mixités de mode (comprises entre le mode I et le mode II). Via l'ensemble de ces essais, un critère de propagation peut être déterminé. Cependant, compte-tenu de la dispersion des résultats expérimentaux, il est souvent difficile d'identifier avec précision le critère de propagation le plus adapté. De plus, l'ensemble de la procédure reste longue et coûteuse et est difficilement applicable pour identifier la ténacité des interfaces $0^\circ/\theta^\circ$, du fait notamment de la présence d'endommagement intralaminare dans le stratifié.

Afin de réduire ces limitations, l'exploitation d'un essai de traction sur plaque rainurée est proposée dans ce travail. Le principe de cet essai, développé à l'Onera, est présenté dans la Figure 6. Il permet d'étudier le délaminage à une interface $0^\circ/\theta^\circ$ ainsi que l'influence de l'endommagement intralaminare (fissurations transverses et microdélaminages) sur la propagation du délaminage. Afin de suivre la propagation du délaminage au cours de l'essai effectué à déplacement imposé, une caméra reliée à un microscope est utilisée. Cette dernière est montée sur des tables micrométriques (voir Figure 7) permettant de suivre la propagation du délaminage et la possible interaction de ce dernier avec les microdélaminages en pointe de fissures transverses le long de l'éprouvette. Pour finir, des études ont permis de démontrer que cet essai est reproductible et qu'il propose une propagation stable de la fissure au cours de l'essai. Ces conclusions sont nécessaires pour utiliser l'essai de traction sur plaque rainurée pour identifier le taux de restitution d'énergie critique de l'interface.

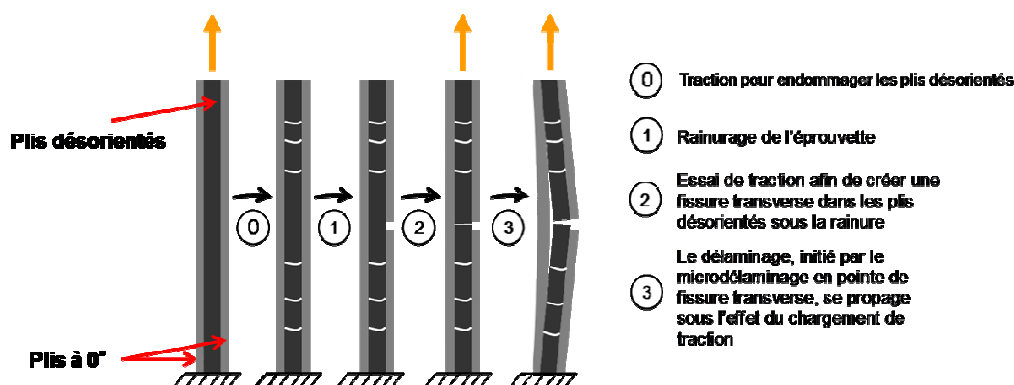


FIG. 6 – PRINCIPE DE L'ESSAI DE TRACTION SUR PLAQUE RAINURÉE

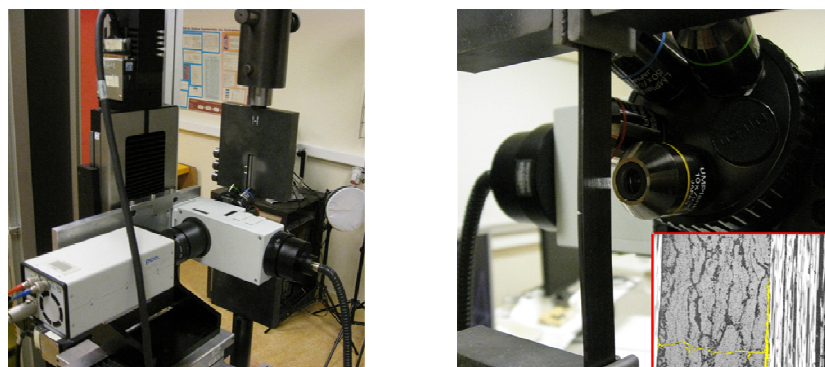


FIG. 7 – DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DE L'ESSAI ET ZOOM SUR L'OBSERVATION DE L'ÉPROUVETTE PAR MICROSCOPE

Néanmoins, l'identification de la ténacité nécessite actuellement l'utilisation des éléments finis, notamment de la méthode VCCT (Virtual Crack Closure Technique) basée sur la mécanique élastique linéaire de la rupture. Cette méthode, dont le principe est de calculer l'énergie nécessaire pour refermer une fissure d'une longueur Δa en supposant que cette dernière est égale à l'énergie pour ouvrir cette fissure d'une longueur Δa , permet de déterminer la ténacité de l'interface à partir du déplacement imposée à l'éprouvette et de la longueur de fissure associée.

La méthode VCCT a été appliquée sur une interface ($0^\circ/90^\circ$) à partir de plusieurs essais sur des éprouvettes $[0_2/90_2]_s$ de carbone/époxy T700GC/M21. Les résultats obtenus, illustrés sur la Figure 8, permettent de conclure (i) que cet essai propose un nombre de données deux fois plus important qu'un essai classique grâce aux deux fronts du délaminage qui se propagent de manière quasi-symétrique à partir de la fissure transverse située droit en dessous de la rainure, (ii) que la dispersion de cet essai (environ $\pm 100 \text{ J/m}^2$) est de l'ordre de la dispersion des essais utilisés classiquement et (iii) que l'essai propose une mixité de mode qui évolue au cours de l'essai entre 15% et 35% de mode II (la mixité de mode étant calculée par le ratio entre l'énergie de cisaillement et l'énergie totale).

La mixité de mode de l'essai de traction sur plaque rainurée évoluant au cours de l'essai, on peut envisager d'extrapoler les résultats obtenus sur l'identification de la ténacité afin d'identifier l'enveloppe des critères de propagation admissibles (voir Figure 9). La mixité de l'essai de traction sur plaque rainurée étant comprise entre 15% et 35% de mode II, la détermination de cette enveloppe ne peut être très précise en utilisant que l'essai de traction sur plaque rainurée. Mais en ajoutant un essai proche du mode II pur, les résultats seraient très encourageants (Figure 9) et permettraient d'identifier les paramètres de propagation des MZC avec une campagne d'essais plus rapide que précédemment.

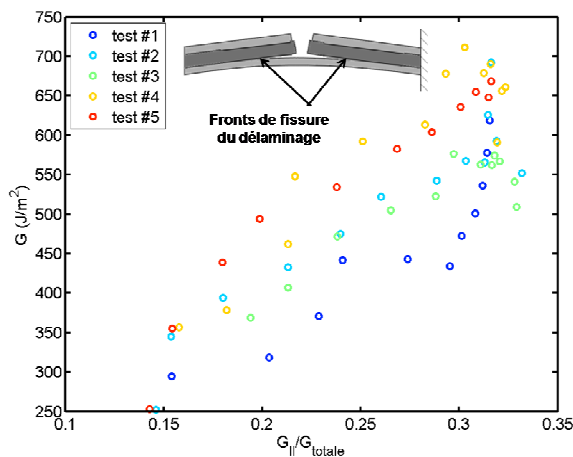


FIG. 8 – IDENTIFICATION DE LA TÉNACITÉ D'UNE INTERFACE $0^\circ/90^\circ$ D'UN CARBONE/ÉPOXY T700GC/M21 À PARTIR DE 5 ESSAIS DE TRACTION SUR PLAQUE RAINURÉE SUR DES STRATIFIÉS $[0_2/90_2]_s$

L'essai de traction sur plaque rainurée peut également être effectué pour observer l'influence du niveau d'endommagement intralaminare sur la propagation du délaminage. Pour cela, il suffit d'exploiter la première étape de la procédure expérimentale qui consiste à effectuer un essai de traction sur le stratifié avant d'appliquer la rainure. Plus le niveau de contrainte appliqué sur l'éprouvette est important, plus le niveau d'endommagement des plis désorientés du stratifié est important. Grâce au dispositif expérimental, il est possible de déterminer le taux de fissuration transverse ρ (i.e. le nombre de fissures transverses sur la longueur utile de l'éprouvette) et le taux de microdélaminage μ (i.e. la longueur totale des microdélaminages sur la longueur utile de l'éprouvette). Ces deux paramètres n'évoluent pas lors du second essai de traction, c'est-à-dire lors de l'essai de traction sur la plaque rainurée. Il est donc possible de déterminer l'influence d'un niveau

d'endommagement intralaminare spécifique sur la propagation du délaminage.

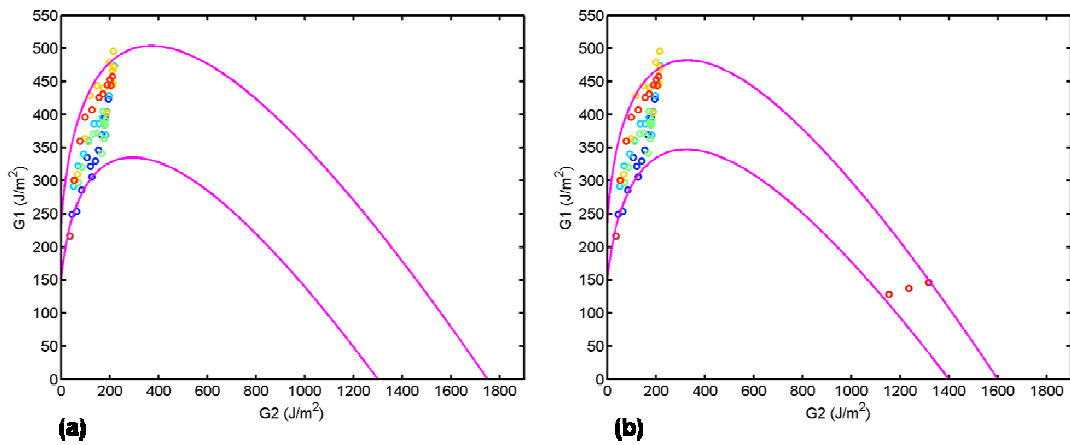


FIGURE 9 – (A) IDENTIFICATION D'UNE ENVELOPPE DE CRITÈRES DE PROPAGATION ADMISSIBLES PAR L'ESSAI DE TRACTION SUR PLAQUE RAINURÉE. (B) PERSPECTIVE D'IDENTIFICATION PAR L'ESSAI DE TRACTION SUR PLAQUE RAINURÉE ET UN ESSAI SUPPLÉMENTAIRE PROCHE DU MODE II PUR

Plusieurs états d'endommagements ont été effectués sur des stratifiés $[0_2/90_2]_S$ de carbone/époxy T700GC/M21. Les résultats de la propagation du délaminage au cours de l'essai en fonction du taux de fissuration transverse indiquent une propagation plus rapide de la fissure pour un niveau d'endommagement élevé (voir Figure 10). Ces résultats sont encourageants pour une identification de la dégradation des propriétés de l'interface en fonction du niveau d'endommagement intralaminare mais il semble également nécessaire d'obtenir la dispersion d'un essai pour un endommagement donné afin d'évaluer la reproductibilité de ce dernier.

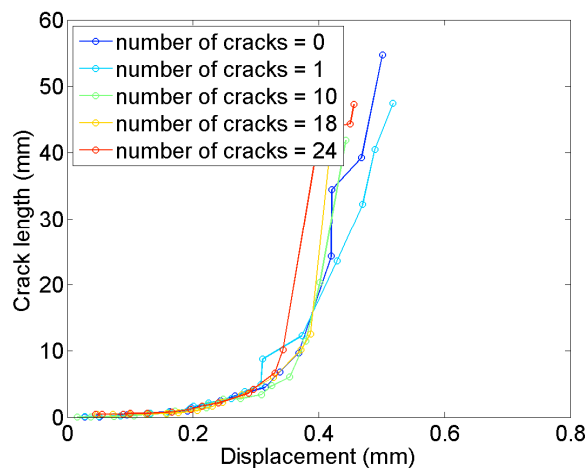


FIGURE 10 – DESCRIPTION DE LA LONGUEUR DE FISSURE EN FONCTION DU DÉPLACEMENT IMPOSÉ À PARTIR DE PLUSIEURS ESSAIS DE TRACTION SUR PLAQUE RAINURÉE $[0_2/90_2]_S$ DE CARBONE/ÉPOXY T700GC/M21 AVEC DIFFÉRENTS ÉTATS D'ENDOMMAGEMENT

4 Conclusions et perspectives

Afin de modéliser le délaminage dans des structures complexes, les modèles de zones cohésives semblent être l'approche la plus adaptée car ils permettent de décrire l'amorçage et la propagation de la fissure. Bien qu'il existe de nombreuses lois, aucune ne semble avoir tous les ingrédients pour

étudier le délaminage dans un stratifié carbone/époxy. C'est pourquoi la première partie de ce travail met en évidence les points essentiels pour l'élaboration d'un nouveau modèle plus adapté : (i) un critère de rupture décrivant un renforcement sous un chargement en compression/cisaillement, (ii) un critère de propagation permettant la description de la propagation de la fissure dans un carbone/époxy et (iii) la prise en compte du couplage inter/intralaminaire. Afin de pouvoir utiliser ces ingrédients dans un modèle de zones cohésives, il est nécessaire de pouvoir les identifier. C'est pourquoi la seconde partie de ce travail présente le développement d'une stratégie d'identification. Cette stratégie a deux avantages. Elle permet (i) l'identification du critère de rupture à partir d'essais représentatif des structures aéronautiques et (ii) l'identification du critère de propagation sur une interface $0^\circ/\theta^\circ$ à partir d'un essai original de traction sur plaque rainurée. Les premiers résultats de l'essai de traction sur plaque rainurée endommagée sont également encourageants pour une détermination de la dégradation des propriétés de l'interface en fonction du niveau d'endommagement intralaminaire.

Parmi les perspectives de ce travail, il reste à compléter la stratégie d'identification des paramètres de propagation en fonction de l'endommagement intralaminaire et à appliquer le nouveau modèle de zones cohésives sur des cas structuraux complexes (flexion quatre points sur cornières, essai de traction sur plaque trouée, essai de traction sur plaque entaillée, poinçonnement) afin d'en démontrer l'apport.

Références

- [1] A.A.Griffith. "The phenomena of rupture and flow in solids", *Philosophical transactions of the royal society*, Vol.221, p.163-198, 1921.
- [2] A.C.Orifici, I.Herszberg, R.S.Thomson. "Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure", *Composite Structures*, Vol.86, p.194-210, 2008.
- [3] A.Turon, P.P.Camanho, J.Costa, and C.G.Dávila, "An interface damage model for the simulation of delamination under variable-mode ratio in composite materials", NASA/TM-2004-213277 2004.
- [4] D.Broek., "Elementary Engineering Fracture Mechanics.", 4th revised ed., Kluwer Academic Publishers, 1991
- [5] D.Leguillon. "Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch", *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol.21, p.61-72, 2002.
- [6] D.S.Dugdale. "Yielding of steel sheets containing slits", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol.8, p.100-104, 1960.
- [7] G.Alfano, M.A.Crisfield. "Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues", *International journal for numerical methods in engineering*, Vol.50, p.1701-1736, 2001.
- [8] G.I.Barenblatt. "Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle failure", *Advances in Applied Mechanics*, Vol.7, p.55-129, 1962.
- [9] G.R.Irwin. *Fracture I. Handbuch der Physik VI.: Flügge*, 1958:558-590
- [10] J.R.Reeder, "An evaluation of mixed-mode delamination failure criteria", *NASA Technical Memorandum* 104210 1992.
- [11] J.S.Charrier et al. Proposition of 3D progressive failure approach and validation on tests cases, *Budapest (Hungary)*, 2010.
- [12] M.Elices, G.V.Guinea, J.Gómez et al. "The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.69, p.137-163, 2002.
- [13] M.L.Benzeggagh, M.Kenane. "Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus", *Composites Science and Technology*, Vol.56, p.439-449, 1996.
- [14] O.Allix, P.Ladevèze. "Damage analysis of interlaminar fracture specimens", *Composite Structures*, Vol.31, p.61-74, 1995.
- [15] P.Prombut, "Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels", *Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier*, 2007.