



HAL
open science

**Modélisation et simulations du phénomène de
délaminage sous des sollicitations de fatigue dans les
structures stratifiées = Modelling and prediction of
debonding phenomenon in laminated structures under
Fatigue loadings**

Laurent Gornet, Hassan Ijaz, Denis D.R. Cartié

► **To cite this version:**

Laurent Gornet, Hassan Ijaz, Denis D.R. Cartié. Modélisation et simulations du phénomène de délaminage sous des sollicitations de fatigue dans les structures stratifiées = Modelling and prediction of debonding phenomenon in laminated structures under Fatigue loadings. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 7 p. hal-00385834

HAL Id: hal-00385834

<https://hal.science/hal-00385834v1>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Modélisation et simulations du phénomène de délaminage sous des sollicitations de fatigue dans les structures stratifiées

Modelling and prediction of debonding phenomenon in laminated structures under Fatigue loadings

Laurent Gornet¹, Hassan Ijaz, Denis D. R. Cartié²

¹GeM-UMR-CNRS 6183, École Centrale de Nantes, 1 Rue de la Noë, 44321 Nantes
e-mail : laurent.gornet@ec-nantes.fr, hassan.ijaz@ec-nantes.fr,

²Composites Centre, Department of Materials, Cranfield University, MK43 0AL, UK
e-mail : d.d.r.cartie@Cranfield.ac.uk

RESUME

Un modèle d'interface inter-laminaire est proposé pour modéliser les phénomènes de délaminage survenant sous l'action des sollicitations de fatigue dans les matériaux composites stratifiés carbone époxy. Les paramètres de ce modèle sont identifiés à l'aide d'essais DCB, ENF et d'essais en mode mixte réalisés sur des matériaux unidirectionnels HTA/6376 et AS4/PEEK. Le modèle proposé intègre également une stratégie de sauts de cycles permettant de mener des calculs éléments finis simplifiés en réduisant le temps des simulations. Les résultats montrent que le modèle d'interface proposé permet de traiter la propagation du délaminage dans les structures composites.

ABSTRACT

A model of inter-laminar interface is proposed to simulate the delamination crack growth behaviour in carbon epoxy composite laminates under fatigue loading conditions. The parameters of this model are identified from DCB, ENF and mixed-mode tests, performed on unidirectional HTA/6376 and AS4/PEEK laminates. This model also incorporates a simple but effective integration scheme for high cycle fatigue based on cycle jump strategy, thus reducing the computational time. The results show that the proposed model can effectively simulate the fatigue delamination growth in composite laminates.

MOTS CLES : Délaminage, Fatigue, Structures stratifiées.

KEYWORDS : Damage, Fatigue, Laminated structures.

1. Introduction

Les structures stratifiées sandwichs soumises à des chargements de fatigue sont modélisées à une échelle intermédiaire dite « méso », liée à l'échelle des matériaux [1]. A cette échelle, la structure est décrite au moyen des constituants de base appelés méso-constituants : couches carbone époxy, âme Nomex et interfaces [2-5]. L'interface est une entité surfacique qui assure le transfert des déplacements et des contraintes normales entre deux plis adjacents ou entre une peau et l'âme du sandwich.

Il convient de rappeler que la matrice d'un matériau composite carbone époxy stratifié peut être sujette à des mécanismes de dégradation sous l'action de sollicitation de fatigue. Des études précédentes ont permis de montrer la faisabilité de la prédiction du délaminage sous l'action de sollicitations quasi-statiques. La modélisation du délaminage pour des chargements quasi-statiques est maintenant complétée pour des chargements de fatigue [6].

Le dimensionnement des structures sandwichs composites stratifiées fortement chargées est largement déterminé par l'analyse précise des zones à forts gradients telles que les bords ou les liaisons. En effet, c'est en général dans ces zones que naissent les premiers endommagements et que surviennent les ruptures. Pour certains types de structures stratifiées, le phénomène de dégradation majeur dans ces zones est l'initiation et la propagation des fronts de délaminage menant à la ruine de la structure. L'étude des propriétés mécaniques des matériaux carbone époxy sous l'action du délaminage est classiquement menée sur différentes stratifications représentatives des procédés de fabrication.

Ce travail vise à mieux comprendre et à mieux modéliser l'évolution des fronts de délaminage lors de sollicitations de fatigue. D'un point de vue expérimental, la difficulté d'un essai de délaminage réside dans la mesure du taux de restitution d'énergie caractérisant le matériau vis-à-vis de la propagation d'un front de fissure. On peut rappeler qu'un grand nombre de dispositifs d'essais mécaniques de délaminage normalisés par les organismes JIS (Japanese Industry Standards), ESIS (European Structural Integrity) ou ASTM (American Society for Testing Materials) sont actuellement disponibles. On peut citer l'essai en mode I : Double Cantiliver Beam, (ASTM 5528-94a, ISO CD 15024.2), les essais en mode II : End Notched Flexure, Four points ENF, End Loaded Split, (ESI TC4 V95), Centre Notched Flexure et les essais en mode mixte : Fixed Ratio Mixed Mode, Mixed Mode Bend, (ASTM D6671-01), Mixed-Mode-Flexure, Cracked Lap Shear, Edge Cracked Torsion.

La présente étude porte sur la modélisation de l'évolution du délaminage sous l'action de sollicitations de fatigue, à partir d'essais en mode I, mode II et modes mixtes. Les simulations ont été réalisées pour les matériaux UD HTA/637C et AS4/PEEK [7-8]. L'effet d'un chargement de fatigue évoluant entre une valeur minimum non nulle et un maximum est également modélisé avec succès sur le carbone UD AS4/PEEK. Le modèle proposé pour simuler le mécanisme de délaminage lors de chargements quasi-statiques et de fatigue est développé au sein du code éléments finis Cast3M (CEA).

1.1 Modélisation du délaminage en fatigue

Dans cette étude, l'éprouvette DCB unidirectionnelle est modélisée à une échelle intermédiaire dite « mésoscopique » située entre l'échelle macroscopique de la structure et celle des micro-constituants (fibres, résine) [1]. À cette échelle, la structure est décrite au moyen de deux constituants de base appelés méso-constituants (couches et interfaces) [2-4]. Cette « méso-modélisation » prend en compte les divers mécanismes de dégradation des matériaux composites. Dans le cas des structures stratifiées, le composite est décrit à l'échelle mésoscopique comme un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter-laminaires. L'interface inter-laminaire est introduite pour modéliser les phénomènes d'initiation et de propagation de délaminage [3-4]. La modélisation introduite dans le cadre éléments finis permet de simuler l'initiation et la propagation de la zone de rupture inter-laminaire.

2.1 Modélisation de l'interface inter-laminaire

Le potentiel thermodynamique de Gibbs (énergie de déformation du matériau endommagé) s'écrit pour l'interface sous la forme suivante :

$$E_D = \frac{1}{2} \left[\frac{\langle -\sigma_{33} \rangle_+^2}{k_3^0} + \frac{\langle \sigma_{33} \rangle_+^2}{k_3^0(1-d_3)} + \frac{\sigma_{32}^2}{k_2^0(1-d_2)} + \frac{\sigma_{31}^2}{k_1^0(1-d_1)} \right]$$

Où $\langle x \rangle_+ = \frac{|x| + x}{2}$ représente la partie positive de la quantité x . La détérioration de l'interface est prise en

compte par trois variables internes d'endommagement d_1 , d_2 et d_3 . Les rigidités k_1^0 , k_2^0 et k_3^0 sont liées aux caractéristiques élastiques des interfaces et sont difficiles à appréhender expérimentalement. Le modèle thermodynamique est construit en tenant compte des trois modes de délaminage possibles pour des

chargements quasi-statiques ou de fatigue. Les forces thermodynamiques conjuguées aux variables d'endommagement et associées aux trois modes de délaminage pour les deux types de chargement sont :

$$Y_{d_3} = \frac{1}{2} \frac{\langle \sigma_{33} \rangle_+^2}{k_3^0 (1-d_3)^2} \quad Y_{d_1} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{31}^2}{k_1^0 (1-d_1)^2} \quad Y_{d_2} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{32}^2}{k_2^0 (1-d_2)^2}$$

L'énergie dissipée dans ce modèle est :

$$\Phi = Y_{d_1} \dot{d}_1 + Y_{d_2} \dot{d}_2 + Y_{d_3} \dot{d}_3 \quad (\Phi \geq 0)$$

Dans ce qui suit les lois d'évolution de délaminage « isotrope », pour les chargements quasi-statiques ou de fatigue sont gouvernées par un taux de restitution d'énergie équivalent unique qui s'écrit :

$$\underline{Y}(t) = \text{Sup}_{\tau \leq t} \left[\left((Y_{d_3})^\alpha + (\gamma_1 Y_{d_1})^\alpha + (\gamma_2 Y_{d_2})^\alpha \right)^{1/\alpha} \right]$$

Où γ_1 et γ_2 sont des paramètres de couplage et α un autre paramètre matériau permettant de décrire le lieu de rupture.

3.1 Modèle de délaminage isotrope pour des sollicitations statiques [2]

L'endommagement est alors défini par le choix d'une fonction matériau $\omega(\underline{Y})$. L'interface interlaminaire est introduite pour modéliser et simuler par éléments finis les phénomènes d'initiation et de propagation de délaminage [2-4]

$$\omega(\underline{Y}) = \left[\frac{n}{n+1} \frac{\langle \underline{Y} - Y_0 \rangle_+}{Y_c - Y_0} \right]^n$$

Les relations entre les paramètres du modèle de dégradation sont rappelées dans (Allix et Ladevèze 92) pour un chargement quasi-statique. L'évolution du délaminage est choisie sous la forme suivante

$$\text{si } \left[(d_3 < 1) \text{ et } (\underline{Y} < Y_R) \right]$$

$$d_1 = d_2 = d_3 = \omega(\underline{Y})$$

Sinon

$$d_1 = d_2 = d_3 = 1$$

4.1 Modèle de délaminage isotrope pour des sollicitations de fatigue [6]

L'interface étant une zone d'épaisseur très faible, il semble assez naturel de considérer que l'interface rompue dans un mode de sollicitation donné l'est également pour tous les autres modes. La loi d'évolution de l'endommagement en fatigue est définie par le choix d'une fonction matériau $\omega_F(\underline{Y})$ telle que :

$$\frac{\partial d_{f1}}{\partial N} = \frac{\partial d_{f2}}{\partial N} = \frac{\partial d_{f3}}{\partial N} = \omega_F(\underline{Y})$$

La loi d'évolution de l'endommagement en fatigue est définie par le choix d'une fonction matériau. La fonction de délaminage $\omega_F(\underline{Y})$ est choisie sous la forme suivante :

$$\omega_F(\underline{Y}) = \frac{1}{1+\beta} C(M) (1-R)^{1+\beta} e^{\lambda d_T} \left[\frac{\langle \underline{Y} \rangle_+}{Y_c} \right]^{1+\beta}$$

$$R = \frac{Y_{\min}}{Y_{\max}}$$

Dans le cas des essais mécaniques en mode mixte, la dépendance des propriétés mécaniques en fonction de l'évolution du taux de mode II peut être prise en compte en introduisant une fonction $C(M)$ intégrant le calcul du ratio de mode II par rapport au mode total :

$$M = \frac{Y_{d1}}{Y_{d3} + Y_{d1}}$$

La fonction $C(M)$ peut être supposée constante pour certains matériaux. Le rapport R permet de tenir compte d'un chargement de fatigue évoluant entre une valeur minimum Y_{\min} et un maximum Y_{\max} .

L'évolution de l'endommagement prenant en compte les chargements statiques et de fatigue sont donc de la forme : $d_{iT} = d_i + d_{fi}$. L'hypothèse d'endommagement total isotrope correspond à $d_T = d_{1T} = d_{2T} = d_{3T}$ la rupture est décrite par $d_T = 1$ Le modèle d'interface endommageable proposé dépend de six paramètres matériau dont trois paramètres pour l'évolution des lois de fatigue.

2. Simulation du délaminage en fatigue

A titre d'illustration, des simulations éléments finis d'essais mécaniques de délaminage en mode I (DCB), en mode II (4 points ENF) et mode mixte, sont présentées sur les Figs 1 à 7. Le maillage éléments finis est composé d'éléments poutres reliés par le modèle d'interface de type Beer. La géométrie des éprouvettes et les conditions limites sont rappelées sur les Figs (1, 3 et 5). Les paramètres du modèle d'interface sont identifiés pour le matériau carbone époxy UD HTA/6376C (Tab 1). Les simulations permettent de retrouver l'évolution de la loi de Paris pour les différents modes de sollicitations (Figs 2, 4 et 6). Les Figs 7 et 8 présentent la prise en compte d'un chargement minimum non nul.

| Essais | G_C (N/mm) | Paramètres statiques de l'Interface | Paramètres de fatigue |
|-----------------------|-------------------|---|--|
| Mode I $\phi = 0$ | 0.26 ± 0.01 | $n = 0.5$ $Y_o = 0.$ $N.mm^{-1}$ $Y_c = 0.26 \pm 0.01$ $N.mm^{-1}$ $k_0^3 = 9.3 \times 10^3$ MPa/mm | $\lambda = 0.5$ $\beta(\phi) = 2$ $C(\phi) = 6.0 \times 10^{-4}$ |
| Mode II $\phi = 1$ | 1.002 ± 0.063 | $n = 0.5$ $Y_o = 0.$ $N.mm^{-1}$ $Y_c = 0.26 \pm 0.01$ $N.mm^{-1}$ $k_0^1 = 2.4 \times 10^3$ MPa/mm $\gamma_1 = 0.25$ | $\lambda = 0.5$ $\beta(\phi) = 2$ $C(\phi) = 6.0 \times 10^{-3}$ |
| Mixed mode | 0.447 ± 0.023 | $n = 0.5$ $Y_o = 0.$ $N.mm^{-1}$ $Y_c = 0.26 \pm 0.01$ $N.mm^{-1}$ $k_0^3 = 9.3 \times 10^3$ MPa/mm $k_0^1 = 2.4 \times 10^3$ MPa/mm $\gamma_1 = 0.25$ $\alpha = 2.0$ | $\lambda = 0.5$ $\beta(\phi) = 3.5$ $C(\phi) = 8.0 \times 10^{-2}$ |

Tab 1 : Paramètre du modèle d'interface du matériau UD HTA/6376C
UD HTA/6376C and interface associated model parameters

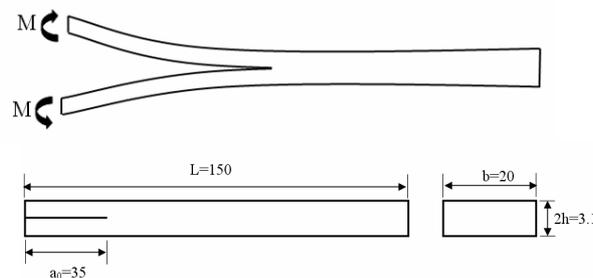


Fig. 1 : éprouvette de mode I soumise à des moments de flexion.
Specimen under pure mode I bending loading conditions

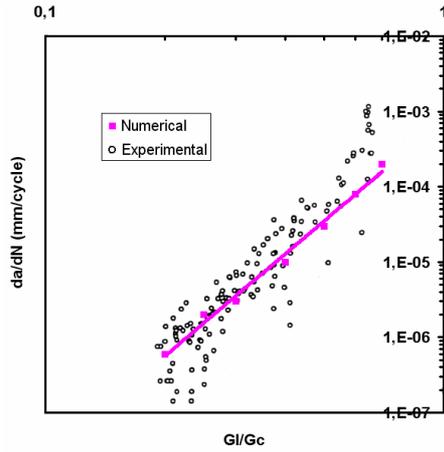


Fig 2 : simulation de fatigue : la loi de Paris en mode I.
Paris plot prediction for pure mode I fatigue delamination

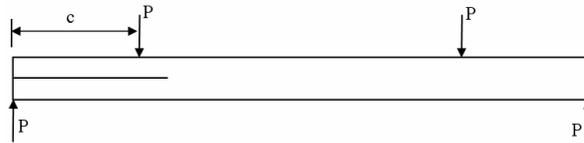


Fig 3 : éprouvette de mode II.
Specimen under pure mode II loading conditions

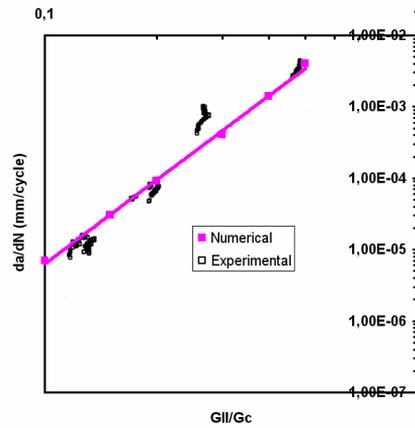


Fig 4 : simulation de fatigue : loi de Paris en mode II.
Paris plot prediction for pure mode II fatigue prediction

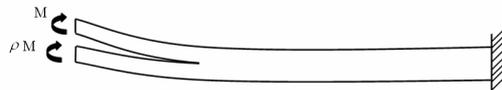


Fig 5 : éprouvette de mode mixte (50% mode I)
Specimen under mixed mode(50% mode I)

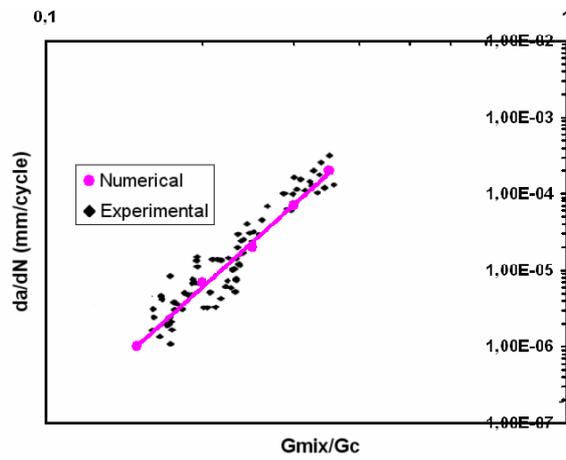


Fig 6 : simulation de fatigue : la loi de Paris en mode mixte (50% mode I).
Paris plot for mixed-mode (50% mode I) fatigue prediction

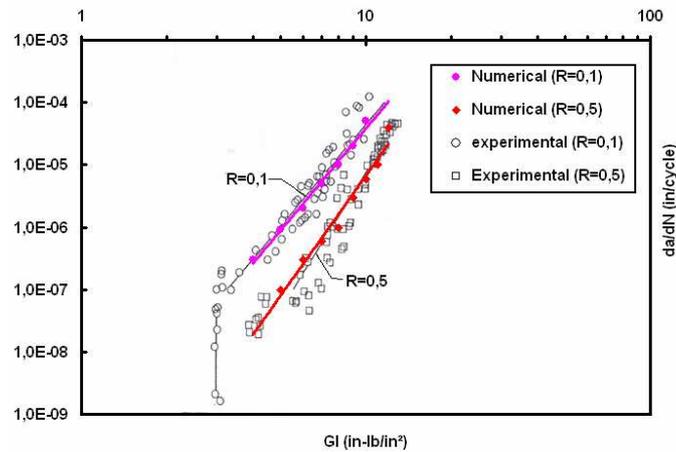
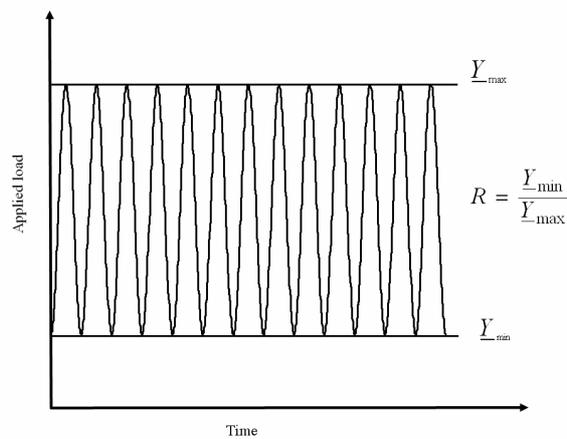


Fig 7 : Lois de Paris en mode I du UD AS4/PEEK, différents ratios de chargements.
UD AS4/PEEK Paris plot for pure mode I fatigue delamination with different load ratios

hal-00385834, version 1 - 20 May 2009

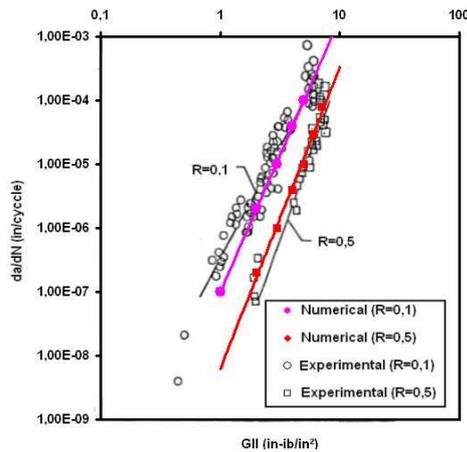


Fig 8 : Lois de Paris en mode II du UD AS4/PEEK, différents ratios de chargements.
UD AS4/PEEK Paris plot for pure mode II with different load ratios

3. Conclusion

Cette étude montre que le modèle développé est apte à simuler la propagation du front de délaminage pour des chargements de fatigue. Les essais destinés à mesurer les taux de restitution d'énergie des matériaux carbone époxy sont correctement simulés. La prise en compte du chargement minimum est également incorporée avec succès. Ce type de modèle d'interface peut également être utilisé pour simuler la rupture entre l'âme et la peau d'un sandwich.

4. Bibliographie

- [1] Ladevèze P., Sur la Mécanique de l'Endommagement des Composites, *Comptes rendus des JNC 5*, C. Bathias & D. Menkès eds, Pluralis Publication, Paris, pp. 667-683., 1986.
- [2] Allix O., Ladevèze P., Interlaminar interface modelling for the prediction of laminates delamination, *Composite Structure*, 22, pp. 235-242, 1992..
- [3] Gornet L., Levêque D., Perret L, Modélisation, identification et simulations éléments finis des phénomènes de délaminage dans les structures composites stratifiées, *Revue Mécanique et Industries, Elsevier*, 1, 3, , pp. 267-276 .. 2000.
- [4] Ladevèze P., Allix O., Gornet L., Leveque D. et Perret L., A Computational Damage Mechanics Approach for Laminates : Identification and Comparison with Experimental Result, *Damage Mechanics in Engineering Materials, Studies in Applied Mechanics 46*, G.Z. Voyiadjis, J.W. Ju & J.-L. Chaboche eds. Elsevier, pp. 481-500. 1998.
- [5] Gornet L., Marckmann G, Kamran-Ali S, Marguet S. Regoin JP, Essais et simulations des âmes Nomex sous sollicitations de type statique et fatigue, JNC 16 Toulouse 2009.
- [6] Gornet L., H Ijaz, D. Cartié, A high cycle elastic fatigue damage model for carbon fiber epoxy matrix laminates, *International Journal Engineering Fracture Mechanics*.2009.
- [7] Leif E. Asp, Sjogren A., Greenhalgh E. S. Delamination growth and thresholds in a carbon/epoxy composite under fatigue loading. *Journal of Composite Technology and Research*, 23(2), pp. 55-68. 2001.
- [8] Martin R. H., Murri G. B. Characterization of mode I and mode II delamination growth and thresholds in AS4/PEEK composites. *Composite Materials: Testing and Design ASTM STP 1059*, 9, pp. 251-270., 1990