HAL
open science

Caractérisation et modélisation des effets de vitesse pour le délaminage des composites stratifiés = Characterization and modeling of rate effects in composites laminates delamination

Jean-Mathieu Guimard, Olivier Allix

To cite this version:

Jean-Mathieu Guimard, Olivier Allix. Caractérisation et modélisation des effets de vitesse pour le délaminage des composites stratifiés = Characterization and modeling of rate effects in composites laminates delamination. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00392531

HAL Id: hal-00392531

https://hal.science/hal-00392531

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.

Author manuscript, published in "JNC 16, Toulouse : France (2009)"

Caractérisation et modélisation des effets de vitesse pour le délaminage des composites stratifiés

Characterization and modeling of rate effects in composites laminates delamination

J.-M. GUIMARD[1,2], O. ALLIX[1]

1 : Ens Cachan/CNRS/Université Paris6/UniverSud Paris
LMT Cachan
61, Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex, France.
e-mail : allix@lmt.ens-cachan.fr

2 : EADS France - Innovation Works,
Mechanical Modelling Team
12, Rue Pasteur, 92250 Suresnes Cedex, France.
e-mail : jean-mathieu.guimard@eads.net

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le contexte du délaminage statique et dynamique des matériaux composites stratifiés. Ce mode de dégradation interfacial, prépondérant dans les problématiques d'absorption d'énergie, exige une modélisation prédictive adaptée. L'objectif est d'étudier la capacité de prédiction du mésomodèle d'interface existant [1-2] dans le cas de propagations engendrant des vitesses de fissuration sub-soniques. L'utilisation d'un montage d'essai simple associé à une mesure optique de vitesse de fissuration permet d'observer quantitativement des effets de vitesse non négligeables en mode II, pour lesquels l'utilisation d'un mésomodèle d'interface classique fait défaut. Un modèle interfacial prenant en compte une dépendance temporelle est proposé, il est basé sur la mécanique de l'endommagement avec une loi d'évolution à taux d'endommagement limité. L'identification de l'effet retard est réalisée par corrélation calcul/essai sur toute une gamme de vitesse. Parallèlement, le contrôle numérique 1D du modèle retardé est étudié afin d'analyser la longueur caractéristique. Enfin, il est montré l'équivalence avec la mécanique de la rupture dans le cadre dynamique, avec la conséquence directe de l'augmentation du G_c en fonction de la vitesse de fissuration et la présence d'une vitesse limite.

Abstract

This paper deals with delamination issues in both quasi-static and dynamic loading rates for UD composites laminates. This interfacial degradation mode is a mandatory for energy absorption purposes, that is why dedicated predictive simulations are required. The objective is to discuss the ability of the classical interfacial model [1-2] to represent any rate effects in the propagation of delamination cracks leading to subsonic ranges. In order to make use of a simple loading device, a Mode-II case is used as the basis of the experimental study. The position of the crack is recorded quantitatively by means of a high-speed camera, it permits to argue for non-negligible rate effects which could not be modeled by the rate-independent interface. Then a modified damage evolution law is proposed: it is based on a bounded damage rate. We also provide a criterion for an appropriate spatial discretization of the process zone. The main consequence of this rate-dependent model is that it introduces a new dependence of G_c with the crack's velocity and the presence of a limiting crack velocity, which both lead to the equivalence with a rate-dependent fracture mechanics criterion.

Mots Clés : Délaminage mode II, mécanique de l'endommagement, interface, effets de vitesse, suivi de vitesse de fissuration.
Keywords : Mode-II delamination, damage mechanics, interface modeling, rate effects, crack velocity monitoring.

1. Introduction

L'utilisation croissante des matériaux composites dans les applications aéronautiques implique des efforts accrus en termes de caractérisation et de simulation prédictive des comportements sous sollicitations dynamiques. Ces travaux proposent plus particulièrement une investigation expérimentale et numérique du délaminage en mode II dans un matériau à fibres de carbone et matrice thermodurcissable.

D'un point de vue expérimental, de nombreux travaux sont dédiés aux essais de délaminages sous sollicitations dynamiques. Si pour les propagations intersoniques, des résultats d'essais très prometteurs sont disponibles pour les matériaux isotropes [3-7], la situation n'est pas la même pour les matériaux composites dans le domaine sub-sonique. Ceci est dû à la complexité des systèmes d'introductions d'efforts permettant d'obtenir des mesures suffisamment intrinsèques des phénomènes de fissuration. Pour le chargement en mode I par exemple, la question reste encore ouverte sur la nature et l'importance des effets de vitesses [8-10] ou comme le montre les travaux rassemblés dans [11].

Afin de simuler de manière prédictive ces propagations dynamiques, de nombreuses stratégies sont envisageables selon le choix de l'échelle de représentation (micro, méso ou macroscopique) et le choix du modèle. On peut notamment citer les approches interfaciales ou cohésives liées à un modèle de traction-séparation ou à variable interne [12-15] et les approches liées à la mécanique de la rupture. Dans ce papier, la modélisation mésoscopique [1] est privilégiée (ici dans une approche 1D) car elle autorise le calcul de structures par l'empilement d'entités plis et interfaces possédant leur propre comportement.

L'objectif premier de ces travaux est de montrer et quantifier les effets de vitesses dans le cas de propagation de mode II en utilisant un protocole et une géométrie d'essai relativement simple (permettant de réaliser les essais statiques et dynamiques sur les mêmes bases) et en tirant partie d'une technique de suivi de fissuration par caméra rapide (jusqu'à 10 m/s). Le second objectif est de proposer un modèle d'endommagement mésoscopique capable de prendre en compte ces effets de vitesse et d'étudier les conséquences en termes de longueur caractéristique et d'interprétation des phénomènes.

2. Protocole et résultats en propagation de délaminage mode II

2.1. Définition de l'éprouvette CLS modifiée et valeur de propagation statique

Dans le but d'étudier la propagation des délaminages en mode II, on utilise une éprouvette de type CLS (Crack Lap Shear) qui a une forme globale d'éprouvette de traction classique mais présente une pré-fissure jusqu'à une longueur a0 à la mi-épaisseur (Fig. 1) la séparant en deux bras. Le chargement est réalisé à l'extrémité d'un seul bras. Des maintiens géométriques latéraux sont ajoutés évitant l'ouverture des bras et assurant une propagation en mode II quasi-pur sans introduire d'effort parasite (validé par pré-dimensionnement numérique). La stratification proposée est de 12 plis unidirectionnels orientés à 0°, ce qui assure des effets de vitesse négligeables dans les plis eux-mêmes. Les essais statiques sont réalisés sur machine hydraulique à une vitesse de déplacement constante de 2mm/min. Le déplacement est enregistré par capteur LVDT et l'effort de réaction à propagation $P=F_c$ par capteur piézo-électrique.

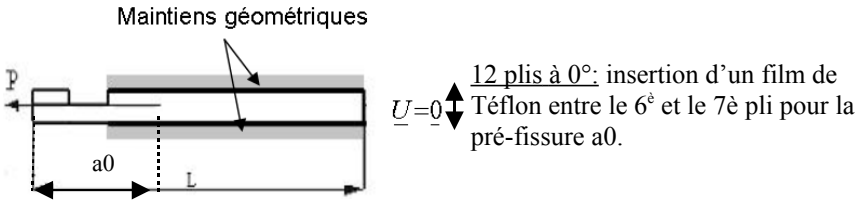

Fig. 1: Géométrie de l'éprouvette CLS modifiée.

$$G_{IIc} = \frac{F_c^2 h_2}{2Eb^2 h_1 (h_1 + h_2)} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Le résultat obtenu est présenté dans la (Fig.4, trait noir) en termes de l'effort en bout d'éprouvette en fonction du déplacement. Trois phases distinctes apparaissent. La montée en charge est linéaire élastique jusqu'à un point d'inflexion annonçant la phase de plateau de propagation du délaminage à amplitude de force quasi-constante et stable. Arrivé à la fin du plateau, cela correspond à la fin de la propagation et à la reprise de rigidité comme le prévoit la théorie. L'utilisation de la formule de mécanique de la rupture (eq. 1) fournit la valeur G_c=1 kJ/m^2, qui sera prise comme valeur statique de référence par la suite.

2.2. Protocole expérimental en dynamique et développement d'un suivi de fissuration

Le protocole expérimental pour des sollicitations dynamiques (consignes de 0.5 à 8 m/s) utilise la même géométrie d'éprouvette associée à une machine à vérin rapide. Outre les mesures usuelles d'effort et de déplacement, la quantité d'intérêt majeure à suivre est alors la vitesse de fissuration instantanée. Ce suivi optique est assuré par une caméra rapide (jusqu'à 250000 images/s) et un traitement d'image dédié utilisant un seuillage par contraste (Fig. 2).

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

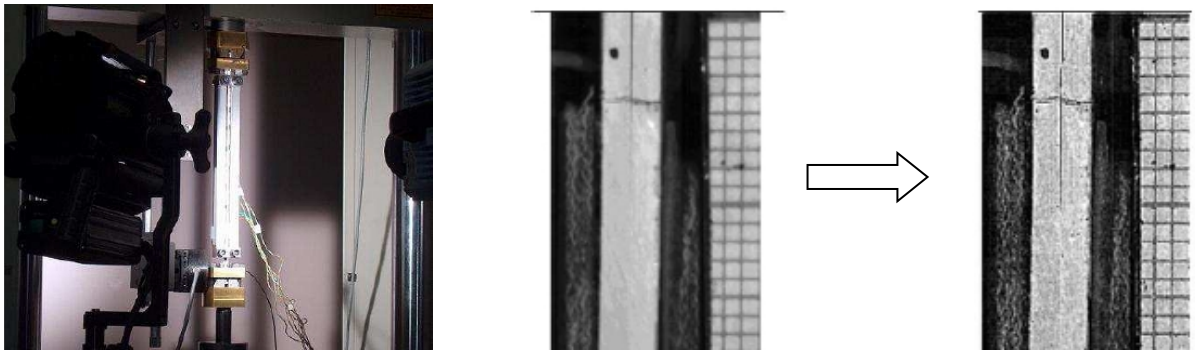

Fig. 2: Essai dynamique équipé du suivi optique (gauche)
et traitement par seuillage et contraste d'un cliché brut (droite).

2.3. Résultats expérimentaux sous sollicitations dynamiques

Les résultats d'essais dynamiques sont tracés sur la (Fig. 3) en termes d'effort en fonction du déplacement. De plus, le traitement par contraste donne accès à la vitesse de fissuration en fonction du temps de propagation (Fig. 4). Par rapport à la courbe référence quasi-statique (trait noir), la phase de montée en charge respecte la même rigidité moyenne, puis le comportement diffère. On constate deux types d'allures: les courbes faiblement dynamiques (entre 0.5 et 2 m/s) dont la force à propagation oscille autour de sa valeur statique et les courbes fortement perturbées (à partir de 4 m/s) pour lesquelles la durée de propagation est indiscernable et le plateau de propagation quasi-inexistant. Dans ce cas, la méthode de suivi in-situ tire tout son avantage.

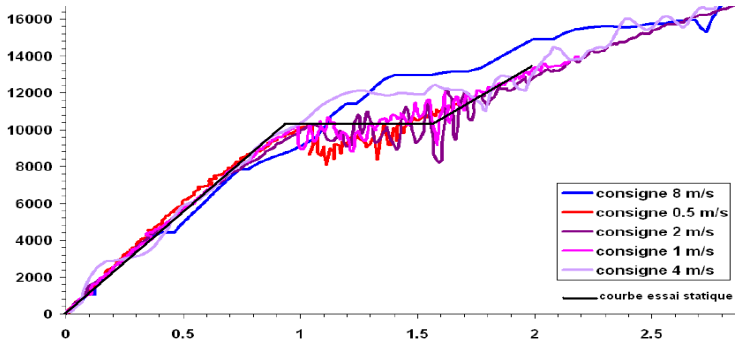

Fig. 3: Résultats d'essais statiques et dynamiques: Effort (N) en fonction du déplacement. (mm).

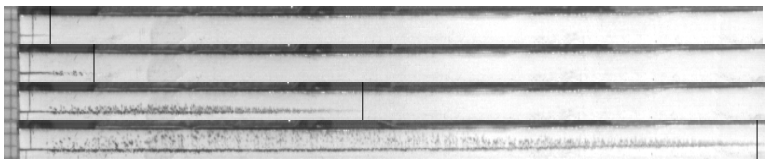

Fig. 4: Clichés de fissuration pour une vitesse consigne de 8 m/s (le réticule vertical résulte du traitement par contraste).

2.4. Le modèle d'interface standard sans dépendance temporelle

On fait le choix d'une modélisation mésoscopique du délaminage pour appréhender les phénomènes dynamiques de fissuration. Le mésomodèle d'interface du LMT Cachan [1-2] est utilisé. Il consiste en la définition d'une entité interface entourée de deux plis (Fig. 5) possédant sa propre loi élastique endommageable ainsi que sa densité d'énergie de déformation $\rho\psi$.

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

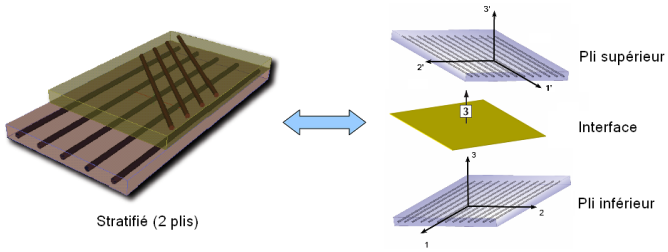

Fig. 5: Représentation d'un stratifié à deux plis et représentation mésoscopique en entités plis et interface de délaminage.

Le formalisme d'interface endommageable est décrit dans le cas particulier d'un mode II. Soit τ la contrainte de cisaillement interlaminaire, qui est continue à travers la zone d'interface. La discontinuité de déplacement est représentée par le vecteur saut $[\underline{U}]$ défini par rapport à la normale de l'interface N_3.
Le modèle d'endommagement en mode II est dérivé de l'énergie libre (ou de Helmholtz) exprimé dans l'équation. La variable d est une variable interne (avec les conditions telles que $d \in [0,1]$ et dpoint>0, d=1 correspond à la dégradation totale). D'un point de vue thermodynamique, l'inégalité de Clausius-Duhem s'applique et s'écrit par la densité de puissance dissipée : $\phi = Y_d.\text{dpoint} > 0$. Y_d est la force thermodynamique gouvernant l'évolution de l'endommagement d, c'est également l'énergie élastique stockée (eq.2). Lorsque la fatigue n'est pas considérée, il est admis pour ce type de composite que l'évolution de l'endommagement est uniquement piloté par la valeur maximale de Y_d, notée Y_{eq} (eq. 3).

$$\rho\Psi([\underline{U}],d) = \frac{1}{2}k_t^0(1-d)[\underline{U}]^2 = \frac{1}{2}k_t^0(1-d)\,[\underline{U}]^t.[\underline{U}]$$
$$\rho\Psi^*([\underline{U}],d) = \frac{1}{2}\frac{\tau^2}{k_t^0(1-d)}$$
$$Y_d = -\frac{\partial\rho\Psi}{\partial d}|_{[\underline{U}]} = \frac{\partial\rho\Psi^*}{\partial d}|_{\tau}$$
$$Y_d = \frac{1}{2}k_t^0[\underline{U}]^2 = \frac{1}{2}\frac{\tau^2}{k_t^0(1-d)^2}$$

(eq. 2)

$$Y_{eq}(t) = \sup_{t_i \leqslant t} Y_d(t_i)$$
$$\text{tant que } d<1,\ d = w(Y_{eq});\ \text{sinon, } d=1$$
$$\text{avec: } w(Y_{eq}) = \left[\frac{\alpha}{\alpha+1}\frac{<Y_{eq}-Y_0>_+}{Y_c-Y_0}\right]^{\alpha} = \left[\frac{1}{3}\frac{Y_{eq}}{Y_c}\right]^{0.5}$$

(eq. 3)

La loi d'évolution est non dépendante du temps, le terme $<x>_+$ correspond à la valeur positive de x. A partir des expériences sur des matériaux similaires, il est admis la valeur de α=0.5. De même, le paramètre Y_0 est sensible uniquement à l'initiation, l'identification de ce paramètre est encore indécis du fait de la faiblesse des matrices testées toutes seules, la valeur Y_0=0 est imposée, ce qui n'a aucune influence dans ce cas de propagation. Par conséquent, la loi statique requiert l'identification de seulement deux paramètres: la raideur d'interface initiale et le paramètre de propagation Y_c qui est directement lié au taux de restitution d'énergie critique G_c=Y_c de la mécanique linéaire de la rupture.

2.5. Incompatibilité des résultats en propagation dynamique avec une loi d'endommagement indépendante du temps

Les résultats statiques sont bien corrélés par le modèle d'interface statique [1-2] 'décrit au paragraphe précédent), en termes de raideur initiale, de plateau quasi-horizontal en force de propagation et de reprise d'effort à la fin de la propagation (Fig. 6-gauche). Seul le paramètre de propagation Y_c est identifié grâce au lien direct entre la mécanique de la rupture (donnée du taux de restitution d'energie critique G_{IIc}) et la mécanique de l'endommagement. Cette loi d'endommagement suffit à représenter la propagation quasi-statique de cet essai. En revanche, pour les vitesses de consignes plus élevées, l'analyse locale des vitesses de propagations réelles suggère un effet de ralentissement asymptotique à l'approche d'une vitesse limite (0.6 fois cR) bien en-deçà de la vitesse limite prévue par la théorie (Fig. 6-droite), qui est la vitesse de Rayleigh cR du composite considéré [5].

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

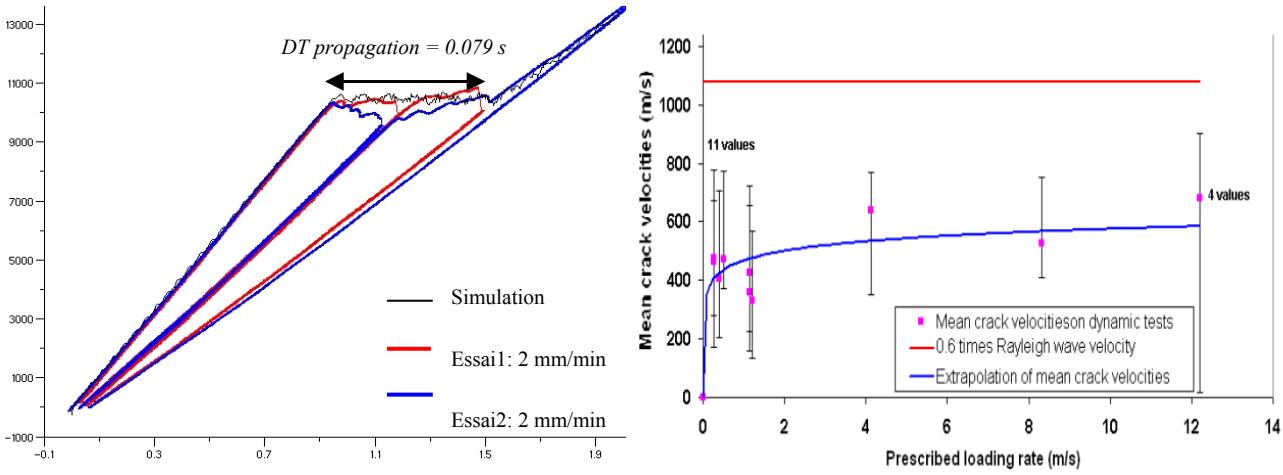

Fig. 6. Validation de l'identification statique avec la loi classique (gauche). Tracé de la vitesse moyenne de propagation en fonction de la vitesse de consigne pour les essais dynamiques (droite).

Plus précisément, ces effets ne sont pas reproductibles avec la loi classique d'endommagement: par exemple pour les vitesses de consigne de 4 et 8 m/s, la (Fig. 7) présente des gaps significatifs en termes de vitesses entre une simulation numérique 1D des mêmes essais et les points de mesures optiques. Le résultat majeur est donc qu'un effet de vitesse important existe sur l'interface (écart jusqu'à 1400 m/s).

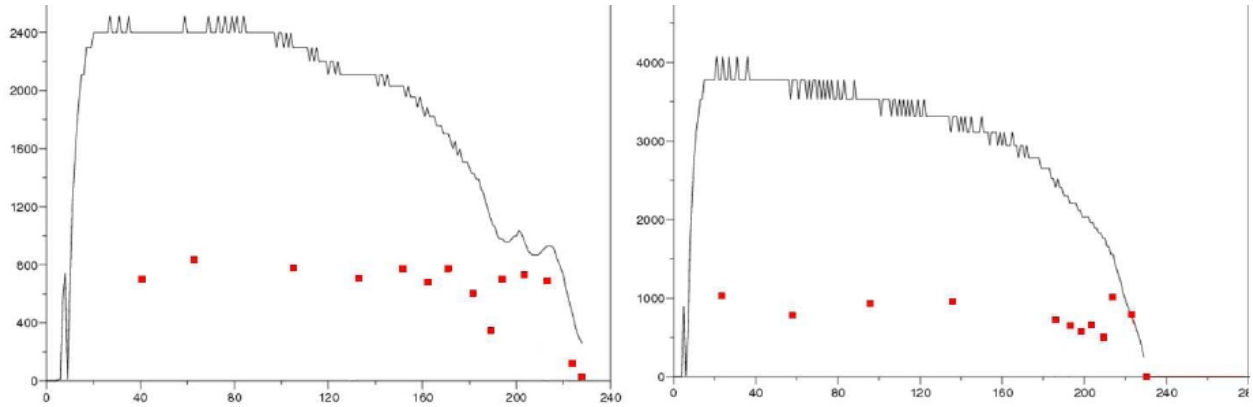

Fig. 7. Comparaisons mesures de vitesses de fissuration (m/s) en fonction de l'avancée de fissure (mm) pour un essai à 4 m/s (gauche) et à 8 m/s (droite).

3. Proposition d'un modèle d'interface dépendant du temps

3.1. Le modèle à taux d'endommagement limité

Parmi de nombreuses propositions de modèles intégrant une dépendance temporelle, on peut distinguer les formulations de lois cohésives ou interfaciales par la manière d'introduire de tels effets: soit par un terme visqueux [14], soit par un terme d'ouverture critique dépendant directement ou indirectement de la vitesse d'ouverture [16-17]. L'idée développée ici est de proposer un modèle d'effet vitesse directement lié au processus d'endommagement de l'interface et donc intégré à la loi d'évolution de cette variable. En effet, l'ingrédient introduit ici est un taux d'endommagement limité (eq. 4), initialement proposé dans [18]. L'hypothèse repose donc sur l'idée que le processus d'endommagement ne se développe pas instantanément dans la matière. Cette loi est définie par deux nouveaux paramètres: A_c adimensionnel et τ_c homogène à un temps. Le terme $w(Y_{eq})$ désigne quant à lui la valeur de la variable d'endommagement selon la loi d'évolution classique, i.e. sans effet de vitesse.

$$\begin{aligned} w(Y_{eq}) &= \{\frac{n}{n+1}\times\frac{Y_{eq}}{Y_c}\}^n \\ \dot{d} &= \frac{1}{\tau_c}(1-exp[-A_c < w(Y_{eq}) - d >_+]) \text{ tant que } \quad d<1 \\ & \text{sinon} \quad d=1 \end{aligned} \qquad \text{(eq. 4)}$$

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

3.2. Identification des paramètres additionnels

L'identification est réalisée de manière indirecte par comparaison essai/calcul. La simulation numérique 1D a montré son efficacité pour représenter le phénomène de propagation et les grandeurs associées [19], il est ainsi valide d'utiliser cette approche pour identifier les paramètres de la loi dépendante du temps. Pour les consignes de 4 et 8 m/s, la corrélation essai/calcul a été réalisée de façon satisfaisante à la fois sur les courbes effort global en fonction du déplacement (Fig. 8) et sur les courbes d'évolution de la vitesse de fissuration (Fig. 9 et 10). Cette identification conduit au couple idéal Ac=1 et τ_c=0.006 ms.

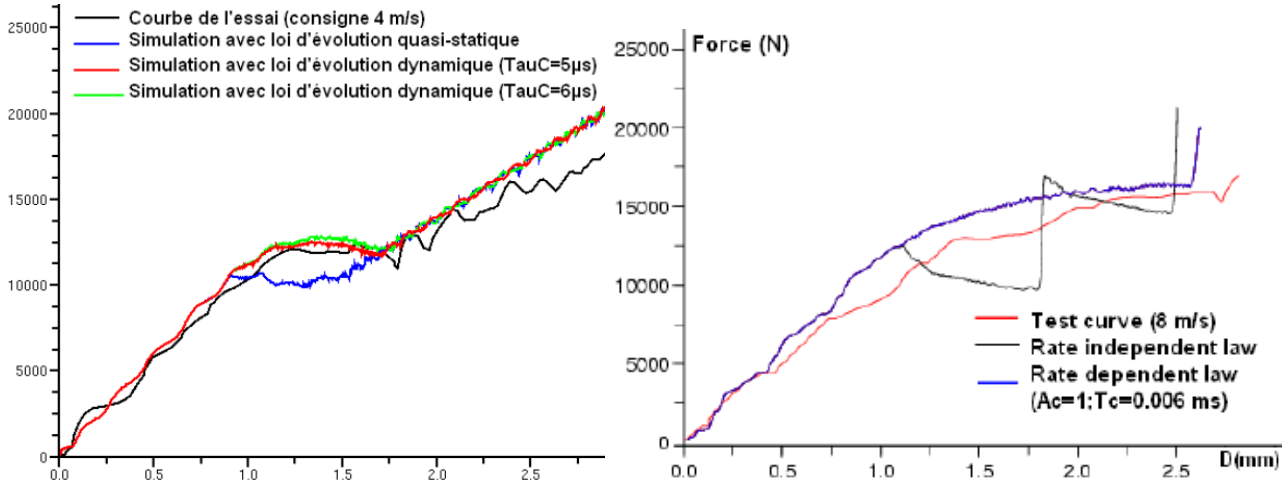

Fig. 8. Corrélations calcul/essai à 4 m/s (gauche) et 8 m/s (droite): Effort (N) fonction du déplacement (mm).

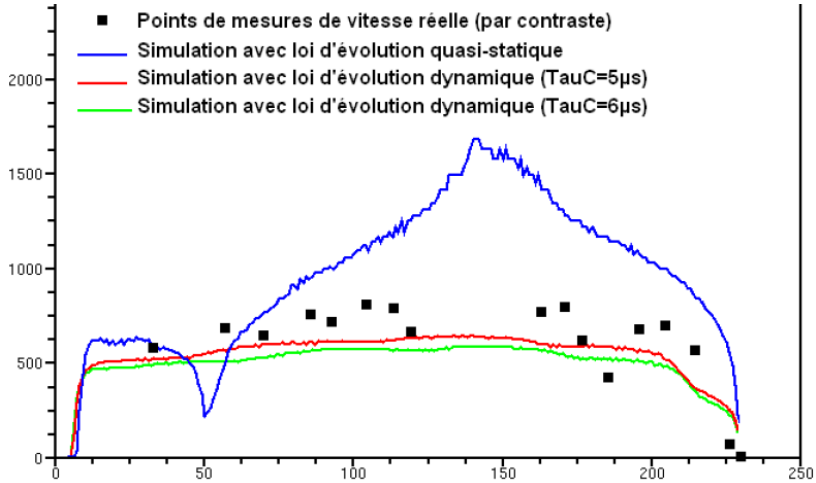

Fig. 9. Essai à 4 m/s : Effort (N) en fonction du déplacement (mm).

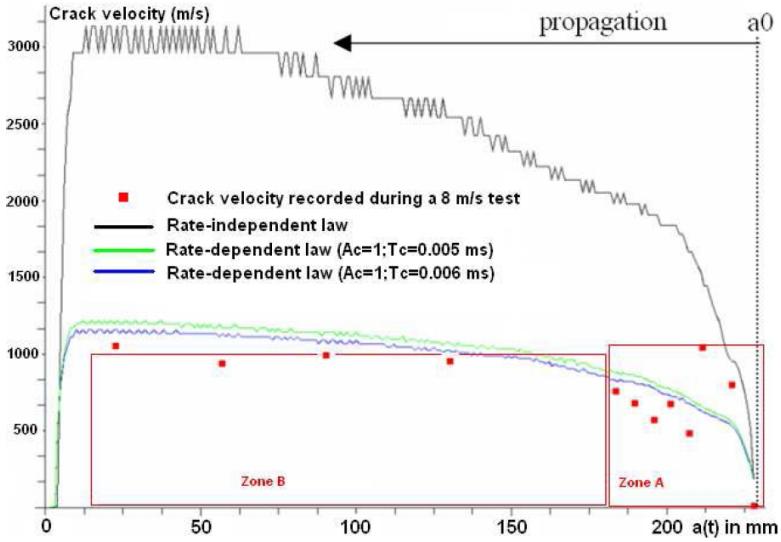

Fig. 10. Essai à 8 m/s : Effort (N) en fonction du déplacement (mm).

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

3.3. Les grandeurs caractéristiques associées à la process zone

Un modèle analytique de fissuration en dynamique développé dans [19] (sous hypothèse de propagation quasi-stationnaire) est utilisé pour évaluer la longueur caractéristique propre à ce modèle adoucissant. Dans [19], il est établi un critère Lc lié à la process zone pour le cas de la loi sans dépendance temporelle. Cela implique de pouvoir discrétiser avec au moins 5 éléments dans cette longueur Lc de façon à assurer une bonne représentation spatiale de cette process zone (Fig. 11 et 12). Pour les paramètres identifiés de la loi à taux limité, ces mêmes courbes sont tracées à partir des résultats numériques 1D. Il est constaté notamment que l'évolution de Lc en fonction de la raideur n'est pas modifiée (Fig. 11) alors que la taille de la porcess zone en fonction de la vitesse de fissuration est quasi-constante et limitée également par la vitesse limite V_{lim} (Fig. 12). Ce dernier résultat mène à une discrétisation spatiale minimale conservatrice par rapport au cas quasi-statique.

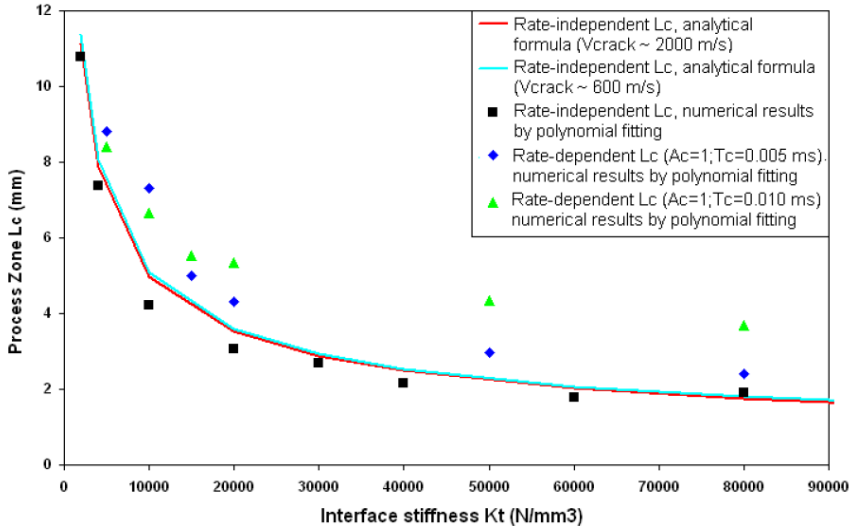

Fig. 11. Process zone (mm) en fonction de la raideur interfaciale (loi classique et dépendante du temps).

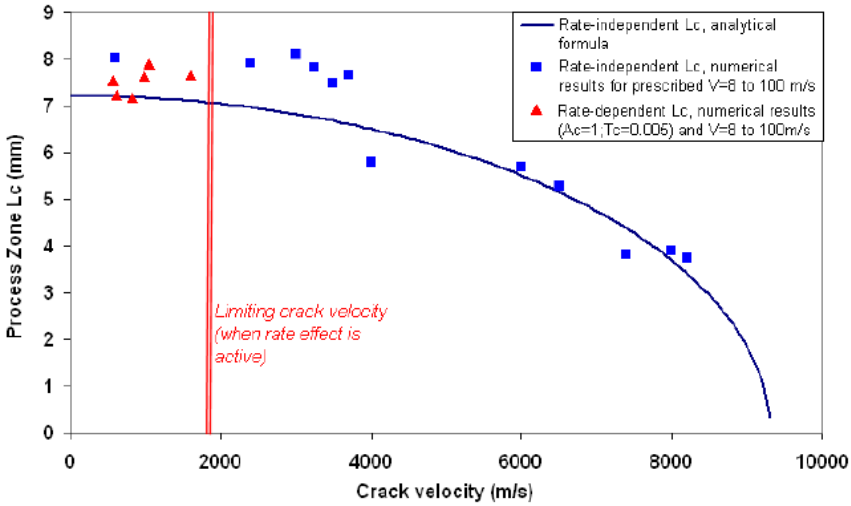

Fig. 12. Process zone (mm) en fonction de la vitesse de fissuration (loi classique et dépendante du temps).

4. Effets de la limitation du taux d'endommagement et interprétation des paramètres du modèle

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'interprétation locale de la loi à taux d'endommagement limité. Il est étudié la modification de l'équivalence entre la loi d'endommagement modifiée et la mécanique de la rupture, qui se résumait à l'équation $Y_c=G_c$ dans le cas quasi-statique.

4.1. Interprétation locale des paramètres

Les tracés de la loi d'évolution modifiée en fonction du terme $<w(Y_{eq})-d>_+$ en faisant varier les deux paramètres A_c et τ_c sont reproduits en (Fig. 13). Il est constaté d'une part que le paramètre τ_c correspond à la valeur maximale du taux d'endommagement autorisé dans le modèle, et ceci quelque soit le niveau de la

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

force thermodynamique $w(Y_{eq})$. D'autre part, la variation du paramètre A_c (à τ_c fixé) permet de rendre compte d'une plus ou moins grande fragilité de l'interface : en effet les grandes valeurs de A_c conduisent à l'atteinte la plus rapide du taux maximal d'endommagement, i.e. à une interface quasi-fragile.

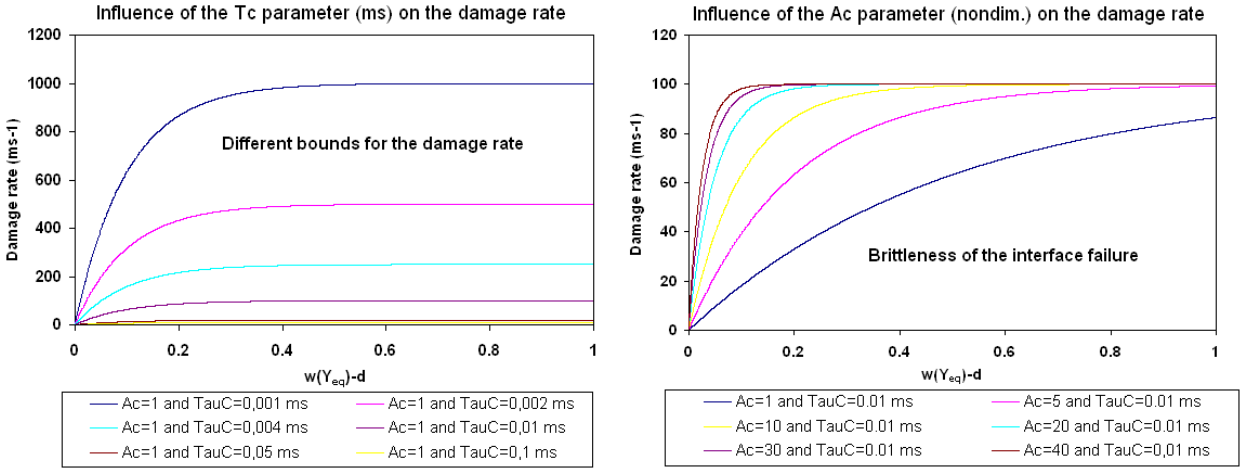

Fig. 13. Influence de τ_c (gauche) et de A_c (droite) sur le taux d'endommagement pour la loi à taux limité.

L'examen de ces courbes fournissent des informations pertinentes sur le fait que le paramètre majeur est le paramètre temporel τ_c puisqu'il fixe indirectement la vitesse de fissuration limite du modèle.

4.2. Equivalence avec la mécanique de la rupture en dynamique : existence d'un terme de vitesse limite

Afin de préciser cette conséquence du paramètre τ_c, il est utile de calculer le taux de restitution local au sens de la mécanique de l'endommagement (eq. 5) pour différentes valeurs de τ_c (Fig. 14). Il est constaté des tendances croissantes en fonction de la vitesse de fissuration qui peut être reproduit par une équation de type mécanique de la rupture (comme proposé dans [20-21]) dépendant de la vitesse, du G_c quasi-statique, d'un terme de vitesse limite V_{lim} et d'un paramètre n, décrit dans l'équation (eq. 6).

$$G_{IIc}^{\text{local CDM}}(a,\dot{a}) = \int_{t=0}^{t=T_{failure}} \int_{\Gamma} Y_{d1}(x,t)\dot{d}(x,t)dtd\Gamma \qquad \text{(eq. 5)}$$

$$G_{IIc}^{dyn} = \frac{G_c^{static}}{(1-(\frac{\dot{a}}{V_{lim}})^n)} \qquad \text{(eq. 6)}$$

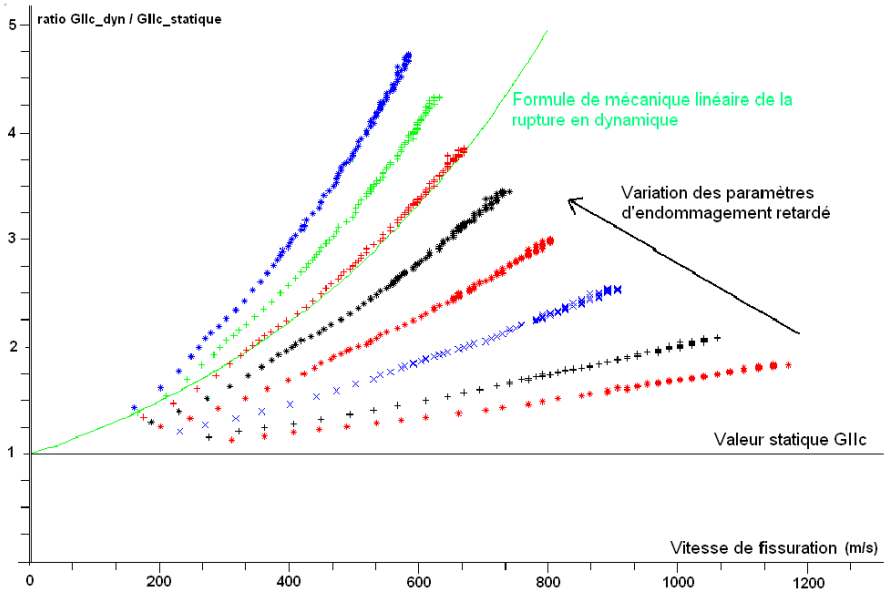

Fig. 14. Résultats de GIIc local au sens de la mécanique de l'endommagement à taux d'endommagement limité (en pointillés). Comparaison avec le modèle sans taux limité (trait noir) et la formule dynamique au sens de la mécanique linéaire de la rupture (trait vert).

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

Ce résultat assure ainsi l'équivalence entre la loi à taux limité proposée et un critère de mécanique de la rupture dynamique, une fois les paramètres A_c et τ_c fixés. Cette équivalence peut être précisée par la figure (Fig. 15) avec la correspondance entre la valeur de cette vitesse limite V_{lim} *et n* et le paramètre τ_c. En comparant avec les vitesses limites observées dans la littérature sur la fissuration dynamique [11], on constate que l'ordre de grandeur est de 0.6 fois la vitesse limite théorique, i.e. la vitesse des ondes de Rayleigh. Pour ce cas identifié dans ces travaux, l'équivalence donne une vitesse limite de l'ordre de 1100 m/s, ce qui correspond à un facteur 0.58 par rapport à la vitesse de Rayleigh du matériau considéré. Le même rapport est ainsi identifié sur ce matériau composite et sur les matériaux isotropes fragiles ou à rupture aléatoire (comme les céramiques par exemple).

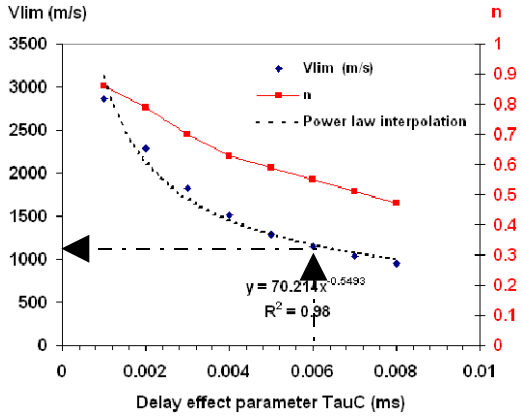

Fig. 15. Correspondance entre les paramètres V_{lim} et n de la loi mécanique de la rupture et le paramètre τ_c de la loi d'endommagement à taux limité.

4.3. Interprétation par phénomènes microscopiques

Comme suggéré au paragraphe précédent, l'accroissement du taux de restitution critique selon la vitesse de fissuration peut être expliqué par des changements de types de fissurations locales en pointe de la fissure principale. En effet, la théorie de la fissuration dynamique prévoit très bien l'apparition de ces micro-bifurcations autour de la fissure principale [22] et des constatations expérimentales ont montré l'apparition de surfaces différentes par exemple dans [4]. Dans l'approche mésoscopique proposée utilisant l'effet de taux d'endommagement limité, l'endommagement est diffusé spatialement, ce qui peut être expliqué énergétiquement par l'apparition de micro-branchements à l'échelle inférieure (Fig. 16). En effet, au niveau microscopique de la zone d'interphase fissurée, le même G_c est dissipée par unité de surface mais dans des directions secondaires orientées par rapport à la direction initiale, par la création de micro-fissures de délaminage. A l'échelle mésoscopique, ceci correspond à un G_c apparent augmentant avec la vitesse de fissuration et à un ralentissement de cette vitesse.

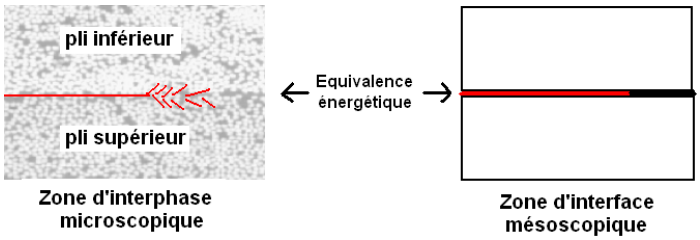

Fig. 16. Schéma explicatif des phénomènes de micro-branchements à l'interphase interplis (gauche) et équivalence mésoscopique interfaciale.

Conclusions

Dans ces travaux, il est montré par l'intermédiaire de comparaisons calculs/essais et une méthode de suivi de fissuration dédiée que des effets de vitesses interfaciaux non négligeables existent dans le cas de propagations de mode II. Ces effets doivent être pris en compte en vue de le simulation numérique prédictive de tels essais car le modèle d'interface endommageable classique ne permet pas de reproduire de tels effets. Une adaptation a été proposée pour pouvoir rendre compte d'une dépendance temporelle. Il s'agit de l'utilisation d'une loi d'évolution à taux d'endommagement limité. L'identification des paramètres adimensionnels sur la gamme sub-sonique de vitesse de fissuration a également permis d'étudier les conséquences majeures en termes de quantités caractéristiques mais encore de proposer une loi de

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009

fissuration équivalente au sens de la mécanique de la rupture en dynamique, par l'intermédiaire d'une vitesse limite, interprétable par des phénomènes microscopiques.

Références

[1] O. Allix, P. Ladevèze. Interlaminar interface modelling for the prediction of delamination. *Composite Structures,* 22(4), 1992.
[2] O. Allix, D. Lévêque, L. Perret. Identification and forecast of delamination in composite laminates by an interlaminar interface model. *Composites Science and Technology*. Vol. 58, 1998, pp. 671-678, 1998.
[3] J. Lambros, A.J. Rosakis. Dynamic crack initiation and growth in thick unidirectional graphite/epoxy plates. Composites Science and Technology. Vol. 57, pp. 55-65. 1997.
[4] O. Samudrala, Y. Huang, A.J. Rosakis. Subsonic and intersonic shear rupture of weak planes with a velocity weakening cohesive zone. Journal of Geophysical Research. Vol. 107(B8,2170), pp. 1-32. 2002.
[5] D. Coker, A.J. Rosakis. Experimental observations of intersonic crack growth in axisymmetrically loaded unidirectional composites plates. Philosophical Magazine A. Vol. 81(3). 2001.
[6] K. Ravi-Chandar, W.G. Knauss. An experimental investigation into dynamic fracture; I.Microstructural aspects. International Journal of Fracture. Vol. 26, pp. 65-80. 1984.
[7] K. Ravi-Chandar, W.G. Knauss, W-G. An experimental investigation into dynamic fracture; III.On steady state crack propagation and branching. Int. J. of Fracture. Vol.26, pp. 141-154. 1984.
[8] C.T. Sun, C. Guo. Dynamic mode-I crack-propagation in a carbon/epoxy composite. *Composites Science and Technology*. 1998. Vol. 58, pp. 1405-1410.
[9] G. Hug, P. Thévenet, P. Planard, J. Fitoussi, D. Baptiste. Ténacité à la rupture interlaminaire en mode I d'un stratifié unidirectionnel carbone/époxy soumis à un chargement à vitesse élevée". *Comptes-Rendus des JNC 14, AMAC*. 2005.
[10] M. Barbezat. Influence de la vitesse de sollicitation sur le comportement de composites à matrices époxydes. Thèse de l'EPFL Lausanne. 1990.
[11] K. Ravichandar. Dynamic Fracture. 2004. *Elsevier Edition*.
[12] D.S., Dugdale, D-S. Yielding of stell sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 8, pp. 100-104. 1960.
[13] G.I. Barenblatt. The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture. Advances in Applied Mechanics. Vol.7, pp. 55-129. 1962.
[14] A. Needleman. Material rate dependence and mesh sensitivity in localization problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Vol.67, pp. 69-85. 1988.
[15] J. Schellekens, R. De borst. A non-linear finite element approach for the analysis of mode I-free edge delamination in composites. International Journal of Solids and Structures. Vol. 30(14), pp. 1239-1253. 1993.
[16] F. Zhou, J.F. Molinari, T. Shioya. A rate-dependent cohesive model for simulating dynamic crack propagation in brittle materials. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 72, pp. 1383-1410. 2005.
[17] A. Corigliano, S. Mariani, A. Pandolfi. Numerical analysis of rate-dependent dynamic composite delamination. *Composites Science and Technology*. Vol. 66. pp. 766-775. 2006.
[18] O. Allix, F.F. Deü. Damage Mesomodelling for the Fracture Prediction of Laminated Composites under Dynamic Loading. *Engineering Transactions.* 29-46 eds. 45(1): pp. 1148-55. 1997.
[19] J.M. Guimard, O. Allix, N. PECHNIK, P. THEVENET. Energetic analysis of fragmentation mechanisms and dynamic delamination modelling in CFRP composites. *Computers & Structures*. Vol à paraitre. 2009.
[20] L.B. Freund. Dynamic fracture mechanics. 1990. Cambridge University Press.
[21] M. Kanninen, C.H. Popelar. Advanced fracture mechanics. 1985. Oxford University Press.
[22] J-D. Achenbach, Z.P. Bazant. Elastodynamic near-tip stress and displacement fields for rapidly propagating cracks in orthotropic materials. *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 42(1), pp. 183-189. 1975.

hal-00392531, version 1 - 8 Jun 2009