



**HAL**  
open science

**Modélisation en dynamique rapide du délaminage des composites à l'aide d'éléments finis cohésifs = Dynamic delamination modeling of unidirectional composites by cohesive finite elements**

Muhammad Ilyas, Frederic Lachaud, Christine Espinosa, Laurent Michel,  
Michel Salaün

► **To cite this version:**

Muhammad Ilyas, Frederic Lachaud, Christine Espinosa, Laurent Michel, Michel Salaün. Modélisation en dynamique rapide du délaminage des composites à l'aide d'éléments finis cohésifs = Dynamic delamination modeling of unidirectional composites by cohesive finite elements. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 9 p. hal-00389645

**HAL Id: hal-00389645**

**<https://hal.science/hal-00389645v1>**

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 en dynamique rapide du délaminage des composites à l'aide d'éléments finis cohésifs

## *Dynamic delamination modeling of unidirectional composites by cohesive finite elements*

Muhammad ILYAS, Frédéric LACHAUD, Christine ESPINOSA, Laurent MICHEL, Michel SALAÜN

Département Mécanique des Structures et Matériaux, ISAE  
Université d'Toulouse – 1 place Emile Blouin, 31500 Toulouse  
e-mail : [milyas@isae.fr](mailto:milyas@isae.fr), [flachaud@isae.fr](mailto:flachaud@isae.fr), [christine.espinosa@isae.fr](mailto:christine.espinosa@isae.fr), [msalaun@isae.fr](mailto:msalaun@isae.fr), [lmichel@isae.fr](mailto:lmichel@isae.fr)

### Résumé

Les éléments finis cohésifs sont utilisées pour modéliser le délaminage dans les matériaux composites stratifiés T800/M21. On propose dans cette étude d'utiliser ces éléments dans un code de dynamique rapide (LS-DYNA) afin de prévoir les endommagements de types délaminages lors d'impacts basses vitesses. La mise au point du modèle de comportement de ces éléments est réalisée sur des essais simples de mécanique de la rupture (DCB, ELS et MMB). La loi utilisée est une loi bilinéaire et le critère de propagation est basé sur un critère de couplage en mode I et en mode II. Enfin, des résultats expérimentaux d'impact sont comparés à des modèles numériques en dynamique rapide.

### Abstract

Impact induced delamination prediction of T800/M21 unidirectional laminated composite is investigated by utilising cohesive finite elements. Cohesive element parameters are identified from DCB, ELS and MMB tests. Results from experiments and numerical prediction of impact induced delamination by commercially available code LS-DYNA are compared.

**Mots Clés :** impact, élément cohésifs, composites carbone/époxy, dynamique rapide

**Keywords :** impact, cohesive elements, carbon/epoxy composites, rapid dynamics

## 1. Introduction

Les structures secondaires dans l'industrie aéronautique ont été fabriquées par des matériaux composites depuis long temps. La possibilité d'utiliser ces matériaux dans les structures primaires exige les concepteurs à comprendre les dommages d'initiation et de propagation des phénomènes qui influencent fortement la résistance résiduelle et, par conséquent, processus de certification. Afin d'atteindre cet objectif, les calculs et les expériences sont menées. Le comportement mécanique de stratifiés est souvent représenté par la méthode des éléments finis (MEF). Il est commun d'intégrer l'initiation et la propagation des dommages dans les lois matériaux. Certaines des méthodes de prédiction avec MEF de délaminage induit par l'impact sont résumées dans la référence [1]. Nous avons choisi l'approche des éléments finis cohésifs présentée par Camanho et al [2], qui a été utilisé pour la première fois dans un code éléments finis implicite, et, plus tard, dans un code éléments finis explicite par Iannucci [3] et Pinho et al [4]. Cette approche distingue deux constantes (i) seuil de l'initiation des dommages, et (ii) taux de restitution d'énergie pour la mode de délaminage correspondante. Notre intérêt a été dans l'utilisation des nouvelles méthodes numériques de modéliser ces dommages d'ouvertures, avec un intérêt particulier sur la prédiction de la résistance résiduelle pour une large gamme de vitesse d'impact. Ce travail est consacré à l'identification des paramètres numériques des éléments finis cohésifs. Dans la première partie on présente le modèle cohésif et calibrage basé sur mode-I, mode-II and mode mixte taux de restitution d'énergie critique mesuré par des essais DCB, ELS et MMB. Dans la deuxième partie, nous appliquons ces résultats à une plaque de composite aéronautique, T800/M21 unidirectionnelle de fibres de carbone et de résine époxy plis, comme un premier cas mais pas plus simple de modélisation pour prédire le comportement sous un impact de basse vitesse. Un cas d'impact à 10J est choisi de comparer les résultats expérimentaux et numériques. D'autres parties de ce travail traitant l'utilisation de méthodes numériques sans maillage peuvent être trouvés dans la réf [5].

## 2. Identification des paramètres des éléments cohésifs

### 2.1 Modèle de comportement des éléments cohésifs

Le modèle développé est basé sur un modèle cohésif [6] classique en mode mixte bilinéaire (fig. 1). Le modèle a été implémenté dans LS-DYNA par l'intermédiaire de routines en Fortran. Bien que ce modèle soit classique et déjà implémenté dans LS-DYNA, l'objectif à terme est de le modifier pour la prise en compte d'effets de vitesses.

On rappelle ci-dessous le principe de ce modèle basé sur le calcul des déplacements entre les différentes couches du stratifié. Le comportement en ouverture est élastique linéaire en compression, élastique non linéaire en traction. Le comportement en cisaillement est élastique non linéaire.

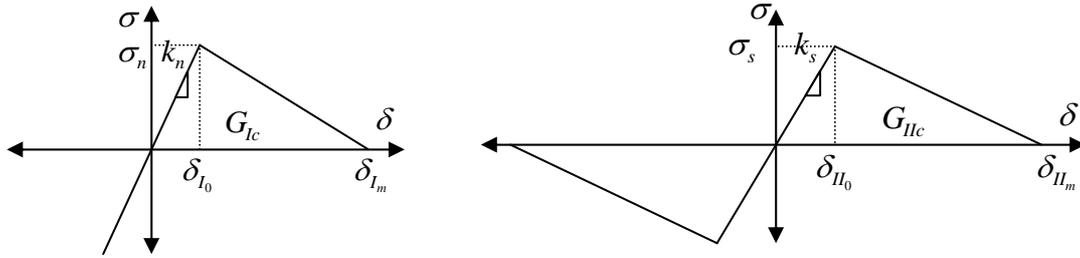


Fig. 1. Comportement du modèle cohésif utilisé

Le déplacement des noeuds initiant le délaminage est déterminé par l'équation 1, en fonction des déplacements critiques en mode I et en mode II (éq. 3). Le déplacement à rupture est donné par l'équation 2 en fonction du déplacement critique et des taux de restitution d'énergie en mode I et II.

$$\delta_0 = \delta_{I_0} \delta_{II_0} \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{(\delta_{II_0})^2 + (\beta \delta_{I_0})^2}} \quad (\text{éq. 1})$$

$$\delta_r = \frac{2(1 + \beta)^2}{\delta_0} \left[ \left( \frac{k_n}{G_{Ic}} \right)^\alpha + \left( \frac{k_s \beta^2}{G_{IIc}} \right)^\alpha \right]^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{éq. 2})$$

$$\text{Avec: } \beta = \frac{\delta_{II}}{\delta_I}; \delta_{I_0} = \frac{\sigma_n}{k_n}; \delta_{II_0} = \frac{\sigma_s}{k_s} \quad (\text{éq. 3})$$

Le terme de couplage mode I/mode II est donné par  $\beta$ , rapport entre l'ouverture en mode II et l'ouverture en mode I. Quand  $\beta$  tend vers zéro, le modèle décrit le mode I pure. Pour le mode II pure, une valeur de  $\beta$  très grande est choisie;  $\delta_0$  et  $\delta_r$  sont alors respectivement égaux à  $\delta_{II_0}$  et  $\delta_{II_m}$ . Les raideurs en traction et en cisaillement des éléments d'interfaces sont respectivement  $k_n$  et  $k_s$ .  $\sigma_n$  et  $\sigma_s$  sont les contraintes à rupture de l'interface en traction hors plan et cisaillement.

### 2.2 Identification des paramètres

Les paragraphes suivants abordent la corrélation essais/calculs sur plusieurs cas tests de mécanique de la rupture. Les éprouvettes utilisées pour la mise au point des lois cohésives sont de type DCB (double cantilever beam) pour le mode I, ELS (end loaded split) pour le mode II et MMB (mixed mode bending) pour le couplage mode I/mode II.

Le modèle éléments finis est un modèle volumique (3 ddl par noeud, 1 point d'intégration par volume) où un seul élément est utilisé suivant la largeur de chaque bras de l'éprouvette. Les éléments cohésifs (sans épaisseur modélisée) possèdent 8 nœuds et sont placés en aval du front de fissure (fig. 2). Ces éléments sont supprimés lorsque le déplacement à rupture  $\delta_r$  est atteint sur un point de Gauss. Le modèle s'apparente donc à un modèle en déformation plane. Les conditions aux limites sont détaillées pour chaque type d'éprouvette.

### 2.2.1 Mode I : éprouvette DCB

Le matériau des éprouvettes DCB est constitué de nappe UD T800/M21 où tous les plis sont orientés à  $0^\circ$ . Les dimensions de l'éprouvette sont  $120(L) \times 25(b) \times 3.1(2h)\text{mm}^3$ . La fissure initiale ( $a_0$ ) est de 40 mm et est réalisée par insertion lors de la fabrication d'un film de Téflon de  $13 \mu\text{m}$  d'épaisseur. Le pli est supposé comme un matériau isotrope avec le module de flexion ( $E_I$ ) 120 GPa et coefficient de Poisson égal à 1.3. Les essais ont été réalisés sur une machine de traction à déplacements imposés de 2 mm/min pour les essais statiques [7] et à 30 m/min. pour les essais dynamiques [8]. Pour les essais dynamiques, un pré fissure a été réalisée afin de minimiser le pic d'effort initial lors de la propagation dû à l'amat de résine présent en front de fissure (surtout pour le mode II réf [9]).

La raideur de traction et de cisaillement des éléments cohésifs est de  $100 \text{ kN/mm}^3$ ; valeur identifiée pour le recalage de la raideur initial de l'essai. Les contraintes à rupture en traction et en cisaillement sont égales à 60 MPa. La valeur du taux de restitution d'énergie critique en mode I est de  $765 \text{ J/m}^2$ . Le chargement est réalisé en vitesse imposée égale à 0.5m/sec. Afin d'éliminer les déformations à énergie nulle (hourglass) les déplacements suivant y (en bord d'éprouvette) ont été bloqués (plan xz).

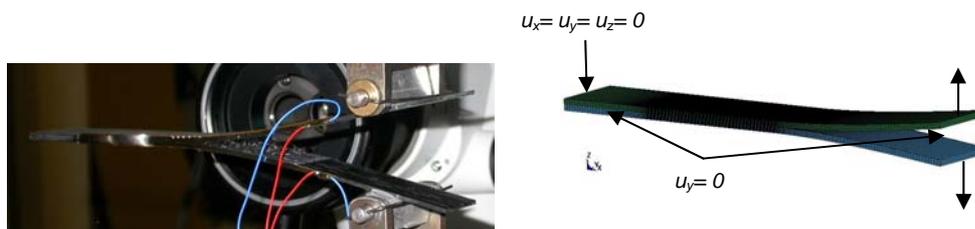


Fig. 2. Epreuve DCB et modèle numérique associé.

La figure 3 présente les résultats globaux du comportement force-ouverture des d'essais pour deux vitesse de chargement ainsi que le modèle numérique associé. Le comportement donné par le modèle numérique est similaire au comportement relevé lors des essais mais ne reproduit pas les non linéarités lors de l'initiation du délaminage. Ces non linéarités ne sont que peu présentes sur le matériau T700/M21 [10]. Le procédé de fabrication du T800/M21 étant différente de celui du T700/M21 (présence de thermoplastique importante à l'interface), il est envisagé de modifier la loi d'interface pour prendre en compte ces non linéarités (plasticité).

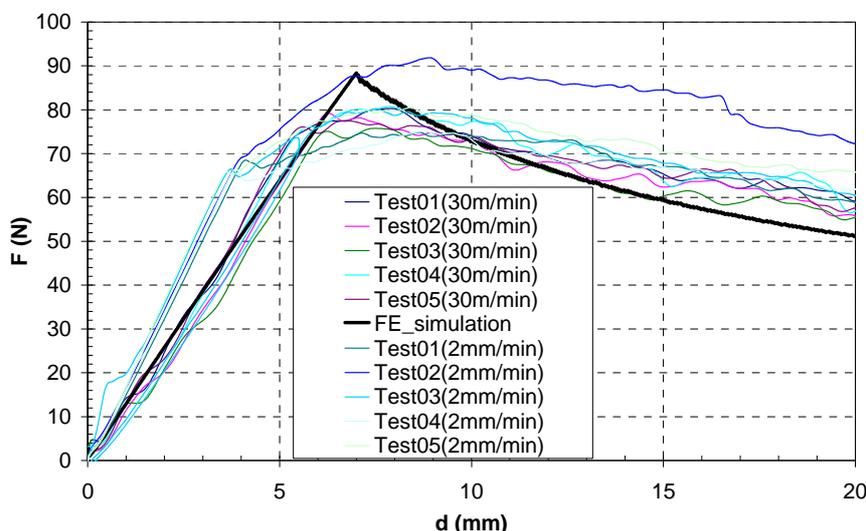


Fig. 3. Courbes force-déplacement et résultats numériques de l'essai DCB (T800/M21).

De plus la vitesse de 30 m/min n'est pas suffisante pour visualiser des effets de vitesses; effets relevés lors d'une étude aux barres de Hopkinson sur des éprouvettes  $[\pm 45^\circ]$ .

### 2.2.2 Mode II : éprouvette ELS

Les résultats expérimentaux corrélés à cette étude numérique sont ceux de précédents travaux réalisés dans notre laboratoire [10] sur un matériau T700/M21. Les dimensions des éprouvettes sont de  $140 (L) \times 20(b) \times 4.68(2h)\text{mm}^3$ . La fissure ( $a_0$ ) est de 80 mm. Le pré fissure est de 4 mm. Les caractéristiques

mécaniques du pli sont données dans le tableau 1. Les propriétés des éléments cohésifs sont identiques à ceux des modèles en mode I. Le taux de restitution d'énergie critique en mode II est  $1387 \text{ J/m}^2$ .

Tab. 1. Caractéristiques mécaniques du T700/M21.

$E_{11f}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$
98.62 GPa	7.69 GPa	7.69 GPa	0.33	0.33	0.40	4.75 GPa	2.75 GPa	4.75 GPa

Pour les essais ELS, un montage d'essai spécifique est nécessaire afin de mesurer correctement l'effort appliqué : l'encastrement de l'éprouvette est mobile, le point d'application de l'effort est fixé longitudinalement (fig. 4). Les conditions aux limites du modèle numérique sont différentes : l'encastrement est fixé, le point d'application du chargement est libre de se déplacer longitudinalement. Le chargement est appliqué à déplacement imposé et égale à  $240 \text{ mm/sec}$ .

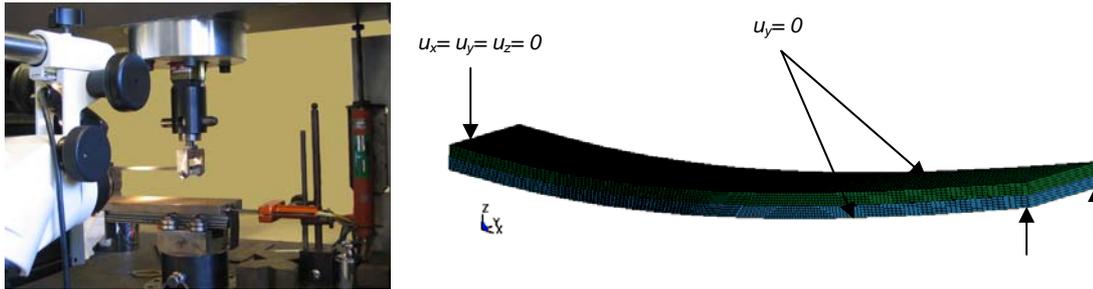


Fig. 4. Eprouvette ELS et modèle numérique associé.

La comparaison du comportement expérimentale et numérique en termes de force en fonction du déplacement, montre, figure 5, un faible écart. La forme est identique et l'écart sur la valeur de l'effort à l'initiation du délaminage est moins de 10% ; cet écart étant attribué à la différence de conditions aux limites entre les essais et le modèle numérique.

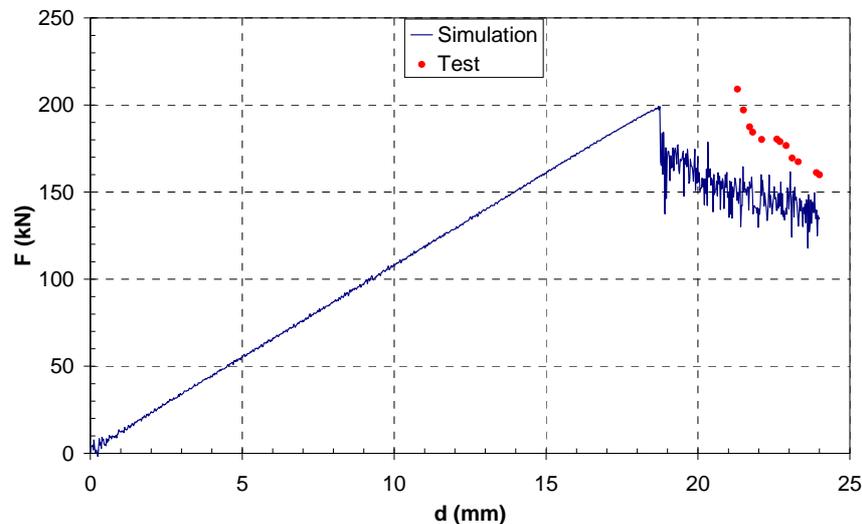


Fig. 5. Comparaison numérique/expérimentale du comportement force/déplacement des essais ELS (T700/M21).

### 2.2.3 Mode mixte : Eprouvette MMB

L'objectif de cette comparaison essais/calculs sur éprouvette MMB est de valider les paramètres de la loi d'interface sur le couplage mode I, mode II. Les essais comparés sont ceux obtenus lors d'une étude expérimentale précédente [10], où les essais sont réalisés pour une partition du mode I égale à 50% de l'énergie totale, obtenue à l'aide d'un montage spécifique (fig. 6). Les dimensions des éprouvettes sont de  $100(2L) \times 20(b) \times 4.68(2h) \text{ mm}^3$ . La fissure ( $a_0$ ) est de 25 mm et le pré fissure de 4 mm (obtenue en mode I). Les taux de restitution d'énergie critique en mode I et en mode II sont respectivement égale à  $545 \text{ J/m}^2$  et  $1387 \text{ J/m}^2$  ; valeurs moyennes des essais. Le paramètre  $\alpha$  définissant la forme du critère de propagation (éq. 2) est égal à 1.5.

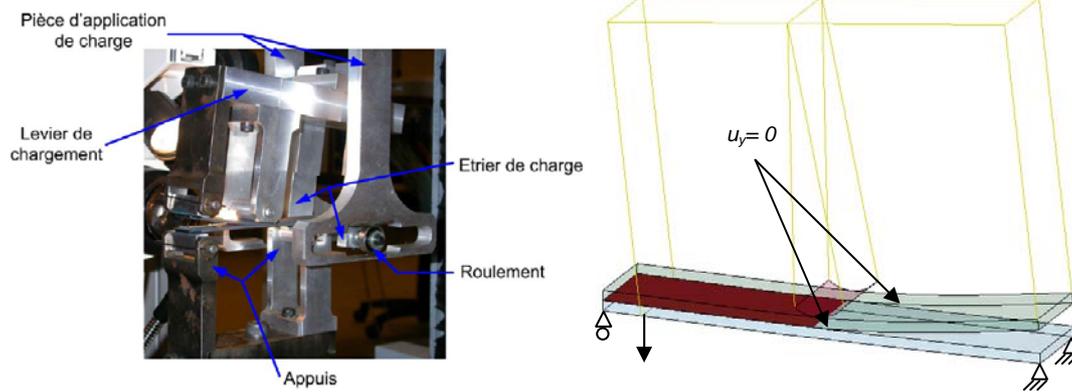


Fig. 6. Eprouvette MMB et modèle numérique associé.

La figure 7 présente la comparaison essai/calcul du comportement effort déplacement du point d'application de l'effort. Le modèle numérique rend bien compte du comportement expérimentale, autant sur l'effort à la propagation que sur la forme du comportement lors de la propagation du délaminage.

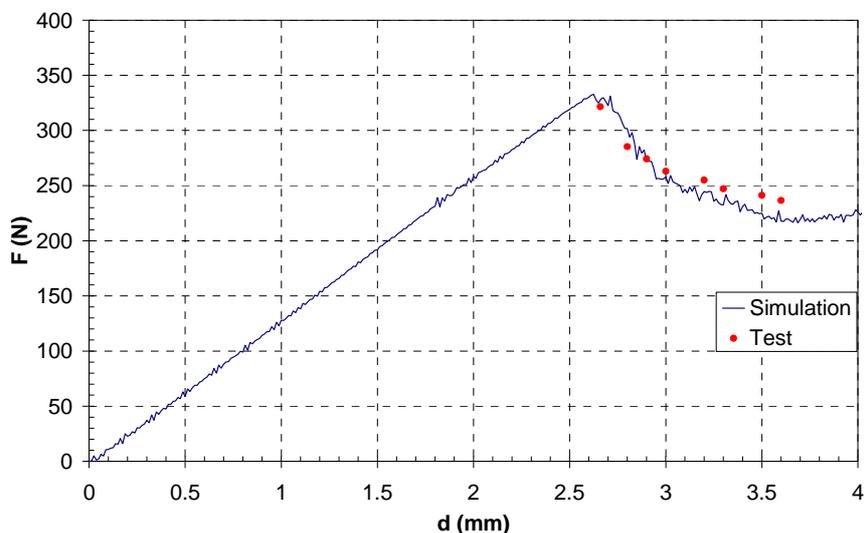


Fig. 7. Comparaison essai/calcul pour la propagation du délaminage en mode mixte (Eprouvette MMB, T700/M21).

### 3. Application à l'impact basse vitesse

L'objectif de cette partie est d'appliquer les résultats précédents pour la simulation numérique de l'apparition des défauts lors d'impacts basses vitesses. On présente dans cette étude une corrélation essais/calculs du comportement à l'impact de matériaux composites T800/M21 ; corrélation en terme de comportement global à l'impact, mais aussi en terme de simulation des défauts.

#### 3.1 Expérimentation

Les impacts sont réalisés sur une tour de chute à poids tombant. L'éprouvette de 150 x 100 mm<sup>2</sup> est simplement appuyée sur un support ajouré (125 x 75 mm<sup>2</sup>). L'impacteur est de type hémisphérique de 16 mm de diamètre [11]. La vitesse de l'impacteur est de 2.955 m/s (environ 10.3 J). La stratification étudiée est [45,-45,0,0,90]S, stratification spécifique permettant de positionner les délaminages apparaissant lors d'impacts, proches des faces du composite. La forme globale des défauts est alors plus proche d'un cylindre que celle classiquement connue en forme de tronc-conique [11] ; ceci dû essentiellement à la position des plis à +45 et à -45.

Les résultats expérimentaux et numériques comparés sont les résultats globaux de types forces-temps et déplacement-temps mais aussi la taille des délaminages observés par ultrasons (C-Scan).

Tab. 2. Caractéristiques mécaniques de l'UD T800/M21 utilisées dans le modèle EF.

$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$
157 GPa	8.5 GPa	8.5 GPa	0.35	0.35	0.53	4.2 GPa	2.2 GPa	4.2 GPa
$k_n$	$k_s$	$\sigma_n$	$\sigma_s$	$G_{Ic}$	$G_{IIc}$	$\alpha$		
100 N/mm <sup>3</sup>	100 N/mm <sup>3</sup>	60 MPa	60 MPa	765 J/m <sup>2</sup>	1250 J/m <sup>2</sup>	1.0		

### 3.2 Modèle numérique

Le modèle numérique utilisé sous LS-DYNA, est un modèle volumique (3 ddl par noeud, 1 point d'intégration par élément) où chaque couche du stratifié est modélisée par un élément (fig. 8a). Le support métallique (support ajouré) de la machine d'impact est modélisé. Un contact sans frottement est défini entre l'impacteur et la plaque mais aussi entre la plaque et le support métallique [11]. Les éléments cohésifs sont placés entre les couches d'orientations différentes (fig. 8b) et éliminés du modèle lorsque le déplacement à rupture  $\delta_r$  est atteint ; un contact est alors introduit. Les propriétés des matériaux ainsi que les paramètres de la loi cohésive sont donnés dans le tableau 2.

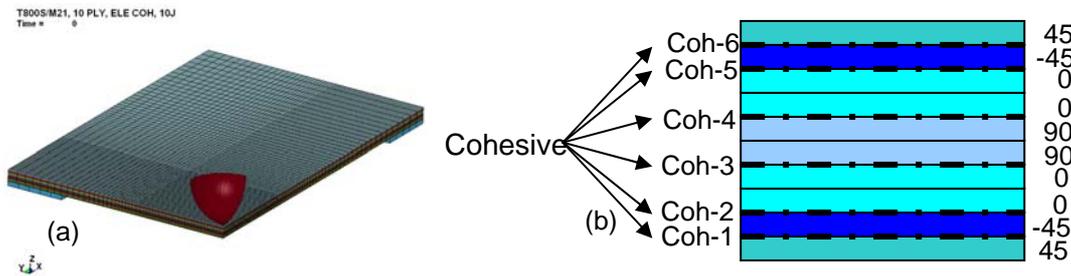


Fig. 8. (a) 1/4 modèle numérique; (b) localisation des éléments cohésifs.

Le comportement des plis est dans cette étude linéaire élastique. Une étude est en cours où le comportement des plis est endommageable.

### 3.3 Résultats

La figure 9 présente la comparaison essai/calcul du comportement effort-temps et déplacement-temps lors des impacts. Il est présenté deux résultats numériques : avec et sans éléments d'interface. Le modèle sans interface est trop rigide c'est à dire que l'effort obtenu numériquement est plus élevé qu'expérimentalement et le déplacement plus faible. L'introduction de l'endommagement aux interfaces par des éléments cohésifs, permet d'approcher le comportement expérimental en dissipant de l'énergie (énergie de délaminage); le modèle est plus souple et le temps d'impact s'accroît. La prise en compte de l'endommagement dans les plis doit permettre de mieux corrélérer le comportement expérimental.

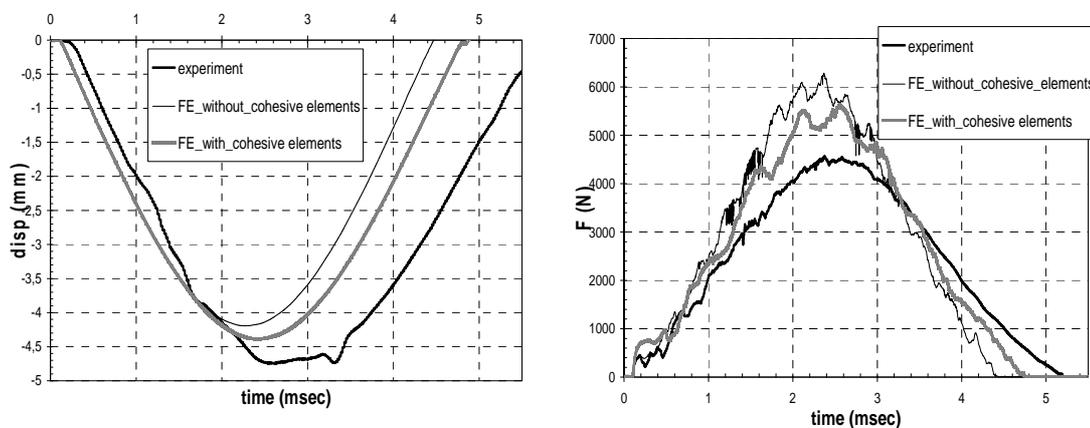


Fig. 9. Comparaison essai/calcul : (a) déplacement max-temps (b) effort max-temps

La figure 10 montre les cartographies C-Scan (mode distance) des plaques impactées. La surface délimitée par les délaminages est d'environ 20 x 22 mm<sup>2</sup>.

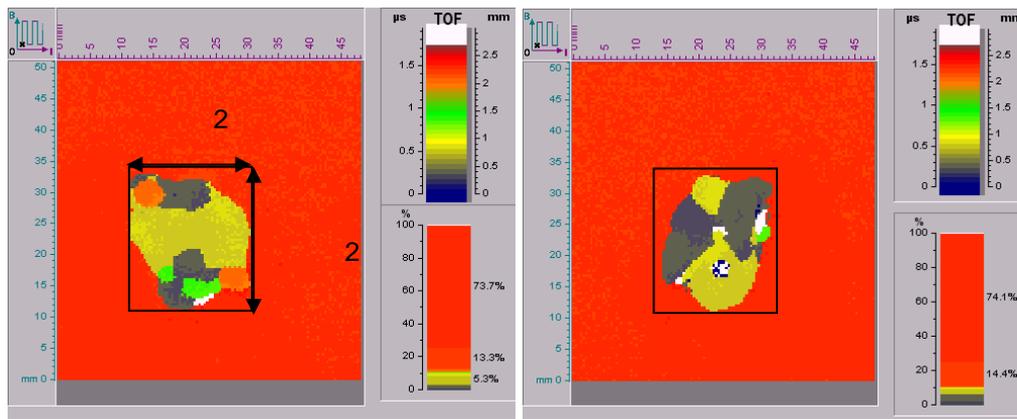


Fig. 10. Visualisation C-Scan (a) face impactée, (b) face opposée.

La surface obtenue numériquement par la frontière des éléments cohésifs endommagés entre 0.9 et 1 est de  $27 \times 30 \text{ mm}^2$  (fig. 11 et fig. 12). Cette surface est plus importante mais cohérente avec les relevés expérimentaux ; le modèle numérique ne rend pas compte des macro-fissures des plis, macro-fissures bloquant la propagation des délaminages. Concernant les orientations des délaminages, elles sont bien restituées. L'orientation des délaminages sur une interface est guidée par le pli situé sous l'interface. Par exemple, concernant l'interface -45/0 face impacté (élément cohésif 5), l'orientation est à  $0^\circ$  (fig. 11).

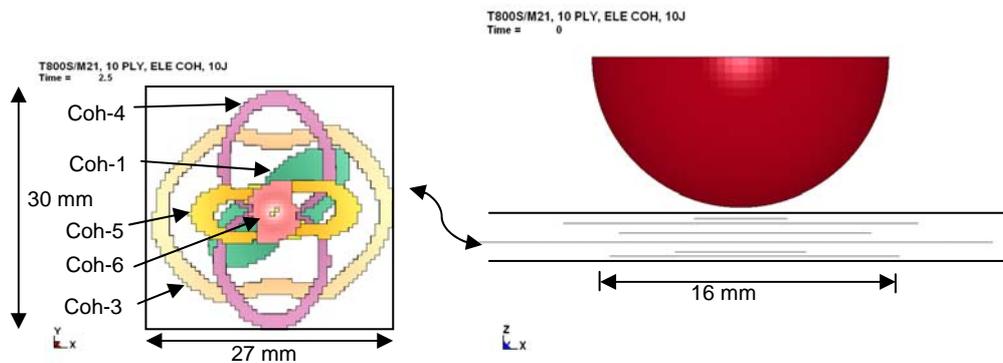


Fig. 11. Visualisation des délaminages dans le modèle limités par les éléments cohésifs endommagés entre 0.9 et 1.

La surface de contact entre le projectile et la plaque a été mesurée lors de la simulation. Elle est de forme circulaire et d'environ 5 mm de diamètre (figure 11). Cette valeur peut être aussi mesurée à partir du centre des éléments cohésifs notes coh-4, coh-5 et coh-6.

Comme on peut le visualiser figure 11, les éléments cohésifs ont été supprimés à l'intérieur des bandes de couleurs. La prise en compte d'un contact entre les couches est alors primordiale. On peut le visualiser figure 12, où les plis sont en compression sous l'impacteur mais légèrement décollés de part et d'autre. Il n'existe alors sous l'impacteur que des contraintes de cisaillement et des contraintes de compression. Localement on peut visualiser des décollements entre les couches à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$  de part et d'autre de l'impacteur (fig. 12b, coh-3). Le phénomène physique de poinçonnement est bien reproduit, ainsi que la flexion locale sous l'impacteur.

Les surfaces délaminées aux interfaces 0/90 et 90/0 sont plus importantes que celles relevées expérimentalement à cause du non prise en compte des macro-fissures.

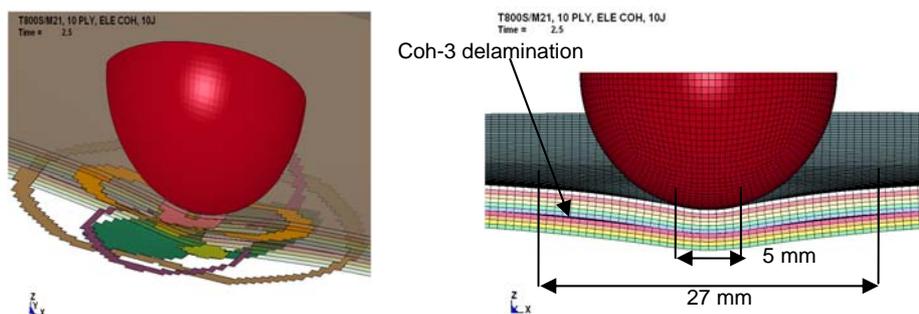


Fig. 12. Visualisation du délaminage dans l'épaisseur à 2.5 ms.

La figure 13 présente l'évolution des contraintes maximales de cisaillement et des contraintes maximales normales dans les éléments cohésifs 1 (interface  $\pm 45$ ) et 3 (interface 0/90) face opposée à l'impact. Il est remarquable que le cisaillement aux interfaces soit principalement la cause du délaminage; les contraintes normales étant faibles.

Les contraintes à l'interface  $\pm 45$  n'ont pas atteint leurs valeurs maximales; le délaminage est faible pour ces interfaces. Concernant l'interface 0/90 le cisaillement max est bien atteint (60 MPa).

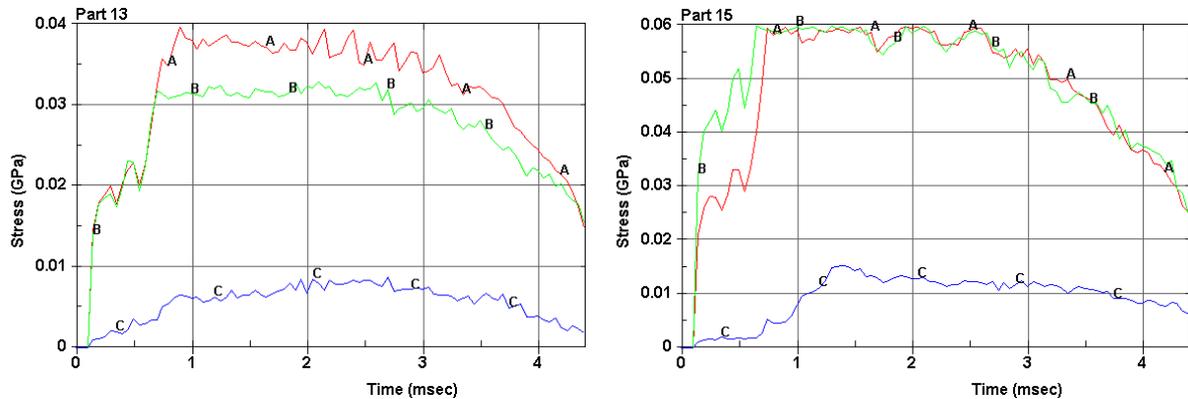


Fig. 13. Evolution temporelle des contraintes de cisaillement (A & B) des contraintes normales (C) à l'interface [+45/-45] coh-1, et à l'interface [90/0] coh-3.

## 4. Conclusions

Dans cette étude, nous avons comparé le comportement expérimental et numérique de plaques impactées. Le modèle numérique dynamique explicite prend en compte l'endommagement interlaminaire par l'utilisation d'éléments d'interface possédant un comportement endommageable. Une loi bilinéaire a été développée et implémentée dans LS-DYNA. La comparaison a été réalisée sur le comportement global effort-temps et déplacement-temps, mais aussi sur la prévision de la surface délaminée. Ces comparaisons sont présentées pour un composite stratifié représentative d'un élément de structure aéronautique.

Il a été montré que la surface et l'orientation des délaminages sont bien reproduites numériquement pour certaines interfaces (0/90 et 45/0) mais qu'elles sont sous estimées pour les interfaces +45/-45. Ces différences sont attribuées à l'endommagement des plis, non prise en compte dans le modèle mais aussi aux effets de vitesses sur le comportement des couches en cisaillement. L'application aux impacts hautes vitesses doit passer par la mise en place de lois de comportement à effet de vitesse.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier « Higher Education Commission of Pakistan » pour le financement de cette étude.

## References

- [1] Elder D. J., Thomson R. S., Nguyen M. Q. and Scott M. L., Review of delamination predictive methods for low speed impact of composite laminates. *Composite Structures*, 66:677–683, 2004.
- [2] Camanho P. P., Dávila C. G. and De Moura M. F., Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials. *J. of Composite Materials*, 37:1415–1438, 2003.
- [3] Iannucci L., Dynamic delamination modeling using interface elements. *Computers and Structures*, 84:1029–1048, 2006.
- [4] Pinho S. T., Iannucci L. and Robinson P, Formulation and implementation of decohesion elements in an explicit finite element code. *Composites: Part A*, 37:778–789, 2006.
- [5] Ilyas M., Limido J., Lachaud F., Espinosa Ch., Salaün M., Modélisation SPH 3D de l'impact basse vitesse sur plaque composite, Congrès Français de Mécanique, Marseille, 2009.
- [6] LS-Dyna Keyword User's Manual version 971, 2007, pp 535-538.
- [7] ISO 15024, Fibre-reinforced plastic composites—Determination mode I interlaminar fracture toughness,  $G_{Ic}$ , for unidirectionally reinforced materials, International Standard, © ISO 2001.
- [8] Ilyas M., Lachaud F., Espinosa Ch. Salaün M., Simulation of dynamic delamination and mode I energy dissipation, 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, 2009.
- [9] Maikuma H., Gillespie J. W. Jr., and Wilkins D. J, Mode II interlaminar fracture of the center notch flexural specimen under impact loading, *Journal of composite materials*, 24:124-149, 1990.

- [10] Prombut P., Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels, thèse de l'Université Paul Sabatier, ENSICA, DGM, 2007.
- [11] Al-Maghribi A., Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse, thèse de l'Université Paul Sabatier, ISAE, DMSM, 2008.