

# Etude expérimentale et numérique de la résistance interlaminaire en mode I de thermoplastiques à renfort tissé

## *Experimental and numerical study of the mode I interlaminar resistance of thermoplastic composites*

C. Avril<sup>1</sup>, D. Perreux<sup>1</sup>, F. Thiebaud<sup>1</sup>, B. Reck<sup>2</sup>

1 : MAHYTEC

Centre d'activités nouvelles, 210 avenue de Verdun – F - 39100 DOLE

e-mail : [contact@mahytec.com](mailto:contact@mahytec.com)

2 : Institut de Recherches franco-allemand de Saint-Louis

5 rue du général Cassagnou – F - 68301 SAINT-LOUIS CEDEX

e-mail : [reck@isl.tm.fr](mailto:reck@isl.tm.fr)

### Résumé

Les structures de maintien des projectiles accélérés à l'aide du lanceur électromagnétique PEGASUS de l'ISL sont réalisées sous la forme d'une stratification de couches de polymère renforcées de verre tissé. Une telle composition leur confère leur propriété d'isolant électrique et une résistance mécanique compatible avec les efforts extrêmes qu'ils sont appelés à subir. Le mode d'endommagement le plus couramment observé sur les radiographies-éclair prises en cours d'accélération et à la sortie du tube de lancement est le délaminage d'un nombre plus ou moins important de couches de composites. La conséquence immédiate d'un délaminage, qui se manifeste concrètement par une diminution d'épaisseur, est une dégradation du contact électrique entre les rails du lanceur et les brosses de cuivre maintenues par la structure de maintien. En plus d'une chute de rendement, ce phénomène peut conduire dans les cas les plus sévères à l'apparition d'arcs électriques susceptibles de détruire à la fois le projectile et les rails du canon. Afin de quantifier la résistance interlaminaire en mode I de stratifiés verre/PEEK et d'étudier l'influence des paramètres de fabrication, une campagne expérimentale a été menée. Les résultats obtenus ont servi de base au développement d'un modèle de matériau pour un code de calcul explicite.

### Abstract

The supporting structures of the projectiles that are accelerated with the electromagnetic launcher of the ISL are built in the form of a stratification of woven glass fibers reinforced polymer layers. Such a configuration gives them their electrical insulating property and the high mechanical strength which is required to stand the extreme loadings that are involved by each shot. The most frequent damage mode that is observed on the flash radiographs taken during the acceleration and out of the launching tube is the delamination of a variable amount of layers. The direct consequence of delamination is a decrease of the laminate thickness that leads to a degradation of the electrical contact between the copper brushes hold by the supporting structure and the rails. In the worst cases, arcing may occur and causes the destruction of both the projectile and the rails. In order to quantify the mode I interlaminar resistance of glass/PEEK laminates and to investigate the influence of fabrication parameters, an experimental campaign has been carried out. The results have then been used to develop a material model for an explicit FE code.

**Mots Clés** : Thermoplastiques, délaminage, essais DCB, modélisation numérique, accélération électromagnétique.

**Keywords** : Thermoplastic, delamination, DCB testing, numerical modelisation, electromagnetic acceleration

## 1. Introduction

Le lanceur électromagnétique PEGASUS conçu par l'institut de Recherches franco-allemand de St-Louis (ISL) permet d'accélérer des masses de plusieurs centaines de grammes à des vitesses supérieures à 2500 m/s [1]. La technologie d'armature électrique développée à l'ISL implique le recours à des composites hautes-performances pour la réalisation de projectiles stratifiés (figure 1-a). En raison des sollicitations extrêmes qu'ils sont appelés à subir, les matériaux utilisés doivent notamment disposer d'une résistance interlaminaire très élevée. Le délaminage est en effet le mode d'endommagement le plus fréquemment

observé sur les radiographies-éclair prises à l'intérieur et en sortie du tube de lancement (figure 1-b). La conséquence immédiate d'un délaminage, qui se manifeste concrètement par une diminution d'épaisseur, est une dégradation du contact électrique entre les rails du lanceur et la structure du maintien. En plus d'une chute de rendement, ce phénomène peut conduire dans les cas les plus sévères à l'apparition d'arcs électriques susceptibles de détruire à la fois le projectile et les rails du canon.

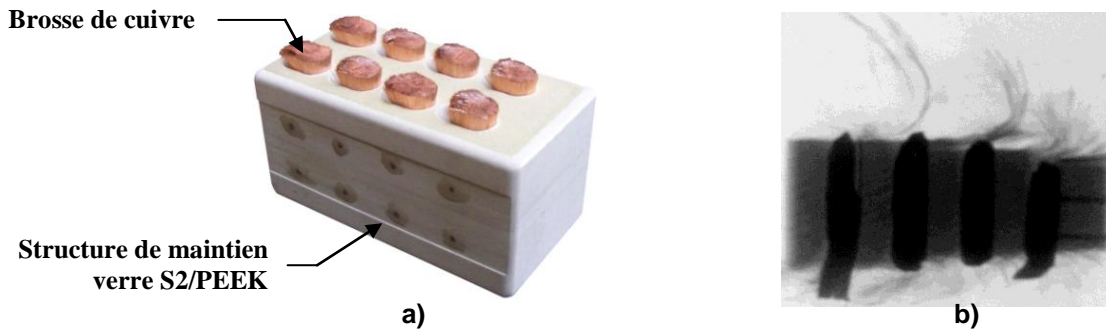


Fig. 1. Ensemble structure de maintien/armature électrique accéléré par PEGASUS (a) et radiographie-éclair montrant un délaminage prononcé du stratifié composite (b)

L'accroissement de la résistance au délaminage des stratifiés passe en premier lieu par la capacité à quantifier la ténacité interlaminaire des matériaux étudiés, afin de créer une base de données expérimentales sur laquelle puisse se baser à terme la recherche de matériaux optimaux. Le second point primordial est la caractérisation de l'influence des paramètres de fabrication sur la résistance au délaminage des stratifiés. En tant que polymère semi-cristallin, la résine thermoplastique PEEK voit en effet ses propriétés mécaniques grandement influencées par les paramètres de mise en œuvre choisis : température de mise en forme, vitesse de refroidissement ou conditions de recuit sont autant de facteurs déterminant le taux de cristallinité final de la résine et par suite les caractéristiques mécaniques du produit fini. Cet article présente les résultats des essais de type DCB obtenus sur des éprouvettes verre/PEEK fabriquées à partir de différentes pressions de consolidation. L'implémentation dans le code de calcul AUTODYN d'un modèle de matériau permettant de reproduire l'initiation et la propagation de fissures est ensuite exposée.

## 2. Etude expérimentale de la ténacité interlaminaire de stratifiés verre/PEEK

Le délaminage de la structure de maintien du lanceur électromagnétique PEGASUS correspond clairement à une ouverture de fissure en mode I. La ténacité à la rupture interlaminaire des stratifiés Verre/PEEK a donc été évaluée en déterminant le taux de restitution d'énergie élastique en mode I  $G_{Ic}$ . La méthode de détermination expérimentale de  $G_{Ic}$  pour les matériaux composites plastiques renforcés de fibres fait l'objet de normes standardisées (NF ISO15024 [2] et ASTM D5528 [3]) basée sur l'utilisation d'éprouvettes DCB (Double Cantilever Beam). Une éprouvette DCB type est présentée en figure 2. Composée d'un nombre de couches pair, elle contient en son plan médian un film non-adhésif très fin qui va permettre l'amorçage de la fissure lors du chargement d'ouverture. Ce dernier est appliqué par l'intermédiaire de blocs d'attache sous la forme d'un déplacement imposé et perpendiculairement au plan du stratifié. L'objectif est de suivre l'évolution de la longueur de délaminage  $a$  en fonction du déplacement imposé  $\delta$  et de la force correspondante  $P$ .

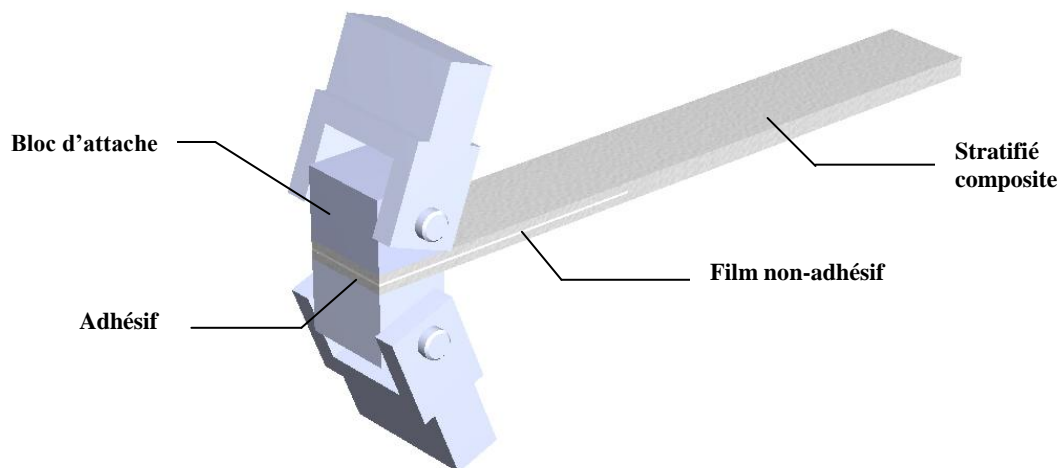


Fig. 2. Éprouvette DCB type

En introduisant la complaisance  $C = \delta / P$ , le taux de restitution d'énergie élastique en mode I s'écrit :

$$G_{Ic} = \frac{1}{2b} P^2 \frac{\partial C}{\partial a}$$

Le taux de restitution d'énergie critique en mode I peut donc être estimé en relevant au cours du chargement la longueur de délaminage, les valeurs des forces et déplacements correspondantes et en explicitant le terme  $dC/da$ . Pour ce faire, plusieurs méthodes d'analyse ont été employées : la méthode SBT (Simple Beam Theory), CBT (Corrected Beam Theory), CC (Compliance Calibration) et MCC (Modified Compliance Calibration). Les éprouvettes verre S2/PEEK ayant servi de support à cette étude ont été fabriquées au moyen d'un système de pressage mis au point au Laboratoire de Mécanique Appliquée de Besançon à partir d'une machine de traction/compression. Quatre configurations ont été testées :

- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 6 bar
- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 10 bar
- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 20 bar
- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 30 bar

Un film de PTFE très fin placé entre la 13<sup>ème</sup> et la 14<sup>ème</sup> couche des stratifiés a servi d'amorce de fissure. En plus de ses propriétés non-adhésives, le film utilisé présente l'avantage de résister aux hautes températures (390-400°C) requises pour la mise en forme du PEEK. Le protocole de mise en œuvre a consisté à appliquer une force initiale de compression de 10 kN, équivalente à une pression d'environ 6 bar, et à démarrer simultanément le cycle de température. Une fois une température de 380°C atteinte, la pression de consolidation souhaitée (6, 10, 20 ou 30 bar) a été appliquée. Le four était ouvert 30 minutes plus tard, tout en maintenant la pression choisie. Afin d'obtenir un refroidissement lent, le moule était conservé à l'intérieur du four jusqu'à atteindre la température ambiante. La figure 3 présente pour chaque configuration l'évolution de l'épaisseur des empilements de couches en fonction du temps et de la température. Très logiquement, l'épaisseur des plaques Verre/PEEK obtenues décroît avec l'augmentation de la pression appliquée. Les épaisseurs par pli polymérisé sont ainsi de 0.219 mm pour une pression maximale de 6 bar, 0.204 mm pour 10 bar, 0.190 mm pour 20 bar, et 0.184 mm pour 30 bar. La quantité de fibres de verre restant inchangée dans chaque cas, seule la teneur en résine varie. En faisant varier la pression de consolidation de nos stratifiés, c'est bel est bien l'influence de la quantité de résine sur la tenue au délaminage que l'on souhaite étudier. Chaque essai est décomposé en deux étapes. La première étape consiste à charger l'éprouvette jusqu'à créer une pré-fissure sur quelques millimètres à partir de l'insert. L'éprouvette est alors complètement déchargée. La deuxième étape consiste à recharger l'éprouvette afin de propager le délaminage à partir de la pré-fissure sur la longueur souhaitée. Pour les deux chargements, la vitesse de déplacement de la traverse mobile a été fixée à 3 mm/min. Lors du second chargement, c'est-à-dire lors de la propagation du délaminage à partir de la pré-fissure, la position de la fissure et les valeurs de charge et de déplacement correspondantes ont été relevées tous les 5mm.

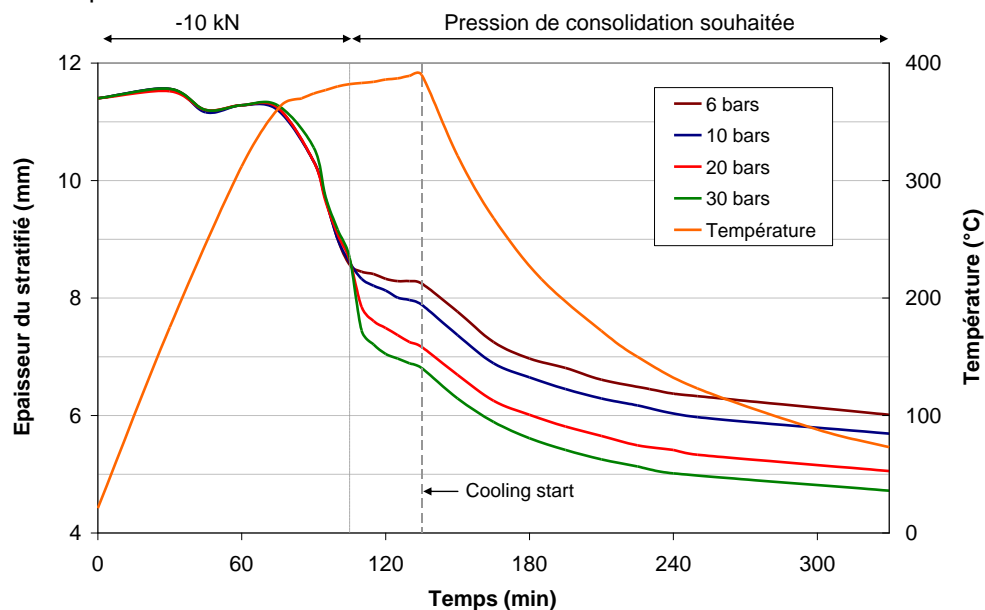


Fig. 3. Evolution de l'épaisseur des stratifiés en fonction de la température et de la pression appliquée

A partir des courbes charge-déplacement (figure 4) et du suivi de la longueur de délaminage, il est alors possible de calculer les valeurs du taux de restitution d'énergie élastique correspondant à l'initiation du délaminage (à partir de la pré-fissure) et à sa propagation. La valeur de  $G_{Ic}$  correspondant à l'initiation du délaminage est déterminée graphiquement. Les valeurs de  $G_{Ic}$  correspondant à la propagation du délaminage sont quant à elles déterminées à partir des relevés effectués tous les 5 mm.

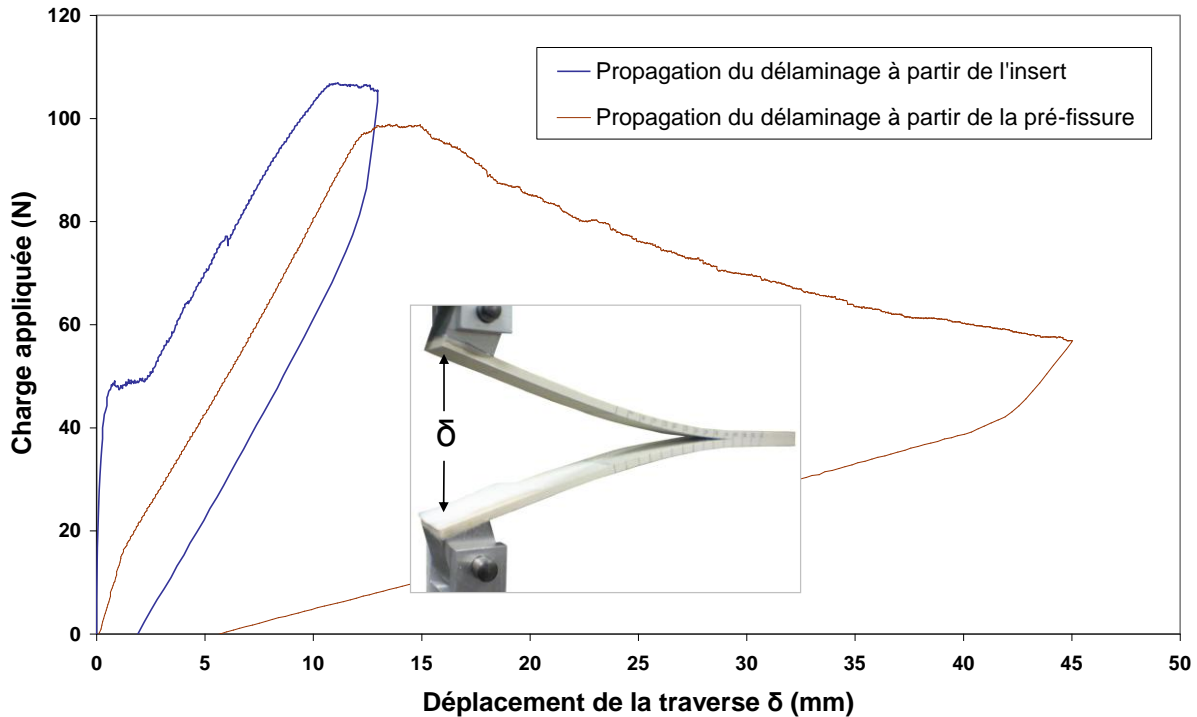


Fig. 4. Exemple de courbe charge-déplacement obtenue lors d'un essai DCB

Les valeurs de propagation de  $G_{Ic}$  sont données en figure 5 :

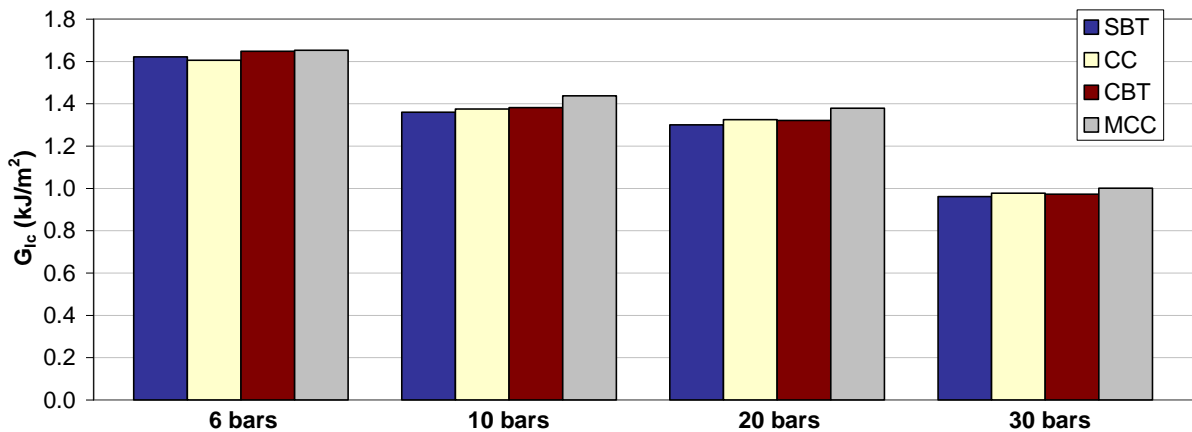


Fig. 5. Comparaison des valeurs de propagation de  $G_{Ic}$

D'un point de vue quantitatif, les valeurs élevées obtenues pour les échantillons les plus riches en résine attestent de la haute ténacité de la résine PEEK. A titre comparatif, Alif et al. dans le cadre d'une étude sur l'influence du motif de tissage sur la résistance au délaminage en mode I de composites à renforts tissés [4], ont réalisé des tests DCB sur des stratifiés Verre/Epoxy 8H-satin et obtenu une valeur de  $G_{Ic}$  égale à  $775 J/m^2$ . Pereira et al. ont conduit des tests DCB sur des stratifiés multidirectionnels Verre/Epoxy satin déséquilibrés (20% de fibres dans le sens trame) pour caractériser l'influence de l'orientation des plis [5]. Dans le cas des stratifiés  $0/0^\circ$  et  $0/90^\circ$  qui se rapprochent le plus de nos éprouvettes, les essais ont abouti respectivement à des valeurs d'environ  $900$  et  $1000 J/m^2$ . S'il reste difficile de comparer des résultats obtenus dans des conditions et avec des matériaux différents, le gain de ténacité offert par une matrice thermoplastique PEEK par rapport à une matrice thermodurcissable de type Epoxy apparaît indéniable et précieux pour l'application très particulière que représentent les lanceurs électromagnétiques. Concernant la comparaison des méthodes d'analyse, la méthode MCC conduit aux valeurs de  $G_{Ic}$  les plus élevées. Les

trois autres méthodes donnent des résultats relativement proches. Cette étude s'inscrivant dans une démarche comparative plus que quantitative, il est important de noter que pour toutes les méthodes de calcul utilisées, une augmentation de la pression de consolidation entraîne systématiquement une diminution de  $G_{Ic}$ .

### 3. Modélisation numérique du délaminage en mode I : Cohesive Zone Model

La méthode CZM consiste à définir des interfaces endommageables au sein desquelles une fissuration est susceptible de s'initier, puis de se propager. Dans le cas d'une structure composite stratifiée, elles seront par exemple introduites dans le plan du stratifié entre deux couches de matériau. Classiquement, le comportement mécanique de l'interface est régi par une loi "traction-déplacement" : dans le cas d'un délaminage en mode d'ouverture pur, les contraintes dans la direction perpendiculaire au plan du stratifié sont exprimées en fonction des déplacements relatifs des faces inférieure et supérieure de l'interface. La figure 6 présente le principe général du modèle. Dans le cas d'une loi de traction-déplacement bilinéaire, la plus fréquemment utilisée dans la littérature, le comportement mécanique de l'interface de cohésion est entièrement décrit par trois paramètres : la raideur initiale  $K$ , la contrainte maximale  $\sigma_{z0}$  correspondant à l'initiation du délaminage, et le taux de restitution d'énergie élastique critique  $G_{Ic}$  correspondant à l'aire comprise sous la courbe.

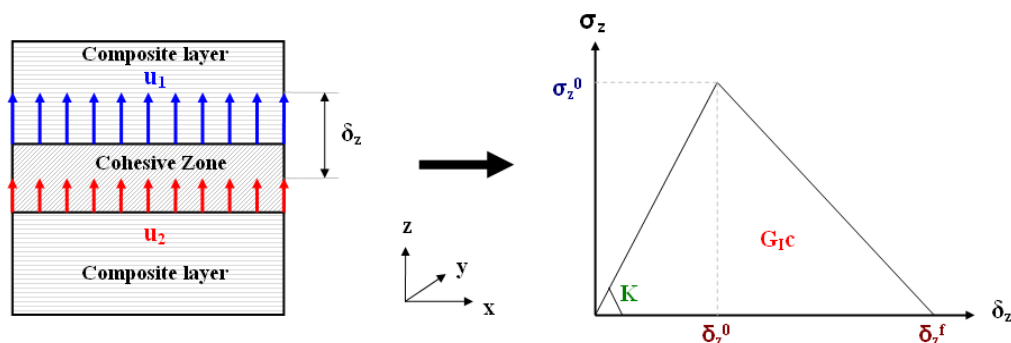


Fig.6. Principe du modèle Cohesive Zone avec loi de comportement bilinéaire

Pour un élément donné de la "cohesive zone", le processus de simulation du délaminage via une loi de traction-déplacement bilinéaire peut être décomposé en trois étapes :

- Étape n°1 :  $\delta_z < \delta_z^0$

Le comportement de l'élément est linéaire élastique :  $\sigma_z = K \cdot \delta_z$

- Étape n°2 :  $\delta_z^0 < \delta_z < \delta_z^f$

Le déplacement  $\delta_z^0$  correspond à l'initiation du délaminage. A partir de cette valeur seuil, la raideur de l'élément est dégradée progressivement. Le lien avec la mécanique de l'endommagement est explicité en définissant une variable  $D$  fonction du déplacement maximal  $\delta_z^{MAX}$  :

$$D = \frac{\delta_z^f (\delta_z^{MAX} - \delta_z^0)}{\delta_z^{MAX} (\delta_z^f - \delta_z^0)}$$

L'intervention du déplacement maximal dans l'expression de  $D$  permet de prendre en compte l'irréversibilité de l'endommagement. Le comportement de l'élément est alors décrit par la relation suivante (figure 7) :

$$\sigma_z = (1 - D)\delta_z$$

- Étape n°3 :  $\delta_z > \delta_z^f$

La valeur  $\delta_z^f$  correspond à la valeur du déplacement pour lequel la décohésion totale de deux couches adjacentes est admise. Une fois cette valeur atteinte, la raideur de l'élément est considérée comme nulle. La raideur initiale de l'élément peut néanmoins lui être réattribuée pour éviter l'interpénétration des couches délaminées.

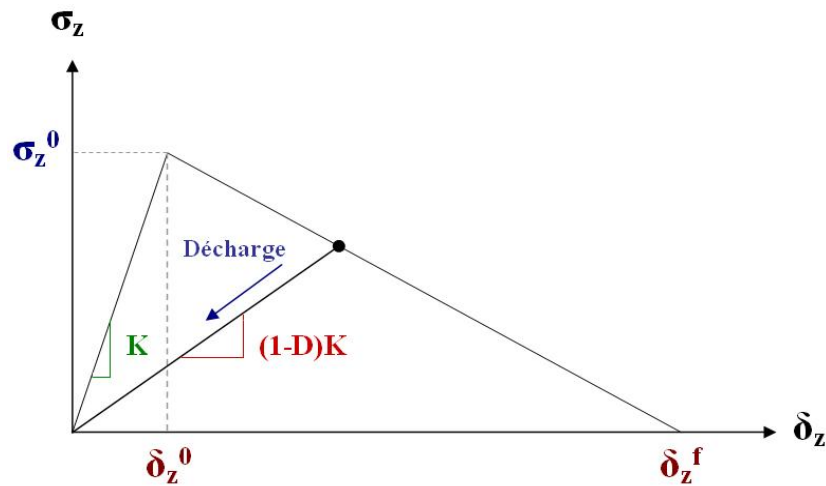


Fig. 7. Diminution de la raideur initiale avec l'augmentation de l'endommagement

La méthode CZM est classiquement implantée dans les codes de calcul via la formulation d'éléments de cohésion. Le logiciel AUTODYN n'offrant pas la possibilité de formuler ses propres éléments, l'implémentation de la méthode CZM a nécessité de procéder différemment. L'idée consiste à modéliser l'interface séparant deux couches à l'aide d'éléments solides classiques et à créer un modèle de matériau basé sur des lois de comportement et d'endommagement reprenant les fondements de la méthode. Pour cela, le module calculant à chaque cycle de calcul les composantes de la matrice de raideur d'un matériau orthotrope élastique donné a été reprogrammé. Il devenait ainsi possible de définir une loi de comportement incluant une cinétique d'endommagement personnalisée en jouant sur l'évolution des modules d'Young et des coefficients de Poisson. Dans le cadre de cette étude, deux lois de comportement ont été programmées, une loi bilinéaire et une loi polynômiale du troisième ordre (figure 8) :

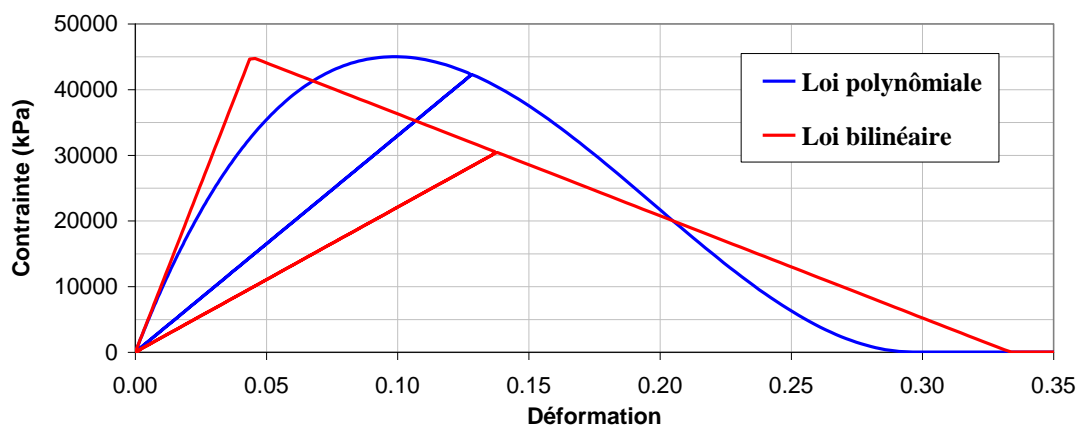


Fig. 8. Lois traction-déformation régissant le comportement mécanique des interfaces endommageables

A terme, l'objectif est de pourvoir le modèle AUTODYN du sabot PEGASUS d'un matériau permettant de simuler les délaminages susceptibles d'intervenir en cours d'accélération. Afin de vérifier que le module développé est capable de reproduire avec exactitude l'initiation et la propagation de fissures interlaminaires, une simulation d'un essai de type DCB a été lancée. Il aurait paru logique de simuler les essais présentés au paragraphe précédent. Cependant, la modélisation d'un essai requiert une définition précise des matériaux impliqués (modules d'Young, modules de cisaillement, coefficients de Poisson). Dans le cas des composites verre/PEEK utilisés pour l'étude expérimentale, trop peu de caractéristiques matériau ont été identifiées pour permettre une description réaliste de leur comportement mécanique et autoriser une évaluation fiable du travail de programmation réalisé. L'étude s'est donc basée sur la simulation d'essais conduits par Morais et al. et visant à caractériser la ténacité interlaminaire en mode I de stratifiés croisés carbone/époxy [6-7]. Les dimensions de l'éprouvette DCB sont données en figure 9 :

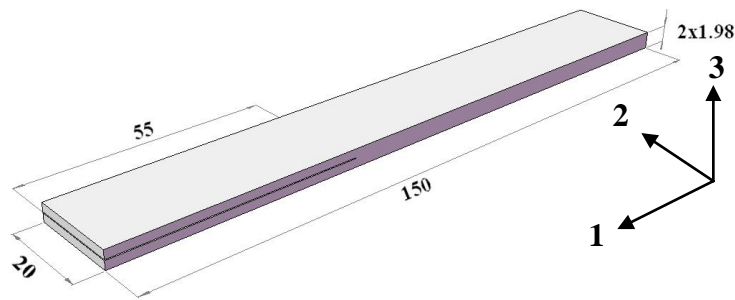


Fig. 9. Dimensions des éprouvettes pour la simulation d'un essai DCB

Le tableau 1 regroupe les propriétés mécaniques de l'éprouvette carbone/époxy [6] :

$E_{11}$	$E_{22} = E_{33}$	$G_{12} = G_{13}$	$G_{23}$	$\nu_{12} = \nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{Ic}$
150 GPa	11 GPa	6 GPa	3.7 GPa	0.25	0.45	352 J/m <sup>2</sup>

Tableau 1. Propriétés de l'éprouvette carbone/époxy

L'éprouvette a été modélisée et maillée directement sous AUTODYN. Afin d'étudier l'influence de la finesse du maillage tout en limitant les temps de calcul, la longueur et l'épaisseur de l'interface de cohésion ont été fixées respectivement à 15 et 0.5 mm (figure 10).

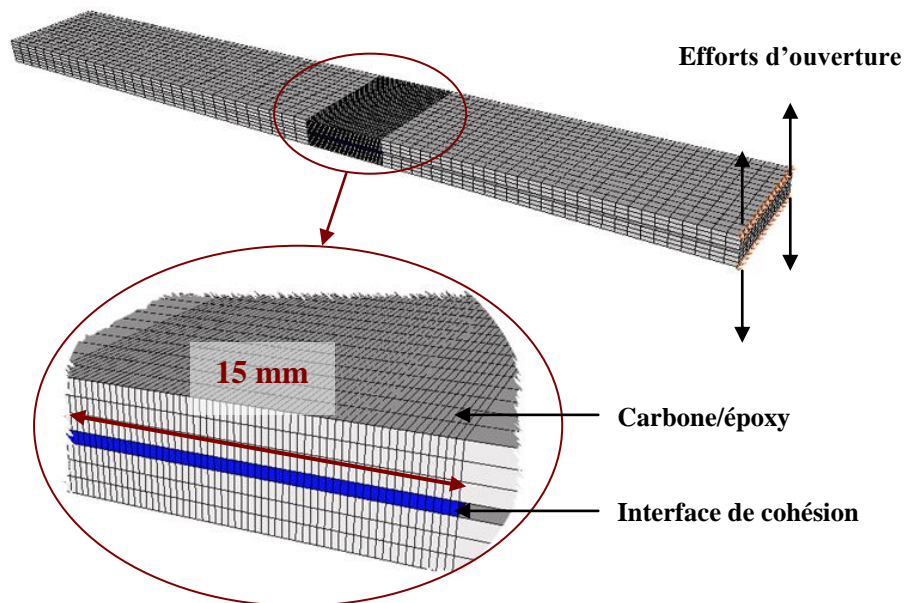


Fig. 10. Modélisation de l'éprouvette DCB avec affinement du maillage au niveau de l'interface de cohésion

La charge d'ouverture a été appliquée en imposant un déplacement aux nœuds des extrémités de l'éprouvette à une vitesse de 0.5 m/s. Le choix d'une vitesse de déplacement élevée permet de réduire le nombre de cycles de calcul nécessaire à l'étude de la propagation du délaminage et d'évaluer la stabilité de la méthode dans l'optique de la simulation des hyperaccélération électromagnétiques. Des jauges de mesures ont été placées au niveau des nœuds concernés de façon à pouvoir accéder à l'évolution du déplacement d'ouverture et à la force totale requise pour initier puis propager le délaminage. Plusieurs tailles d'élément ont été testées pour le maillage de l'interface de cohésion. Si le nombre d'éléments dans le sens de l'épaisseur et de la largeur a été conservé constant (respectivement 1 et 15 éléments), le nombre d'éléments dans le sens de la longueur a successivement pris les valeurs suivantes : 15, 30, 45, 60 et 75, soit une taille d'élément variant de 1 à 0.2 mm. Pour chaque configuration, les lois bilinéaire et polynômiale du troisième ordre (figure 8) ont été testées. L'influence de la finesse du maillage et de la loi de "traction-déplacement" a tout d'abord été évaluée en traçant l'évolution de la force s'exerçant sur chaque nœud contraint en fonction du déplacement d'ouverture. La figure 11 présente les courbes obtenues pour chaque configuration.

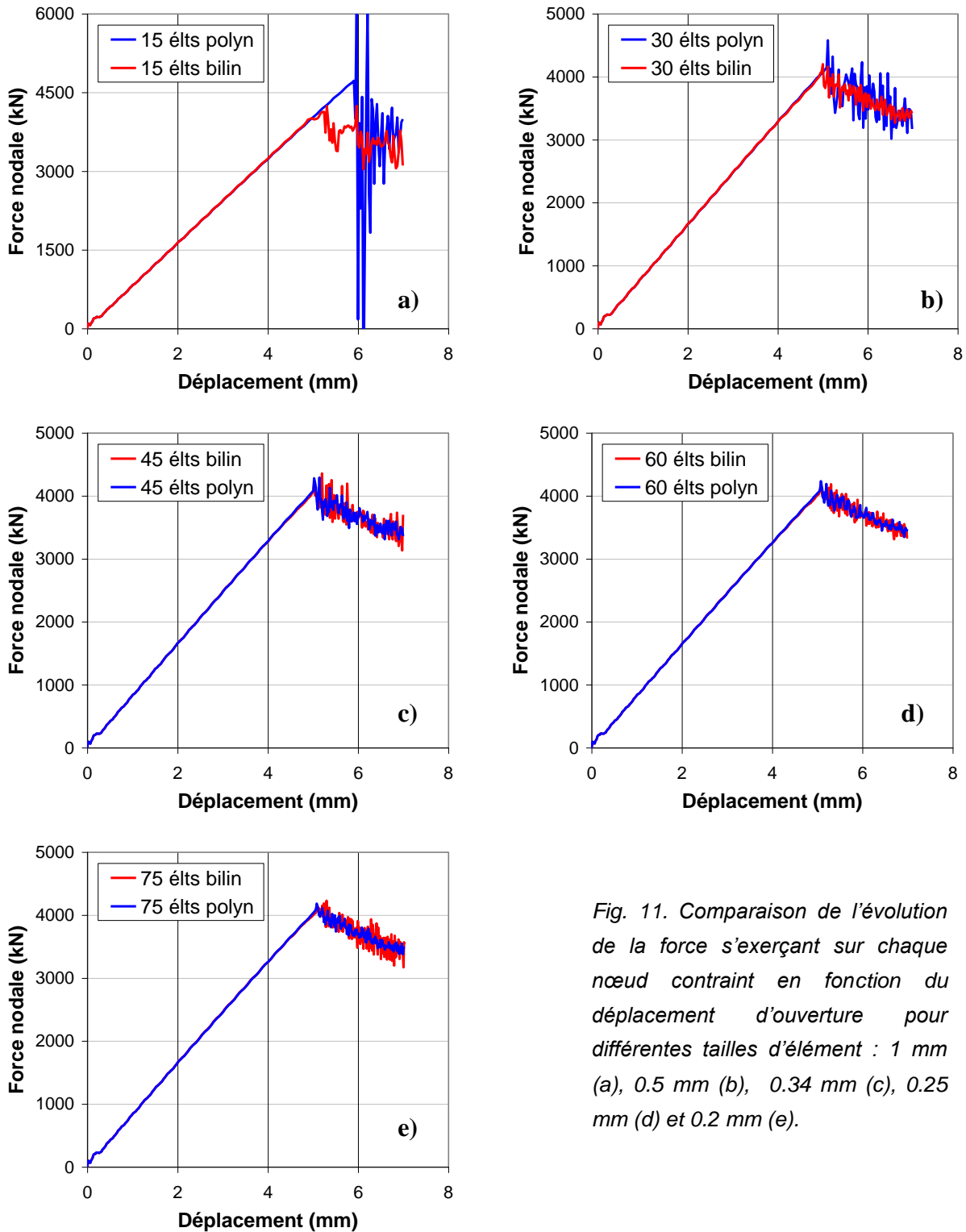


Fig. 11. Comparaison de l'évolution de la force s'exerçant sur chaque nœud contraint en fonction du déplacement d'ouverture pour différentes tailles d'élément : 1 mm (a), 0.5 mm (b), 0.34 mm (c), 0.25 mm (d) et 0.2 mm (e).

La première constatation concerne la stabilité générale du modèle. Seule la configuration impliquant la loi de comportement polynômiale et le maillage le plus grossier conduit à des divergences et à des instabilités très prononcées (figure 11-a), se manifestant par de fortes oscillations. Compte-tenu de la vitesse de déplacement imposée, ce résultat démontre que le modèle est adapté à l'étude des problèmes dynamiques. Plus le maillage est fin, plus les oscillations s'atténuent. Le choix de la loi de comportement la plus adaptée est dépendant du maillage : jusqu'à une taille d'élément de 0.5 mm, la loi bilinéaire donne les résultats les plus stables, tandis que la loi polynômiale du 3<sup>ème</sup> ordre s'avère plus appropriée aux maillages les plus fins. La figure 12 présente l'allure de l'éprouvette après que le délaminage a été propagé sur les 15 mm de l'interface de cohésion :

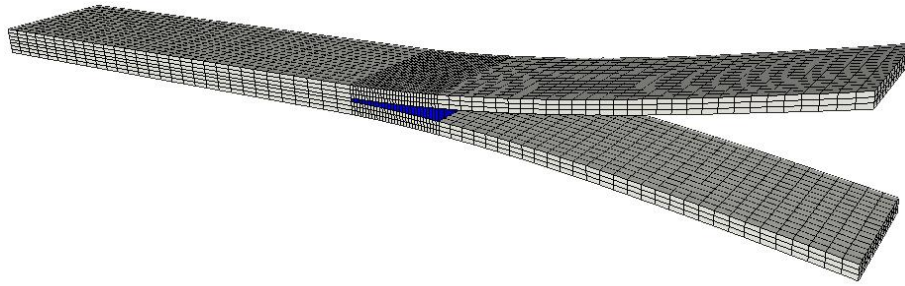


Fig. 12. Éprouvette DCB après propagation du délaminage sur toute la longueur de l'interface de cohésion

La comparaison de l'allure générale des courbes obtenues avec la loi bilinéaire et avec la loi polynômiale révèle une cohérence manifeste des résultats. Afin d'en vérifier l'exactitude, la courbe de la force totale s'exerçant sur l'ensemble des nœuds contraints a été tracée en fonction du déplacement d'ouverture (éléments de taille 0.2 mm et loi de comportement polynômiale), puis comparée à la courbe expérimentale obtenue par Morais et al. (figure 13) :

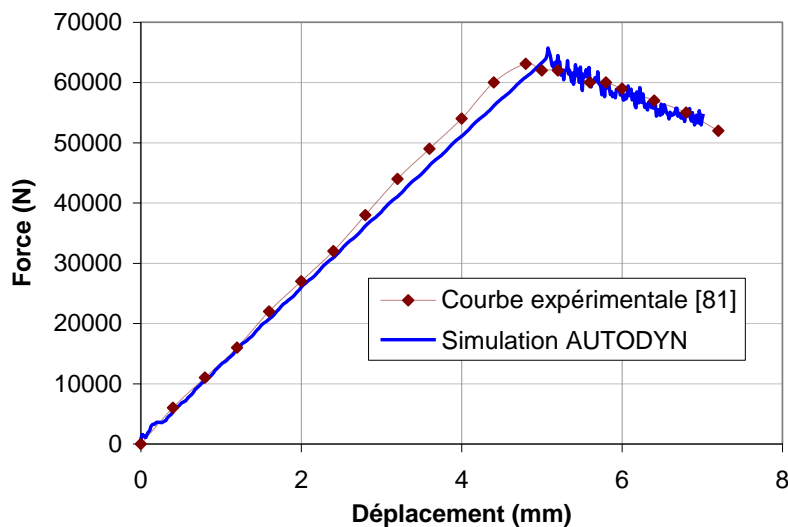


Fig. 13. Comparaison des résultats expérimentaux [6] et de la simulation

Une corrélation très satisfaisante entre la courbe issue de la simulation et la courbe expérimentale est observée. Le pic de force obtenu par Morais et al., qui correspond à l'initiation du délaminage, est égal à 62.52 N. La valeur donnée par la simulation est de 64 N. Les valeurs des déplacements correspondants sont respectivement de 4.8 mm et 5 mm. La diminution progressive de la force nécessaire à la propagation du délaminage est également conforme aux résultats expérimentaux.

#### 4. Conclusions

L'étude de la résistance du matériau verre S2/PEEK à la rupture interlaminaire en mode I a révélé des valeurs de ténacité élevées de la résine PEEK et la possibilité de les optimiser en influant sur la teneur en matrice des stratifiés. La programmation sous AUTODYN d'un modèle de matériau dédié à la simulation du comportement au délaminage des matériaux composites a en outre donné de très bons résultats et permettra à termes une prise en compte de la rupture interlaminaire dans la simulation de l'accélération des structures de maintien stratifiées.

#### Références

- [1] B. Reck, « Étude numérique du délaminage d'un composite stratifié à renfort tissu de verre/tissu de carbone ». *Comptes-rendus des 15<sup>e</sup> Journées Nationales sur les Composites (JNC15)*, Publiés par C. Hochard & J. Lamon, pp. 649-657, Marseille, 6-8 Juin 2007. ISBN 978-2-87717-090-1.
- [2] AFNOR, « NF ISO 15024 : Détermination de la ténacité à la rupture interlaminaire en mode I,  $G_{Ic}$ , de matériaux composites à matrice polymère renforcés de fibres unidirectionnelles », 2002.
- [3] ASTM INTERNATIONAL, « D5528: Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites », 2001.

- [4] N. Alif, L.A. Carlsson, L. Boogh, « The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode I delamination resistance of woven glass and carbon composites », *Composites: Part B*, 29, pp. 603-611, 1998.
- [5] A.B. Perreira, A.B. De Morais, M.F.S.F. De Moura, A.G. Magalhaes, « Mode I interlaminar fracture of woven glass/epoxy multidirectional laminates », *Composites: Part A*, 36, pp. 1119-1127, 2005.
- [6] MORAIS A.B., DE MOURA M.F., MARQUES A.T., DE CASTRO P.T., « Mode I interlaminar fracture of carbon/epoxy cross-ply composites », *Composites Science and Technology*, 62, pp.679-686, 2002.
- [7] MORAIS A.B., MARQUES A.T., DE CASTRO P.T., « Estudo da aplicação de ensaios de fractura interlaminar de modo I a laminados compositos multidireccionais », *Proceedings of the 7as Jornadas de Fractura*, pp.90-95, 2000.