



OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID: 2798

To cite this document: GUILLON, Damien. RIVALLANT, Samuel. BARRAU, Jean-Jacques. PETIOT, Caroline. THEVENET, Pascal. MALHERBE, Benoît. Développement d'un modèle de l'écrasement progressif des composites stratifiés en dynamique. In: *JNC16 - 16ème Journées Nationales sur les Composites*, 10-12 juin 2009, Toulouse, France.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr

Développement d'un modèle de l'écrasement progressif des composites stratifiés en dynamique

Development of a simulation of the dynamic progressive crushing of laminated composites

D. Guillon¹, S. Rivallant², JJ. Barrau³, C. Petiot⁴, P. Thevenet⁴, B. Malherbe⁵

1 : CETIM
74, Rte de la Jonnelière - BP 82617 - 44326 Nantes
damien.guillon@cetim.fr

2 : Université de Toulouse / ISAE / DMSM
10 av. Edouard Belin - 31055 Toulouse
samuel.rivallant@isae.fr

3 : Université de Toulouse / UPS / LGMT
118 Rte de Narbonne - 31062 Toulouse
barrau@cict.fr

4 : EADS IW / SP / ME
12 rue Pasteur - BP 76 - 92152 Suresnes
Caroline.petiot@eads.net

5 : Airbus France / EDSAZ
316 Rte de Bayonne - 31060 Toulouse
benoit.malherbe@airbus.com

Résumé

Grâce à un dispositif d'essai original d'écrasement de plaques composites, des modes d'écrasement élémentaires de stratifiés CFRP ont été observés et analysés pour des chargements statiques et dynamiques. Ces analyses ont permis de proposer un modèle éléments finis 2D explicite, avec modélisation de l'endommagement du matériau à l'échelle mésoscopique, pour la simulation du mode d'écrasement par évatement, avec une bonne corrélation entre modèle et expérience.

Abstract

Thanks to an innovative plate crushing test fixture, elementary crushing modes of CFRP laminates have been observed and analysed for static and dynamic loading. These analyses enabled to propose a 2D explicit finite element model at mesoscale for the simulation of splaying mode, with a good correlation between model and test data.

Mots Clés : stratifié, écrasement, absorption d'énergie, corrélation expérience/numérique

Keywords : laminate, crushing, energy absorption, experimental/numerical correlation

1. Introduction

Grâce à leur résistance spécifique élevée, les matériaux composites sont de plus en plus largement utilisés dans le domaine des transports, et en particulier dans les applications aérospatiales, pour lesquelles l'économie de masse est primordiale. Cependant, la spécificité et la complexité des modes d'endommagement des composites rendent difficile la prédiction du comportement des structures composites soumises à des chargements de type crash.

De nombreuses études [1-2] sur l'écrasement des structures composites ont été réalisées ces dernières décennies, et l'intérêt pour le domaine de la résistance à l'écrasement est encore présent comme l'attestent les travaux récents sur le sujet [3]. Cependant, il reste des progrès à réaliser, notamment en ce qui concerne la modélisation de l'écrasement des structures composites. La plupart des modèles développés au cours des dernières années [4-5] sont fondés sur des tests de caractérisations globaux, qui rendent donc les modèles dépendant de paramètres globaux, et qui ne permettent pas d'obtenir des modèles prédictifs. Quelques modèles [6-7] sont basés sur les caractéristiques élémentaires des matériaux,

mais nécessitent souvent une connaissance a priori du mode d'écrasement développé dans le front d'écrasement. L'enjeu, aujourd'hui, en terme de simulation de crash, est d'être capable, à partir des caractéristiques matériaux élémentaires, de prédire à la fois le mode d'endommagement développé, et la quantité d'énergie absorbée au sein d'une structure quelconque.

Dans cette étude, un modèle du mode d'écrasement par évaseement des plis du stratifié est présenté. Les simulations sont basées sur les seules caractéristiques mécaniques élémentaires du matériau. Des données précises provenant d'expériences réalisées avec un dispositif d'essais d'écrasement de stratifiés original permettent de réaliser des comparaisons entre expérience et modèle.

2. Etude expérimentale

Ce paragraphe présente le dispositif d'essai et un résumé des principaux résultats de l'étude expérimentale réalisée sur des plaques composites stratifiées soumises à des écrasements. Plus de détails sur les résultats expérimentaux sont disponibles dans [8]

2.1 Dispositif d'essai

Le montage d'essai (Fig. 1) a été conçu pour améliorer les dispositifs d'écrasement de plaques existants dans la littérature. Il est composé de quatre guides verticaux ajustables qui empêchent le flambage de l'échantillon, et de deux guides horizontaux ajustables. Ces derniers, situés juste en dessous des guides verticaux, sont placés de telle sorte qu'il existe un jeu entre ces guides et la plaque métallique sur laquelle vient s'effectuer l'écrasement. Un concept similaire a été développé pendant la même période par Feraboli [3]. Cela permet d'éviter le déchirement des plaques observé dans la plupart des dispositifs d'écrasement de stratifiés existant [9,10], et d'assurer des conditions aux limites identiques sur toute la largeur de la plaque, juste au dessus du front d'écrasement. Deux montants principaux maintiennent les guides et l'ensemble du dispositif, sans interférer avec le front d'écrasement. Des trous de visualisation ont été réalisés dans ces montants afin de laisser le front visible.

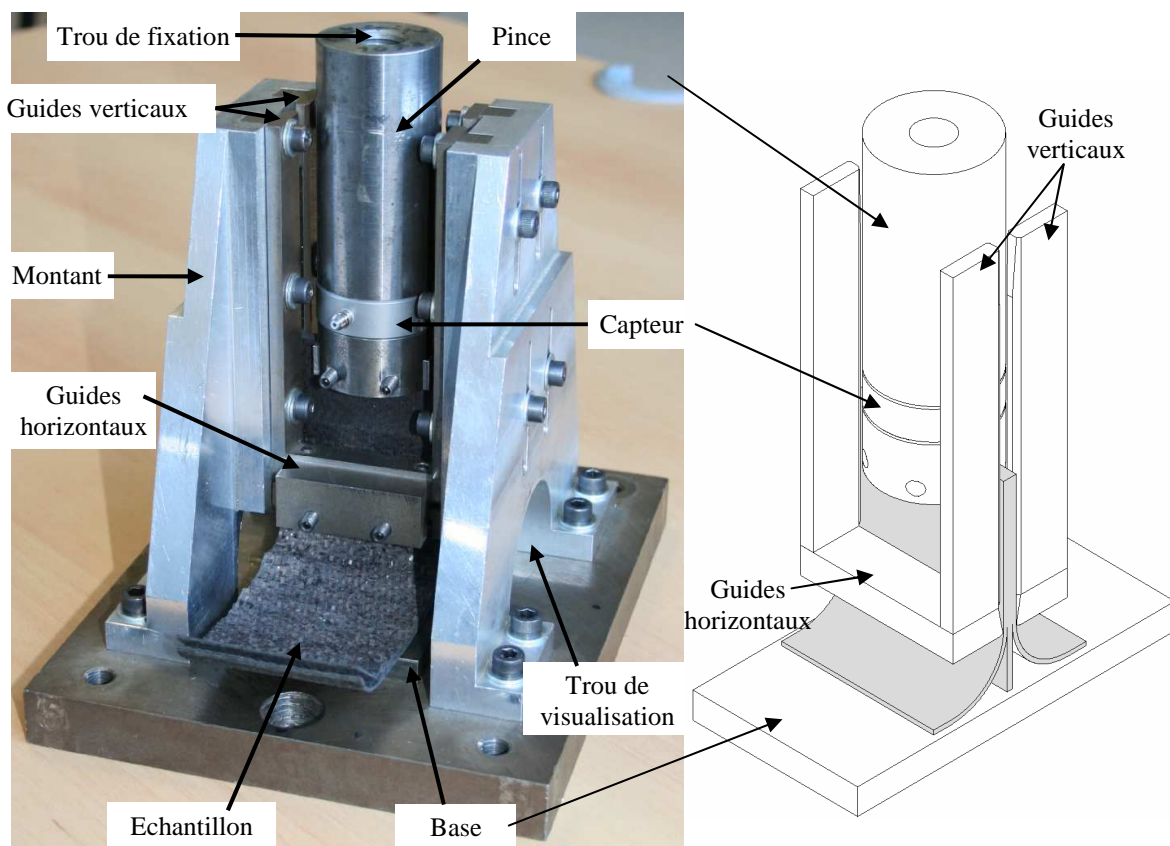


Fig. 1. Dispositif d'essai : photo et schéma de principe (sans les montants)

L'épaisseur de l'échantillon peut varier de 0 à 10 mm. Le jeu (hauteur libre entre la plaque métallique et les guides horizontaux) peut également être ajustée, de 0 à 40 mm.

La plaque stratifiée est fixée à un cylindre en acier, qui sert d'interface avec la machine d'essai statique ou la tour de chute (pour les tests dynamiques). Pendant l'écrasement, le stratifié et le cylindre passent entre les montants et entre les guides verticaux. Dans la partie inférieure du cylindre, un capteur

piézoélectrique Kistler de 120 kN mesure l'effort d'écrasement. La faible distance entre la plaque stratifiée et le capteur limite le filtrage mécanique du signal d'effort, permettant ainsi une grande précision de la mesure de l'effort en dynamique. Une caméra rapide est utilisée pour obtenir des observations au cours de l'essai du front d'écrasement, sur le côté de la plaque. La vitesse d'acquisition est de 20000 images par seconde, pour une résolution de 512x256 pixels.

2.2 Echantillon

Les plaques testées sont des plaques stratifiées de 160x60 mm. Des graduations blanches sont tracées sur la tranche tous les 5 mm. Chaque test est défini par trois paramètres :

- le mécanisme d'initiation : les trois différents triggers sont présentés ci-dessous (Fig. 2),
- la vitesse d'écrasement : 20 mm/min pour les tests statiques, et 5 m/s de vitesse avant impact pour les tests sur tour de chute,
- la configuration de drapage : trois matériaux ont été testés : 1) Tissu carbone-époxyde Vicotex 914/42%/G803 pré-imprégné, avec les drapages $[(0^\circ/90^\circ), (+45^\circ/-45^\circ)]_{4/s}$ et $[(0^\circ/90^\circ)]_{8/s}$, 2) Nappe unidirectionnelle carbone-époxyde fort grammage Hexply M21/35/268/T700GC pré-imprégnée, avec les drapages $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_{2/s}$ et $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{4/s}$, 3) Nappe unidirectionnelle carbone-époxyde faible grammage Hexply M21/35/134/T700GC pré-imprégnée, avec les drapages $[45^\circ/-45^\circ]_{8/s}$ et $[0^\circ/90^\circ]_{8/s}$.

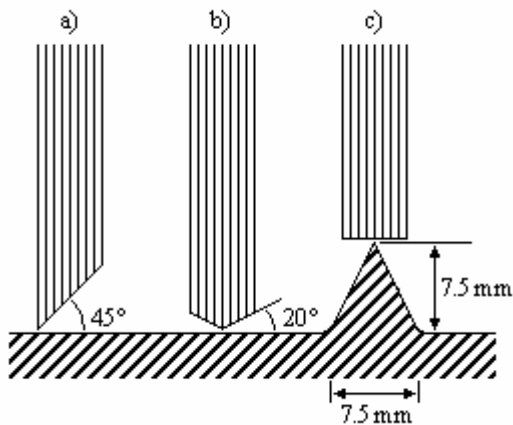


Fig. 2. Triggers :
a) chanfrein - b) clocher - c) pointe métallique

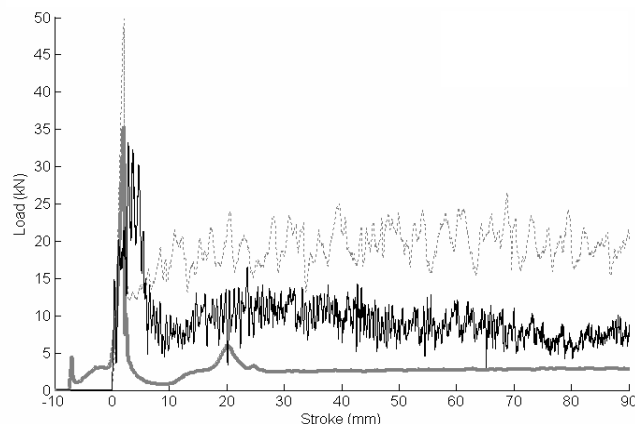


Fig. 3. Courbes Effort-Déplacement
Haut : évaselement fragmenté (G803/914, statique)
Milieu : mode mixte (T700/M21, dynamique)
Bas : évaselement sans dommage (G803/914, statique)

2.3 Principaux résultats expérimentaux

Les nombreux tests réalisés ont permis d'observer les différents modes d'écrasement de plaques composites stratifiées. Les mécanismes d'endommagement étant homogènes dans la largeur de la plaque, les images des côtés de la plaque obtenues par caméra rapide (Fig. 4) permettent l'observation et la compréhension des modes d'écrasement. Les principaux modes observés sont décrits brièvement ci-dessous.

L'évasement sans dommage se développe lorsque le stratifié est assez souple pour fléchir sans dommage localisé dans les plis pendant l'écrasement. Un ratio faible entre la résistance des interfaces et la résistance des plis favorise ce mode. L'énergie absorbée est faible : moins de 10 kJ/kg (Fig. 3). L'évasement fragmenté arrive lorsque le stratifié est soumis à des dommages localisés répétés dans les plis, dus à la flexion pendant l'écrasement. Un obstacle, comme une cale de débris, séparant le front d'écrasement en deux branches d'évasement est nécessaire pour maintenir ce mode. La fragmentation arrive lorsque les plis atteignent la plaque métallique à angle droit, et ne peuvent glisser d'un côté ou de l'autre. La rupture apparaît alors de façon continue à l'échelle mésoscopique. L'énergie absorbée est bien plus forte : jusqu'à 50 kJ/kg, dépendant fortement du nombre de plis endommagés (Fig. 3). Cependant, la fragmentation n'est pas un mode stable, l'écrasement des plis évoluant de la fragmentation vers la flexion, menant à un mode d'écrasement de type évaselement avec ou sans dommages dans les plis. De manière générale, l'écrasement se fait dans un mode combinant ces modes élémentaires.

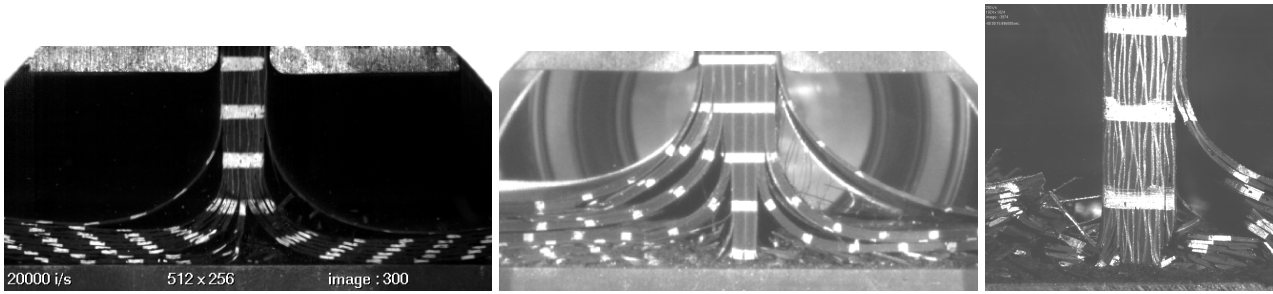


Fig. 4. Exemples de modes d'écrasement observés (de gauche à droite) :
 Evasement sans dommage : plaque de G803/914 - trigger chanfrein
 Mode mixte (évasement + fragmentation) : plaque de T700/M21 - trigger chanfrein
 Fragmentation : plaque de G803/914- trigger chanfrein

3. Etude numérique

La simulation numérique présentée est basée sur un test dynamique. L'échantillon est une plaque stratifiée formée de vingt plis d'UD T700/M21 fort grammage, d'épaisseur 0,25 mm, avec le drapage suivant : $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 90^\circ]_{2/s}$. Le mécanisme d'initiation est une pointe usinée dans la plaque métallique. Le mode d'écrasement obtenu pour cette configuration de test est un évasement avec multiples délaminages entre plis. La vitesse initiale de chute du poids tombant est 5 m/s. Les courbes Effort-Temps et Effort-Déplacement, ainsi que les images de la caméra rapide forment une base de données précise pour effectuer des corrélations entre expérimental et simulation. Les calculs sont réalisés avec le code de calcul Abaqus/Explicit.

3.1 Description du modèle

Dans ce modèle, x est la direction d'écrasement, et z la direction normale à la plaque (Fig. 5). Dans un pli, les directions 1, 2 et 3 représentent les directions sens fibre, sens travers et normale au pli. 0° correspond à la direction d'écrasement (x).

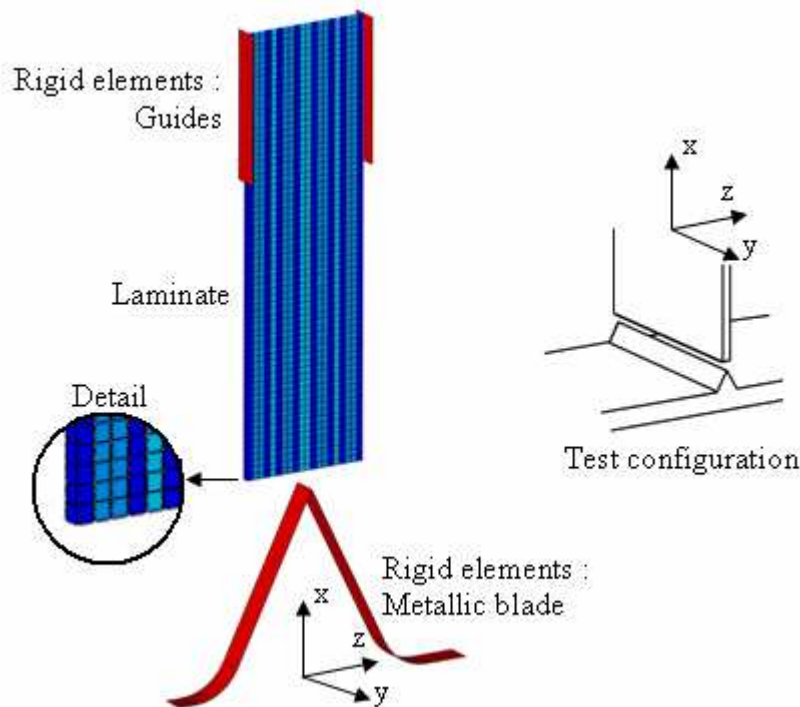


Fig. 5. Modèle éléments finis de la plaque stratifiée

La plaque stratifiée est modélisée en 3D (Fig. 5). Seule une longueur de 100 mm de la plaque est modélisée, pour réduire les temps de calcul, ce qui est suffisant pour représenter de manière réaliste les conditions aux limites sur la plaque métallique et sur les guides. Chaque couche est modélisée par des éléments coques épaisses (continuum shell, dans Abaqus), carrés, avec un élément dans l'épaisseur. Les

dimensions de l'élément sont 0,23 mm d'épaisseur, pour 0,25 mm dans les deux autres directions. Le plan moyen de l'élément correspond au plan moyen du pli (plan xy). Les plis sont séparés par des éléments cohésifs 3D, d'épaisseur 0,02 mm, soit environ le dixième de l'épaisseur du pli. Les détails du maillage de la plaque sont donnés ci-dessous (Fig. 6).

Pour réduire les temps de calcul, seul un élément est modélisé dans la largeur de la plaque (direction y). Le modèle est donc constitué de 8000 éléments coque épaisse et 7600 éléments cohésifs, pour environ 100000 degrés de liberté.

Le trigger pointe métallique est représenté par une condition aux limites rigide avec gestion du contact (méthode des pénalités) et du frottement (coefficient de frottement de 0,1). Les guides sont modélisés par des demi-plans rigides, avec lois de contact et de frottement similaires.

Des masses additionnelles sont ajoutées sur le haut de la plaque pour prendre en compte la masse du poids tombant utilisé pendant l'essai, et la vitesse initiale de 5 m/s est appliquée à la plaque composite et à ces masses additionnelles.

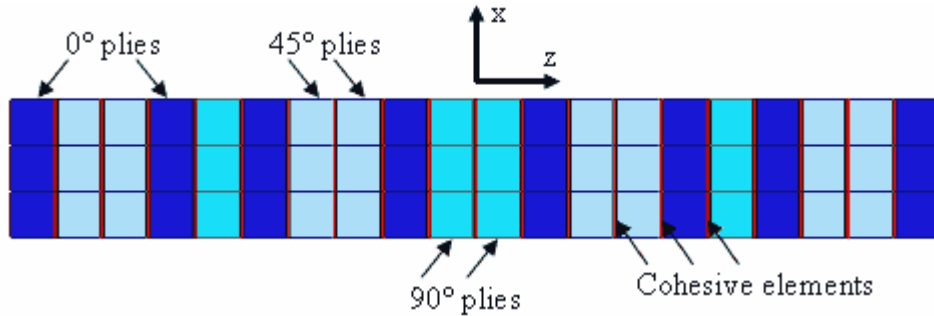


Fig. 6. Détail du maillage

3.2 Dommages dans les plis

Le caractère pseudo-2D du modèle (un seul élément dans la largeur) amène à définir différents matériaux pour les plis à 0° et 90° d'un côté, 45° de l'autre.

Pour les plis à 0° et 90°, le comportement est choisi si linéaire élastique endommageable. L'initiation des dommages est pilotée par le critère d'Hashin, réduit à son expression en contraintes planes. Les caractéristiques mécaniques sont données ci-dessous (Tab. 1). X^T , X^C , Y^T , Y^C et S_C sont respectivement la résistance en traction et compression sens fibre, la résistance en traction et compression sens travers, et la résistance au cisaillement dans le plan. Ensuite, pour chacun des quatre modes d'endommagement, une variable d'endommagement est définie : d_{ft} , d_{fc} , d_{mt} , d_{mc} pour le mode de rupture sens fibre en traction et compression, et les modes de rupture sens travers en traction et compression. La rigidité de l'élément décroît alors linéairement avec les déformations, ce qui donne l'évolution suivante pour les variables d'endommagement :

$$d_i = \frac{\varepsilon_i^f \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_i^0)}{\varepsilon_i \cdot (\varepsilon_i^f - \varepsilon_i^0)} \quad (\text{eq. 1})$$

Où ε_i est la déformation concernée par le mode d'endommagement i , ε_i^0 est la déformation lorsque le critère d'Hashin est atteint, pour le mode i , et ε_i^f est la déformation lorsque la rupture totale est atteinte dans le mode i .

La déformation à rupture ε_i^f est calculée de telle sorte que l'énergie dissipée dans l'élément soit égale à l'énergie dissipée par le même volume de matériau dans un essai élémentaire de propagation de fissure stable en traction ou compression (sens fibre en compression : G_{FC} , en traction : G_{FT}). Les valeurs utilisées dans le sens fibre sont extrapolées de travaux expérimentaux réalisés par Pinho [11], sur du T300/913. Les valeurs pour les ruptures de matrice sont calculées à partir des données de la mécanique de la rupture pour les interfaces (voir Tab. 1 pour les valeurs).

La loi de dégradation du matériau, prenant en compte quelques couplages, est la suivante :

$$[\sigma] = \frac{1}{\alpha} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)\nu_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha(1-d_s)G_{12} \end{bmatrix} \cdot [\varepsilon] \quad (\text{eq. 2})$$

Où

d_f et d_m représentent les modes sens fibre et sens travers, en traction ou compression selon le signe de σ_{11} ,

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c),$$

$$\alpha = 1 - (1 - d_f)(1 - d_m)v_{21}v_{12}$$

Pour prendre en compte le comportement pseudo plastique des plis à 45°, une loi élastique plastique bilinéaire endommageable est utilisée. La loi d'endommagement est la même qu'à 0° et 90°, appliquée dès que le critère d'Hashin est atteint.

Les caractéristiques mécaniques des plis, donnés dans le tableau (Tab. 1) proviennent de tests de caractérisation, exceptés G_{FC} et G_{FT} .

3.3 Gestion du délaminage

La modélisation du délaminage est prise en compte par des éléments cohésifs, avec la loi de comportement suivante :

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \frac{1-D}{T_0} \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 3})$$

Où (t_n, t_s, t_t) sont les contraintes dans les directions 3, 1 et 2, $[K]$ est la matrice de rigidité, $(\delta_n, \delta_s, \delta_t)$ sont les déplacements dans les directions 3, 1 et 2, T_0 est l'épaisseur initiale de l'élément, et D la variable d'endommagement.

L'initiation du dommage se fait lorsque l'une des trois contraintes atteint sa valeur maximale. Ces valeurs sont calculées à partir des tests de caractérisation des plis de composite : $t_n^0 = \sigma_{33} = 75$ MPa en traction, et $t_s^0 = t_t^0 = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 150$ MPa en cisaillement.

La propagation du dommage est gérée par une loi d'adoucissement bilinéaire. La décroissance linéaire est calculée pour que l'énergie absorbée soit égale au taux de restitution d'énergie à l'interface dans chaque mode. Le couplage entre les trois modes est choisi linéaire :

$$\sum \frac{G_i}{G_{ic}} = 1 \quad (\text{eq. 4})$$

Après rupture totale des interfaces, une gestion de contact avec frottement est activée entre les plis adjacents.

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	
125	9	5	0,4	
X^T (MPa)	X^C (MPa)	Y^T (MPa)	Y^C (MPa)	S_c (MPa)
1950	1950	75	220	150
G_{FT} (mJ/mm ²)	G_{FC} (mJ/mm ²)	G_I (mJ/mm ²)	G_{II} (mJ/mm ²)	
133	80	0,35	1,2	

Tab. 1. Caractéristiques mécaniques du T700/M21 pour la simulation.

3.4 Comparaison expérience/numérique

La simulation donne des résultats très satisfaisants à la fois en terme de restitution du comportement global de la plaque, et en terme de courbes d'effort. Les courbes Effort-Déplacement (Fig. 7) sont très similaires, et les principaux phénomènes physiques bien pris en compte : un petit pic d'effort quand la plaque entre en contact avec la pointe métallique, suivi par un léger accroissement d'effort lorsque les deux branches de la plaques, séparées par la pointe, glissent sur chacun de ses côtés, puis un pic d'effort important lorsque les branches atteignent la base de la pointe, et enfin, une forte décroissance jusqu'au plateau d'effort correspondant à l'écrasement stabilisé en mode évaselement.

L'effort maximum obtenu pendant le pic (50 kN) est inférieur dans la simulation (35 kN), mais les différents effets dynamiques dus à la structure (poids tombant) et au capteur n'étant pas simulés, il est difficile de dire avec certitude ce que représente physiquement l'amplitude du pic d'effort, et donc de comparer expérimental et numérique sur ce point.

Pour les mêmes raisons, les vibrations observées sur la courbe d'essai, qui proviennent de l'excitation de la structure par les deux pics d'effort, ne peuvent être retrouvées par simulation. Ces vibrations ne

correspondant pas à une réponse de la plaque en écrasement, mais à une réponse dynamique du système, elles ne mettent pas en défaut le modèle d'évasement proposé.

La faible valeur d'effort du plateau est cohérente avec un mode d'écrasement en évasement, dans lequel les dommages dans les plis sont très limités, même si la valeur d'effort de la simulation est inférieure de 30% à la valeur expérimentale (1.7 kN). Les délaminages observés, excepté le délaminage central, sont pilotés essentiellement par le mode II.

Les images provenant de la caméra rapide et des simulations (Fig. 8) montrent elles aussi une bonne corrélation en termes de comportement global de la plaque, et plus particulièrement en termes de déplacements.

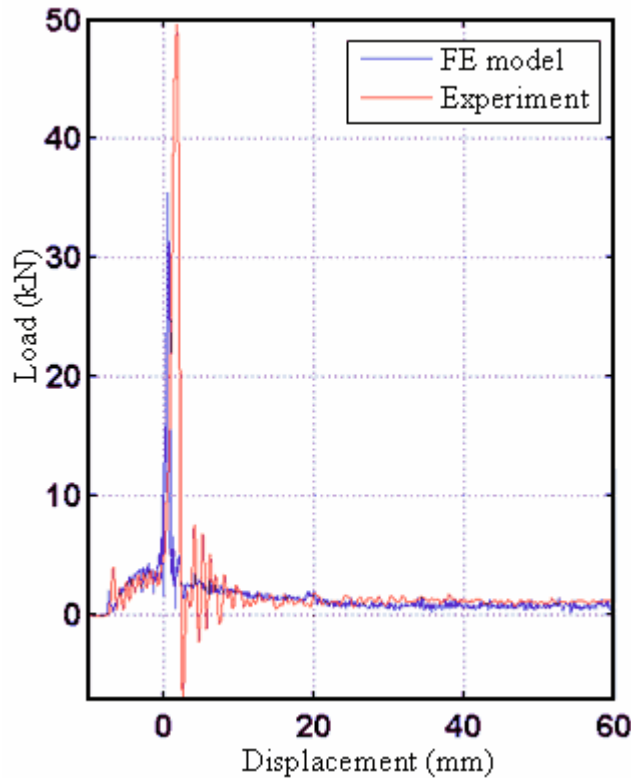


Fig. 7. Comparaison expérimental / numérique : courbe Effort-Déplacement

3.5 Analyse de la dissipation d'énergie

L'analyse de la dissipation d'énergie dans la phase d'écrasement, à partir des résultats numériques, montre que dans le cas d'un mode d'écrasement en évasement, dans la phase stabilisée, la plupart de l'énergie est dissipée par le multi-délaminage au niveau des interfaces entre plis. Dans la configuration de test modélisée, cela représente 60% de l'énergie, contre 15% en frottements et 15% en dommages dans les plis.

3.6 Etude d'influence

Une étude d'influence de certains paramètres a été réalisée.

Concernant le coefficient de frottement entre composite et pièces métalliques, accroître ce coefficient de 0 à 0.3 mène à un changement de géométrie du front stabilisé, par diminution du rayon de courbure des plis, notamment, et à une augmentation de l'effort d'écrasement, donc de l'énergie absorbée. Une variation du coefficient de frottement entre les plis de composites, entre 0 et 0.4, n'est pas significative : les surfaces de contact entre plis restent faibles, pour des valeurs d'effort également faibles.

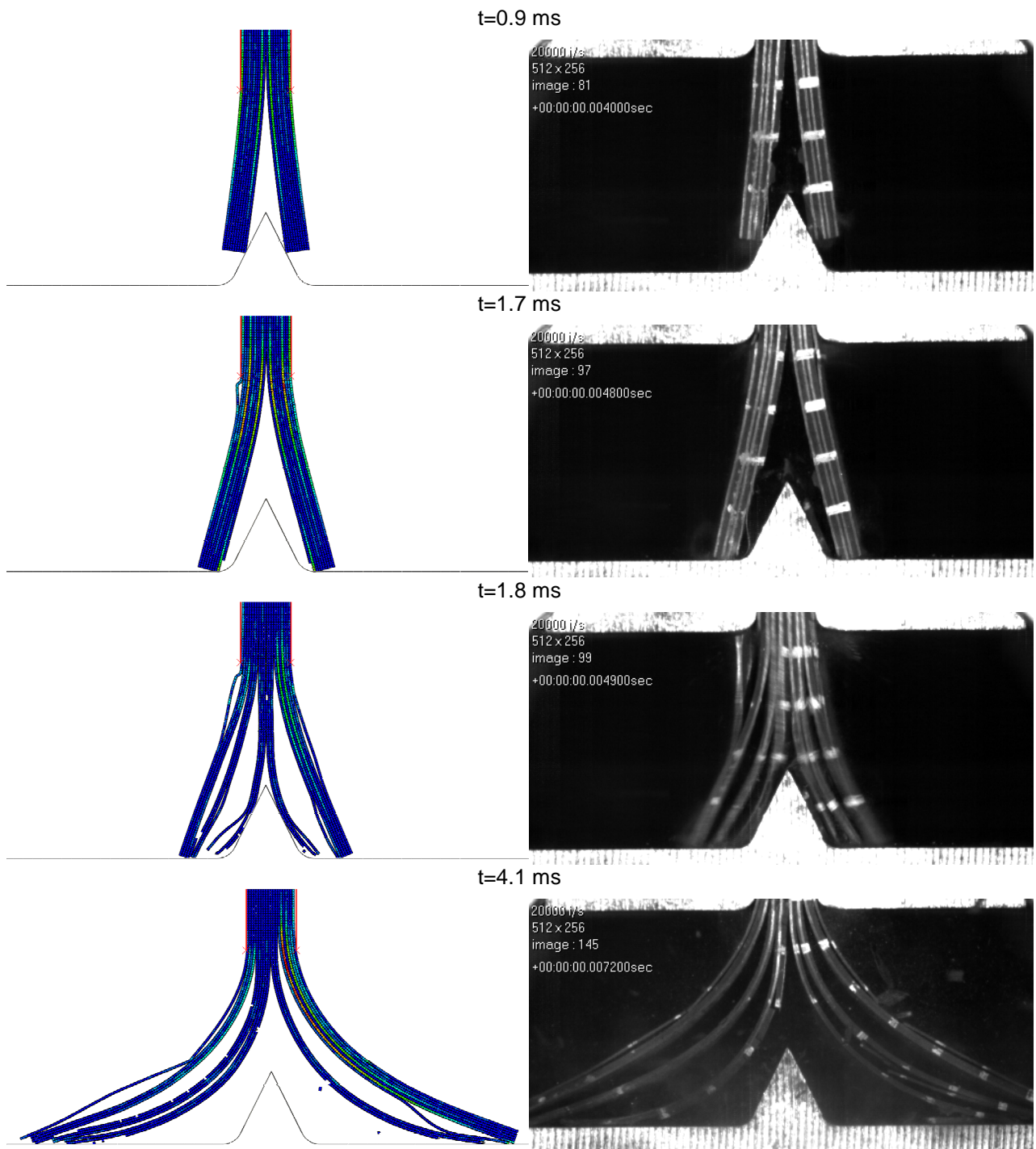


Fig. 8. Comparaison expérimental / numérique : visualisation du mode d'évasement

Les paramètres d'interface ont également été regardés. Leur influence est plus complexe. L'augmentation de la résistance de l'interface par le biais de l'augmentation des contraintes d'initiation et du taux de restitution d'énergie critique (Fig. 9) mènent à divers changements dans le mode de rupture : de la diminution du nombre d'interface délaminées (ce qui donne toujours un mode d'évasement, mais aux rayons de courbure plus grand), à l'augmentation des contraintes dans les plis, ce qui conduit à des ruptures répétées des plis (vers un mode de fragmentation). Cette étude de sensibilité montre l'importante sensibilité du comportement de la structure sous écrasement aux caractéristiques matériau du composite la constituant.

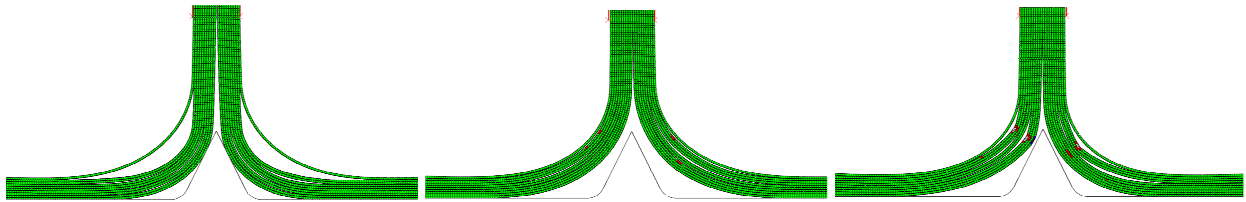


Fig. 9. Evolution du front avec le taux de restitution d'énergie en mode II : De gauche à droite : $G_{II} = 1.2 \text{ mJ/mm}^2 - 1.8 \text{ mJ/mm}^2$ (moins de délaminages) - 2.4 mJ/mm^2 (ruptures dans les plis)

4. Conclusion

L'objectif de cette étude était de proposer un modèle du mode d'évasement de plaques composites soumises à un chargement de type crash, dépendant uniquement de caractéristiques élémentaires du matériau constituant le stratifié. Grâce à des mesures et des observations expérimentales précises, il a été montré que cette modélisation est possible, avec des résultats qualitativement très bons, et quantitativement corrects. L'étude d'influence sur certains paramètres jugés prépondérants a également permis de montrer la capacité du modèle à prédire une évolution du comportement du front d'écrasement des plaques avec les caractéristiques matériau du composite.

Néanmoins, il faut garder à l'esprit que le mode de ruine présenté ici n'est pas le mode le plus dissipateur en terme d'énergie. Et même si les expériences montrent que la plupart des fronts d'écrasement présentent un certain nombre de plis extérieurs en évasement, et qu'ils semblent même participer fortement à la stabilisation des plis internes, il est nécessaire de concentrer également les efforts de modélisation sur le mécanisme de fragmentation, qui est le mode le plus efficace en terme d'absorption d'énergie.

Références

- [1] Hull D. "A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes", *Composites science and technology* 1991;40:377-421.
- [2] Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B., Carruthers J. "Crashworthy capability of composite material structures", *Composite structures* 1997; 37:109-134.
- [3] Feraboli P., Deleo F., Garattoni F., "Efforts in the standardization of composite materials crashworthiness energy absorption", 22nd American Society for Composites Technical Conference, Seattle, USA, September 2007.
- [4] McGregor C.J., Vaziri R., Poursartip A., Xiao X., "Simulation of progressive damage development in braided composite tubes under axial compression", *Composites: Part A* 2007; 11:2247-2259.
- [5] Bisagni C., Di Pietro G., Frascini L., Terletti D., "Progressive crushing of fiber-reinforced composite structural components of a formula One racing car", *Composite Structures* 2005;68:491-503.
- [6] Fleming D.C. "Finite element simulation of delamination with application to crashworthy design", AHS 62nd annual forum, Phoenix, USA, May 2006.
- [7] Pinho S.T., Camanho P.P., de Moura M.F., "Numerical simulation of the crushing process of composite materials", *International Journal of Crashworthiness* 2004;9(3):263-276.
- [8] Guillon D., Rivallant S., Barrau J.J., Petiot C., Thevenet P., Pechnick N. : "Initiation and propagation mechanisms of progressive crushing in carbon-epoxy laminated plates". ECCM13, Stockholm, Sweden, June 2008.
- [9] Lavoie J.A., Kellas S. "Dynamic crush tests of energy absorbing laminated composites plates", *Composites: Part A* 1996;27:467-475.
- [10] Daniel L., Hogg P.J., Curtis P.T. "The crush behaviour of carbon fibre angle-ply reinforcement and the effect of interlaminar shear strength on energy absorption capability" *Composites: Part B* 2000;31:435-440.
- [11] Pinho S.T., Robinson P., Iannucci L., "Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes", *Composites science and technology* 2006;66:2069-2079.