



HAL
open science

Modélisation semi-continue des composites stratifiés unidirectionnels sous sollicitation d'impact

Bassam Mahmoud, Pascal Florian, Pablo Navarro, Steven Marguet,
Jean-François Ferrero, Issam Tawk

► **To cite this version:**

Bassam Mahmoud, Pascal Florian, Pablo Navarro, Steven Marguet, Jean-François Ferrero, et al..
Modélisation semi-continue des composites stratifiés unidirectionnels sous sollicitation d'impact.
Journées Nationales sur les Composites 2015, Jun 2015, Lyon, France. hal-01623249

HAL Id: hal-01623249

<https://hal.science/hal-01623249>

Submitted on 25 Oct 2017

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 Semi-Continue de plis UniDirectionnels sous sollicitation d'impact

Semi-Continuous Modelling of UniDirectional plies under impact loading

Bassam Mahmoud^{1,2}, Pablo Navarro¹, Steven Marguet², Issam Tawk², Jean-François Ferrero¹

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader,
UMR CNRS 5312, INSA/UPS/ISAE/Mines Albi,
3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France
e-mail : pablo.navarro@univ-tlse3.fr

2 : University of Balamand,
Deir El-Balamand, El-Koura,
Lebanon

Résumé

Cet article traite du développement d'un modèle éléments finis de stratifiés unidirectionnels capable de prédire les dommages liés à un impact à basse vitesse. Ce modèle est basé sur l'analyse des dommages observés expérimentalement. L'échelle de modélisation est celle du paquet de fibres du pli unidirectionnel. Ces torons sont représentés par des éléments barre 1D. La résine est modélisée par des éléments plaque spécifiques endommageables. Le stratifié est ensuite construit en utilisant des éléments cohésifs particuliers. Cette stratégie est validée par comparaison avec des essais d'impact au poids tombant. Plusieurs paramètres expérimentaux sont variés : le matériau (T700/M21 et HTA7/913), l'épaisseur (1.44mm et 2.4mm), la séquence de drapage et la vitesse d'impact (2m/s et 3m/s). Les courbes effort/déplacement et les dommages obtenus par calcul sont en accord avec les observations expérimentales.

Abstract

This article deals with the development of a finite element model for the prediction of low velocity impact damage within unidirectional composite laminates. This model is based on analysis of the impact damage observed experimentally. The modelling scale is that of the bundle of fibers of the unidirectional ply. These bundles are represented with 1D rod elements. The matrix is modeled with 2D damageable shell elements. The laminate is built using cohesive elements. The strategy is validated by a comparison with low velocity drop weight impact tests. Several experimental parameters are varied: the materials (T700/M21 and HTA7/913), the thickness (1.44mm and 2.4mm), the stacking sequence and the impact velocity (2m/s and 3m/s). The calculated load-displacement curves and the damage extent correlate well with experimental results.

Mots Clés : impact, MEF explicite, composite unidirectionnel

Keywords : impact, explicit FEM, unidirectional composite

1. Introduction

Cet article traite de la modélisation d'impacts à basse vitesse sur des stratifiés en composites unidirectionnels. Ce travail concerne plus particulièrement le développement d'un modèle éléments finis spécifique capable de prédire à la fois les dommages d'impact et le scénario d'endommagement.

Les matériaux composites, de par leurs performances en termes de rapport résistance-raideur/masse, sont très largement utilisés dans de nombreux domaines industriels, en particulier dans le domaine des transports. Néanmoins, le comportement de ces matériaux à l'impact reste problématique. En effet ce type de chargement peut engendrer des fissurations matricielles, du délaminage, voire des ruptures de fibres, qui viennent réduire considérablement ses performances.

La prédiction de ces dommages a fait l'objet de nombreuses recherches. Plusieurs auteurs ont décrits en détail les différentes approches de modélisation déjà publiées [1,2]. On distingue les approches basées sur des critères de ruptures évalués à partir de contraintes ou déformations équivalentes [3, 4], les approches basées sur la mécanique de la rupture [5,6] et les approches

basées sur la mécanique d'endommagement [7,8]. Le délaminage est généralement modélisé en utilisant des éléments cohésifs [9,10]. Ces stratégies permettent de prédire correctement la forme et la taille des délaminages. Pour ce qui est de la modélisation de fissurations transverses, des éléments cohésifs verticaux intra plis peuvent aussi être utilisés [11,12]. Cette stratégie permet de bien représenter les dommages intralaminaires et interlaminaires, mais elle passe par la réalisation d'un maillage complexe souvent rédhibitoire à l'échelle de la structure.

C'est pourquoi une nouvelle stratégie de modélisation, appelée approche semi-continue, et décrite dans [13,14,15] a été développée. L'originalité est de se positionner à l'échelle des torons, représentés par des éléments 1D. Ces torons sont stabilisés grâce à des éléments 2D spécifiques et endommageables. Cette stratégie permet de représenter correctement la chronologie du dommage pendant un impact.

Dans cet article, l'approche semi-continue, initialement développée pour les tissus composites, est appliquée à la modélisation des stratifiés composites unidirectionnels sous chargement d'impact. Ces développements font partie d'un travail plus global qui doit permettre, à termes, d'étudier et de modéliser les stratifiés hybrides tissu/UD.

Dans un premier temps la stratégie de modélisation est décrite avant d'être validée par comparaison avec des essais d'impact au poids tombant. On trouve une bonne corrélation entre résultats expérimentaux et numériques.

2. Description de la modélisation

La stratégie de modélisation présentée ici s'appuie sur l'approche semi-continue décrite en [13]. Elle repose sur les observations expérimentales des dommages d'impacts de stratifiés unidirectionnels (Figure 1). Le scénario identifié expérimentalement se déroule en trois étapes principales. Tout d'abord la résine est endommagée : des fissures intralaminaires se propagent entre les torons, dans la direction longitudinale. Les paquets de fibres localisés entre ces fissures ne sont alors plus stabilisés et travaillent principalement en traction et en compression. Enfin, quand la déformation de ces torons atteint la limite à rupture, les fibres cassent.

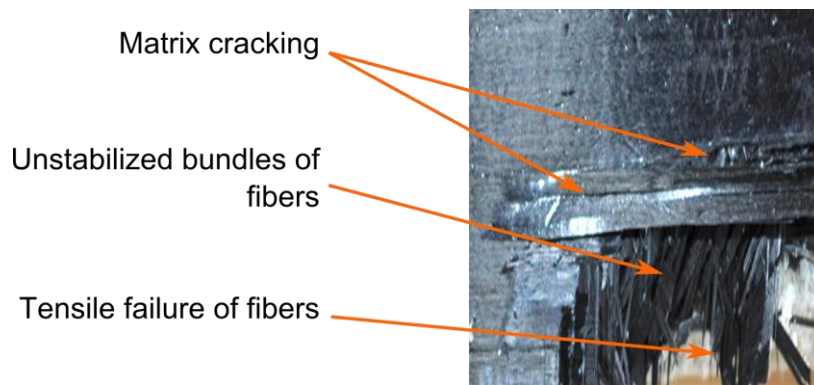


Fig. 1. Faciès de rupture d'un stratifié UD après impact.

Pour pouvoir reproduire le plus fidèlement les dommages liés à l'impact, cette chronologie, et plus particulièrement la phase où les torons ne sont plus stabilisés, doit être représenté par le modèle. Ainsi nous avons fait le choix de représenter les paquets de fibres par des éléments 1D barre, stabilisés par un élément 2D spécifique qui peut être endommagé. L'échelle de modélisation est liée à la taille des torons : la taille de maille correspond à la distance entre deux fissures longitudinales. Une description du modèle est donnée Figure 2.

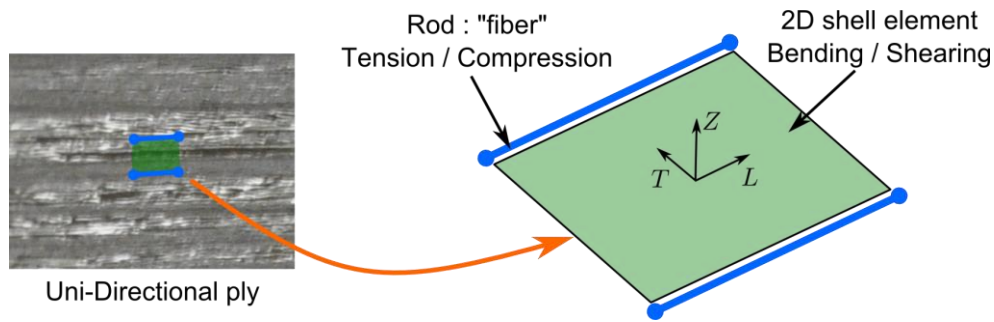


Fig. 2. Principe de modélisation Semi-Continue d'un pli UD

Pour les éléments barre, une loi élastique fragile est choisie. En ce qui concerne les éléments 2D, leur comportement est spécifique au choix de modélisation qui a été fait. En effet, en membrane, cet élément travaille conjointement avec les éléments barre et se comporte donc comme la résine du pli UD. En revanche, pour les sollicitations hors plan, les barres n'ont plus aucune raideur et l'élément se comporte comme le pli homogénéisé. Cet élément est endommageable. Les lois introduites s'appuient sur la mécanique de l'endommagement. Deux paramètres d'endommagement correspondant à la représentation des fissures dans le sens longitudinal et transversal du pli UD sont utilisés. Leur évolution est pilotée en se basant sur des taux de restitution d'énergie. Le comportement fortement non-linéaire du pli en cisaillement plan, aussi appelé « pseudo-plasticité » en cisaillement plan, est pris en compte.

Finalement, le stratifié est construit à partir de ce modèle de pli UD en utilisant des éléments cohésifs spécifiques décrits dans [14].

Les paramètres du modèle sont trouvés par identification inverse à partir d'essais de traction, flexion 3 points et d'indentation.

3. Validation de la stratégie de modélisation pour des impacts au poids tombant

3.1 Description des essais poids tombant

Dans cette partie, des essais au poids tombant sont réalisés pour pouvoir confronter les données expérimentales aux résultats donnés par la modélisation proposée. Le moyen d'essai est décrit Figure 3. La masse du poids est de 2kg. L'impacteur est hémisphérique et de diamètre 16mm. Les éprouvettes impactées sont des plaques de 100mmx150mm. Elles sont en appui sur un cadre de dimensions 75mmx125mm. Le déplacement de l'impacteur ainsi que l'effort de réaction sont mesurés pendant l'essai. De plus, des tomographies sont réalisées après impact pour pouvoir observer les fissurations matricielles, les ruptures de fibres et les délaminages.

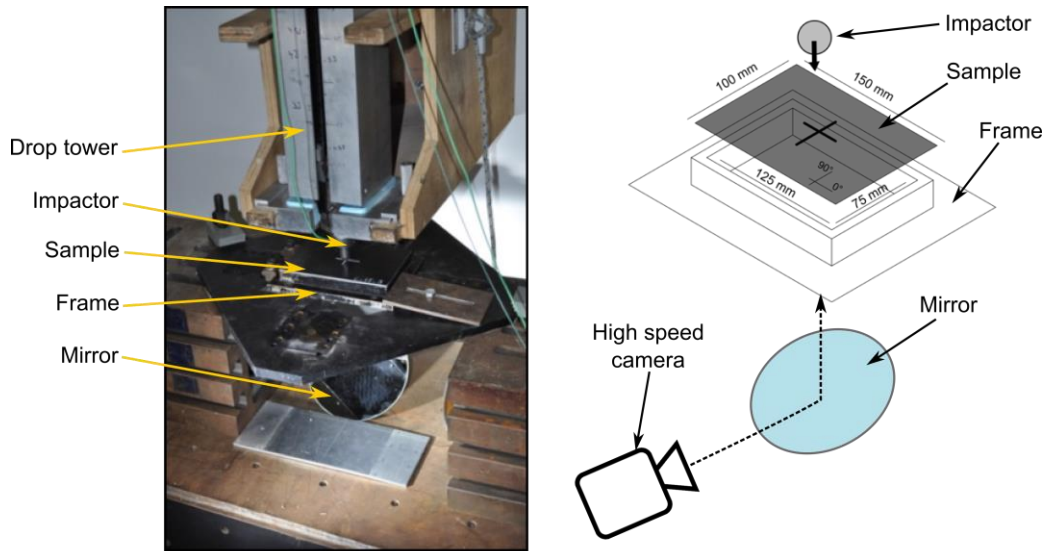


Fig. 3. Dispositif d'essai au poids tombant

L'objectif étant d'évaluer la précision du modèle, plusieurs configurations d'essai ont été testées. En effet, les matériaux, les épaisseurs, les séquences de drapages ainsi que les vitesses d'impact ont été variées. La liste de toutes les configurations testées est donnée dans le Tableau 1

Specimen	Material	Stacking sequence	Thickness	Velocity
S1	T700/M21	$[0_2, 90_2, 0_2]$	1.44 mm	$2 m.s^{-1}$
S2	T700/M21	$[90_2, 0_2, 90_2]$	1.44 mm	$2 m.s^{-1}$
S3	T700/M21	$[0_2, 45_2, 0_2]$	1.44 mm	$2 m.s^{-1}$
S4	T700/M21	$[90_2, 45_2, 90_2]$	1.44 mm	$2 m.s^{-1}$
S5	T700/M21	$[0_2, 90_2, 0_2, 90_2, 0_2]$	2.4 mm	$2 m.s^{-1}$
S6	T700/M21	$[0_2, 90_2, 0_2, 90_2, 0_2]$	2.4 mm	$3 m.s^{-1}$
S7	T700/M21	$[90_2, 0_2, 90_2, 0_2, 90_2]$	2.4 mm	$2 m.s^{-1}$
S8	T700/M21	$[90_2, 0_2, 90_2, 0_2, 90_2]$	2.4 mm	$3 m.s^{-1}$
S9	HTA7/913	$[0_2, 90_2, 0_2]$	1.44 mm	$2 m.s^{-1}$
S10	HTA7/913	$[0_2, 90_2, 0_2, 90_2, 0_2]$	2.4 mm	$2 m.s^{-1}$

Tab. 1. Liste des configurations testées.

3.2 Description du modèle

Ces essais sont modélisés en utilisant la stratégie semi-continue décrite précédemment. Le logiciel utilisé est Radioss (explicite). La taille de maille est de 1mm. L'impacteur et le cadre sont modélisés en utilisant des surfaces rigides. Les contacts entre l'impacteur et le stratifié, entre le cadre et le stratifié, ainsi qu'entre les plis, sont pris en compte. Le temps de calcul est de 20 minutes sur 120 cœurs du supercalculateur CALMIP.

3.3 Resultats et discussions

Dans un but de clarté et de concision, nous ne présentons ici les résultats que d'une partie des configurations étudiées. Les configurations choisies permettent néanmoins de balayer tous les paramètres que nous voulions étudier. De plus, les erreurs relatives pour l'effort maximum, le déplacement maximum et la taille maximale de délaminage sont données dans le Tableau 2 pour toutes les configurations étudiées.

Specimen	F_{\max}	u_{\max}	Ld_{\max}
S1	0.2 %	0.9 %	16.2 %
S2	7.3 %	1.3 %	15.4 %
S3	1 %	1.6 %	11.4 %
S4	5.4 %	7.6 %	16.1 %
S5	1.7 %	2.3 %	8.3 %
S6	5.9 %	10.2 %	2.2 %
S7	2.8 %	0.3 %	12 %
S8	7.3 %	5.2 %	14.3 %
S9	6.8 %	1 %	13 %
S10	6.8 %	4.5 %	5.6 %

Tab 2. Ecart relatif entre mesures expérimentales et résultats numériques pour les 10 configurations étudiées.

Les courbes force/déplacement expérimentales et numériques pour les configurations S1, S3, S6 et S10 sont données Figure 4. On observe une bonne corrélation entre expérimental et numérique. De plus, les erreurs maximales relevées sur l'ensemble des configurations sont inférieures à 7.3% pour l'effort maximal et à 10.2% pour le déplacement maximal.

Les dommages intra et interlaminaires calculés et mesurés par tomographie sont données pour la configuration S3 (Figure 5) et S6 (Figure 6), ce qui correspond à deux épaisseurs et deux vitesses d'impact différentes.

Les dommages observés expérimentalement sont bien représentés par le calcul. La stratégie proposée est capable de reproduire les formes typiques de délaminage ainsi que sa taille. Les fissures longitudinales à l'intérieur des plis sont aussi bien représentées. L'erreur relative sur la taille du délaminage est inférieure à 16.2%.

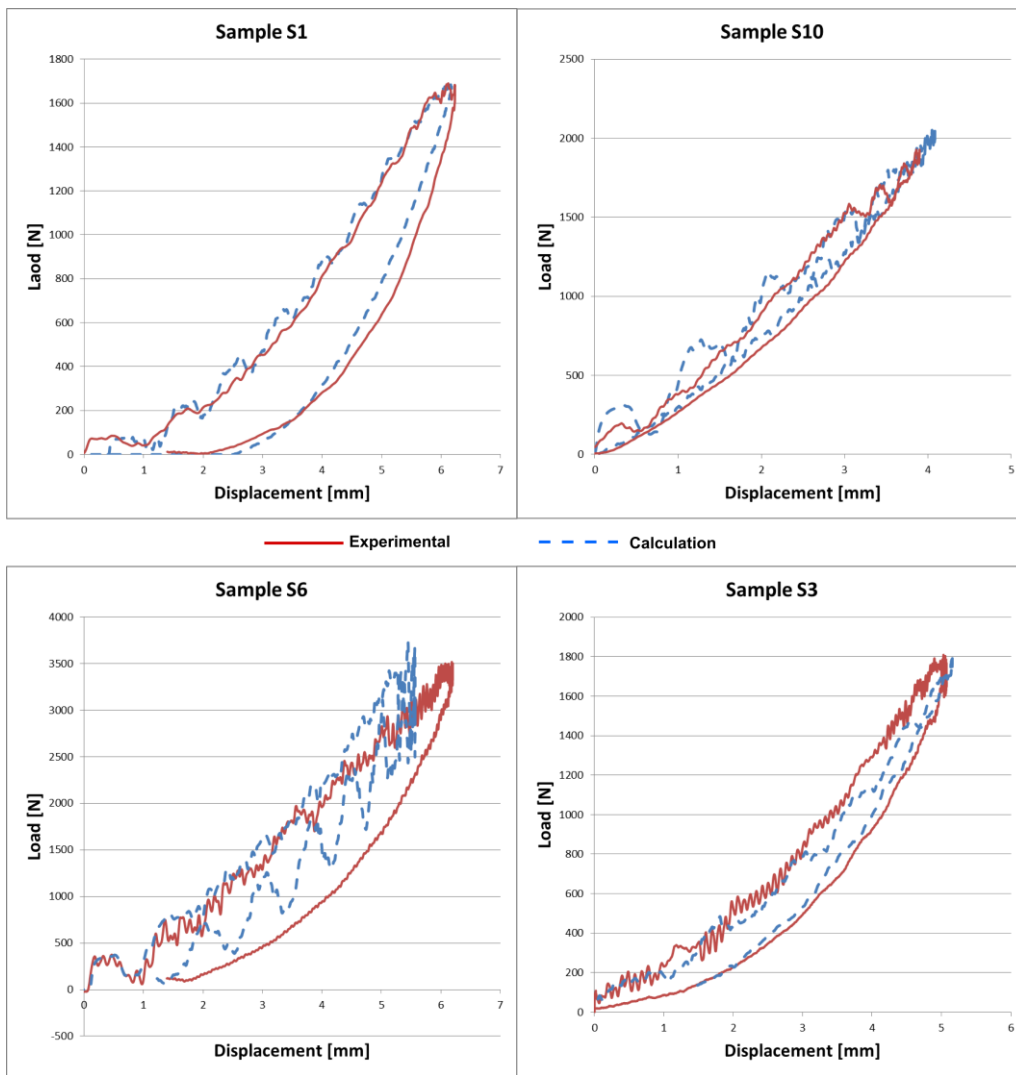


Fig. 4. Courbes force/déplacement expérimental et numérique pour les configurations S1, S3, S6 et S10.

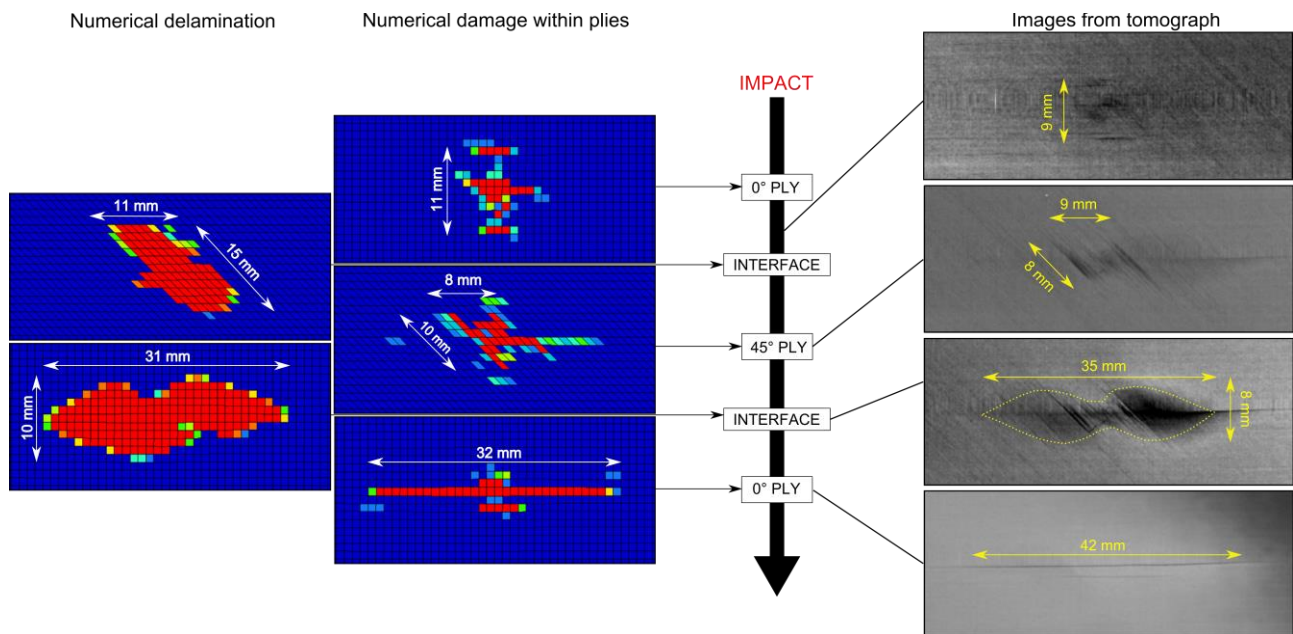


Fig 5. Endommagements expérimentaux et numériques pour la configuration S3

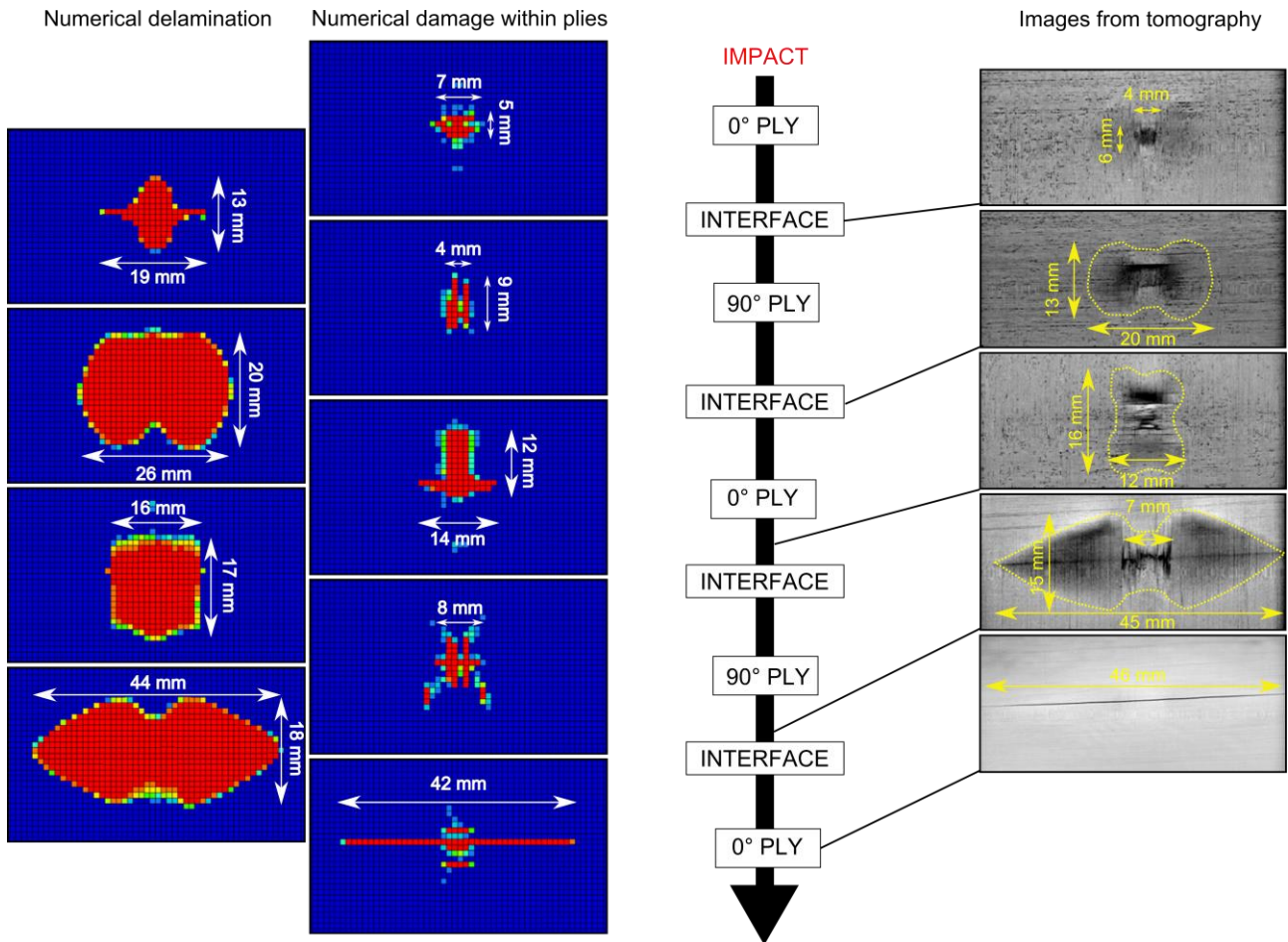


Fig 6. Endommagements expérimentaux et numériques pour la configuration S6

4. Conclusion.

Cet article présente une approche semi-continue pour représenter les dommages liés à l'impact qui apparaissent dans les stratifiés unidirectionnels. La stratégie est validée en comparant les résultats numériques à des mesures effectuées lors d'impact au poids tombant.

Remerciements

Les auteurs remercient le mesocentre de calcul CALMIP pour leur avoir permis d'accéder aux ressources dans le cadre du projet 2015-P09105.

Références

- [1] S. Abrate, "Impact on composite structures", *Cambridge University Press*, 1998.
- [2] G. Davies, R. Olsson, "Impact on composite structures", *Aeronautical Journal* 108 (1089) (2004) 541-563.
- [3] Z. Hashin, "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", *Journal of Applied Mechanics* 47 (2) (1980) 329.
- [4] F.-K. Chang, K.-Y. Chang, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations", *Journal of Composite Materials* 21 (9) (1987) 834-855.
- [5] J. Whitney, R. Nuismer, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations", *Journal of Composite Materials* 8 (3) (1974) 253-265.
- [6] M. de Moura, J. Gonalves, "Modelling the interaction between matrix cracking and delamination in carbon epoxy laminates under low velocity impact", *Composites Science and Technology* 64 (7-8) (2004) 1021-1027.
- [7] P. Ladeveze, G. Lubineau, "An enhanced mesomodel for laminates based on micromechanics", *Composites Science and Technology* 62 (4) (2002) 533-541.
- [8] O. Allix, L. Blanchard, "Mesomodeling of delamination: towards industrial applications", *Composites Science and Technology* 66 (6) (2006) 731-744.

- [9] M. Wisnom, “Modelling discrete failures in composites with interface elements”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41 (7) (2010) 795-805.
- [10] S. Abrate, J. F. Ferrero, P. Navarro, “Cohesive zone models and impact damage predictions for composite structures”, *Meccanica* 50 (10) (2015) 2587-2620.
- [11] Y. Shi, C. Pinna, C. Soutis, “Modelling impact damage in composite laminates: A simulation of intra- and inter-laminar cracking”, *Composite Structures* 114 (2014) 10{19.
- [12] C. Bouvet, B. Castani, M. Bizeul, J.-J. Barrau, “Low velocity impact modelling in laminate composite panels with discrete interface elements”, *International Journal of Solids and Structures* 46 (1415) (2009)
- [13] P. Navarro, J. Aubry, S. Marguet, J.-F. Ferrero, S. Lemaire, P. Rauch, “Semi-continuous approach for the modeling of thin woven composite panels applied to oblique impacts on helicopter blades”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43 (6) (2012) 871-879.
- [14] P. Navarro, F. Pascal, J. Aubry, S. Marguet, J. F. Ferrero, S. Lemaire, P. Rauch, “Semi-continuous approach for the study of impacts on woven composite laminates: Modeling interlaminar behavior with a specific interface element”, *International Journal of Impact Engineering* 75 (2015) 184-193.
- [15] F. Pascal, P. Navarro, S. Marguet, J.-F. Ferrero, “On the modelling of low to medium velocity impact onto woven composite materials with a 2d semi-continuous approach”, *Composite Structures* 134 (2015)