

Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/10151

To cite this version :

Yann DUPLESSIS KERGOMARD, Sebastian HEIMBS, Frédéric DAU - Choc mou basse énergie sur composite interlock 3X: approche expérimentale et numérique - Matériaux & Techniques - Vol. 100, n°6-7, p.11p. - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Choc mou basse énergie sur composite interlock 3X : approche expérimentale et numérique

Y. Duplessis Kergomard¹, F. Dau¹ et S. Heimbs²

¹ Institut de Mécanique et Ingénierie de Bordeaux (I2M), Département DUrabilité Matériaux Assemblages Structures (DUMAS), site Arts et Métiers ParisTech (AMP), esplanade des arts et métiers, 33405 Talence Cedex, France e-mail : frederic.dau@ensam.eu; dkyann@hotmail.com

² EADS Innovation Works, 81663, Munich, Germany e-mail : sebastian.heimbs@eads.net

Mots-clés :

Endommagements ; choc mou ; composite 3D ; expérimental ; numérique **Résumé** – Dans ce travail, on s'intéresse aux mécanismes d'endommagement qui apparaissent lors d'un choc mou entre un impacteur déformable en caoutchouc et une plaque composite tissée 3D (interlock 3X). Des impacts basses énergies sont réalisés à l'aide d'une tour de chute. L'impacteur en caoutchouc est de forme hémisphérique. La cible, obtenue par procédé RTM, est en fibre de carbone et résine RTM 6. Plusieurs impacteurs de différentes dureté et de différents diamètres d'une part, et des tissus avec différents degrés de renfort 3D d'autre part, sont disponibles pour cette étude pour permettre une analyse de variabilité ultérieure. Dans ce papier, les résultats obtenus avec un impacteur de diamètre 40 mm sont présentés. L'accent est mis à la fois sur les moyens expérimentaux employés pour l'analyse des endommagements (Analyse par stéréo-corrélation d'images, Thermographie IR, Micrographie) et sur les développements numériques menés en parallèle (FEM) avec le logiciel Abaqus. Contrairement aux composites stratifiés UD, la notion de délaminage n'est plus appropriée pour ce type de composite tissé 3D. Des décohésions et ruptures de torons ainsi que des fissurations matricielles sont majoritairement identifiées.

Key words:

Damage; soft impact; 3D composite; experimental; numerical **Abstract – Low energy soft impact on interlock3X composite: experimental and numerical approach.** Analyzing damage mechanisms when a deformable impactor is impacting a reinforced 3D woven composite (interlock 3X) is aimed in this work. Low energy impacts are considered in this soft shock configuration using a drop test tower. Materials involved in this study are hemispherical rubber impactors and carbon fibers in RTM 6 resin for the composite target plate. Elastomer impactors with different hardness and diameters and composite plates with different degrees of reinforcement in the thickness are available for this study so that the influence of impact conditions (mass, hardness, diameters, 3D reinforcement, ...) on the damage mechanisms could be assessed. The focus of the impact tests presented in this paper will be on the 40 mm impactor. The experimental measurements and analysis (Digital Image Correlation, IR thermography, micrography) as the numerical FEM investigations are particularly highlighted in this paper. In contrast to regular unidirectional composite laminates, no delaminations occur in such a 3D textile composite. Yarn decohesions, matrix craks and yarn ruptures are identified as the major damage mechanisms.

ous présentons dans ce papier une 1 partie des résultats obtenus lors 2 du projet ANR VULnérabilité des 3 COMPosites dont le principal objectif était 4 5 d'améliorer la description physique des mécanismes d'endommagement des matériaux 6 composites et leur modélisation dans le 7 cas de sollicitations dynamiques extrêmes. 8 9 Dans le cadre de ce projet, le laboratoire

I2M/DUMAS (ex LAMEFIP) a conçu, déve-10 loppé et mis au point des essais expéri-11 mentaux adaptés devant permettre la géné-12 ration d'endommagements dans le cas de 13 chocs « mous » : impacteur élastomère (de 14 type caoutchouc) sur plaque composite in-15 terlock 3X. Une approche numérique simpli-16 fiée, présentée lors des JNC16 [1] à Toulouse, 17 a d'abord été mise en oeuvre pour détermi-18

ner les dimensions des éprouvettes et des 1 conditions aux limites les mieux appropriées 2 pour révéler les endommagements. Elle a 3 ainsi permis de concevoir des montages spé-4 cifiques pour la mise en évidence de ces en-5 dommagements [2]. Des campagnes d'essais 6 mettant en oeuvre une métrologie ainsi que 7 des moyens d'observation et d'analyses spé-8 cifiques ont alors pu être menées, en colla-9 boration avec les différents partenaires du 10 projet, avec comme objectifs : 11 d'analyser les endommagements post-12

impact à l'aide d'analyses micrographiques et de mesures par thermographies IR (*collaboration avec la cellule de transfert techno THERMICAR et l'I2M/TREFLE*);

- d'identifier les modèles de comportement et de réaliser des simulations du
choc mou (*collaboration avec Airbus*);

- de valider des développements de la mé thode de reconstruction de champs par
 corrélation d'images (collaboration étroite
 avec le laboratoire LMT Cachan et la société

25 *Holo3*).

26 Des résultats d'essais réalisés dans cette 27 campagne comparés à des simulations nu-28 mériques font principalement l'objet de la 29 présentation qui suit. Les aspects thermo-30 graphie et reconstruction de champs par cor-31 rélation d'images n'y sont pas développés 32 pour des raisons de place.

33 1 Matériaux

34 1.1 Impacteur déformable

L'impacteur est en caoutchouc de type 35 Styrene-Butadiene-styrene (SBS), utilisé 36 pour la fabrication des pneus et des se-37 melles de chaussures. Différents impacteurs 38 ont été fabriqués, par la société SMAC à 39 Toulon, avec différentes duretés shore A 40 (SHA) : 40, 60, et 80 et avec des géométries 41 42 hémisphériques de différents diamètres : 40 mm, 70 mm et 100 mm. Ces impac-43 teurs ont été élaborés en contrôlant leur 44 formulation chimique pour privilégier un 45 comportement élastique plutôt qu'amor-46 tissant. Pour chaque impacteur, figure 1a, 47 l'adhésion à un cylindre en acier de 22 mm 48 est assurée lors du processus de fabrica-49 tion. Ce cylindre est vissé sur une partie 50

mécanique comprenant une rondelle de 51 force piézoélectrique, elle-même fixée sur le 52 chariot de la tour de chute. Pour le travail 53 présenté dans cet article, l'impacteur de 54 diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA est 55 utilisé. 56

57

77

78

94

1.2 Cible interlock 3X

Les éprouvettes testées sont en composite 58 tissé 3D de type interlock 3X dont la struc-59 ture est schématisée figure 2. La structure du 60 tissu est composée de torons chaînes droits, 61 de torons déviés (torons 3D) et de torons 62 trames. Trois différentes structures tissées 63 ont été fabriquées, en faisant varier le pour-64 centage de torons chaînes 3D par rapport 65 aux torons chaînes droits : 30 %, 55 % et 66 100 % associés à différents degrés de ren-67 fort dans l'épaisseur. Ces composites seront 68 nommés par la suite I30, I55 et I100 lorsque 69 nécessaire. 70

Des plaques composites de 500×500 mm² 71 ont été élaborées par procédé RTM. La résine 72 utilisée est de type RTM 6. Elle a été injectée à 73 120 °C et polymérisée à 160 °C. Ces plaques 74 ont une épaisseur de 2,7 mm alors que les 75 tissus secs ont une épaisseur de 10 mm. 76

2 Essais d'impact

2.1 Montage

Les essais sont réalisés sur la tour de 79 chute du laboratoire I2M/DUMAS, figure 1b. 80 L'énergie incidente de l'impact est imposée 81 par la hauteur de chute (qui conditionne la 82 vitesse) et la masse du poids tombant; ce 83 dernier étant composé de l'impacteur et du 84 chariot. La masse du poids tombant est de 85 5,3 Kg. Cinq hauteurs de chutes croissantes 86 sont retenues : 1 m, 1,25 m, 1,5 m, 1,75 m 87 et 2 m. Les énergies incidentes correspon-88 dantes varient alors de 52 J à 104 J. 89

Les éprouvettes testées ont une dimension de $100 \times 100 \times 2,7$ mm³. Elles sont encastrées sur un pourtour circulaire de diamètre 70 mm. 93

2.2 Mesures

La force et le déplacement du chariot sont 95 mesurés au cours du temps à l'aide, respec-96



Fig. 1. (a) Impacteur. (b) Tour de chute instrumentée. Fig. 1. (a) Impactor. (b) Instrumented drop test tower.



Fig. 2. Tissus interlock 3X. Fig. 2. Interlock 3X fabric.

- tivement, d'une rondelle de force placée der-1
- rière l'impacteur (capteur piezoélectrique) et 2
- d'un capteur laser de déplacement. L'aire 3
- maximale de contact entre l'impacteur et sa 4
- cible est évaluée en relevant l'empreinte ob-5
- tenue à l'aide d'un papier collé sur l'éprou-6
- 7 vette et de craie bleue appliquée sur l'impac-
- teur. Un exemple d'empreinte est montré sur 8
- la figure 3. 9

2.3 Vidéos rapides 10 et stéréo-corrélation 11

- Deux caméras rapides, une PHOTRON APX 12 RS et une PHOTRON SA3, permettent de 13 filmer l'évolution des endommagements dé-14
- bouchant sur la face arrière de l'éprouvette 15 ainsi que la déformation de l'impacteur 16 durant l'impact. Les vitesses d'acquisition 17 sont de 8400 images/s pour la PHOTRON 18 APX RS et de 6000 images/s pour la PHO-19
- TRON SA3. L'encombrement disponible 20
- entre l'éprouvette et le massif étant réduit, 21
- un (ou deux miroirs) orienté(s) à 45° est 22



Fig. 3. Exemple d'empreinte relevée. Fig. 3. Example of chalk print.

(sont) placé(s) entre les deux, permettant de 23 renvoyer l'image de la face arrière du com-24 posite vers la caméra PHOTRON APX RS, 25 figure 1b.

Les images obtenues par cette caméra 27 PHOTRON APX RS seront aussi utilisées 28 pour faire de la reconstruction de champs 29 par stéréo-corrélation d'images. Cette tech-30 nique permet de suivre le champ de dépla-31

26

1 cement tridimensionnel de la face arrière

2 du composite. Son principe est présentée3 dans [3]. Elle nécessite d'avoir deux points

de vues différents de la surface observée. Ces

5 deux points de vue sont ici obtenus à l'aide

6 deux miroirs faisant entre eux un angle de

7 150° environ et montés sur un même support

8 fixé au massif, et incliné à 45° par rapport au

9 plan du composite.

10 2.4 Contrôles

Des contrôles non destructifs des différentes 11 éprouvettes testées sont effectués avant et 12 après essais par thermographie IR. La tech-13 nique employée est celle dite du flash ar-14 rière [9]. Elle consiste à exciter thermique-15 ment la face avant de l'échantillon impacté et 16 à mesurer, à l'aide d'un capteur infrarouge la 17 réponse en température sur la face arrière. Le 18 thermogramme obtenu permet de remonter 19 à la diffusivité [10]. La présence d'endomma-20 gements est alors révélée par la cartographie 21 de diffusivité, figure 4. 22 23 Fort des informations fournies par ces 24 cartographies, les éprouvettes sont ensuite découpées, selon les directions chaînes et les 25 directions trames comme indiqué sur la fi-26 gure 5, pour observer la nature des endom-27

magements à l'aide d'un microscope op-tique.

30 3 Modélisation numérique

Dans le cadre de cette étude, les modèles 31 numériques pour simuler les essais d'im-32 pact précédents sont mis en œuvre à l'aide 33 du code de calculs par éléments finis Aba-34 qus/Explicit 6.10. Contrairement aux modé-35 lisations d'impact avec des impacteurs ri-36 gides, il est nécessaire ici de prendre en 37 compte la déformabilité de la cible mais éga-38 lement celle, plus importante, de l'impacteur 39 et leurs interactions. 40

41 3.1 Comportement

42 De l'impacteur en caoutchouc

43 La loi de comportement hyperélastique de

- 44 Mooney-Rivlin [4, 5], couramment utilisée
- 45 pour modéliser le comportement de caou-
- 46 tchoucs dans des études aéronautiques ou

automobiles en particulier, est retenue ici. 47 Le modèle de Mooney-Rivlin est basé sur un 48 potentiel énergétique composé d'une partie déviatorique et d'une partie hydrostatique, décrit, pour les matériaux incompressibles, par l'équation (1). 52

$$U = C_{10} \left(\bar{I}_1 - 3 \right) + C_{01} \left(\bar{I}_2 - 3 \right) \tag{1}$$

où les paramètres C_{10} et C_{01} dépendent de 53 la température. I_1 et I_2 désignent les premier 54 et second invariants du tenseur des déformations. Cette loi implémentée dans Abaqus/Explicit est utilisée ici. 57

Les paramètres C₁₀ et C₀₁ sont identi-58 fiés à partir d'essais de compression quasi-59 statiques de l'impacteur décrit dans [6]. 60 Après identification, on obtient : C_{01} = 61 0,35 MPa pour une dureté de 40 SHA, C_{01} = 62 0,90 Mpa pour une dureté de 60 SHA et 63 $C_{01} = 2$ Mpa pour 80 SHA. Dans tous les 64 cas, le paramètre C_{10} a été posé égal à 0. 65

Le modèle éléments finis est construit 66 avec des éléments solides C3D8R. Une dimension de maille de 3 mm a été sélectionnée à la suite d'une étude convergence, pour 69 des tailles d'éléments allant de 1 à 10 mm. 70

Ce modèle, identifié en statique grâce 71 à des essais d'impact sur plaque alumi-72 nium dont le comportement est parfaite-73 ment connu, a été ensuite validé en dyna-74 mique [6]. 75

De la cible composite

76

Le matériau modélisé est le I55 (interlock 3X 77 55 %). Pour cette première étape de modé-78 lisation, il est modélisé à l'échelle macro-79 scopique en le considérant comme un maté-80 riau homogène. Une loi de comportement de 81 type Ladevèze a été sélectionnée. Construite 82 au départ pour des matériaux composites 83 stratifiés UD [7], elle a été étendue aux com-84 posites tissés par Johnson et Simon [8] et 85 implémentée dans le logiciel de calcul Aba-86 qus/Explicit en tant que subroutine VUMAT. 87

3.2 Maillage, chargement 88 et conditions aux limites 89

La plaque composite de dimension 100 mm 90 × 100 mm × 2,7 mm a été maillée avec des 91 éléments coques S4R de taille caractéristique 92



Fig. 4. Carte de diffusivité obtenue par thermographie. *Fig. 4. Map of diffusivity issued from thermography method.*



Fig. 5. Micrographies après impact de 100 J sur une plaque composite interlock 3X 55 %. *Fig. 5. Micrographies coming from interlock 3X 55% fabric after a 100J impact.*

de 2 mm, avec contrôle de l'énergie d'hour-1 glass. Tous les nœuds du bord circulaire de 2 diamètre 70 mm ont été bloqués selon la di-3 rection z de l'impact. Au delà de cette cir-4 5 conférence, tous les noeuds ont été bloqués dans les 3 directions x, y et z, pour représen-6 ter au mieux les conditions expérimentales. 7 La gravité ainsi qu'une vitesse initiale ont 8 été introduites pour l'impacteur. Cinq éner-9 gies incidentes d'impact ont été considérées : 10 50 J, 63 J, 75 J, 88 J and 100 J associées à des 11 hauteurs de chute variant de 1 à 2 m. 12 13 Le temps simulé est de 10 ms conduisant à un temps CPU de 30 mn par simulation. 14

15 4 Résultats

16 4.1 Résultats expérimentaux

17 Analyse des endommagements

18 de la cible 155

Pour des énergies incidentes de l'ordre de50 J, aucun endommagement n'est révélé

dans la réponse globale, figure 6. Cela se 21 traduit par des courbes de réponse plu-22 tôt lisses; il n'y a pas les fortes oscilla-23 tions au début du contact qui sont habi-24 tuellement observées lors d'essais d'impact 25 avec des impacteurs rigides. En revanche, 26 pour des énergies incidentes de l'ordre de 27 100 J, des oscillations apparaissent au som-28 met de la courbe traduisant le développe-29 ment d'endommagements. Leur amplitude, 30 à un instant *t* donné, dépend de la nature et 31 de l'ampleur des endommagements déve-32 loppés. Les cartes de diffusivité thermique, 33 obtenues à l'issue de mesures thermogra-34 phiques montrent un début d'endommage-35 ment à partir d'une énergie de l'ordre de 80 J, 36 figure 7; celui-ci devenant significatif pour 37 une énergie de 100 J. Toutefois, les échan-38 tillons ne sont pas perforés pour ces niveaux 39 d'énergies avec les conditions aux limites ap-40 pliquées (échantillon encastré sur le pour-41 tour circulaire de diamètre 70 mm). 42 \oplus



Fig. 6. (a) Courbes de force en fonction du temps. (b) Déplacement du chariot, obtenues lors d'essais sur plaques composites interlock 3X 55 % et 100 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et dureté 60 SHA.

Fig. 6. (a) Force versus time curve. (b) Carriage displacement versus time concerning interlock 3X 55% and 100% fabrics with rubber impactor of 40 mm diameter and 60 SHA hardness.



Fig. 7. Cartes de diffusivité obtenues par thermographie. *Fig. 7. Map of diffusivity issued from thermography method.*

Les analyses micrographiques, figure 5, 1 2 montrent que les endommagements observés sont des décohésions de torons, des 3 fissures apparaissant dans les zones inter-4 torons riche en résine et des fissures intra-5 torons. Deux zones d'endommagement se 6 7 distinguent en particulier : l'une sous la surface de contact impacteur/cible et l'autre au 8 voisinage des conditions aux limites encas-9 trées ici. Sous la zone de contact impac-10 teur/cible, il n'y a pas de cône d'endom-11 magement habituellement observé dans les 12 impacts sur composites stratifiés UD avec 13 des impacteurs rigides. Du fait de sa grande 14 déformabilité, la force d'impact se répar-15 tie sur une surface de contact importante; 16 de ce fait, il n'y a pas de concentration 17 18 de contraintes en cisaillement au voisinage 19 de l'impacteur. Ici, les contraintes influentes sont les contraintes de traction justifiant l'ap-20 parition des endommagements majoritaire-21

ment dans la moitié inférieure du composite. 22 Au voisinage des conditions aux limites, les 23 endommagements apparaissent non seule-25 ment sur la moitié supérieure du compo-26 site qui est localement en traction (du fait 27 de la flexion locale du composite au voi-28 sinage de l'encastrement), mais également 29 sur toute l'épaisseur du fait du cisaillement 30 hors plan (transverse) important dans cette 31 zone. Ainsi sur la figure 5, une décohésion 32 importante d'un toron trame supérieur se 33 propage depuis le bord vers le centre, et in-34 versement, une décohésion importante d'un 35 toron trame se propage depuis le centre vers 36 les bords. La répartition des endommage-37 ments laisse penser que les zones de croise-38 ment de torons trames et chaînes sont des 39 zones privilégiées pour leur apparition. Ces 40 croisements créent des ondulations des to-41 rons et des zones de pincement entre torons 42 trames et chaines. Lors d'une mise en trac-43



Fig. 8. Déformation de l'impacteur caoutchouc lors d'un impact sur une plaque en aluminium. *Fig. 8. Crushing of rubber impactor on alloy plate.*

1 tion dans le sens chaîne, les torons chaînes

2 déviés dans l'épaisseur vont avoir tendance

3 à se réaligner suivant la direction de sollici-

4 tation et augmenter le pincement entre to-

5 rons chaînes et trames, favorisant ainsi des

6 concentrations de contraintes.

7 Analyse de la déformation

8 de l'impacteur

D'après la série de photos prises par caméra 9 rapide lors de l'impact sur plaque compo-10 site interlock I55, figure 8, la déformation 11 élastique de l'impacteur est très importante 12 13 réduisant d'autant l'énergie absorbée par la cible. La surface maximale de contact di-14 minue avec l'augmentation de la dureté de 15 l'impacteur. Le contour de cette surface de 16 17 contact est quasiment circulaire; son diamètre sera retenu comme indicateur à cor-18 réler ultérieurement à l'endommagement . 19 Pour l'impacteur de diamètre 40 mm et de 20 dureté 60 SHA, ce diamètre varie entre 46 et 21 49 mm pour une énergie incidente de 100 J. 22

23 4.2 Résultats numériques

24 Modèle de comportement

Dans un premier temps, des simulations 25 d'une éprouvette sollicitée en traction quasi-26 statique ont été réalisées afin de voir les li-27 mites du modèle de comportement de La-28 devèze utilisé ici. Comme en témoigne la 29 figure 9, les courbes montrent que pour 30 une déformation inférieure à 0,6 %, cor-31 32 respondant à la déformation élastique, les résultats expérimentaux et numériques se 33 superposent bien. Les résultats expérimen-34 taux dont il est question ici ont été réali-35 sés sur des éprouvettes de dimensions utiles 36 $300 \times 32 \times 2,7$ mm³ respectivement sollicitées 37 selon le sens chaîne (Fig. 9a), le sens trame 38 (Fig. 9b) et à 45° (Figs. 9c et 9d). Des essais 39 de cyclage ont été réalisés à 45° pour éta-40 blir la loi de comportement élasto-plastique 41 endommageable en cisaillement [6]. 42

Les résultats montrent que le modèle de 43 Ladevèze n'est pas adapté pour prendre en 44 compte l'évolution des endommagements 45 de l'interlock 3X 55 % en particulier dans les 46 directions chaînes et trame, figures 9a et 9b. 47 Malgré une bonne corrélation entre le mo-48 dèle et les résultats expérimentaux observée 49 jusqu'à une déformation de l'ordre de 0,6 % 50 correspondant au début de l'endommage-51 ment, le modèle et l'expérience divergent si-52 gnificativement au delà de cette valeur de 53 déformation. En l'état, il n'est pas capable 54 de prendre en compte l'effet de réalignement 55 des torons et l'effet encore plus particulier 56 des torons chaînes 3D sur l'évolution des en-57 dommagements. Des investigations supplé-58 mentaires consistant à réaliser des essais de 59 cyclage dans les directions chaîne et trame 60 pour mieux décrire la loi d'évolution de l'en-61 dommagement sont en cours. 62

Simulations dynamiques

63

Les clichés numériques de la figure 10. 64 rendent compte du comportement de l'impacteur et de la cible pendant la phase 66 de choc. Les courbes déplacement-temps 67



ŧ

 \oplus

 \oplus

Đ

 \oplus

 \oplus

 \oplus

Æ

Fig. 9. Numerical and experimental comparisons for interlock 3X 55% fabrics, (a) traction along the warp direction, (b) traction along the weft direction, (c) traction along 45° direction, (d) Cyclic traction along 45° direction.

Fig. 9. Comparaison des résultats expérimentaux de traction en quasi-static et des simulations pour l'interlock 3X 55 %, (a) traction dans la direction chaîne, (b) traction dans la direction trame, (c) traction à 45°, (d) essai de cyclage en traction à 45°.



Fig. 10. Simulation numérique du choc mou pour la cible composite en interlock I55. *Fig. 10. Numerical simulations of the soft impact concerning interlock I55 fabric.*



Fig. 11. Comparaison entre les résultats des essais expérimentaux et les simulations obtenus pour des impacts sur plaques interlock 3X 55 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA, (a) courbes force-temps, (b) courbes déplacement chariot-temps.

Fig. 11. Comparison between numerical and experimental results on interlock 3X 55% plate impacted by a 40 mm diameter and 60 SHA hardness rubber, (a) force versus time curve, (b) carriage displacement versus time curve.

simulées pour des énergies incidentes de 1 50 J et 100 J sont pratiquement superpo-2 sables à celles obtenues expérimentalement, 3 figure 11. Elles ont cependant tendance à lé-4 gèrement sous estimer le déplacement. En 5 revanche, pour ce qui est de l'évolution 6 force-temps, figure 10a, même si les allures 7 8 sont comparables, un écart significatif entre expérimental et numérique est observé. En 9 effet, le niveau de force prédit numérique-10 ment est largement surestimé, bien que, par 11 12 ailleurs, le temps de contact soit correctement restitué. Cette surestimation peut s'ex-13 pliquer par une rigidité trop importante de 14 la cible impactée. Au delà d'une déformation 15 de 0,6 %, figure 9, cette hypothèse est confor-16 tée par le fait que les courbes se confondent 17 au début et divergent lorsque la déforma-18 tion devient importante (au delà de 0,6 %). 19 Un modèle de comportement mieux adapté 20 serait donc nécessaire à ce niveau. 21

D'autres raisons comme l'insuffisance d'une modélisation plaque de l'impacteur pour rendre compte des modes d'endommagements complexes dans l'épaisseur, la validation du comportement de l'impacteur uniquement pour des déformations modérées ainsi que l'idéalisation des conditions aux limites par un encastrement peuvent 29 être avancées. 30

Une évaluation numérique de l'endom-31 magement généré dans la plaque composite 32 (cible) est proposée figure 12. Les valeurs des 33 paramètres d'endommagement en traction 34 et compression dans les directions chaînes 35 et trames ainsi qu'en cisaillement, au bout 36 de 10 ms, sont mentionnées. Ces valeurs va-37 rient entre 0 (pas d'endommagement) et 1 38 (niveau d'endommagement maximum). Des 39 tentatives de comparaison, purement quali-40 tative, avec les résultats des cartes de diffusi-41 vité obtenues par thermographie, montrent 42 l'existence de 2 zones d'endommagement 43 distinctes : une au voisinage de l'impacteur 44 et l'autre au voisinage de l'encastrement. Par 45 ailleurs, l'endommagement croît avec la vi-46 tesse d'impact. Pour les plus faibles vitesses 47 d'impact, aucun endommagement n'est ob-48 servé dans la direction chaine 1. 49

5 Conclusions

Cette phase 1 du projet aura donc permis i) la réalisation d'un montage spécifique et d'une métrologie adaptée pour la mise en évidence d'endommagements dans le cas d'un impact 54

50



Fig. 12. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques : répartition des endommagements. *Fig. 12. Damage distribution maps. Numerical and experimental results.*

- élastomère/composite interlock 3X ii) la fai-1 sabilité de suivi par vidéos rapides permet-2 tant la reconstruction de champs de dépla-3 cement visant l'identification future de lois 4 d'endommagements iii) le diagnostic des 5 endommagements par un moyen d'analyse 6 7 'simple' et efficace qu'est celui de la thermographie IR iv) la mise en évidence des 8 différentes natures d'endommagements de 9 l'interlock 3X par analyses micrographiques 10 v) la simulation numérique du choc mou. 11 La confrontation des premiers résultats 12 de simulations numériques aux résultats 13 d'essais expérimentaux a montré des résul-14 15 tats prometteurs malgré les écarts significatifs observés sur la prévision de la force 16 ntact. La prise en cor des raisons 17 avancées dans le Section 572 pour justifier 18 ces écarts devraient permettre d'améliorer 19 significativement les résultats. 20 Remerciements 21
- 22 Les auteurs tiennent à remercier le programme
- 23 Matériaux et Procédés de l'ANR pour son sou-

tien financier au projet VULCOMP-Phase 1 coordonné par EADS. 25

Références

26

 \oplus

- Y. Duplessis-Kergomard, F. Dau, L. 27
 Guillaumat, Analyse paramétrique d'un 28
 essai sur plaques stratifiées, propice à l'apparition du délaminage et de la fissuration 30
 intralaminaire, proceedings JNC16, 2009, 31
 Toulouse, France 32
- F. Dau, Y. Duplessis-Kergomard, Study on interlock 3X damage mechanisms under impact loading using a deformable impactor, in proceedings ICEM 14, 2010, Poitiers, France
- [3] J.N. Périé, H. Leclerc, S. Roux, F. Hild, Int. J. 37 Solids Struct. 46 (2009) 2388-2396
 38
- [4] M. Mooney, J. Appl. Phy. 11 (1940) 582-592 39
- [5] R.S. Rivlin, Philosophical Transactions of The Royal Society of London A240 (1948) 459-490
- [6] S. Heimbs, B. Van Den Broucke, Y. Duplessis
 Kergomard, F. Dau, Rubber Impact on
 3D Textile Composites, Applied Composite
 Materials, 2011

1	[7]	P. Ladeveze, A damage mesomodel of lami-	[9]	L. Guillaumat, J.C. Batsale, D. Mourand,	11
2		nate composites. In Handbook of Materials		Real time infrared image processing for	12
3		Behaviour Models, Section 10. 6, Publisher		the detection of delamination in composite	13
4		Academic Press, Editor Lemaitre, J., Vol. 3,		plates, Composites part A: 35, 2004, pp. 939-	14
5		2001, pp. 1004-1014		944	15
6	[8]	A.F. Johnson, J. Simon, Modelling fabric	[10]	D. Maillet, S. André, J.C. Batsale,	16
7		reinforced composites under impact loads,		A. Degiovanni, C. Moyne, Thermal	17
8		in Euromech 400 : Impact and Damage		quadrupoles- Solving the heat equation	18
9		Tolerance of Composite Materials and		through integral transforms- J. Wiley	19
10		Structures, London, 1999, pp. 27-29		Editeur-Chichester, 2000, 270 p.	20

 \oplus

 \oplus

 \oplus

Œ

 \oplus

 \bigoplus

 \oplus