



### **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](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



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

Y. Duplessis Kergomard<sup>1</sup>, F. Dau<sup>1</sup> et S. Heimbs<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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 duretés 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 cracks and yarn ruptures are identified as the major damage mechanisms.

1 Nous présentons dans ce papier une 10  
2 partie des résultats obtenus lors 11  
3 du projet ANR VULnérabilité des 12  
4 COMPosites dont le principal objectif était 13  
5 d'améliorer la description physique des mé- 14  
6 canismes d'endommagement des matériaux 15  
7 composites et leur modélisation dans le 16  
8 cas de sollicitations dynamiques extrêmes. 17  
9 Dans le cadre de ce projet, le laboratoire 18  
I2M/DUMAS (ex LAMEFIP) a conçu, déve-  
loppé et mis au point des essais expéri-  
mentaux adaptés devant permettre la géné-  
ration d'endommagements dans le cas de  
chocs « mous » : impacteur élastomère (de  
type caoutchouc) sur plaque composite in-  
terlock 3X. Une approche numérique simpli-  
fiée, présentée lors des JNC16 [1] à Toulouse,  
a d'abord été mise en oeuvre pour détermi-

1	ner les dimensions des éprouvettes et des	mécanique comprenant une rondelle de	51
2	conditions aux limites les mieux appropriées	force piézoélectrique, elle-même fixée sur le	52
3	pour révéler les endommagements. Elle a	chariot de la tour de chute. Pour le travail	53
4	ainsi permis de concevoir des montages spé-	présenté dans cet article, l'impacteur de	54
5	cifiques pour la mise en évidence de ces en-	diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA est	55
6	dommagements [2]. Des campagnes d'essais	utilisé.	56
7	mettant en oeuvre une métrologie ainsi que		
8	des moyens d'observation et d'analyses spé-		
9	cifiques ont alors pu être menées, en colla-		
10	boration avec les différents partenaires du		
11	projet, avec comme objectifs :		
12	– d'analyser les endommagements post-	<b>1.2 Cible interlock 3X</b>	57
13	impact à l'aide d'analyses microgra-	Les éprouvettes testées sont en composite	58
14	phiques et de mesures par thermo-	tissé 3D de type interlock 3X dont la struc-	59
15	graphies IR ( <i>collaboration avec la cellule</i>	ture est schématisée figure 2. La structure du	60
16	<i>de transfert techno THERMICAR et</i>	tissu est composée de torons chaînes droits,	61
17	<i>l'I2M/TREFLE</i> );	de torons déviés (torons 3D) et de torons	62
18	– d'identifier les modèles de comporte-	trames. Trois différentes structures tissées	63
19	ment et de réaliser des simulations du	ont été fabriquées, en faisant varier le pour-	64
20	choc mou ( <i>collaboration avec Airbus</i> );	centage de torons chaînes 3D par rapport	65
21	– de valider des développements de la mé-	aux torons chaînes droits : 30 %, 55 % et	66
22	thode de reconstruction de champs par	100 % associés à différents degrés de ren-	67
23	corrélation d'images ( <i>collaboration étroite</i>	fort dans l'épaisseur. Ces composites seront	68
24	<i>avec le laboratoire LMT Cachan et la société</i>	nommés par la suite I30, I55 et I100 lorsque	69
25	<i>Holo3</i> ).	nécessaire.	70
26	Des résultats d'essais réalisés dans cette	Des plaques composites de 500×500 mm <sup>2</sup>	71
27	campagne comparés à des simulations nu-	ont été élaborées par procédé RTM. La résine	72
28	mériques font principalement l'objet de la	utilisée est de type RTM 6. Elle a été injectée à	73
29	présentation qui suit. Les aspects thermo-	120 °C et polymérisée à 160 °C. Ces plaques	74
30	graphie et reconstruction de champs par cor-	ont une épaisseur de 2,7 mm alors que les	75
31	rélation d'images n'y sont pas développés	tissus secs ont une épaisseur de 10 mm.	76
32	pour des raisons de place.		
33	<b>1 Matériaux</b>	<b>2 Essais d'impact</b>	77
34	<b>1.1 Impacteur déformable</b>	<b>2.1 Montage</b>	78
35	L'impacteur est en caoutchouc de type	Les essais sont réalisés sur la tour de	79
36	Styrene-Butadiène-styrene (SBS), utilisé	chute du laboratoire I2M/DUMAS, figure 1b.	80
37	pour la fabrication des pneus et des se-	L'énergie incidente de l'impact est imposée	81
38	melles de chaussures. Différents impacteurs	par la hauteur de chute (qui conditionne la	82
39	ont été fabriqués, par la société SMAC à	vitesse) et la masse du poids tombant; ce	83
40	Toulon, avec différentes duretés shore A	dernier étant composé de l'impacteur et du	84
41	(SHA) : 40, 60, et 80 et avec des géométries	chariot. La masse du poids tombant est de	85
42	hémisphériques de différents diamètres :	5,3 Kg. Cinq hauteurs de chutes croissantes	86
43	40 mm, 70 mm et 100 mm. Ces impac-	sont retenues : 1 m, 1,25 m, 1,5 m, 1,75 m	87
44	teurs ont été élaborés en contrôlant leur	et 2 m. Les énergies incidentes correspon-	88
45	formulation chimique pour privilégier un	dantes varient alors de 52 J à 104 J.	89
46	comportement élastique plutôt qu'amor-	Les éprouvettes testées ont une dimen-	90
47	tissant. Pour chaque impacteur, figure 1a,	sion de 100×100×2,7 mm <sup>3</sup> . Elles sont encas-	91
48	l'adhésion à un cylindre en acier de 22 mm	trées sur un pourtour circulaire de diamètre	92
49	est assurée lors du processus de fabrica-	70 mm.	93
50	tion. Ce cylindre est vissé sur une partie	<b>2.2 Mesures</b>	94
		La force et le déplacement du chariot sont	95
		mesurés au cours du temps à l'aide, respec-	96

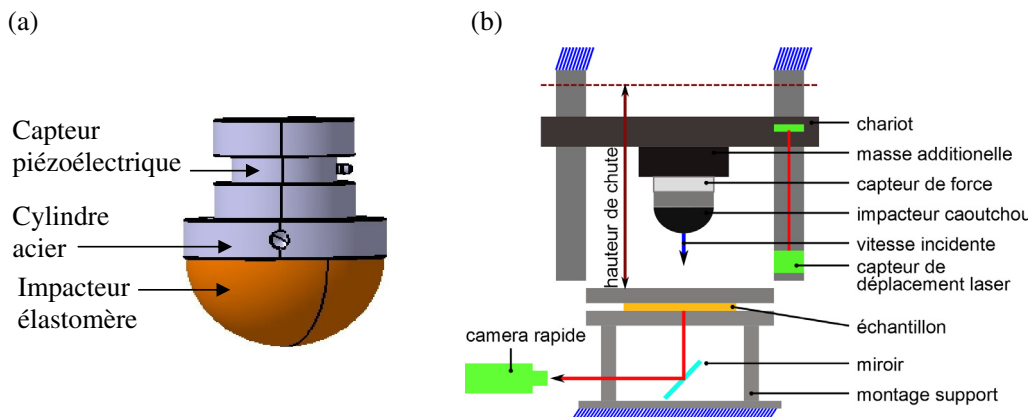


Fig. 1. (a) Impacteur. (b) Tour de chute instrumentée.

Fig. 1. (a) Impacteur. (b) Instrumented drop test tower.

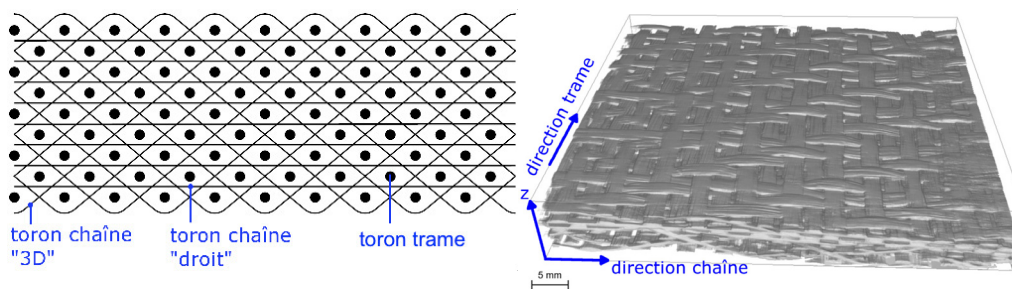


Fig. 2. Tissus interlock 3X.

Fig. 2. Interlock 3X fabric.

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

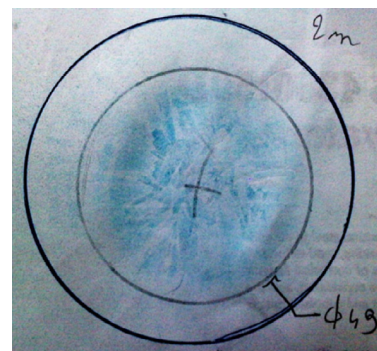


Fig. 3. Exemple d'empreinte relevée.

Fig. 3. Example of chalk print.

### 2.3 Vidéos rapides et stéréo-corrélation

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

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

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

23  
 24  
 25  
 26  
 27  
 28  
 29  
 30  
 31

1 ciment tridimensionnel de la face arrière  
 2 du composite. Son principe est présentée  
 3 dans [3]. Elle nécessite d'avoir deux points  
 4 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

11 Des contrôles non destructifs des différentes  
 12 éprouvettes testées sont effectués avant et  
 13 après essais par thermographie IR. La tech-  
 14 nique employée est celle dite du flash ar-  
 15 rière [9]. Elle consiste à exciter thermique-  
 16 ment la face avant de l'échantillon impacté et  
 17 à mesurer, à l'aide d'un capteur infrarouge la  
 18 réponse en température sur la face arrière. Le  
 19 thermogramme obtenu permet de remonter  
 20 à la diffusivité [10]. La présence d'endomma-  
 21 gements est alors révélée par la cartographie  
 22 de diffusivité, figure 4.

23 Fort des informations fournies par ces  
 24 cartographies, les éprouvettes sont ensuite  
 25 découpées, selon les directions chaînes et les  
 26 directions trames comme indiqué sur la fig-  
 27 ure 5, pour observer la nature des endom-  
 28 magements à l'aide d'un microscope op-  
 29 tique.

## 30 3 Modélisation numérique

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

### 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 49  
 déviatorique et d'une partie hydrostati- 50  
 que, décrit, pour les matériaux incompress- 51  
 sibles, par l'équation (1). 52

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

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 défor- 55  
 mations. Cette loi implémentée dans Aba- 56  
 quus/Explicit est utilisée ici. 57

Les paramètres  $C_{10}$  et  $C_{01}$  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 di- 67  
 mension de maille de 3 mm a été sélection- 68  
 née 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 quus/Explicit en tant que sous-routine VUMAT. 87

### 88 3.2 Maillage, chargement 89 et conditions aux limites

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

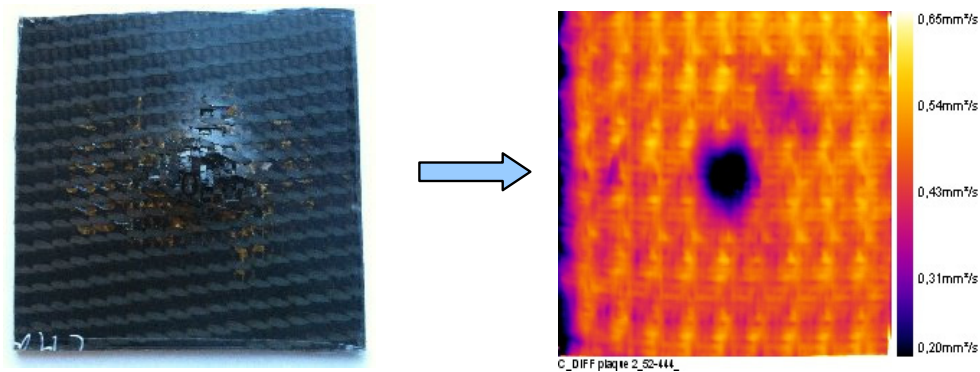


Fig. 4. Carte de diffusivité obtenue par thermographie.

Fig. 4. Map of diffusivity issued from thermography method.

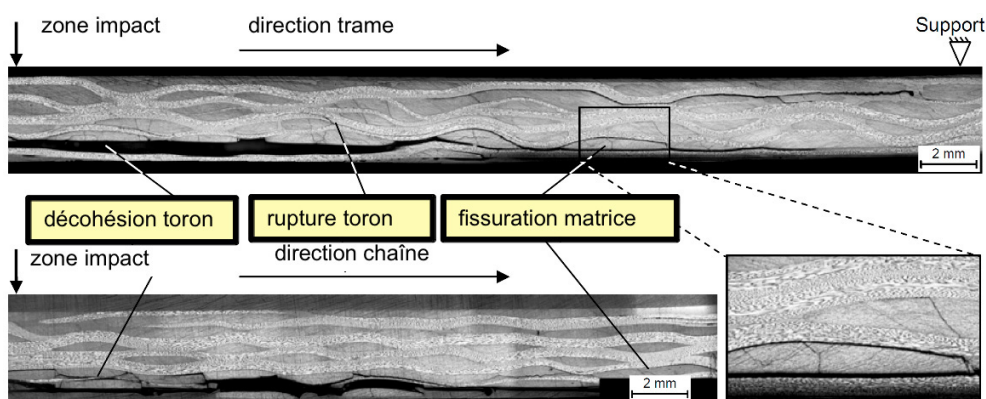


Fig. 5. Micrographies après impact de 100 J sur une plaque composite interlock 3X 55 %.

Fig. 5. Micrographies coming from interlock 3X 55% fabric after a 100J impact.

1 de 2 mm, avec contrôle de l'énergie d'hour- 21  
 2 glass. Tous les nœuds du bord circulaire de 22  
 3 diamètre 70 mm ont été bloqués selon la di- 23  
 4 rection  $z$  de l'impact. Au delà de cette cir- 24  
 5 conférence, tous les noeuds ont été bloqués 25  
 6 dans les 3 directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ , pour représen- 26  
 7 ter au mieux les conditions expérimentales. 27  
 8 La gravité ainsi qu'une vitesse initiale ont 28  
 9 été introduites pour l'impacteur. Cinq éner- 29  
 10 gies incidentes d'impact ont été considérées : 30  
 11 50 J, 63 J, 75 J, 88 J and 100 J associées à des 31  
 12 hauteurs de chute variant de 1 à 2 m. 32

13 Le temps simulé est de 10 ms conduisant 33  
 14 à un temps CPU de 30 mn par simulation. 34

## 15 4 Résultats

### 16 4.1 Résultats expérimentaux

#### 17 Analyse des endommagements 35 18 de la cible I55 36

19 Pour des énergies incidentes de l'ordre de 37  
 20 50 J, aucun endommagement n'est révélé 38  
 39  
 40  
 41  
 42

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

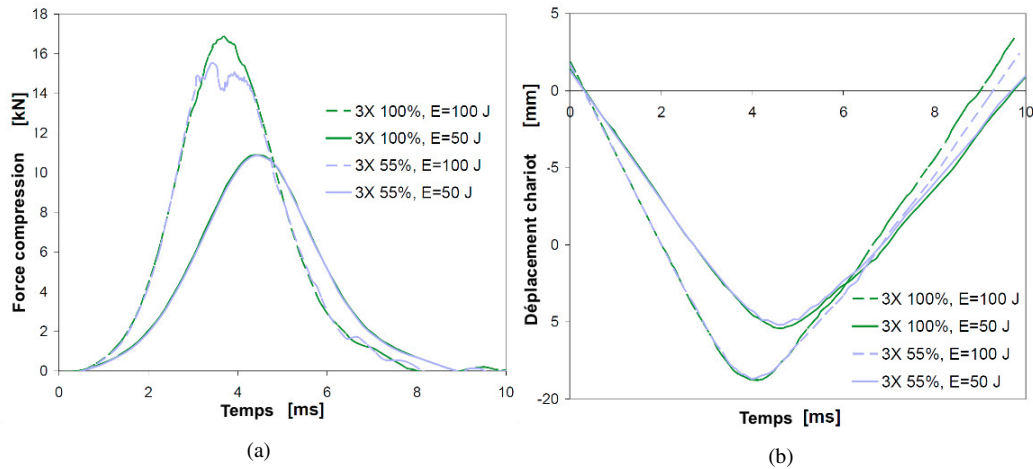


Fig. 6. (a) Courbes de force en fonction du temps. (b) Déplacement du chariot, obtenues lors d'essais sur plaques composites interlock 3X 55 % et 100 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et dureté 60 SHA.

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.

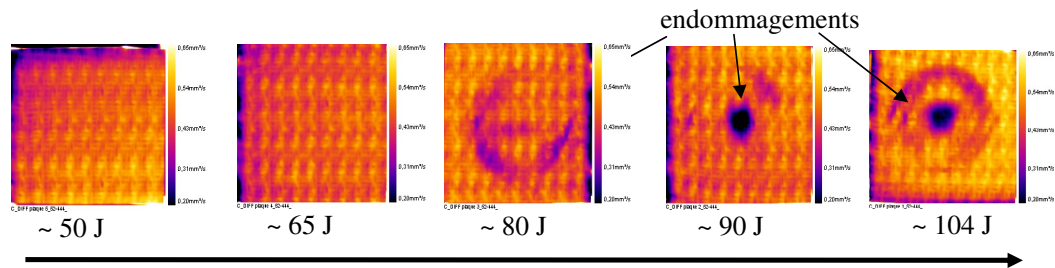


Fig. 7. Cartes de diffusivité obtenues par thermographie.

Fig. 7. Map of diffusivity issued from thermography method.

1 Les analyses micrographiques, figure 5, 22  
 2 montrent que les endommagements obser- 24  
 3 vés sont des décohésions de torons, des 25  
 4 fissures apparaissant dans les zones inter- 26  
 5 torons riche en résine et des fissures intra- 27  
 6 torons. Deux zones d'endommagement se 28  
 7 distinguent en particulier : l'une sous la sur- 29  
 8 face de contact impacteur/cible et l'autre au 30  
 9 voisinage des conditions aux limites encas- 31  
 10 trées ici. Sous la zone de contact impac- 32  
 11 teur/cible, il n'y a pas de cône d'endom- 33  
 12 magement habituellement observé dans les 34  
 13 impacts sur composites stratifiés UD avec 35  
 14 des impacteurs rigides. Du fait de sa grande 36  
 15 déformabilité, la force d'impact se répartie 37  
 16 sur une surface de contact importante ; 38  
 17 de ce fait, il n'y a pas de concentration 39  
 18 de contraintes en cisaillement au voisinage 40  
 19 de l'impacteur. Ici, les contraintes influentes 41  
 20 sont les contraintes de traction justifiant l'ap- 42  
 21 parition des endommagements majoritaire- 43  
 ment dans la moitié inférieure du composite.  
 Au voisinage des conditions aux limites, les  
 endommagements apparaissent non seule-  
 ment sur la moitié supérieure du compo-  
 site qui est localement en traction (du fait  
 de la flexion locale du composite au voi-  
 sinage de l'encastrement), mais également  
 sur toute l'épaisseur du fait du cisaillement  
 hors plan (transverse) important dans cette  
 zone. Ainsi sur la figure 5, une décohésion  
 importante d'un toron trame supérieur se  
 propage depuis le bord vers le centre, et in-  
 versement, une décohésion importante d'un  
 toron trame se propage depuis le centre vers  
 les bords. La répartition des endommage-  
 ments laisse penser que les zones de crois-  
 ement de torons trames et chaînes sont des  
 zones privilégiées pour leur apparition. Ces  
 croisements créent des ondulations des to-  
 rons et des zones de pincement entre torons  
 trames et chaînes. Lors d'une mise en trac-

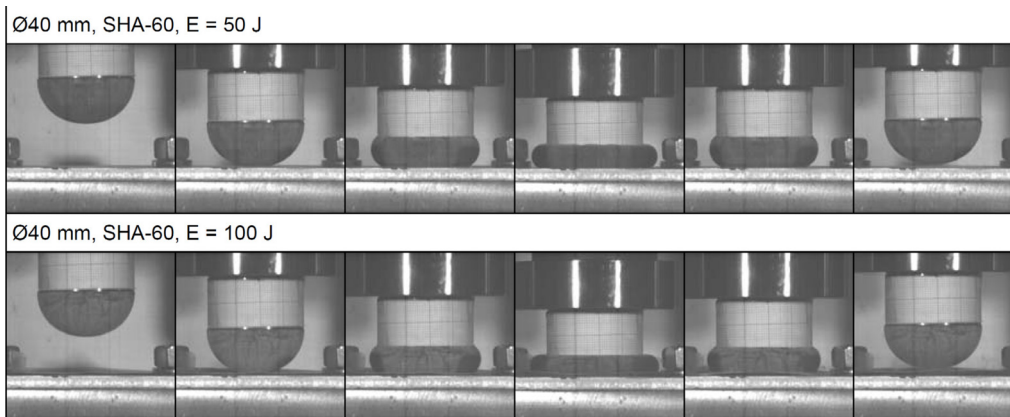


Fig. 8. Déformation de l'impacteur caoutchouc lors d'un impact sur une plaque en aluminium.

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**

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

## 23 **4.2 Résultats numériques**

### 24 **Modèle de comportement**

25 Dans un premier temps, des simulations  
26 d'une éprouvette sollicitée en traction quasi-  
27 statique ont été réalisées afin de voir les li-  
28 mites du modèle de comportement de La-  
29 devèze utilisé ici. Comme en témoigne la  
30 figure 9, les courbes montrent que pour  
31 une déformation inférieure à 0,6 %, cor-  
32 respondant à la déformation élastique, les

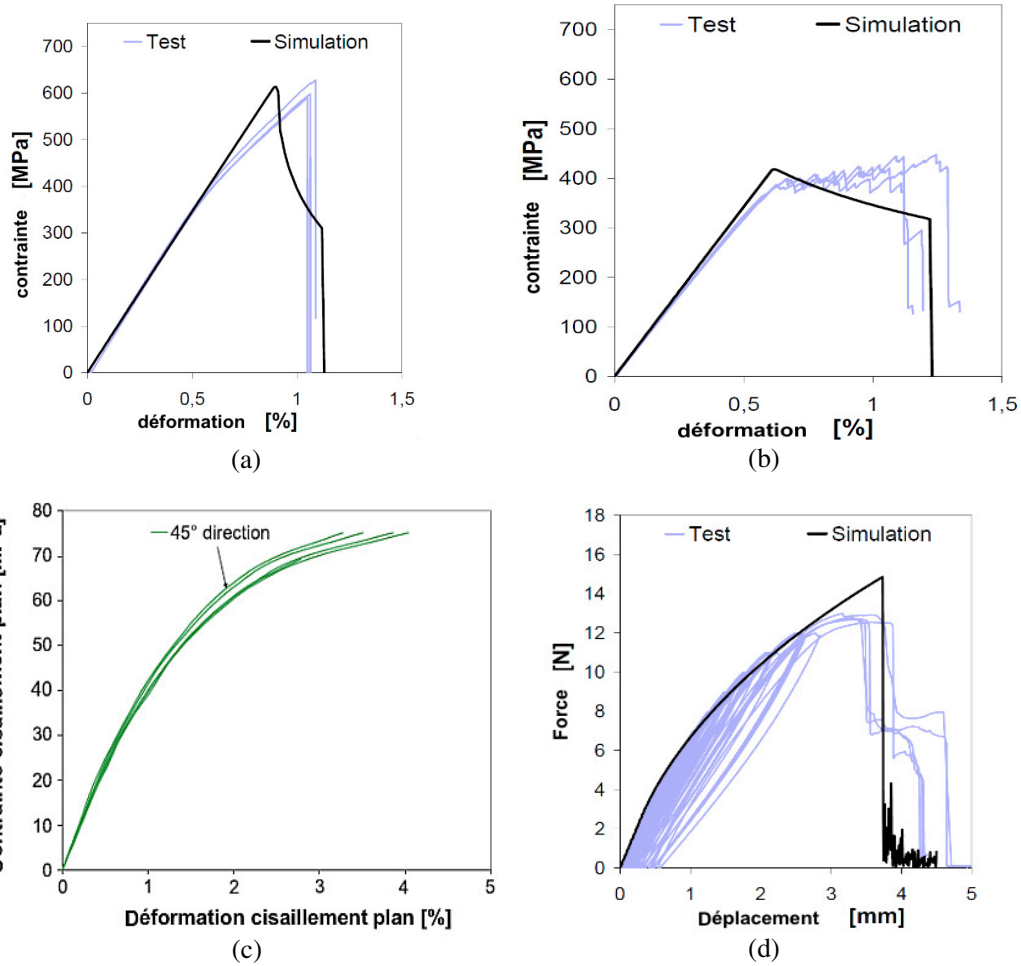
résultats expérimentaux et numériques se  
33 superposent bien. Les résultats experimen-  
34 taux dont il est question ici ont été réali-  
35 sés sur des éprouvettes de dimensions utiles  
36  $300 \times 32 \times 2,7 \text{ mm}^3$  respectivement sollici-  
37 tées selon le sens chaîne (Fig. 9a), le sens trame  
38 (Fig. 9b) et à  $45^\circ$  (Figs. 9c et 9d). Des essais  
39 de cyclage ont été réalisés à  $45^\circ$  pour éta-  
40 blir la loi de comportement élasto-plastique  
41 endommageable en cisaillement [6].  
42

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

### 63 **Simulations dynamiques**

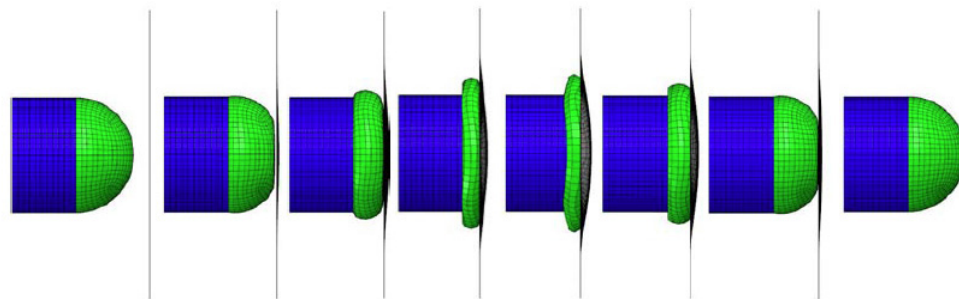
64 Les clichés numériques de la figure 10.  
65 rendent compte du comportement de l'im-  
66 pacteur et de la cible pendant la phase  
67 de choc. Les courbes déplacement-temps





**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.*

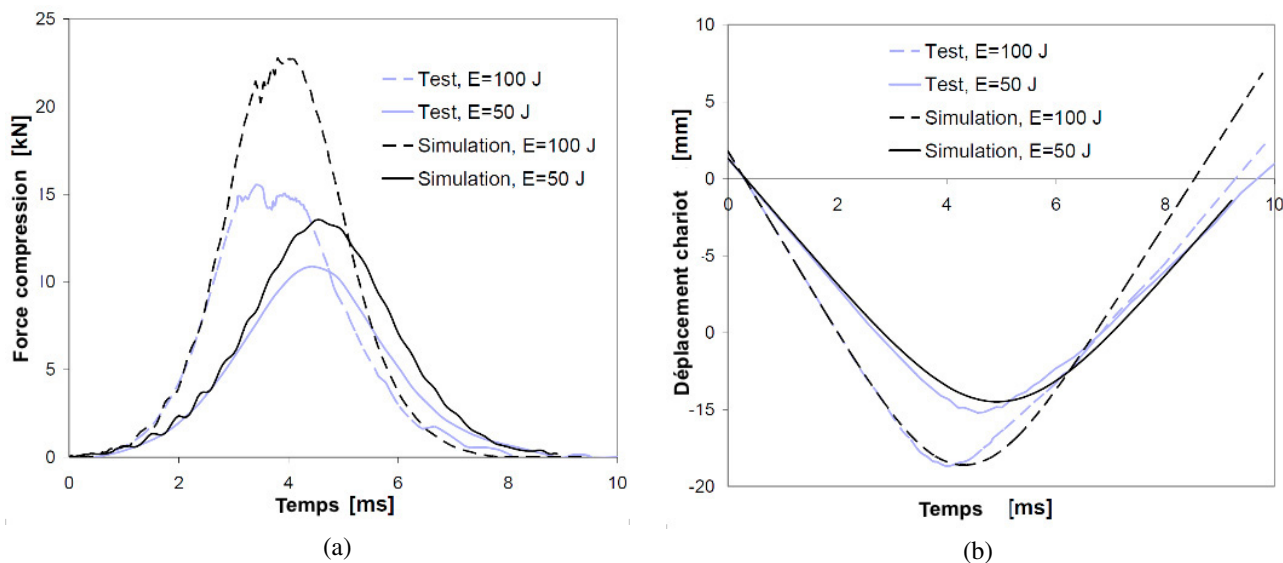


Fig. 11. Comparaison entre les résultats des essais expérimentaux et les simulations obtenus pour des impacts sur plaques interlock 3X 55 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA, (a) courbes force-temps, (b) courbes déplacement chariot-temps.

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.

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

22 D'autres raisons comme l'insuffisance  
 23 d'une modélisation plaque de ~~l'impacteur~~  
 24 pour rendre compte des modes d'endom-  
 25 magements complexes dans l'épaisseur, la  
 26 validation du comportement de l'impacteur  
 27 uniquement pour des déformations modé-  
 28 rées ainsi que l'idéalisation des conditions

aux limites par un encastrement peuvent  
 être avancées.

Une évaluation numérique de l'endom-  
 magement généré dans la plaque composite  
 (cible) est proposée figure 12. Les valeurs des  
 paramètres d'endommagement en traction  
 et compression dans les directions chaînes  
 et trames ainsi qu'en cisaillement, au bout  
 de 10 ms, sont mentionnées. Ces valeurs var-  
 ient entre 0 (pas d'endommagement) et 1  
 (niveau d'endommagement maximum). Des  
 tentatives de comparaison, purement quali-  
 tative, avec les résultats des cartes de diffusi-  
 vité obtenues par thermographie, montrent  
 l'existence de 2 zones d'endommagement  
 distinctes : une au voisinage de l'impacteur  
 et l'autre au voisinage de l'encastrement. Par  
 ailleurs, l'endommagement croît avec la vi-  
 tesse d'impact. Pour les plus faibles vitesses  
 d'impact, aucun endommagement n'est ob-  
 servé dans la direction chaîne 1.

## 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

29  
 30  
 31  
 32  
 33  
 34  
 35  
 36  
 37  
 38  
 39  
 40  
 41  
 42  
 43  
 44  
 45  
 46  
 47  
 48  
 49  
 50  
 51  
 52  
 53  
 54

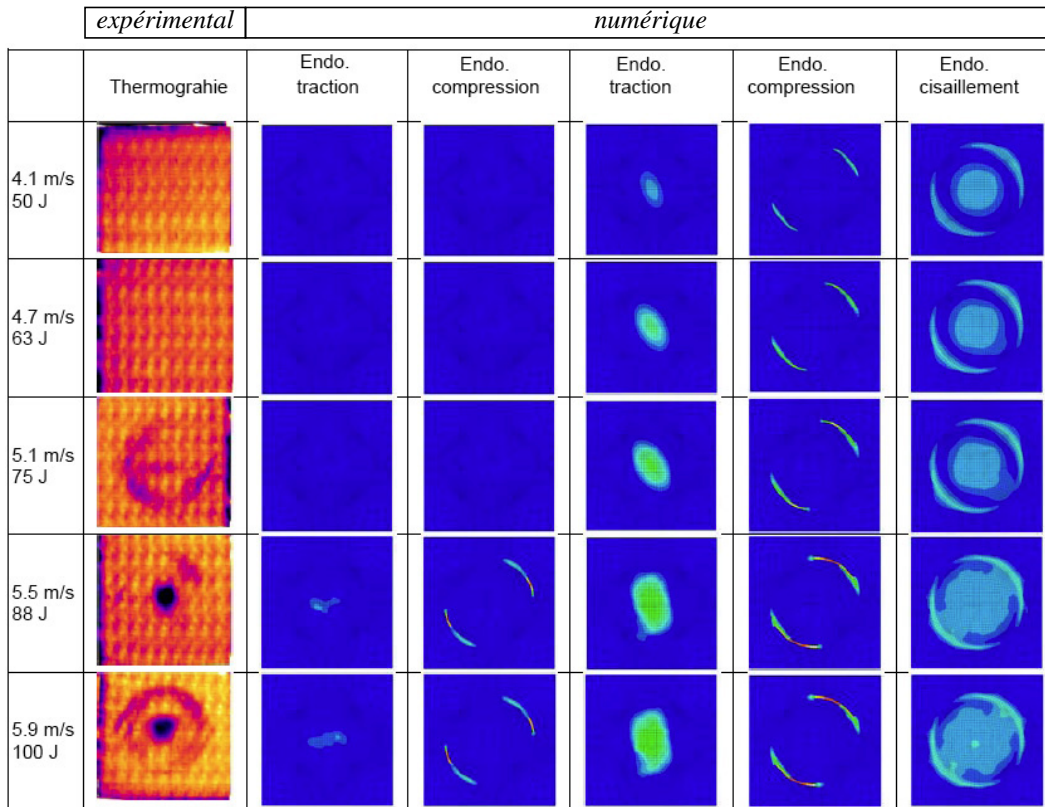


Fig. 12. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques : répartition des endommagements.

Fig. 12. Damage distribution maps. Numerical and experimental results.

1 élastomère/composite interlock 3X ii) la faisabilité de suivi par vidéos rapides permettant la reconstruction de champs de déplacement visant l'identification future de lois d'endommagements iii) le diagnostic des endommagements par un moyen d'analyse 'simple' et efficace qu'est celui de la thermographie IR iv) la mise en évidence des différentes natures d'endommagements de l'interlock 3X par analyses micrographiques v) la simulation numérique du choc mou.

12 La confrontation des premiers résultats de simulations numériques aux résultats d'essais expérimentaux a montré des résultats prometteurs malgré les écarts significatifs observés sur la prévision de la force de contact. La prise en compte des raisons avancées dans le Section 5.2 pour justifier ces écarts devraient permettre d'améliorer significativement les résultats.

### 21 Remerciements

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.

### Références

[1] Y. Duplessis-Kergomard, F. Dau, L. Guillaumat, Analyse paramétrique d'un essai sur plaques stratifiées, propice à l'apparition du délaminage et de la fissuration intralaminare, proceedings JNC16, 2009, Toulouse, France

[2] 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. Solids Struct.* **46** (2009) 2388-2396

[4] M. Mooney, *J. Appl. Phys.* **11** (1940) 582-592

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