



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

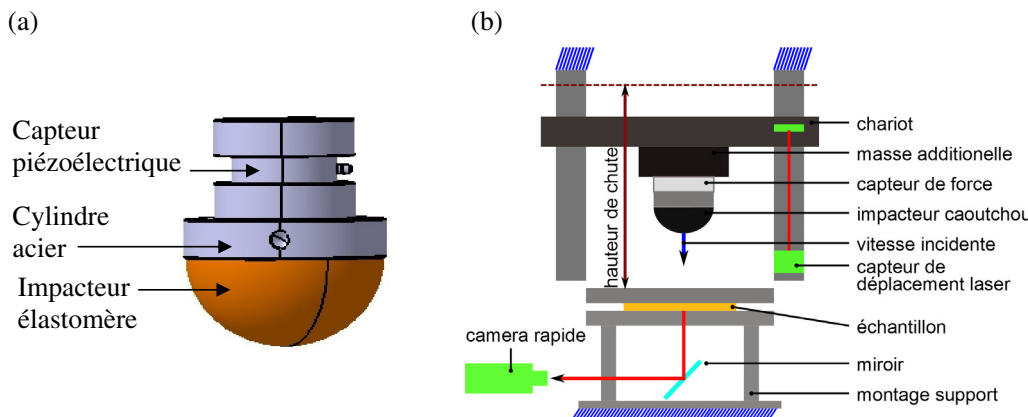


Fig. 1. (a) Impacteur. (b) Tour de chute instrumentée.

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

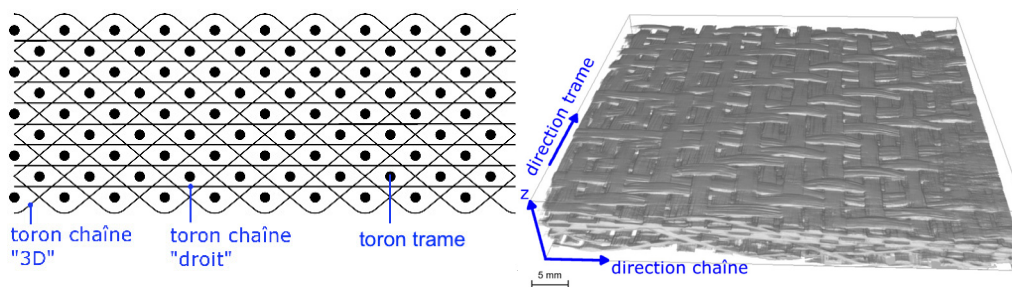


Fig. 2. Tissus interlock 3X.

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.

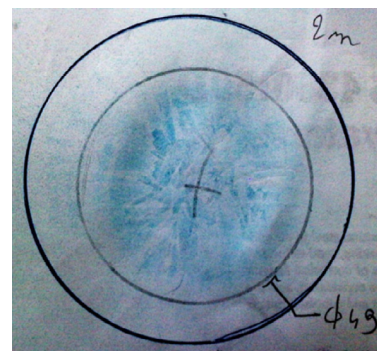


Fig. 3. Exemple d'empreinte relevée.

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 subroutine 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

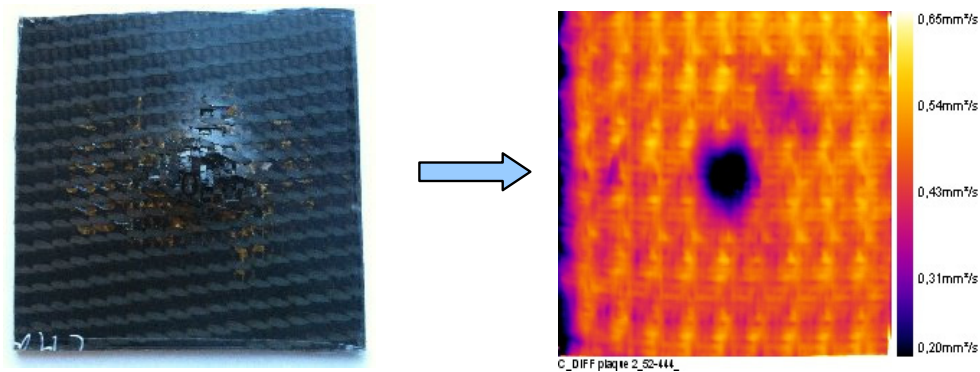


Fig. 4. Carte de diffusivité obtenue par thermographie.

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

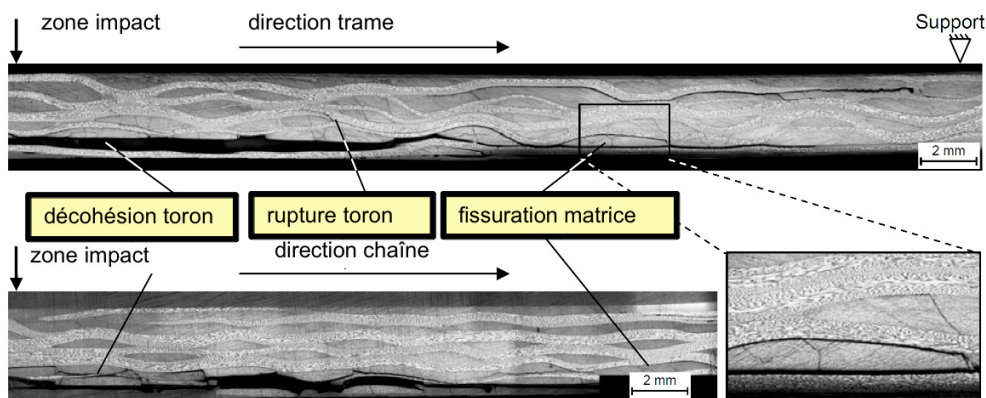


Fig. 5. Micrographies après impact de 100 J sur une plaque composite interlock 3X 55 %.

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

19 Pour des énergies incidentes de l'ordre de 36  
 20 50 J, aucun endommagement n'est révélé 37

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

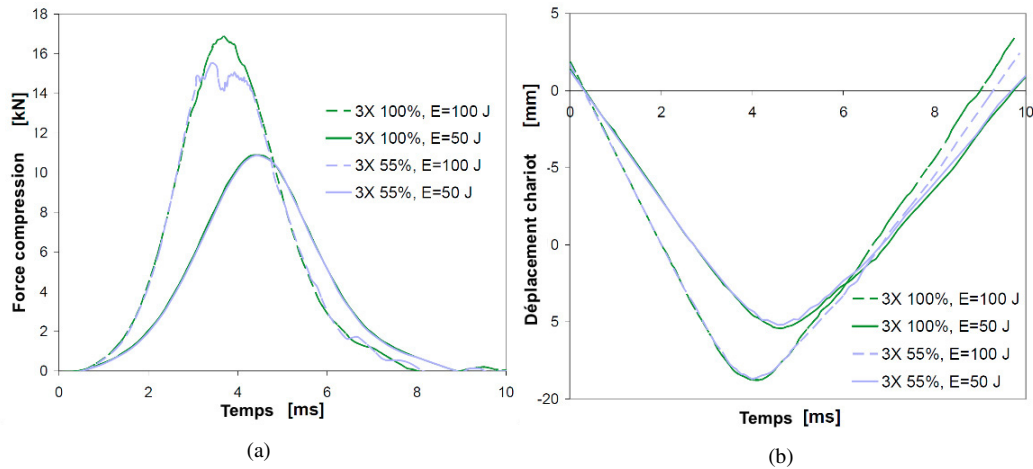


Fig. 6. (a) Courbes de force en fonction du temps. (b) Déplacement du chariot, obtenues lors d'essais sur plaques composites interlock 3X 55 % et 100 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et dureté 60 SHA.

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.

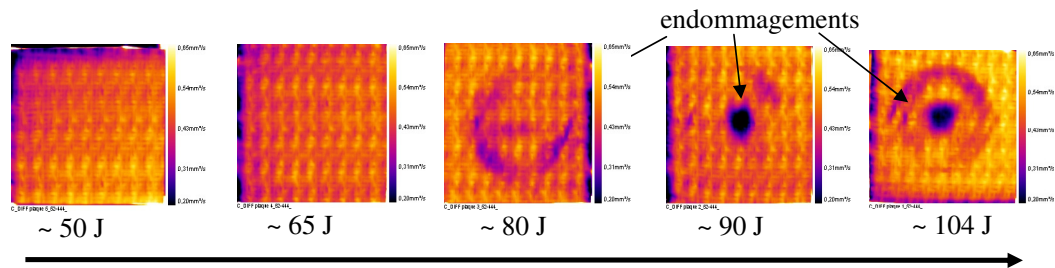
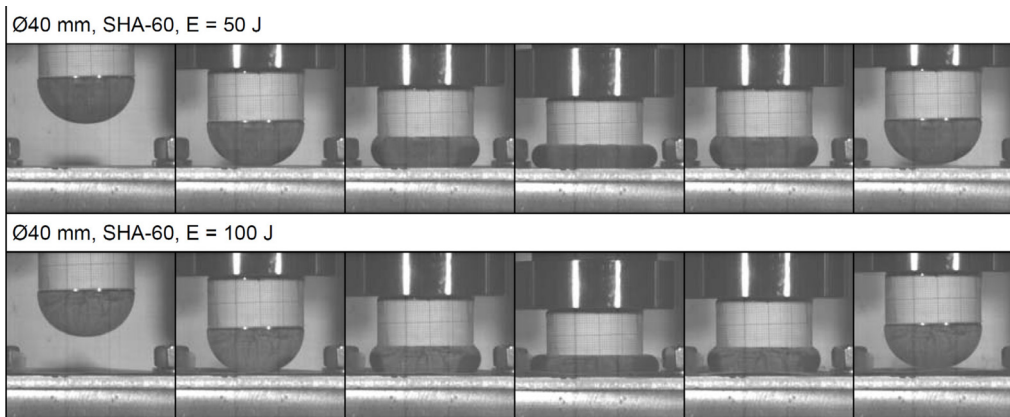


Fig. 7. Cartes de diffusivité obtenues par thermographie.

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

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

22 ment dans la moitié inférieure du composite.  
 23 Au voisinage des conditions aux limites, les  
 24 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 voisina-  
 28 ge 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 croisement  
 38 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 chaînes. 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**

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

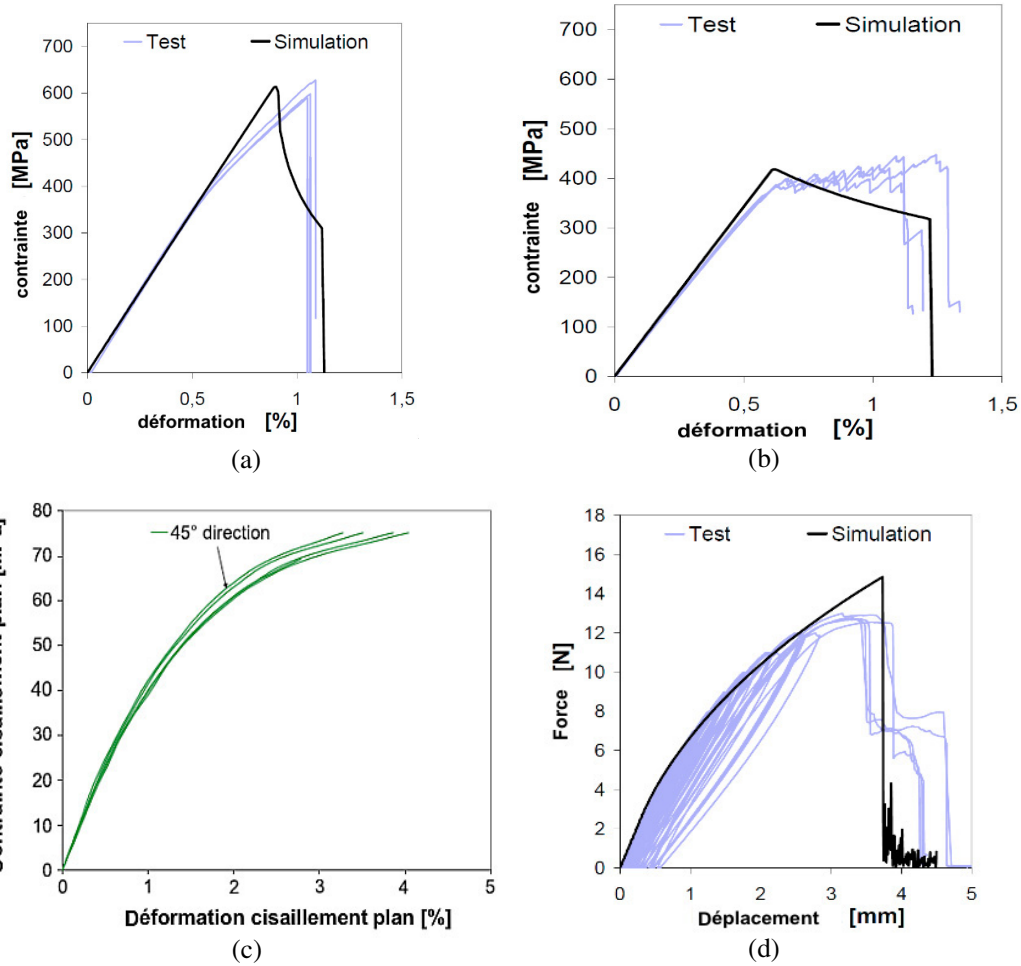
résultats expérimentaux et numériques se  
 33 superposent bien. Les résultats experimen-  
 34 taux dont il est question ici ont été réali-  
 35 sés sur des éprouvettes de dimensions utiles  
 36  $300 \times 32 \times 2,7 \text{ mm}^3$  respectivement sollici-  
 37 tées selon le sens chaîne (Fig. 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

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

### 63 **Simulations dynamiques**

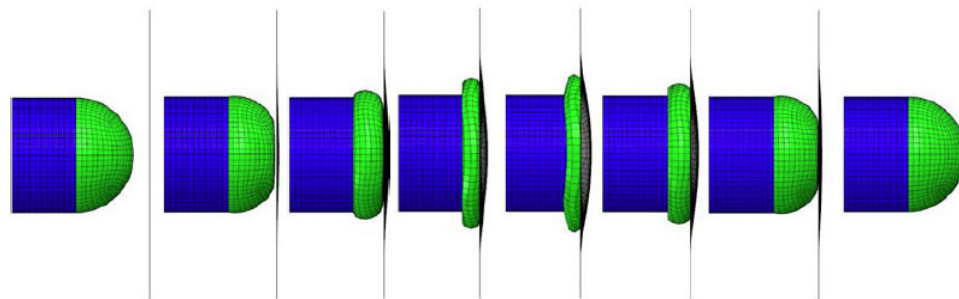
Les clichés numériques de la figure 10.  
 64 rendent compte du comportement de l'im-  
 65 pacteur et de la cible pendant la phase  
 66 de choc. Les courbes déplacement-temps  
 67





**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.*

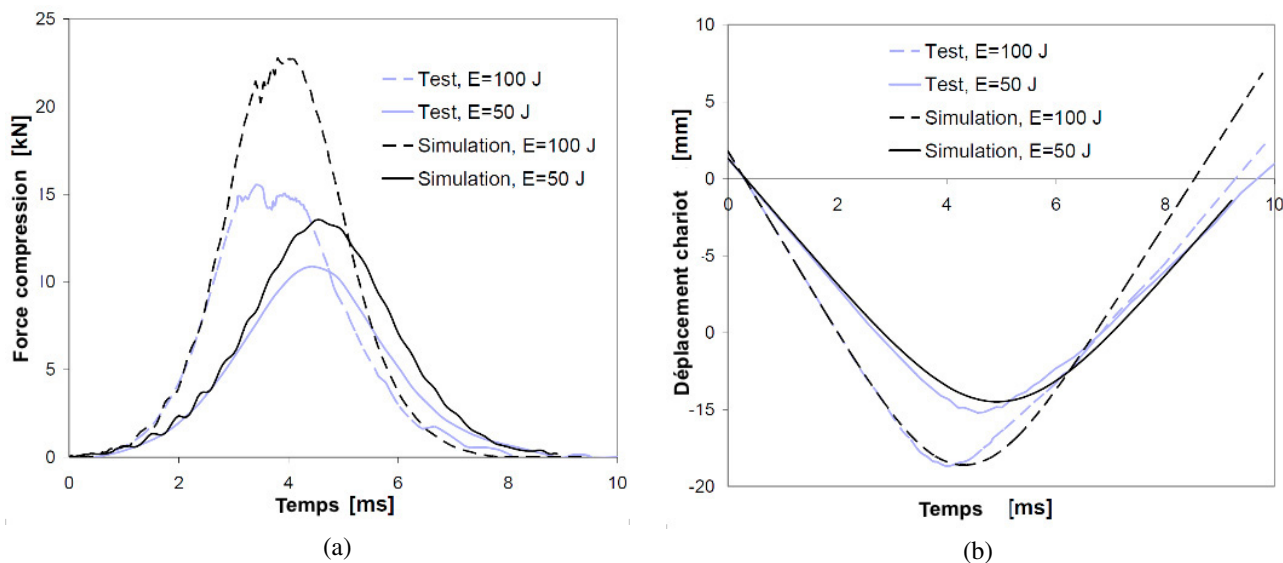


Fig. 11. Comparaison entre les résultats des essais expérimentaux et les simulations obtenus pour des impacts sur plaques interlock 3X 55 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA, (a) courbes force-temps, (b) courbes déplacement charriot-temps.

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

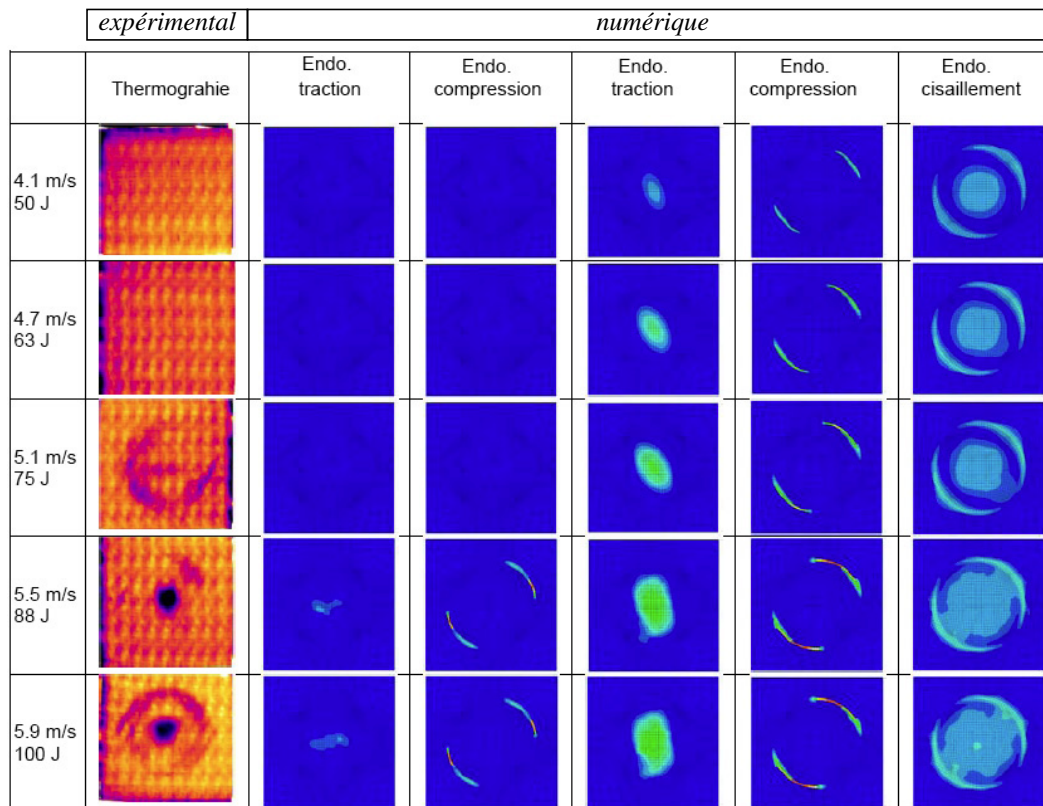


Fig. 12. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques : répartition des endommagements.

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