



HAL
open science

Impacts simultanés sur les structures en matériaux composites

Ayoub Soufri, Ameer Chettah, Benoit Piezel, Christophe Bouvet, Bruno Martin

► **To cite this version:**

Ayoub Soufri, Ameer Chettah, Benoit Piezel, Christophe Bouvet, Bruno Martin. Impacts simultanés sur les structures en matériaux composites. JNC23 : Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606790

HAL Id: hal-04606790

<https://hal.science/hal-04606790>

Submitted on 10 Jun 2024

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.

Impacts simultanés sur les structures en matériaux composites

Simultaneous impacts on composite structures

A. SOUFRI¹, A. CHETTAH¹, B. PIEZEL¹, C. BOUVET², B. MARTIN¹

1 : Laboratoire DRIVE, Université de Bourgogne
Nevers 58000, France

Ayoub.Soufri@u-bourgogne.fr, Ameer.Chettah@u-bourgogne.fr, Benoit.Piezel@u-bourgogne.fr et Bruno.Martin@u-bourgogne.fr

2 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader, ISAE-SUPAERO – UPS – IMT Mines Albi – INSA – CNRS
Toulouse 31000, France
christophe.bouvet@isae-supaero.fr

Résumé

Cette étude a pour but d'étudier l'effet d'impacts simultanés sur des structures en matériaux composites stratifiées à fibres de carbone, afin de se rapprocher des conditions réelles de service, telles que des chutes de grêlons, des projections d'objets extérieurs comme les gravillons présents sur les routes, ou encore des impacts d'oiseaux, etc. Par rapport à un impact seul ou à des impacts répétés, les impacts simultanés modifient la réponse globale de la structure, à cause des effets synergiques venant de l'interaction des ondes de contraintes induites par les différents projectiles, ce qui génère des endommagements plus importants. Afin de réaliser les différentes configurations de multi-impacts, un canon à air comprimé a été développé, pour permettre le contrôle de plusieurs paramètres tels que le nombre d'impacts, le décalage temporel et spatial, la vitesse et l'énergie d'impact, etc. Pour mieux comprendre l'interaction entre plusieurs impacts simultanés, un modèle éléments finis 3D basé sur l'approche DPM (Discret Ply Model) est utilisé afin de prédire les dommages se développant au sein de la structure composite ; l'objectif étant à terme de modéliser d'autres configurations de multi-impacts (séquentielles, déphasées, répétées, etc.) et de faire ressortir les configurations les plus critiques. Le résultat de cette étude montre la pertinence de considérer des impacts simultanés ; les endommagements au sein du composites sont en effet plus complexes et critiques par rapport à un cas de mono-impact. Cette étude montre également la capacité du modèle numérique DPM à mettre en évidence des scénarios d'endommagements complexes.

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of several simultaneous impacts on laminated composite structures, in order to get closer to real service conditions, in the case of hailstone falls or projections of external objects such as road gravels, bird strikes, etc. Compared to a single impact or a repeated impact, simultaneous impacts modify the overall response of the structure, due to the synergistic effects of the interaction of the stress waves induced by the different projectiles, which may generate greater damages. In order to realize the different multi-impact configurations, a compressed air cannon has been developed, to allow the control of several parameters such as the number of impacts, the temporal and spatial offset, the velocity and the impact energy, etc. To better understand the interaction between several simultaneous impacts, a 3D finite element model based on the DPM (Discrete Ply Model) approach is used to predict the damage developing within composite structure. The final objective is to simulate other multi-impact configurations (sequential, out of phase, repeated, etc.) in order to distinguish the most critical configurations. The result of this study shows the relevance of considering simultaneous impacts, as the damage within the composite is more complex and critical compared to a single-impact case. This study also shows the ability of the DPM numerical model to highlight complex damage scenarios.

Mots Clés : Multi-impact, impacts simultanés, matériaux composites, modélisation numérique.

Keywords : Multi-impact, simultaneous impacts, composite materials, numerical modeling.

1. Introduction

Les matériaux composites sont largement utilisés dans le domaine des transports en raison de leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées. Cependant, au cours de leur cycle de vie, ils peuvent subir une dégradation significative de leurs propriétés mécaniques lorsqu'ils sont soumis à des chargements d'impacts. Les dommages induits par des impacts se manifestent sous différentes formes telles que la rupture des fibres, la fissuration matricielle, la décohésion fibres/matrice et le délaminage [1]. L'étude

du comportement aux impacts des structures composites a suscité une attention importante dans la littérature [2-4]. Cependant, ces études se rapportent généralement au cas d'un seul impact ou d'impacts répétés [5-7]. Peu de travaux se sont intéressés au cas d'impacts multiples, même s'ils sont plus proches des conditions réelles de service, comme dans les cas de chute de grêlons ou de projection d'objets externes tels que les gravillons présents sur les routes, etc. Récemment, les chercheurs se sont davantage intéressés au cas des multi-impacts en distinguant entre les impacts séquentiels et simultanés [8-11]. Ces deux types d'impact se différencient selon l'interaction des ondes induites par les différents projectiles (interférence constructive ou destructive). En général, un impact est considéré comme simultané lorsqu'une interaction entre les ondes de choc liées à chacun des impacts a lieu [11], et séquentiel lorsque l'intervalle entre les impacts est suffisamment long pour éviter tout effet synergique [12]. Par rapport à un mono-impact, la réponse structurale globale en cas d'impacts multiples est modifiée en raison d'un mécanisme d'endommagement plus complexe engendré par les différents projectiles [8]. Ces études portent sur des impacts à haute énergie/vitesse sur des composites en fibre de verre [8-10] ou des composites renforcés de fibres courtes de verre [11]. L'étude présentée se concentrera sur la différence entre le comportement d'un stratifié composite, UD carbone/époxy, lorsqu'il est soumis à un impact seul et deux impacts simultanés, à vitesse et énergie moyennes. Pour cela, un canon à air comprimé a été développé pour maîtriser les paramètres mis en jeu (nombre d'impacts, décalage temporel et spatial, etc.). La configuration de tirs simultanés nous permettra de s'approcher des conditions réelles de service pour étudier et comprendre la différence par rapport à un seul impact.

2. Matériaux et méthodes

2.1 Processus de fabrication :

Les plaques composites de dimensions $350 \times 350 \times 1,4 \text{ mm}^3$ sont obtenues par thermo-compression d'un pré-imprégné unidirectionnel en carbone/époxy (HEC /SE84LV). La séquence d'empilement est $[0/-45/90/45]_s$ avec une épaisseur de pli de 0.175 mm.

2.2 Multi-impact à l'aide du canon à air comprimé

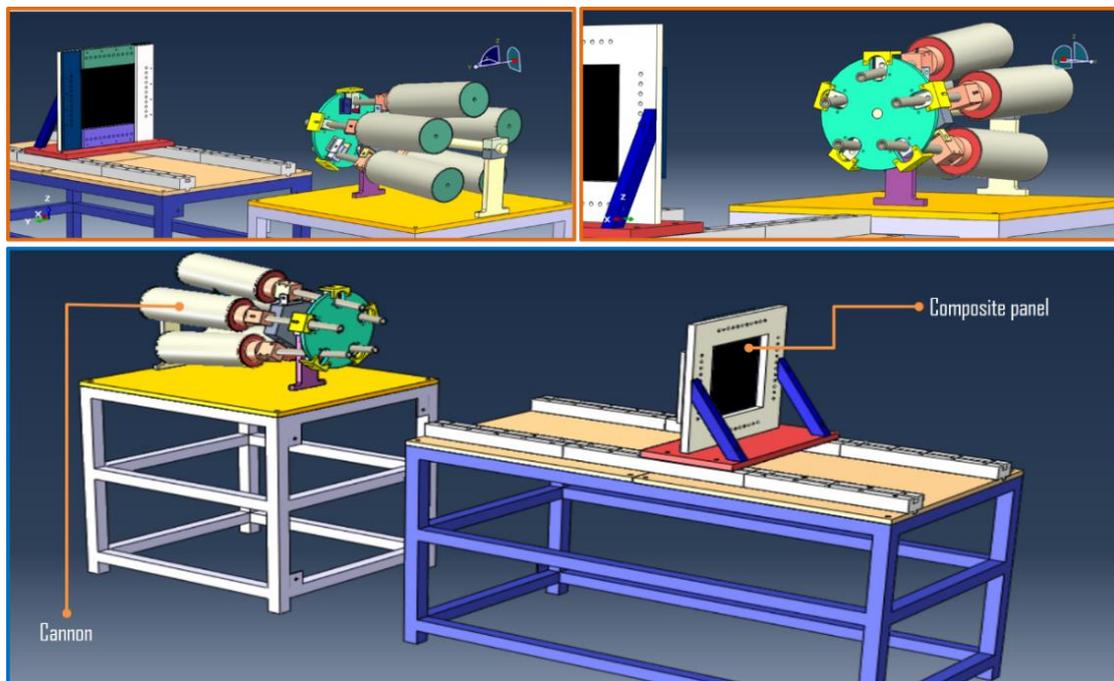


Fig. 1. Banc d'essai « canon à air comprimé ».

Le banc d'essai expérimental (Fig. 1) est composé de cinq canons à air comprimé. Chaque canon est muni d'un système de déclenchement commandé automatiquement selon la configuration de tir choisie. Le dispositif est instrumenté avec 4 capteurs de déplacement (Keyence LK-H082), placés à l'arrière de la plaque, pour mesurer le déplacement lors des impacts. Il est aussi équipé d'une caméra thermique rapide (FLIR X6800sc) permettant de reconstituer, à travers les différentes signatures thermiques enregistrées pendant les impacts, les scénarios d'endommagement et de les lier à la réponse structurale de la plaque et aux simulations numériques. La vitesse des billes en sortie des canons est mesurée par des chronographes (Acetech Airsoft Gun AC6000 BT), tandis que les vitesses avant et après impact sont mesurées à l'aide d'une caméra rapide (MotionBLITZ EoSens-mini2), il est ainsi possible de déterminer les vecteurs de vitesses ainsi que l'énergie dissipée durant l'impact. Après impacts, les plaques sont analysées par un contrôle ultrasons (C-scan) en immersion. Les différents impacts sont réalisés avec des billes d'acier de 20 mm de diamètre et d'une masse de 32.7 g.

Dans un premier temps, un essai de mono-impact à une énergie de 15J est réalisé (Fig. 2a). Ensuite, deux impacts simultanés à une énergie de 15 J par bille sont effectués (Fig. 2b). Pour chaque configuration, nous réalisons trois essais pour s'assurer de la répétabilité des résultats.

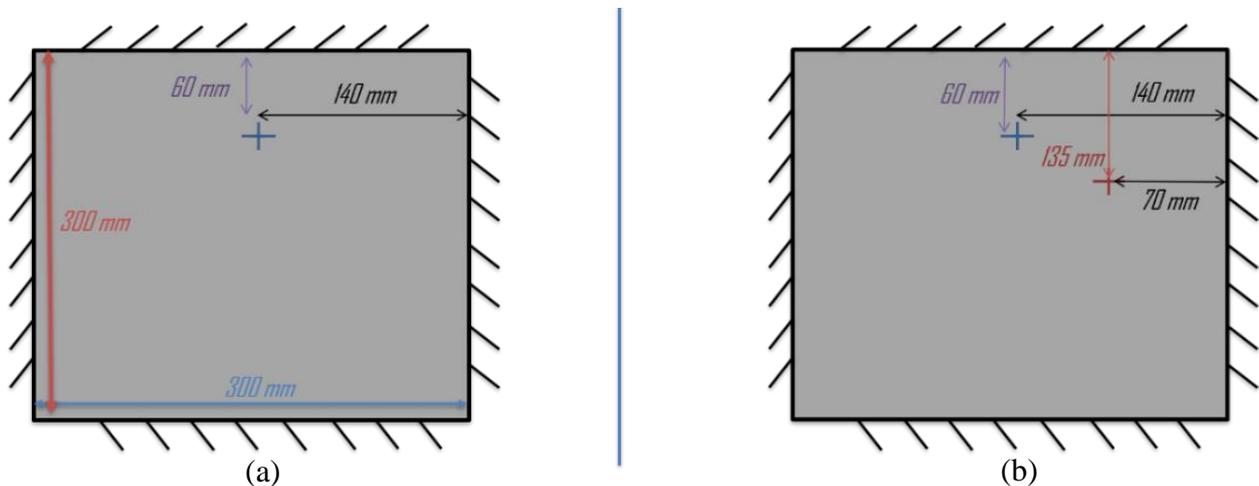


Fig. 2. Configurations expérimentales : (a) mono-impact, (b) deux impacts simultanés.

2.3 Modélisation numérique

L'étude numérique d'impacts multiples simultanés est basée sur le DPM (Fig. 3), qui est un modèle réalisé à l'échelle mésoscopique, où les plis sont découpés en bandes d'éléments volumiques. Entre les plis, des éléments d'interface cohésifs à épaisseur nulle, permettent de prendre en compte le délaminage. D'autres éléments d'interface sont utilisés entre les bandes, dans la longueur du pli, pour représenter la fissuration matricielle. Le couplage des endommagements inter/intra-laminaire est alors automatiquement pris en compte par le modèle. La prise en compte des différents endommagements, ainsi que leurs interactions, font du DPM un modèle efficace pour prédire les dommages d'impacts [13, 14] ainsi que pour évaluer la tenue résiduelle en compression après impact (CAI) [15] sur des stratifiés unidirectionnels.

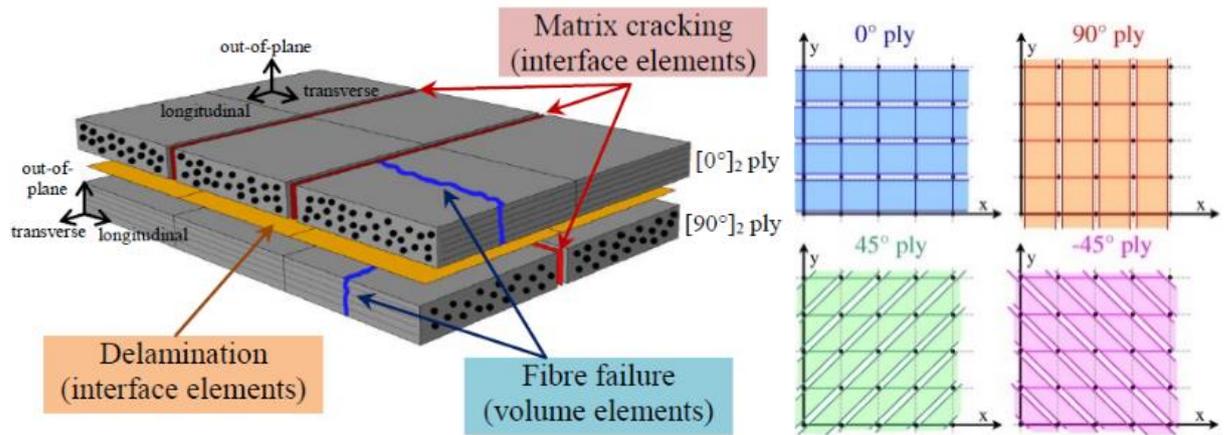


Fig. 3. Représentation schématique du principe du Discret Ply Model (DPM) [13].

Dans cette étude, un dialogue essais/calculs est assuré afin de valider les performances du DPM et montrer le rôle du « Virtual Testing » dans la réduction des coûts des campagnes d’essais et l’accroissement de la compréhension des différents mécanismes d’endommagements pour atteindre les performances maximales des matériaux composites.

3. Résultats et discussion

3.1 Mono-impact :

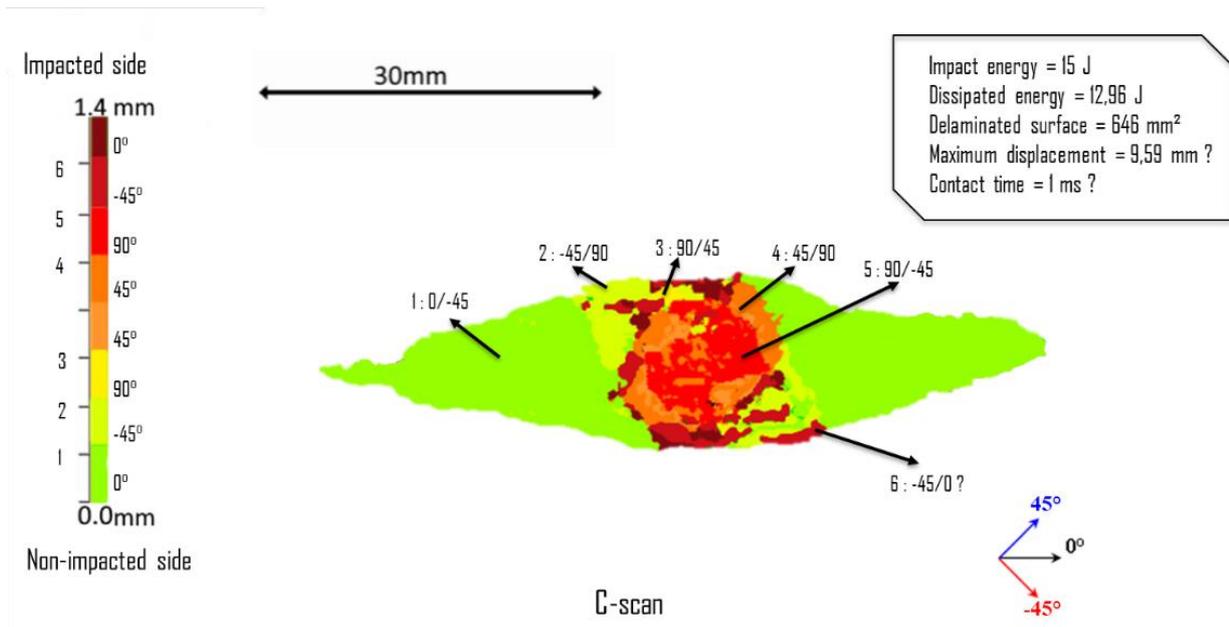


Fig. 4. C-scan d'un mono-impact.

Pour le cas d’un mono-impact, l’énergie dissipée moyenne par la bille est 12,92 J avec un écart type de 0,06 J, pour un déplacement maximum moyen de l’impacteur de 7,79 mm (avec 1,84 mm d’écart type). Le temps d’impact moyen dans les trois essais est d’environ une milliseconde. Ces valeurs sont mesurées à l’aide du suivi de la trajectoire de la bille avec une caméra rapide. Pour ce premier cas, nous mesurons à l’aide du C-scan, une surface délaminée projetée moyenne de 653mm², avec un écart type de 32 mm². Nous distinguons les différentes interfaces et orientations du délaminage dans l’épaisseur (Fig. 4).

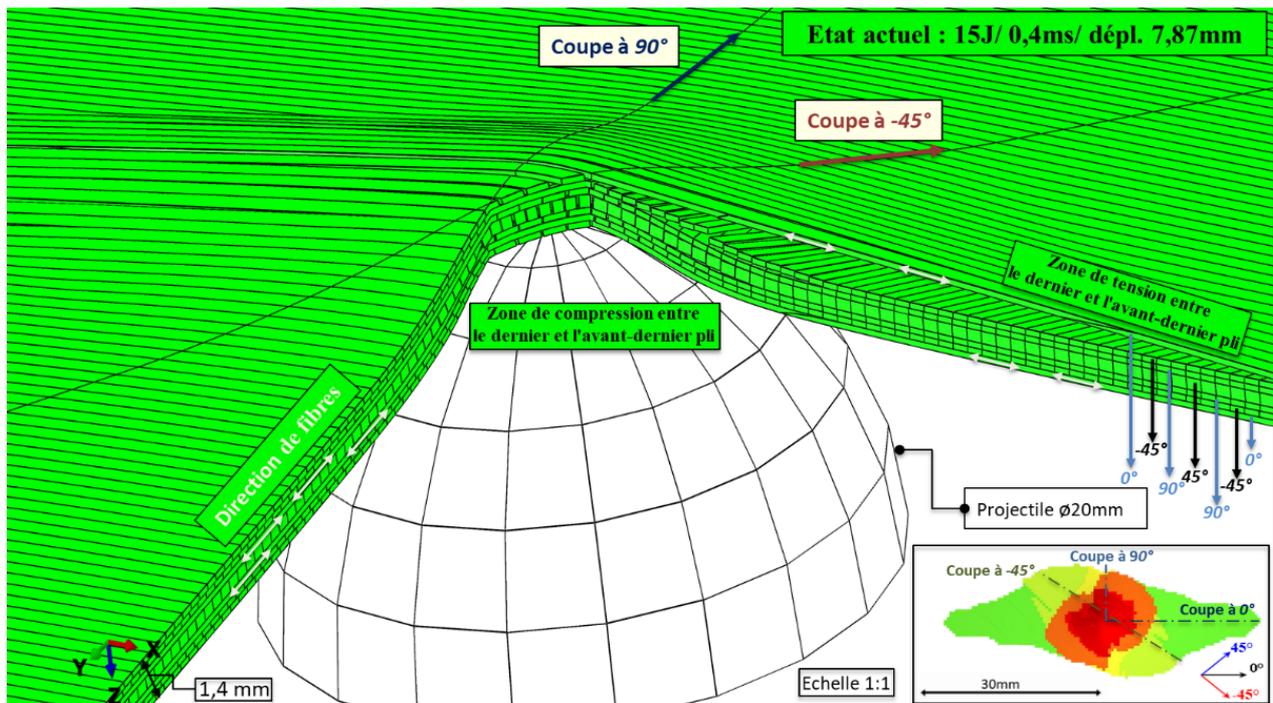


Fig. 5. Vue en coupes multiples, réponse en déplacement du modèle DPM.

D'un point de vue numérique, l'énergie dissipée par la bille est de 12,02 J, pour un déplacement maximum de l'impacteur de 7,87 mm et un temps d'impact de 0.95 ms. La surface délaminée projetée est de 687 mm². Nous constatons une zone de compression entre le dernier pli et l'avant-dernier pli sous l'impacteur, et une zone de tension entre ces plis loin de l'impacteur, ce qui explique que la surface la plus délaminée est celle entre le dernier et l'avant dernier pli (Fig. 5). Nous retrouvons les mêmes interfaces et orientations du délaminage dans l'épaisseur que celles obtenues expérimentalement (Fig. 6). L'erreur sur la surface délaminée est inférieure à 5%.

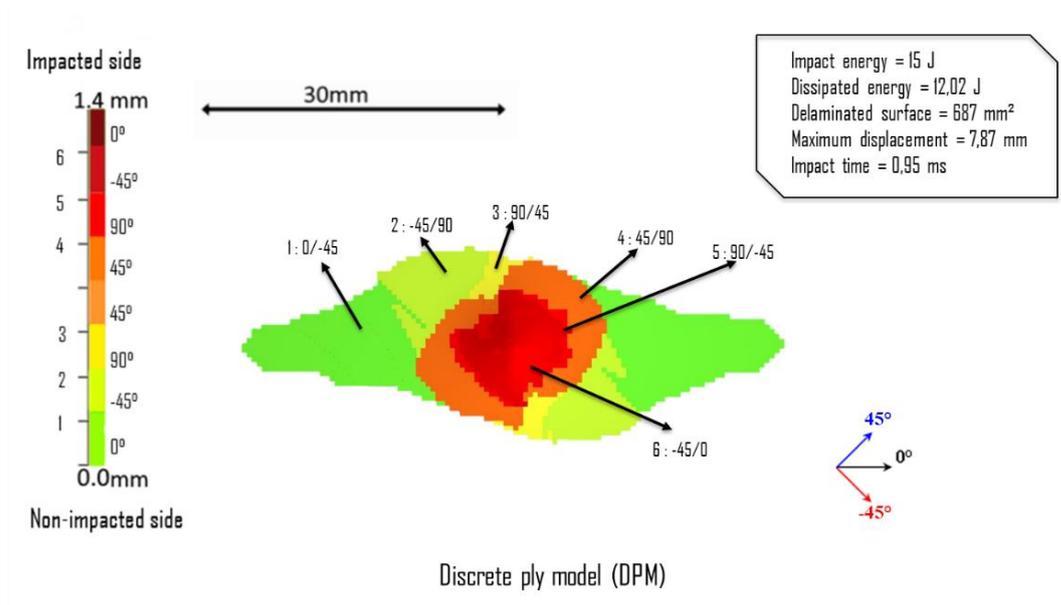


Fig. 6. Mono-impact, surface délaminée obtenue numériquement (DPM).

3.2 Impacts simultanés :

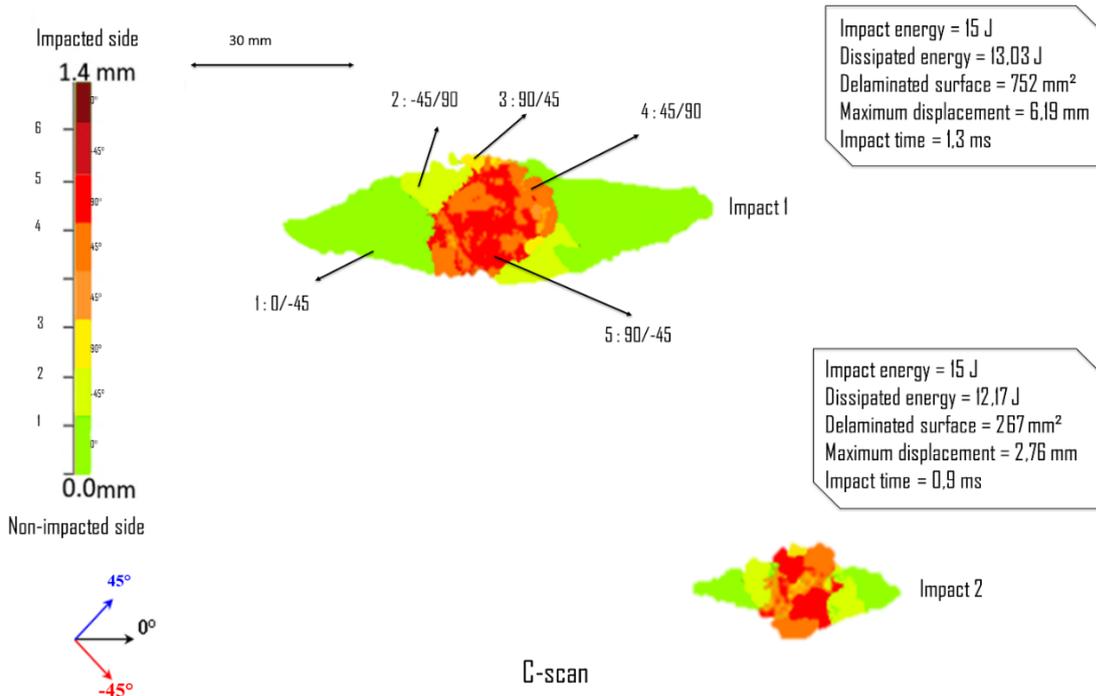


Fig. 7. C-scan des impacts simultanés.

La figure (Fig. 7) présente les surfaces délaminées observées expérimentalement par C-scan de deux impacts simultanés. La surface délaminée totale (1019 mm²) est plus importante par rapport à un cas de multi-impacts (646 mm²). Par contre, il y a une différence importante entre les surfaces délaminées par zone d'impact, même s'il s'agit du même type d'impacteur et même énergie d'impact. Cette différence est due à la vibration de la plaque au moment du second impact, plus la plaque approche de son déplacement maximal possible, plus l'énergie cinétique qui peut être possiblement dissipée en énergie élastique tend vers zéro, la plupart d'énergie cinétique se transforme donc en énergie inélastique (endommagements). Sachant que l'impacteur 1 est plus proche des encastremets, le déplacement maximal possible est plus faible et le délaminage prévu est plus important. Numériquement, la deuxième bille est repoussée par la bille due à la vibration de la plaque. Cette deuxième bille commence à perdre contact plusieurs fois avec la plaque suite à la vibration de celle-ci. L'énergie dissipée étant alors plus faible, la surface délaminée est aussi moins importante (Fig. 8).

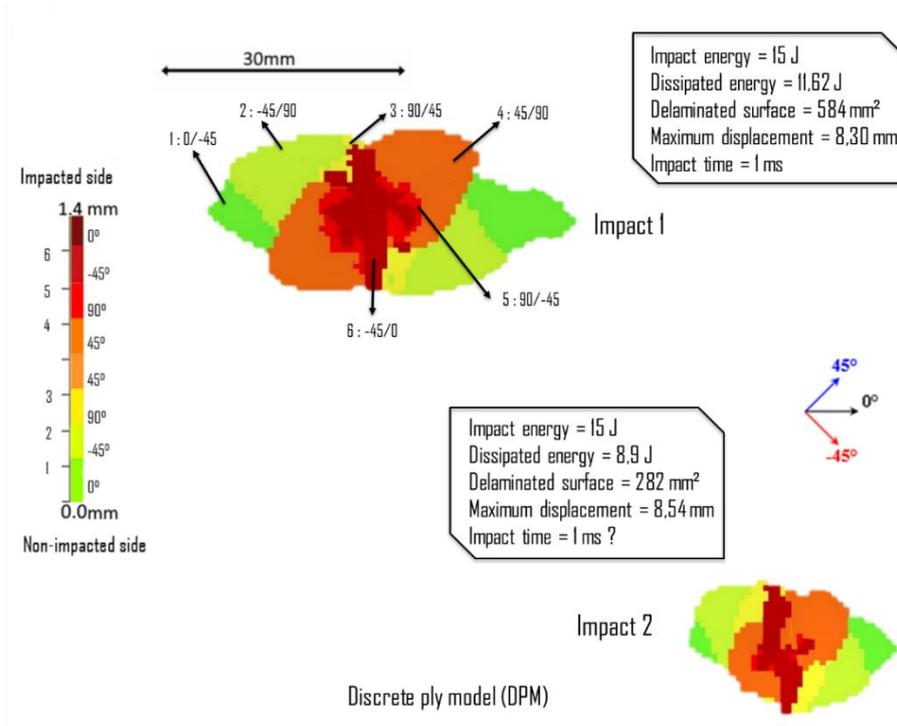


Fig. 8. Impacts simultanés, surfaces délaminées obtenues numériquement (DPM).

Nous constatons également plusieurs ruptures de fibres sous l'impacteur 1 (Fig.9), la zone de tension entre le pli à 90° et le pli à -45° explique l'étendu de la surface délaminée (interface 2 : -45/90) dans le cas d'impacts simultanés. Pour l'impacteur 2, nous observons moins de ruptures de fibres et moins d'éléments d'interfaces rompus.

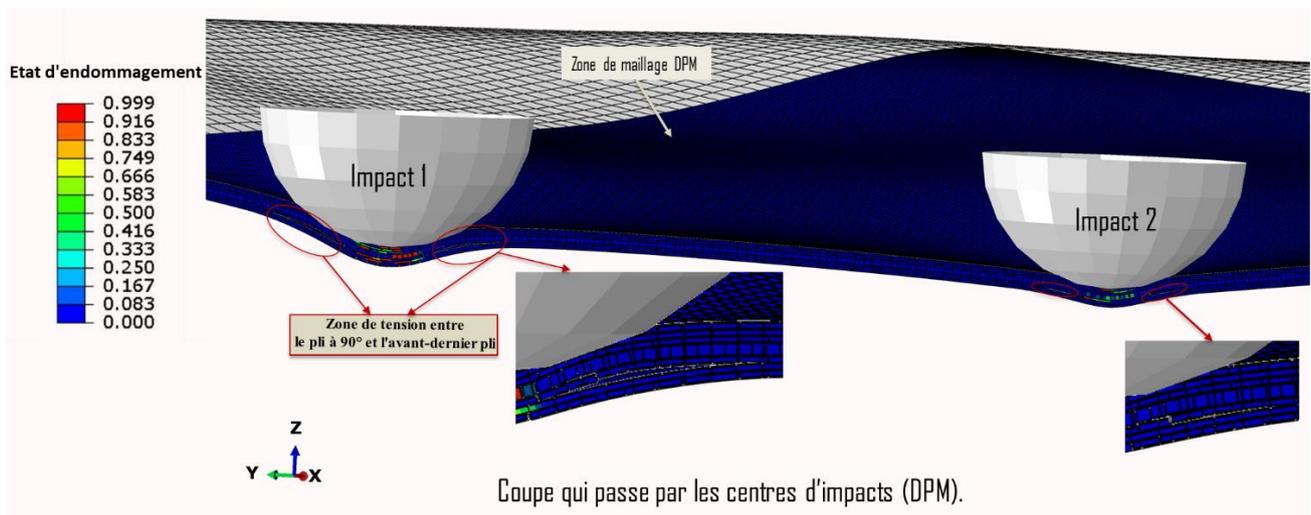


Fig. 9. Vue de coupe, impacts simultanés (DPM).

4. Conclusions et perspectives

Le présent travail a montré que la réponse des stratifiés composites carbone/époxy à un essai d'impact unique ne peut pas être extrapolée aux essais de multi-impacts. En effet, les dommages dus aux essais simultanés sont plus compliqués à prévoir et les interactions d'ondes induites par les différents projectiles peuvent modifier la réponse structurale globale du composite. Pour bien comprendre les

phénomènes mis en jeu, le Virtual Testing est une méthode efficace pour réduire le coût des essais et mieux sécuriser l'utilisation des structures en composites. En l'occurrence, le DPM a démontré une bonne capacité à prédire les dommages dans un cas de chargement complexe. Les résultats de cette étude vont être élargis pour couvrir plus de paramètres (nombre d'impact, écart temporel et spatial, etc.).

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés au sein du laboratoire DRIVE à l'ISAT de Nevers avec le financement de la Région Bourgogne-Franche-Comté et l'Ecole Doctorale SPIM (ED37). Nous remercions également l'Institut Clément Ader (ICA, CNRS UMR 5312) pour l'utilisation du mésocentre de calcul CALMIP.

Références

- [1] C. Wang, C. H. Yew, « Impact damage in composite laminates », *Computers & Structures*, Vol.37, No.6, pp. 967–982, 1990.
- [2] S. Abrate, « Impact Engineering of composite structures, CISM Courses and Lectures », vol.526, pp. 97–128, 2011.
- [3] G. A. O. Davies, R. Olsson, « Impact on composite structures ». *The aeronautical journal*, pp. 542–561, 2004.
- [4] W. Cantwell, J. Morton, « Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP », *Composites Journal*, Vol.20, pp. 545–51, 1989.
- [5] H. B. Mokhtar, « Contribution to the study of impact damage on composite laminates: The effect of hygrothermal ageing and preloading », Thèse de l'université de Bourgogne, pp. 78–85, 2012.
- [6] A.S.E Amouzou, O. Sicot, A. Chettah, S. Aivazzadeh, « Experimental characterization of composite laminates under low-velocity multi-impact loading », *Journal of composite materials*, pp. 1–14, 2019.
- [7] A. Amaro, P. Reis, M. Moura, M. Neto, « Influence of multi-impacts on GRP composite Laminates.Composites », Part B, pp. 93–99, 2013.
- [8] S. Xiao-Yu, T. Jian-Xin, H. Zheng, G. Xuan, « A study on the failure mechanisms of composite laminates simultaneously impacted by two projectiles », *Advanced Composites Letters*, Vol. 27, Iss.3, pp. 96–106, 2018.
- [9] S.D. Bartus, U.K. Vaidya, « Near-simultaneous and sequential multi-site impact response of s-2glass/epoxy laminates », 16th international conference on composite materials, pp. 1–4, 2007.
- [10] L.J. Deka, S.D. Bartus, U.K. Vaidya, « Multi-site impact response of S2-glass/epoxy composite laminates », *Composites Science and Technology*, pp. 725–735, 2009.
- [11] S. Garzon-Hernandez, D. Garcia-Gonzalez, A. Arias, « Multi-impact mechanical behaviour of short fibre reinforced composites ». *Composite Structures*, Vol. 202, pp.2 41–252, 2018.
- [12] S. Bartus, « Simultaneous and sequential multi-site impact response of composite laminates », Thèse de l'université d'Alabama, 2006.
- [13] C. Bouvet, B. Castanié, M. Bizeul, J.J. Barrau, « Low velocity impact modeling in laminated composite panels with discrete interface elements », *International Journal of Solids and Structures*, 46, pp. 2809–2821, 2009.
- [14] C. Bouvet, S. Rivallant, J.J. Barrau, « Low velocity impact modeling in composite laminates capturing permanent indentation », *Composites Science and Technology*, vol. 72 n° 16, pp. 1977–1988, 2012.
- [15] N. Hongkarnjanakul, C. Bouvet, S. Rivallant, « Validation of low velocity impact modelling on different stacking sequences of CFRP laminates and influence of fibre failure », *Composite Structures*, vol. 106, pp. 549–559, 2013.