

## Caractérisation de l'endommagement post-impact dans un composite PA6.6/6-Sergé2.2 : indentation permanente et micro-tomographie X

*Post-impact damage characterization of woven glass reinforced polyamide 6.6/6 composites: permanent indentation measurements and X-Ray tomography*

N. MIQOI<sup>1,2,4</sup>, P. POMAREDE<sup>1,2</sup>, F. MERAGHNI<sup>1</sup>, N-F. DECLERCQ<sup>2</sup>, G. LECOZ<sup>1</sup>, L. GUILLAUMAT<sup>3</sup>, S. DELALANDE<sup>4</sup>

1: LEM3-UMR 7239 CNRS  
Arts et Métiers ParisTech  
4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France  
Université de Lorraine  
7 rue Félix Savart, 57073 Metz, France  
e-mail : [nada.miqoi\\_1@ensam.eu](mailto:nada.miqoi_1@ensam.eu), [pascal.pomarede@ensam.eu](mailto:pascal.pomarede@ensam.eu),  
[fodil.meraghni@ensam.eu](mailto:fodil.meraghni@ensam.eu), [gael.lecoz@univ-lorraine.fr](mailto:gael.lecoz@univ-lorraine.fr)

2: Georgia Tech-UMI 2958 CNRS  
GeorgiaTech Lorraine  
2 rue Marconi, 57070 Metz, France  
e-mail : [declercq@gatech.edu](mailto:declercq@gatech.edu), [ppomarede@georgiatech-metz.fr](mailto:ppomarede@georgiatech-metz.fr)

3: LAMPA-EA 1427  
Arts et Métiers ParisTech  
2 BD du Ronceray, BP 93525, 49035 Angers, France  
e-mail : [laurent.guillaumat@ensam.eu](mailto:laurent.guillaumat@ensam.eu)

4: Groupe PSA  
Centre technique de Vélizy A  
Route de Gisy, 78140 Vélizy-Villacoublay, France  
e-mail : [nada.miqoi@mpsa.com](mailto:nada.miqoi@mpsa.com), [stephane.delalande@mpsa.com](mailto:stephane.delalande@mpsa.com)

### Résumé

Dans cette étude, des essais d'impacts à faible vitesse ont été réalisés sur un polyamide 6.6/6 renforcé de fibres de verre tissées. L'objectif principal est d'étudier qualitativement et quantitativement l'endommagement induit ainsi que sa détectabilité au moyen de différentes méthodologies expérimentales. Pour ce faire, plusieurs méthodes de contrôle non destructif (CND) ont été employées. L'identification des différents mécanismes d'endommagements a été effectuée par micro-tomographie à rayons X ( $\mu$ CT). Des mesures ultrasonores par imagerie C-scans en transmission et en réflexion ont été utilisés pour localiser la zone endommagée ainsi que pour extraire les informations relatives à l'indentation permanente observée sur la face impactée. Ces informations ont ensuite été vérifiées par une mesure de la planéité à l'aide de la profilométrie optique 3D. Une corrélation entre les résultats obtenus par micro-tomographie à rayons X et la taille de l'indentation permanente a été réalisée.

### Abstract

The present experimental works study the response of a polyamide 6.6/ 6 reinforced with woven glass fibers to drop weight solicitations. Several tests were carried out under numerous impact energies. A quantitative along with a qualitative study of the induced damage are the main objectives of this study. Different non-destructive evaluation (NDE) methods were utilized for this purpose. The damage mechanisms were each identified using X-Ray micro-computed tomography ( $\mu$ CT). The impacted area was first localized using C-scan imaging, and then the depth and diameter of permanent indentation left on the impacted surface were extracted from the ultrasonic map. These measures were later validated using 3D optical profilometry. Afterwards, a link between the X-Ray tomography results and the PI measurements was established.

**Mots Clés :** Endommagement, impact, indentation permanente, ultrasons, contrôle non-destructif

**Keywords:** Damage, impact, permanent indentation, ultrasound, Non-destructive evaluation

## 1. Introduction

Dans l'industrie automobile, l'utilisation des matériaux composites a augmenté au cours des dernières années en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques [1],[2]. Toutefois, la résistance de ce type de matériau aux chargements hors-plan reste un défi majeur. En effet, au cours de leur cycle de vie, les structures en composite peuvent subir des impacts qui se produisent pendant la fabrication ou en service. Cependant, ce type de chargement entraîne une réduction importante des propriétés résiduelles sans laisser de trace apparente sur la surface. Cet endommagement externe correspond à l'empreinte laissée au moment de l'impact et est appelée indentation permanente (IP). En automobile comme en aéronautique, la conception des structures composite est fondée sur la détectabilité de l'endommagement. Comme l'indique le principe de la tolérance à l'endommagement, sous un certain niveau de détectabilité, la structure composite doit supporter le chargement maximal sans rupture soudaine jusqu'à ce que l'endommagement soit détecté et par la suite réparé [3],[4]. Ce seuil de détection est appelé endommagement à peine visible et est considéré comme paramètre clé pour définir la tolérance à l'endommagement d'une structure composite.

Il est important de garder sous surveillance les pièces mécaniques susceptibles d'être soumises à des chargements d'impact à faible vitesse afin d'éviter les conséquences désastreuses qui peuvent se produire en service. Par conséquent, le développement de méthodes efficaces, rapides, sensibles à l'endommagement et ne nécessitant pas un démontage des structures reste d'une grande importance. A cette fin, de nombreuses techniques de contrôle non destructif (CND) sont considérées dans la littérature [5]–[10]. Toutefois, le développement d'une procédure basée sur les techniques de CND permettant d'identifier l'emplacement du défaut, d'estimer les dimensions de l'indentation permanente en cas d'impact ainsi que de déterminer les mécanismes d'endommagement internes peut être d'une grande utilité. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude, elle présente une méthodologie d'évaluation du comportement d'un composite tissé à matrice thermoplastique soumis à un chargement en impact à différentes énergies en faible vitesse. Pour ce faire, des essais d'impact par poids tombant sont effectués. Les principaux objectifs sont d'analyser la réponse à l'impact, d'étudier la détectabilité de l'endommagement induit en utilisant des méthodes de CND et d'identifier les mécanismes d'endommagement résultants. Finalement un lien entre l'endommagement interne et l'endommagement apparent en surface (IP) est établi.

## 2. Matériau de l'étude

Le matériau utilisé dans cette étude est nommé Vizilon TM SB63GI-T1.5-S3 fabriqué par DuPont par thermocompression. Il s'agit d'un co-polyamide (matrice thermoplastique) 66/6 renforcé d'un tissu de fibres de verre. C'est un composite stratifié tissé sergé 2,2 composé de trois couches superposées dans le même sens, d'une épaisseur de 1,53 mm. La fraction de masse de fibres est de 63% et la fraction de volume de fibres 43%. La microstructure obtenue à l'aide de la micro-tomographie à rayons X est présentée dans la Fig. 1.

Les échantillons de dimensions 100 x 150 x 1,53 mm<sup>3</sup> sont découpés à l'aide d'une scie circulaire refroidie à l'eau conformément aux normes ASTM D7136/D7136M. L'état initial non endommagé a été vérifié pour tous les échantillons à l'aide d'imagerie C-scan en transmission. Les plaques ont été ensuite maintenues aux mêmes conditions initiales en termes de température (température ambiante) et d'humidité relative.

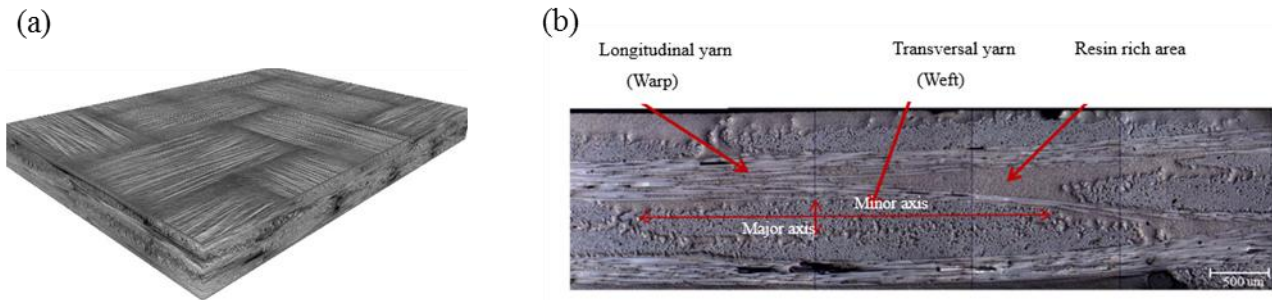


Fig. 1 : Architecture (a) et microstructure (b) du PA 66-6 renforcé de fibres de verre tissées détaillant l'orientation des torons.

### 3. Méthodologie expérimentale et résultats

#### 3.1. Essais d'impact à poids tombants

Les essais d'impact sont effectués à l'aide d'une tour de chute équipée d'un impacteur de 1,02 kg ayant une extrémité hémisphérique de 16 mm de diamètre. Le dispositif expérimental est constitué d'un capteur de force piézoélectrique, de deux capteurs de déplacement laser ainsi qu'un système d'acquisition de données. Les échantillons sont encastrés des deux extrémités et le projectile impacte les échantillons au centre. La flèche est ensuite mesurée sous l'échantillon par le biais d'un capteur de déplacement laser. Les données relatives au déplacement du projectile, du déplacement de la plaque ainsi que la force de contact sont acquises pour l'analyse de la réponse à l'impact du matériau d'étude. En effet, les données enregistrées à l'aide du capteur de déplacement de l'impacteur sont utilisées pour calculer la vitesse d'impact ainsi que l'énergie absorbée. Cette dernière correspond à la quantité d'énergie transférée du projectile à l'échantillon durant l'impact. Dans cette étude, cette énergie est donnée comme la différence entre l'énergie d'impact (calculée en utilisant la vitesse d'impact) et « l'énergie excessive » (calculée à l'aide de la vitesse de rebond). Toutes les vitesses calculées correspondent à la pente de la meilleure ligne droite ajustée à travers les valeurs réelles. La Fig. 2 présente un exemple où les vitesses sont estimées à l'aide d'une régression linéaire de la courbe déplacement-temps de l'impacteur pour l'échantillon impacté à 7,30 J. Les paramètres d'impact calculés sont énumérés dans le Tab. 1. Comme prévu, l'énergie absorbée augmente avec la hauteur d'impact et peut par la suite justifier la formation de l'endommagement.

Hauteur d'impact (m)	Vitesse d'impact (m/s)	Energie réelle d'impact (J)	Energie absorbée (J)
1	3,88	7,30	1,78
1,5	5,18	13,45	5,66
1,75	5,53	15,28	7,01
2	5,93	17,60	8,93

Tableau 1 : Paramètres d'impact à poids tombants : hauteur d'impact, vitesse d'impact, énergie réelle d'impact et énergie absorbée.

Fig. 3 représente (a) les courbes déplacement-temps et (b) force-temps respectivement pour les quatre niveaux d'énergie. Sur toutes les courbes (force et déplacement), un gap d'amplitude est observé entre la réponse à 7,30 J et le reste des courbes. Il convient de mentionner que dans la Fig. 3 (b), pour la courbe relative à 17,60 J, une régression s'avère indispensable en raison de difficultés

inhérentes à l'acquisition (saturation du capteur dans certaines parties de la courbe). Sur toutes les courbes de la Fig. 3 (a) des oscillations ainsi que des discontinuités à deux fréquences différentes sont observées. Le premier type d'oscillation peut être lié à la fréquence propre de l'impacteur dont la sévérité augmente si le montage des pièces constituant le projectile n'est pas rigide [11]. Le deuxième type d'oscillations correspond à la vibration de l'échantillon après impact. Il convient de noter que les deux types d'oscillations se produisent lors du contact initial entre l'impacteur et l'échantillon et pourront être liés à la création de l'endommagement [12].

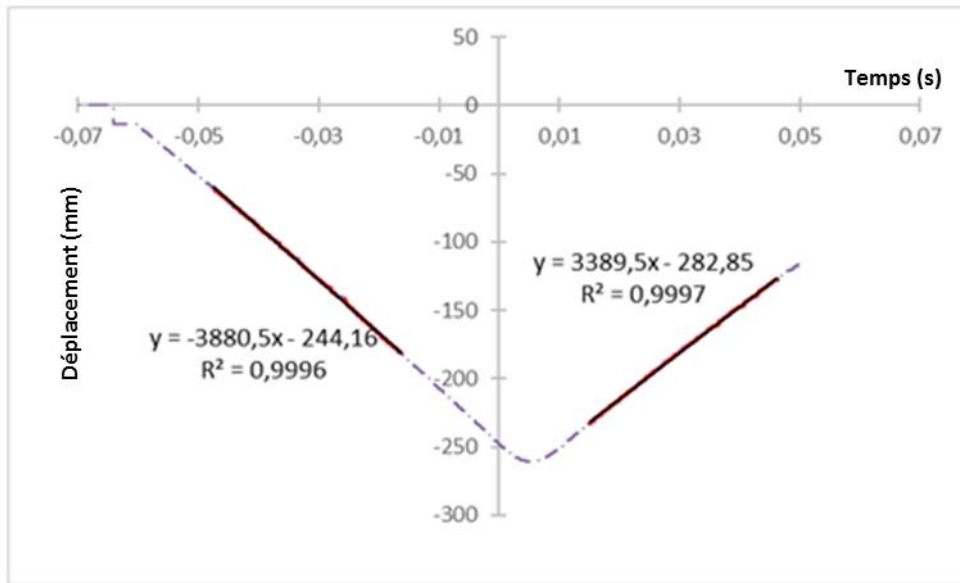


Fig. 2 : Courbe déplacement-temps pour l'échantillon impacté à 7,30 J détaillant la méthode suivie pour calculer l'énergie absorbée.

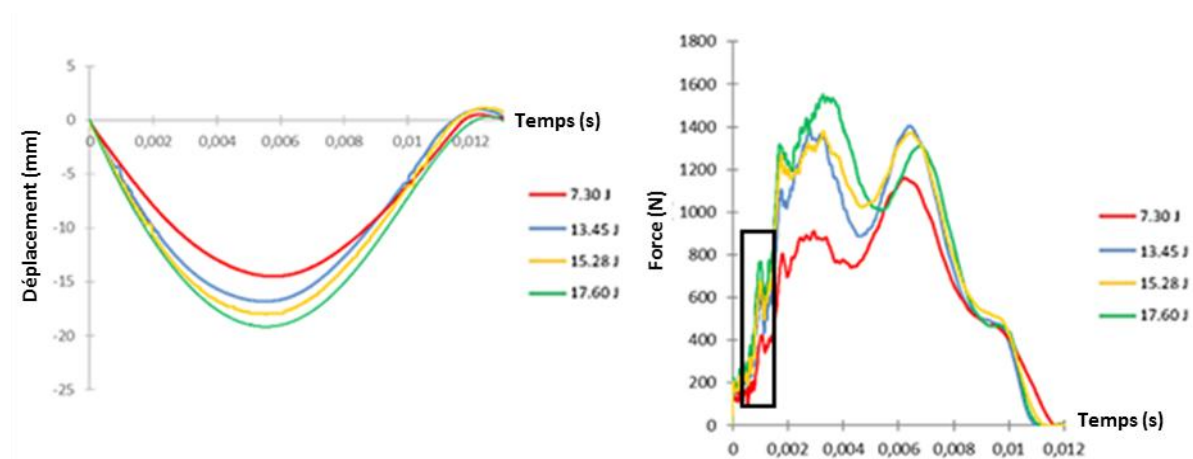


Fig. 3 : Courbes déplacement-temps (a) et force-temps (b) pour les quatre niveaux d'énergie.

Après impact, aucun endommagement visible n'est observé sur l'échantillon chargé à un niveau d'énergie de 7,30 J. Toutefois, sur les trois autres échantillons, les endommagements apparaissant sur la surface non impactée pourraient être observés à l'œil nu. Il convient de mentionner que tous les endommagements décrits dans cette section se produisent sur la face non impactée des plaques. En effet, comme mentionné dans la littérature [12], pour les plaques minces, l'endommagement est initié sur la face non-impactée à cause du phénomène de flexion.

Le premier niveau d'endommagement observé a eu lieu sur l'échantillon impacté à 13,45 J. Cet endommagement apparaît comme une petite ouverture sur la face non-impactée à peine visible à

l'œil nu. Une observation microscopique a permis de mesurer la dimension de cette ouverture et est de  $696,21 \mu\text{m}$  (Fig. 4). Toutefois, sur les échantillons impactés à  $15,28 \text{ J}$  et  $17,60 \text{ J}$ , des fissures apparaissent et se propagent dans le sens longitudinal et transversal menant à la rupture des fibres (Fig. 5).

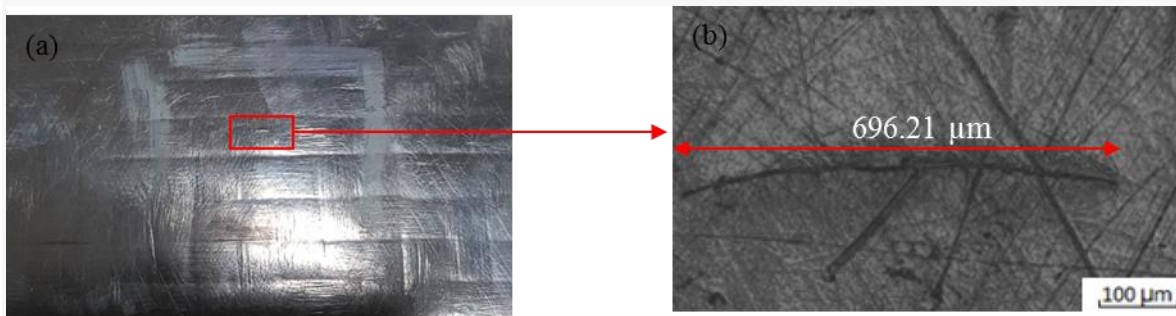


Fig. 4 : Observation macroscopique (a) et microscopique (b) de l'endommagement observé sur la face non-impactée de l'échantillon impacté à un niveau d'énergie de  $13,45 \text{ J}$ .

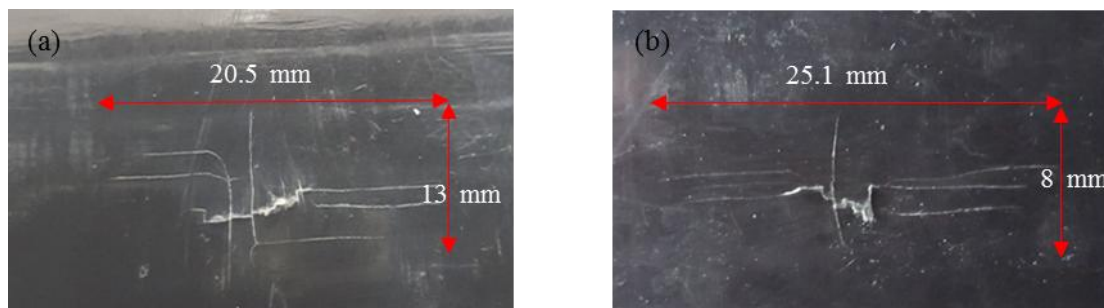


Fig. 5 : Dimensions de l'endommagement apparent sur la face non-impactée des échantillons impactés à des niveaux d'énergie de  $15,28 \text{ J}$  et  $17,60 \text{ J}$ .

### 3.2. Micro-tomographie à rayons X

La tomographie à rayons X est une méthode de contrôle non-destructif permettant la reconstruction 3D d'un volume à partir d'une série d'images radiographiques. Cette méthode consiste à émettre, d'une source fixe, un faisceau de rayons X pénétrant dans l'échantillon et qui est absorbé en fonction de sa densité. Le faisceau est ensuite capté sur un écran photosensible placé derrière l'échantillon. Chaque radiographie traduit l'atténuation du rayon qui traverse l'échantillon selon une direction. Une reconstruction des données enregistrées de chaque radiographie bidimensionnelle permet de reconstituer la structure de l'objet étudié en trois dimensions. Cette technique permet l'investigation des défauts à une précision de l'ordre de la taille des fibres (environ  $10 \mu\text{m}$ ).

Plusieurs mécanismes d'endommagement sont distingués sur le volume 3D reconstruit. La sévérité de l'endommagement augmente en fonction de l'énergie d'impact. Sur la plaque impactée à une énergie de  $7,30 \text{ J}$ , aucun endommagement n'est observé. En effet, une énergie d'impact de l'ordre de  $7,30 \text{ J}$  semble ne pas être suffisante pour causer de l'endommagement interne permanent dans le matériau. Les Fig. 7, 8 et 9 représentent les mécanismes d'endommagement observés pour les trois échantillons impactés à  $13,45 \text{ J}$ ,  $15,28 \text{ J}$  et  $17,60 \text{ J}$  respectivement. Sur la plaque impactée à  $13,45 \text{ J}$  (Fig. 6), seule une fissure de très petite dimension est retrouvée. Cependant, sur les deux autres plaques impactées à  $15,28 \text{ J}$  et  $17,60 \text{ J}$ , un endommagement plus prononcé est observé causant ainsi la rupture des fibres (Fig.7 et 8).



Le mécanisme d'endommagement principal détecté sur ces deux plaques est la fissuration de la matrice. En effet, les fissures se diffusent en épaisseur autour et au long des torons permettant la création du délaminage. Il est important de noter que dans un composite stratifié ayant des couches avec la même orientation de fibres, aucun délaminage ne peut se générer entre les différentes couches [12]. Cependant, un décollement entre les différents torons peut avoir lieu et est nommé pseudo-délaminage. Comme le montre les Fig. 7, 8, certaines fissures pénètrent dans les torons du deuxième pli et sont amorties par le troisième pli.

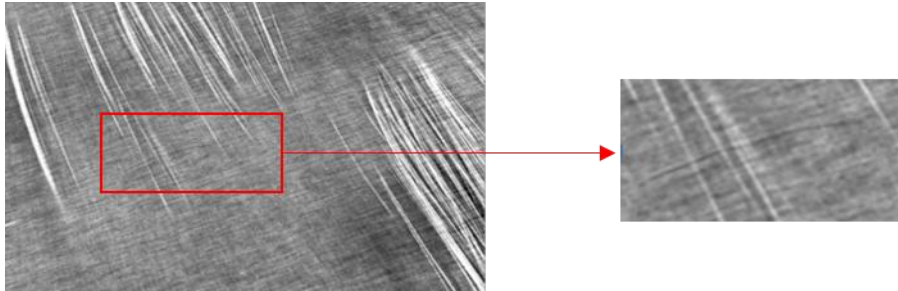


Fig. 6 : Observation du défaut figurant sur la face non-impactée de l'échantillon impactée à une énergie de 13,45 J.

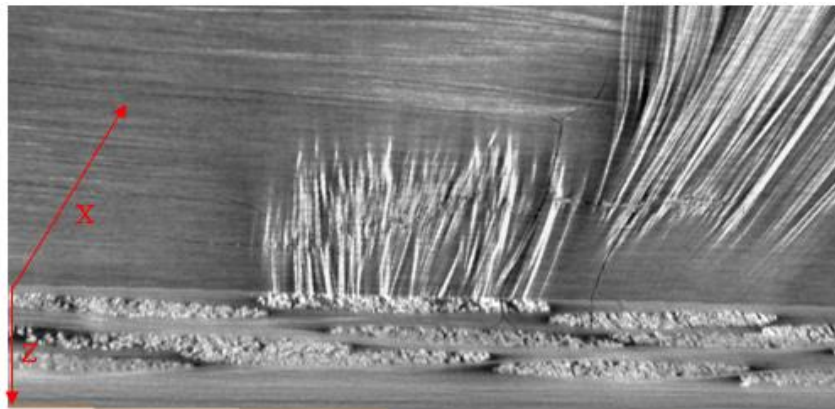


Fig. 7 : Observation par tomographie à rayons X sur l'échantillon impactée à 15,28 J montrant le réseau de fissures, la propagation des fissures en épaisseur ainsi que le délaminage.

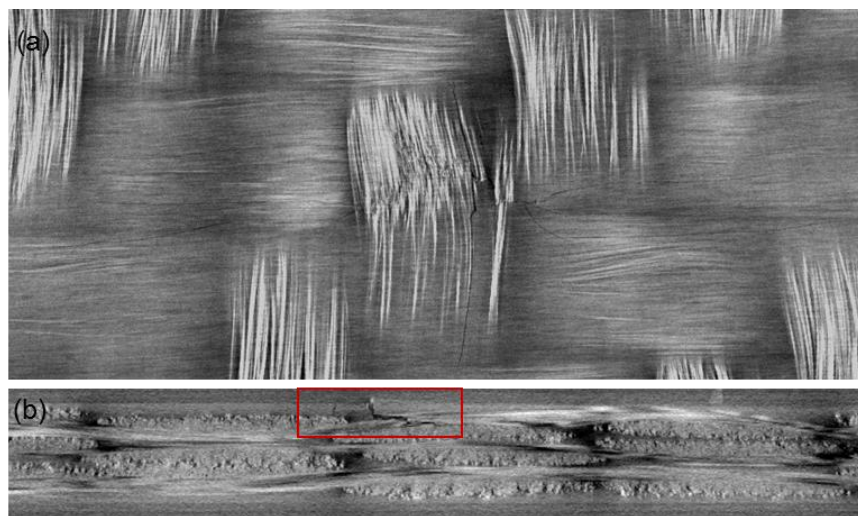


Fig. 8 : Observation par tomographie à rayons X sur l'échantillon impactée à 17,60 J montrant le réseau de fissures, la propagation des fissures en épaisseur ainsi que le délaminage.

### 3.3. Mesure de l'indentation permanente

#### 3.3.1. Mesure ultrasonore : Imagerie C-scan

La technique d'imagerie C-scan est utilisée pour détecter et caractériser l'endommagement dans les échantillons en composite. L'acquisition est réalisée par un robot 5 axes fabriqué par Inspection Technology Europe BV. Le signal est généré par un dual pulse-receiver DPR500 de JSR ultrasonics. Les données expérimentales sont enregistrées à l'aide du logiciel Winspect et sont ensuite post traitées sous Matlab. Les C-scan sont réalisés en réflexion sur une surface de 55 x 55 mm avec une résolution de 0,3 mm. Pour cela, un seul transducteur, agissant comme émetteur et récepteur, de 10 MHz est utilisé en immersion pour obtenir des informations relatives à l'indentation permanente. Ce transducteur émet une onde ultrasonore réfléchiée quand un défaut est rencontré. Il faut noter que pour cette configurations le scan suit un trajet serpentin avec une vitesse de déplacement de 20 mm/s suivant X et de 10 mm/s suivant Y. Le système (transducteur et plaques) est immergé dans l'eau qui, contrairement à l'air, a comme avantage un meilleur couplage ultrasonore.

La zone d'impact est obtenue en traçant le temps d'arrivé du premier pic positif de chaque signal correspondant à chaque point de la surface scannée. Les résultats sont représentés sous forme de cartographie codée sur une échelle de couleur qui montre une atténuation au niveau de la zone impactée. Par conséquent, le diamètre de l'indentation permanente peut être déduit. Après localisation du défaut, des mesures en imagerie B-scan sont ensuite réalisés. Afin d'expliquer la démarche suivie pour déterminer la profondeur de l'indentation permanente, la figure 9 (Fig. 9) représente une image B-scan dans la zone contenant l'empreinte pour l'échantillon impactée à un niveau d'énergie de 17,60 J. En multipliant la différence de temps d'arrivé du premier pic entre la partie impactée et non-impactée de la plaque par la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau (1478,8 m/s), la profondeur de l'empreinte peut être estimée.

Une augmentation importante de la profondeur et du diamètre de l'indentation permanente est remarquée entre les échantillons impactés à 13,45 J et 15,28 J respectivement. Toutefois, une légère différence entre les plaques impactées à 15,28 J et 17,60 J est notée. Cependant, il est important de signaler que la mesure de l'indentation permanente par ultrasons comporte une incertitude importante (Tab. 2).

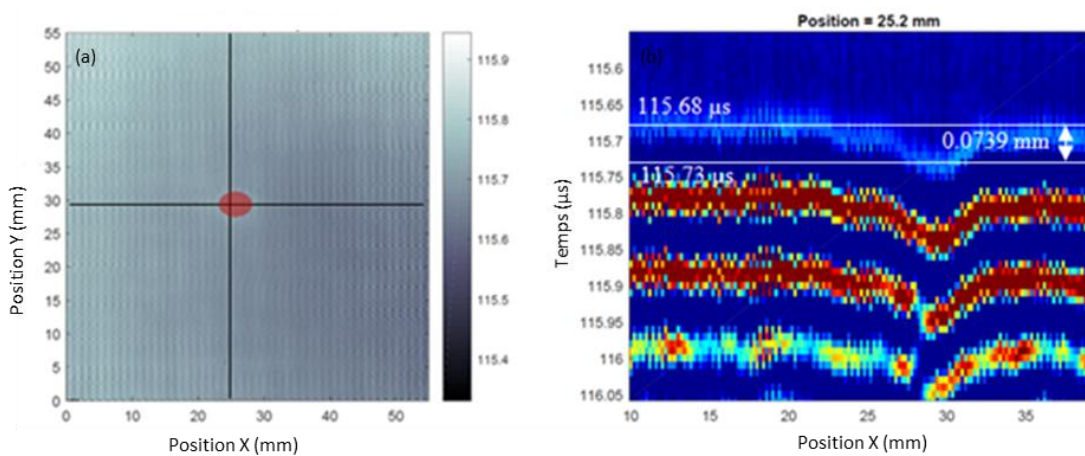


Fig. 9 : (a) C-scan représentant le temps d'arrivé du premier pic positif, (b) B-scan montrant la méthode de mesure de la profondeur de l'indentation permanente pour la plaque impactée à 17,60 J.

Energie d'impact	7,30 J	13,45 J	15,28 J	17,60 J
Diamètre (mm) ± 0.2 mm	-	3	6,4	6,8
Profondeur (µm) ± 7 µm	-	23	44	37

Tab. 2 : Valeurs des dimensions de l'indentation permanente pour les quatre échantillons impactés à 7,30 J, 13,45 J, 15,28 J et 17,60 J.

### 3.3.2. Mesure de l'indentation permanente par profilométrie optique 3D

La profilométrie optique 3D est ensuite effectuée pour valider les mesures obtenues dans la section précédente en utilisant le LEICA DCM3D avec un grossissement x5 sur une surface de 27 x 20,23 mm. Chaque échantillon est scanné par des pas prédéfinis au cours desquels chaque point de la surface traverse le plan focal. Le grossissement choisi conduit à une résolution le long de X et Y de 0,94 µm, et à une résolution verticale inférieure à 150 nm. Les données brutes sont ensuite post-traitées à l'aide du logiciel Leica Maps comme montré sur la Fig. 10. Un filtre est appliqué pour bien définir le contour de l'indentation permanente qui permet par la suite la mesure du diamètre. Le profil est ensuite extrait à partir de la ligne correspondant à la zone la plus profonde. Le volume de l'indentation permanente peut être calculé en sélectionnant le contour de la zone précédemment isolée. L'ensemble des valeurs obtenues en suivant cette procédure sont données dans le Tab. 3.

Une comparaison entre les résultats fournis par les deux méthodes, ultrasons et profilométrie optique, est établie et représentée dans la Fig. 11. La comparaison montre une bonne corrélation entre les deux méthodes ainsi qu'une précision satisfaisante pour les mesures par ultrasons.

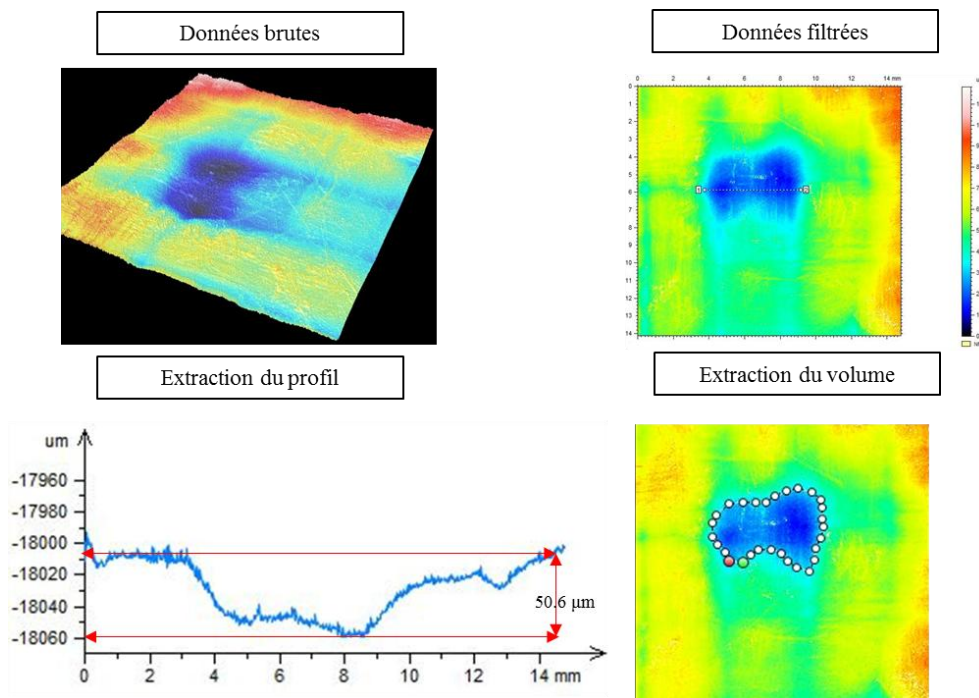


Fig. 10 : Procédure détaillée de la mesure des paramètres de l'indentation permanente pour l'échantillon impacté à 15,28 J : (a) données brutes, (b) données filtrées, (c) extraction du profil et (d) extraction du volume.



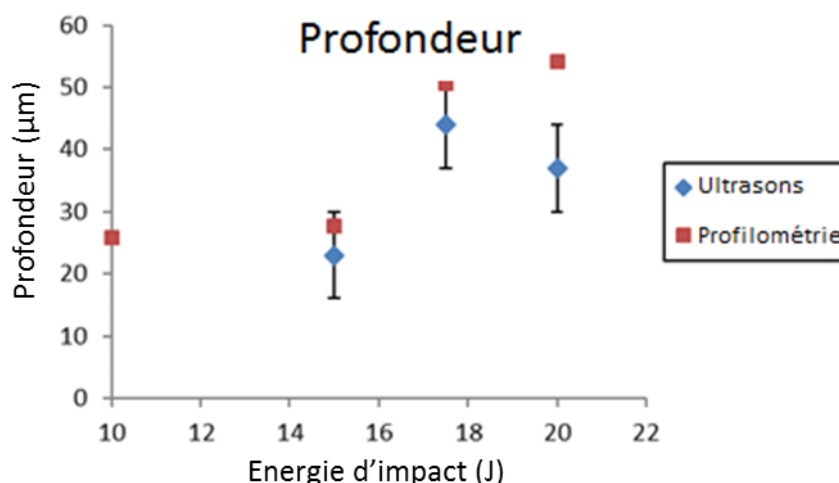


Fig. 11 : Comparaison entre les résultats obtenus par mesures ultrasonores et par profilométrie optique 3D pour les quatre échantillons impactés à 7,30 J, 13,45 J, 15,28 J et 17,60 J.

Energie d'impact (J)	7,30	13,45	15,28	17,60
Diamètre (mm) ±0,94 μm	2,09	1,92	5,10	5,77
Profondeur (μm) ±0,130 μm	25,8	27,6	50,6	54,1
Volume de l'indentation permanente (10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> )	35,6	37,2	138	107

Tab. 3 : Profondeur, diamètre et volume de l'indentation permanente mesurés en utilisant la profilométrie optique,

### 3. Synthèse et conclusion

Les techniques de contrôle non-destructif utilisées, l'analyse connexe discutée et les résultats présentés ci-dessous mènent aux conclusions suivantes :

- Pour l'échantillon impacté à une énergie de 7,30 J, aucun endommagement n'est détecté par tomographie à rayons X et par C-scan. Par conséquent, lors de la mesure de l'indentation permanente par ultrasons, aucun changement de la surface touchée n'est observé,
- Pour les trois autres énergies d'impact, 13,45 J, 15,28 J et 17,60 J, l'énergie absorbée et calculée croît indiquant la création de l'endommagement. Cette hypothèse est vérifiée par une inspection visuelle mettant en évidence une petite ouverture sur la face non-impactée pour l'échantillon chargé à 13,45 J et est validée par μCT confirme que l'endommagement observé est en effet superficiel. Un endommagement plus important est détecté pour les échantillons ayant subi un impact à 15,28 J et 17,60 J. Ainsi, les fissures s'étendant jusqu'à la deuxième couche du composite sont observées. Ces dernières se propagent à travers la matrice pour ensuite conduire à la rupture des fibres et ainsi la création du délaminage. Sur la face impactée, la mesure de l'indentation permanente par ultrasons montre une augmentation importante à partir de 15,28 J comme énergie d'impact. La vérification de ces mesures par profilométrie optique conduit à un accord entre les deux méthodes utilisées,

En identifiant l'endommagements résiduels sur les deux surfaces, impactées et non impactées, et en épaisseur, un lien entre l'énergie absorbée, les dimensions de l'empreinte et les endommagements internes peut être établi. En effet, en mesurant l'indentation permanente, les mécanismes d'endommagement qui en résultent ainsi que le degré de propagation en épaisseur peuvent être prédit,

## Remerciements

Le présent travail a été financé par Groupe PSA et réalisé dans le cadre de l'OpenLab Materials and Processes. Cet OpenLab réunit le Groupe PSA, les Arts et Metiers ParisTech et Georgia Tech Lorraine.

Les auteurs tiennent à remercier DuPont de Nemours pour son soutien et pour avoir fourni le matériau de cette étude.

## Références

- [1] A. Patil, A. Patel, and R. Purohit, "An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 3807–3815, 2017.
- [2] T. Ishikawa, K. Amaoka, Y. Masubuchi, and T. Yamamoto, "Overview of automotive structural composites technology developments in Japan," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 155, pp. 221–246, 2018.
- [3] R. L. Sierakowski and G. M. Newaz, *Damage tolerance in advanced composites*, First edit. 1995.
- [4] D. Hull and Y. B. Shi, "Damage mechanism characterization in composite damage tolerance investigations," *Compos. Struct.*, vol. 23, no. 2, pp. 99–120, 1993.
- [5] A. Maier, R. Schmidt, B. Oswald-Tranta, and R. Schledjewski, "Non-Destructive Thermography Analysis of Impact Damage on Large-Scale CFRP Automotive Parts," *Materials (Basel)*, vol. 7, pp. 413–429, 2014.
- [6] A. Ravikara, N.K. Venkataramanaiah, M. R. Bhat, and C. R. L. Murthy, "Detection and Evaluation of Impact damage in CFRP Laminates Using Ultrasound C-Scan and IR Thermography," in *National seminar on non-destructive Evaluation*, 2006.
- [7] P. Margueres, F. Meraghni, and M. L. Benzeggagh, "Comparison of stiffness measurements and damage investigation techniques for a fatigued and post-impact fatigued GFRP composite obtained by RTM process," *Compos. part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, pp. 151–163, 2000.
- [8] P. Marguères and F. Meraghni, "Damage induced anisotropy and stiffness reduction evaluation in composite materials using ultrasonic wave transmission," *Compos. Part A*, vol. 45, pp. 134–144, 2013.
- [9] P. Pomarède, "Détection de l'endommagement dans un composite tissé PA66,6/Fibres de verre à l'aide de techniques ultrasonores en vue d'une prédiction de la durabilité de pièces automobiles," ENSAM ParisTech, 2018.
- [10] S. Eckel, F. Meraghni, P. Pomarède, and N. F. Declercq, "Investigation of Damage in Composites Using Nondestructive Nonlinear Acoustic Spectroscopy," *Exp. Mech.*, 2016.
- [11] A. Gliszczynski, T. Kubiak, P. Rozylo, P. Jakubczak, and J. Bieniaś, "The response of laminated composite plates and profiles under low-velocity impact load," *Compos. Struct.*, vol. 207, no. August 2018, pp. 1–12, 2019.
- [12] Serge Abrat, *Impact on composite structures*. Cambridge: Cambridge university Press, 1998.