

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Evaluation non destructive de la tenue mécanique d'assemblages collés par ondes de choc intenses générées par laser**

M. Ducouso<sup>a</sup>, S. Bardy<sup>b</sup>, Y. Rouchausse<sup>c</sup>, T. Bergara<sup>d</sup>, L. Berthe<sup>c</sup>, L. Videau<sup>b</sup>, F. Jenson<sup>a</sup> et N. Cuvillier<sup>a</sup>

<sup>a</sup>SAFRAN, Rue des Jeunes Bois - Châteaufort, Pole TSI - Mathieu Ducouso, 78772 Magny Les Hameaux, France

<sup>b</sup>CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

<sup>c</sup>Laboratoire Procédés et Ingénieries en Mécanique et Matériaux, 151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France

<sup>d</sup>Rescoll, 8 Allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33600 Pessac, France  
mathieu.ducouso@safrangroup.com

On présente dans ce travail l'évaluation non destructive de la tenue mécanique d'assemblages collés structuraux. Celle-ci est faite par procédé de choc laser. Ce procédé consiste à illuminer l'assemblage considéré avec un laser ns très intense de manière à sublimer sa surface en un plasma de haute pression. La détente de ce plasma permet de créer une onde de choc par principe d'action/réaction qui se propage alors dans le volume de la structure assemblée. Après avoir parcouru son épaisseur, l'onde de choc se réfléchit en face arrière avec un changement de phase, donnant alors naissance à une onde de traction. Celle-ci en parcourant à nouveau l'épaisseur de la structure assemblée va exercer une traction sur le joint de colle. Si le collage a une tenue mécanique supérieure à la traction exercée celui-ci ne sera pas affecté par l'onde de traction alors que si sa tenue mécanique est inférieure à la pression de traction le collage va céder. Les matériaux assemblés dans ces travaux sont du Ta6V4 et un composite à matrice organique obtenu par procédé d'injection sous pression. La colle liant les deux matériaux est une colle structurale époxy en film à très haute tenue mécanique (supérieure à 30 MPa en cisaillement simple). Les mesures expérimentales sont en très bonne adéquation avec les simulations physiques réalisées. Ces résultats ouvrent la voie pour un procédé non destructif de certification des collages, que ce soit en production ou en maintenance. Des extensions d'applications, pour le démantèlement des collages, la conception de cale de références en composite pour les procédures de contrôles non destructifs et la validation des méthodologies de SHM seront aussi présentées.

## 1 Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans de nombreux secteurs industriels de pointe. Ainsi, dans le secteur des énergies, les composites à matrice organiques (CMO) permettent de réaliser des éoliennes aux dimensions toujours plus grandes et les composites à matrices céramiques (CMC) de faire des réparations par patch collés dans les centrales nucléaires. Dans le secteur des transports, l'utilisation des matériaux composites pour réduire le poids des avions – et ainsi réduire leur empreinte carbone - semble inévitable.

Une des limitations majeures à une utilisation encore plus vaste de ces matériaux concerne leur assemblage. En effet, étant en général de faible épaisseur, ils ne peuvent que difficilement être rivetés, vissés ou cloutés pour des raisons de concentrations locales de contraintes qui pourraient mener à la ruine de la structure. Il est donc préférable de les assembler avec un procédé surfacique. Ne pouvant être soudés, le procédé de collage apparaît finalement comme étant stratégique pour ce besoin.

Le contrôle de la qualité de l'assemblage par collage est un point stratégique pour un bon déploiement de cette activité et donc une plus grande généralisation de l'utilisation des matériaux composites. En effet, souvent, un collage ne peut être structural que si la tenue mécanique de l'assemblage collé peut être garantie.

En comparaison des assemblages mécaniques classiques, la qualité de l'assemblage par collage peut être fortement dispersive du fait de la dépendance de ce processus à l'environnement extérieur, à l'histoire propre des structures assemblées et au procédé intrinsèque de collage. Ainsi, la tenue mécanique d'un assemblage collé pourra dépendre de paramètres chimiques (traitement de surface avant collage, pollutions de surface, ...), physiques (réticulation de la colle, épaisseur du joint de colle, ancrage,...) mais aussi morphologiques (éventuelles porosités, vieillissement, ...). [1]

Cette myriade de causes possibles de défaillance de la tenue d'un collage implique que son évaluation non destructive apparaît comme étant une des plus délicates qui soit.

A peu près toutes les méthodes physiques sont explorées pour répondre à ce besoin, aussi une revue exhaustive de la bibliographie ne sera pas réalisée dans ce document et le

lecteur intéressé pourra éventuellement lire [1] pour se faire une idée plus précise. Les approches ultrasonores et thermiques semblent particulièrement prometteuses parmi cet éventail de méthodes cependant, aucune de celles-ci ne semble apte à proposer un contrôle global et exhaustif de la tenue mécanique de l'assemblage collé. [3] [4]

Dans ces travaux, nous utilisons le procédé de choc laser pour réaliser un contrôle quantitatif de la tenue mécanique d'un assemblage collé. [5] [6] Le collage d'intérêt est un assemblage mixte, de type Composite/Ta6V4, assemblé par une colle structurale époxy à hautes performances mécaniques. Nous présenterons dans un premier temps les assemblages collés et leurs caractéristiques structurales. Deux niveaux de tenues mécaniques différentes sont obtenus par modulation de la réticulation de la colle. Le contrôle de ceux-ci par procédé de choc laser sera ensuite abordé. Ce collage étant mixte, les deux configurations offertes (le laser éclaire le Ta6V4 et le laser éclaire le composite) seront étudiées. Ces études permettront de quantifier la tenue mécanique de l'assemblage en régime de choc laser. Ces quantifications seront comparées aux seuils de résistances des matériaux de l'assemblage afin de vérifier le caractère non destructif de la procédure mise en place.

## 2 Présentation des collages

### 2.1 Morphologie générale

Dans cette étude, 4 collages plans et présentant la même géométrie seront utilisés. Ils sont composés d'une plaque de Ta6V4 de 0,4 mm, collée à un matériau composite de 3,8 mm par un joint de colle d'épaisseur approximative de 0,15 mm. Les dimensions latérales des assemblages sont de 240 x 40 mm<sup>2</sup>. Le composite est un matériau dit « tissé 3D » obtenu par procédé d'injection de résine (RTM). Pour ce matériau, le renfort est un tissage tridimensionnel de torons de fibres de carbone et la matrice est une base époxy. Avant collage, les surfaces sont nettoyées et dégraissées avec de l'éthanol. Un cadre de Tisoflon (5 mm de largeur) est appliqué sur les collages, pour contrôler l'épaisseur de joint de colle et prévenir les pertes de colles lors de la réticulation de celle-ci. Les assemblages ainsi réalisés sont mis en pression en utilisant 4 pinces de collage, dont la pression nominale de chacun est de 65 N.

## 2.2 Tenues mécaniques

Deux tenues mécaniques différentes ont été obtenues par modulation de la cuisson des assemblages. En effet, deux des quatre assemblages ont été polymérisés pendant 90 mn à 125°C alors que les deux autres assemblages ont subi une polymérisation de 150 mn à 150°C. Pour les deux cycles de réticulations, les rampes de montées et de descentes en température sont de deux degrés par minutes. Ces deux cycles de polymérisations différents ont permis de réticuler la colle à 50 % pour le cycle le plus court et à 90 % pour le plus long.

La tenue mécanique des assemblages ainsi obtenus a été quantifiée par essais destructifs sur coupons ayant subi le même protocole expérimental de collage. Les essais destructifs menés sont des essais normés de cisaillement simple [7] et de traction longitudinale. [8] Les tenues structurales de l'assemblage réticulé à 50 % sont de 15 MPa en cisaillement simple et 10 MPa en traction longitudinale. Les tenues structurales de l'assemblage réticulé à 90 % sont de 35 MPa en cisaillement simple et 39 MPa en traction longitudinale. Les profils de ruptures obtenus sont adhésifs pour la tenue mécanique la plus faible et cohésifs pour la tenue la meilleure.

## 3 Procédé de choc laser avec focalisation en surface du titane

### 3.1 Simulations

Les simulations du procédé de choc laser sont réalisées dans cette étude avec le code Esther. [6] [9] Ce logiciel de simulations est développé par le CEA. Il s'agit d'un logiciel de simulation Lagrangien unidimensionnel qui permet de modéliser l'interaction laser-matière et la propagation acoustique non linéaire. L'interaction laser-matière est modélisée en résolvant l'équation de Helmholtz [10] et la propagation acoustique est modélisée en résolvant les équations de Navier-Stokes avec une loi de comportement de Steinberg-Cochran-Guinan pour modéliser la propagation acoustique dans le Ta6V4 [11] et une loi de comportement de Mie-Grüneisen pour ce qui concerne la modélisation dans la colle et dans le composite. [12] Le composite est ici considéré comme étant un matériau homogène.

On considère tout d'abord la simulation d'une expérimentation où le faisceau laser illumine la surface du Ta6V4. Cette simulation est réalisée pour une densité d'énergie laser de 3 GW/cm<sup>2</sup> et une durée d'impulsion laser de 7 ns. Ces paramètres sont représentatifs des expérimentations réalisées par la suite. La Figure (1.a) représente le champ de pression résultant du choc laser en fonction de l'espace et du temps. La Figure (1.b) présente les contraintes aux interfaces du joint de colle en fonction du temps. L'interface Ta6V4/colle est représentée en bleu et l'interface colle/composite est représentée en rouge. Un grossissement de la figure sur les premières 1500 ns est aussi présenté en encart.

Le signal haute fréquence, de l'ordre de 80 MHz, est liée à l'onde de choc se réfléchissant à de multiples reprises dans le Ta6V4. En effet, le coefficient de réflexion à l'interface Ta6V4/époxy étant autour de 0,8 la majorité du

signal acoustique est piégée dans le Ta6V4. Néanmoins, chaque réflexion à cette interface est aussi accompagnée par une transmission qui va permettre la propagation d'une onde de choc dans le volume de l'assemblage.

Le profil des contraintes aux deux interfaces, très similaire, est lié au fait que l'onde de choc, générée au voisinage immédiat de ces interfaces a une longueur d'onde de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ . Cette longueur d'onde, inférieure à l'épaisseur du joint de colle, permet donc de résoudre spatialement celui-ci.

La Figure 1 permet aussi de quantifier la traction exercée sur le joint de colle (pression négative) et de visualiser son historique. Ainsi, dans cette simulation, la traction exercée sur le joint de colle est de -0,25 GPa. Cette traction est exercée par une onde de choc qui a traversé l'interface Ta6V4/colle, 2 fois l'interface Colle/composite, s'est réfléchi à la surface libre du composite, parcourue deux fois l'épaisseur du composite et une fois celle du Ta6V4.

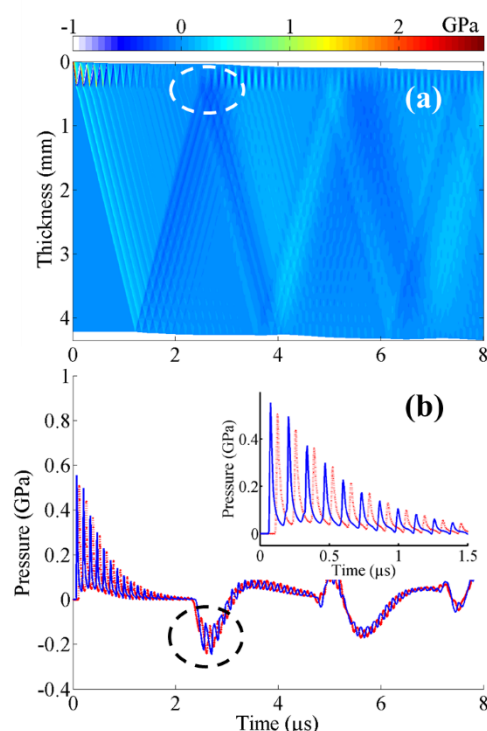


Figure 1: Simulations Esther de la propagation acoustique engendrée dans un assemblage mixte en éclairant la surface du métal. (a) Champ de pression en fonction de l'espace et du temps. (b) Pressions exercées au niveau des interfaces du joint de colle (code couleur explicité dans le corps de texte).

### 3.2 Expérimentations

Des expérimentations ont été réalisées sur les collages présentant les deux tenues mécaniques différentes avec un éclairage laser à la surface du Ta6V4. Ces expérimentations ont été réalisées sur la plateforme Héphaïstos du PIMM (ENSAM Paris). Le laser émet des impulsions de 7 ns focalisée sur un disque de 6 mm de diamètre à 532 nm. L'énergie maximale atteignable est de 14 J. La vitesse particulière de l'onde de choc est enregistrée pour ces expérimentations avec une détection de vélocimétrie hétérodyne (VH).

Le principe de ces expérimentations consiste à éclairer les assemblages présentant les deux tenues mécaniques différentes avec des énergies laser allant de 10 % jusqu'à l'énergie maximale atteignable sur Héphaïstos. Les incréments sont par pas de 10%. Après expérimentations, un contrôle ultrasonore en transmission à 15 MHz est effectué pour détecter un éventuel décollement.

Une comparaison entre la simulation Esther de la détection de VH et les expérimentations est présentée sur la Figure 2.

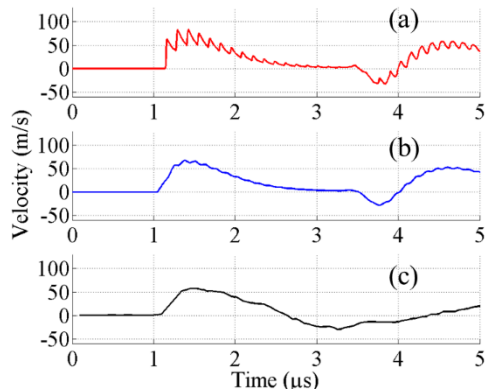


Figure 2: (a) Simulation de la détection VH pour une énergie laser incidente de 3 GW/cm<sup>2</sup> focalisée sur un disque de 6 mm de diamètre en surface du Ta6V4. Résolution temporelle de 0,1 ns. (b) convolution de (a) avec un filtre passe bande de manière à obtenir la même résolution temporelle que lors des expérimentations (50 ns), présentées en (c).

La Figure (2) présente une comparaison entre des simulations (a-b) réalisées avec le code Esther et une détection expérimentale de VH (c). Sur la Figure (2.a), la résolution temporelle de 0,1 ns permet de résoudre le signal acoustique associé aux multiples réflexions acoustiques dans le Ta6V4. Le signal présenté en (a) a ensuite été convolué de manière à avoir une résolution temporelle égale à la résolution temporelle expérimentale, de 50 ns. La simulation et les expérimentations sont alors similaires ; le temps de montée du signal de VH et son amplitude étant comparable. Néanmoins, le signal simulé change de signe plus tard que le signal expérimental. Cela est probablement lié à la nature hétérogène du matériau composite par rapport à la simulation qui considère un matériau homogénéisé et à des effets 2D qui ne peuvent être modélisés à ce stade.

Les seuils de décollement ont ensuite été identifiés. Pour l'assemblage de moindre tenue mécanique, un décollement apparaît pour des énergies laser à partir de 3,2 GW/cm<sup>2</sup> alors que le collage de meilleure tenue mécanique est endommagé à partir d'énergies laser de 5,2 GW/cm<sup>2</sup>. Les deux tenues mécaniques sont donc bien discriminées.

## 4 Procédé de choc laser avec focalisation en surface du composite

### 4.1 Simulations

On considère à présent une illumination laser à la surface du composite. Les paramètres laser de simulations sont inchangés. Les simulations du champ de pression engendré dans l'assemblage et les pressions aux interfaces

du joint de colle sont présentés sur la Figure 3. Les mêmes codes couleurs et principes de représentations que dans la Figure 1 sont respectés.

Comparativement avec la simulation précédente, le signal haute fréquence de 80 MHz est de bien plus faible amplitude. Au premier ordre cela est dû au fait que l'interface colle/Ta6V4 doit être franchie avant que celui-ci puisse naître or, pour rappel, le coefficient de réflexion à cette interface est de l'ordre de 0,8.

Considérant la pression aux interfaces du joint de colle (encart de la Figure (3.b)), on observe à présent que le signal acoustique est significativement différent d'une interface à l'autre. Cette différence provient de la longueur d'onde de l'onde de choc considérée : lors de la génération, cette onde de choc à une longueur d'onde de l'ordre de 200 μm mais, après avoir parcouru environ 3,8 mm de composite cette longueur d'onde a augmenté jusqu'à 400 μm. A cette longueur d'onde les interfaces du joint de colle de 150 μm d'épaisseur ne peuvent être résolues comme précédemment d'où les différences de morphologies des signaux simulés.

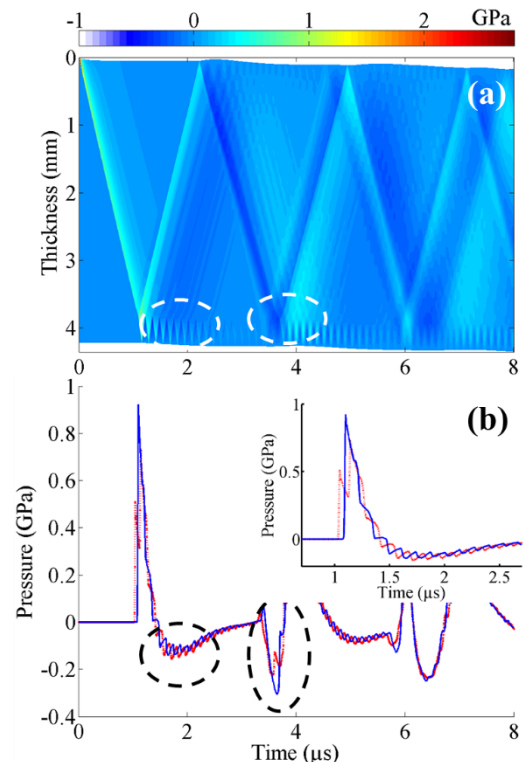


Figure 3: Simulations Esther de la propagation acoustique engendrée dans un assemblage mixte en éclairant la surface du composite. (a) Champ de pression en fonction de l'espace et du temps. (b) Pressions exercées au niveau des interfaces du joint de colle en fonction du temps.

Enfin, comme précédemment, on quantifie les tractions exercées au niveau du joint de colle et nécessaires au procédé pour contrôler la tenue mécanique des assemblages collés. On remarque que deux tractions apparaissent dans les 4 premières μs. La première traction, de -0,15 GPa, apparaît à 1,5 μs et est associée à une onde de choc qui a parcouru l'épaisseur du composite, a été transmise aux interfaces du joint de colle, s'est réfléchi à la surface libre du Ta6V4 et a été à nouveau transmise à l'interface Ta6V4/colle. La seconde traction, de -0,30 GPa, est associée à une onde de choc qui a parcouru 3 fois



l'épaisseur du composite, a été transmise 3 fois à l'interface composite/colle, réfléchi 1 fois à l'interface colle/Ta6V4 et une fois à la surface libre du composite. Bien que l'historique acoustique de cette dernière traction soit plus riche que celui associé à la première traction, son intensité est bien plus importante. Cela est dû au fait que l'onde de choc associée à cette seconde traction n'a pas eu à franchir l'interface colle/Ta6V4. De la même manière, cette seconde traction de  $-0,30$  GPa est plus intense de 20% que la traction décrite dans la section 3.1 à  $0,25$  GPa.

## 4.2 Expérimentations

Le même principe d'expérimentations que celui décrit dans la section 3.2 a été réalisé. On présente sur la Figure 4 les résultats de simulations, avec une résolution temporelle de  $0,1$  ns (a) et de  $50$  ns (b) ainsi que la détection expérimentale (c).

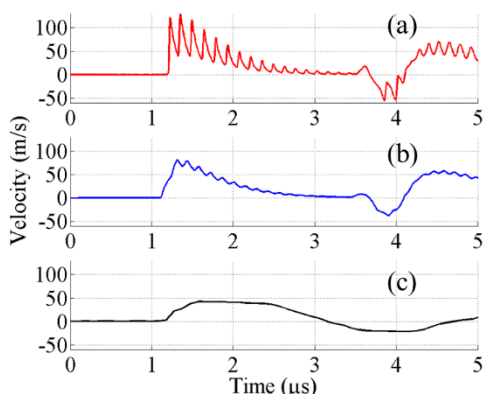


Figure 4: Détection VH obtenue lorsque l'on éclaire le composite. Simulations (a-b) et expérimentations (c). Comme pour la Figure 2, (a) contient un signal avec une résolution temporelle de  $0,1$  ns alors que les résolutions temporelles de (b) et (c) sont de  $50$  ns.

A nouveau, on illustre sur la Figure 4 l'importance de la résolution temporelle pour la détection des phénomènes engendrés dans ces études. Ainsi, la résolution expérimentale de  $50$  ns (b-c) n'est pas suffisante pour résoudre l'ensemble des phénomènes engendrés et présentés sur la Figure (4.a). La comparaison des Figures (4.b) et (4.c) paraît moins favorable que celle proposée sur la Figure 2. La différence majeure provenant du type de matériau illuminé, il est possible que la génération acoustique soit significativement plus complexe sur matériau composite. Cela pourrait être lié à la nature hétérogène du composite au niveau de la surface éclairée. Néanmoins, les ordres de grandeurs des vitesses particulières en faces arrière sont respectés et le changement de signe du signal, autour de  $4 \mu\text{s}$  est en bon accord.

Finalement, les seuils de décollement ont été identifiés selon le même protocole que précédemment. L'assemblage de faible tenue mécanique est endommagé pour des énergies laser à partir de  $2,25$  GW/cm<sup>2</sup> alors que l'assemblage de meilleure tenue mécanique résiste à des énergies laser jusqu'à  $4,2$  GW/cm<sup>2</sup>.

## 5 Analyse des résultats obtenus

On propose à présent une analyse des résultats obtenus dans les deux configurations d'illumination : le collage de moindre tenue mécanique a été endommagé pour des énergies laser de  $3 \pm 0,5$  GW/cm<sup>2</sup> alors que le collage de meilleure tenue mécanique a été endommagé pour des énergies laser de  $5 \pm 0,5$  GW/cm<sup>2</sup>. A ce stade, on vérifie donc bien que le procédé de choc laser a permis de discriminer les deux tenues mécaniques, quel que soit le matériau de l'assemblage que l'on éclaire. Ce premier résultat est d'un intérêt majeur puisque qu'il illustre un intérêt industriel direct : un collage faible – mais de tenue mécanique importante tout de même puisqu'il s'agit de tenues mécaniques représentatives de celles que l'on trouve dans les assemblages du transport terrestre par exemple – a été détecté par la procédure de choc laser mise en place.

On propose cependant d'aller plus loin que ce résultat basé uniquement sur les expérimentations et d'utiliser le code de simulation Esther pour résoudre le problème inverse et quantifier la traction exercée au milieu du joint de colle dans les 4 configurations expérimentales présentées. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. On identifie alors uniquement deux seuils de traction dans le joint de colle pour endommager le collage, à  $305 \pm 25$  MPa et  $255 \pm 25$  MPa. Ainsi, les différences d'énergies laser requises pour endommager un collage d'une tenue mécanique donnée en fonction de la surface éclairée sont bien dues aux différents phénomènes acoustiques identifiés précédemment à la lumière des simulations réalisées.

Tableau 1: Fluence laser nécessaire pour endommager les collages considérés et tractions correspondantes simulées avec Esther au milieu du joint de colle. Les intervalles d'erreurs sont déterminés à partir des pas d'incrémentaux expérimentaux de fluence laser utilisée.

Tenue mécanique	Bonne		Dégradée	
	Ta6V4	Comp.	Ta6V4	Comp.
Surface éclairée				
Fluence laser (GW/cm <sup>2</sup> )	5.2	4.2	3.2	2.25
Traction dans le joint de colle (MPa)	$310 \pm 20$	$300 \pm 20$	$260 \pm 20$	$250 \pm 20$

## 6 Vérification de l'innocuité du procédé pour le matériau composite

### 6.1 Seuils d'endommagement

Des expérimentations ont été réalisées sur composites monolithiques pour identifier le seuil d'endommagement du matériau. Ce seuil est identifié à partir de la détection de la VH et de micro-tomographies réalisées après expérimentations. Un micro-endommagement des composites est commencé à être détecté pour des fluences

laser de 4 GW/cm<sup>2</sup>. L'épaisseur des composites considérée ici étant de 3 mm, une comparaison de seuils d'endommagement en terme de fluence laser n'est pas judicieuse. Esther est donc à nouveau utilisé pour résoudre le problème inverse et quantifier la traction maximale associée à ce seuil d'endommagement. Celui-ci est quantifié autour du GPa donc significativement au-dessus des tractions nécessaires au contrôle des collages.

## 6.2 Test de compression après impact

L'innocuité du procédé pour le matériau composite a aussi été contrôlée avec un essai normé de compression après impact. [13] Les essais sont réalisés sur un composite monolithique. Le principe consiste à éclairer les matériaux avec la plus forte intensité laser possible (6 GW/cm<sup>2</sup> sur une zone de diamètre 6 mm). Un lot de trois échantillons a été éclairé avec 1 impulsion laser, alors qu'un second lot de trois échantillons a été éclairé avec trois impulsions laser au même endroit et un lot final de 3 échantillons toujours a été éclairé avec 5 impulsions laser au même endroit. Un lot de référence de 4 échantillons non éclairés par le laser sert de référence d'étalonnage.

Après impacts laser, les échantillons ont été contrôlés en ultrasons (immersion, réflexion à 15 MHz) et en tomographie (Voxel de 8 µm). Aucun endommagement n'a été détecté pour les échantillons illuminés une seule fois et des micro-endommagements ont été détectés pour les échantillons éclairés plusieurs fois. On rappellera cependant que ce test est bien plus éprouvant pour le matériau que la sollicitation nécessaire au contrôle des collages en ce sens que la fluence laser est supérieure au besoin pour le contrôle des collages et que les échantillons ont été éclairés plusieurs fois dans cette étude alors que le contrôle des collages nécessite une unique impulsion laser.

Après impacts, les matériaux ont été soumis à un test destructif de compression après impacts. Aucun endommagement n'a été détecté.

## 7 Conclusion

Nous avons présenté dans ces travaux la première démonstration de contrôle non destructif d'assemblages collés et présentant une tenue mécanique structurale. Cette démonstration a été faite sur la base de travaux expérimentaux mais aussi sur la base de simulations réalisées à l'aide du logiciel de simulations Esther. Les simulations réalisées ont permis de mettre en lumière le rôle crucial qu'exerce la rupture d'impédance acoustique dans les assemblages mixte de type métal/composite.

Une extension d'applications a enfin été présentée à travers les activités que nous projetons de mener dans le cadre du Fui Monarque.

## Remerciements

Les activités de contrôle non destructif des collages ont été réalisées dans le cadre du FUI Compochoch, coordonné par Rescoll. Ce FUI est financièrement supporté par BPI France, la région Ile de France et la région Nouvelle Aquitaine. Ce projet a été labélisé par les pôles de compétitivité Astech, Route des Laser et Aerospace Valley.

Les activités d'endommagement sélectif de structures sont réalisées dans le cadre du FUI Monarque, coordonné par Safran. Ce FUI est financièrement supporté par BPI France, la région Ile de France et la région Nouvelle Aquitaine. Ce projet a été labélisé par les pôles de compétitivité Astech et Aerospace Valley.

Nous remercions aussi la DGA pour l'intérêt et le soutien qu'elle apporte à ces activités.

## Références

- [1] S. Budhe, S. de Barros, L. da Silva, An updated review of adhesively bonded joints in composite materials, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, **72**, 30 (2017).
- [2] A. Baudot, Etude et mise au point de méthodes de mesures non destructives permettant de caractériser les paramètres critiques de l'adhésion sur structures collées, *Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille* (2015).
- [3] B. Ehrhart, B. Valeske, E. Muller, C. Bockenheimer, Methods for the Quality Assessment of Adhesive Bonded CFRP Structures - A Résumé, *NDT in Aerospace 2010*, Hambourg, Allemagne.
- [4] D. Palumbo, R. Tamborrino, U. Galietti, P. Aversa, A. Tati, V. Luprano, Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints, *NDT & E International*, **78**, 1-9 (2016).
- [5] L. Berthe, M. Arrigoni, M. Boustie, J. P. Cuq-Lelandais, C. Broussillou, G. Fabre, M. Jeandin, V. Guipont, M. Nivard, State-of-the-art laser adhesion test (LASAT), *NDT & E international*, **26**, 303-317 (2011).
- [6] M. Ducousso, S. Bardy, Y. Rouchasse, T. Bergara, F. Jenson, L. Videau, L. Berthe et N. Cuvillier, Quantitative evaluation of the mechanical strength of titanium/composite bonding using laser-generated shock waves, *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 111904 (2018).
- [7] AFNOR, Résistance au cisaillement en traction d'assemblages collés à recouvrement simple, (2009).
- [8] ASTM D4541 - Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, (2017).
- [9] S. Bardy, B. Aubert, L. Berthe, P. Combis, D. Hébert, E. Lescoute, J.-L. Rullier et L. Videau, Numerical study of laser ablation on aluminum for shock-wave applications: development of a suitable model by comparison with recent experiments, *Opt. Eng.*, **56**, 011014 (2017).
- [10] M. Born et E. Wolf, Principles of Optics - 7th edition, Cambridge: University Press (2006).
- [11] D. R. Jones, D. J. Chapman et D. E. Eakins, A gas gun based technique for studying the role of

temperature in dynamic fracture and fragmentation,  
*J. Appl. Phys.*, **114**, 173508 (2013).

[12] D. Laporte, Analyse de la réponse d'assemblages collés sous des sollicitations en dynamique rapide, *Thèse de doctorat*, ENSMA (2011).

[13] ASTM, Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates (2017).