



**HAL**  
open science

## **Etude des effets d'un choc laser symétrique sur des assemblages collés de composites dans le cas d'un joint faible**

Maxime Sagnard, Laurent Berthe, Romain Ecault, Fabienne Touchard, Michel Boustié

### ► **To cite this version:**

Maxime Sagnard, Laurent Berthe, Romain Ecault, Fabienne Touchard, Michel Boustié. Etude des effets d'un choc laser symétrique sur des assemblages collés de composites dans le cas d'un joint faible. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. <hal-01621547>

**HAL Id: hal-01621547**

**<https://hal.science/hal-01621547v1>**

Submitted on 23 Oct 2017

**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.



HAL Authorization

# **Etude des effets d'un choc laser symétrique sur des assemblages collés de composites dans le cas d'un joint faible**

## *Study of symmetrical laser shock wave effects on bonded CFRP composite in case of a weak bond*

**Sagnard Maxime<sup>1</sup>, Berthe Laurent<sup>1</sup>, Ecault Romain<sup>2</sup>, Touchard Fabienne<sup>3</sup>, Boustie Michel<sup>3</sup>**

1 : PIMM, UMR8006  
ENSAM, CNRS, CNAM  
151 bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France  
Email : maxime.sagnard@ensam.eu

2 : Airbus Group Innovations  
Campus Engineering (D42/D41) – BP90112 – 31703 Blagnac, France  
Email : romain.ecault@airbus.com

3 : PPRIME Institute, CNRS-ENSMA-Université de Poitiers,  
Département Physique et Mécanique des Matériaux  
ENSMA, 1, Av. Clément Ader, B.P 40109, 86961 Futuroscope Cedex, France.  
Email : fabienne.touchard@ensma.fr

### **Résumé**

L'étude suivante s'inscrit dans le cadre du projet européen ComBoNDT. Il a pour but le développement de techniques de contrôles non destructifs (CND) permettant l'évaluation de l'adhérence de joints collés. En effet, l'un des enjeux majeurs en aéronautique est la réduction de la consommation de carburant. Cela passe notamment par l'allègement et l'optimisation des structures. Ainsi, de nouveaux moyens d'assemblage mieux adaptés aux matériaux composites sont développés, en particulier l'utilisation du collage en lieu et place des rivets ou des boulons. Cet article présente les résultats obtenus grâce à un test d'adhérence innovant par choc laser (LASAT). Des ondes de chocs sont générées grâce à des lasers de part et d'autre d'échantillons d'assemblages collés de composites en fibres de carbone. En se recomposant, ces ondes créent localement une zone de traction qui permet de tester mécaniquement l'adhérence de la colle. Cette étude compare la tenue d'un joint sain et celle de joint à l'adhérence réduite due à une contamination à l'agent de démoulage. Deux diagnostics post-mortem différents, les ultrasons et les micrographies, ont permis de valider ce nouveau CND et notamment sa capacité à ne solliciter que le joint sans endommager le composite.

### **Abstract**

This study is part of the European ComBoNDT project. It aims at the development of extended non-destructive inspection tools (ENDT) to assess the adherence quality of bonded carbon fiber reinforced plastics (CFRP). One of aeronautics' most sensitive point, is the reduction of fuel consumption. A key element to achieve this goal, is the optimization of structures, in order to lower the weight of planes. Several solutions have been proposed, and among them is the use of glue bond instead of rivet. This article presents the results of the LASer Shock Adhesion Test (LASAT), a new Extend Non Destructive Technique. It is based on laser generated shockwaves created on both sides of the sample. When properly recombined, these shockwaves can create a tensile strength inside the material. In this study, the adherence properties of a healthy bond and a weak bond are compared. The weak bond is due to residues of release agent on one of the bonded surface of the composite. The comparison is based on two post-mortem techniques: ultrasounds and photomicrographs. They both allowed the validation of this ENDT. Disbondings were evidenced, without damaging the composite structure

## **1. Introduction**

Les matériaux composites sont actuellement incontournables, quel que soit le secteur d'activité en raison de leurs propriétés mécaniques et de leur masse [1]. Pourtant, si les matériaux utilisés ont beaucoup changé, les techniques d'assemblages sont restées les mêmes. Ainsi, en aéronautique, de nombreuses pièces composites sont encore assemblées à l'aide de

rivets ou de boulons, or ces techniques ne sont plus adaptées à ces nouveaux matériaux. En effet, le perçage de structures composites entraîne souvent la création de délaminages, de ruptures de fibres, ... Les constructeurs se retrouvent ainsi obligés de surdimensionner leurs pièces pour compenser l'endommagement, minimisant ainsi l'intérêt des structures composites.

Une des pistes d'améliorations est de remplacer les rivets / boulons par de la colle [2]. Cette technique permet de ne plus endommager le composite, et donc d'éviter le surdimensionnement. Par ailleurs, dans le domaine de l'aéronautique, de premières estimations ont conclu que le collage permettrait de gagner entre 12 et 15% de la masse d'un avion, après optimisation de la structure [3].

Cependant, il y a un problème majeur avec ces assemblages collés : comment s'assurer de l'adhérence du joint de colle ? En effet, des études ont montré que si l'une des faces collées est contaminée (humidité, empreinte de doigt, résidus de certains liquides, ...), la tenue de la colle chute significativement [4]. C'est d'autant plus problématique qu'à l'heure actuelle aucune technique ne permet de vérifier les propriétés adhésives d'un joint. En effet, que ce soient les ultrasons, la radiographie X, ou encore la tomographie, ces techniques se limitent à la détection d'endommagements et ne sollicitent pas l'interface collée [5], [6].

Cet article présente le test d'adhérence par choc laser (LASer Shock Adhesion Test – LASAT[7]). Ces travaux s'inscrivent dans le projet européen ComBoNDT qui vise à développer de nouveaux contrôle non destructifs (CND) capable de tester – à l'échelle industrielle – l'adhérence des assemblages collés [8]. Le projet regroupe 13 partenaires industriels et académique, et fait suite au projet ENCOMB.

Chaque technique proposée doit être capable de différencier un joint sain, c'est-à-dire avec un niveau d'adhérence proche de la valeur cible, d'un joint faible à l'adhérence réduite (en dessous de 80% de la valeur nominale). Six cas de contaminations représentatifs des lignes de production et de réparation ont été identifiés : humidité, empreinte de doigts, résidus d'agent de démoulage, résidus de liquide de dégivrage, mauvaise cuisson, et dégradation thermique. L'institut Fraunhofer de Brème (IFAM) a fabriqué des échantillons contenant chacun de ces contaminants à trois niveaux différents : faible, moyen et élevé [4].

Jusqu'à présent [9], la technique mettait en œuvre des chocs lasers simples, limitant la portée de son utilisation. Cette étude présente une nouvelle génération de test LASAT, avec deux chocs lasers symétriques, ouvrant de nouvelles perspectives d'utilisation.

La première partie de ce papier présente la technologie, et son optimisation. Les résultats montrent son application au test d'adhérence sur assemblages collés, pollués avec des résidus d'agent de démoulage.

## **2. Principe du choc laser**

### **2.1 Le choc simple**

Le test d'adhérence par choc laser repose sur la création et la recombinaison d'ondes de choc produites par irradiation laser. La création d'un choc par cette méthode se déroule en plusieurs étapes. Dans un premier temps, un laser est généré puis amplifié pour obtenir les caractéristiques souhaitées (durée d'impulsion, longueur d'onde, intensité). Ces caractéristiques sont propres au laser utilisé. Les études détaillées dans ce papier ont été réalisées sur la

plateforme Héphaïstos, qui génère un laser de longueur d'onde 532nm, avec une durée d'impulsion de 7ns, et à intensité variable allant jusqu'à 14J.

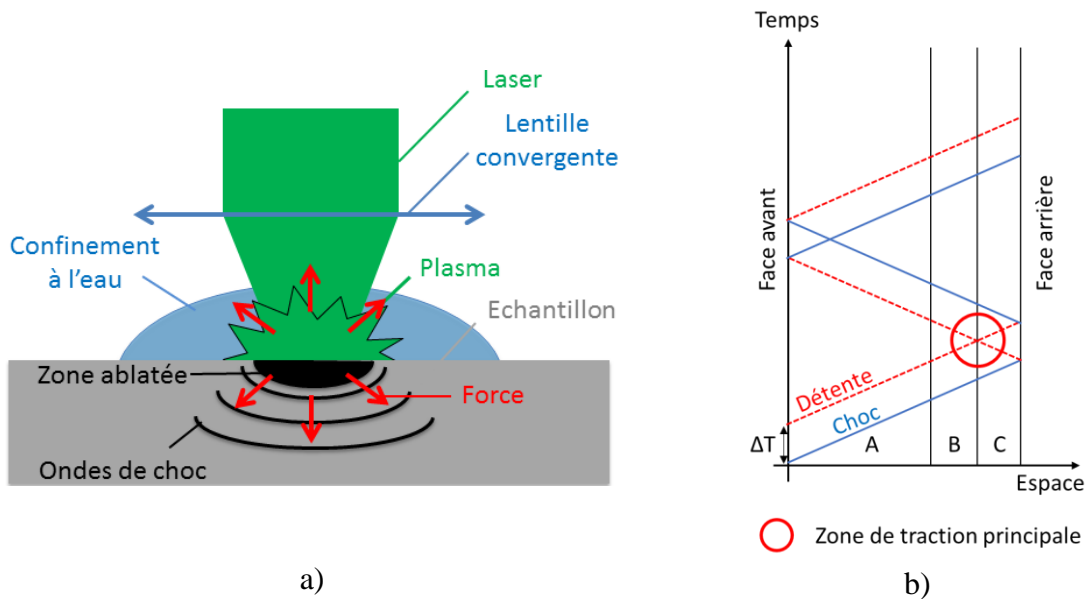


Fig. 1a) Principe de création d'onde de choc à l'aide d'un laser. b) Diagramme de marche d'un choc simple

Un faisceau laser de la gamme du GW/cm<sup>2</sup> est focalisé sur la cible. La matière est transformée en un plasma de haute pression (de l'ordre du GPa). En réaction à sa détente, il va produire une contrainte sur la surface de l'échantillon, générant ainsi une onde de choc. Restera après le tir, une zone ablatée à l'endroit où le rayon laser et l'échantillon sont entrés en contact (Fig. 1-a).

Le plasma est confiné avec un matériau transparent, permettant de multiplier par 3 ou 4 le niveau de pression généré [10].

L'onde de choc générée – aussi appelée onde de choc incidente, en trait plein sur le diagramme de marche de la Fig. 1-b) – va se propager dans le matériau, jusqu'à atteindre la face arrière de l'échantillon. En se réfléchissant sur la face libre, l'onde de choc va se transformer en onde de détente – en pointillés sur la Fig. 1-b). En parallèle, à la fin du chargement en pression de la face avant ( $\Delta t$  sur la figure, correspondant à la durée d'impulsion du laser), une onde de détente, aussi appelée onde de détente incidente est créée. Lorsque cette onde rencontre l'onde de détente issue de la réflexion de l'onde de choc incidente, de la traction est générée localement dans le matériau.

L'intensité de la contrainte est directement liée au niveau d'énergie du tir laser [11]. Il est donc possible de savoir quelle force de traction a été appliquée sur le joint. Si après le tir le joint est intact, le niveau d'adhérence du joint de colle est validé. A l'inverse, l'apparition de décollement ou de fissurations dans le joint signifieront que l'adhérence du collage est inférieure à l'adhérence voulue.

Cette méthode a cependant une limitation de taille : la position de la zone de contrainte maximale dépend uniquement de la durée  $\Delta t$  du chargement. Or il s'agit d'un paramètre intrinsèque au laser, qui n'est pas facilement modifiable. On pourra donc souvent se retrouver dans le cas illustré en Fig. 2-a, où la contrainte ne se situe pas sur l'interface, mais à côté.

## 2.2 Une optimisation : le choc symétrique

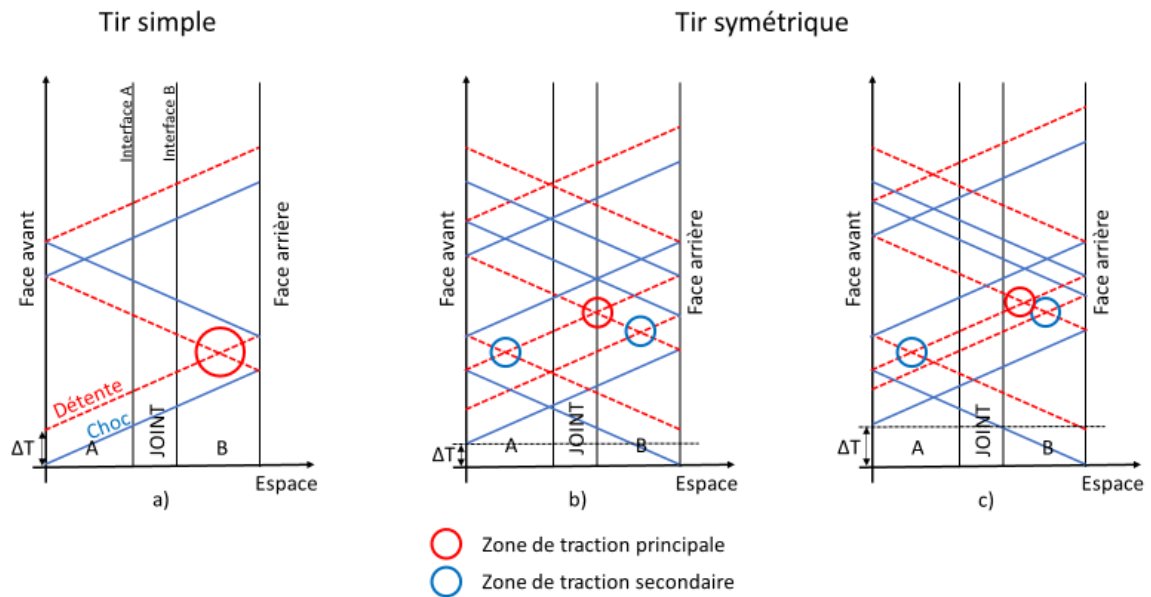


Fig. 2a) Diagramme XT d'un tir simple. b) Diagramme XT d'un tir symétrique avec un décalage optimisé entre chaque voie. c) Illustration du déplacement de la zone de traction principale en fonction du décalage temporel appliqué

La génération de contrainte peut être optimisée par une configuration à deux tirs symétriques. L'intérêt majeur de cette technique est la facilité avec laquelle la zone de traction peut être localisée en jouant sur le décalage temporel des deux lasers. La Fig. 2-b est la superposition de deux tirs simples effectués de part et d'autre de la cible.

Les deux zones de contraintes secondaires (entourées en bleu), correspondent à la zone de traction principale d'un tir simple. La nouveauté de cette optimisation est l'apparition d'une zone de traction supplémentaire, exerçant une contrainte plus grande, située au croisement des ondes de détentes issues des réflexions des ondes de chocs. La position de cette zone de traction principale ne dépend plus des paramètres lasers, mais du décalage temporel entre l'arrivée des deux lasers de part et d'autre de l'échantillon comme le montre la Fig. 2-c.

## 3. Procédure expérimentale

Les échantillons utilisés sont des assemblages de fibres de carbone (CFRP). Chaque échantillon est composé de deux empilements [0 / 0 / 45 / -45]<sub>s</sub> de préimprégnés Hexcel M21E, collés entre eux par un joint de FM300K 0,2mm.

C'est le cas de contamination à l'agent de démoulage qui sera étudié dans ce papier. Cette contamination a été réalisée avec du Frekote 700-NC, un agent de démoulage contenant du silicium. Le taux de contamination d'un échantillon est défini par la concentration en Frekote dans la solution d'heptane utilisée pour le deepcoating des plaques composites. Seule la surface du côté de la face B du joint est contaminée.

L'état des cibles est vérifié grâce aux ultrasons pour s'assurer qu'aucun défaut matériel n'est présent avant le test LASAT.

L'échantillon est ensuite entièrement recouvert d'adhésif aluminium pour générer un chargement maîtrisé et pour le protéger des effets thermiques. Chaque échantillon est confiné par un filet d'eau [11].

L'objectif de cette expérience est d'isoler les seuils de rupture des joints d'échantillons contaminés et de les comparer au seuil obtenu avec un échantillon sain. Chaque plaque de 10mmX10mm est divisée en 16 différentes zones de 4cm<sup>2</sup>, et l'énergie laser augmente de manière constante d'une zone à l'autre. La campagne se faisant à tache focale constante (7mm), l'énergie – et donc la traction générée dans le matériau – sera la seule variable.

Dans cette première étude, aucun décalage temporel n'a été appliqué. Les échantillons étant symétriques, la zone de traction principale se trouvera au milieu du joint de FM300.

Les échantillons sont analysés via ultrasons pour isoler les différents seuils. Certains endommagements critiques sont analysés par des coupes micrographiques. Les deux lasers seront identifiés par « voie A » et « voie B ». De même la face de l'échantillon éclairée par la voie A s'appellera face A, idem pour face B.

## 4. Les résultats

### 4.1 Les test ultrasons (US)

Les mesures ultrasons ont été faites par Airbus AGI à Toulouse. Elles ont été conduites à l'aide d'une sonde multi élément linéaire de 64 éléments, à une fréquence de 10 MHz. Dans la suite de l'étude, différents types de scans ultrasons seront utilisés :

- Le A-Scan une cartographie 1D réalisée localement sur l'échantillon
- Le B-Scan une cartographie 2D dans un plan perpendiculaire
- Le C-Scan est une cartographie ultrasons 2D de l'échantillon, réalisée dans un plan parallèle aux faces avant et arrière de l'échantillon

La Fig. 3-a présente les analyses ultrasons d'un échantillon sain. Les ondes ultrasons sont réfléchies à chaque interface. Ainsi, sur le A-Scan, on distingue très nettement trois pics correspondant respectivement à la face avant, au joint et à la face arrière (Fig. 3-a).

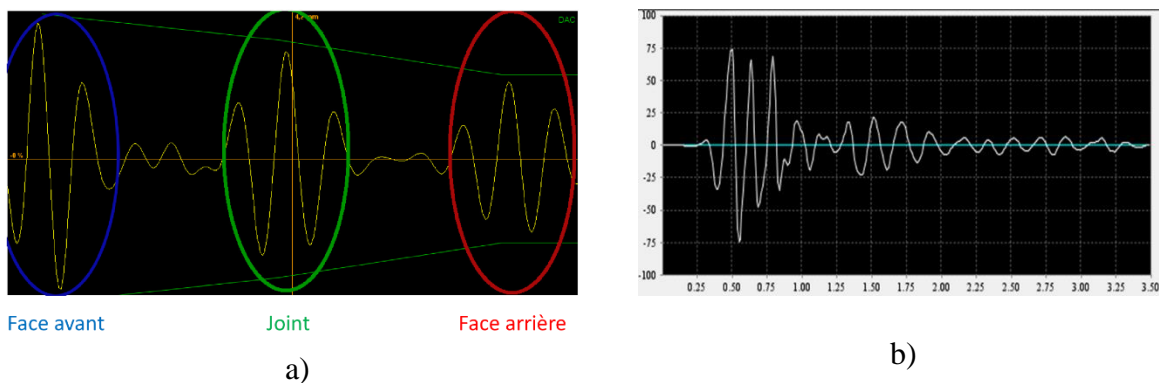


Figure 3a) A-Scan d'un joint sain. b) A-Scan d'un joint endommagé, la face arrière n'apparaît plus car occultée par le décollement

Ces analyses ultrasons ont permis d'isoler trois seuils différents par plaque : le seuil d'adhérence / décollement du joint, celui du délaminage du composite face A, et celui du délaminage du composite face B (cf Fig 4-b). Sur le B-Scan, le défaut apparaît via une modification locale du signal (entouré en rouge). La création d'une poche d'air (délaminage, fissuration, ...) va empêcher les ondes US de passer, occultant tout ce qui se trouve derrière. C'est d'autant plus marquant sur les A-Scan où les pics situés après le défaut disparaissent presque intégralement (Fig. 3-b).

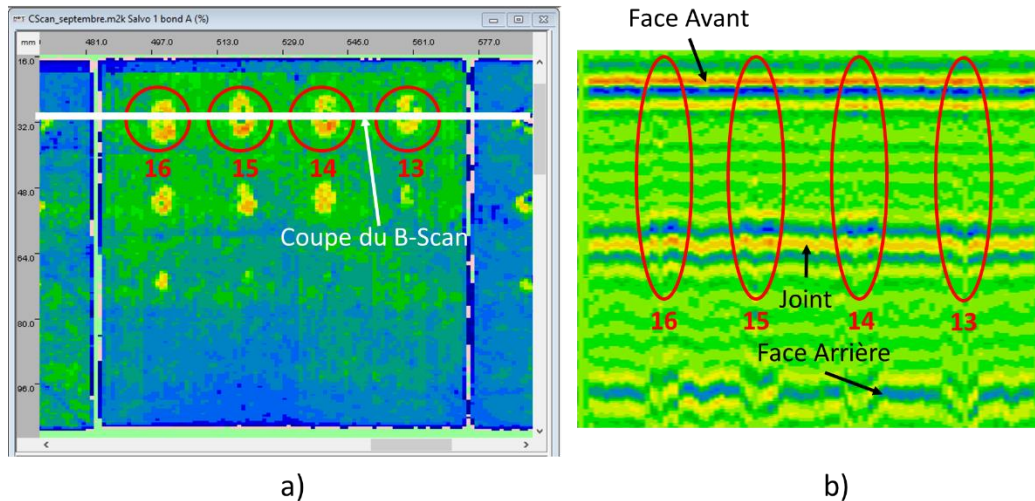


Fig. 4 a) C-Scan de l'échantillon P-RA-2, contamination moyenne. b) B-Scan des tirs 13, 14, 15, 16

La Fig. 5 présente une synthèse des résultats ultrasons. En abscisse sont représentés les différents échantillons par ordre croissant de contamination : P-RE-1 pour l'échantillon sain de référence, puis P-RA-1,2 et 3, respectivement à 1%, 2% et 5% de contamination au silicium. En ordonnée sont référencés les flux. Par exemple, dans le cas de l'histogramme de l'échantillon de référence, il y a quatre différents codes couleurs. La zone verte signifie qu'après le choc laser, rien n'a été détecté aux ultrasons. La partie orange signifie que pour ces flux-là, seul le joint casse. Aucun défaut n'a été relevé dans le composite. La dernière partie de l'histogramme, en rouge, signifie qu'un défaut a été repéré dans le composite (quel que soit la face). Les zones de séparation blanches sur la figure représentent les intervalles entre les valeurs de flux.

Par exemple, dans le cas de l'échantillon sain, le seuil de rupture du joint est dépassé pour un flux de  $0.82 \text{ GW/cm}^2$ . Le choc à  $0.68 \text{ GW/cm}^2$  n'a rien endommagé. Il est impossible de statuer sur le comportement du joint entre ces deux tirs, car aucun tir n'a été effectué entre ces deux valeurs. Idem pour le seuil de rupture du composite situé entre  $0.96 \text{ GW/cm}^2$  et  $1.11 \text{ GW/cm}^2$ . En conclusion, le seuil de rupture du joint est compris entre  $0.68$  et  $0.82 \text{ GW/cm}^2$ , et le seuil de délaminage des peaux entre  $0.96$  et  $1.11 \text{ GW/cm}^2$ .

Pour une intensité laser adaptée, la technologie LASAT a permis d'endommager uniquement le joint, sans abimer les plaques de composite. Ce premier résultat permet de valider l'optimisation apportée par le tir symétrique. En effet, les études précédentes réalisées en tir simple ne permettaient pas de casser uniquement le joint [12].

Si l'on compare les seuils de rupture des plaques contaminées, on remarque une tendance à la baisse, notamment pour la plaque P-RA-3-1, qui est la plaque la plus contaminée. Sur cette première étude, il semblerait aussi que le seuil d'adhérence d'un joint faiblement contaminé

avec de l'agent de démoulage soit très proche de celui d'un joint sain (échantillon P-RE-1). Il est toutefois possible d'affiner encore ces seuils.

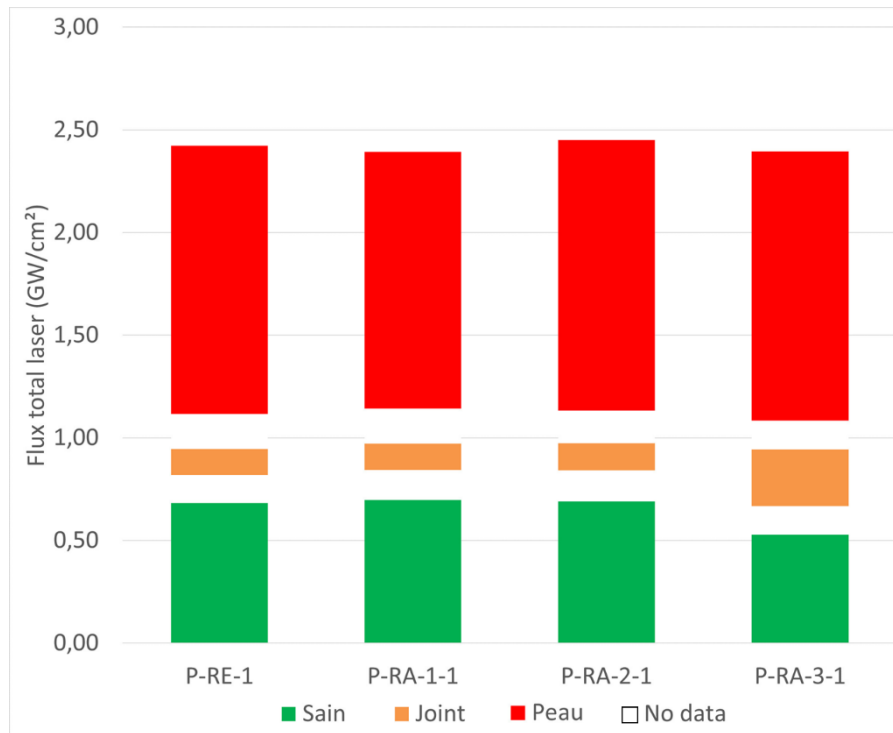


Fig. 5 Tableau récapitulatif des seuils pour l'échantillon de référence (P-RE) et ceux contaminés à l'agent de démoulage (P-RA)

On remarque également que le seuil de rupture des peaux est constant. Cela souligne la robustesse de la technologie. En effet, les matériaux étant supposés être similaires d'une plaque à l'autre, le seuil de d'endommagement des peaux ne doit pas changer.

#### 4.2 Les études micrographiques

Afin d'étudier les différents endommagements obtenus, des observations micrographiques ont été réalisées. Les coupes de l'échantillon P-RA-1-1 (le plus faiblement contaminé) sont présentées. Une coupe a été réalisée avant et après chacun des trois seuils. La Fig. 5 résume les résultats obtenus.

A gauche sont reportés les différents seuils isolés grâce aux ultrasons : en orange quand il s'agit d'un défaut dans le joint et en rouge quand le seuil du composite est atteint. Les flux indiqués sont les flux par voie.

A droite se trouve chacune des micrographies présentant un défaut en fonction de leur position. « ND » signifie que rien d'anormal n'a été noté. Ces défauts sont reportés à l'échelle sur le schéma récapitulatif de droite : en orange les zones d'impact laser et en rouge les défauts.

La décohérence générée au seuil du joint (0,42 GW/cm<sup>2</sup> par voie) est très localisée. Dans le cas des échantillons contaminés à l'agent de démoulage, les défauts créés au seuil prennent la forme de plusieurs microfissures dans le joint.

A plus haut flux, la décohésion est beaucoup plus marquée. Elle a toujours lieu à l'interface entre la colle du préimprégné, et le joint de FM300, et se trouve du côté de la face B, la surface contaminée.

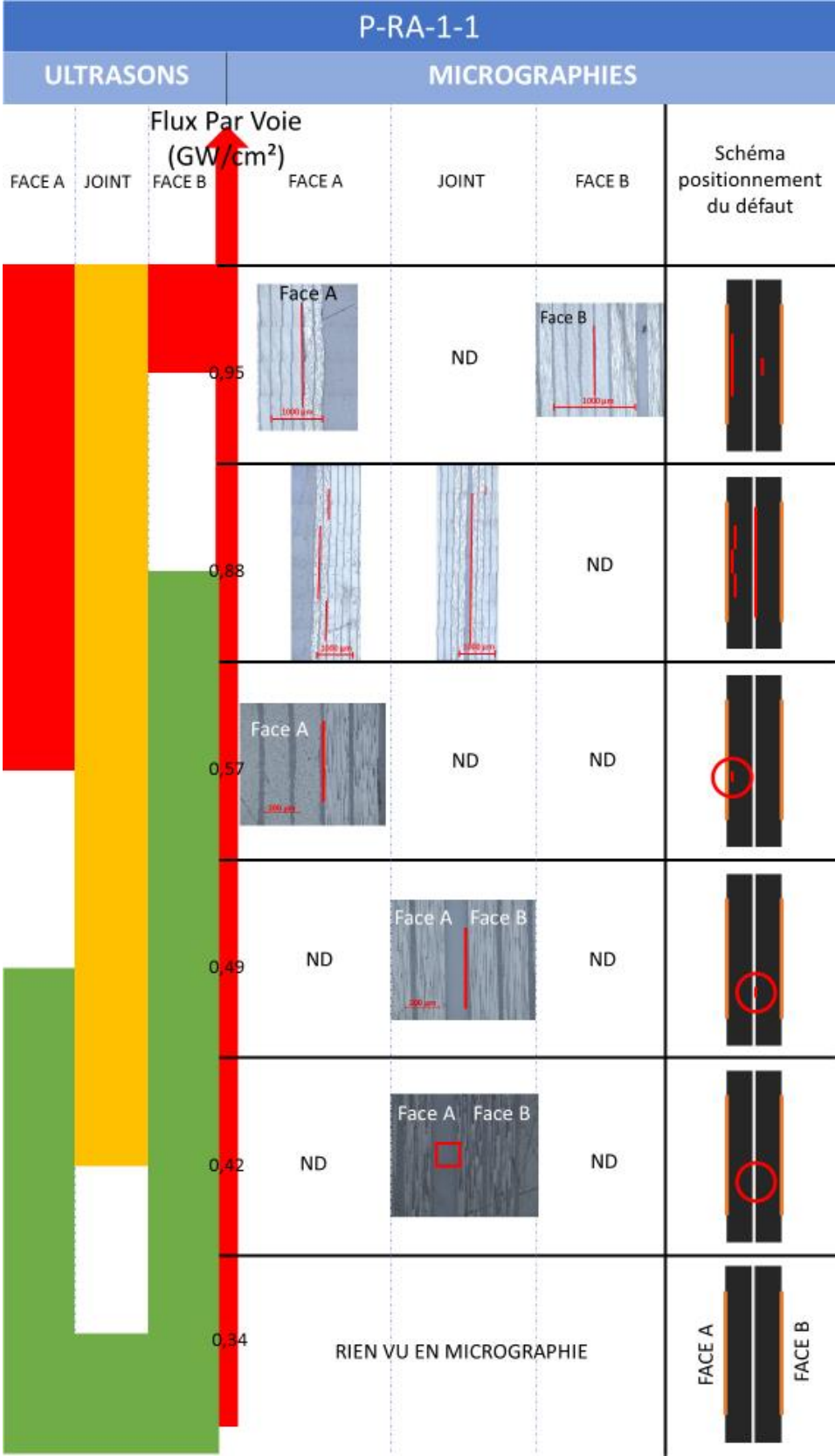


Fig. 6 Résultats des coupes micrographiques en fonction du flux total

La micrographie du tir à  $1,14\text{GW}/\text{cm}^2$ , seuil de rupture du composite face A, ne montre plus de décohésion visible au niveau du joint. En effet, c'est la combinaison des ondes générées par les deux lasers qui permet la création de la zone de traction au sein du matériau. Plus précisément, c'est la combinaison des énergies apportées par ces ondes qui, quand elles sont suffisantes, permettent de générer un défaut. Le diagramme XT Fig 2-b, montre que les zones de traction secondaires arrivent temporellement avant la traction primaire. Or si une partie de l'énergie de ces ondes est utilisée pour générer un délaminage sur l'une des zones de traction secondaire, la recombinaison dans la zone principale n'est plus assez énergétique pour générer une décohésion.

Cette étude micrographique est en adéquation avec les résultats observés aux ultrasons. Elle permet de valider l'utilisation des ultrasons en tant que CND supplémentaire pour repérer les défauts éventuels mis en avant par la technologie LASAT.

## 5. Conclusion

La campagne de tir a permis, pour chaque contamination, de venir tester les joints, jusqu'à l'endommagement, sans qu'aucun défaut ne soit créé dans les composites.

Dans le cas d'une contamination à l'agent de démoulage, une perte d'adhérence a été notée en fonction du taux de contamination.

La combinaison des études ultrasons et des coupes micrographiques a permis de mieux comprendre le comportement d'un composite CFRP sous choc, et notamment le positionnement des défauts en fonction de l'intensité laser utilisée. Ces informations seront capitales pour la calibration des modèles numériques.

Des études complémentaires doivent être menées pour raffiner les différents seuils, et également pour mieux cibler l'interface contaminée (instauration d'un décalage temporel entre les deux voies du laser). L'objectif reste de pouvoir différencier un joint sain d'un joint contaminé, ce qui n'a pas été entièrement réalisé dans cette étude.

Des questions se posent également sur les seuils. Les deux composites face A et B sont supposés être similaires. Cependant une différence de seuil de rupture a été observée. Des tirs sur composites non assemblés permettront de mieux comprendre à l'origine de cette différence.

## Remerciements

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement N° 636494.

## Références

- [1] L. C. Hollaway, "A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 12, pp. 2419–2445, 2010.
- [2] R. D. Adams and P. Cawley, "Defect types and non-destructive testing techniques for composites and bonded joints," *Constr. Build. Mater.*, vol. 3, no. 4, pp. 170–183, 1989.
- [3] R. Ecault, M. Boustie, F. Touchard, M. Arrigoni, and L. Berthe, "Development of a

- shock wave adhesion test for composite bonds by pulsed laser and mechanical impacts,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 500, no. 11, p. 112022, 2014.
- [4] D. N. Markatos, K. I. Tserpes, E. Rau, S. Markus, B. Ehrhart, and S. Pantelakis, “The effects of manufacturing-induced and in-service related bonding quality reduction on the mode-I fracture toughness of composite bonded joints for aeronautical use,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 556–564, 2013.
- [5] X. He, “A review of finite element analysis of adhesively bonded joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 31, no. 4, pp. 248–264, 2011.
- [6] B. Ehrhart *et al.*, “Development of a laser shock adhesion test for the assessment of weak adhesive bonded CFRP structures,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 52, pp. 57–65, 2014.
- [7] C. Bolis, L. Berthe, M. Boustie, M. Arrigoni, S. Barradas, and M. Jeandin, “Physical approach to adhesion testing using laser-driven shock waves,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 10, pp. 3155–3163, 2007.
- [8] “Quality assurance concepts for adhesive bonding of aircraft composite structures by advanced NDT | ComBoNDT.” [Online]. Available: <http://combondt.eu/>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [9] R. Ecault, “Experimental and numerical investigations on the dynamic behaviour of aeronautic composites under laser shock - Optimization of a shock wave adhesion test for bonded composites,” PhD thesis, Poitiers, 2013.
- [10] L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre, L. TOLLIER, and E. Bartnicki, “Shock waves from a water-confined laser-generated plasma,” *J. Appl. Phys.*, vol. 82, no. 1997, pp. 2826–2832, 1997.
- [11] R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, and J. Virmont, “Physical study of laser-produced plasma in confined geometry,” *J. Appl. Phys.*, vol. 68, no. 2, pp. 775–784, 1990.
- [12] R. Ecault, F. Touchard, M. Boustie, L. Berthe, H. Voillaume, and B. Campagne, “Etude expérimentale des effets d ’ un choc laser sur des assemblages collés de composites dans le cas d ’ un joint faible.,” *Rev. des Compos. des matériaux avancés*, vol. 1, pp. 53–66, 2014.