HAL
open science

Caractérisation de l'adhésion d'un assemblage Tensylon/revêtement d'alumine par choc laser

Rachid Ben Saada, Aboulghit El Malki Alaoui, Geoffrey Darut, Sophie Costil, Michel Arrigoni

To cite this version:

Rachid Ben Saada, Aboulghit El Malki Alaoui, Geoffrey Darut, Sophie Costil, Michel Arrigoni. Caractérisation de l'adhésion d'un assemblage Tensylon/revêtement d'alumine par choc laser. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280056

HAL Id: hal-04280056

https://hal.science/hal-04280056v1

Submitted on 10 Nov 2023

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.

Caractérisation de l'adhésion d'un assemblage Tensylon/revêtement d'alumine par choc laser

R. BENSAADA[a*], A. EL MALKI ALAOUI[a], G. DARUT[b], J. LE CLANCHE[a], M. ARRIGONI[a]

a. ENSTA Bretagne, IRDL, UMR 6027 CNRS, 29806 Brest, France,
b. ICB UMR 6303, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France
* rachid.ben_saada@ensta-bretagne.fr

Résumé :

Le développement de matériaux pour la défense, notamment pour la protection balistique est en constante évolution. Dans ce cadre, les matériaux composites représentent une bonne alternative aux matériaux conventionnels métalliques ou céramiques en termes de ratio résistance/légèreté. Néanmoins, ces matériaux peuvent être améliorés afin de répondre au mieux aux chocs à grandes vitesses. Dans la présente contribution, un revêtement d'alumine est déposé sur un composite à base de PEhd i.e. le Tensylon® HSDB 30 A fabriqué par DuPont®, en utilisant les procédés de projection thermique par plasma ou flamme. Ce couple de matériaux bien que très utilisé dans les applications de protections balistiques, reste peu rencontré dans le domaine de la fabrication additive. Pour se faire, une sous-couche métallique est souvent nécessaire pour que le dépôt d'alumine se fasse avec succès et que le substrat en composite ne soit pas dégradé. L'assemblage substrat composite/sous-couche protectrice/revêtement céramique peut alors être caractérisé. Dans un premier temps, des observations au microscope optique ont été réalisées afin d'obtenir les premières informations sur le revêtement (rugosité, pores, ...) qui peuvent jouer un rôle dans sa résistance. Par la suite, l'adhésion du revêtement est éprouvée par le biais de l'essai d'adhérence par choc laser LASAT (LASer Adherence Test) qui est un essai sans contact mettant en œuvre des vitesses de déformation élevées ($10^6 s^{-1}$). Le composite non-revêtu est d'abord considéré comme échantillon témoin. Cet essai constitue un moyen d'évaluer la cohésion du Tensylon® seul. Ensuite, des tirs laser sont réalisés sur l'échantillon de 50 x 50 mm de Tensylon® revêtu du dépôt d'alumine d'environ 0.2 mm d'épaisseur. Chaque tir est réalisé avec une tache focale de 4 mm (zone sous choc) côté Tensylon®. Un espacement de 5 mm entre les bords de la cible et le bord de la tache focale et entre deux taches focales afin d'éviter les effets de bords. L'énergie du tir est augmentée d'un tir à l'autre. Pour chaque impact, un interféromètre laser Doppler basé sur la mesure hétérodyne (sonde VH) de la vitesse de la surface libre en vis-à-vis du choc est mesurée en cours d'expérience. A partir de l'analyse de ces signaux, un diagnostic de la décohésion de l'interface est proposé.

À travers cette technique, une contrainte limite de délaminage peut être estimée, ce qui offre la perspective d'étudier les paramètres clés de la méthode de projection afin d'optimiser le niveau d'adhérence du revêtement sur son substrat.

Abstract:

In the last decades, many progresses are achieved concerning the materials development for defense applications, especially for ballistic protection. In this context, the composite materials present obvious advantages in comparison with the conventional materials i.e. metals and ceramics given their interesting strength/weight ratio. However, the protection efficiency of material assemblies could be improved in term of manufacturing and mass reduction.

In the present contribution, an Al2O3 coating is deposited on an Ultra High Molecular Weight PolyEthylene (UHMWPE)-based composite i.e. Tensylon® HSBD 30 A, manufactured by DuPont®. The deposition process is operated by using thermal spray coating. In order to obtain the expected multi-material, a metallic undercoat between the composite and the coating is necessary. Otherwise, the composite degrades and melts. Henceforth, the Tensylon®/Al2O3 coating assembly could be characterized from a mechanical point of view. Firstly, observations under optical microscope are done in order to obtain the preliminary information on the coating microstructure (roughness, porosity, ...). These parameters could play a key role on the coating strength. The adhesion of the assembly is subsequently tested using the LASAT (LASer Adherence Test) technique which is a contactless test involving high strain-rates (10^6 s^{-1}). The uncoated composite is considered as a control sample. This test is a means of evaluating the cohesion of Tensylon® only. Then shots are performed on the 50 x 50 mm sample of Tensylon® coated with the alumina coating of approximately 0.2 mm thick. Each shot is performed with a 4 mm focal spot (shocked area) on the Tensylon® side. A spacing of 5 mm between the edges of the target and the edge of the focal spot and between two focal spots in order to avoid edge effects due to the sample geometry. The energy of the shot is increased from one shot to the next. For each impact, a laser Doppler interferometer based on the Photonic Doppler Velocimetry measurement (PDV probe) of the speed of the free surface with respect to the impact is measured during the experiment. From the analysis of these signals, a diagnosis of the decohesion of the interface is proposed.

Through this technique, a delamination limit stress can be estimated, which offers the prospect of identify the key parameters of the spraying method in order to optimize the level of adhesion of the coating on its substrate.

Mots clefs : Tensylon®, Revêtement céramique, Projection thermique, Adhésion, LASAT

1 Introduction

Le développement de matériaux pour la protection balistique est en constante évolution au vu de l'importance de l'application pour laquelle ils sont dédiés. Les composites polyéthylène de masse molaire très élevée (Ultra-High Molecular Poly-Ethylene – UHMWPE) sont souvent utilisés comme couche sacrificielle. Ces matériaux sont reconnus pour leur résistance à l'impact [1][2][3]. La caractérisation mécanique est une étape primordiale afin d'évaluer les performances de ces matériaux. À travers leur travail, Cline et Love [4] ont évalué l'effet du cisaillement plan sur la réponse balistique en termes de vitesse limite et de déformation de la face arrière d'un composite à base de polyéthylène. Les auteurs affirment que ces deux critères représentent les deux grandeurs les plus pertinentes à évaluer afin d'étudier la réponse balistique d'un matériau.

Peu d'études sont disponibles sur le Tensylon®. Alil et al. [5] ont étudié son délaminage en utilisant la technique du choc laser (LASAT). Cette méthode est attractive pour caractériser le délaminage dans la

mesure où elle permet d'obtenir une contrainte seuil de rupture. Malgré les performances que ces matériaux peuvent atteindre en termes de résistance à l'impact, des améliorations sont possibles et des efforts sont continuellement fournis dans ce sens. L'hybridation structurelle est reconnue à travers plusieurs études comme une méthode attrayante pour améliorer ces propriétés. Sapozhnikov et al. [6] ont comparé deux matériaux hybrides. Le premier est un multi-couche à base d'aramide (Twaron®, RUSLAN®-SVM)/matrice polyéthylène à basse densité et le second est un assemblage UHMWPE constitué de Dyneema® (HB2, HB80) avec un hybride aramid/Dyneema® HB2. Les deux configurations ont été soumises à un projectile de 1g. Il a été observé que les plis d'aramide assemblés avec l'UHMWPE montrent une meilleure résistance à l'impact. Zulkifli et al. [7] ont optimisé la position d'un composite carbone au sein d'un composite hybride carbone/UHMWPE impacté par un projectile de 9mm. Il a été trouvé que quand le pli de carbone est positionné sur la face avant (en face du projectile), la signature de la face arrière est considérablement réduite par rapport aux autres configurations. Alil et al. [8] ont assemblé des panneaux en Tensylon® avec des tôles minces en acier comme face arrière. Des tirs balistiques ont été réalisés et les panneaux renforcés se sont avérés plus résistants à l'impact et présentent une meilleure rigidité en flexion.

Une autre méthode prometteuse consiste à améliorer les propriétés balistiques des composites en déposant une couche de revêtement sur la face arrière. Peu d'études sont disponibles dans la littérature concernant cette approche. Parmi elles, Liu et al. [9] ont étudié la résistance à l'impact balistique des composites carbone revêtus de polyurea en évaluant les ratios d'énergie absorbée et les niveaux d'endommagement qui sont trouvés significativement meilleurs pour le composite revêtu comparativement au composite témoin. Prawara et al. [10] ont amélioré un revêtement céramique en y dispersant une phase métallique. Le procédé de projection thermique par flamme HVOF a été utilisé. Un composite à matrice céramique à base de carbure de chrome (Cr_3C_2) et un mélange métal-céramique NiAl-Al_2O_3 avec différentes tailles de particules ont été déposées sur un substrat en acier doux. Il en résulte que l'énergie absorbée pendant l'impact est augmentée de huit et dix fois respectivement comparativement au revêtement original Cr_3C_2 et la plaque non-revêtue.

Dans la présente contribution, l'effet de l'ajout d'un revêtement d'Alumine Al_2O_3 à un composite à base de PEhd i.e. le Tensylon® HSBD 30A sur sa réponse au choc laser est étudié. La méthode utilisée pour réaliser le revêtement est brièvement décrite. Les échantillons revêtu et non revêtu ont été éprouvés par le biais de la méthode LASAT (LASer Adherence Test) [11]. Le principe de la méthode ainsi que le dispositif qui permet sa mise en œuvre sont exposés. Les résultats obtenus en termes de vitesse de propagation de l'onde de choc, vitesses de surface libre ainsi que les observations post-impact sont exposés et discutés. En outre, il a été observé que la vitesse en face arrière est proportionnelle à l'énergie du tir et qu'une relation linéaire peut être établie. La surface de la tache focale laissée par le tir laser est également proportionnelle à l'énergie pour l'échantillon non-revêtu.

2 Revêtement du Tensylon® par projection thermique

2.1 Principe

La projection thermique est un processus à haute énergie. Ce procédé appartient à la famille des traitements de surface par voie sèche. Le but est de chauffer et projeter des particules micrométriques sur un support pour modifier ses propriétés en utilisant des sources thermiques et cinétiques (Darut et al. [12]). Les matériaux sous forme de poudre principalement sont généralement injectés dans une source (flamme, plasma) où ils sont chauffés et accélérés avant d'être déposés sur un substrat pour former un revêtement (Le principe est décrit par la Figure 1).

Concernant la projection thermique, la gamme de matériaux est très large, avec une taille de poudre allant du nanomètre au micromètre, en fonction de l'atmosphère environnante (air, gaz neutre, vide). Les émissions varient considérablement en fonction de ces conditions [12]. De plus, la plage d'efficacité du dépôt par projection dépend largement du procédé utilisé et des paramètres opératoires. La taille moyenne initiale de la poudre varie de 5 à 150 µm. Notons que pendant la projection, une partie des particules peut être vaporisée, projetée hors du substrat, perdue après rebond à la surface.

Deux méthodes sont utilisées dans le présent travail : la projection thermique par flamme et par plasma. Les méthodes, les ressources utilisées ainsi que les résultats obtenus dans le cadre de travaux antérieurs en termes de caractérisation mécanique, observation micrographiques … sont détaillés dans Thermal spray Handbook [13] et Thermal spray fundamentals [14].

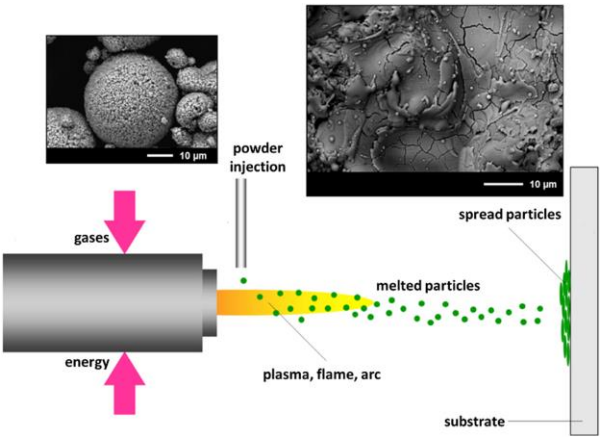

Figure 1 - Principe de la projection thermique (Darut et al. [12])

2.2 Matériaux, substrats et méthodes

Le Tableau 1 présente les matériaux projetés utilisés. Les substrats utilisés sont des plaques en composite de polyéthylène haute densité i.e. le Tensylon® pressé à 230 bars lors de la fabrication, dont la masse volumique est de 0.966 g/cm^3.

Matériau	Al_2O_3	Al_2O_3-ZrO_2	Zn
Type	Poudre	Flexicord	Poudre

Tableau 1 - Caractéristiques des matériaux projetés

Une première série d'essais est réalisée avec des tentatives de dépôts directement sur des plaques de Tensylon® d'épaisseur de 2,4 mm. Plusieurs paramètres ont été variés : la distance de projection, la vitesse de projection et la cinématique. Toutes ces tentatives se sont avérées infructueuses : soit le substrat s'est dégradé (flux de chaleur trop important pour le Tensylon ne supportant pas la température), soit le dépôt n'a pas pu être effectué (particules refroidies avant impact sur le substrat). Par conséquent, une sous-couche métallique (Zn) est déposée sur le substrat avant la projection d'alumine, afin d'éviter sa dégradation. En effet, les plaques ne présentent aucune dégradation de surface. À l'issue de ces résultats, le même protocole est suivi pour recouvrir une plaquette de 50x50 mm^2.

Un revêtement céramique d'une épaisseur d'environ 200 µm est donc déposé en utilisant la projection thermique par plasma. Le matériau projeté est l'Al_2O_3 sous forme de poudre. Un échantillon de

Tensylon® de dimensions 50x50mm² est revêtu. Les tests de choc laser seront réalisés sur cet échantillon ainsi qu'un échantillon non-revêtu qui sera considéré comme témoin (Figure 2).

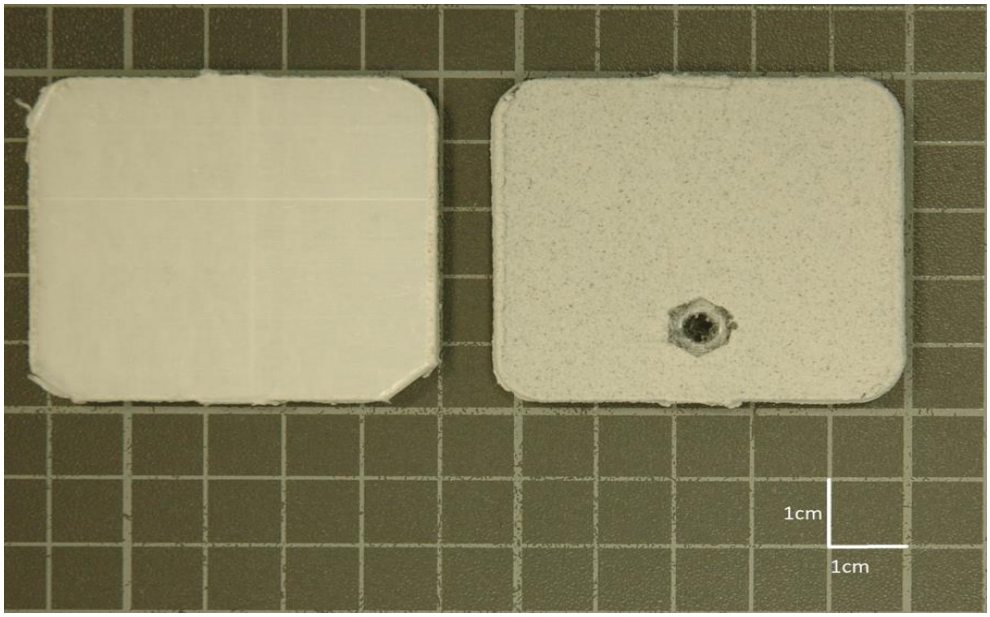

Figure 2 - Tensylon® non- revêtu (à gauche) et revêtu (à droite)

3 Essais LASAT

3.1 Présentation de la technique

L'essai LASAT consiste en un faisceau pulsé de haute énergie (E) est focalisée sur quelques mm² de tache focale (S) sur la face avant d'une cible donnée pendant une durée (τ) de quelques nanosecondes [15]. L'impulsion laser peut donc être caractérisée par son intensité (Eq.1)

$$I\left(\frac{GW}{cm^2}\right) = \frac{E(J)}{\tau(ns)*S(cm^2)} \quad (1)$$

L'utilisation d'une couche diélectrique de confinement telle que l'eau a été longtemps identifiée comme une technique d'optimisation pour générer des chocs de plus grande intensité et de plus longue impulsion pour une densité de puissance laser donnée [16] (Figure 3).

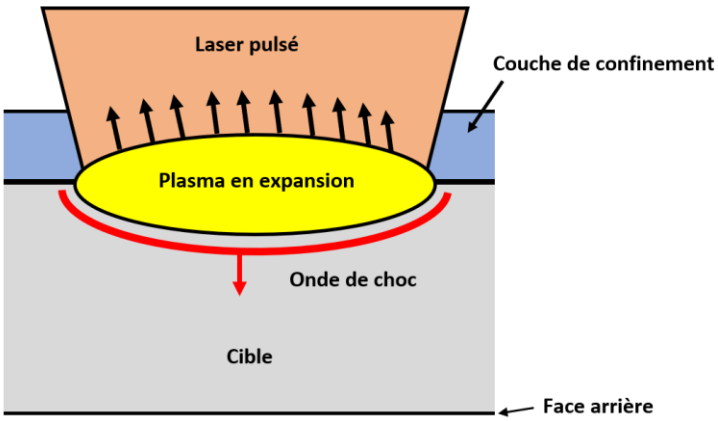

Figure 3 – Schématisation de la génération d'une onde de choc induite par laser dans un milieu confiné

L'amplitude (quelques GPa) de durée (quelques nanosecondes) du chargement résultant est appelée "Pression d'ablation". Elle implique de fortes discontinuités temporelles et spatiales, typiques d'une onde de choc.
L'onde de choc générée en face avant se propage alors dans l'épaisseur de l'échantillon. Selon les lois de transmission-réflexion et de l'impédance acoustique des milieux rencontrés, des zones de contraintes de traction peuvent être générées du fait de la recombinaison des ondes de relâchement. Si la contrainte de traction appliquée est supérieure à la résistance mécanique dynamique de la liaison, alors on observe une rupture cohésive ou adhésive de la liaison. Le principe est illustré par la Figure 4.

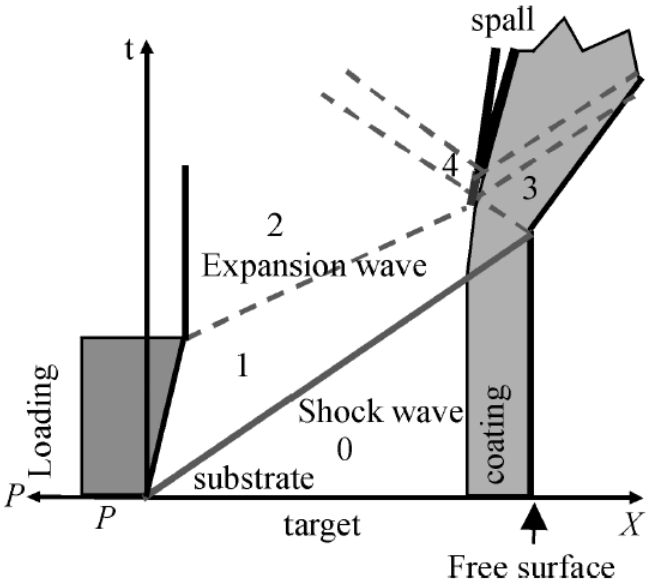

Figure 4 – Diagramme x-t résultant d'un essai de choc laser [17]

3.2 Paramètres et conditions d'essai

Des essais LASAT ont été réalisés sur les échantillons de la Figure 2, sur l'installation Belenos de l'ENSTA Bretagne. Le générateur laser impulsionnel est un laser Nd : YAG en 1064 nm, de durée d'impulsion à mi-hauteur de 9.8 ns et de diamètre de faisceau 12.7 mm en sortie. Il délivre une énergie maximale de 2.87 J après les systèmes optiques amenant le faisceau à la cible (Figure 5). La vitesse en face arrière est mesurée par le biais d'un système de Vélocimétrie Hétérodyne (VH) [18].

La mesure de cette vitesse permet d'obtenir des informations sur la réponse dynamique du matériau et éventuellement de son délaminage ou de la décohésion de revêtement.

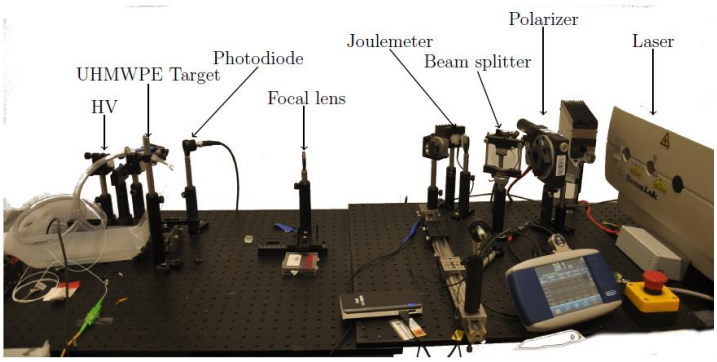

Figure 5 – Dispositif pour la réalisation des essais LASAT au générateur Belenos de l'ENSTA Bretagne

L'épaisseur totale de l'échantillon revêtu est de 2,87 mm. Un film d'aluminium de 70 µm (30 µm Al et 40 µm méthacrylate) est collé sur la face avant des deux échantillons afin de mieux maîtriser l'interaction laser-matière. Les tirs sont réalisés avec une couche transparente pour procurer un effet de confinement. Cette méthode a été étudiée par Tahan [19] sur cette installation. Un fin film d'or a également été déposé sur la face arrière des deux échantillons pour en augmenter la réflectivité nécessaire à la mesure VH.

4 Résultats et discussions

Plusieurs tirs ont été effectués à différentes énergies (100% Emax, 75% Emax, 50% Emax et 25% Emax). Les résultats obtenus en termes de vitesse en face arrière sont donnés par les figures 6 et 7 pour le Tensylon® non-revêtu et revêtu respectivement. Tahan [19] donne également la définition du chargement mécanique en pression P(r,t) correspondant avec r le rayon de la tache focale et t le temps.

Le premier constat qui peut être fait concerne les pics de vitesse en face arrière dont l'amplitude augmente avec l'énergie mise en jeu pour la création du choc, de manière quasi-linéaire (Figure 8). L'onde mettra plus de temps à traverser un échantillon s'il est de plus grande épaisseur ou si l'onde est moins rapide (choc plus faible).

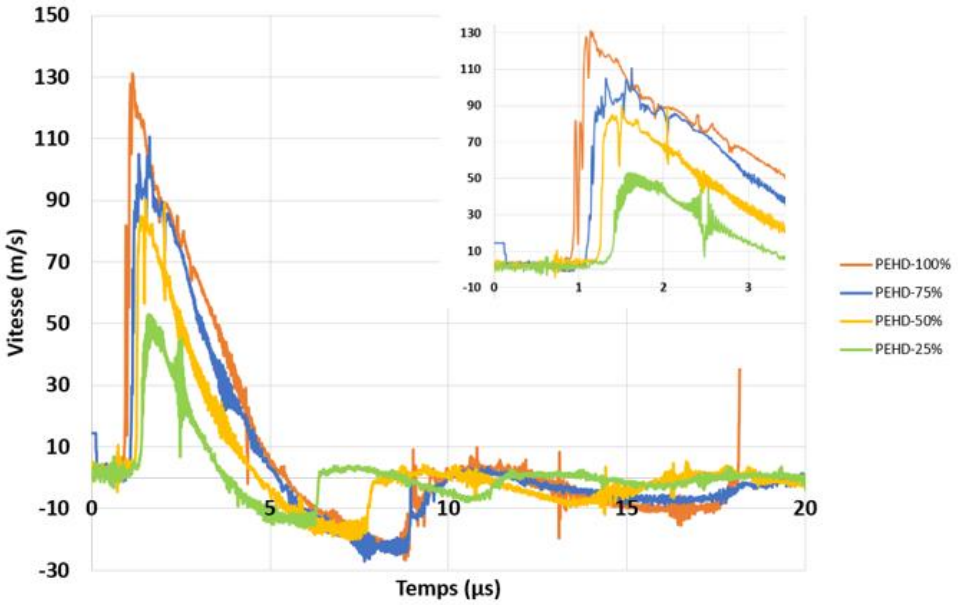

Figure 6 - Vitesse de la face arrière du Tensylon® non-revêtu

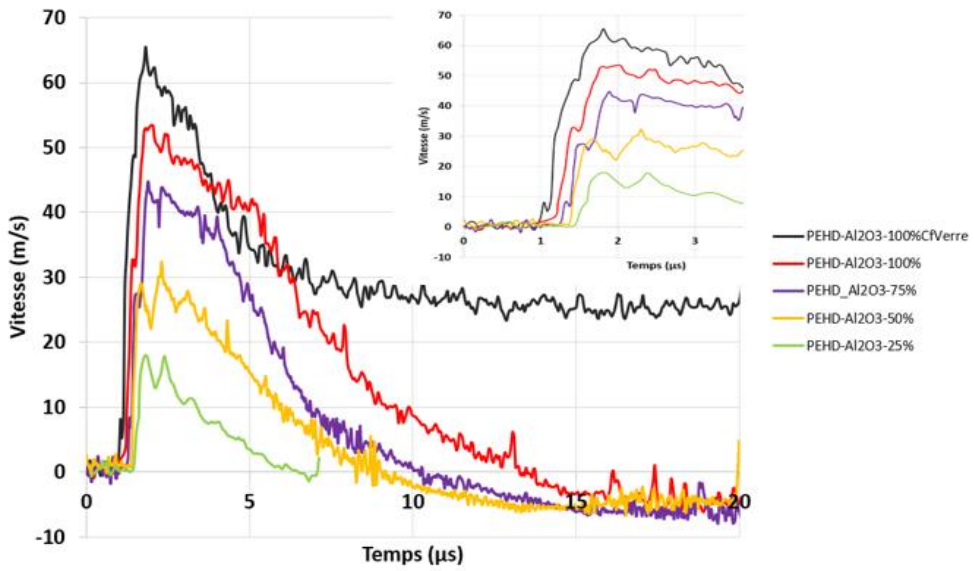

Figure 7 - Vitesse de la face arrière du Tensylon® revêtu

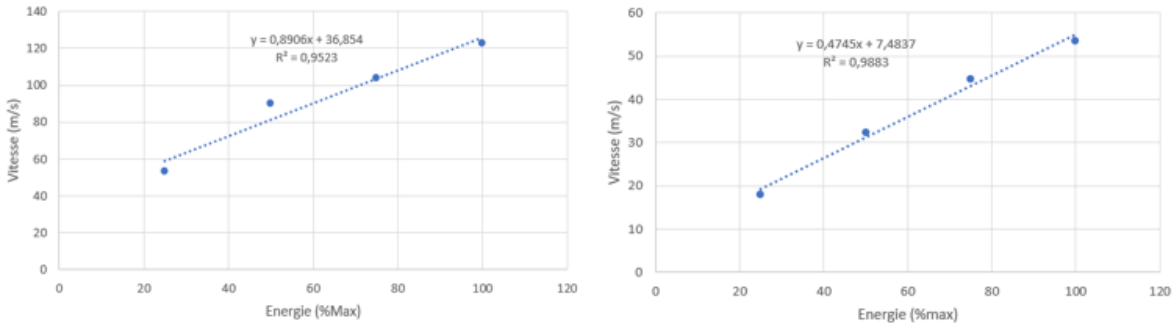

Figure 8 – Evolution de la vitesse en fonction de l'énergie du tir (à gauche : Tensylon® non-revêtu, à droite : Tensylon® revêtu)

On peut également noter une vitesse supérieure au niveau de la face arrière de l'échantillon non-revêtu (car moins épais donc moins d'atténuation lors de la propagation). La différence est significative dans le cas d'une énergie de 25% Emax. Cette différence tend à s'atténuer pour des taux d'énergie plus importants.

Les informations fournies par les courbes de vitesse en face arrière quand le confinement en eau du laser est utilisé ne montrent pas de délaminage au sein des échantillons. Un tir laser a été effectué avec l'énergie maximale et un confinement en verre qui va amplifier l'impulsion transmise dans la cible. Une comparaison peut être faite au niveau de la comparaison des vitesses de surface libre des deux tirs (Figure 7) à Emax confinement en eau et Emax confinement en verre. Nous pouvons voir aisément que la courbe vitesse-temps avec confinement en verre a une forme différente du reste des configurations. La vitesse ne revient pas à 0 dans ce cas de figure et reste quasi constante. Il s'agit de la vitesse d'envol des fragments de matière qui constituait le revêtement. Cela suggère qu'un délaminage s'est produit. Le seuil de délaminage doit se situer entre les deux courbes. Le même constat a été fait par Gay et al. [20].

Des observations micrographiques ont été réalisées sur les taches focales laissées par les différents tirs laser réalisés. Concernant le Tensylon® non-revêtu, les taches sont données par la Figure 9. Nous pouvons constater que le diamètre décroît avec la diminution de l'énergie du tir. Le même constat a été fait par Tahan [19] dans le cas d'un alliage d'aluminium. Cette constatation trouve son explication

dans le fait que l'impulsion laser est spatialement gaussienne. Lorsque l'énergie augmente, la zone ablatée augmente également. Nous pouvons également voir des fissures apparaitre pour les intensités les plus importantes. Elles pourraient résulter de rupture en flexion. Cependant, elles sont invisibles pour les intensités plus faibles i.e. 50%Emax et 25%Emax. Concernant le Tensylon® revêtu, cette tendance est moins évidente. En effet, aucune tendance ne se dégage quand l'énergie et le diamètre de la tache focale sont superposés. Néanmoins, certaines informations peuvent être tirées de ces observations. À partir de la Figure 10, nous pouvons constater qu'une partie de la matière a été éjectée au niveau de la tache focale. L'examen de la face avant nous montre également qu'une partie du revêtement s'est détaché laissant un cratère de taille relativement importante (à peu près 4,5mm² de surface), ce qui témoigne de la sévérité de ce tir à 100% d'énergie maximale avec confinement en verre et de l'endommagement qu'il provoque à travers l'épaisseur de l'échantillon. Cela concorde avec les résultats obtenus en termes de courbe d'historique des vitesses de surface libre. À noter qu'un cratère de moindre importance (de l'ordre de 0,7mm²) a été créé en face arrière lors du tir à 100% d'énergie maximale avec confinement en eau, ce qui peut suggérer que le seuil d'endommagement se situe à ce niveau d'énergie, même si cela paraît moins évident à travers l'analyse des signaux vitesse en face arrière associées. A partir de ceux-ci, on constate une périodicité d'environ 0.75 µs sur les pics des signaux de surface libre obtenus avec 25 et 50% Emax (fig. 7). Au-delà, cette périodicité disparaît au profit d'un signal plus haché avec de plus petites amplitudes faisant penser à un signal plus bruité ou encore mettant en évidence des aller-retours d'ondes de fréquence plus élevée. Cela traduirait le fait que l'interface PEHD/dépôt serait rompue. Toutefois, la coupe de ce matériau reste délicate une orientation vers des méthodes non destructives (microtomographie) est en cours d'étude.

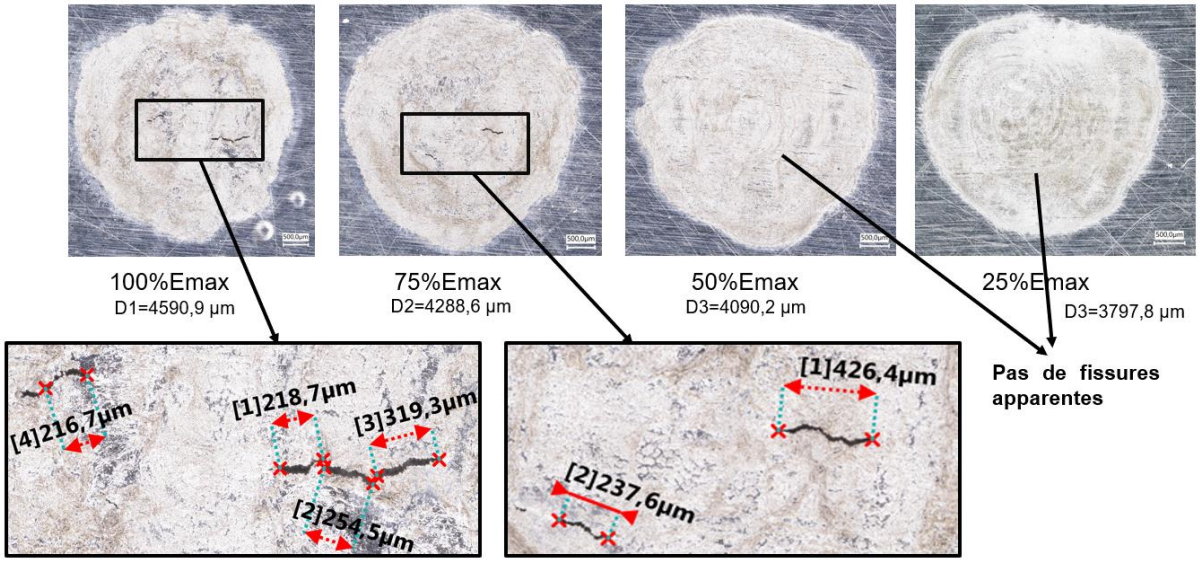

Figure 9 – Diminution du diamètre des taches avec la diminution de l'intensité du tir laser dans le Tensylon® non-revêtu

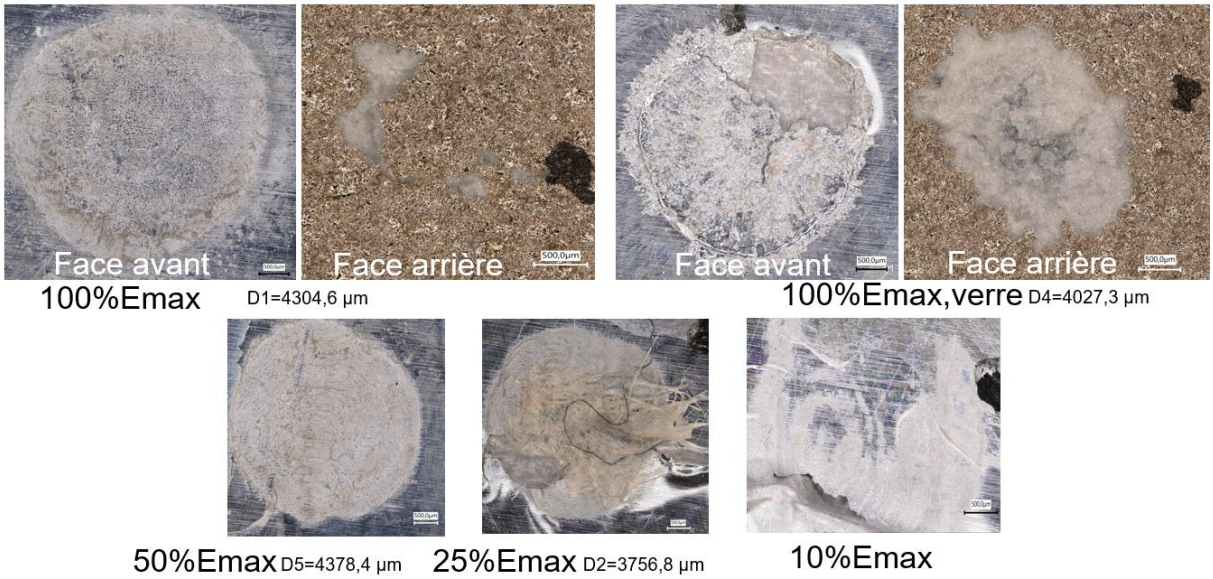

Figure 10 – Les taches résultantes des tirs laser sur le Tensylon® revêtu

5 Conclusion

Le but du présent travail était d'évaluer les possibilités d'utiliser l'essai LASAT comme essai d'adhérence sur un échantillon de composite à base de PEHD, revêtu par un dépôt d'alumine projeté thermiquement. Il en résulte que, même si un seuil d'adhérence n'a pu être clairement identifié, la méthode LASAT avec un confinement en verre a permis l'expulsion du revêtement de céramique projetée thermiquement. En outre, des pistes d'analyse sont en cours afin de trouver d'autres signatures d'endommagement, mais le PEHD étant délicat à couper pour des analyses microscopiques destructives, il a été choisi d'avoir recours à la microtomographie pour estimer la décohésion interfaciale lorsque l'endommagement n'est pas visible dans le revêtement. Ces essais ont permis en outre d'étudier l'effet d'un dépôt de revêtement d'alumine Al_2O_3 sur la réponse au choc laser d'un composite à base de PEhd, i.e. le Tensylon®. Suite à plusieurs tirs réalisés sur deux échantillons (revêtu et non-revêtu) à différentes énergies, plusieurs conclusions peuvent être tirées.

1. La vitesse maximale de l'onde est plus importante dans l'échantillon non-revêtu, ce qui atteste d'une plus grande résistance à la propagation de l'onde de choc à travers l'épaisseur de l'échantillon revêtu. Le gradient de temps (Δt) est, quant à lui plus important dans le cas du Tensylon® revêtu, ce qui est logique. L'onde mettrait plus de temps à traverser l'échantillon revêtu et plus épais. De plus, elle traverse un dépôt d'alumine, milieu agrégataire réputé comme dispersif pour la propagation des ondes. Il est également trouvé que la vitesse maximale augmente de manière linéaire avec l'augmentation de l'énergie laser dans les deux cas de figure, ce qui rassure quant à la reproductibilité des tirs.
2. La comparaison de deux tirs à iso-énergie sur le même échantillon (Tensylon® revêtu) avec deux matières de confinement (eau et verre) nous a permis d'obtenir deux réponses différentes mettant en exergue une décohésion débouchante en face arrière dans le cas du confinement en verre. Les observations micrographiques de face arrière associées sont concordantes avec les résultats obtenus en termes de diagrammes vitesse – temps.
3. L'observation des taches laissées par les différents tirs laser au microscope optique nous a montré que dans le cas du Tensylon® non-revêtu, la surface de la tache est proportionnelle à l'énergie du laser. Des fissures d'un même ordre de grandeur apparaissent en surface pour des intensités d'énergie importantes (100%Emax et 75%Emax).

En perspective de ce travail, une modélisation numérique de validation est prévue. Un modèle va être mis au point afin d'étudier la réponse mécanique au choc laser et d'évaluer la résistance au délaminage du matériau et ainsi déterminer une contrainte seuil. Une analyse microscopique et chimique approfondie est également au programme pour une meilleure compréhension des phénomènes locaux résultants de ces essais. Enfin, cette faisabilité ouvre la voie de l'optimisation du procédé de dépôt en vue d'obtenir à la fois des revêtements céramiques plus adhérents et plus épais.

Remerciements

Les auteurs remercient l'AID (Agence de l'Innovation de Défense) pour le soutien financier de cette étude ainsi que le personnel technique de la plateforme MASMECA, en particulier Célia CAËR pour son assistance lors des observations microscopiques. Hakim HOEPFFNER de la société DuPont est vivement remercié pour la fourniture du matériau.

Références

[1] K. Karthikeyan, B. P. Russell, N. A. Fleck, H. N. G. Wadley, and V. S. Deshpande, "The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates," *Eur. J. Mech. - A/Solids*, vol. 42, pp. 35–53, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2013.04.002.

[2] B. P. Russell, K. Karthikeyan, V. S. Deshpande, and N. A. Fleck, "The high strain rate response of Ultra High Molecular-weight Polyethylene: From fibre to laminate," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 60, pp. 1–9, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.03.010.

[3] E. S. Greenhalgh, V. M. Bloodworth, L. Iannucci, and D. Pope, "Fractographic observations on Dyneema® composites under ballistic impact," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 44, pp. 51–62, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.08.012.

[4] J. Cline and B. Love, "The effect of in-plane shear properties on the ballistic performance of polyethylene composites," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 143, no. April, p. 103592, 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103592.

[5] L. Alil, M. Arrigoni, L. Deleanu, and M. Istrate, "Assessment of delamination in tensylon R uhmwpe composites by laser-induced shock," *Mater. Plast.*, vol. 55, no. 33, 2018.

[6] S. B. Sapozhnikov, O. A. Kudryavtsev, and M. V. Zhikharev, "Fragment ballistic performance of homogenous and hybrid thermoplastic composites," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 81, pp. 8–16, 2015, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2015.03.004.

[7] F. Zulkifli, J. Stolk, U. Heisserer, A. T. M. Yong, Z. Li, and X. M. Hu, "Strategic positioning of carbon fiber layers in an UHMwPE ballistic hybrid composite panel," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 129, no. August 2018, pp. 119–127, 2019, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.02.005.

[8] L. Alil, M. Arrigoni, S. Badea, R. Ginghina, L. Matache, and P. Mostovykh, "Ballistic study of tensylon-based panels," *Express Polym. Lett.*, vol. 12, no. 6, pp. 491–504, 2018.

[9] Q. Liu *et al.*, "Investigating ballistic resistance of CFRP/polyurea composite plates subjected to ballistic impact," *Thin-Walled Struct.*, vol. 166, no. February, p. 108111, 2021, doi: 10.1016/j.tws.2021.108111.

[10] B. Prawara, E. Martides, B. Priyono, H. Ardy, and N. Rikardo, "Wear and impact resistance of HVOF sprayedceramic matrix composites coating," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1710, no. August, 2016, doi: 10.1063/1.4941498.

[11] 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, doi: 10.1088/0022-3727/40/10/019.

[12] G. Darut *et al.*, “State of the art of particle emissions in thermal spraying and other high energy processes based on metal powders,” *J. Clean. Prod.*, vol. 303, p. 126952, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126952.

[13] J.R. Davis, Ed., *Handbook of thermal spray technology*, ASM Intern. 2004.

[14] B. Fauchais, P., Heberlein, J.V.R., *Thermal Spray Fundamentals - from Powder to Part.*, Pub. Sprin. Pub. Springer, London., 2014.

[15] S. Bardy *et al.*, “strength of a TA6V4 / composite bond using LASAT,” *JEC Compos. Mag. - Technol. NDT*, no. October, pp. 58–62, 2017.

[16] C. Le Bras *et al.*, “Novel Confinement Possibility for Laser Shock: Use of Flexible Polymer Confinement at 1064 nm Wavelength,” *Metals* , vol. 11, no. 9. 2021, doi: 10.3390/met11091467.

[17] M. Arrigoni, M. Boustie, C. Bolis, L. Berthe, S. Barradas, and M. Jeandin, “Evolutions of the LASer Adhesion Test (LASAT) for the debonding of coatings on substrates above the millimeter range thickness,” *J. Phys. IV Fr.*, vol. 134, pp. 739–744, Aug. 2006, [Online]. Available: https://doi.org/10.1051/jp4:2006134114.

[18] P. Mercier, J. Benier, A. Azzolina, J. Lagrange M., and D. Partouche, “Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments,” *J. Phys. IV Fr.*, vol. 134, pp. 805–812, Aug. 2006, [Online]. Available: https://doi.org/10.1051/jp4:2006134124.

[19] G. Tahan, “Etude des assemblages collés sous choc - Propriétés mécaniques après choc laser,”, Thèse de Doctorat, ENSTA Bretage, 2018.

[20] E. Gay, L. Berthe, M. Boustie, M. Arrigoni, and M. Trombini, “Study of the response of CFRP composite laminates to a laser-induced shock,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 64, pp. 108–115, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.04.004.