HAL
open science

Experimental study of composite damage under LASER shock

Elise Gay, Laurent Berthe, Michel Boustié, M. Arrigoni, Patrick P. Mercier, Jacky Bénier

To cite this version:

Elise Gay, Laurent Berthe, Michel Boustié, M. Arrigoni, Patrick P. Mercier, et al.. Experimental study of composite damage under LASER shock. Matériaux et Techniques, 2012, 100 (6-7), pp.703-712. 10.1051/mattech/2012029 . hal-02399956

HAL Id: hal-02399956

https://hal.science/hal-02399956

Submitted on 9 Dec 2019

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.

Étude expérimentale de l'endommagement de composites sous choc LASER

E. Gay[1], L. Berthe[1], M. Boustie[2], M. Arrigoni[3], P. Mercier[4] et J. Bénier[4]

[1] *Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (CNRS), Arts et Métiers ParisTech, 151 bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France*
e-mail : elise.gay@hotmail.fr
[2] *Département Physique et Mécanique des Matériaux, Institut Pprime (CNRS), ENSMA, 1 av. Clément Ader, 86960 Futuroscope Cedex, France*
[3] *Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes EA 4325, ENSTA-Bretagne, 2 rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9, France*
[4] *CEA, DAM, DIF, 91297 ARPAJON*

Mots-clés :
Choc LASER ; haute vitesse de déformation ; composite ; carbone époxy ; délaminage

Résumé – Dans un contexte de mise en œuvre croissante des composites dans les secteurs aéronautiques et de la défense, la compréhension de leur comportement sous choc et de l'endommagement induit est un point crucial développé dans cette étude. Des LASER impulsionnels intenses sont mis en œuvre pour la génération d'impacts localisés et calibrés sur ces matériaux complexes, supportés par de nombreux diagnostics en temps réel et post-choc pour l'étude et la quantification de l'endommagement dynamique.

Key words:
LASER shock; high strain-rate; composite; carbon epoxy; delamination

Abstract – Experimental study of composite damage under LASER shock. In a context of rising use of composite materials in aeronautic or defense fields, the understanding of the behavior under shock and induced damage of these complex materials is a key issue developed in this study. Shock induced by LASER pulse offers a calibrated method to study material damage at conditions of hypervelocity impact located in a small area. Experiments are supported by real-time and post shock diagnostics to study and quantify dynamic delamination.

Dans les domaines aéronautiques et balistiques, la question de l'endommagement sous choc est anticipée en vue d'être minimisée. La mise en œuvre d'ondes de choc induites par une impulsion LASER de très courte durée (de l'ordre de quelques ns) génère un impact localisé de forte amplitude et éventuellement un endommagement dynamique contrôlé suite à ses effets mécaniques. La technique a d'ores et déjà été mise en oeuvre sur matériaux composites en fibre de carbone et matrice époxy, initialement pour le test d'adhérence de composites collés [1–3], pour l'étude du comportement sous choc de composites et de l'adhérence des plis [4–6]. L'analyse des phénomènes induits par une telle sollicitation est effectuée sur la base d'expérimentations supportées par les diagnostics : mesure de vitesse de surface libre, visualisation transverse par ombroscopie des éjections, récupération des fragments dans des collecteurs, observation macro- et microscopique post choc des cibles.

Cet article expose l'ensemble des techniques mises en œuvre ainsi que les résultats expérimentaux associés pour la caractérisation de l'endommagement dynamique, illustrés pour le cas des composites stratifiés carbone/époxy à fibres longues soumis à un choc de forte amplitude. Une étude analytique simplifiée de ces matériaux multicouches précise les origines du délaminage induit par la propagation du choc.

1 Principe du choc induit par LASER

Le principe de génération de contrainte interne par impulsion LASER repose sur les mécanismes de l'interaction LASER-matière

et sur la propagation d'ondes de choc au sein d'une cible d'épaisseur millimétrique.

Le faisceau d'une impulsion LASER d'une durée de quelques ns est focalisé à la surface d'une cible sur un diamètre d'au moins 2 à 3 fois son épaisseur pour considérer la propagation monodimensionnelle des ondes [7]. L'irradiation transforme une fine couche de matière en un plasma, dont la détente génère en réaction un chargement en compression d'une durée similaire à celle de l'impulsion. L'amplitude de pression atteint jusqu'à plusieurs dizaines de GPa pour des intensités de l'ordre du GW.cm^{-2}.

L'intensité incidente est définie par $\varphi = E/\tau.S$, avec E l'énergie incidente, τ la durée d'impulsion à mi-hauteur du profil, et S la surface irradiée.

La pression d'impact générée en surface incidente dépend de l'intensité du rayonnement comme l'indique la loi de Grün donnée par l'équation (1) [8], applicable au polystyrène pour une longueur d'onde de 1,06 μm, et extrapolée pour la configuration expérimentale présentée.

$$P(\text{GPa}) = 1440\ \Phi^{0,8}\ (10^{14}\ \text{W.cm}^{-2}). \quad (1)$$

Le choc, référencé 1 sur le schéma proposé en figure 1, se propage au sein de la matière condensée, suivi à la fin du chargement d'un faisceau d'ondes de détente 2 qui relaxe le matériau à son état initial. Lorsque l'onde de choc atteint la surface libre, elle l'accélère et se réfléchit en une onde de détente 3. Son interaction avec le faisceau de détente incidente 2 génère une zone de traction susceptible d'induire l'endommagement de la cible à proximité de la face opposée au choc.

Si l'amplitude de la sollicitation est importante, la couche de matière entre l'endommagement et la face libre se désolidarise du reste de la cible et s'envole.

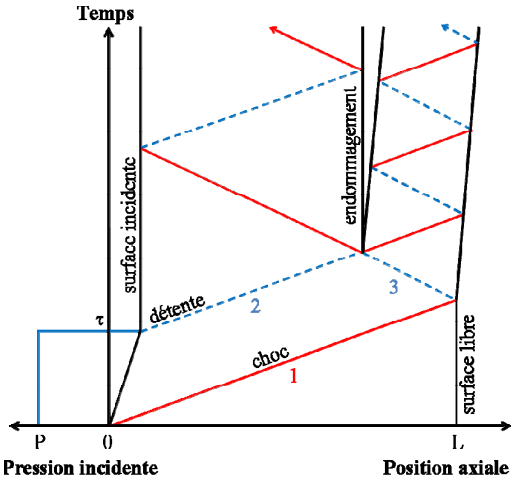

Fig. 1. Schéma du processus d'endommagement par choc représenté sur un diagramme espace-temps de propagation d'une onde de choc endommagente. Ondes de compression en rouge, ondes de détente en pointillé bleu.

Fig. 1. Description of shock wave propagation on a space versus time diagram within an homogeneous plate with damage. Shock waves are represented by red full lines, release waves in dashed blue lines.

2 Configuration expérimentale

2.1 Sources de choc et diagnostics

Les expériencess dont les résultats sont détaillés ci-après ont été réalisées sur les LASER Néodyme (verre) Alisé (CEA / CESTA) et LULI2000 (Laboratoire pour l'Utilisation des LASER Intenses, École Polytechnique), dont la longueur d'onde est de 1,06 μm et une durée d'impulsion de 2,5 ns, répartis sur un disque d'un diamètre approximatif de 2,5 mm, avec des niveaux d'énergie maximales respectives de 150 et 1200 J. Dès lors il est envisageable d'atteindre des densités de puissance de l'ordre de 8 TW.cm^{-2} soit un choc équivalent de plus de 100 GPa.

Par ailleurs les cibles sont placées dans une chambre sous vide secondaire pour éviter les phénomènes de claquage dus à la focalisation du faisceau dans l'air avant qu'il n'atteigne la cible. Elles sont solidarisées au banc d'essai afin d'empêcher leur envol sous l'effet du choc.

La figure 2a schématise la configuration expérimentale. Divers instruments équipent ces installations pour l'observation en temps réel du délaminage dynamique induit par les effets mécaniques du choc. La vitesse dynamique de surface libre (en vis-à-vis de la surface impactée), est mesurée en cours d'essai par Interférométrie Doppler LASER via la technique de Vélocimétrie Hétérodyne (VH) à dépouillement fréquentiel [9], ou par VISAR [10]. Par ailleurs la visualisation transverse par ombroscopie précise la morphologie d'une éventuelle éjection de matière en face libre quelques microsecondes après impact. L'installation d'un gel, dans lequel les

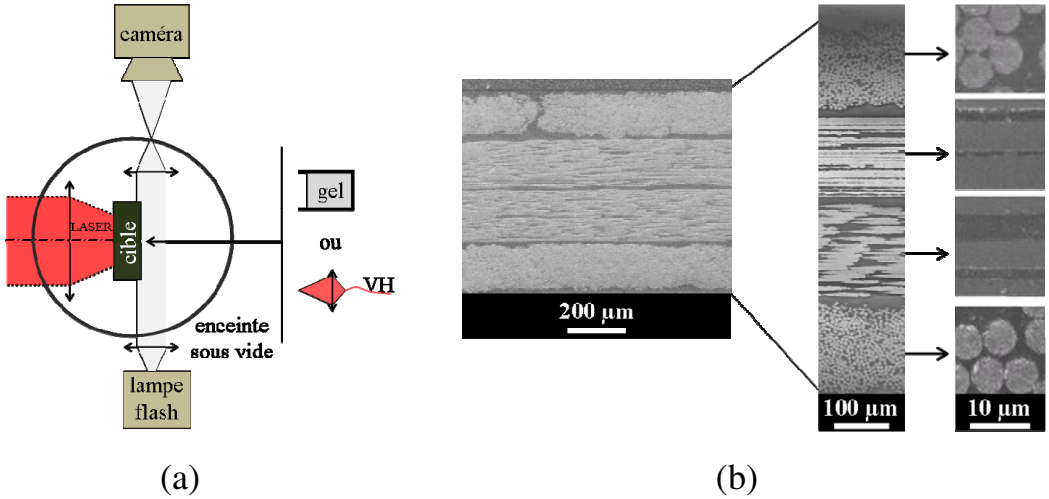

Fig. 2. Configuration expérimentale : (a) schéma du dispositif, et (b) observation microscopique d'un composite 4 plis en vue de coupe avec grossissement de la microstructure des plis.

Fig. 2. (a) Experimental set-up diagram, and (b) Cross section micrograph of carbon epoxy 4 ply composite with high magnification of the microstructure.

Tableau 1. Paramètres expérimentaux des essais à intensité croissante. La pression incidente est estimée par la formule de Grün [8], la vitesse d'éjection mesurée quelques microsecondes après impact par VH ou VISAR.

Table 1. Parameters of the experiments on 4 ply composites with increasing shock intensity. Incident pressure is estimated by the Grün relation [8], the ejection velocity is measured a few microseconds after the impact by VH or VISAR.

Réf cible	Diamètre focal (mm)	Énergie (J)	Durée d'impulsion (ns)	Intensité du choc ($GW.cm^{-2}$)	Pression équivalente (GPa) (Éq. (1))	Vitesse d'éjection ($m.s^{-1}$)
Tir 1	2,4	13	2,6	107	5,1	250
Tir 2	2,2	127	2,5	1340	38,2	1300
Tir 3	2,4	181	2,5	1602	44,1	1250
Tir 4	2	172	2,4	2279	58,5	1500
Tir 5	2,3	853	2,9	7082	144,9	2500

débris s'incrustent, est également un moyen alternatif de caractérisation de la vulnérabilité sous choc, mais demeure incompatible avec tout diagnostic de mesure de vitesse par restriction de l'accès à la surface libre.

Étant donné le caractère local de la sollicitation, l'étendue des déformations est limitée et les échantillons sont récupérés pour leur analyse post-choc, afin de quantifier plus précisément la dégradation.

2.2 Matériaux mis en œuvre

Les expériences ont été conduites sur des échantillons composites stratifiés carbone/époxy à fibres unidirectionnelles dans leur configuration 4 plis suivant l'orientation $[0°/90°]_S$. La figure 2b illustre les observations morphologiques de la microstructure d'un stratifié 4 plis de 600 μm d'épaisseur sur lesquelles les plis (130–140 μm de fibres à 70 % en volume noyées dans l'époxy) sont discernés des interplis en résine pure (de 10 à 40 μm d'épaisseur). Les plaques présentent une surface de plusieurs cm^2 afin d'éviter toute réflexion d'onde sur les bords de l'échantillon.

3 Résultats expérimentaux

Le tableau 1 synthétise l'ensemble des paramètres de choc des essais proposés dans cette étude.

3.1 Mesure de vitesse de surface libre

La traction de très forte amplitude à proximité de la surface libre induit l'arrachement

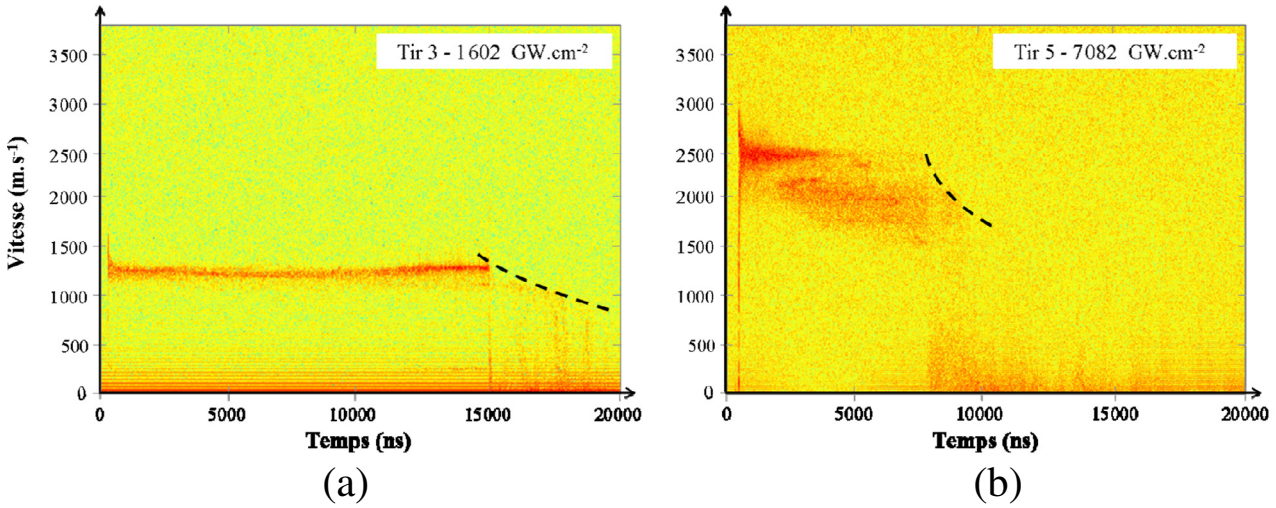

Fig. 3. Spectrogrammes de vitesse de surface libre de composites 4 plis soumis à un choc endommageant, recueillis par Vélocimétrie Hétérodyne avec matérialisation du signal de vitesse par le trait rouge. L'hyperbole pointillée représente l'instant $t(v)$ où un fragment de vitesse v impacte la fenêtre protectrice de la tête optique de la sonde VH. L'origine temporelle a été ajustée à l'instant d'impact, dont l'irradiation est de : (a) 1602 GW.cm^{-2} (Tir 3), et (b) 7082 GW.cm^{-2} (Tir 5).

Fig. 3. Rear free surface velocity of 4 ply composite subjected to a strong shock, recorded by Heterodyne Velocimetry, the velocity is represented by the red line. The black dashed line plots the instant $t(v)$ when a fragment impacts with velocity v the protective window of the sensor. The time origin is adjusted at the moment of impact, with an irradiation of: (a) 1602 GW.cm^{-2} (Shot 3), and (b) 7082 GW.cm^{-2} (Shot 5).

puis l'éjection de matière à une vitesse atteignant jusqu'à quelques milliers de m.s^{-1} selon l'intensité. La figure 3 illustre ces profils de vitesse de surface libre, relevés en temps réel par la technique de Vélocimétrie hétérodyne à deux puissances de choc différentes (Tirs 3 et 5).

Pour les deux cas (Figs. 3a et b), les spectrogrammes issus du dépouillement fréquentiel des relevés présentent une importante accélération 200 ns après l'impact, correspondant au débouché de l'onde principale (vitesse de propagation de l'onde ≈3000 m.s^{-1} sur une épaisseur approximative de 600 μm), suivi d'un palier de vitesse. L'amplitude de ce palier correspond à la vitesse moyenne des particules éjectées : 1250 m.s^{-1} (Fig. 3a), 2500 m.s^{-1} (Fig. 3b).

Par la suite cette éjection principale s'étend hors du champ de mesure, ou se désagrège en particules plus fines plus difficilement détectables, car le signal s'atténue. Un nuage de fragments est par la suite détecté, particulièrement pour le cas à très haute intensité (Fig. 3b), dans une gamme de vitesse comprise entre 2000 et 2200 m.s^{-1}. Ces débris correspondent aux fragments secondaires plus lents, mis en avant par visualisation transverse (paragraphe suivant) dans le sillage de l'éjection principale. La présence de ces fragments s'explique par le délaminage multiple issu des mises en contrainte secondaires de moindre amplitude (voir Fig. 9).

L'arrêt brusque des débris à partir de t = 15 μs (Fig. 3a) et 7 μs (Fig. 3b), est induit par leur impact sur la fenêtre de polycarbonate protectrice de la tête optique de la sonde VH.

Cet impact se produit d'autant plus tôt que la vitesse de vol est élevée, induisant sur le spectrogramme la forme concave décroissante matérialisant les différents instants d'impact, fonction de la distance cible-fenêtre (15–16 mm dans les deux cas), et de la vitesse de l'éjection.

La technologie VH possède la capacité de sonder une population de fragments de petites dimensions, animés de vitesses différentes dans un champ d'observation restreint, par la modulation de fréquences du système. Par ailleurs la loi de répartition spatiale de vitesse est éventuellement étudiée par la propriété de mesure multipoint de la technique.

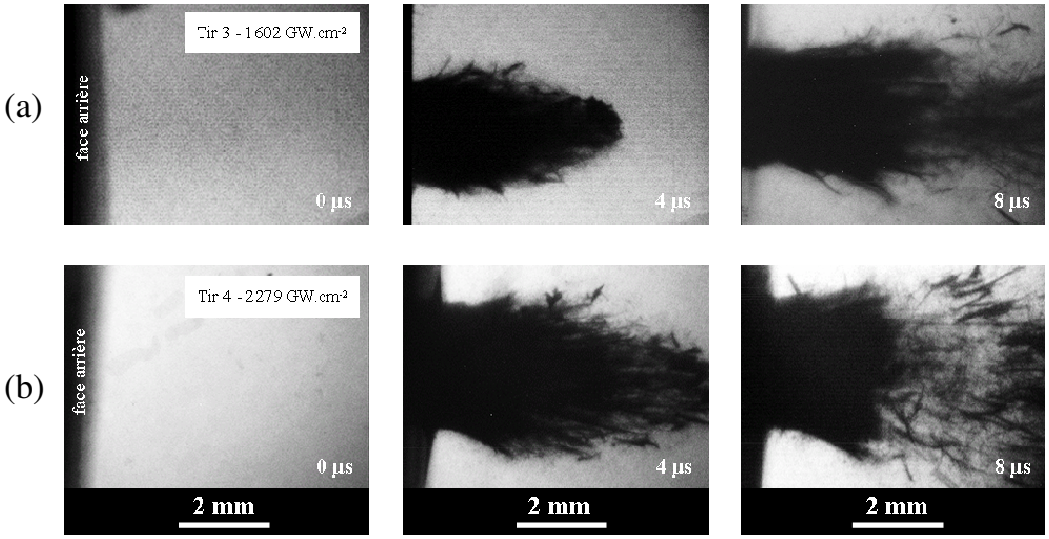

Fig. 4. Visualisations transverses en face libre des fibres éjectées d'un composite 4 plis soumis à un choc de forte amplitude : (a) 1602 GW.cm^{-2} (Tir 3), et (b) 2279 GW.cm^{-2} (Tir 4). La surface plane sombre à l'extrême gauche des prises de vue délimite la face libre de la cible. Le choc initial se propage dans la cible de la gauche vers la droite, et les délais d'acquisition après impact sont inscrits dans le coin de la prise de vue. Résolution spatiale : 3,6 μm.pixel^{-1}.

Fig. 4. Optical shadowgraph of fibers ejection from a 4 ply composite subjected to a strong shock with intensity: (a) 1602 GW.cm^{-2} (Shot 3), and (b) 2279 GW.cm^{-2} (Shot 4). The dark surface on the left side defines the free surface of the target. The shock propagates from the left to the right, and record time is written in the bottom right hand corner. Spatial resolution: 3.6 μm.pixel^{-1}.

3.2 Visualisation transverse

La morphologie de la désolidarisation et de l'éjection rapide du pli opposé au choc est mise en évidence par visualisation dynamique transverse [11].

Les résultats, sous forme de prises de vue successives du profil de la surface en vis-à-vis du choc, sont recueillis quelques microsecondes après impact par des caméras CCD intensifiées pendant une durée d'exposition de 10 ns. Ces visualisations sont avancées en figure 4 pour deux densités de puissance différentes (Tir 3 et 4). L'image de référence (avant impact, identifiée par la légende 0 μs) marque la position initiale de la surface libre. Le choc se propage dans l'échantillon de la gauche vers la droite et les fibres sont par conséquent éjectées vers la droite sur les acquisitions.

Ces acquisitions réalisées à différents délais après impact montrent l'éjection principale et sa désagrégation progressive suivie d'un nuage de débris plus lents et de plus petites dimensions, en accord avec les observations du spectrogramme VH.

L'ordre de grandeur de la vitesse moyenne de l'éjection du tir 3 (Fig. 3a) est cohérent avec la mesure VH présentée en figure 3a, puisque qu'une vitesse moyenne de 1100 m.s^{-1} est estimée entre deux visualisations par mesure du déplacement en fonction du délai.

3.3 Observation post-choc des gels

Les fragments éjectés suite au tir 4, dont une visualisation transverse est proposée en figure 4b, ont été récupérés par un collecteur en varagel [11] disposé 10 cm en arrière de la surface libre. Les observations par microscopie optique du collecteur, dans lequel les multiples particules submillimétriques sont incrustées suite à leur fragmentation, sont présentées en figure 5.

La multitude de fragments, d'une taille caractéristique de quelques dizaines de μm, n'a pénétré que très peu profondément dans

Fig. 5. Vues microscopiques au travers d'un collecteur en Varagel des fibres éjectées issues d'une cible de composite 4 plis choquée à 2279 GW.cm^{-2} (Tir 4). Sur les vues de côté, l'entrée des fragments est observée de la gauche vers la droite au travers du collecteur, la zone plus claire correspondant au gel.

Fig. 5. Microscopic observations through a Varagel collector of fibers ejected from a 4 ply composite target after a shock of 2279 GW.cm^{-2} (Shot 4). On the side views, fragments penetration is observed from the left to the right within the gel.

une couche d'environ 2 mm sous la surface du gel. Cette profondeur de pénétration relève de la quantité de mouvement du fragment et de son profil aérodynamique. La vitesse d'éjection des fragments du composite étant importante (approximativement 1500 m.s^{-1}, relevée par visualisation transverse), la faible énergie cinétique est imputable à la taille des fragments générés, d'autant que leur masse volumique est basse.

Par ailleurs leur répartition dans le gel semble aléatoire, avec une composante centrifuge dans la vitesse d'éjection de certains fragments.

L'analyse des fragments récupérés dans les gels permet d'évaluer leur distribution en taille, et ouvre la perspective de caractériser les propriétés balistiques des stratifiés. Dès lors un gel calibré de densité moindre, induisant une plus grande pénétration des fibres dans sa structure est nécessaire à l'observation de la fragmentation dynamique de ces matériaux.

3.4 Observation des cibles soumises au choc

De par le faible taux de déformation induit par la technique de choc LASER, l'examen post-choc des cibles est permis et renseigne leur degré d'endommagement. Les macrographies présentées en figure 6 illustrent en premier lieu l'arrachement des fibres en surface libre, dont l'étendue croît avec l'intensité. L'arrachement lamellaire du pli extérieur suivant la direction des fibres résulte de son caractère isotrope transverse. Par ailleurs la décohésion suivant un faciès net précise le caractère fragile de la rupture dynamique initiée par microfissures.

L'endommagement est quantifiable de façon élémentaire par la surface délaminée apparente, relevée en surface libre par analyse d'image sur les macrographies et dont l'évolution est présentée en figure 7a. Par ailleurs la base de données constituée lors des nombreuses campagnes expérimentales établit la relation entre la vitesse maximale d'éjection présentée auparavant et la pression du choc, visualisée en figure 7b. L'éjection est d'autant plus rapide que le choc est fort, en accord avec l'approche de Gurney [12].

Ces deux variables montrent que la quantité d'endommagement est proportionnelle à la pression du choc incident, et donc avec le niveau de contrainte interne.

Dès lors il est envisageable d'intégrer ces données pour un essai de validation de l'adhérence des plis entre eux : connaissant les niveaux d'endommagement (en termes d'aire délaminée et/ou de vitesse d'éjection) associés à un choc de pression fixe, les échantillons seraient soumis à un tir calibré. Une cible faible présentera une résistance à l'endommagement peu importante et les observables seront supérieures à celles des abaques présentés en figure 7, révélant la faiblesse du matériau. La perspective d'un tel essai requiert une base phénoménologique

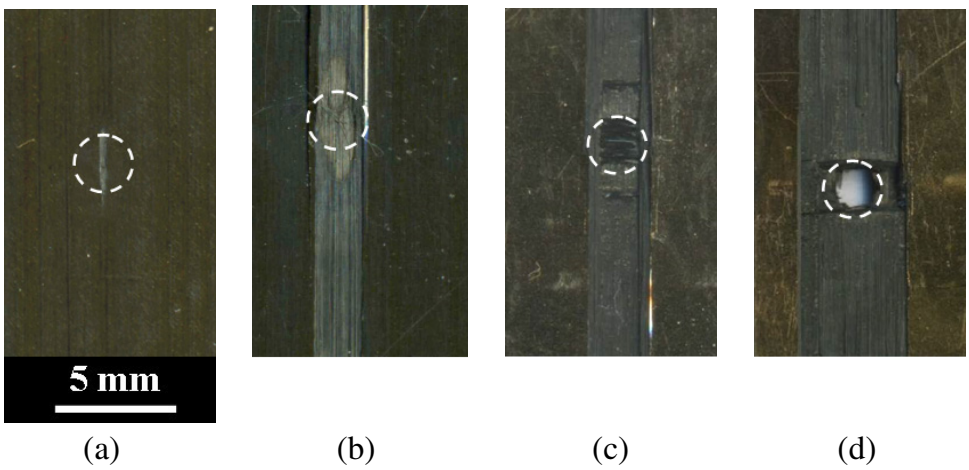

Fig. 6. Macrographies de la face opposée au choc d'échantillons composites 4 plis soumis à une irradiation de : (a) 107 GW.cm^2 (Tir 1), (b) 1340 GW.cm^{-2} (Tir 2), (c) 2279 GW.cm^{-2} (Tir 4), et (d) 7082 GW.cm^{-2} (Tir 5). La zone d'irradiation sur la face incidente non visualisée est délimitée par les cercles pointillés blancs.

Fig. 6. Macroscopic observations of the rear surface (opposite to the shock) of 4 ply composite subjected to irradiation of : (a) 107 GW.cm^{-2} (Shot 1), (b) 1340 GW.cm^{-2} (Shot 2), (c) 2279 GW.cm^{-2} (Shot 4), and (d) 7082 GW.cm^{-2} (Shot 5). The irradiation zone on the incident surface is represented by white dashed circles.

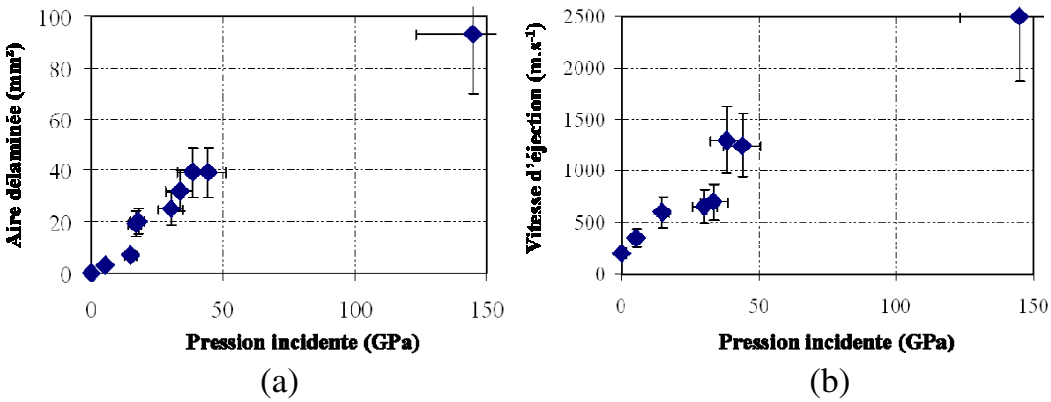

Fig. 7. Sévérité du délaminage de composites 4 plis en fonction de la pression incidente du choc, mesurée en surface libre par deux grandeurs : (a) Aire apparente de délaminage en surface libre, et (b) Vitesse d'éjection moyenne des fragments, mesurée par VH et VISAR.

Fig. 7. Quantification of the delamination of 4 ply composite depending on the incident shock pressure: (a) Apparent delaminated area on the back surface, and (b) Velocity of fragment ejection, measured by VH and VISAR.

plus conséquente, *y* compris sur composites faibles.

Suite à la coupe métallographique dans la section médiane de la zone choquée, les observations microscopiques associées aux acquisitions de la figure 6 précisent la quantité de délaminage des stratifiés, confirmant la rupture fragile. Avec l'élévation de l'intensité, les niveaux de contraintes dans le stratifié sont accentués. Ceux-ci sont responsables du délaminage intralaminaire graduel par dépassement des limites à la rupture dans le dernier pli à proximité de la face opposée au choc. Le délaminage se traduit par des plans de fissuration parallèles à la zone d'impact, y compris dans l'interpli, accompagnés de fissures verticales consécutives à l'arrachement du dernier pli.

Dès lors le délaminage est à la fois inter et intra laminaire, d'autant que les mécanismes

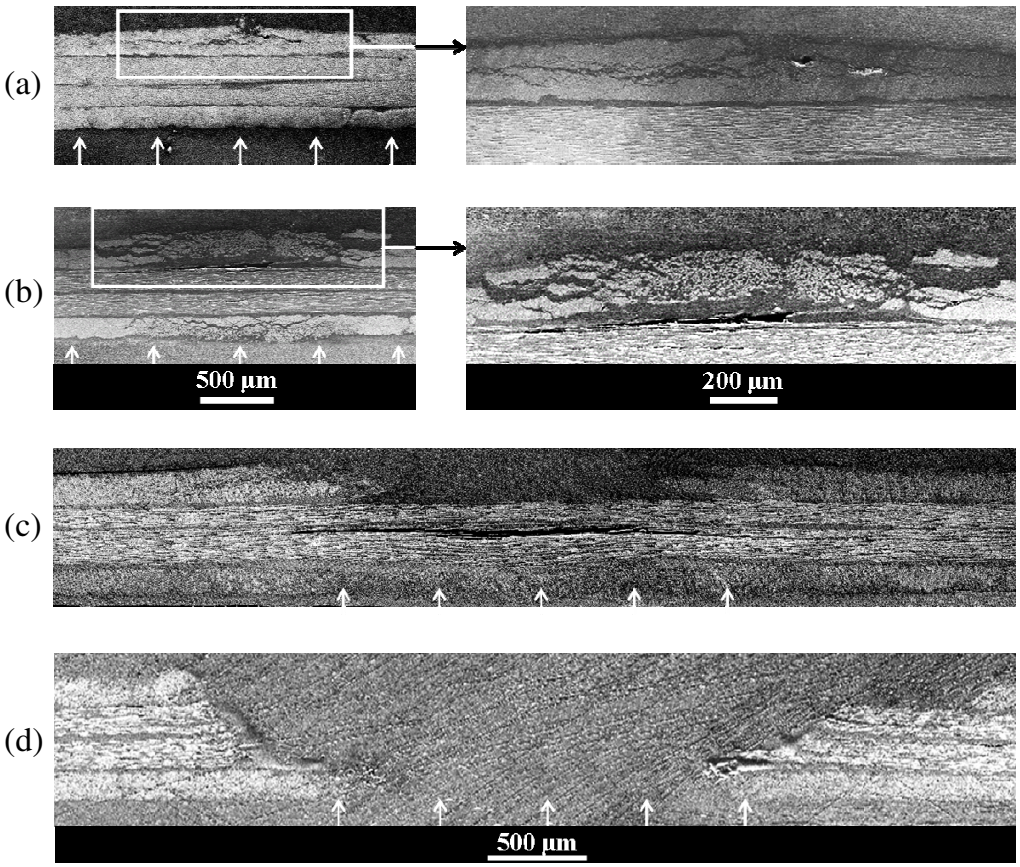

Fig. 8. Microscopies en vue de coupe de composites 4 plis soumis à un choc d'intensité croissante : (a) 107 GW.cm^{-2} (Tir 1), (b) 1340 GW.cm^{-2} (Tir 2), (c) 2279 GW.cm^{-2} (Tir 4), (d) 7082 GW.cm^{-2} (Tir 5). La zone d'irradiation sur la face incidente est matérialisée par les flèches blanches au bas des prises de vue.

Fig. 8. Transverse microscopic observations of 4 ply composites subjected to a shock with increasing pressure: (a) 107 GW.cm^{-2} (Shot 1), (b) 1340 GW.cm^{-2} (Shot 2), (c) 2279 GW.cm^{-2} (Shot 4), (d) 7082 GW.cm^{-2} (Shot 5). Pictures are presented with laser impact on the bottom face, indicated by the white arrows.

de propagation des ondes de choc au sein de matériaux hétérogènes induisent des niveaux de contraintes supérieurs dans la zone interpli (voir Fig. 9). À un stade extrême d'endommagement, la nappe extérieure se détache du composite et s'envole, comme constaté par les diagnostics résolus en temps.

La dégradation est également constatée dans le pli incident, elle est d'autant plus importante que l'intensité du choc est élevée, comme en témoignent les prises de vues à très haute intensité (plus de 1000 GW.cm^{-2}).

4 Discussion

La figure 9 propose une interprétation des phénomènes observés avec l'historique des niveaux de sollicitation interne sur un diagramme espace-temps. Il fournit une représentation de la propagation monodimensionnelle d'un choc dans un milieu stratifié de 4 plis encastré, modélisé par un empilement solidaire de strates isotropes dont les épaisseurs (voir Fig. 2b) et les caractéristiques dynamiques transverses [6] sont représentatives du matériau réel. Le calcul est réalisé avec SHYLAC [13], code hydrodynamique lagrangien explicite, basé sur la méthode des différences finies.

Sa lecture renseigne la chronologie de mise en contrainte avec une première mise en traction Réf 1 consécutive aux interactions des ondes partiellement réfléchies dans le premier et le second pli. Si l'amplitude du phénomène est telle que la contrainte

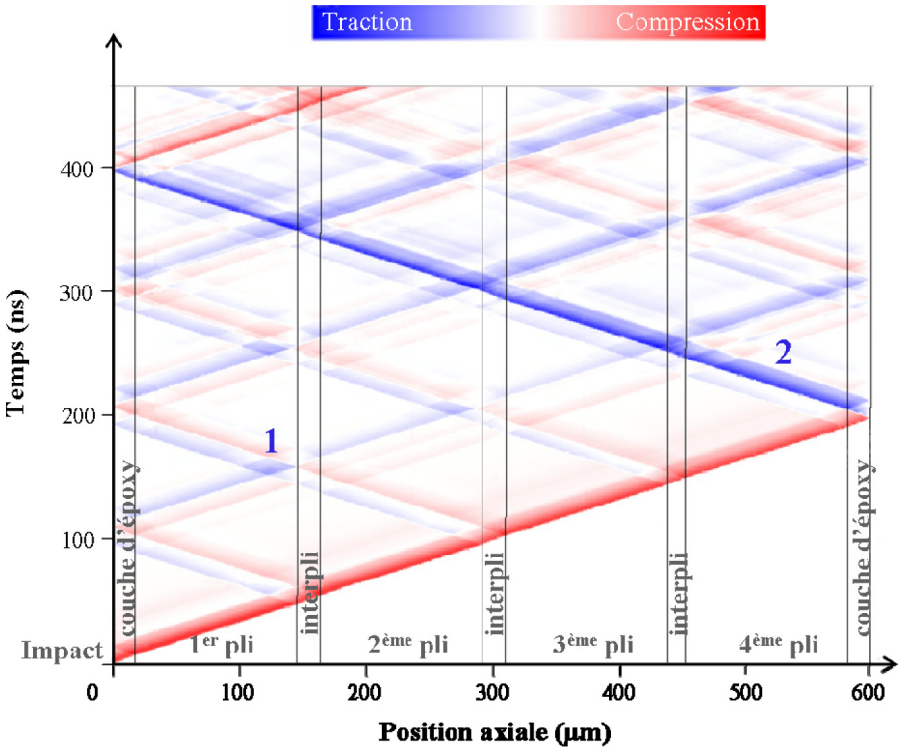

Fig. 9. Diagramme de pression espace-temps de propagation d'une onde de choc d'une durée de 3 ns dans un stratifié représentatif d'un composite 4 plis (sans endommagement). La mise sous contrainte des plans parallèles à la surface incidente par compression (pression positive) est représentée en niveau de rouge et la traction (pression négative) en bleu.

Fig. 9. Space-time diagram of the shock wave propagation with pulse duration 3 ns in a 4 ply composite (without damage). Compressive stress (positive pressure) is represented in red and traction (negative pressure) in blue.

générée est supérieure à la limite à la rupture, le délaminage survient suivant un plan parallèle à la zone d'impact.

La propagation de l'onde principale n'est pas affectée par cet éventuel délaminage et sa réflexion en surface libre est à l'origine de la forte traction référencée 2. Cette sollicitation induit l'endommagement intra et interlaminaire observé dans le dernier pli.

L'onde de traction poursuit sa propagation vers la face avant de la cible. Ces sollicitations de moindre amplitude induisent à très haute intensité un délaminage secondaire, responsable des nuages de particules observés sur les spectrogrammes VH (Fig. 3) et sur les visualisations transverses (Fig. 4).

Dès lors le jeu de réflexions des ondes est à l'origine de sollicitations internes aux matériaux [14], dont la contrainte est suffisante à la génération du multi-délaminage ayant conduit à la dislocation totale de l'ensemble des couches du composite présenté en figure 8d.

5 Conclusion

L'étude expérimentale de la réponse des composites à un choc de très grande amplitude renseigne les propriétés balistiques et l'endommagement sous choc, dont la gravité va de pair avec l'intensité de l'impact. L'éjection de matière sous les effets mécaniques du choc est caractérisée par de nombreux instruments, renseignant la base de données expérimentale sur laquelle appuyer la modélisation des phénomènes. Ces travaux mettent en évidence l'intérêt et le potentiel du LASER impulsionnel pour générer une traction modulable dans les composites, pour l'analyse de leur vulnérabilité sous sollicitation dynamique intense.

Remerciements

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet Franco-Canadien SATAC (Shock Adhesion Test

for Adhesively Bonded Composites) dont l'objectif est le développement et l'application industrielle du test d'adhérence par ondes de choc induites par LASER sur des assemblages de composites collés. Le laboratoire IAR (Institute for Aerospace Research, Ottawa) assure la provision en échantillons composites. Nous remercions la DGA pour son financement et les auteurs sont particulièrement reconnaissants aux laboratoires du CEA/CESTA (Alisé) et au LULI (LULI2000) de l'École Polytechnique pour la mise à disposition de leurs installations et l'appui technique des personnels. Par ailleurs merci à Émilien Lescoute et Thibaut De Résséguier de l'Institut Pprime pour la mise en œuvre du dispositif de visualisation transverse et la fabrication des gels, et à Mariette Nivard pour son aide précieuse en instrumentation.

Références

[1] R.H. Bossi, K. Housen, W. Shepherd, *Material Evaluation* **60** (2002) 1333-1338

[2] M.D. Banea, L.F.M. Da Silva, *J. Mater. : Design Appl. Part L* **223** (2009) 1-18

[3] M. Perton, A. Blouin, J.-P. Monchalin, E. Gay, L. Berthe, M. Boustie, M. Arrigoni, Adhesive bond testing by laser shock waves and laser interferometry, Proceeding of the 8th Joint Canada-Japan Workshop on Composites, Canada, 2010

[4] A. Yu, V. Gupta, *Compos. Sci. Technol.* **58** (1998) 1827-1837

[5] I. Gilath, S. Eliezer, S. Shkolnik, *J. Compos. Mater.* **24** (1990) 1138-1151

[6] E. Gay, L. Berthe, M. Boustie, M. Arrigoni, A. Johnston, R. Cole, J. Barroeta, E. Buzaud, Experimental and numerical investigation of composite behaviour at high strain rate, Proceeding of the 18th DYMAT Technical Meeting, Strasbourg, France, 2010

[7] D. Salzmann, I. Gilath, B. Arad, *Appl. Phys. Lett.* **52** (1988) 1128-1129

[8] J. Grün, R. Decoste, B.H. Ripin, J. Gardner, *Appl. Phys. Lett.* **39** (1981) 545-547

[9] P. Mercier, J. Benier, A. Azzolina, J.M. Lagrange, D. Partouche, *Journal de Physique IV* **134** (2006) 805-812

[10] L.M. Barker, R.E. Hollenbach, *J. Appl. Phys.* **43** (1972) 4669-4675

[11] E. Lescoute, Étude de la fragmentation dynamique de métaux sous choc laser, thèse de l'ENSMA, 2010

[12] R.W. Gurney, The initial velocities of fragments from bombs, shells, and grenades, BRL Report 405, U.S.A. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1943

[13] L. Marty, Étude numérique et expérimentale d'une onde de choc induite par impact laser dans une cible solide, thèse de l'Université de Poitiers, 1988

[14] S.K. Datta, *Comprehensive Composite Materials* **1** (2000) 511-558