HAL
open science

Étude expérimentale de l'endommagement de composites sous choc laser

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

To cite this version:

Elise Gay, Laurent Berthe, Michel Boustié, M. Arrigoni, Patrick Mercier, et al.. Étude expérimentale de l'endommagement de composites sous choc laser. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.168. hal-00597540

HAL Id: hal-00597540

https://hal.science/hal-00597540v1

Submitted on 1 Jun 2011

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

Experimental study of composite damage under laser shock

Elise Gay[1], Laurent Berthe[1], Michel Boustie[2], Michel Arrigoni[3], Patrick Mercier[4], Jacky Bénier[4].

1 : Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (CNRS),
Arts et Métiers ParisTech, 151 bd de l'Hôpital, F-75013 PARIS
e-mail : elise.gay@paris.ensam.fr, laurent.berthe@ensam.eu

2 : Département Physique et Mécanique des Matériaux, Institut Pprime (CNRS)
ENSMA, 1 av. Clément Ader, F-86960 FUTUROSCOPE CEDEX

3 : Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes EA 4325,
ENSTA-Bretagne, 2 rue François Verny, F-29806 BREST CEDEX 9

4 : CEA, DAM, DIF, F-91297 ARPAJON

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.

Abstract

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.

Mots Clés : choc laser, haute vitesse de déformation, composite, carbone époxy, délaminage.
Keywords : laser shock, high strain-rate, composite, carbon epoxy, delamination.

1. Introduction

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 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 oeuvre 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 renseigne sur les origines possibles du délaminage induit par la propagation du choc.

2. 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 laser 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 laser de l'ordre du $GW.cm^{-2}$.
La densité de puissance incidente est définie par $\phi = E / \tau.S$, avec E l'énergie incidente, τ la durée d'impulsion à mi-hauteur, et S la surface irradiée.
La pression d'impact générée en surface incidente dépend de l'intensité du rayonnement laser comme l'indique la loi de Grün donnée en équation 1 [8], applicable au polystyrène pour une longueur d'onde de 1,06 µm, et extrapolée pour la configuration expérimentale présentée.

$$P\ (GPa) = 1\,440\ \Phi^{0,8}\ (10^{14}\ W.cm^{-2}) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

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.

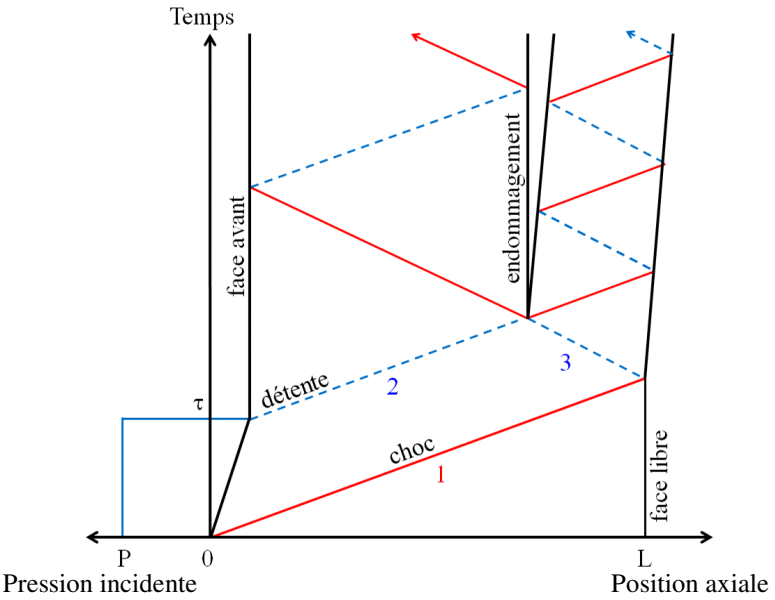


Fig. 1. Schéma du processus d'endommagement par choc laser représenté sur un diagramme espace-temps de propagation d'une onde de choc endommagente. Ondes de compression en rouge, ondes de détente en pointillé bleu.

3. Configuration expérimentale

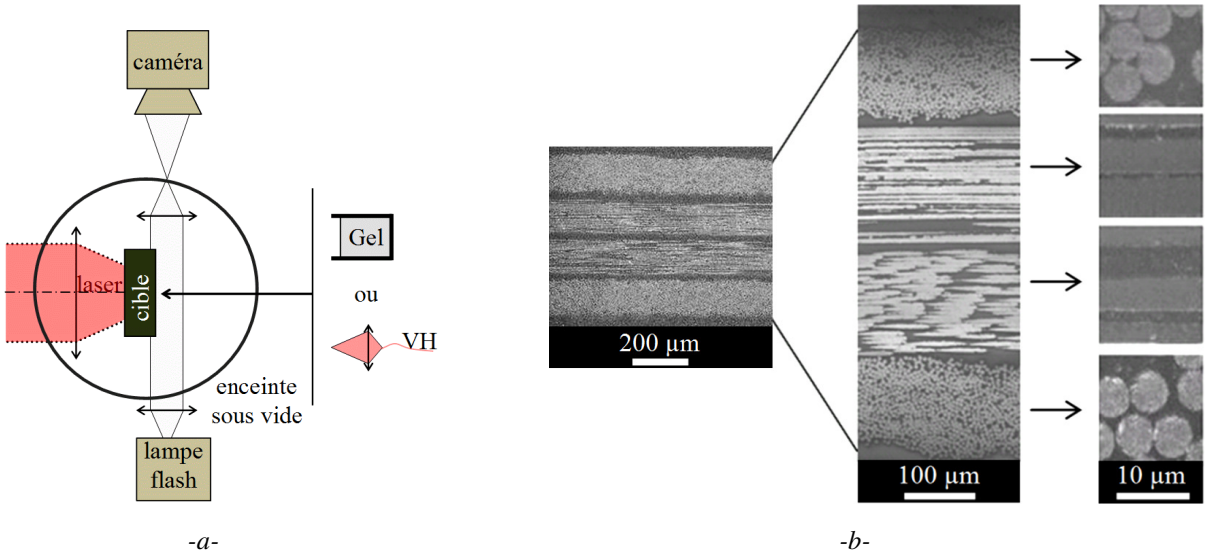


Fig. 2. Configuration expérimentale : -a- Schéma du dispositif, et -b- Observation microscopique d'un composite 4 plis en vue de coupe avec grossissement de la microstructure des plis.

3.1 Sources de choc et diagnostics

Les expériences 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, avec des niveaux d'énergie maximales respectives de 150 et 1 200 J et une durée d'impulsion de 2,5 ns, répartis sur un disque d'un diamètre approximatif de 2,5 mm. 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.

La figure 2-a schématise la configuration expérimentale. Des diagnostics équipent ces installations laser 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 renseigne la morphologie d'une éventuelle éjection de matière en face libre quelques microsecondes après impact. L'installation d'un gel, dans lequel les 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.

3.2 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 2-b 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).

4. Résultats expérimentaux

La table 1 synthétise l'ensemble des paramètres de choc des essais proposés dans cette étude.

Réf cible	Diamètre focal (mm)	Énergie (J)	Durée d'impulsion (ns)	Densité de puissance incidente ($GW.cm^{-2}$)	Pression équivalente (GPa) (Équation 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	1 340	38,2	1 300
Tir 3	2,4	181	2,5	1 602	44,1	1 250
Tir 4	2	172	2,4	2 279	58,5	1 500
Tir 5	2,3	853	2,9	7 082	144,9	2 500

Tab. 1. Paramètres expérimentaux des essais donnés à densité de puissance 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.

4.1 Mesure de vitesse de face arrière

La traction de très forte amplitude à proximité de la face arrière induit l'arrachement puis l'éjection de matière à une vitesse atteignant jusqu'à quelques milliers de $m.s^{-1}$ selon l'intensité laser. 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 pour les échantillons 3 et 5.

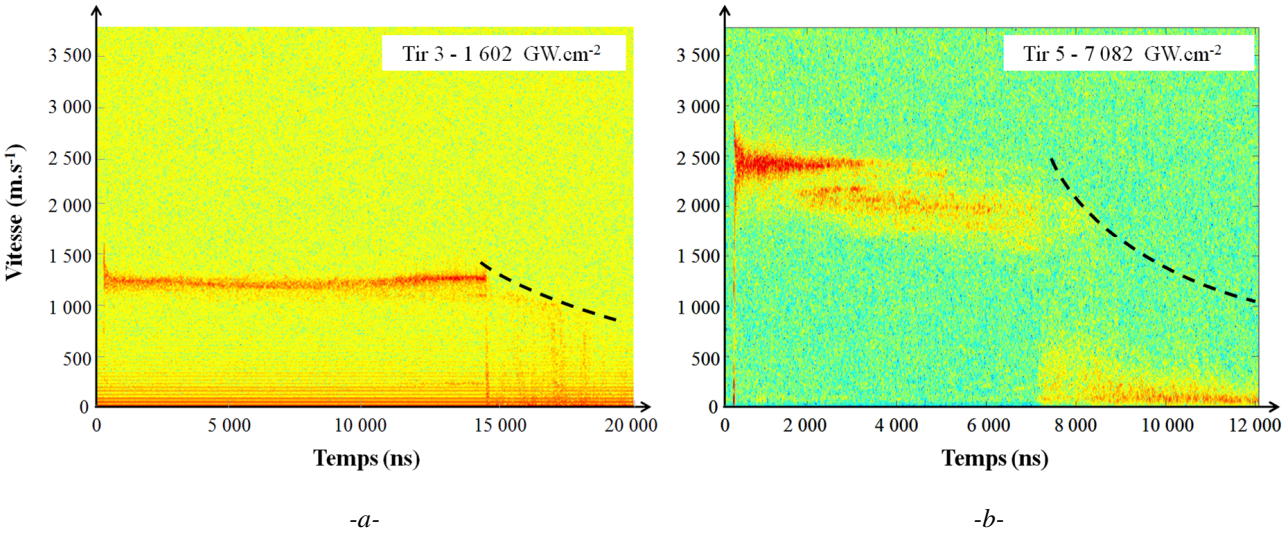


Fig. 3. Spectrogrammes de vitesse de surface libre de composites 4 plis soumis à un choc endommageant, recueillis par Vélocimétrie Hétérodyne avec matérialisation du signal de vitesse par le trait rouge. L'hyperbole pointillée représente l'instant t(v) où un fragment de vitesse v impacte la plaque de protection du dispositif.
L'origine temporelle a été ajustée à l'instant d'impact, dont l'irradiation est de : -a- 1 602 $GW.cm^{-2}$ (Tir 3), et -b- 7 082 $GW.cm^{-2}$ (Tir 5).

Pour les deux cas a 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 ≈ 3 000 $m.s^{-1}$ 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 : 1 250 $m.s^{-1}$ pour le cas a (Tir 3), 2 500 $m.s^{-1}$ pour le cas b (Tir 5).
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 b à très haute densité de puissance, dans une gamme de vitesse comprise entre 2 000 et 2 200 $m.s^{-1}$. 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 figure 9).
L'arrêt brusque des débris à partir de t = 15 µs pour le cas a (Tir 3) et 7 µs pour le cas b (Tir 5), 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.

4.2 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 recueillies 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.

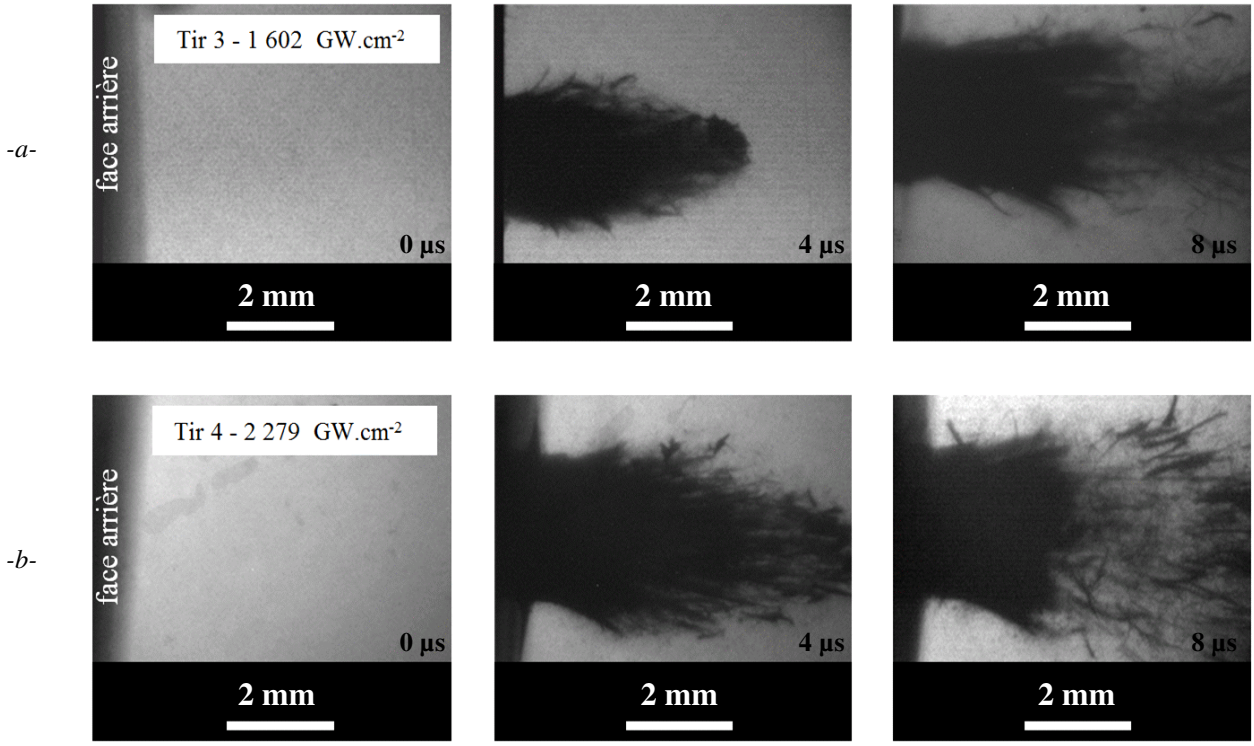
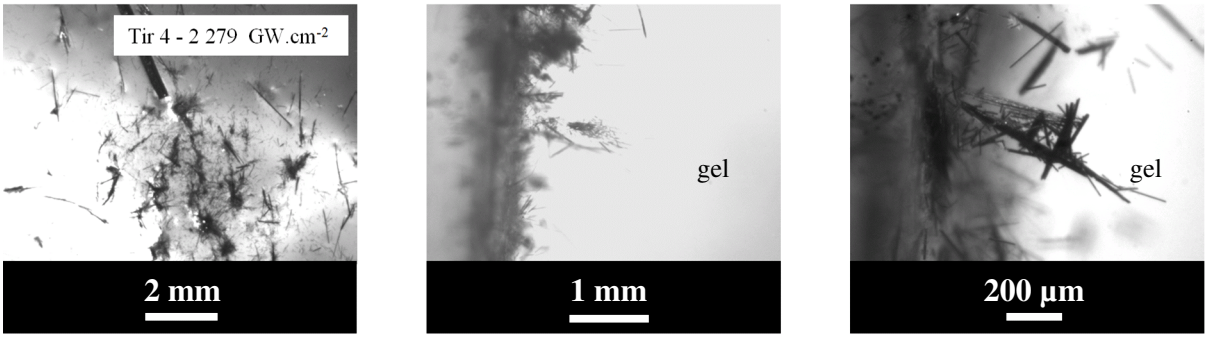


Fig.4. Visualisations transverses en face libre des fibres éjectées d'un composite 4 plis soumis à un choc de forte amplitude : -a- 1 602 GW.cm^{-2} (Tir 3), et -b- 2 279 GW.cm^{-2} (Tir 4).
La surface plane sombre à l'extrême gauche des prises de vue délimite la face libre de la cible. Le choc initial 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.

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 cas a (Tir 3) est cohérent avec la mesure VH présentée en figure 3-a, puisque qu'une vitesse moyenne de 1 100 $m.s^{-1}$ est estimée entre deux visualisations par mesure du déplacement en fonction du délai.

4.3 Observation post-choc des gels

Les fragments éjectés suite au tir 4, dont une visualisation transverse est proposée en figure 4-b, 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 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 1 500 $m.s^{-1}$ 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.



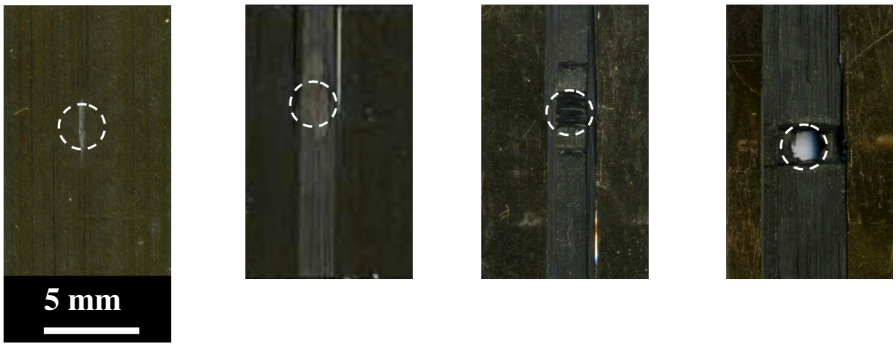
Vue de dessus *Vue de côté* *Vue de côté*

Fig. 5. Vues microscopiques au travers d'un collecteur en Varagel des fibres éjectées issues d'une cible de composite 4 plis choquée à 2 279 $GW.cm^{-2}$ (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.

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.

4.4 Observation des cibles soumises au choc laser

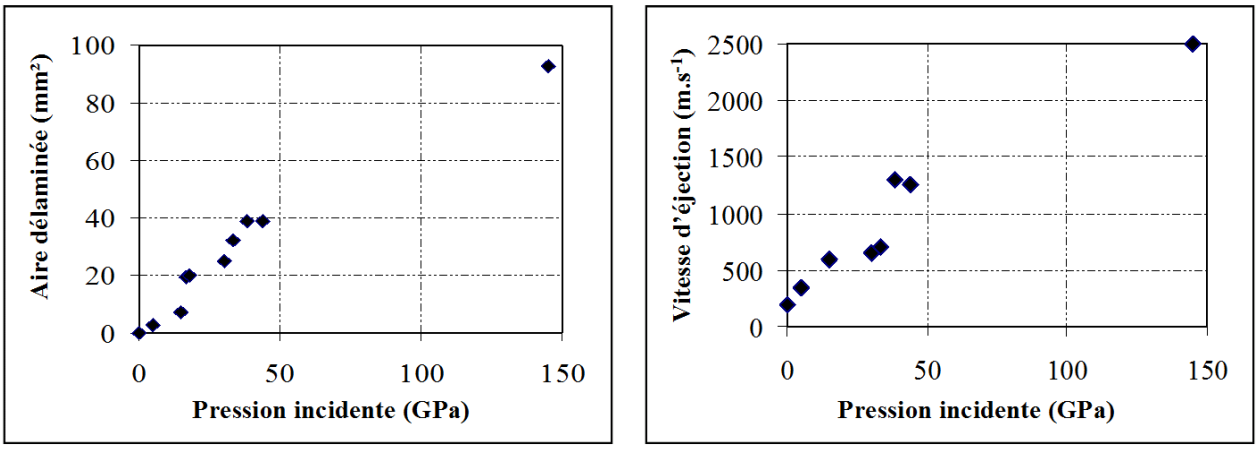
De par le faible taux de déformation induit par la technique de choc laser, l'examen post-choc des cibles est permis et renseigne leur degré d'endommagement. Les macrographies présentées en figure 6 illustrent en premier lieu l'arrachement des fibres en face libre, dont l'étendue croît avec la densité de puissance. 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.



-a- -b- -c- -d-

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- 1 340 GW.cm^{-2} (Tir 2), -c- 2 279 GW.cm^{-2} (Tir 4), et -d- 7 082 GW.cm^{-2} (Tir 5). La zone d'impact laser sur la face incidente non visualisée est délimitée par les cercles pointillés blancs.

L'endommagement est quantifiable de façon élémentaire par la surface délaminée apparente, relevée suivant l'intensité du choc et présentée en figure 7-a. Par ailleurs la base de données issue des nombreuses campagnes expérimentales établit la relation entre la vitesse maximale d'éjection présentée auparavant et la pression incidente, visualisée en figure 7-b, montrant que l'éjection est d'autant plus rapide que le choc est fort, en accord avec l'approche de Gurney [12].



-a- -b-

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

Ces deux variables montrent que la quantité d'endommagement est proportionnelle à la puissance 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 d'un niveau d'adhérence bas présentera une résistance à l'endommagement faible et les observables seront supérieures à celles des abaques présentées en figure 7, révélant la faiblesse du matériau. À cet effet une base phénoménologique plus conséquente est requise, et la validation de ce précepte nécessite des expériences 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 la densité de puissance incidente, 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 opposé au choc. Le délaminage se traduit par de larges plans de fissuration parallèles à la zone d'impact dans les lieux de contraintes maximales, accompagnés de fissures verticales de moindre ouverture, consécutives aux effets de flexion lors de l'arrachement du dernier pli.
Dès lors le délaminage est à la fois inter et intra laminaire, d'autant que les mécanismes de propagation des ondes de choc au sein de matériaux hétérogènes induisent des niveaux de contraintes supérieurs dans la zone interpli (voir figure 9). À un stade extrême l'endommagement est total avec l'envol et l'éjection de nappes complètes, déjà 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 densité de puissance (plus de 1 000 GW.cm^{-2}).

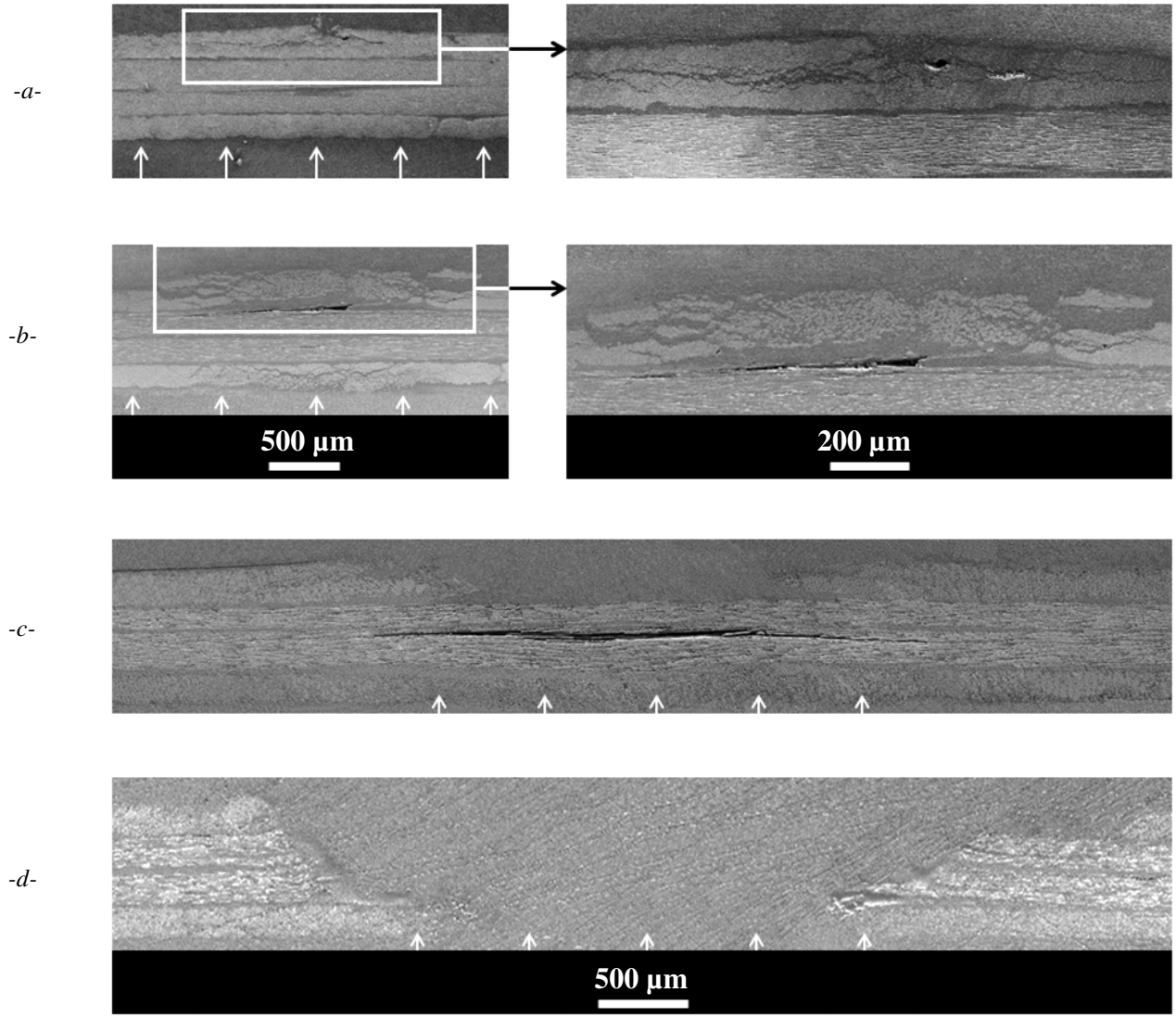


Fig. 8. Microscopies en vue de coupe de composites 4 plis soumis à un choc d'irradiation d'intensité croissante : -a- 107 GW.cm^{-2} (Tir 1), -b- 1 340 GW.cm^{-2} (Tir 2), -c- 2 279 GW.cm^{-2} (Tir 4), -d- 7 082 GW.cm^{-2} (Tir 5). La zone d'impact laser sur la face incidente est matérialisée par les flèches blanches au bas des prises de vue.

5. Discussion

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

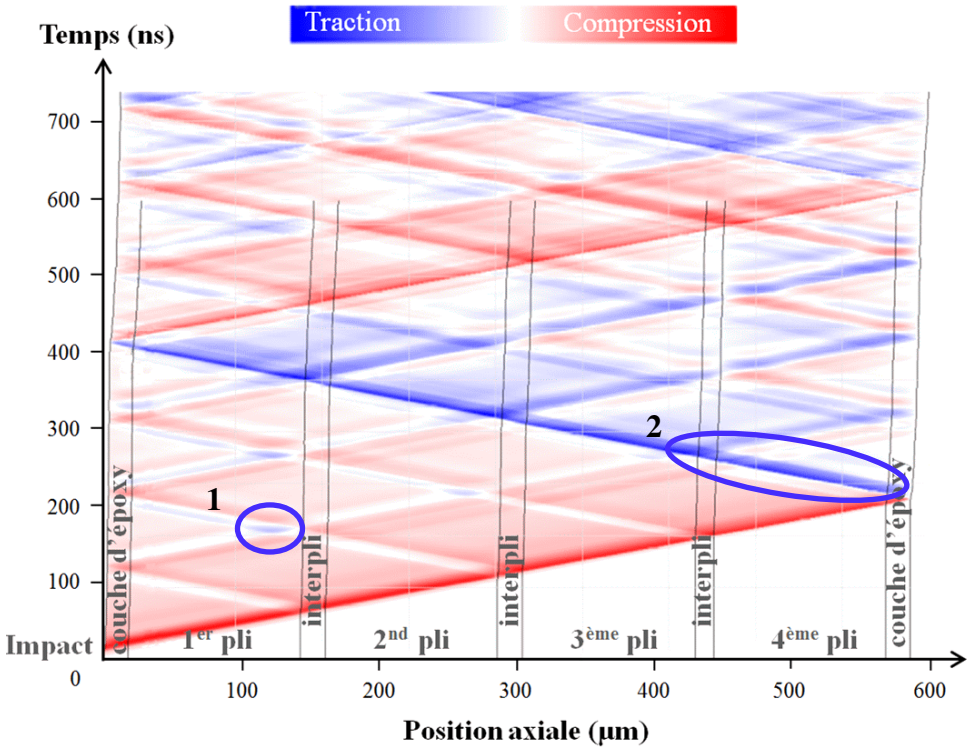


Fig. 9. Diagramme de pression espace-temps de propagation des ondes de choc (sans critère d'endommagement) dans un stratifié 4 plis sur la base d'un empilement de strates isotropes affectées des propriétés dynamiques transverses du pli et de l'interpli. La mise sous contrainte des plans parallèles à la surface incidente par compression (pression positive) est représentée en niveau de rouge et la traction (pression négative) en bleu.

Sa lecture renseigne la chronologie de mise en contrainte avec une première mise en traction (référencée 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 générée est supérieure à la limite à la rupture, le délaminage survient suivant un plan parallèle à la zone d'impact.
L'onde principale n'est pas affectée par ce premier endommagement et poursuit sa propagation, à l'origine d'une forte traction endommageante référencée 2 à proximité de la face arrière par réflexion de l'onde à la surface libre.
L'onde de traction poursuit sa propagation à l'intérieur de la cible vers la face avant. Ces sollicitations de moindre amplitude induisent à très haute densité de puissance un délaminage secondaire, responsable des nuages de particules observés sur les spectrogrammes VH (figure 3) et sur les visualisations transverses (figure 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 8-d.

6. Conclusion

L'investigation 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 la sévérité de l'impact. L'éjection de matière sous les effets mécaniques de la propagation du choc est caractérisée par les nombreux diagnostics, 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
Ce projet de thèse 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) nous approvisionne en échantillons dans le cadre de l'étude. 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 laser 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, « Using shock loads to measure bonded joint strength », *Material evaluation*, Vol. 60, pp.1333-1338, 2002.
[2] M.D. BANEA, L.F.M. DA SILVA, « Adhesively bonded joints in composite materials : An Overview », *Journal of Materials : Design and Applications Part L*, Vol. 223, n°1, pp. 1-18, 2009.
[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 », *Proceedings of eighth Joint Canada-Japan Workshop on Composites, Canada*, 2010.
[4] A. YU, V. GUPTA, « Measurement of in situ fibre/matrix interface strength in graphite/epoxy composites », *Composites Sciences and Technology*, Vol. 58, pp. 1827-1837, 1998.
[5] I. GILATH, S. ELIEZER, S. SHKOLNIK, « Spall behaviour of carbon epoxy unidirectional composites as compared to aluminum and iron », *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, n° 11, pp. 1138-1151, 1990.
[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 », *Proceedings of the 18th DYMAT Technical Meeting, Strasbourg, France*, 2010.
[7] D. SALZMANN, I. GILATH, B. ARAD, « Experimental measurements of the conditions for the planarity of laser-driven shock waves », *Applied Physic Letter*, Vol. 52, n°14, pp. 1128-1129, 1988.
[8] J. GRÜN, R. DECOSTE, B.H. RIPIN, J. GARDNER, « Characteristics of ablation plasma from planar, laser driven targets », *Applied Physics Letter*, Vol. 39, n°7, pp. 545-547, 1981.
[9] P. MERCIER, J. BENIER, A. AZZOLINA, J.M. LAGRANGE, D. PARTOUCHE, « Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments », *Journal de Physique IV*, Vol. 134, pp. 805-812, 2006.
[10] L.M. BARKER, R.E. HOLLENBACH, « Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface », *Journal of Applied Physics*, Vol.43, n° 11, pp. 4669-4675, 1972.
[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, « Wave propagation in composite plates and shells », *Comprehensive Composite Materials*, Vol. 1, pp. 511-558 (2000).