Mécanismes d'endommagement de différents composites à matrice céramique lors d'un impact à basse vitesse

Vincent Herb, Éric Martin, Guillaume Couégnat

▶ **To cite this version:**

Vincent Herb, Éric Martin, Guillaume Couégnat. Mécanismes d'endommagement de différents composites à matrice céramique lors d'un impact à basse vitesse. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.43. hal-00597914

HAL Id: hal-00597914
https://hal.science/hal-00597914

Submitted on 2 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.

Mécanismes d'endommagement de différents composites à matrice céramique lors d'un impact à basse vitesse

Damage mechanisms of different ceramic matrix composites subjected to low velocity impact

Vincent Herb, Éric Martin et Guillaume Couégnat

Laboratoire des Composites ThermoStructuraux (UMR 5801)
Université de Bordeaux, CNRS – F - 33600 PESSAC
e-mail : herb@lcts.u-bordeaux1.fr, martin@lcts.u-bordeaux1.fr, couegnat@lcts.u-bordeaux1.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est d'identifier les modes d'endommagement observés lors d'essais d'impact à basse vitesse sur différents CMC tissés. Un composite C/C (2D) et trois composites SiC/SiC (2D ou 3D) ont alors été sollicités au moyen d'une tour de chute et d'un montage de poinçonnement quasi-statique. Nous vérifions une équivalence entre un choc à basse vitesse et la sollicitation quasi-statique. Les dommages générés ont été caractérisés par des méthodes non-destructives – tomographie RX et thermographie IR – afin d'identifier la zone endommagée et d'évaluer la nature de l'endommagement. Les différents matériaux présentent des scénarios d'impact et des mécanismes d'endommagement différents : le dommage d'impact est localisé sur composites SiC/SiC alors qu'il est diffus dans un composite C/C. Les modes d'endommagement dépendent aussi de l'architecture du tissage.

Abstract

The aim of this work is to assess the damage mechanisms observed on different woven CMC subjected to low velocity impact. Static indentation and drop weight tests were carried out on C/C and SiC/SiC composites. No distinct differences could be seen between the static and the impact responses. The extent of impact damage was imaged and analyzed using non-destructive evaluation methods such as pulsed thermography and computed tomography. Impact scenario and damage mechanisms depend on the nature of the CMC and the fiber architecture. The impact damage is localized on SiC/SiC composites and diffuse on C/C composites.

Mots Clés : Composites à matrice céramique, impact basse vitesse, caractérisation non-destructive.
Keywords : Ceramic matrix composites, low velocity impact, non-destructive evaluation.

1. Introduction

Les composites à matrice céramique (CMC) possèdent à haute température de bonnes propriétés thermomécaniques [1] et les progrès réalisés ces dernières années sur la protection contre l'oxydation ont permis d'augmenter considérablement leur durée de vie en température [2]. Leur emploi est envisagé pour certaines pièces aéronautiques. Ce domaine d'application requiert la définition de critères de conception permettant de dimensionner une structure en prenant en compte sa tolérance aux dommages. Il est en particulier nécessaire lors d'un impact à basse vitesse d'analyser les mécanismes d'endommagement et d'évaluer les propriétés résiduelles. La compréhension du scénario d'endommagement est une étape cruciale en vue du dimensionnement de structures composites, car elle est indispensable à la définition de modèles de prévision, tant du dommage d'impact que des propriétés résiduelles.

Un essai de poinçonnement quasi-statique permet de générer un endommagement similaire à celui obtenu lors d'un choc à basse vitesse. Dans ce but, nous avons précédemment analysé le comportement au poinçonnement quasi-statique d'un composite SiC/SiC en fonction des conditions expérimentales [3] et observé certaines similitudes entre un choc à faible vitesse et un essai de poinçonnement quasi-statique [4]. L'objectif de cette étude est de comparer les mécanismes

d'endommagement de différents CMC lors d'essais d'impact et de confirmer l'équivalence entre un choc à basse vitesse et une sollicitation quasi-statique en termes de réponse mécanique.

2. Procédure expérimentale

2.1 Matériaux étudiés

Les matériaux étudiés sont des CMC développés par SAFRAN – Snecma Propulsion Solide (Le Haillan, France) pour des applications aéronautiques. Leurs constituants et leur microstructure sont déterminés en fonction des conditions de sollicitation des pièces en fonctionnement (température, chargement mécanique, …). Le composite C/C-2D est un stratifié tissé orthotrope de 2 mm d'épaisseur. Il est composé de cinq plis satin en fibres de carbone Tenax® HTA ex-PAN densifiés par pyrolyse d'une résine phénolique. Les composites SiC/SiC ont été élaborés à partir de fibres Nicalon®, pré-densifiés par voie liquide par une matrice de carbure de silicium et densifiés par CVI (*Chemical Vapor Infiltration*) d'une matrice auto-cicatrisante composée dans le système [Si B C]. Les SiC/SiC-3D sont constitués d'une préforme fibreuse tissée tridimensionnelle Guipex® (tissage interlocks) à base satin ou à base sergé. Le SiC/SiC-2D est un stratifié tissé composé de cinq plis drapés. L'épaisseur moyenne de ces matériaux est respectivement 1,55 mm, 1,7 mm et 2,1 mm.

2.2 Essai de poinçonnement

Les essais de poinçonnement quasi-statique ont été réalisés à partir d'un montage constitué d'un support en acier inoxydable vissé sur la traverse inférieure d'un bâti Instron 4505 afin d'encastrer l'éprouvette, et d'un poinçon en acier traité (HB > 300) maintenu par un mors hydraulique fixé sur la traverse supérieure du bâti [3-4]. Différents supports circulaires (de diamètre D_S = 18 mm, 32 mm et 80 mm) et poinçons hémisphériques (de diamètre D_P = 4,5 mm, 9 mm et 16 mm) peuvent être utilisés. L'effort de poinçonnement P est évalué par une cellule de force d'une capacité maximale de 50 kN placée dans la traverse supérieure. Le déplacement du poinçon δ est directement mesuré par un extensomètre positionné entre le support et le poinçon afin de ne pas avoir à prendre en compte la complaisance du montage. Les essais ont été conduits sous déplacement contrôlé à la vitesse de 0,2 mm/min et l'acquisition de P et δ est faite avec une période de 1 s.

2.3 Essais d'impact à basse vitesse

Le montage expérimental utilisé pour les essais d'impact à basse vitesse est une tour de chute Instron MiniTower® (Fig. 1). Il permet de réaliser des essais de choc instrumentés à des vitesses d'impact comprises entre 0,5 m/s et 3 m/s avec une énergie d'impact pouvant atteindre 18 J. Cette tour de chute est équipée d'un système anti-rebond pneumatique empêchant l'impacteur de retomber sur la plaque après le premier impact, d'une photodiode permettant de mesurer la vitesse d'impact et de détecter le début de l'essai, d'une cellule de force intégrée dans l'embout de l'impacteur et du système d'acquisition et d'exploitation des données Dynatup®. Elle permet d'encastrer une éprouvette dans un support circulaire et l'impacteur est équipé d'un embout hémisphérique. Afin de pouvoir comparer le comportement à l'impact des CMC avec les résultats de poinçonnement quasi-statique, des supports circulaires et des embouts hémisphériques aux dimensions du montage de poinçonnement ont été usinés.

La masse m de l'impacteur est de 1,13 kg et jusqu'à douze masses additionnelles de 250 g peuvent y être ajoutées. Lors d'un essai, l'acquisition de l'historique de la force $P(t)$ est déclenchée par le passage de l'impacteur devant la photodiode qui mesure également la vitesse instantanée. La plupart des essais ont été réalisés avec une fréquence d'acquisition de 204,8 kHz sur une durée totale de 40 ms. Le système anti-rebond consiste en deux pistons pneumatiques amortissants qui remontent de quelques centimètres après l'impact. Son déclenchement est aussi provoqué par la photodiode : son

temps de réaction (environ 80 ms) est suffisamment court pour bloquer l'impacteur après le premier rebond mais pas assez long pour perturber l'essai (les temps de contact sont de l'ordre de 4 ms).

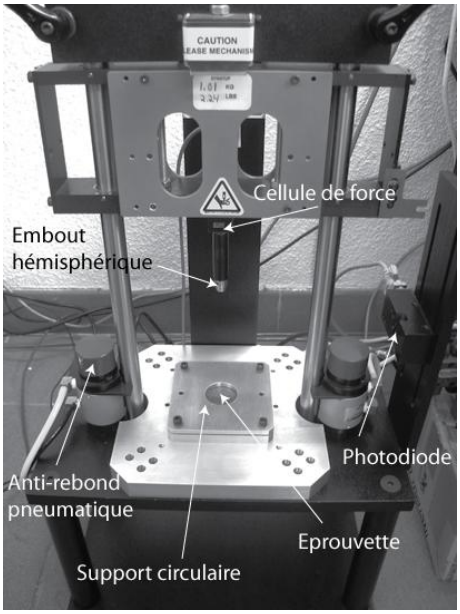

Fig. 1. Montage expérimental d'impact basse-vitesse.

Connaissant la valeur de la force $P(t)$ en fonction du temps, la vitesse d'impact v_i et le début de l'impact t_0 (identifié à partir du premier saut de force lors du contact), le déplacement de l'impacteur peut être calculé à partir des relations suivantes :

$$\ddot{\delta}(t) = g - \frac{1}{m}F(t), \quad \dot{\delta}(t) = \int_{t_0}^{t} \ddot{\delta}(t)dt + v_i \qquad \text{et} \qquad \delta(t) = \int_{t_0}^{t} \dot{\delta}\,(t)dt. \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Il est ainsi possible d'obtenir la relation entre la force et le déplacement ($P - \delta$) et par conséquent l'évolution de l'énergie mécanique totale $E^{tot}(t)$ de la plaque pendant l'essai par intégration de cette dernière relation :

$$E^{tot}(t) = \int_{t_0}^{t} P(t)d\delta(t). \qquad \text{(Eq. 2)}$$

L'énergie d'impact ($E^i = mgh_0$) est d'abord définie approximativement en réglant la masse de l'impacteur et sa hauteur de chute h_0, mais elle est ensuite évaluée plus précisément à partir de la vitesse d'impact ($E^i = ½mv_i^2$). Les énergies d'impact appliquées lors de cette étude ont été choisies à partir des résultats d'essais de poinçonnement quasi-statique préliminaires.

Les résultats d'essais de choc présentés dans ce document ont été obtenus à partir d'échantillons de 25 × 25 mm^2 encastrés dans un support de diamètre D_S = 18 mm et impactés par un poinçon de diamètre D_P = 9 mm. Ces conditions permettent d'une part d'amplifier les phénomènes de couplage entre le chargement en flexion de l'éprouvette et le champ de contrainte dû au contact avec le poinçon et d'autre part de pouvoir utiliser nos moyens de caractérisation non-destructive présentés par la suite.

2.4 Méthodes de caractérisation non-destructives des dommages d'impact

Des échantillons ont été tomographiés après avoir été impactés ou poinçonnés pour obtenir une caractérisation non-destructive tridimensionnelle du dommage. Les acquisitions ont été réalisées au moyen d'un microtomographe de laboratoire Nonotom – Phoenix/Xray avec une taille de voxel de

15 µm. Les images volumiques ont ensuite été reconstruites avec le logiciel Digisens et la caractérisation de l'endommagement est faite par analyse d'images.

L'étendue de l'endommagement a également été évalué par thermographie en calculant le champ de diffusivité résiduelle dans l'épaisseur des éprouvettes impactées – les propriétés thermiques des CMC étant reliées à l'état d'endommagement [5]. Ces mesures ont été réalisées au moyen d'une caméra thermique FLIR SC7000, en relevant l'évolution du champ de température sur l'une des faces de l'éprouvette après avoir appliqué une impulsion thermique sur la face opposée. Le champ de diffusivité thermique est calculé par la méthode de Parker qui se base sur le temps de demi-montée $t_{1/2}$ de l'élévation du champ de température [6].

3. Résultats expérimentaux

3.1 Description des dommages d'impact

Un impact de 1,35 J à 1,55 m/s génère une cavité sphérique sur la face supérieure des composites SiC/SiC (Fig. 2). L'empreinte laissée par l'impacteur varie en fonction du matériau ; la résistance au choc des CMC semble augmenter avec l'épaisseur. Ces dommages sont traversants et on observe des ruptures de fibres, dont l'étendue est légèrement supérieure, sur la face opposée des échantillons. Il s'agit de dommages localisés, sans déformation résiduelle de l'échantillon. Contrairement aux composites SiC/SiC, l'endommagement s'est diffusé dans le composite C/C. Nous n'observons ni cratère sur la face impactée, ni ruptures de fibres sur la face opposée mais une déformation résiduelle de l'échantillon.

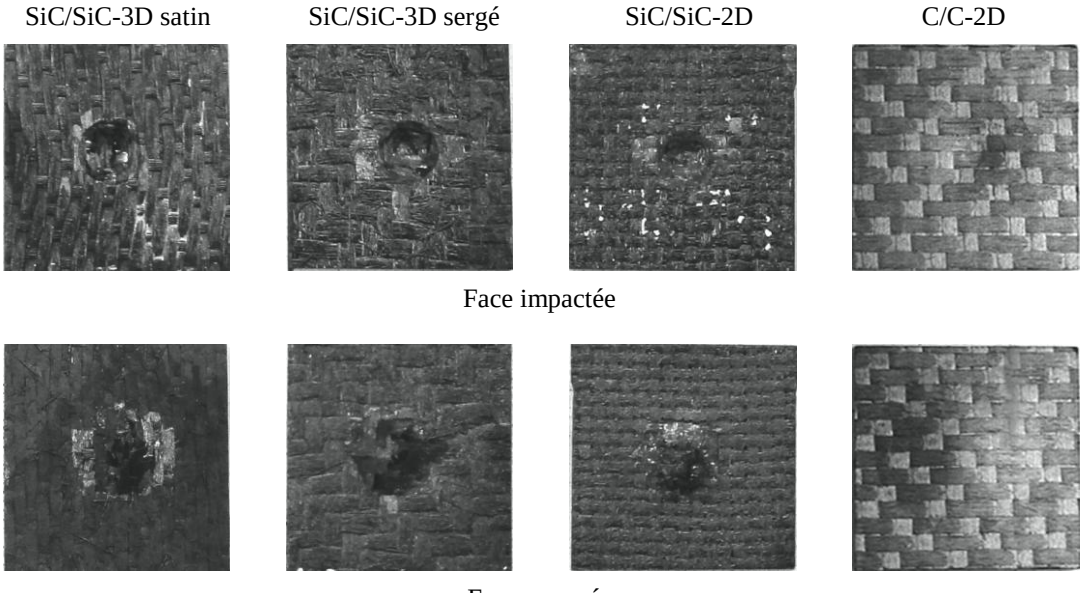

Fig. 2. Photographies des éprouvettes (25 × 25 mm^2) impactées à 1,35 J (m = 1,13 kg et v_i = 1,55 m/s) avec D_S = 18 mm et D_P = 9 mm.

3.2 Comportement à l'impact

L'évolution de la force $P(t)$ lors de l'impact sur un composite SiC/SiC et sur le composite C/C est représentée sur la Fig. 3. Il s'agit de signaux bruts relevés par le capteur de force. L'évolution de l'énergie mécanique totale $E^{tot}(t)$ de la plaque, calculée à partir de l'Eq. 2, y est également tracée. Nous observons que 95 % de l'énergie d'impact est absorbée pour générer le dommage sur le SiC/SiC alors que 25 % de l'énergie d'impact est restituée en énergie élastique par le C/C.

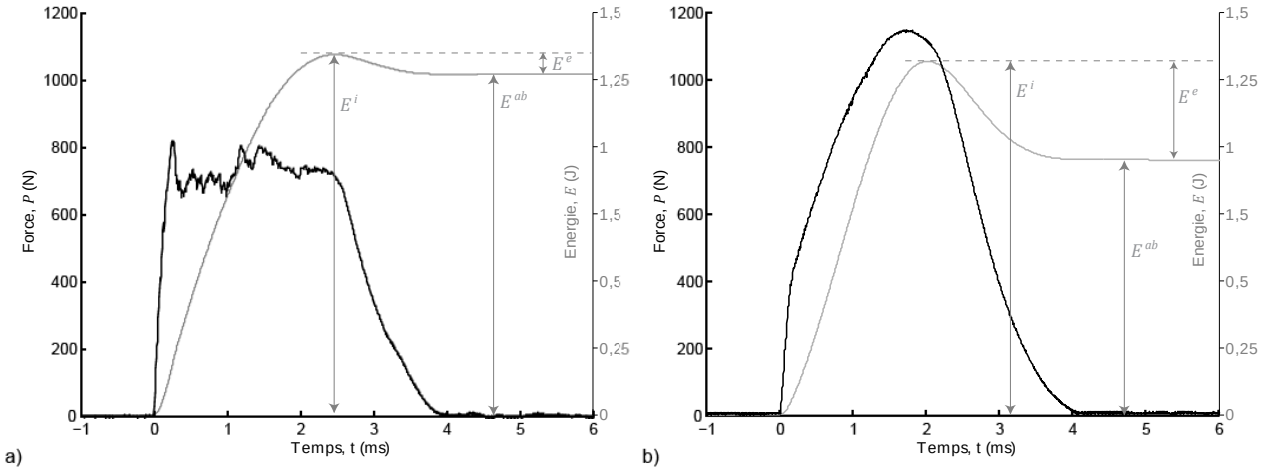

Fig. 3. Réponses temporelles d'essais d'impact sur le SiC/SiC-3D sergé (a) et le C/C-2D (b) dans des conditions identiques (D_S = 18 mm, D_P = 9 mm et E^i = 1,35 J).

Le comportement mécanique est décrit par l'évolution de la force P en fonction du déplacement δ qui est calculé à partir de l'Eq. 1. Il est important de noter qu'on obtient une bonne corrélation entre les réponses mécaniques des essais d'impact et celles des essais de poinçonnement quasi-statique pour les différents matériaux (Fig. 4). La courbe ($P - \delta$) des composites SiC/SiC décrit le processus de perforation par une succession de mécanismes de ruptures de fibres et de fissuration de la matrice qui se caractérise par des chutes ponctuelles de la force de contact. La déformation résiduelle $\delta^{rés}$ correspond à la profondeur de la cavité. Quant à la non-linéarité du comportement du stratifié C/C, elle provient d'un endommagement diffus de l'éprouvette, principalement par délaminage. La déformation résiduelle $\delta^{rés}$ correspond à une déformation globale permanente de l'échantillon sous l'effet de la fissuration et du glissement de la matrice inter-plis. La chute de force que l'on observe en fin de sollicitation sur l'un des essais correspond à la rupture en traction d'un toron de fibres sur la face opposée qui précède l'amorçage de la pénétration du poinçon dans l'épaisseur du matériau. Une représentation schématique du scénario d'impact de ces deux familles de CMC est présentée en Fig. 5.

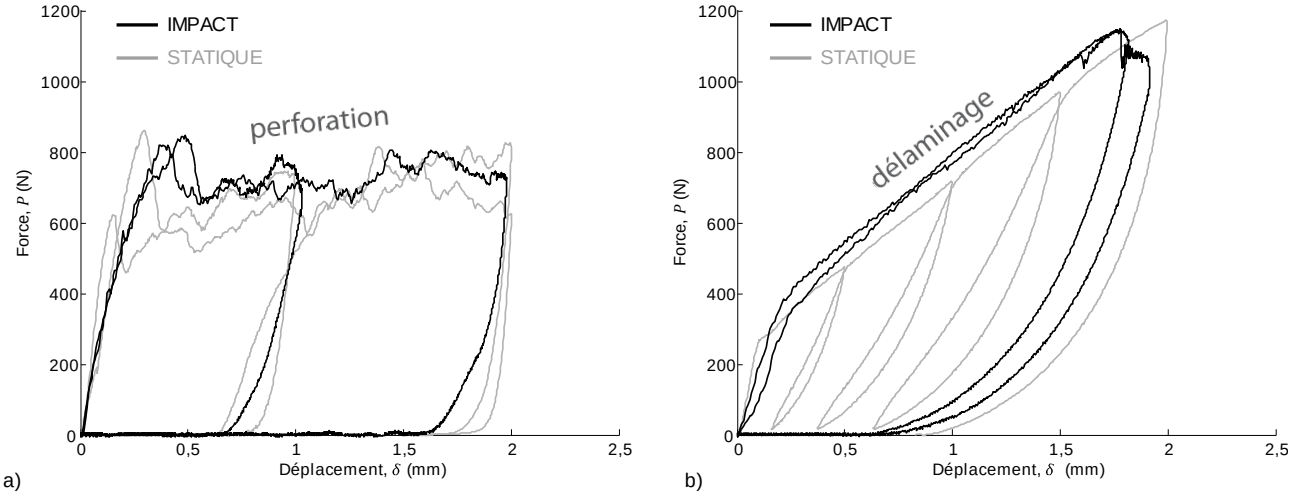

Fig. 4. Réponses mécaniques d'essais d'impact et de poinçonnement sur le SiC/SiC-3D sergé (a) et le C/C-2D (b) dans des conditions identiques (D_S = 18 mm, D_P = 9 mm).

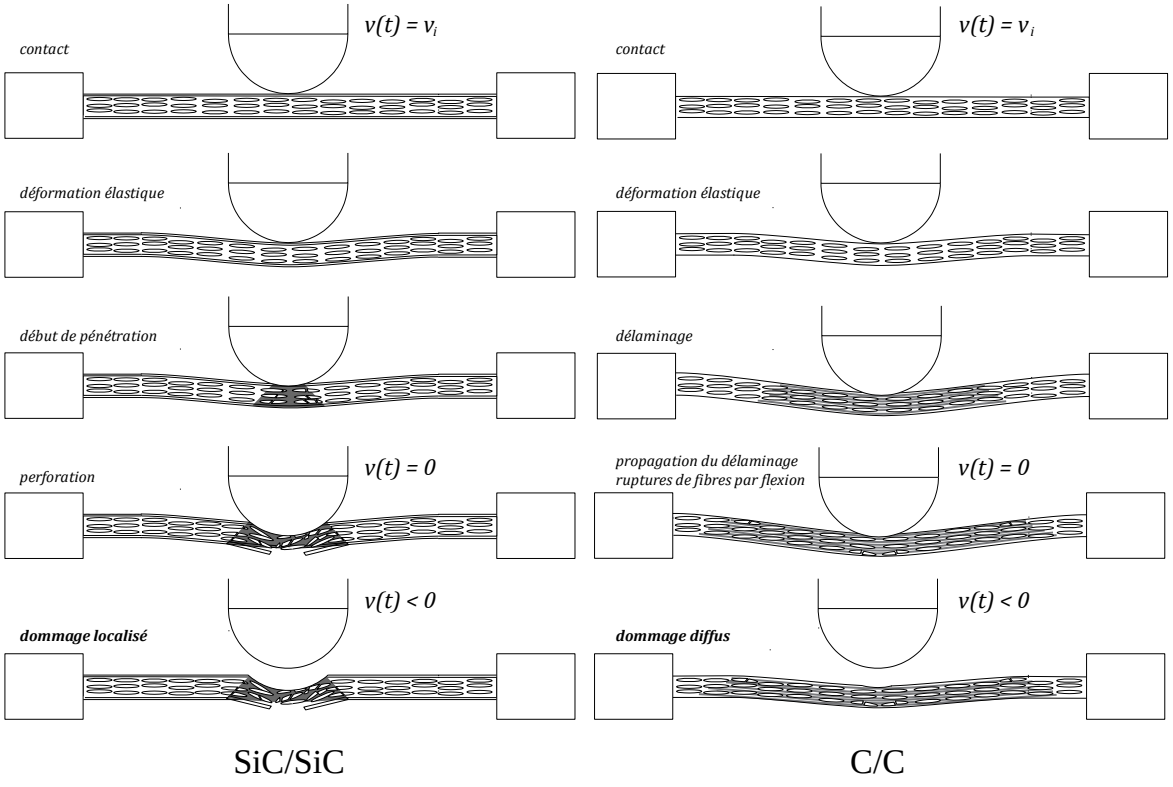

Fig. 5. Représentation schématique du scénario d'impact dans des composites SiC/SiC et C/C.

3.3 Caractérisation non-destructive des dommages d'impact

Une microtomographie des échantillons impactés permet de visualiser l'endommagement dans le volume du matériau. Nous pouvons ainsi confirmer la présence de délaminage au sein du composite C/C-2D et le caractère localisé d'un dommage d'impact sur les composites SiC/SiC-3D (Fig. 6).

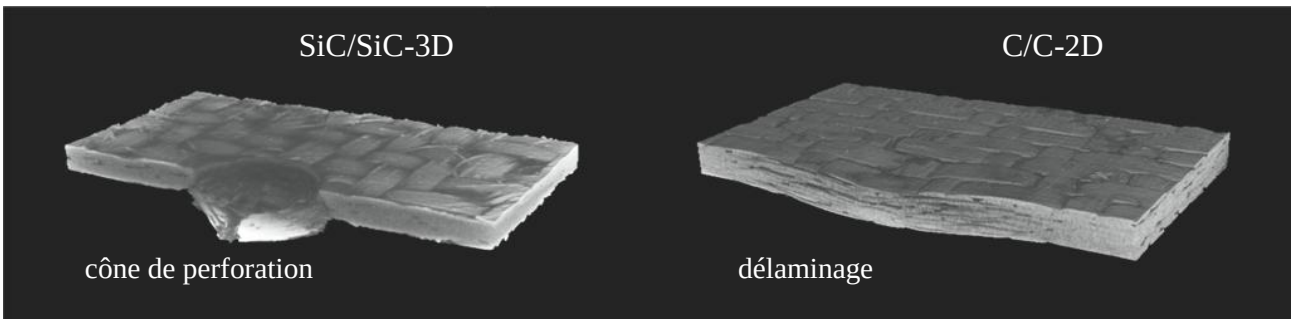

Fig. 6. Représentations tridimensionnelles par analyse tomographique des demi-éprouvettes en SiC/SiC-3D sergé et C/C-2D endommagées telles que δ^{max} = 2 mm (D_S = 18 mm, D_P = 9 mm).

L'analyse tomographique des dommages d'impact générés dans le composite SiC/SiC-2D a permis de révéler un mode d'endommagement que l'on n'observe pas sur les SiC/SiC à texture tridimensionnelle. On observe en effet des plans de délaminage localisés en périphérie du cône de rupture (Fig.7 et Fig.8). Ces délaminages se créent lors du début de la pénétration du poinçon dans le matériau et s'observent plus facilement pour des dommages de faible profondeur. Ils ne semblent pas se propager durant le processus de perforation lors de l'impact, mais pourraient avoir des conséquences néfastes sur les propriétés résiduelles du matériau sous des sollicitations mécaniques complexes (fatigue multiaxiale, torsion, …).

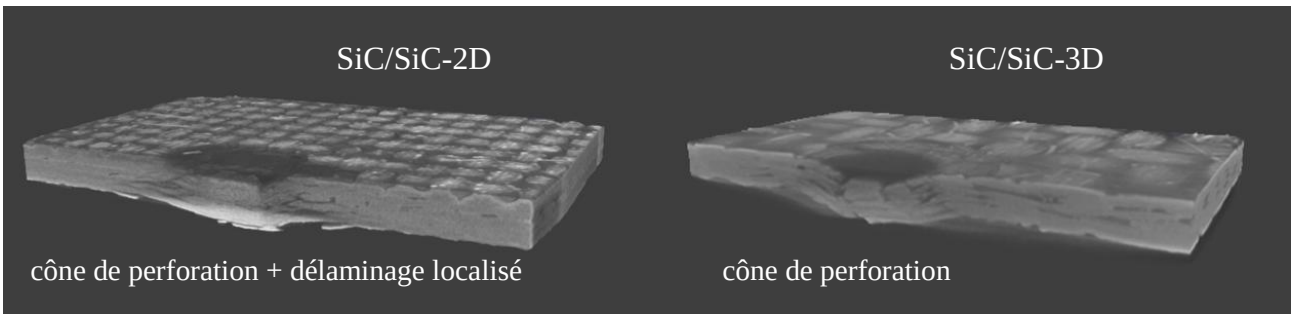

Fig. 7. Représentations tridimensionnelles par analyse tomographique des demi-éprouvettes en SiC/SiC-2D et SiC/SiC-3D sergé endommagées telles que δ^{max} = 1 mm (D_S = 18 mm, D_P = 9 mm).

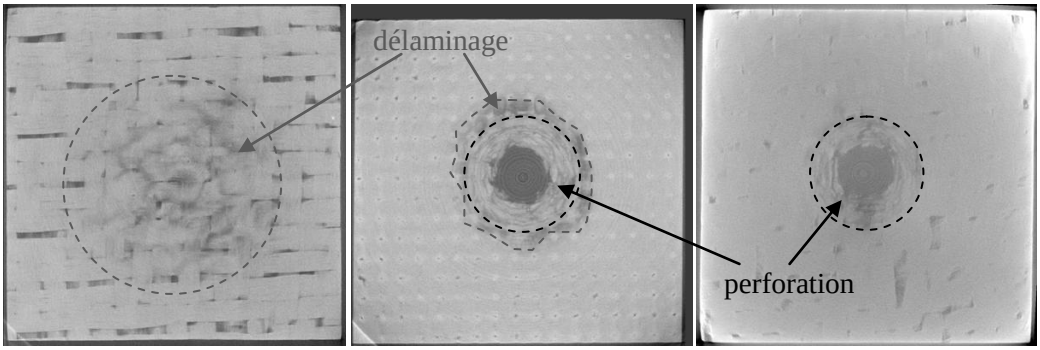

Fig. 8. Représentations par analyse tomographique de coupes à mi-épaisseur des éprouvettes en C/C-2D, SiC/SiC-2D et SiC/SiC-3D sergé endommagées telles que δ^{max} = 2 mm (D_S = 18 mm, D_P = 9 mm).

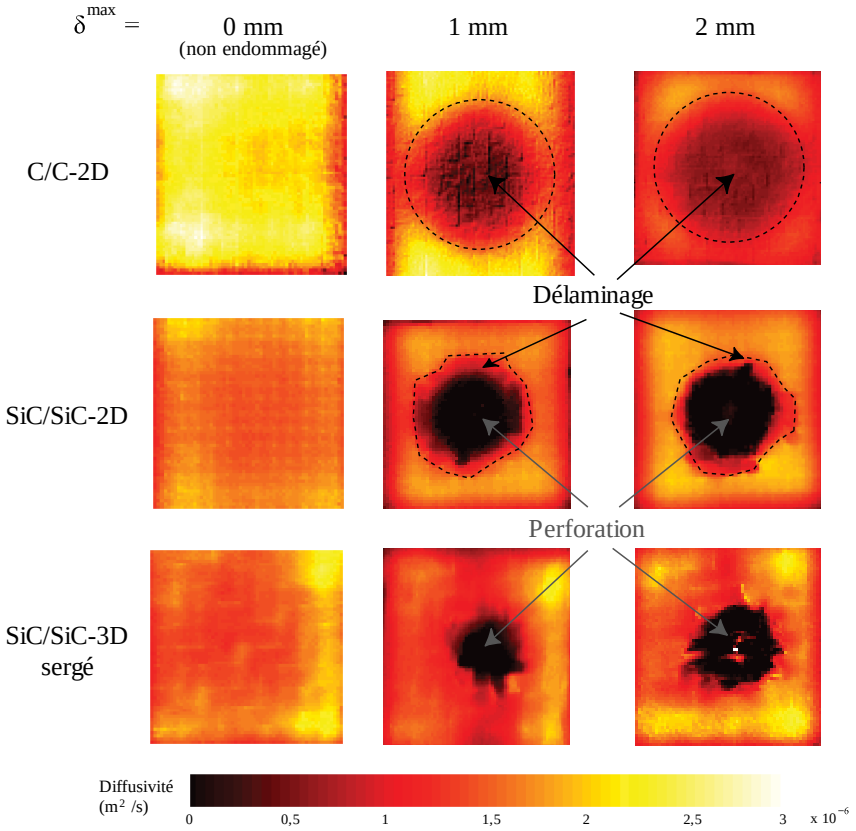

Fig. 9. Cartographies du champ de diffusivité thermique d'éprouvettes C/C-2D, SiC/SiC-2D et SiC/SiC-3D non endommagées et endommagées telles que δ^{max} = 1 mm et 2 mm (D_S = 18 mm, D_P = 9 mm).

Un endommagement invisible en surface peut modifier les propriétés thermiques d'un composite, la thermographie est donc souvent utilisée par les industriels pour évaluer l'endommagement d'une pièce de manière non-destructive. Nous nous sommes donc intéressés à cette technique pour corréler les résultats issus des analyses tomographiques. Nous avons donc estimé le champ de diffusivité thermique des éprouvettes endommagées par la méthode de Parker. Des dommages d'impact sur les composites C/C-2D, SiC/SiC-2D et SiC/SiC-3D ont ainsi été caractérisés ; les cartographies de diffusivité thermique obtenues sont présentées sur la Fig. 9. On observe un endommagement localisé sur les échantillons en SiC/SiC-2D alors qu'il est diffus sur ceux en C/C. On constate aussi une perte de diffusivité en périphérie de la perforation sur les éprouvettes en SiC/SiC-2D, ce qui est cohérent avec les délaminages observés par microtomographie.

3.4 Influence du montage sur les dommages d'impact

Les dommages d'impact à basse vitesse présentés jusqu'ici ont été réalisés sur des éprouvettes de relativement faibles dimensions (25 × 25 mm^2). Il devient ensuite nécessaire d'évaluer l'influence des dimensions du montage expérimental sur la formation du dommage. Des essais de poinçonnement quasi-statique ont donc été réalisés sur les composites SiC/SiC-3D satin et C/C-2D pour des diamètres de support D_S = 18 mm, 32 mm et 80 mm et de poinçon D_P = 16 mm, 9 mm et 4,5 mm. Les photographies des éprouvettes endommagées lors de ces essais sont présentées sur les Fig. 10 et Fig. 11.

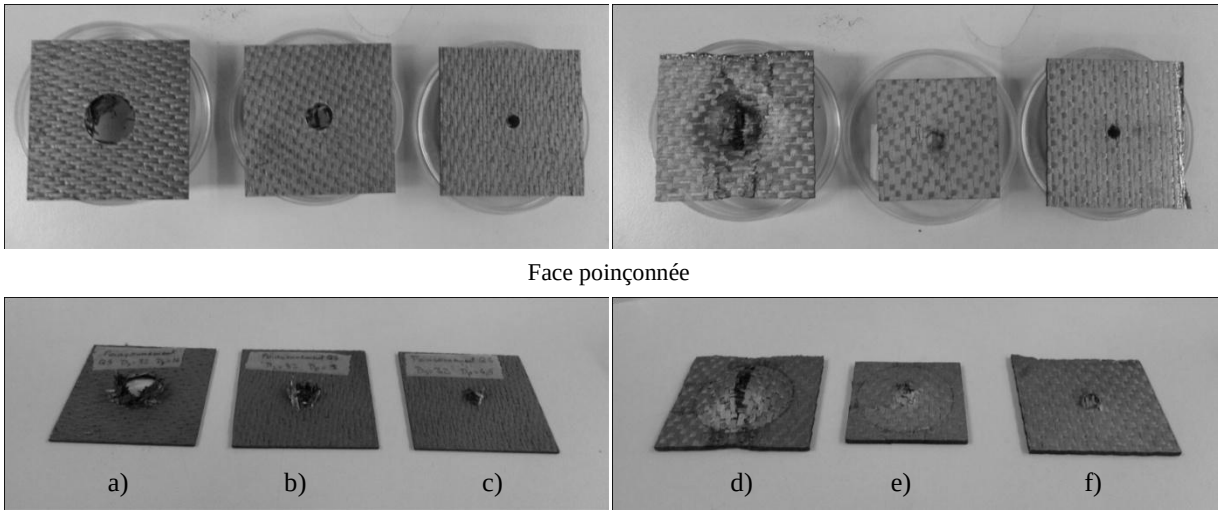

Fig. 10. Eprouvettes en SiC/SiC-3D satin (a, b et c) et en C/C-2D (d, e et f) sollicitée en poinçonnement quasi-statique dans des conditions de support identiques D_S = 32 mm et de poinçon différents : D_P = 16 mm(a et d), 9 mm (b et e) et 4,5 mm (c et d).

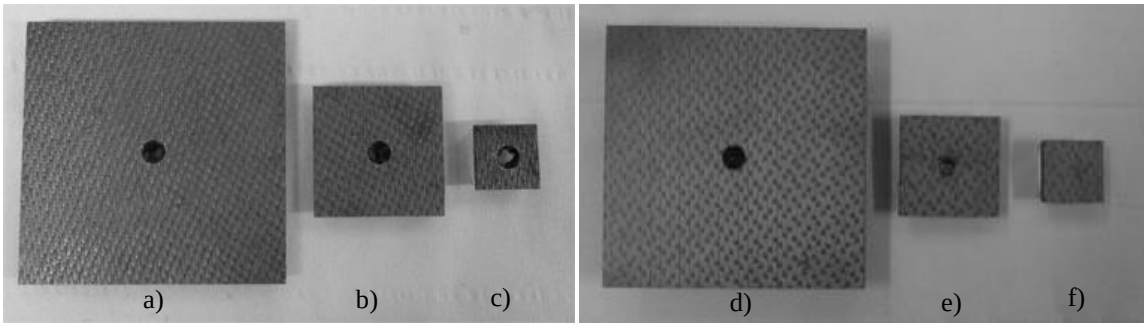

Fig. 11. Eprouvettes en SiC/SiC-3D satin (a, b et c) et en C/C-2D (d, e et f) sollicitée en poinçonnement quasi-statique dans des conditions de poinçon identiques D_P = 9 mm et de support différents : D_S = 80 mm (a et d), 32 mm (b et e) et 18 mm (c et d).

Il est remarquable de constater que tous les essais (d'impact et de poinçonnement) que nous avons réalisés sur des composites SiC/SiC ont généré un dommage localisé et parfaitement circulaire sur la face supérieure. Nous observons également que l'on peut découpler la réponse de la plaque en flexion (qui dépend de D_S) du processus de pénétration du poinçon dans le matériau (qui dépend de D_P) [3]. La force de pénétration et l'énergie de perforation sont indépendantes de la dimension du support pour un poinçon donné. L'énergie de perforation des plaques en SiC/SiC-3D satin est respectivement 0,8 J, 2,1 J et 5,5 J en utilisant les poinçons de diamètre D_P = 4,5 mm, 9 mm et 16 mm. Notons enfin que la sollicitation de flexion sur des plaques de grande dimension peut introduire un endommagement par fissuration matricielle dans les zones les plus fortement sollicitées ; il peut alors être étudié indépendamment du mécanisme de perforation.

Au contraire, on observe une forte dépendance aux conditions expérimentales sur la formation du dommage dans le composite C/C. Il existe d'une part un couplage entre la rupture par perforation de la plaque et l'endommagement en flexion de l'éprouvette. D'autre part, l'endommagement en flexion (principalement par délaminage) est fortement dépendant des conditions de support et du poinçon. Cependant, le composite C/C a la capacité d'absorber des quantités d'énergie bien supérieures : l'énergie de perforation pour D_S = 32 mm et D_P = 9 mm (Fig. 11.e) est de 9 J contre 2,1 J pour le composite SiC/SiC-3D satin (Fig. 11.b).

4. Conclusion

Le comportement au choc de différents CMC a été étudié expérimentalement au moyen d'une tour de chute instrumentée et d'un montage de poinçonnement quasi-statique. Des méthodes de caractérisation non destructives ont été utilisées pour caractériser les dommages d'impact.

Nous avons d'abord vérifié que les essais de poinçonnement permettent bien de reproduire le comportement à l'impact basse vitesse des CMC. Suivant la nature des constituants (carbone ou carbure de silicium) le scénario d'impact et les mécanismes d'endommagement peuvent être très différents. Lors d'un choc, le stratifié C/C s'endommage de façon diffuse, ce qui engendre une déformation résiduelle de l'éprouvette. Au contraire, les dommages d'impact des composites SiC/SiC sont localisés et se caractérisent par une indentation permanente sphérique sur la face supérieure. La résistance aux dommages de ces matériaux semble augmenter avec l'épaisseur.

La tomographie et la thermographie ne permettent pas d'observer finement les fissures d'endommagement que peut produire un choc sur un CMC comme le permettrait des micrographies de coupes polies. Cependant ces deux techniques permettent d'en estimer l'étendue et la nature sans détruire le matériau. Nous observons ainsi des délaminages diffus sur le C/C-2D, une perforation localisée sur un SiC/SiC-3D et une perforation entourée une zone délaminée sur un SiC/SiC-2D.

L'étude du comportement au choc des composites C/C est fortement dépendante des conditions expérimentales choisis. Au contraire, l'influence des dimensions du support et du poinçon sur les mécanismes d'endommagement d'un composite SiC/SiC lors d'un impact est comparable et découplé.

Compte tenu de ces observations, des approches différentes doivent être envisagées pour étudier la tolérance aux dommages de ces deux familles de CMC. Ainsi, le dimensionnement de structures en composites C/C devra fortement s'inspirer des méthodologies développées pour les composites à matrice organique qui sont généralement sensibles au délaminage. Alors qu'une démarche plus spécifique, basée sur la présence d'un dommage localisé, doit être mis en place pour définir la tolérance aux dommages des composites SiC/SiC.

Remerciements

Cette étude est financée par le programme ARCOCE qui est piloté par la société SAFRAN – Snecma Propulsion Solide. Les auteurs tiennent à remercier B. Humez et F. Larribau-Lavigne pour l'assistance lors de la mise en place des essais mécaniques ainsi que O. Caty pour l'acquisition et la reconstruction des microtomographies.

Références

[1] R. NASLAIN, « Design, preparation and properties on non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview ». *Comp. Sci. Technol.*, Vol. 64, pp. 155-170, 2004.

[2] F. CHRISTIN, « A global approach fo fiber nD architectures and self-sealing matrices – from research to production ». *in proceeding of HT-CMC*, Seattle, USA, 2004.

[3] V. HERB, G. COUÉGNAT, É. MARTIN, « Damage assessment of thin SiC/SiC composite plates subjected to quasi-static indentation loading ». *Composites: Part A*, Vol, 41, pp. 1677-1685, 2010.

[4] V. HERB, G. COUÉGNAT, É. MARTIN, J. LAMON, « Static indentation and low velocity impact damage of a SiC/SiC ceramic matrix composite ». *in proceeding of ECCM 14*, Budapest, Hungary, 2010.

[5] J. EL YAGOUBI, J. LAMON, J.-C. BATSALE, « Multiscale modeling of the influence of damage on the thermal properties of ceramic marix composites ». *in proceedings of CIMTEC 2010.*, Montecatini teme, Italy, 2010.

[6] L. VOZÁR, W. HOHENAUER, « Flash method of measuring the thermal diffusivity. A review ». *High Temperatures – High Pressures*, Vol. 35/36 (3), pp. 253-264, 2004.