



HAL
open science

Etude des débris générés lors de l'écrasement de stratifiés CFRP

Samuel Rivallant, Alberto Gonzales, Florian Tostain, Christine Espinosa

► **To cite this version:**

Samuel Rivallant, Alberto Gonzales, Florian Tostain, Christine Espinosa. Etude des débris générés lors de l'écrasement de stratifiés CFRP. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621557

HAL Id: hal-01621557

<https://hal.science/hal-01621557>

Submitted on 23 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude des débris générés lors de l'écrasement de stratifiés CFRP

Study of debris generated during the crushing of CFRP laminates

S. Rivallant¹, A. Gonzalez¹, F. Tostain¹, C. Espinosa¹

¹ : Université de Toulouse, CNRS, ISAE-SUPAERO, Institut Clément Ader (ICA)
10 avenue E. belin – BP 54032 – 31055 TOULOUSE Cedex 4 - France
e-mail : samuel.rivallant@isae.fr

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse de la taille et de la position des débris formés lors de l'écrasement dans son plan d'une plaque composite stratifiée. Les plaques sont formées de plis unidirectionnels en fibres de carbone orientés à 0° et 90°, et écrasées dans un montage spécifique. Différents mécanismes de ruine apparaissent alors dans et entre les plis, dépendant de leur position dans l'épaisseur de la plaque. Une partie des plis se fragmente par ruptures répétées, qui conduisent à la formation de débris. Une méthode est présentée pour compter ces fragments et les positionner dans l'espace. A partir de cette étape, une reconstruction de la plaque à partir des fragments est réalisée, qui permet alors de faire une analyse de la distribution spatiale des fragments, à savoir dans l'épaisseur et dans la longueur de la plaque.

Abstract

This study deals with the analysis of size and location of debris formed by the in-plane crushing of composite laminate plates. Plates are made of unidirectional plies with carbon fibre, oriented at 0° and 90°, and are crushed in a specific set-up. Different failure mechanisms appear in and between plies, depending on their position in the plate thickness. Some of these plies fail by repeated inside ply ruptures, leading to the formation of fragments. A method is presented to count these fragments and spatially locate them. From this stage, a reconstruction of the plate is done from the debris, that allows an analysis of the spatial distribution of the fragments, in the thickness and in the length of the plate.

Mots Clés : écrasement, composite, distribution de fragments, reconstruction post-mortem

Keywords : crushing, composite, fragments distribution, post-mortem reconstruction

1 Introduction

L'utilisation du composite dans les structures aéronautiques pose la question de son comportement lors de crash (atterrissage dur), et en particulier de sa capacité d'absorption d'énergie [1,2]. Cette problématique se retrouve également dans d'autres domaines, tels que l'automobile [3,4], le ferroviaire,...

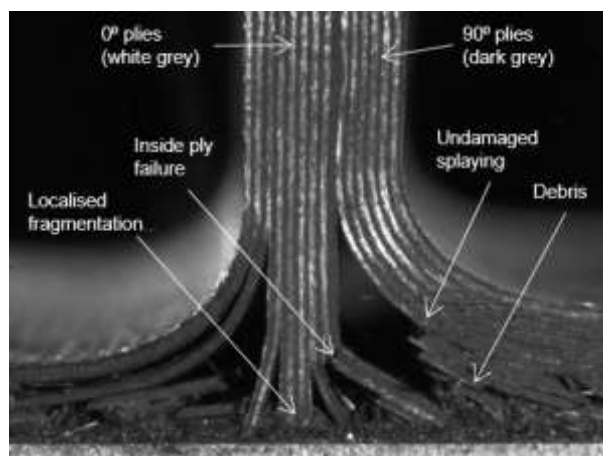


Fig. 1. Modes de ruine dans un stratifié 0°/90° sous écrasement.

Les travaux de Farley [5] ont permis de montrer que les mécanismes d'endommagement des stratifiés composites lors de l'écrasement peuvent essentiellement être classés en deux catégories : l'évasement des plis, et la fragmentation. Des travaux plus récents [6] ont montré que la fragmentation pouvait également être classée en deux catégories :

- la fragmentation localisée, en bout de plis, due au micro-flambage de paquets de fibres, avec des débris très petits ($<100\mu\text{m}$),
- la fragmentation en cœur de pli, qui donne des débris plus gros (jusqu'à quelques millimètres), et qui résulte des dommages classiques observés dans les composites (figure 1).

L'objectif de cette étude est d'analyser cette fragmentation en cœur de pli, et plus particulièrement au travers des débris qui en résultent. Pour cela, une méthode est proposée pour comptabiliser les débris, puis une étude de la distribution de ces fragments est présentée.

2 Tests d'écrasement

2.1 Matériau et échantillons

Le matériau testé est un pré-imprégné unidirectionnel de 0.125mm d'épaisseur, composé de fibres T700 et de résine époxyde M21. Les éprouvettes sont des plaques stratifiées rectangulaires (figure 2b) formées de 32 plis, pour une épaisseur totale de 4mm. Le drapage est le suivant : $[(0^\circ/90^\circ)_{x8}]_{\text{sym}}$. A l'une des extrémités de chaque plaque, un trigger de type chanfrein à 45° est usiné pour piloter l'initiation de l'écrasement.

2.2 Montage d'essai d'écrasement

Les essais d'écrasement quasi-statiques sont réalisés avec un montage spécifique (figure 2a), conçu autour de guides de stabilisation horizontaux et verticaux destinés à éviter le flambage global des plaques et donc leur rupture brutale durant l'écrasement. Une distance libre de 20mm (figure 3) est ménagée entre les guides horizontaux et le socle sur lequel l'éprouvette vient s'écraser. La conception de ce montage est telle qu'elle permet de prendre des photos de l'évolution des dommages lors du test. Plus d'explications sont disponibles dans [7]. Ce montage peut être utilisé dans une machine de traction-compression en statique, ou sous une tour de chute pour des écrasements en dynamique. Ici, les tests sont réalisés dans une machine de traction/compression standard à une vitesse imposée de 20mm/min.

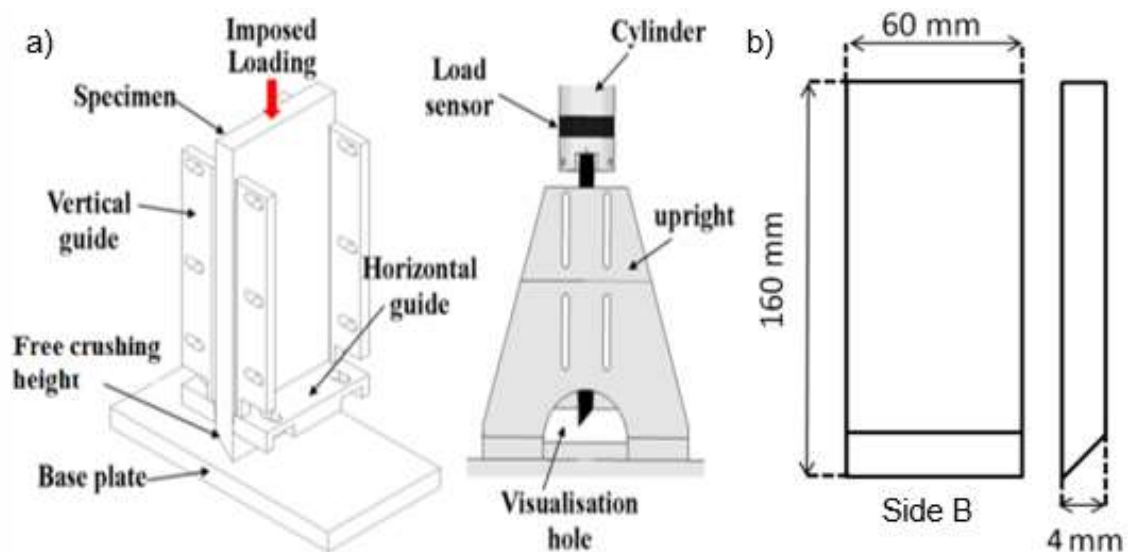


Fig. 2. Montage d'écrasement de plaque (a) et éprouvette (b)

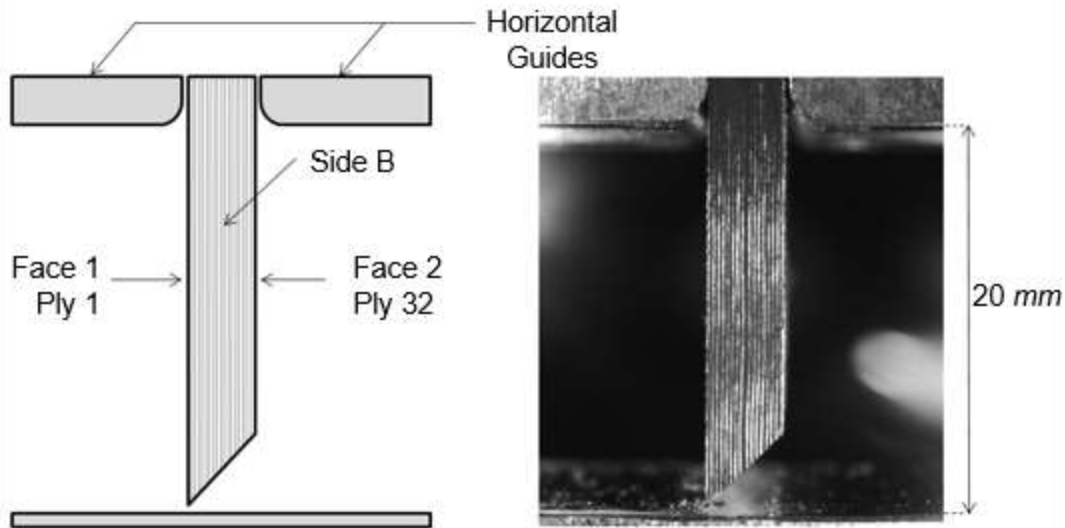


Fig. 3. Terminologie utilisée pour identifier faces et côtés de l'éprouvette

Pendant l'expérience, les données suivantes sont collectées :

- hauteur d'écrasement au cours du temps (x), égale au déplacement machine, initialisé à zéro au premier contact entre l'éprouvette et le socle,
- effort d'écrasement de la plaque, mesuré à son extrémité supérieure en utilisant un capteur rondelle piézoélectrique Kistler de 120kN (figure 2a)
- deux vidéos synchronisées des deux côtés de la plaque, à 20 images par secondes.

La terminologie utilisée pour distinguer les deux faces (1 et 2) et les deux côtés ou tranches (A et B) des échantillons est présentée sur la figure 3. Le côté B est celui pour lequel la pointe du chanfrein (face 1 et pli 1) est située sur la gauche de l'image. Le côté A est à l'opposé.

Pour cette étude, des essais statiques sont choisis car les fragments de plis obtenus lors de l'écrasement restent attachés ensemble sur la plaque, même après la fin du test, ce qui facilite leur décompte et leur positionnement dans l'éprouvette. Il faut noter que lors d'essais identiques effectués en dynamique (quelques mètres par seconde), les débris sont éjectés lors de la rupture.

2.3 Résultats d'essais

La figure 4 présente la force mesurée pendant les deux essais étudiés, en fonction de la hauteur écrasée. On distingue trois phases différentes :

- La phase d'initiation : première étape de l'écrasement, pendant laquelle l'échantillon entre en contact avec le socle et commence à transmettre l'effort dans la plaque. L'effort maximal est alors atteint pour un déplacement de 3mm, juste avant une chute d'effort marquée correspondant à l'apparition d'une grande fissure de délaminage.
- La phase de transition : la force décroît du pic d'effort vers la valeur du plateau (après environ 10mm). Une différence apparaît dans cette phase entre les deux échantillons testés, l'accumulation de débris sous forme de cales de débris modifiant le comportement transitoire entre les deux tests.
- La phase de plateau : c'est cette phase qui est étudiée plus en détail dans la suite de l'article (de 10mm à 80mm d'écrasement). Son intérêt réside dans le fait que durant cette phase, la force a une valeur moyenne constante à laquelle se superposent des oscillations relativement régulières. Les dommages et la génération de débris y sont globalement stabilisés dans un processus d'écrasement « laminaire ». Cette force moyenne est liée au volume de matériau qui s'écrase et à la capacité d'absorption d'énergie de la plaque.

La figure 5 montre des images extraites du test T090n1 à différents instants, indiqués par les étoiles dans la figure 4 : juste avant que la plaque ne touche le socle, dans la phase d'initiation lorsqu'une petite partie seulement des plis a atteint le socle, et dans la phase plateau, lorsque les mécanismes affectant chaque pli sont établis.

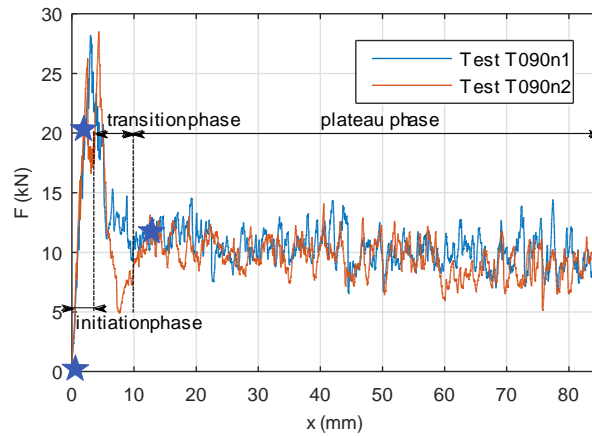


Fig. 4. Courbes force-déplacement.

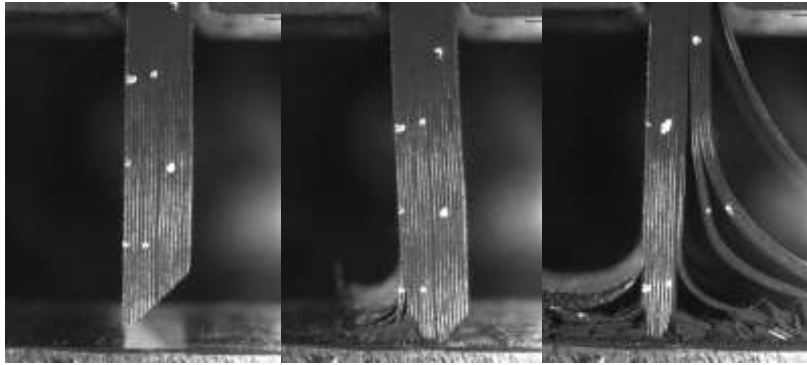


Fig. 5. Images de l'essai T090n1, côté B, à $x=0\text{mm}$, $x=2.9\text{mm}$ et $x=12.6\text{mm}$.

3 Analyse des fragments

3.1 Méthode d'identification des fragments

La première étape de l'analyse des fragments est leur identification. Comme expliqué ci-avant, la plupart des fragments restent attachés à la plaque. Un scan des deux côtés de chaque échantillon est alors réalisé. Le scan est préféré à la prise de photos pour éviter les distorsions éventuelles et les incertitudes de mesures associées. Un exemple de photo d'un échantillon post-mortem est donné en figure 6.

Chaque fragment est alors identifié manuellement et localisé sur son pli correspondant en sélectionnant sa ligne moyenne. Ce processus est très chronophage, mais il n'a pas été possible de créer un processus entièrement automatisé pour le remplacer. Après cette étape, un code maison permet de calculer la longueur et la position de chaque débris le long du pli, en partant du trigger. Cette approche permet d'obtenir une reconstruction de la plaque avec chaque fragment dans sa position initiale, avant écrasement.

Chaque fragment est identifié par deux points à ses extrémités (en bleu, figure 6) et un point en son centre (en rouge). La longueur du débris est obtenue par le calcul de la distance entre ces deux points bleus, en tenant compte de la courbure grâce au point rouge. Cette approximation est considérée comme suffisante car les fragments ont une courbure relativement faible. Pour les fragments plus longs, ou à la courbure plus prononcée, des points intermédiaires supplémentaires sont introduits.

Une attention particulière est portée à l'identification manuelle des débris pour minimiser les incertitudes de mesure. Premièrement, pour éviter de compter deux fois les longueurs de recouvrement des débris en leurs extrémités, un débris est défini par sa ligne moyenne (figure 7). L'erreur dans la mesure de la longueur des fragments est alors estimée à un maximum de 0.1mm par débris, en lien avec la résolution des images (0.02mm/pix), leur qualité et leur netteté. Comparée à la taille des plus petits débris comptabilisés (seulement quelques dixièmes de millimètres), cette erreur peut paraître importante, mais elle n'affecte pas l'analyse de la distribution des débris par taille, puisque les ordres de grandeur de taille des fragments restent les mêmes, et que cette erreur n'est pas significative pour la plupart d'entre eux.

Quelques débris se trouvent toutefois éjectés durant la phase d'initiation (visible sur les vidéos), et ne sont donc pas présents sur les scans de l'éprouvette post-mortem. Par contre, la présence de l'ensemble des fragments de la phase plateau est garantie par la continuité observée entre les extrémités des fragments voisins. La longueur totale de l'échantillon est retrouvée en sommant les longueurs des fragments.

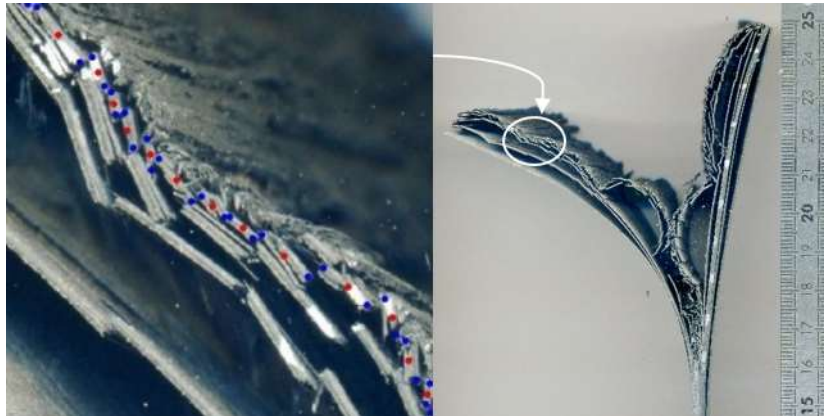


Fig. 6. Scan de la plaque T090n1 : côté A entier et détail de l'identification des fragments

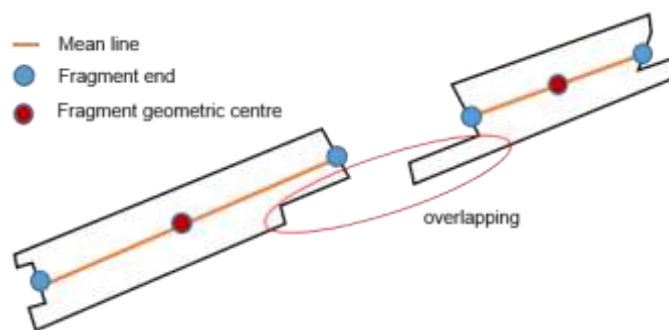


Fig. 7. Identification des fragments par selection de la ligne moyenne

3.2 Reconstruction des plaques

Une fois que les fragments ont été identifiés et positionnés, une reconstruction complète de la plaque peut être réalisée. La figure 8 montre le résultat de la reconstruction du premier échantillon, pour les deux côtés scannés, avec des couleurs différentes pour représenter les plis à 0° (orange) et les plis à 90° (bleu). Les plis sont numérotés de 1 à 32, en partant de la face 1.

Seuls les premiers 100mm de la plaque sont représentés : la distance écrasée étant inférieure à cette valeur (environ 90mm), il n'est pas utile de représenter le reste de la plaque, non fragmenté.

A noter également, le côté B du graphe a été inversé afin d'avoir une numérotation des plis identique et une comparaison visuelle plus aisée. Les traits horizontaux noirs représentent les interfaces délaminées, tandis que les traits noirs verticaux représentent les localisations des zones de rupture, c'est-à-dire les extrémités des fragments préalablement mesurés et localisés. De la fragmentation localisée est apparue lors de ces écrasements, au centre de la zone des plis endommagés. Ce mécanisme induit la création de très petits fragments, difficilement identifiables.

Ces zones sont donc représentées dans leur globalité sur les graphes par des blocs continus de couleur violette.

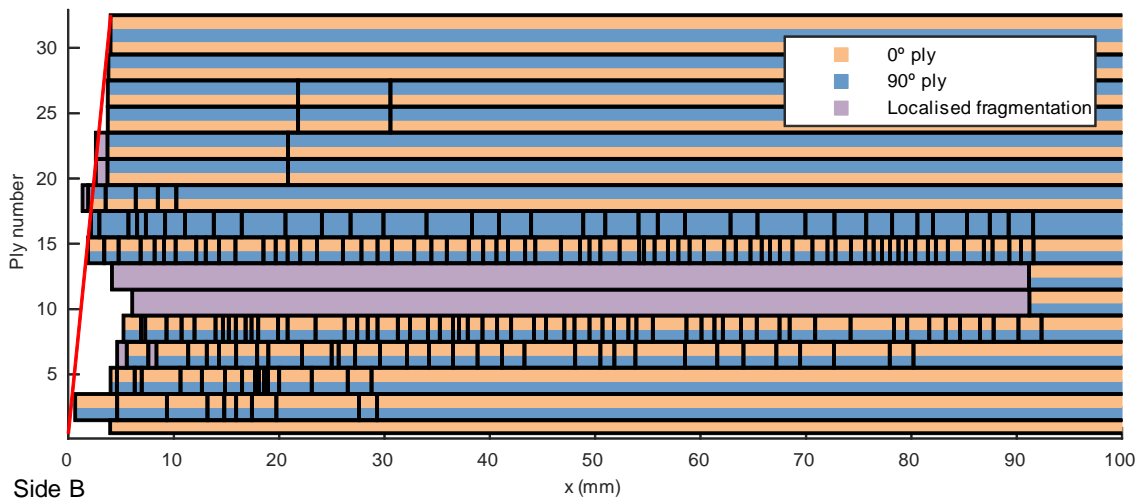
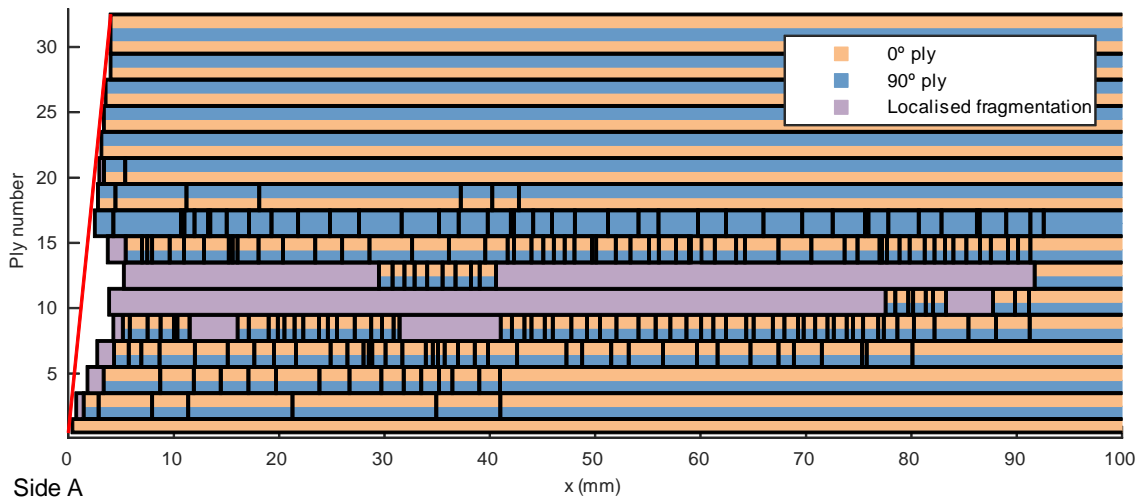


Fig. 8. Reconstruction de la plaque T090n1, côté A et côté B inversé

Les graphiques de la figure 8 montrent clairement les trois mécanismes impliqués dans l'écrasement du stratifié : l'évasement sans délaminage, la fragmentation localisée, et la rupture en cœur de pli.

On peut observer que les plis apparaissent la plupart du temps par groupes de deux, avec un pli à 0° vers l'intérieur et un pli à 90° vers l'extérieur, l'intérieur correspondant à la région de fragmentation localisée, i.e. les plis 10 à 13. Les deux groupes de plis complètement à l'extérieur font exception, avec un bloc de trois plis sur la face 2 (plis 30 à 32), et un pli seul en face 1 (pli 1).

Un trait rouge a été ajouté au graphique pour représenter le chanfrein avant écrasement. On peut observer une différence entre ce trait et la reconstruction, en particulier dans les plis entourant la zone de fragmentation localisée. Cette différence est due à deux raisons. Tout d'abord, la petite taille et la grande quantité de fragments augmente l'erreur commise dans la mesure totale de la longueur d'un pli reconstitué. Le nombre maximal de débris par pli (autour de 60), est justement atteint dans les plis 8-9 et 14-15. Comme cette erreur a été estimée à 0.1mm par débris, par cumul, cela représente potentiellement une sous-estimation de la longueur d'environ 6mm, ce qui est cohérent avec l'écart observé sur la figure 8. D'autre part, les vidéos montrent que quelques débris sont éjectés des plis pendant l'initiation, et donc non comptabilisés ensuite. C'est le cas par exemple pour le pli 1 sur le côté B.

Une première analyse visuelle des plis soumis à de la rupture en cœur de pli montre un gradient dans la taille des débris en fonction de la distance des plis où se situent les débris avec la zone de

fragmentation localisée, les fragments les plus petits se trouvant près de la fragmentation localisée. Cette observation est confirmée par l'analyse de la distribution des débris dans la section suivante. Une autre conclusion de ces graphiques est que les résultats ne sont pas identiques des deux côtés de la plaque, et plus précisément, les débris n'ont pas la même taille pour une position donnée dans un pli, alors même que l'observation des éprouvettes montre bien que les débris sont pour la grande majorité, traversants (i.e. dans toute la profondeur du pli). Cela montre donc que le comportement de la plaque en écrasement n'est pas uniforme dans la largeur de la plaque, et que les deux côtés doivent donc être pris en compte pour l'analyse. Cela dit, le comportement global reste le même, avec des plus petits fragments auprès de la zone de fragmentation localisée, des plus grands vers l'extérieur, et des délaminages aux mêmes interfaces.

3.3 Distribution des fragments

Cette reconstruction de l'échantillon permet donc de faire une analyse de la distribution des fragments à partir de leur position dans l'épaisseur et dans la longueur de la plaque.

La figure 9 montre la répartition des fragments en fonction de leur longueur, dans chaque pli, pour l'échantillon T090n1, uniquement en analysant les débris côté B. Comme expliqué plus tôt, les plis intérieurs 10 à 13 contiennent un grand nombre de très petits fragments provenant de la fragmentation localisée. Les plis 1 à 5 et 18 à 32 sont principalement en évaselement, donc ne présentent pas de débris excepté dans la première phase de l'essai (figure 8, côté B et figure 9 gauche). Entre ces deux familles de plis, quatre groupes de deux plis séparés par des délaminages sont fragmentés en débris de taille intermédiaire (6-7, 8-9, 14-15 and 16-17). Afin de faciliter la lecture de la figure 9, une couleur a été assignée pour chacune des catégories de plis qui génère une majorité de débris de tailles du même ordre de grandeur, et sous le même mécanisme d'endommagement, i.e. évaselement (en bleu), fragmentation localisée (en gris) et rupture en cœur de pli (en vert).

En se basant sur la définition des phases de l'essai provenant de l'analyse de la courbe effort/déplacement, deux processus peuvent être distingués : dans les phases d'initiation et de transition (figure 9 gauche), des débris sont créés dans les 20 premiers plis jusqu'à ce que le mécanisme d'écrasement se stabilise. Ensuite, dans la phase plateau (figure 9 droite), les débris ne sont créés que dans les plis 6 à 9 et 14 à 17. La zone de fragmentation localisée (plis 10 à 13) donnant invariablement de très petits fragments.

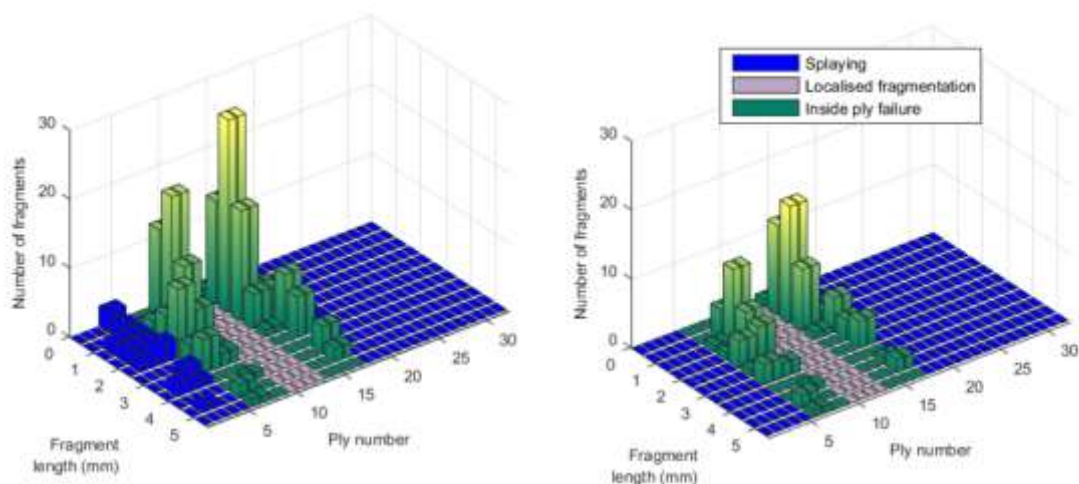


Fig. 9. Distribution des fragments en taille pour chaque pli dans l'éprouvette T090n1, côté B.
Gauche : de 0 à 90mm (plaque entière) – droite : de 40 à 90mm (phase plateau).

Seuls les groupes de plis sous rupture en cœur de pli (6-9 and 14-17) sont étudiés par la suite, puisqu'ils sont les seuls à rompre alternativement durant la phase stable (plateau), comme illustré

par la figure 9 droite, et sont donc considérés comme responsables de l'oscillation de la force d'écrasement durant cette phase.

La distribution en taille des fragments pour les côtés A et B de la plaque T090n1 est présentée dans les figures 10 et 11 pour la totalité de la longueur de l'échantillon. Les courbes enveloppes des distributions sont également dessinées afin de faciliter la comparaison entre les distributions pour les quatre groupes de plis.

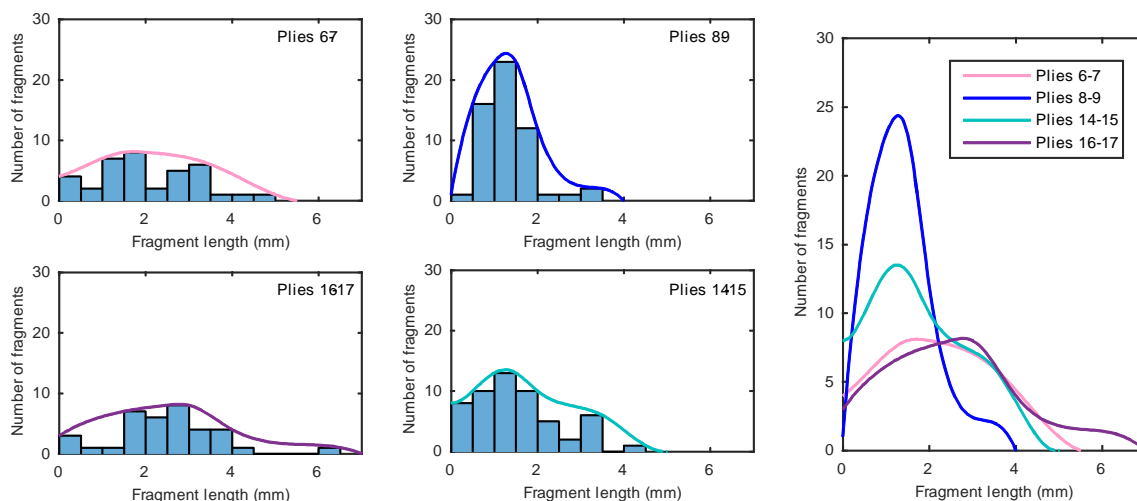


Fig. 10. Distribution des fragments en taille - T090n1, côté A, plaque entière: plis 6-7, plis 8-9, plis 16-17, plis 14-15, et courbes enveloppes

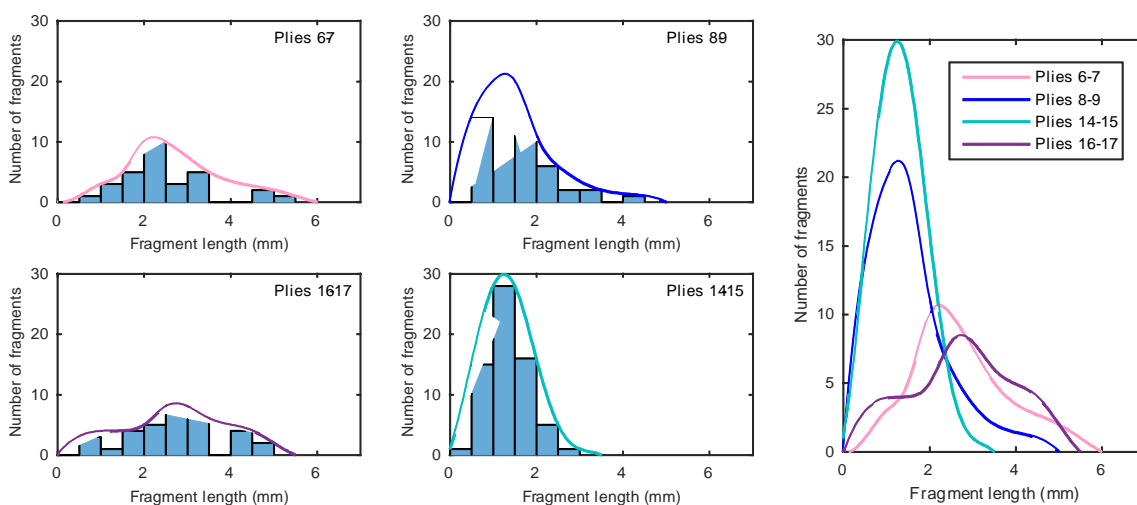


Fig. 11. Distribution des fragments en taille - T090n1, côté B, plaque entière: plis 6-7, plis 8-9, plis 16-17, plis 14-15, et courbes enveloppes

On peut observer que les groupes de plis contigus à la zone de fragmentation localisée (plis 8-9 et 14-15), présentent des courbes de distribution moins allongées, avec une majorité de fragments de 1 à 2mm. Pour les plis plus éloignés (6-7 et 16-17), la distribution est plus large, avec un pic de taille entre 2 et 3mm. Ces résultats confirment les observations effectuées sur la figure 8, avec des débris plus petits autour de la zone de fragmentation localisée.

La similarité dans les courbes de distribution entre les blocs de plis 8-9 et 14-15 est moins évidente dans la figure 10, avec un pic moins élevé pour les plis 14-15, à cause du changement de localisation de la fragmentation localisée (passage des plis 10-13 à 9-11) durant l'intervalle $x=30$ à 40 mm, comme on peut le voir sur la figure 8. Par contre, lorsqu'on ne prend en compte que la partie stable (plateau, de $x=40$ à 90 mm), comme illustré sur la figure 12, les deux courbes sont alors beaucoup plus semblables.

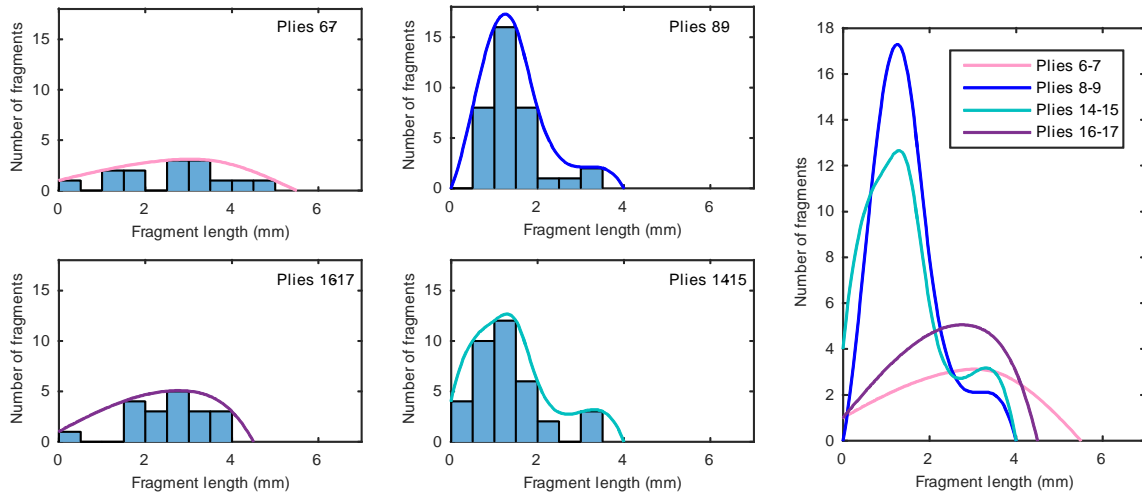


Fig. 12. Distribution des fragments en taille - T090n1, côté A, $x=40$ to 90mm: plis 6-7, plis 8-9, plis 16-17, plis 14-15, et courbes enveloppes

Considérant que les distributions sont semblables pour les deux blocs de plis intérieurs (et respectivement pour les deux blocs de plis extérieurs), les fragments ont été compatibles par groupes (intérieurs ou extérieurs) afin de comparer les distributions pour chaque côté de la plaque T090n1 (A et B). Comme observé précédemment, même si les deux côtés ne présentent pas les mêmes tailles de fragment pour une position donnée, les courbes de distribution sont très proches, ce qui signifie que le comportement à l'écrasement et la création de débris sont similaires sur les deux côtés.

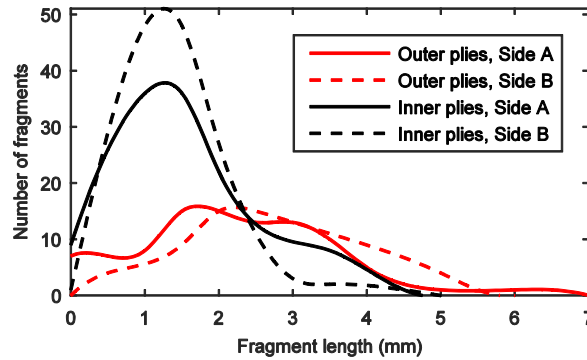


Fig. 13. Distribution des fragments en taille - T090n1, plaque entière: Comparaison entre les côtés A et B

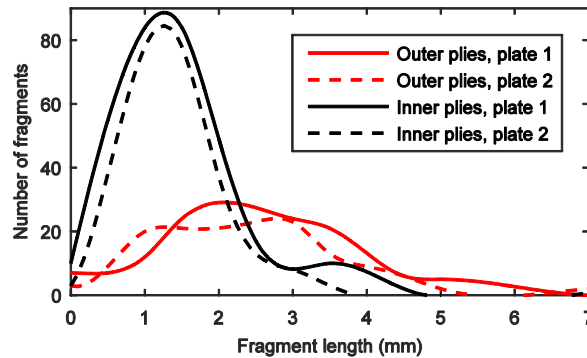


Fig. 14. Distribution des fragments en taille – courbes enveloppes, plaques entières: Comparaison entre les éprouvettes T090n1 et T090n2

Finalement, la figure 14 présente une comparaison entre les deux tests effectués, en comptabilisant ensemble les plis intérieurs (respectivement extérieurs), sur les deux côtés, pour les deux tests. L'analyse des courbes montre alors que les distributions d'un essai à l'autre sont très proches, ce qui laisse penser que les mécanismes dans la phase plateau sont répétables d'un essai à l'autre, même si seulement deux tests ont été réalisés.

4 Conclusion

En premier lieu, cette étude a permis de montrer que pour le type d'éprouvette analysée, il est possible de faire un décompte des fragments provenant de l'écrasement d'une plaque composite, sous sollicitation dans le plan, et en statique. Ce décompte s'accompagne d'une localisation des débris, qui permet également de reconstruire l'éprouvette, et ainsi d'analyser la distribution des fragments non pas dans sa globalité, mais par plis.

Les principaux résultats obtenus sont que la fragmentation apparaît dans un nombre limité de plis, plutôt au centre de l'éprouvette. On distingue deux zones fragmentées : une zone de fragmentation localisée, avec de très petits débris, et, de part et d'autre, une zone de fragmentation en débris macroscopiques, pour laquelle il a été possible de réaliser une étude de distribution. Ces plis sont regroupés par blocs de deux : deux blocs de part et d'autre.

Cette analyse montre qu'il y a une distribution particulière des fragments :

- les fragments sont plus petits et plus nombreux dans les plis adjacents à la zone de fragmentation localisée,
- les fragments mesurés à partir des deux côtés d'une même plaque ne sont pas identiques, mais présentent des distributions similaires,
- la comparaison entre les distributions de débris dans les deux tests réalisés montre une très grande similitude.

Une perspective directe de ces résultats est l'étude de l'impact de ces ruptures sur les variations de la courbe d'effort et donc de l'énergie dissipée. En effet, dans la phase plateau de l'écrasement, les mécanismes sont stabilisés, et seules les ruptures en cœur de plis diffèrent. A partir de la localisation des ruptures (i.e. des extrémités des fragments), et d'un modèle de reprise d'effort des plis, il devrait alors être possible de reconstruire la courbe d'effort et ses variations.

Remerciements

Cette étude a fait l'objet d'un financement de l'ANR via le projet VULCOMP2 (VULnérabilité des COMPOSITE – Phase 2), réunissant les partenaires suivants : Airbus Group Innovation, Holo3, ICA, Impetus-AFEA, I2M, LMT-Cachan et ONERA.

Références

- [1] S. Heimbs, F. Strobl, P. Middendorf, and J. Guimard, "Composite crash absorber for aircraft fuselage applications", *Structures Under Shock and Impact XI*, WIT Transactions on The Built Environment, vol. 113, 2010.
- [2] M. Jimenez, A. Miravete, E. Larrode, and D. Revuelta, "Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles", *Composite Structures*, vol. 48, no. 1, pp. 107–111, 2000.
- [3] A. Beyene, E. Koricho, G. Belingardi, and B. Martorana, "Design and manufacturing issues in the development of lightweight solution for a vehicle frontal bumper", *Procedia Engineering*, vol. 88, pp. 77–84, 2014.
- [4] A. Esnaola, I. Tena, J. Aurrekoetxea, I. Gallego, and I. Ulacia, "Effect of fibre volume fraction on energy absorption capabilities of e-glass/polyester automotive crash structures", *Composites Part B: Engineering*, vol. 85, pp. 1–7, 2016.
- [5] G. Farley and R. Jones, "Crushing characteristics of continuous fiber-reinforced composite tubes", *Journal of composite Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 37–50, 1992.
- [6] H. Israr, S. Rivallant, and J. Barrau, "Experimental investigation on mean crushing stress characterization of carbon-epoxy plies under compressive crushing mode", *Composite Structures*, vol. 96, pp. 357 – 364, 2013.
- [7] D. Guillon, S. Rivallant, J.J. Barrau, C. Petiot, P. Thevenet, N. Pechnik, "Initiation and propagation mechanisms of progressive crushing in carbon-epoxy laminated plates", *ECCM13*, 2-5 June 2008, Stockholm, Sweden.