



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/7363>

To cite this version :

Nicolas GUILLAUD, Catherine FROUSTEY, Jean-Luc LATAILLADE, Philippe VIOT, Frédéric DAU - Réponse à l'impact de plaques composites épaisses préchargées en tension uniaxiale. - In: Congrès français de mécanique (21 ; 2013 ; Bordeaux), France, 2013-08-26 - Réponse à l'impact de plaques composites épaisses préchargées en tension uniaxiale. - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Réponse à l'impact de plaques composites épaisses préchargées en tension uniaxiale.

N. GUILLAUD^a, C. FROUSTEY^b, F. DAU^a, P. VIOT^a, JL. LATAILLADE^a

a. Arts et Métiers Paristech, Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux, Esplanade des Arts et Métiers, F-33400 TALENCE

b. Université Bordeaux 1, Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux, Esplanade des Arts et Métiers, F-33400 TALENCE

Résumé :

Ce travail porte sur la réponse à l'impact de plaques composites de fortes épaisseurs (de 5 à 15 mm) soumises à un préchargement en tension uniaxiale. Le matériau utilisé est un stratifié carbone/époxy quasi-isotropique de séquence d'empilement $([0/45/90/-45]_i)_S$ avec i variant de 2 à 6. Un plan d'expérience de Doelhart à trois variables est proposé afin d'étudier l'influence de l'épaisseur, du préchargement, et de l'énergie d'impact. Pour la précharge avant impact, les déformations sont imposées grâce à un dispositif de prétension conçu à cet effet et varient de 300 à 3000 micro-déformations. Les impacts sont générés avec une tour de chute de capacité maximale de 700 Joules. Les énergies d'impact utilisées pour ces travaux varient de 30 à 214 Joules. Les endommagements post impact sont caractérisés par des techniques CND et destructive (dépilage pour obtenir une cartographie des ruptures de fibres). Des essais de traction seront réalisés pour déterminer la tenue résiduelle des échantillons et appréhender l'évolution de l'endommagement.

Abstract :

This study concerns Carbon / epoxy composite plates. Three different thickness were investigated $([0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_i)_S$ for $i = 2, 3$ or 4 (5, 10 and 15 mm thick). An instrumented falling-weight-impact test machine was used for test in this work. Impact energies were 30 J to 214 J. Tensile preloadings were defined according to the ultimate tensile strength of the plates (300 to 3000 micro strain). Tests were defined using Doelhart design of experiments for which parameters were thickness, tensile preloading and impact energy and were performed on a drop tower. Impact behavior were characterized from impact force and displacement measurements. The strain state of back sheet was determined using digital correlation. Damage was characterized using non destructive control technique and depley technique. Post impact tension are carried to characterize the residual strength and to see the damage evolution.

Mots clefs : Composite ; préchargement ; impact

1 Introduction

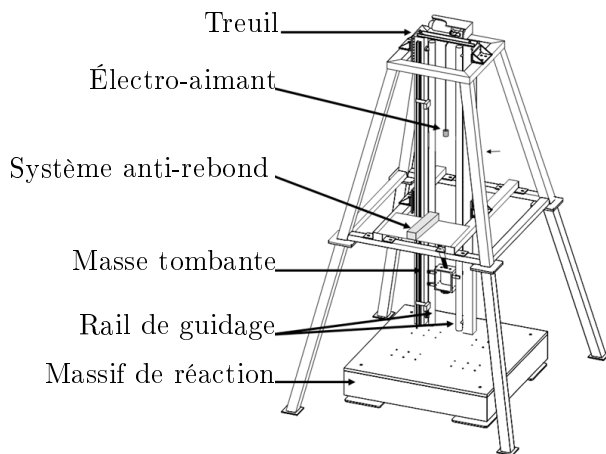
Les matériaux composites ont un rapport rigidité/masse qui favorise leur utilisation pour alléger les structures. Dans l'aéronautique, ils sont de plus en plus présents en tant que pièces structurales. En place ou en fonctionnement, généralement chargées, ces pièces sont soumises à des impacts (dus à des chutes d'outils par exemple). Peu de marqueurs permettent de révéler l'endommagement qui est induit et se pose donc le problème de la tenue résiduelle de ces pièces endommagées. Ces pièces structurales ont dans certains cas une épaisseur importante. Quelques auteurs [1, 2, 3, 4, 5, 6] ont étudié l'influence de la précontrainte sur le comportement à l'impact de plaques minces (< 5 mm). L'influence de l'épaisseur vis-à-vis d'un impact a été observée [7, 8, 9, 10], cependant, les réponses à l'impact de plaques épaisses (> 5 mm) précontraintes sont très peu étudiées. Cette étude porte sur le comportement à l'impact et la tenue résiduelle de plaques épaisses (5, 10 et 15 mm) et précontraintes.

2 Dispositif expérimental

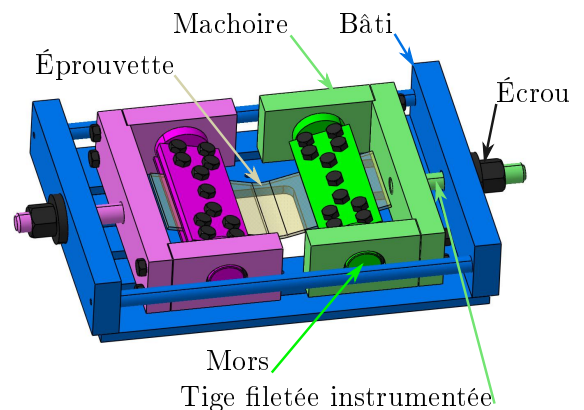
Deux moyens expérimentaux sont utilisés. Le premier, une tour de chute, permet de générer un seul impact prédéfini. Le second permet de précontraindre des échantillons plans.

2.1 Tour de chute

La tour de chute est un moyen d'essais fréquemment utilisé pour réaliser des essais d'impacts. Celle utilisée est composée de deux colonnes rectifiées permettant la translation d'un mobile selon la verticale. Ces deux colonnes sont maintenues par un châssis rigide. L'échantillon est placé sur un massif de réaction et un dispositif anti-rebond évite d'endommager une seconde fois l'échantillon après le rebond du mobile impacteur. La tour de chute a pour capacité maximale une masse de 25 kg tombant de 2,80 m ce qui correspond à une vitesse de $7,4 \text{ m s}^{-1}$ et une énergie d'impact de près de 700 J. Elle est représentée sur la figure 1(a).



(a) Tour de chute.



(b) Système de précontrainte.

FIGURE 1 – Moyens expérimentaux pour réaliser les impacts sur plaques précontraintes

2.2 Dispositif de précontrainte

Le dispositif de précontrainte développé permet d'appliquer un effort de précontrainte de 66 kN. Ce dispositif est composé de :

- un bâti rigide
- deux mâchoires en liaison glissière par rapport au bâti
- deux mors (chacun relié à une mâchoire par une liaison pivot)
- deux tiges filetées reliant chaque mâchoire au bâti dont l'une d'entre elle est équipée d'un pont complet de jauge d'extensométrie qui permet de contrôler la précharge appliquée ainsi que l'effort dans la tige pendant l'impact

La flexion de l'échantillon est autorisée pour éviter l'endommagement au niveau des mors. La figure 1(b) représente ce dispositif.

3 Plan expérimental

3.1 Échantillons

Le matériau utilisé est un matériau composite à renfort carbone (fibre T700) et matrice époxy (Époxy M10). Trois épaisseurs différentes ont été fabriquées, 5, 10 et 15 mm. Elles ont pour stratification respective $([0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_i)_S$ avec $i = 2, 3$ ou 4 . Les échantillons ont pour dimension $100 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$. Des talons en verre/époxy et en aluminium sont collés sur les extrémités des échantillons pour éviter tout endommagement dans les zones bridées.

3.2 Plan d'expérience

Pour obtenir un maximum d'information avec un nombre limité d'essais, le choix d'utiliser un plan d'expérience de Doelhart a été fait. Ce type de plans présente plusieurs avantages :

- Les points d'expérience sont répartis dans tout l'espace expérimental de façon uniforme.
- Il est possible d'étendre facilement le domaine expérimental.
- Le nombre de facteurs peut être augmenté en cours d'étude.

Les surfaces de réponse reconstituées à partir des résultats obtenus pour les essais définis par le plan d'expérience sont d'ordre 2 suivant tous les facteurs.

3.3 Les différents facteurs du plan d'expérience

L'objectif est d'analyser le comportement d'une plaque composite précontrainte lors d'un impact. Trois facteurs ont été choisis :

1. La valeur de la pré-déformation imposée.
2. L'énergie d'impact.
3. L'épaisseur de la plaque.

Un impact est défini par une masse (de l'impacteur) et une vitesse. Dans le plan d'expérience choisi, seule l'énergie d'impact est un paramètre, ainsi l'influence du couple masse/vitesse ne sera pas observée.

3.3.1 Prédéformation

La précharge est définie par de nombreux auteurs comme une déformation [2, 3, 6, 4, 5] et par d'autres [1], comme un taux de la contrainte à rupture. La précharge peut donc être exprimée de deux façons indépendantes de l'épaisseur. Dans un premier temps, le choix a été fait de l'exprimer comme un taux de la contrainte à rupture. Cependant, la valeur de la contrainte à rupture pose le problème de la limite des capacités des machines de traction/compression pour obtenir la rupture des échantillons ($\simeq 800$ kN) ; le choix a été fait d'utiliser une déformation comme précharge.

Le dispositif de précharge développé a une capacité maximale de 66 kN. Le module d'Young des échantillons a été déterminé par calculs analytiques utilisant la loi des mélanges [11] et sa valeur pour l'ensemble des échantillons est de 40 GPa. Le tableau 1 exprime la prédéformation maximale possible en fonction de l'épaisseur.

TABLE 1 – Prédéformation maximale applicable

Épaisseur (mm)	5	10	15
Prédéformation max ($\mu\epsilon$)	3000	1500	1000

3.3.2 L'énergie d'impact

L'impacteur utilisé est un impacteur hémisphérique de 16 mm de diamètre. L'énergie d'impact est un paramètre dirigé par le couple masse/vitesse. Dans cette étude, l'influence de la masse ou de la vitesse n'est pas étudiée. L'ensemble des essais est réalisé avec des vitesses d'impact comprises entre 4 m s^{-1} et 5 m s^{-1} . Pour chaque épaisseur, un calcul par éléments finis a été réalisé avec les mêmes conditions aux limites que celles imposées par le dispositif de précharge. Ce calcul a permis de connaître l'énergie nécessaire pour atteindre une contrainte de ± 2400 MPa en indentation quasi-statique avec un indenteur hémisphérique de 16 mm de diamètre. La contrainte de ± 2400 MPa correspond à la limite à rupture des fibres. Le tableau 2 représente cette énergie de référence en fonction de l'épaisseur.

TABLE 2 – Énergie de référence en fonction de l'épaisseur

Épaisseur (mm)	5	10	15
Énergie de référence (J)	62	127	214

3.4 Plans d'expérience utilisés

Un plan d'expérience de Doelhart à trois facteurs est défini en utilisant les facteurs présentés dans la section précédente : épaisseur de l'échantillon, prédéformation imposée, énergie d'impact. Cependant, en limitant la force de précharge à 66 kN, la précharge maximale à appliquer n'est que de 1500 $\mu\epsilon$. Pour étudier l'influence de la précharge avec des valeurs plus élevées, un second plan d'expérience est donc défini pour l'épaisseur la plus faible (5 mm) avec seulement deux facteurs : l'énergie incidente d'impact et la précharge. Le tableau 3 représente le plan d'expérience à trois facteurs. L'ensemble des expériences est répété deux fois pour assurer la reproductibilité, mais également pour pouvoir réaliser un plus grand nombre d'investigations pour qualifier et quantifier les endommagements.

TABLE 3 – Plan d'expérience à trois facteurs

Num	Énergie (% E_{ref})	Prédéformation ($\mu\epsilon$)	Épaisseur	Force de pré- contrainte (kN)	Énergie d'im- pact (J)
1	62,5	900	10	36	79
2	100	900	10	36	127
3	25	900	10	36	32
4	81	1500	10	60	103
5	44	300	10	12	56
6	81	300	10	12	103
7	44	1500	10	60	56
8	81	1100	15	66	174
9	44	700	5	14	27
10	81	700	5	14	50
11	62,5	1300	5	26	39
12	44	1100	15	66	94
13	62,5	500	15	30	134

4 Moyens d'analyses de l'impact, observation et quantification des endommagements

Lors de l'impact, les mesures effectuées sont :

- La force de contact entre l'impacteur et l'échantillon (capteur piézo d'une capacité de 100 kN)
- L'effort de traction encaissé par la vis instrumentée.
- La position de l'impacteur au cours du temps (Caméra rapide cadencée à 10 000 images⁻¹)
- Le déplacement 3D de la surface inférieure de l'échantillon au cours du temps, pour calculer sa déformation 3D (Stéréo-Corrélation cadencé à 6000 images⁻¹)

Après l'impact, des analyses non-destructives et destructives sont réalisées pour définir au mieux l'endommagement du matériau. Un essai de traction est également réalisé pour suivre l'évolution de l'endommagement. Cet essai de tenue résiduelle est régulièrement interrompu pour étudier la propagation de l'endommagement. Les différentes techniques d'observation et de suivi de l'endommagement sont listées ci-dessous :

CND par ultrasons est utilisé pour évaluer le volume endommagé du matériau et connaître la localisation précise de l'endommagement.

Émission acoustique permet de suivre, lors de l'essai de tenue résiduelle en traction, l'évolution de l'endommagement.

La micrographie optique permet après polissage d'observer l'endommagement. Cette technique est qualitative, mais ne permet pas d'obtenir une réponse quantitative pour être exploitée comme surface de réponse.

La De-ply technique (ou dépilement) est une technique présentée par Freeman [12] qui consiste à carboniser la matrice pour obtenir les renforts secs. Cette technique permet de cartographier et de quantifier les ruptures de fibres.

5 Premiers résultats et commentaires

Les premiers essais réalisés ont permis de définir l'énergie maximale qui endommage l'ensemble des plis tout en préservant l'aspect extérieur de l'échantillon. L'énergie déterminée pour chacune des épaisseurs correspond à l'énergie de référence définie par calcul éléments finis. Ces premiers impacts sont réalisés sans appliquer un effort de précontrainte à l'éprouvette.

L'effort de contact en fonction du temps se diviser en plusieurs phases.

1. Une rampe où l'effort augmente brusquement (réponse élastique de la plaque)
2. Une chute brutale de l'effort causée par une perte de contact due au flambement des plis supérieurs
3. Une reprise du contact
4. Une baisse de l'effort qui correspond au rebond de l'impacteur et donc à la fin de l'essai

Après la reprise du contact, on observe de petites oscillations du signal correspond à l'endommagement de l'échantillon. On remarque également que la valeur maximale de la force de contact est proportionnel à l'épaisseur à la puissance $\frac{3}{2}$ ce qui avait été montré par Caprino et al.[8]. La figure 2 représente les forces maximales mesurées ainsi que la courbe $E_{paiss}\frac{3}{2} \times \alpha$ avec $\alpha = 10,5$.

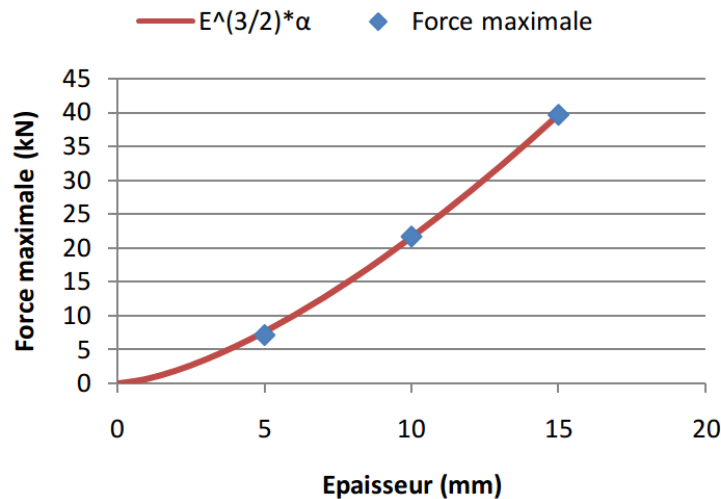


FIGURE 2 – Force maximale en fonction de l'épaisseur

La figure 3 représente les micrographies pour les trois épaisseurs différentes dans le plan médian de l'éprouvette. Le disque représente la position de l'impacteur lors de l'impact.

Les micrographies montrent que l'ensemble des plis est endommagé. En effet, on note la présence de fissures dans l'ensemble des plis. Ces fissures s'expliquent par le phénomène de flexion de l'éprouvette au moment de l'impact : les contraintes de cisaillement apparaissant dans ces plis favorisent le délaminage. Quelle que soit l'épaisseur de l'éprouvette, le pli supérieur est rompu sur toute la largeur de l'éprouvette. Cette rupture s'explique par le flambement de ce pli lors de l'impact. Pour les essais avec précontrainte, la répartition des efforts au sein des échantillons est modifiée. Le risque de flambement du pli supérieur est diminué et les efforts de traction pour les plis inférieurs des éprouvettes sont augmentés.

L'ensemble des essais sera présenté lors de la session orale.

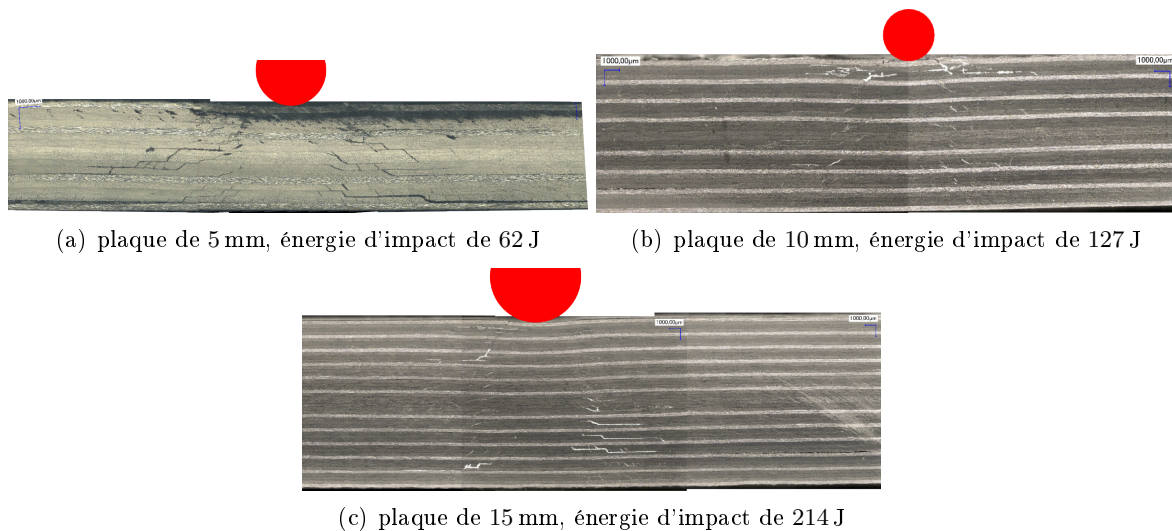


FIGURE 3 – Micrographie dans le sens de la longueur des échantillons

Références

- [1] S.-T. Chiu, Y.-Y. Liou, Y.-C. Chang, and C.-L. Ong, “Low velocity impact behavior of prestressed composite laminates,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 47, no. 2-3, pp. 268–272, 1997.
- [2] M. D. Robb, W. S. Arnold, and I. Marshall, “The damage tolerance of GRP laminates under biaxial prestress,” *Composite Structures*, vol. 32, pp. 141–149, 1995.
- [3] B. Whittingham, I. Marshall, T. Mitrevski, and R. Jones, “The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage,” *Composite Structures*, vol. 66, no. 1-4, pp. 685–698, 2004.
- [4] I.-H. Choi, I.-G. Kim, S.-M. Ahn, and C.-H. Yeom, “Analytical and experimental studies on the low-velocity impact response and damage of composite laminates under in-plane loads with structural damping effects,” *Composites Science and Technology*, vol. 70, no. 10, pp. 1513–1522, 2010.
- [5] M. Kulkarni, R. Goel, and N. Naik, “Effect of back pressure on impact and compression-after-impact characteristics of composites,” *Composite Structures*, vol. 93, no. 2, pp. 944–951, 2011.
- [6] T. Mitrevski, I. Marshall, R. Thomson, and R. Jones, “Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes,” *Composite Structures*, vol. 76, no. 3, pp. 209–217, 2006.
- [7] L. Sutherland and C. G. Soares, “Effects of laminate thickness and reinforcement type on the impact behaviour of e-glass/polyester laminates,” *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 15, pp. 2243 – 2260, 1999.
- [8] G. Caprino, V. Lopresto, C. Scarponi, and G. Briotti, “Influence of material thickness on the response of carbon-fabric/epoxy panels to low velocity impact,” *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 15, pp. 2279–2286, 1999. cited By (since 1996) 35.
- [9] G. Belingardi and R. Vadori, “Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate,” *Composite Structures*, vol. 61, no. 1-2, pp. 27–38, 2003.
- [10] C. Breen, F. Guild, and M. Pavier, “Impact damage to thick carbon fibre reinforced plastic composite laminates,” *Journal of Materials Science*, vol. 41, no. 20, pp. 6718–6724, 2006.
- [11] J.-M. Berthelot, *Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures*. Éditions Tec& Doc, 1999.
- [12] S. M. Freeman, “DAMAGE PROGRESSION IN GRAPHITE-EPOXY BY A DEPLYING TECHNIQUE.” *Technical Report AFWAL-TR - Air Force Wright Aeronautical Laboratories (United States)*, 1981.