

Caractérisation au choc de composites : endommagement et effet de la géométrie

Impact resistance characterization of composites : damage and influence of the geometry

Christophe Cruanes¹, Laurent Guillaumat¹, Stéphanie Patel², Charles Naejus², Martin Denize², Jean-Baptiste Croué¹

1 : Laboratoire Angevin de Mécanique, Procédés et Innovation,
Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, campus Angers,
2 boulevard du Ronceray, 49035 Angers Cedex 1, France
Email : Christophe.Cruanes@ensam.eu ; Laurent.Guillaumat@ensam.eu

2 : Daher Aerospace – Shap'in
1 rue Claire Roman, 44860 Saint Aignan de Grandlieu, France
Email : S.Patel@daher.com ; C.Naejus@daher.com ; M.Denize@daher.com

Résumé

Le comportement à l'impact de pièces composites soumises à un choc à basse énergie est fonction d'un grand nombre de paramètres. Certains sont liés à la nature du composite et, parmi les autres, l'énergie d'impact, la forme de l'impacteur ou encore les conditions aux limites jouent un rôle prépondérant.

Cette étude se base sur une campagne expérimentale où l'énergie d'impact a varié de 2 à 60 J. Les éprouvettes étaient constituées d'une matrice thermoplastique ou thermosettable mais renforcées par des mêmes fibres de carbone. En plus des deux seuils énergétiques bien connus (énergies critique et de perforation), un troisième a pu être identifié en observant les évolutions de deux paramètres en fonction de l'énergie d'impact : la force maximale mesurée lors de l'essai et le ratio énergétique (i.e. le rapport de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact).

Des observations par microtomographie postérieures aux essais ont permis de relier ces seuils avec l'état d'endommagement dans le volume en plus de l'observation de l'indentation.

L'effet de la géométrie de l'éprouvette (largeur et épaisseur) a permis l'observation de courbes maîtresses jusqu'à un certain point en suivant l'évolution des paramètres (force, énergie absorbée...) ramenés au volume.

Abstract

The impact behaviour of composite parts subjected to low-energy impacts depends on a large number of parameters. Some of these are related to the nature of the composite, and, among the others, the impact energy, the shape of the impactor and the boundary conditions play a major role.

This study is based on an experimental campaign in which the energies varied from 2 J to 60 J. The materials were thermoplastic or thermosetting matrices reinforced with the same carbon fibres.

In addition to the two well-known energy thresholds (critical and perforation energies), a third was identified by observing changes in two parameters as a function of impact energy: the maximum force measured during the test and the energy ratio (i.e. the ratio of absorbed energy to impact energy).

Post-test microtomographic observations were carried out to link these thresholds with the damage in the volume, in addition to visual observations the indentation.

The effect of the geometry of the specimen (width and thickness) enabled the observation of master curves up to a point by following the evolution of the parameters (force, absorbed energy, etc.) in relation to the volume.

Mots Clés : Choc à basse énergie, Seuils énergétiques, Microtomographie, Courbes maîtresses volumiques

Keywords : Low energy impact, Energy thresholds, Microtomography, Volumic master curves

1. Introduction

L'étude, à partir de laquelle ce résumé a été écrit, est la suite de celle ayant servi de base pour la présentation aux JNC 2023 [1] à savoir un projet soutenu par Daher sur l'étude du comportement mécanique d'un composite à matrice thermoplastique.

En partant de ces résultats, il a été décidé d'étendre les campagnes d'essais à d'autres composites renforcés avec les mêmes fibres de carbone : celui de la première étude avec une matrice TP et fibres UD (UD/TP), un à matrice TD et fibres UD (UD/TD) et un à matrice TD et tissé (Tissé/TD) (Tab 1.). Les trois matériaux ont subis des chocs aux mêmes énergies (et même couple hauteur de chute/masse de l'impacteur).

Composite	Type de matrice	Type de pli	Empilement	Epaisseur (mm)
UD/TP	Thermoplastique	Unidirectionnel	[45/0/-45/90]2s	2,16
UD/TD	Thermodurcissable	Unidirectionnel	[45/90/-45/0/45/90]s	2,32
Tissé/TD	Thermodurcissable	Tissé	[45/90/-45/0]s	2,36

Tab. 1. Caractéristiques partielles des différents composites.

Les essais de choc ont été effectués sur une tour de chute avec les conditions limites suivantes : deux bords encastres et deux bords libres. Il a également été possible de mesurer précisément l'évolution de l'énergie en fonction du temps par trois moyens à partir du : déplacement de l'impacteur, la flèche sous la zone de contact et la force.

2. Résultats

2.1 Observation des seuils

La première partie de cette présentation porte sur l'étude de l'évolution de la force maximale mesurée lors de l'essai et le ratio énergétique défini par la relation (1) en fonction de l'énergie cinétique à l'impact sur des éprouvettes en composite UD à matrice thermoplastique (UD/TP) et tissé à matrice thermodurcissable (tissé/TD). Les résultats sont représentés sur les figures 1 et 2 :

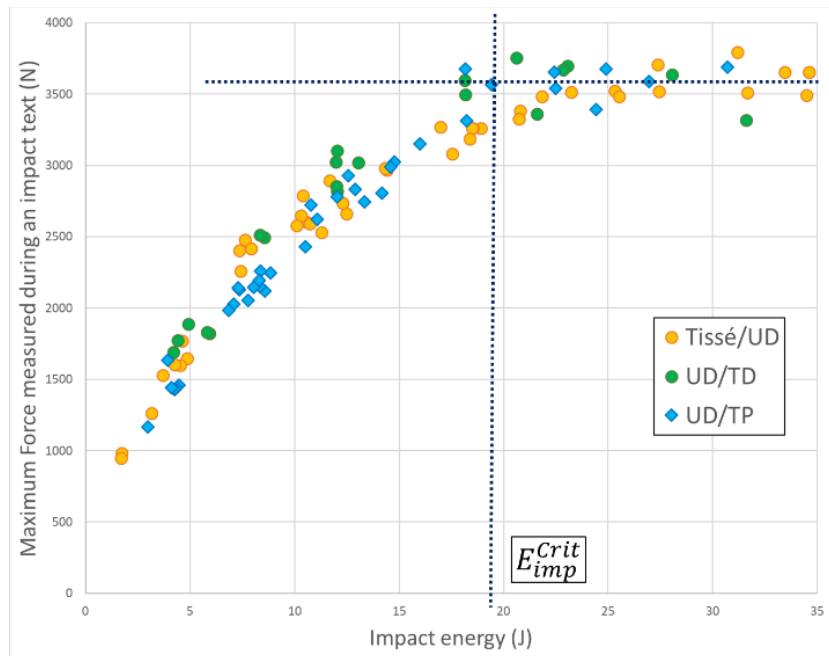


Fig. 1. Evolution de la force maximale mesurée lors de l'essai d'impact en fonction de l'énergie cinétique à l'impact.

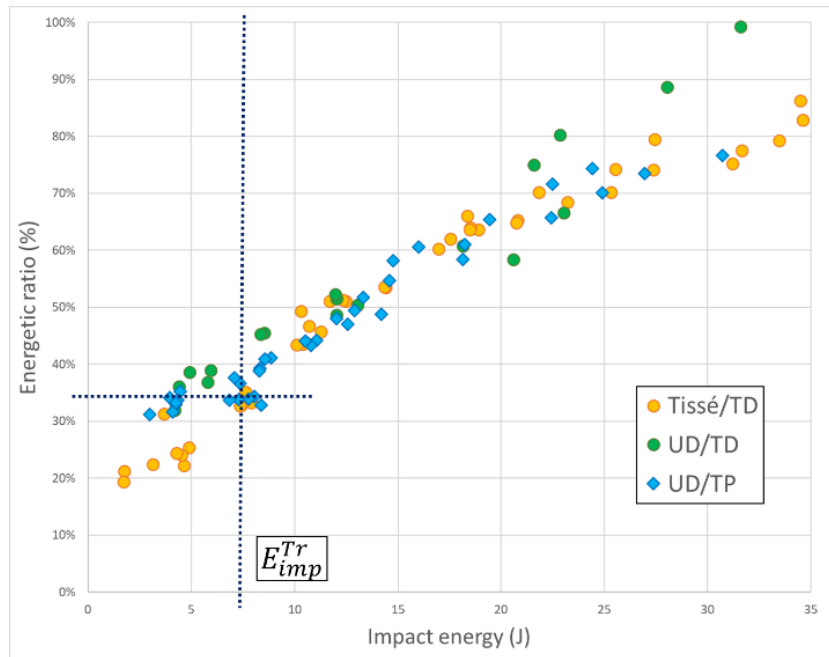


Fig. 2. Evolution du ratio énergétique (Eq.1) en fonction de l'énergie cinétique à l'impact.

$$R = \frac{E_{abs}}{E_{cin}} \quad (\text{Eq.1})$$

Où E_{abs} est l'énergie absorbée et E_{cin} l'énergie cinétique à l'impact [3,4].

Les deux seuils énergétiques observés sont :

- l'énergie critique E_{cin}^{crit} à partir de laquelle l'effort maximum mesuré lors d'un essai de choc se stabilise alors que l'énergie d'impact augmente. Ce seuil est généralement mesuré dans la littérature en calculant l'énergie d'impact pour laquelle l'énergie élastique est maximum [2].
- L'énergie de transition E_{cin}^{tr} qui s'observe sur l'évolution du ratio énergétique en fonction de l'énergie d'impact : c'est l'énergie d'impact pour laquelle la ratio transitionne d'une évolution constante (dans le cas de matrice thermoplastique) ou transitoire (matrice thermodurcissable) vers une évolution linéaire.

Le troisième seuil énergétique que l'on pourrait observer correspond à l'énergie de perforation mais, dans le cas de cette étude, aucun essai n'a été effectué à une telle énergie.

2.2 Lien entre les seuils et l'endommagement dans le volume

Des mesures par microtomographie ont été effectuées au CERMEL à Tours à l'aide d'un RX Solution Easytom 160 afin d'investiguer le lien entre les deux seuils identifiés dans le paragraphe précédent et l'endommagement induit par le choc.

Les éprouvettes utilisées pour ces mesures sont de géométrie rectangulaire (20 x 100 x épaisseur mm³) et ont été découpées dans des éprouvettes après l'essai de choc dans le sens de la largeur et centrées autour du point d'impact. Il a été ainsi possible d'observer l'état de l'endommagement dans un volume d'environ 8 x 8 x 8 mm³ directement sous le point d'impact et à une résolution proche de 5 μm.

Les éprouvettes ont été choisies de manière à encadrer les deux seuils décrits dans le paragraphe précédent (cf. figures 1 et 2).

Il apparaît que les composites présentent un certain nombre de points communs :

- $E_{imp} < E_{cin}^{tr}$: aucune rupture de fibres n'est observée
- $E_{cin}^{tr} < E_{imp} < E_{cin}^{crit}$: des ruptures de fibres sont observées dans certains plis à 0°
- $E_{cin}^{crit} < E_{imp}$: tous les plis à 0° présentent des fibres rompues

Néanmoins, les trois types de composites présentent des différences liées à la nature de leur matrice : le composite UD/TP exhibe très peu de fissures dans la matrice ou à l'interface fibre/matrice, contrairement aux composites à matrice TD pour des essais où l'énergie absorbée est du même ordre de grandeur : illustration avec les figures 3 et 4 montrant l'endommagement post choc dans une éprouvette UD/TD et UD/TD.

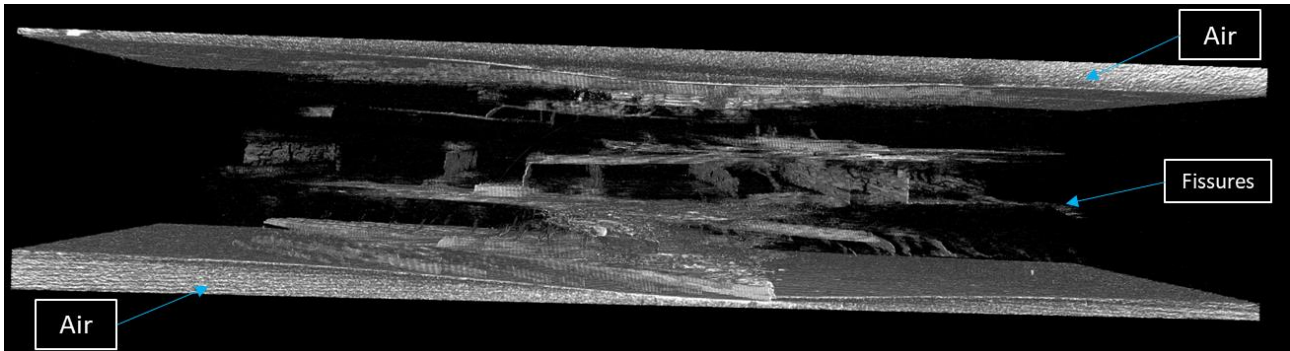


Fig. 3. Endommagement après un essai à 11 J vu par microtomographie d'une éprouvette UD/TP vue dans l'orientation longueurXépaisseur

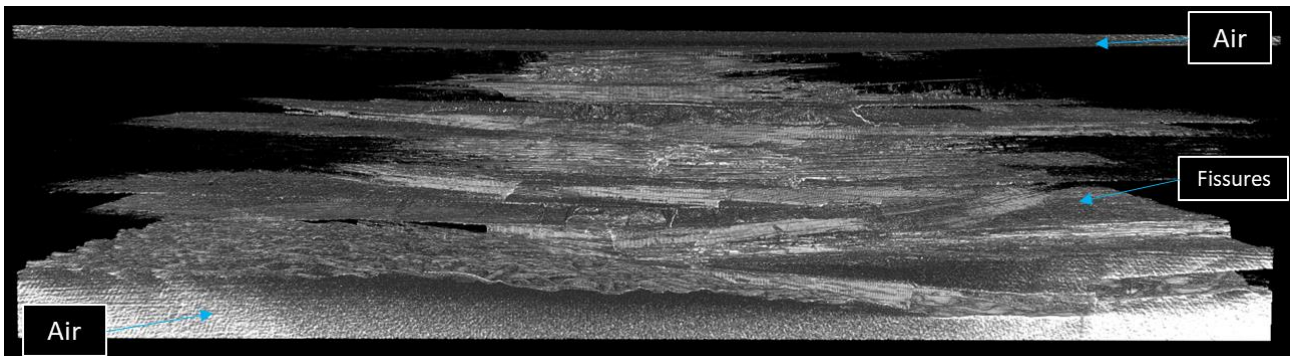


Fig. 4. Endommagement après un essai à 12 J vu par microtomographie d'une éprouvette UD/TD vue dans l'orientation longueurXépaisseur

2.3 Effet de la géométrie sur la réponse au choc

Plusieurs types d'éprouvettes de largeur et d'épaisseur différentes ont été testées pour le composite UD/TP :

Nom	S	M	L	N	N-32p	N-64p
Largeur (mm)	25	75	125	100	100	100
Épaisseur (plis)	16	16	16	16	32	64

Tab. 1. Géométrie des éprouvettes utilisées dans cette partie

Il apparaît que les paramètres mesurés (force, déplacement, énergie) lors des essais nous donnent des informations assez attendues (les éprouvettes avec le plus grand volume utile atteignent les efforts les plus importants et les déplacements les plus faibles par exemple), les valeurs volumiques (i.e. divisées par le volume utile) présentent dans certains cas des résultats plutôt inattendus comme le montrent les figures 5 et 6

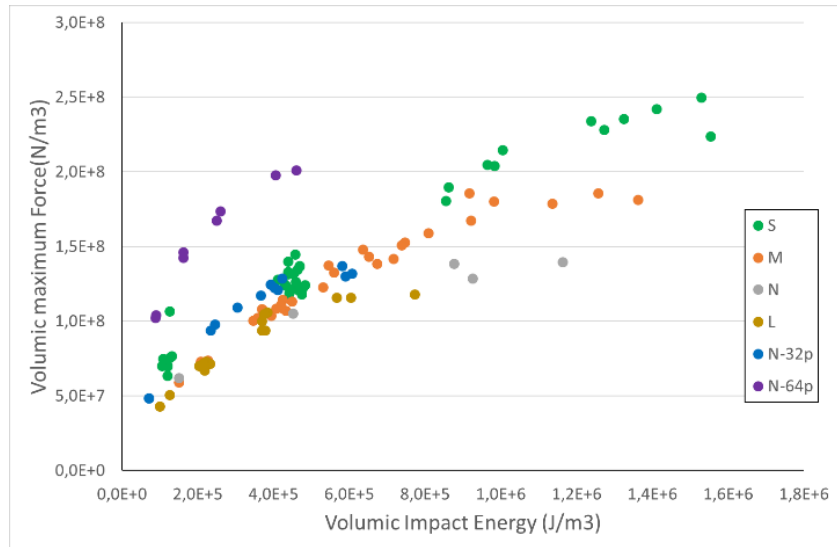


Fig. 5. Evolution de la force maximale volumique mesurée lors de l'essai d'impact en fonction de l'énergie cinétique à l'impact volumique.

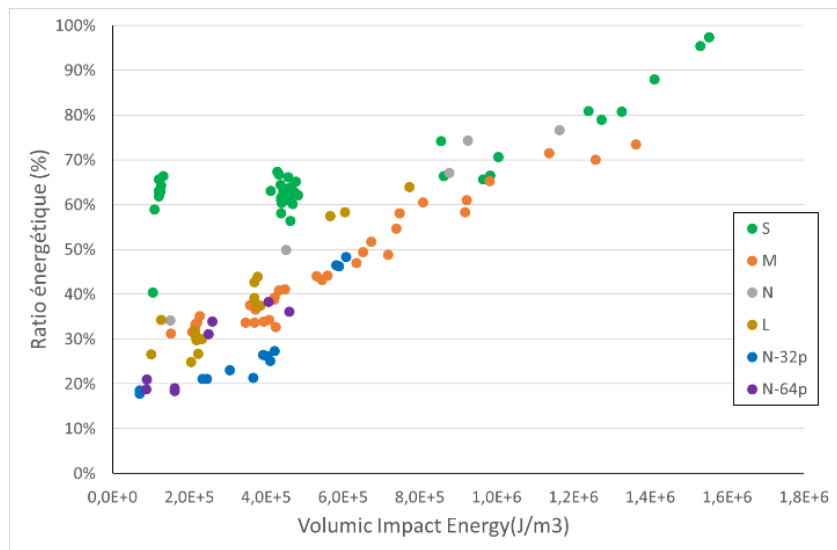


Fig. 6. Evolution du ratio énergétique en fonction de l'énergie cinétique à l'impact volumique.

Un comportement de type courbe maîtresse peut être observé sur ces deux figures, avant un seuil associé à la valeur volumique du seuil critique (Figure 5) et après celui associé à la valeur volumique du seuil de transition (Figure 6).

La seule géométrie qui ne suit pas la courbe maîtresse en effort volumique est la plus épaisse (64 plis) tout en suivant celle du ratio énergétique. Cela pourrait s'expliquer par la géométrie de l'impacteur qui serait de géométrie et de masse trop faibles pour réussir à solliciter d'une façon comparable les différentes géométries d'éprouvettes.

La figure 5 semble donc montrer que, tant que l'énergie d'impact reste inférieure à l'énergie critique (ie tant qu'il reste un plis à 0° ne présentant pas de rupture de fibre), l'essai se situe dans un intervalle d'énergie d'impact où la réponse du matériau peut être anticipée par une abaque en force volumique (excluant toutefois des géométrie d'épaisseur trop différentes comme les éprouvettes 64 plis semble l'indiquer).

En ce qui concerne la figure 6, les différentes géométries rejoignent la courbe maîtresse à partir de l'énergie volumique de transition. Ceci semble indiquer que, comme pour la force volumique, il existerait un intervalle d'énergie d'impact commençant à l'énergie de transition et semblant se finir à l'énergie de perforation où un nouvel abaque en ratio énergétique semble émerger.

C'est une première observation d'une forme de comportement propre au matériau, dans un intervalle d'énergie d'impact donné.

Conclusion et perspectives

Cette étude est dans le prolongement de la présentation sur la tenue au choc d'un composite UD à matrice TP donnée en 2023¹ : il a été possible d'approfondir la relation entre les seuils énergétiques observés et l'état d'endommagement post choc tout en élargissant le scope à deux autres composites (UD/TD et tissé/TD). Ceci a permis d'établir de généraliser cette relation pour ces trois types de composites.

Dans un second temps, l'étude de l'influence de la géométrie de l'éprouvette a permis de mettre en évidence un comportement volumique justement indépendant de la géométrie dans des intervalles d'énergie d'impact néanmoins limités : l'exemple de la figure 5 montre qu'une fois l'énergie critique volumique atteinte, les courbes divergent de la courbe maîtresse. Ceci a permis d'émettre l'hypothèse de l'existence d'abaques de force volumique et de ratio énergétique.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Stéphane Méo, professeur à l'Université de Tours, et Mathieu Venin, Ingénieur au CERMEL, pour avoir grandement facilité l'accès à leur micro tomographe.

Références

- [1] C. Cruanes, L. Guillaumat, S. Patel, C. Naejus, M. Denize, in : Comptes Rendus des JNC 2023, Besançon, 2023
- [2] S.Z.H. Shah, S. Karuppanan, P.S.M. Megat-Yusoff, Z. Sajid « Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review », *Composite Structures* Vol. 217, pp. 100–121, 2019.
- [3] R. Matadi Boumbina, C. Froustey, P. Viot et C. Gerard, Low velocity impact response and damage of laminate composite GFRP epoxy tri block copolymer, *Composites Part B*, Vol. 76, pp. 332-342, 2015
- [4] M. Aktas, C. Atas, B.M. Icten et R. Karakuzu, An experimental investigation of the impact response of composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 87, pp. 307-313, 2009