



**HAL**  
open science

# Caractérisation dynamique en compression longitudinale d'un composite tissé à matrice thermoplastique

Arnaud Clou, Jean Luc Hanus, Christophe Roua, Patrice Bailly

## ► To cite this version:

Arnaud Clou, Jean Luc Hanus, Christophe Roua, Patrice Bailly. Caractérisation dynamique en compression longitudinale d'un composite tissé à matrice thermoplastique. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04281714

**HAL Id: hal-04281714**

**<https://hal.science/hal-04281714v1>**

Submitted on 13 Nov 2023

**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.

# Caractérisation dynamique en compression longitudinale d'un composite tissé à matrice thermoplastique

A. CLOU<sup>ab</sup>, J.L. HANUS<sup>a\*</sup>, C. ROUA<sup>b</sup>, P. BAILLY<sup>a</sup>

a. INSA Centre Val de Loire, Univ. Oréans, Univ. Tours, LaMé EA7494, 88 boulevard Lahitolle, 18000 Bourges, France

b. COGIT Composites, 9117 rue des vigneron, 18390 Saint Germain du Puy

\* [jean-luc.hanus@insa-cvl.fr](mailto:jean-luc.hanus@insa-cvl.fr)

## Résumé :

*La présente contribution présente la caractérisation expérimentale de l'effet de la vitesse de déformation sur la réponse en compression longitudinale d'un composite stratifié carbone-polyamide. Un dispositif spécifique est conçu pour mener des essais quasi-statiques et dynamiques avec la même géométrie d'éprouvette. Les essais sont réalisés avec une machine électromécanique pour les faibles vitesses, et en utilisant le système des barres de Hopkinson pour la caractérisation dynamique. Une attention particulière est portée à l'équilibre dynamique des efforts, obtenu notamment par l'utilisation d'un modeleur d'impulsion. Grâce à l'enregistrement vidéo à haute vitesse, le processus de ruine est observé et la validité des modes de rupture est constatée. La corrélation d'images numériques permet d'obtenir le champ de déformation et de vérifier son homogénéité. Dans la large plage de vitesse étudiée  $[10^{-3}; 700] s^{-1}$ , les résultats expérimentaux mettent en évidence une augmentation significative de la contrainte à rupture en compression.*

## Abstract :

*The present contribution studies the experimental characterization of the effect of strain rate on the mechanical response in longitudinal compression of a laminated carbon-polyamide composite. A specific device is designed to conduct quasi-static and dynamic tests with the same specimen geometry. The quasi-static tests are carried out with an electromechanical machine for low speeds, and using split Hopkinson pressure bars for dynamic characterization. Particular attention is paid to the dynamic stress equilibrium, thanks to the use of a pulse shaper. Through high-speed video recording, the failure initiation is observed and the validity of failure modes is ascertained. Thanks to Digital Image Correlation, the homogeneity of the strain field is analyzed. In the range  $[10^{-3}; 700] s^{-1}$ , the experimental results show a significant increase in the longitudinal compressive failure stress.*

**Mots clefs : Composite thermoplastique, Compression longitudinale, Comportement dynamique, Barres de Hopkinson, Corrélation d'images numériques**

# 1 Introduction

Les matériaux composites à matrice thermoplastique sont de plus en plus utilisés dans les industries des transports en raison de leurs propriétés mécaniques. En effet, ils permettent l'amélioration des performances et l'allègement des structures par rapport aux métaux, rendant ainsi possible une réduction des consommations de carburant, et donc des coûts de fonctionnement. Ces matériaux se démarquent par leur fabrication avec des temps de cycles courts, compatibles de la production en grandes séries, et par leur recyclabilité. Au cours de leur cycle de vie, dans les applications utilisant ces matériaux, tels que des châssis automobiles ou des éléments d'aéronefs, les structures sont soumises à des sollicitations rapides comme des chocs, des crashes et des impacts. Ainsi, une connaissance du comportement dynamique de ces matériaux est essentielle pour le dimensionnement optimal de ces structures.

Ce travail est centré sur la détermination des propriétés mécaniques en compression de composites tissés de fibres de carbone et à matrice polyamide. Ce matériau et son comportement dynamique ont été largement étudiés en traction mais sont peu documentés en compression. Jendli et al. [1] ont étudié les propriétés dynamiques en traction à  $0^\circ/90^\circ$  et  $\pm 45^\circ$  d'un composite tissé sergé 2x2 carbone/polyamide 66 jusqu'à  $300 \text{ s}^{-1}$ . En particulier pour les sollicitations en cisaillement, l'effet de la vitesse de déformation est attribué à la viscoélasticité et au comportement visco-endommageable de la matrice thermoplastique. En ayant également recours à une machine de traction servo-hydraulique, Coussa et al. [2] ont confirmé ces résultats par des essais de cisaillement interrompus sur du polyamide 66 renforcé de fibres de verre tissées en sergé 2x2. Plus tôt, Todo et al. [3] ont caractérisé un tissu de carbone taffetas à matrice polyamide 6 et ont observé une augmentation linéaire de la résistance à rupture en traction et de l'énergie absorbée par rapport à la vitesse de déformation logarithmique.

Plus récemment, Massaq et al. [4] ont caractérisé un composite tissé à matrice polyamide 6, par l'utilisation de barres de Hopkinson jusqu'à  $2500 \text{ s}^{-1}$ . Le matériau présente une augmentation de sa contrainte à rupture, conjointement à la vitesse de déformation, suivant les trois directions principales. Ploeckl et al. [5][6] ont utilisé des barres de Hopkinson, avec différentes géométries d'éprouvettes et conditions aux limites, pour investiguer l'effet de la vitesse de déformation sur la contrainte à rupture d'un composite unidirectionnel carbone-polyamide 6. Leurs résultats mettent en évidence une augmentation de l'ordre de 60% pour une vitesse de déformation de  $100 \text{ s}^{-1}$  par rapport aux essais quasi-statiques.

Pour étudier les effets de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique des matériaux composites en compression, les études font très souvent appel aux barres de Hopkinson en utilisant des dispositifs spécialement adaptés pour obtenir des résultats acceptables. Wiegand [7] a montré le premier la pertinence d'un montage d'essai spécifique pour assurer la sollicitation en compression et la validité des modes de rupture. Koerber et Camanho [8] ont développé un dispositif de compression dynamique ad-hoc pour aligner et stabiliser une fine éprouvette rectangulaire entre les barres. Soigneusement conçu pour ne pas perturber la propagation des ondes, ce dispositif de chargement en bout permet un état d'équilibre précoce des efforts appliqués sur l'éprouvette. Ploeckl et al. [5] ont implémenté une version modifiée du dispositif de Koerber et Camanho [8]. Des éprouvettes rectangulaires minces, renforcées de talons en verre/époxy collés, ont été sollicitées en compression simple aux barres de Hopkinson. Ploeckl et al. [6] ont amélioré le dispositif d'essai précédent en

introduisant la charge à la fois en bout et par cisaillement sur des éprouvettes rectangulaires planes, collées dans des embouts fendus. Yokoyama et Nakai [9] ont également étudié les effets de la vitesse de déformation sur les matériaux composites à fibres de carbone à l'aide des barres de Hopkinson. Des éprouvettes, rectangulaires épaisses et cubiques ont été utilisées. Leurs extrémités sont insérées dans un disque en acier à encoche carrée pour empêcher la rupture en pinceau et l'écrasement prématuré en bout. Nakai et al. [10] ont appliqué cette configuration de préhension à des éprouvettes cylindriques. Un stratifié à plis croisés a été caractérisé dans les trois directions principales de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  à  $10^3 \text{ s}^{-1}$ , montrant un effet positif de la vitesse de déformation sur la résistance en compression.

## 2 Etude expérimentale

### 2.1 Matériau, éprouvette et dispositif d'essai

Le matériau étudié est un composite à fibres de carbone tissées en sergé 2x2 et à matrice polyamide 66. Il est utilisé dans l'industrie automobile pour fabriquer des éléments de carrosserie par exemple, et pour des applications structurelles dans le domaine des loisirs comme des coques de casques. En utilisant une presse de thermocompression, des plaques stratifiées ont été consolidées dans un moule pendant 10 minutes à  $285^\circ\text{C}$  et une pression de 5 bars.

Les éprouvettes, d'une longueur d'environ 20 mm, sont usinées, avec des outils au diamant, en assurant des tolérances réduites pour la planéité et le parallélisme des faces de chargement. Une attention particulière est donnée à la géométrie de l'éprouvette. Cette dernière est suffisamment large pour contenir un volume élémentaire représentatif du matériau et éviter des effets d'échelle [1]. Pour limiter la friction avec les plateaux de chargement et garantir un état de contrainte uniaxial, du lubrifiant sec est appliqué sur les extrémités de l'éprouvette. Afin de réaliser de la corrélation d'images numériques (CIN) [10], un mouchetis aléatoire noir et blanc est peint par aérosol sur la face visible de l'échantillon.

Un dispositif d'essai spécifique (fig. 1), de taille réduite et facile d'emploi, a été développé afin d'empêcher la rupture en bout et la ruine prématurée de l'éprouvette lors du chargement. Utilisable aussi bien en quasi-statique qu'en dynamique, il permet la comparaison des résultats d'essais aux différentes vitesses de déformation. Ce dispositif, constitué de deux paires de brides en acier usinées et montées à chaque extrémité de l'éprouvette, est maintenu en place par le serrage manuel de vis.

### 2.2 Dispositif d'essai quasi-statique

Une machine d'essais électromécanique avec une capacité de 100 kN a été utilisée pour réaliser les essais quasi-statiques. Des jauges de déformation sont collées à l'éprouvette et connectées à un boîtier d'acquisition par l'intermédiaire d'un pont Wheatstone.

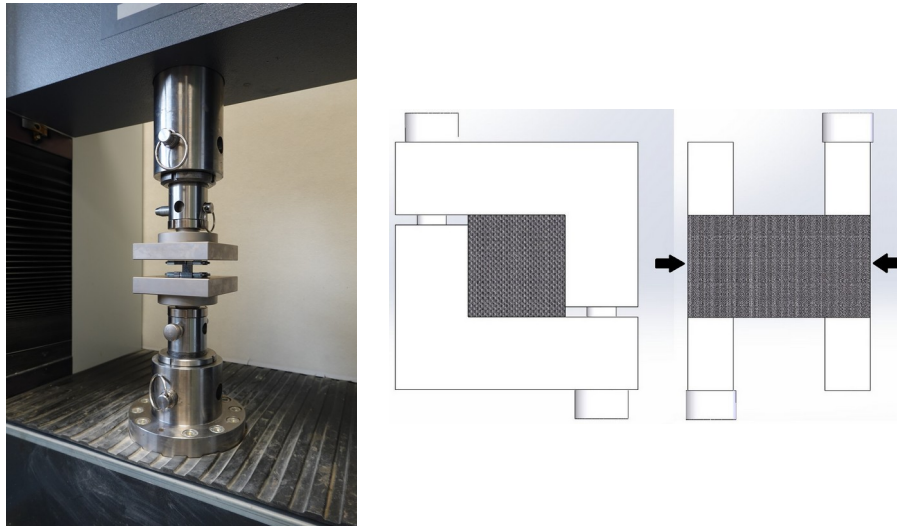


Figure 1. Configuration d'essai quasi-statique (à gauche) et dispositif d'essai spécifique (à droite), vue de face et section de profil. L'application du chargement est symbolisée par les flèches.

Une base de comparaison, nécessaire pour la validation du dispositif, est établie en menant des essais suivant la norme ISO 14126 [11] avec le dispositif IITRI. Des éprouvettes de type A, renforcées par des talons en verre/époxy, sont utilisées. Les essais de caractérisation avec le dispositif sont réalisés à différentes vitesses de déformation variant environ entre  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  et  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . De plus, l'éprouvette est filmée avec une caméra CCD haute définition. Ce dispositif est complété par deux projecteurs LED de 45 W pour un éclairage constant de l'éprouvette. La CIN est réalisée avec le logiciel Icasoft [12], permettant le calcul de la déformation sur une surface correspondant à un motif élémentaire du matériau.

## 2.3 Dispositif d'essai dynamique

Le dispositif des barres de Hopkinson (fig. 2) a été utilisé pour la détermination des propriétés de compression dynamique. D'un diamètre de 20 mm, elles comprennent un impacteur, une barre entrante et une barre sortante en acier à haute limite élastique de longueurs respectives 0,50 m, 3,00 m et 1,80 m. Des jauges de déformation sont placées sur les barres, entrante à 1,50 m et sortante à 0,38 m, de part et d'autre de l'éprouvette, pour mesurer la propagation des ondes élastiques. Deux paires de jauges de déformation, collées aux barres, sont diamétralement opposées pour s'affranchir des effets de flexion et de torsion. Amplifiés à haute vitesse, les signaux de déformation sont enregistrés avec un oscilloscope numérique à une fréquence de 1 MHz. Un modèleur de signal incident en cuivre est placé sur la face impactée de la barre entrante afin d'obtenir un chargement progressif de l'éprouvette. Cette méthode est appliquée aux matériaux composites présentant un comportement linéaire jusqu'à la rupture [8] pour assurer un état d'équilibre précoce des efforts.

Pour vérifier l'absence de dispersion et la précision des mesures de déformation dans les barres, un essai avec les barres en contact est réalisé préalablement pour valider l'hypothèse de propagation unidimensionnelle des ondes. L'impacteur frappe le modèleur d'impulsion à une vitesse  $V_0$ . La célérité des ondes dans les barres est obtenue par  $C_b = (E_b/\rho_b)^{0,5} = 4529 \text{ m/s}$  avec  $E_b = 160 \text{ GPa}$  le module d'Young et  $\rho_b = 7800 \text{ kg/m}^3$  la masse volumique des barres. L'amplitude théorique  $\epsilon_b = V_0/2C_b$  est atteinte. Entre les barres entrante et sortante, la différence de déformation mesurée de 1,4 % est

considérée comme négligeable puisque aucun changement n'est observé dans la forme du signal. Par conséquent, aucune correction de dispersion n'est nécessaire.

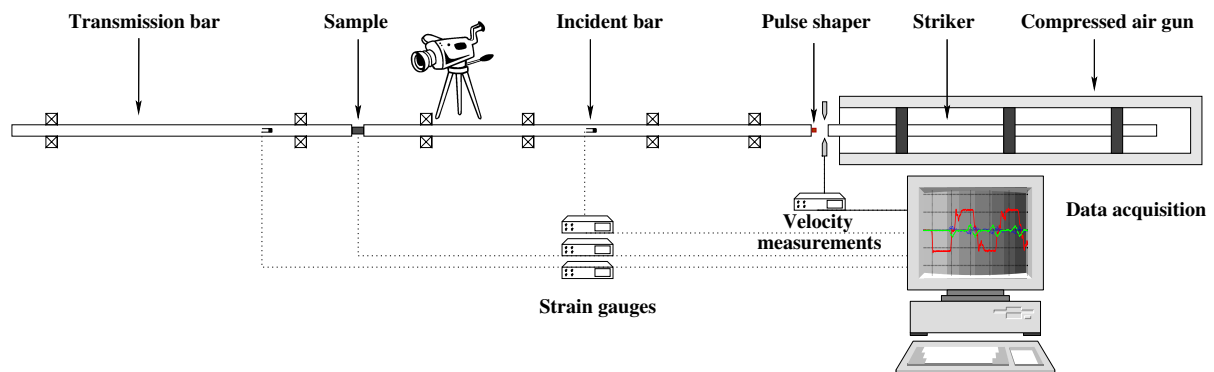


Figure 2. Dispositif d'essais des barres de Hopkinson

Le dispositif de brides est assemblé à l'éprouvette et l'ensemble est placé entre les barres. La déformation de l'échantillon et ses modes de rupture sont observés grâce à l'enregistrement vidéo à haute vitesse, avec une caméra rapide à une fréquence de 150 000 images par seconde. Deux projecteurs halogènes apportent un éclairage homogène de la zone d'intérêt. Suivant la méthode décrite précédemment, le champ de déformation en surface est déterminé par CIN.

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Résultats d'essais quasi-statiques

Pour chaque vitesse de déformation, trois essais sont réalisés et la contrainte à rupture en compression longitudinale est mesurée (tab. 1). Les essais suivant la norme ISO 14126 sont aussi menés afin d'établir une référence pour valider le dispositif d'essai proposé. Ces résultats obtenus avec la méthode normalisée sont désignés par un astérisque \*. Comme attendu, le comportement élastique fragile du matériau est confirmé. La CIN atteste de l'homogénéité du champ de déformation dans la partie utile de l'éprouvette et de l'absence d'influence du dispositif d'essai. Les modes de rupture relevés, tels que le cisaillement dans l'épaisseur et la rupture en pinceau, sont distants des faces de chargement et des brides.

Tableau 1: Résultats d'essais quasi-statique (\*Essais suivant la norme ISO 14126)

Vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ ( $s^{-1}$ )	Contrainte à rupture moyenne $\bar{\sigma}$ (MPa)	Ecart-type $s$ (MPa)	Coefficient de variation $s/\bar{\sigma}$ (%)
$1,5 \cdot 10^{-5}$	326	12	3,6
* $6,1 \cdot 10^{-5}$	*347	*10	*2,8
$1,7 \cdot 10^{-2}$	396	28	7,0

## 3.2 Résultats d'essais dynamiques

Les efforts appliqués sur l'échantillon sont calculés à partir des signaux de déformation dans les barres entrante et sortante, puis transportés aux interfaces barres/échantillon par la méthode de propagation unidimensionnelle des ondes. Les forces sont données par Eq. (1) et Eq. (2) où  $\varepsilon_{inc}$ ,  $\varepsilon_{réf}$  et  $\varepsilon_{tra}$  sont respectivement les ondes incidente, réfléchie et transmise.  $S_b$  est la section et  $E_b$  le module d'Young des barres.

$$F_{entrante} = S_b E_b (\varepsilon_{inc} + \varepsilon_{réf}) \quad (1)$$

$$F_{sortante} = S_b E_b \varepsilon_{tra} \quad (2)$$

En vérifiant l'équilibre des efforts et l'homogénéité du champ de déformation, la vitesse de déformation de l'éprouvette  $\dot{\varepsilon}_{ép}$ , la déformation  $\varepsilon_{ép}$  et la contrainte  $\sigma_{ép}$  sont calculées par les équations Eq. (3), Eq. (4) et Eq. (5), où  $S_{ép}$  est la section de l'éprouvette et  $l_{ép}$  sa longueur.

$$\dot{\varepsilon}_{ép} = \frac{C_b}{l_{ép}} (\varepsilon_{tra} - (\varepsilon_{inc} - \varepsilon_{réf})) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ép} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{ép} dt \quad (4)$$

$$\sigma_{ép} = \frac{F_{entrante} + F_{sortante}}{2 S_{ép}} \quad (5)$$

Un exemple représentatif de signaux de déformation dans les barres, enregistré lors d'un essai, est présenté en figure 3. L'analyse des résultats est détaillée en figure 4. Les efforts appliqués sur l'éprouvette évoluent de manière conjointe dans le temps. Ainsi, l'état d'équilibre est rapidement atteint. L'analyse des signaux des barres et la CIN permettent chacune une évaluation de la déformation de l'échantillon avec une bonne adéquation entre les deux méthodes. L'homogénéité du champ de déformation dans l'éprouvette pendant le chargement est confirmée par la CIN (fig. 5). La courbe de la contrainte longitudinale en fonction de la déformation est donnée en figure 6. La déformation et la contrainte retenues sont issues de la méthode de dépouillement des signaux des barres.

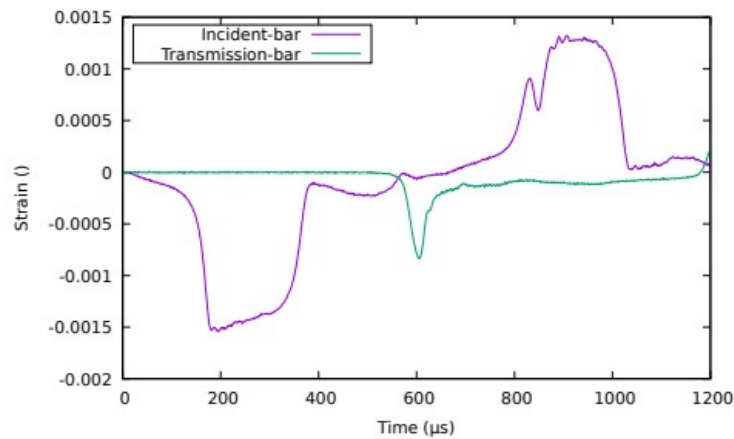


Figure 3. Signaux de déformation mesurés dans les barres représentatifs d'un essai de compression dynamique du composite carbone/polyamide

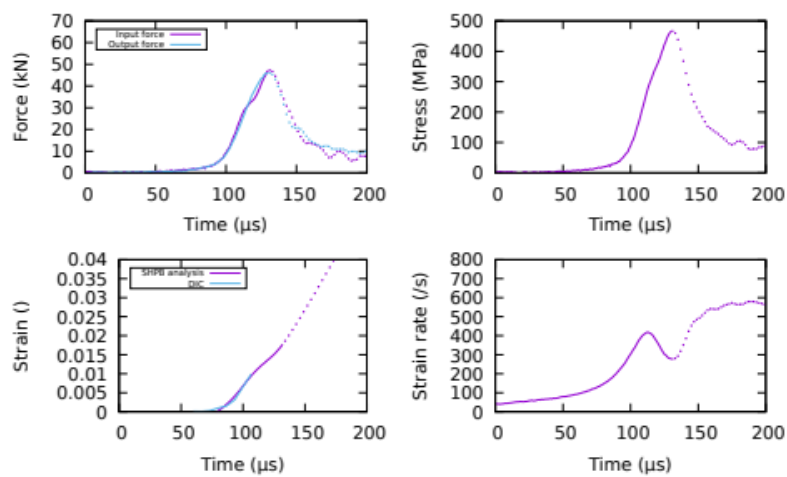


Figure 4. Efforts appliqués sur l'éprouvette, contrainte, déformation déduites des mesures des barres et par la CIN et vitesse de déformation au cours du temps.

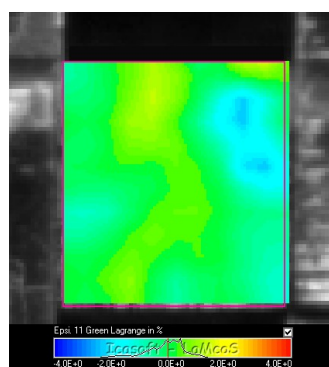


Figure 5. Champ de déformation longitudinale sur la partie utile de l'éprouvette sollicitée horizontalement aux barres de Hopkinson à  $\epsilon_{11}=0,29\%$ .



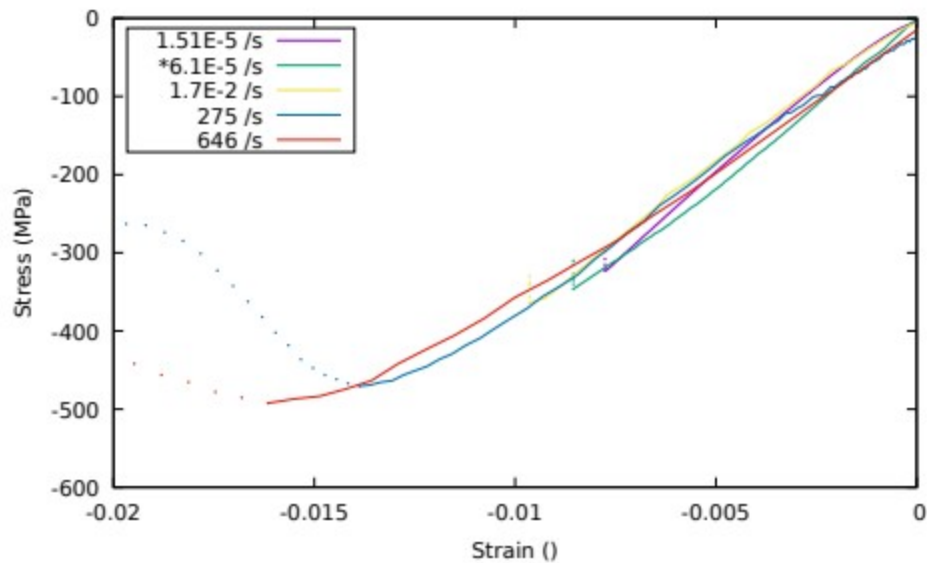


Figure 6. Comportement mécanique du composite tissé carbone à matrice polyamide à différentes vitesses de déformation.

La contrainte moyenne à rupture est 489 MPa à 265 s<sup>-1</sup> et 530 MPa à 659 s<sup>-1</sup>. Le coefficient de variation, calculé comme le rapport de l'écart-type à la moyenne, est respectivement de 5,7 % et 5,6 %. Ainsi, une hausse de +60 % est observée entre 1,5.10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup> et 659 s<sup>-1</sup>. En accord avec les précédentes constatations, les modes de rupture demeurent valides dans la partie utile de l'éprouvette (fig. 7).



Figure 7. Modes de rupture pour les essais aux barres de Hopkinson.

Ces résultats sont cohérents par rapport aux précédents travaux de recherche présentés à travers la littérature. En caractérisant un stratifié unidirectionnel carbone-polyamide 6 en compression longitudinale, Ploeckl et al. [6, 7] ont montré une augmentation significative de la contrainte à rupture entre les basses et hautes vitesses de déformation. Cette sensibilité est attribuée à l'influence de la matrice sur la réponse mécanique en compression.

## 4 Conclusion

Cette étude investigate le comportement mécanique en compression dynamique de fibres de carbone tissées en sergé renforcées par une matrice polyamide 66. Pour la caractérisation d'éprouvettes épaisses stratifiées, un dispositif d'essai spécifique a été développé avec une attention particulière apportée à l'introduction du chargement et à l'homogénéité de la déformation. Une machine électromécanique et des barres de Hopkinson ont été utilisées pour réaliser les essais à des vitesses de déformation allant de la quasi-statique à la dynamique. L'enregistrement vidéo à haute vitesse a été implémenté afin de calculer le champ de déformation via mesure optique et corrélation d'images

numériques. La rupture en pinceau et le cisaillement dans l'épaisseur ont bien été observés dans la partie utile de l'éprouvette, des basses aux hautes vitesses de déformation. Dans la plage  $[1,5 \cdot 10^{-5}; 700] \text{ s}^{-1}$ , une augmentation de +60 % de la contrainte longitudinale en compression du matériau est observée.

## Références

- [1] Jendli Z, Walrick JC, Bocquet M, Fitoussi J. Comportement mécanique sous sollicitations rapides de composites tissés carbone à matrice thermoplastique. Comptes Rendus des JNC 18. Nantes, France. 2013.
- [2] Coussa F, Renard J, Joannes S, Teissedre JC, Bompont R, Feld N. A consistent experimental protocol for the strain rate characterization of thermoplastic fabrics. Strain. Wiley. 2016.
- [3] Todo M, Takahashi K, Béguelin P, Henning Kausch H. Strain-rate dependence of the tensile fracture behaviour of woven-cloth reinforced polyamide composites. Composites Science and Technology 2000; 60: 763-771.
- [4] Wiegand J. Constitutive modelling of composite materials under impact loading. Thèse. Université d'Oxford, Royaume-Uni. 2008.
- [5] Koerber H, Camanho PP. High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in longitudinal compression. Composites: Part A 2011; 42: 462-470.
- [6] Ploeckl M, Kuhn P, Koerber H. Characterization of unidirectional carbon fiber reinforced polyamide-6 thermoplastic composite under longitudinal compression loading at high strain rate. Proceedings of DYMAT conference. 2015.
- [7] Ploeckl M, Kuhn P, Grosser J, Wolfahrt M, Koerber H. A dynamic test methodology for analyzing the strain-rate effect on the longitudinal compressive behavior of fiber-reinforced composites. Composites Structures 2017; 180: 429-438.
- [8] Yokoyama T, Nakai K. Impact compressive failure of a unidirectional carbon/epoxy laminated composite in three principal material direction. Proceedings of DYMAT conference. 2009.
- [9] Nakai K, Fukushima T, Yokoyama T, Arakawa K. High strain-rate compressive properties of carbon/epoxy laminated composites – Effects of loading direction and temperature. Proceedings of DYMAT conference. 2018.
- [10] Sutton MA, Orteu JJ, Schreier HW. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Springer. 2009.
- [11] International Organization for Standardization - ISO 14126: 1999. Fibre reinforced plastic composites – Determination of compressive properties in the in-plane direction.
- [12] Mguil-Touchal S, Morestin F, Brunet M. Various experimental applications of digital image correlation method. Rhodes. CMEM 1997; 97: 45-58.