

Influence des paramètres des structures fibreuses et tissées sous charges dynamiques

Influencing parameters of fibrous and woven structures under dynamic loads

C. Chevalier^{a,b}, F. Boussu^c, C. Kerisit^a, A. Klavzar^a, D. Coutellier^b

- a. French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL),
France, caroline.chevalier@isl.eu, christophe.kerisit@isl.eu, Andreas.KLAVZAR@isl.eu
- b. LAMIH UMR CNRS 8201 University of Valenciennes,
France, daniel.coutellier@univ-valenciennes.fr
- c. Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles
(ENSAIT), francois.boussu@ensait.fr

Résumé :

Le développement de nouvelles solutions de protection balistique nécessite des simulations numériques, afin de prédire leurs performances et leurs effets secondaires. Les mécanismes induits dans les tissus balistiques lors d'un impact dépendent des paramètres de tissage mais aussi des paramètres internes des fils utilisés dans ces structures. Ainsi, connaître le comportement dynamique du fil est essentiel pour déterminer le comportement balistique des tissus lors d'un impact.

Ce travail vise à étudier le comportement mécanique d'un fil para-aramide en charge dynamique et longitudinale. À cette fin, nous avons conçu un nouveau dispositif expérimental pour réaliser ces essais à l'aide d'un canon à gaz: le Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF). Des campagnes d'essais ont été réalisées pour identifier les paramètres dynamiques d'un fil vierge, ainsi que de caractériser l'influence de l'arrangement structural du tissu sur le comportement dynamique d'un fil.

Abstract:

The development of new ballistic solutions needs numerical simulations in order to predict their performance and their secondary effects. The induced mechanisms in ballistic fabrics during an impact depend on the weaving parameters but also on inner parameters of yarns used in these structures. Thus, knowing the dynamic behaviour of yarn is essential to determine the ballistic behaviour of fabrics during an impact.

This work aims at studying the mechanical behaviour of a para-aramid yarn in dynamic and longitudinal load. To that end, we have designed a new experimental device to achieve these tests with the use of a gas gun: the Tensile Impact Test for Yarn (TITY). Test campaigns have been performed to identify the dynamic parameters of a virgin yarn, and also to characterize the influence of the fabric structural arrangement on the dynamic behaviour of a yarn.

Mots clefs : Caractérisation dynamique, fil para-aramide, taux de déformation, procédé de mesure expérimental, paramètres dynamiques.

1 Introduction

L'amélioration du processus de conception et d'optimisation des protections balistiques nécessitent aujourd'hui le développement d'outils numériques permettant un pré-dimensionnement de la structure [1] [2]. Ce pré-dimensionnement numérique permet de diminuer le nombre d'essais expérimentaux nécessaires à la recherche de nouvelles solutions et ainsi de diminuer les coûts et délais au global. La réalisation de simulations numériques d'impact nécessite alors de décrire le comportement et la rupture des matériaux dans des conditions extrêmes, notamment de vitesses de déformation.

Concernant les matériaux fibreux techniques, peu d'études sur leur comportement mécanique en sollicitation dynamique ont encore pu être apportées. En effet, ces matériaux sont à la fois souples, hétérogènes et sans résistance en compression longitudinale ce qui en font des matériaux difficiles à étudier et à caractériser avec les dispositifs expérimentaux existants.

Aussi, le comportement mécanique d'une structure tissée dépend, en plus des paramètres liés à l'échelle macroscopique, des paramètres de chaque filament contenu dans chaque fil qui la compose.

La description du comportement mécanique de ces matériaux est donc complexe et dépend de l'échelle à laquelle on souhaite décrire le matériau. Dans le cadre de la simulation d'un impact sur un matériau fibreux, on s'intéressera soit au tissu directement (comportement homogénéisé) soit au fil (description du tissage ou fils dans la matrice organique).

Pour cette étude, nous cherchons à identifier le comportement mécanique longitudinal d'un fil en sollicitation dynamique. Cette sollicitation uni-axiale permet d'évincer toutes les composantes des vecteurs de force et d'allongement suivant les autres axes. De ce fait, à vitesse de déformation constante, l'expression de son comportement mécanique se simplifie et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F_{11} = (S_{\text{fil}} \cdot E_{11}) \cdot \varepsilon_{11} \quad (1)$$

Avec F_{11} la force axiale appliquée à l'extrémité du fil et ε_{11} l'allongement axial subi par le fil durant l'essai.

Initialement, dans les travaux de recherche de Ha-Minh [3], des premiers essais de traction dynamique sur des fils d'aramide ont été effectués à l'aide d'un tout nouveau dispositif expérimental (Figure 1 (a) et (b)). Cependant, celui-ci n'est pas optimal et présente de nombreux inconvénients comme le système d'attache par des nœuds autour de tiges métalliques qui présente des concentrations de contrainte lors des essais réalisés (Figure 1 (c)).

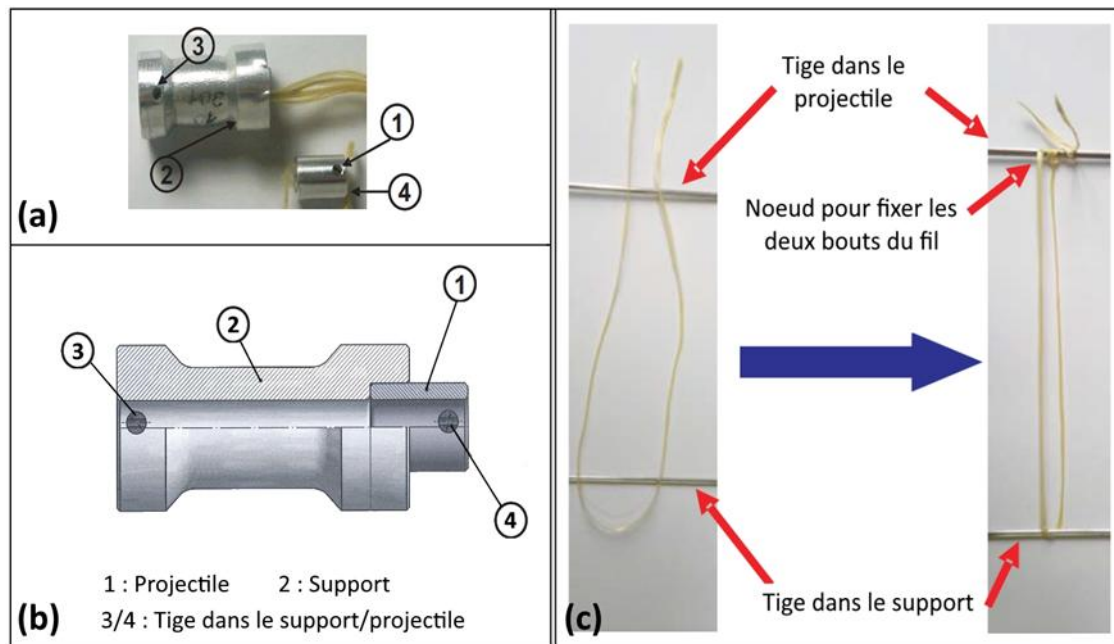


Figure 1 : (a) Photo du dispositif initial (b) schéma du système support/projectile (c) Illustration de l'enroulement du fil autour des tiges présentes dans le support et le projectile [19].

Malgré les désavantages de ce dispositif, celui-ci a permis d'obtenir des données expérimentales sur le comportement mécanique du fil en sollicitation dynamique (Tableau 1).

Etat	Module d'Young E (GPa)	Déformation à rupture ϵ_r (%)	Energie volumique de déformation critique W (J/cm ³)
Statique (0,03 s ⁻¹)	69,1 (± 3,8%)	3,7 (± 1,4%)	46,8
Dynamique (225 s ⁻¹)	214,6 (± 28%)	2,2 (± 14%)	49,8

Tableau 1: Comparaison des propriétés mécaniques du fil de Kevlar 129 entre l'état statique et l'état dynamique [19].

Par la suite, ces nouvelles valeurs dynamiques ont été intégrées dans un modèle numérique simulant un impact balistique sur une structure tissée, pour se rapprocher du comportement mécanique expérimentale de la structure tissée lors d'un impact par rapport aux données quasi-statiques (Figure 2).

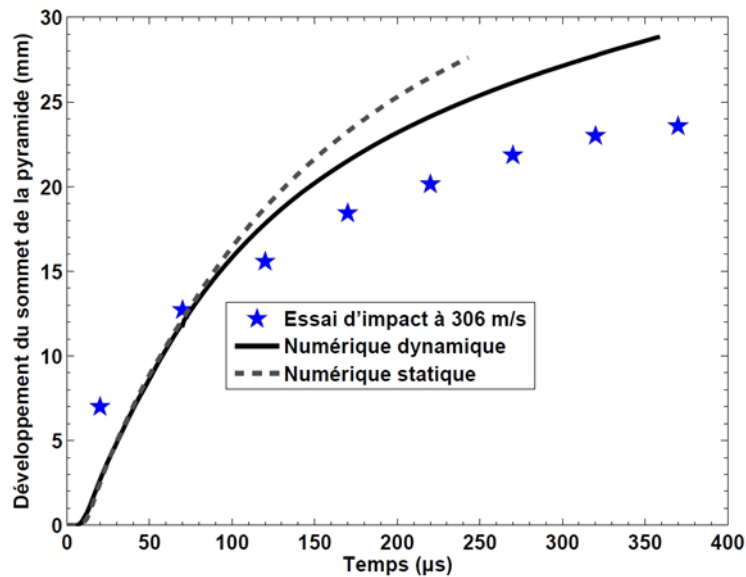


Figure 2 : Comparaison dans le cas d'impact non perforant sur le déplacement du sommet de la pyramide de déformation entre : les résultats expérimentaux, les résultats numériques en quasi-statique et les résultats numériques en dynamique [19].

Cependant, les valeurs mesurées dynamiquement par le biais de ce premier système de mesure expérimental ne se sont pas avérées précises et n'ont pas permis de reproduire exactement le phénomène réel. Pour cela, dans le cadre des travaux de thèse de Chevalier[4], une amélioration du procédé de mesure dynamique a été réalisée pour ensuite effectuer des mesures sur fils para-aramides plus précises et plus fiables.

2 Développement du dispositif de traction

Un nouveau banc de traction sur fil en sollicitation dynamique a été développé au sein des laboratoires de l'ISL: le Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF)[5] [6]. En parallèle, Lopatnikov[7] ont proposé la même idée de développement. Le principe est de propulser au moyen d'un canon à gaz un dispositif à une vitesse initiale V_0 .

Ce dispositif se compose de deux pièces : un support cylindrique, de diamètre égal à celui du diamètre intérieur du canon, et un projectile cylindrique, entre lesquels est fixé le fil à tester. Une réduction de diamètre au bout du canon vient alors stopper l'avancée du support en laissant le projectile poursuivre sa trajectoire à la vitesse V_0 et ainsi exercer une traction uni-axiale sur le fil (Figure 3) [8] [9].

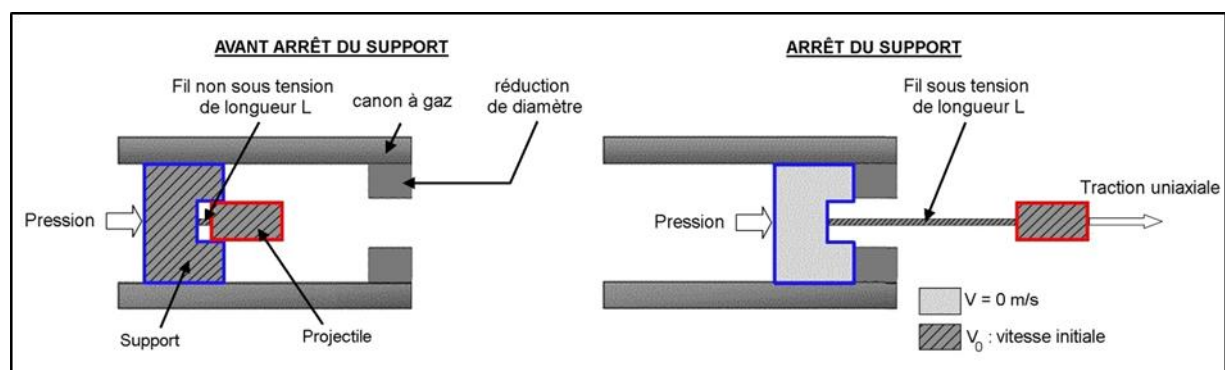


Figure 3: Schéma du dispositif de traction longitudinale sur fil.

3 Comportement mécanique du fil seul

Pour cette étude, différents essais ont été réalisés à des vitesses initiales de traction V_{i0} et des longueurs initiales de fil L_0 différents :

- à $V_{i0} = 20$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 20$ mm
- à $V_{i0} = 30$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 20$ mm
- à $V_{i0} = 20$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 5$ mm
- à $V_{i0} = 40$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 5$ mm

Les vitesses initiales de traction et les longueurs de fils ont été modifiés afin d'obtenir des vitesses de déformation différentes. Nous considérons que la sollicitation apportée au fil durant l'essai est homogène et uni-axiale. Ainsi, nous pouvons calculer la déformation vraie $\varepsilon_v(t)$ et la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}_v(t)$ subies par le fil telles que :

$$\varepsilon_v(t) = \ln\left(\frac{L(t)}{L_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta L(t)}{L_0}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_v(t) = \frac{d\varepsilon_v(t)}{dt} = \frac{V_i(t)}{L(t)} = \frac{V_i(t)}{L_0 + \Delta L(t)} \quad (3)$$

Avec $L(t)$ la longueur instantanée du fil, L_0 la longueur initiale, $\Delta L(t)$ l'allongement du fil correspondant également au déplacement mesuré du projectile et $V_i(t)$ la vitesse instantanée du projectile.

De par la diminution de la vitesse instantanée du projectile et l'augmentation de la longueur instantanée du fil, la vitesse de déformation varie et reste connue à chaque instant de l'essai (Figure 4). Les vitesses de déformation théoriques initialement appliquées pour chaque essai sont respectivement de 1000 s^{-1} , 1500 s^{-1} , 4000 s^{-1} et 8000 s^{-1} .

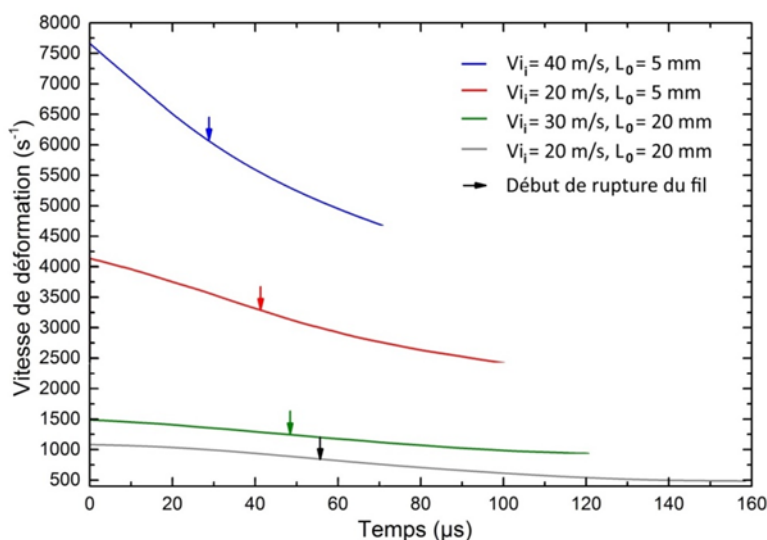


Figure 4 : Variation de la vitesse de déformation durant la phase d'élongation jusqu'à rupture pour des essais réalisés à différentes vitesses initiales de propulsion du projectile.

A l'aide de notre dispositif expérimental, nous obtenons les courbes de vitesse en fonction du temps, pour les fils de 20 mm (Figure 5) et pour les fils de 5 mm (Figure 6).

On note que l'erreur standard sur la moyenne de chaque courbe est relativement faible. Elle est de 4% pour les essais sur fil de 20 mm à 20 m/s et inférieure à 2% pour les trois autres essais. On retrouve sur ces courbes de vitesse une première courbure correspondant à l'élongation du fil. Celle-ci est délimitée par les moments de début de traction sur le fil et de début de rupture progressive des filaments dans le fil. S'en suit la deuxième courbure correspondant à la rupture progressive des filaments. Celle-ci se termine par la rupture complète du fil [10].

On note également une réduction de la durée des phénomènes d'allongement avant rupture, première courbure, et de rupture progressive du fil, deuxième courbure, avec l'augmentation des vitesses de sollicitation. Toutes ces observations suggèrent une bonne reproductibilité de l'essai sur fil seul et valident la bonne conformité des résultats obtenus [11].

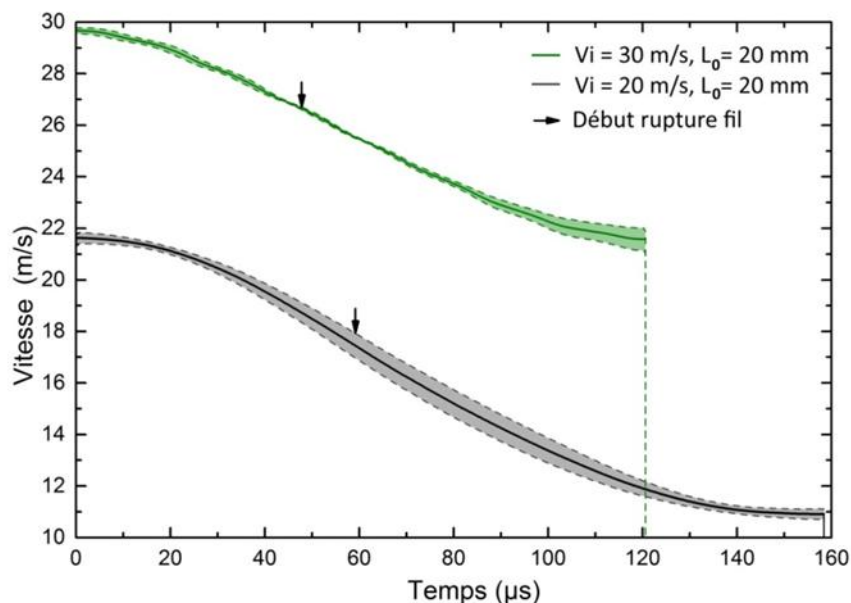


Figure 5 : Courbes de vitesse en fonction du temps pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

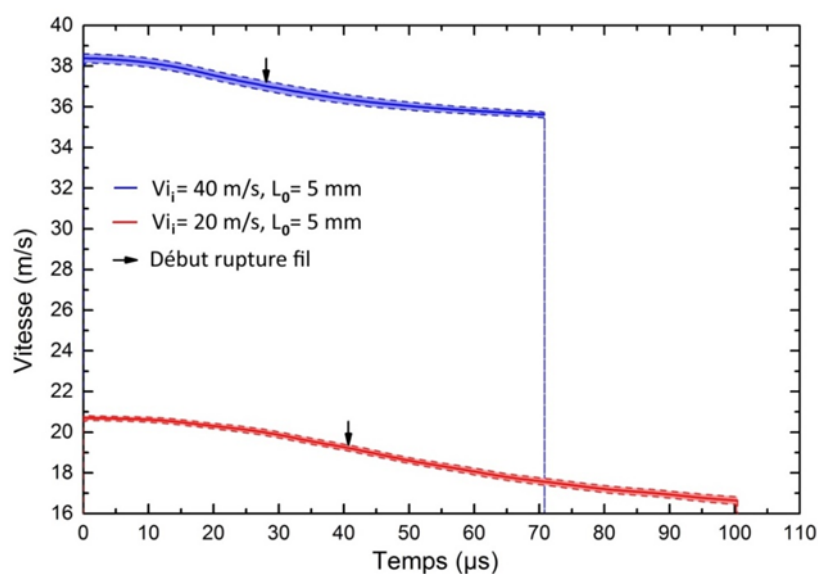


Figure 6 : Courbes de vitesse en fonction du temps pour les essais sur fil seul de 5 mm testé à 20 et 40 m/s. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

En ce qui concerne l'évolution de la force appliquée au fil en fonction de la vitesse de déformation (Figure 7), celle-ci dépend de l'allongement possible du fil et de sa capacité à emmagasiner de l'énergie. Les fils de 5 mm possèdent un volume plus petit et emmagasinent alors beaucoup moins d'énergie que les fils de 20mm. La force nécessaire à appliquer pour atteindre la rupture des fils de 5mm est donc inférieure à celle nécessaire à la rupture des fils de 20mm. Ils absorbent néanmoins une densité d'énergie volumique plus importante due à l'évolution des mécanismes de rupture.

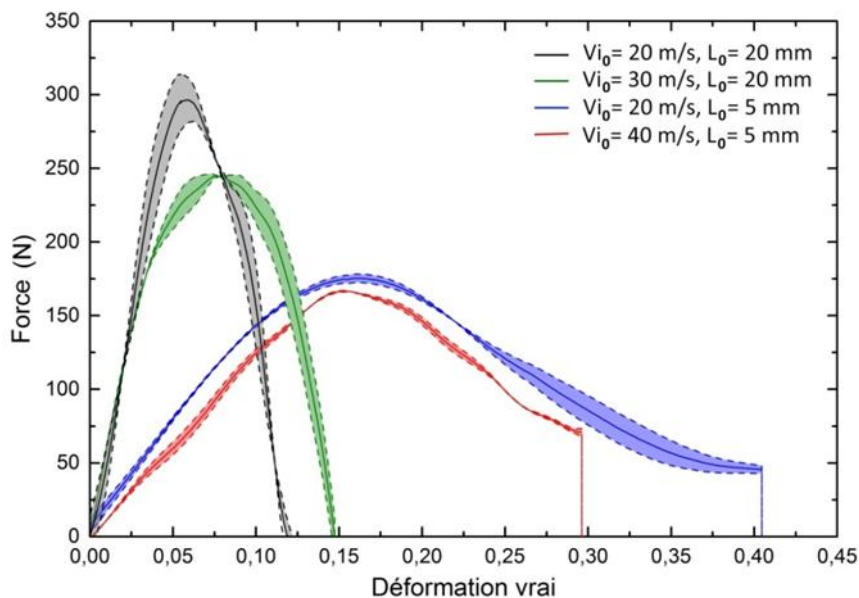


Figure 7: Courbes de force appliquée à l'extrémité du fil testé en fonction de la déformation vraie du fil pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s et de 5 mm testé à 20 et 40 m/s.

4 Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée

Dans une structure tissée, le comportement mécanique des fils dépend de leurs paramètres physiques, tels que le nombre de filament, la nature du filament, la densité linéique du filament ainsi que l'usure due au processus de tissage. Il dépend également de paramètre mécanique, tel que la vitesse de déformation. Cependant, dans une structure tissée, les fils ne sont pas isolés et interagissent entre eux. Ainsi, le comportement mécanique des fils présents dans le tissu dépend également d'autres paramètres internes à la structure.

La variation des densités chaîne et trame dans une structure tissée fait intervenir à la fois un changement du nombre de points de liage présents dans la structure tissée et une modification de la surface de contact entre le fil de chaîne testé et les fils de trame transverses.

Pour illustrer cette variation du nombre de points de liage, des structures tissées ont été réalisées en faisant varier l'architecture et la densité des fils trame. Les points de liages correspondent aux points de contact entre un fil de chaîne et tous les fils de trame qui se trouvent dans une direction perpendiculaire sur toute sa longueur (Figure 8).

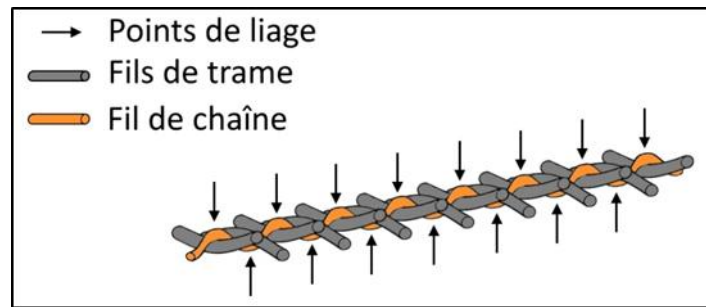


Figure 8: Représentation des points de liage entre un fil de chaîne et les différents fils de trame transverses.

Quatre architectures tissées différentes ont été étudiées. Elles ont été conçues de façon à ce que leur densité de fils de chaîne, et ainsi leur surface de contact inter-fil, soit identique (Figure 9). Une vérification des surfaces de contact a été réalisée à l'aide d'observations au microscope de coupes transverses des différentes structures tissées. Ainsi, seul le nombre de points de liage varie.

Les structures tissées sont les suivantes :

- Une structure toile avec 5 fils de trame (duites) au cm ; soit 10 points de liage sur un fil de chaîne de 2 cm.
- Une structure cannelé 2.1.1.1. avec 5 duites au cm ; soit 8 points de liage sur un fil de chaîne de 2 cm.
- Une structure cannelé 2.2. avec 5 duites au cm ; soit 5 points de liage sur un fil de chaîne de 2cm.
- Une structure cannelé 2.3 avec 5 duites au cm ; soit 4 points de liage sur un fil de chaîne de 2cm.

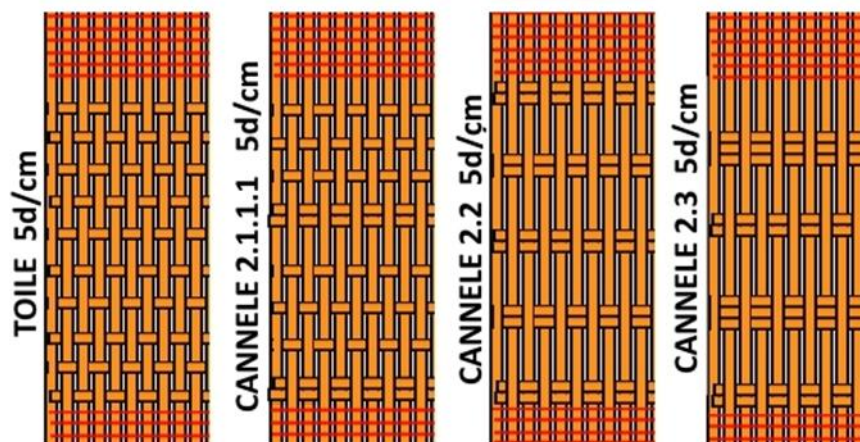


Figure 9: Représentation des structures tissées à surface de contact inter-fils équivalentes.

Chaque essai consiste à exercer une sollicitation en traction sur un des fils présents dans sa structure tissée en rattachant une de ses extrémités au projectile, l'autre étant fixée avec le reste de la structure dans le support. Des séries d'essais ont été réalisées sur chacune des quatre structures à une vitesse de 20 m/s et ce pour une longueur d'échantillon de 20mm.

D'après les courbes de vitesse illustrées dans la Figure 10, on remarque que les erreurs standards sur la moyenne sont deux fois plus importantes pour des essais de fils testés dans leur structure tissée que pour des essais de fils isolés. Ceci s'explique par la présence d'interactions entre le fil testé et ceux de la structure tissée ce qui ajoute une marge d'erreur supplémentaire sur la réaction du fil lors de sa sollicitation. Avec une erreur standard inférieure à 10%, les données restent néanmoins comparables entre elles. On note également une dispersion de 2 m/s entre les vitesses initiales de chaque courbe soit

10% de la vitesse initiale théorique ce qui reste acceptable pour pouvoir comparer les phénomènes observés.

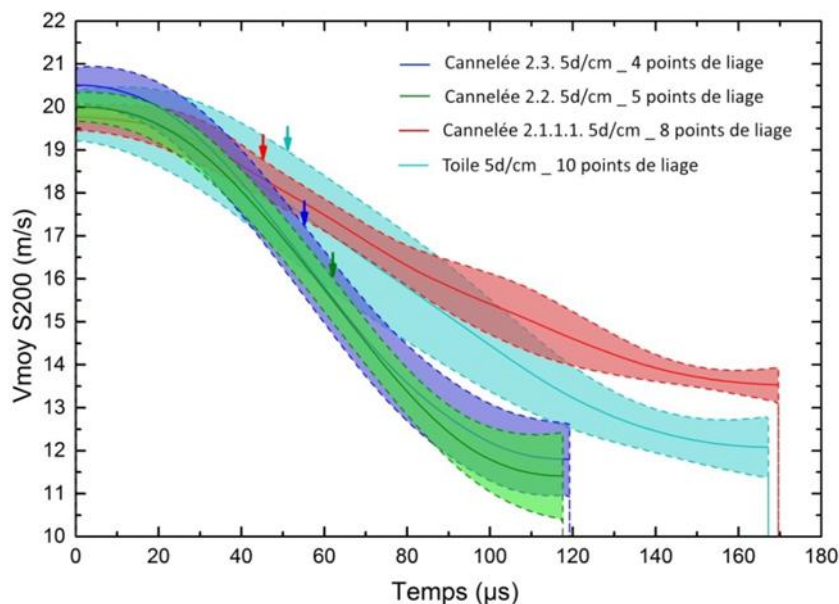


Figure 10: Courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour les essais sur fil de 20 mm testé à 20 m/s dans les structures tissées suivantes : Cannelé 2.3. 5d/cm, Cannelé 2.2. 5d/cm, Cannelé 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

On observe une décroissance linéaire de la force appliquée au fil pour ceux testés dans les structures à 4 et 5 points de liage et une décroissance par paliers dans le cas des fils testés dans les structures à 8 et 10 points de liage (Figure 11).

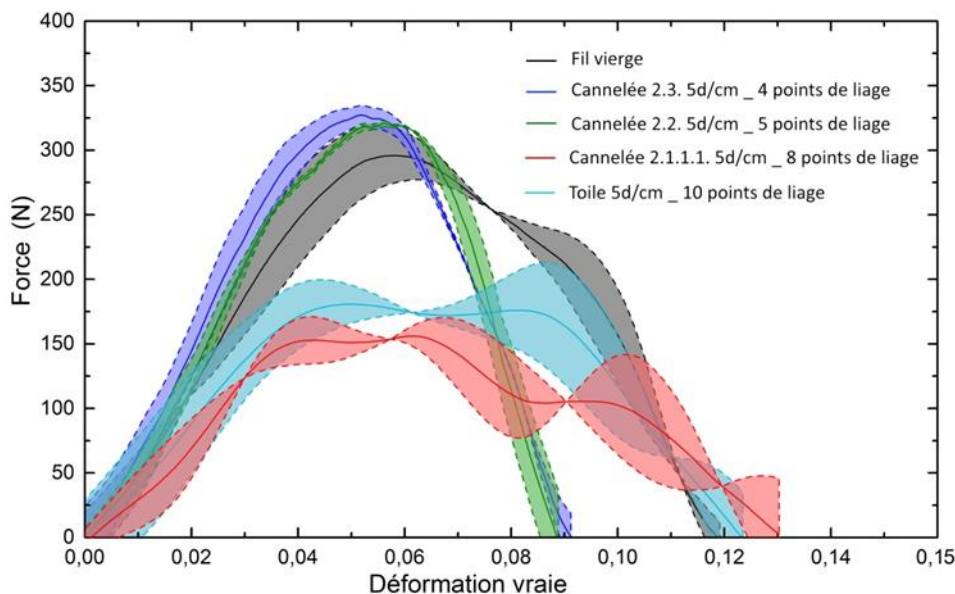


Figure 11 : Courbes de force exercée à l'extrémité du fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil testé dans les structures tissées suivantes : Cannelé 2.3. 5d/cm, Cannelé 2.3. 5d/cm, Cannelé 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm, et sur fil vierge de 20 mm.

Pour les fils présents dans les structures à 4 et 5 points de liage, après l'amorce de la rupture des filaments qu'ils contiennent, les déformations plastiques transverses engendrées dans les structures tissées jouent ici le rôle de concentrations de contraintes. De ce fait, leur rupture se déroule plus rapidement et leur déformation vraie, ainsi que leur énergie absorbée après rupture complète, sont plus faibles.

Dans les structures à 8 et 10 points de liage, ce phénomène est présent mais ces effets sont compensés par ceux d'un autre. Leur nombre de points de liage non négligeable confine les fils de chaîne dans ces structures. Les frottements engendrés entre le fil de chaîne testé et les autres de la structure viennent retarder la rupture progressive des filaments. Ce phénomène permet aux fils de chaîne testés dans ces structures d'atteindre un allongement après rupture similaire à celui d'un fil vierge. Cela indique une compensation totale des effets de la présence de concentrations de contraintes par ceux induits par les frottements inter-fils.

5 Conclusion

Nous avons développé un dispositif expérimental de caractérisation dynamique des fils appelé « Dispositif de Traction par Impact sur Fil » (DTIF). Composé de deux pièces emboîtées l'une dans l'autre, le support et le projectile, et auxquelles sont attachées les extrémités du fil à tester ; la propulsion de celui-ci au travers d'un canon à gaz permet d'appliquer une tension longitudinale sur le fil tout en atteignant des vitesses de déformation élevées comprises entre 1000 et 8000 s⁻¹.

La campagne d'essais réalisée sur fils vierges nous a permis de confirmer une dépendance du comportement mécanique du fil par rapport à la vitesse de déformation. L'augmentation de la vitesse de déformation implique en effet une augmentation de la densité d'énergie volumique fournie au fil mais également une augmentation de la densité d'énergie volumique nécessaire à la rupture du fil de par l'évolution des mécanismes de rupture agissant au sein de chaque filament.

Des essais ont été réalisés sur des fils au sein même de leur structure tissée en faisant varier le nombre de points de contact dans le sens chaîne tout en gardant une surface de contact inter-fils totale constante.

Une augmentation de la surface de contact totale inter-fils le long du fil sollicité ainsi que des pressions transverses appliquées sur celui-ci induisent une augmentation des forces de frottement inter-fils. Cela implique alors une absorption d'énergie supplémentaire et provoque une augmentation de la limite à rupture du fil.

Enfin, l'augmentation du nombre de points de liage ainsi que la présence de défauts de structure engendrent une augmentation des concentrations de contraintes au sein des filaments. Cela entraîne une plus grande probabilité d'amorce de rupture et a pour conséquence une baisse de la limite à rupture du fil et donc de l'énergie qu'il absorbe.

Références

- [1] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact," *Engineering Failure Analysis Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 2179 - 2187, December 2011, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.07.011>.
- [2] C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, and T. Kanit, "Experimental and numerical investigation of a 3D woven fabric subjected to a ballistic impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 88, pp. 91–101, February 2016, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2015.08.011.
- [3] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Villeneuve d'ascq,

- France, Thèse de doctorat <http://www.theses.fr/2011LIL10184>, soutenue le 17/11/2011.
- [4] C. Chevalier, "Détermination des caractéristiques dynamiques des structures fibreuses," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat Soutenue le 13/12/2016.
- [5] C. Chevalier, A. Klavzar, C. Kerisit, D. Coutellier, and F. Boussu, "Development of a new device for experimental study of the dynamic behaviour of ballistic yarns," in *TEXCOMP 11*, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [6] C. Chevalier et al., "A new experimental setup to characterize the dynamic mechanical behaviour of ballistic yarns," *Measurement Science and Technology*, no. 27, p. 11, September 2016, doi:10.1088/0957-0233/27/10/10590.
- [7] S. Lopatnikov, N. Schevchenko, and J.W. Gillepsie. (2012, January) Device and Method for Investigation of Mechanical Properties of Fibers under High-Strain Rate Tensile Load. [Online]. <http://arxiv.org/abs/1201.0916>
- [8] C. Chevalier, N. Faderl, C. Kerisit, F. Boussu, and D. Coutellier, "A new experimental setup to characterize the dynamic mechanical behaviour of ballistic yarns," in *DYNACOMP 2015, International Conference on Dynamics of Composite Structures*, Arles, France, June 2-4, 2015.
- [9] C. Chevalier, C. Kerisit, A. Klavzar, D. Coutellier, and F. Boussu, "Measurements of dynamic properties of ballistic yarns using innovative testing devices," in *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*, Xiaogang CHEN, Ed. Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing - Elsevier, 2016, ch. 7, p. 548, ISBN: 978 1 782 424611.
- [10] C. Chevalier et al., "Dynamic mechanical behaviour of yarn under high speed loading," in *14th AUTEX conference*, Bursa, Turkey, 26 to 28 May 2014.
- [11] C. Chevalier, C. Kerisit, A. Klavzar, D. Coutellier, and F. Boussu, "Characterization of the dynamic behavior of yarns for the modeling of ballistic fabrics," in *4th International conference on Impact Loading of Lightweight structures (ICILLS)*, Cape Town, South Africa, 12 - 16 January 2014.