

Simulation discrete et multi échelle du comportement sous impact de matériaux tissés

J. Girardot¹, P. Del Sorbo¹, F. Dau¹, I. Iordanoff¹

¹ *12M umr CNRS 5295, Ecole des Arts et Métiers ParisTech, {jeremie.girardot, pietro.del-sorbo, frederic.dau, ivan.iordanoff}@ensam.eu*

Résumé — La modélisation du comportement de matériaux tissés reste un enjeu fort pour les structures de protection balistiques. Jusqu'à présent, plusieurs approches de simulations ont été réalisées dans la littérature aux trois échelles (macro, meso et micro) représentatives de ce matériau. Les verrous actuels de la simulation d'un impact sur un matériau tissé sont à la fois la prise en compte des caractéristiques mécaniques de la fibre (ou du toron selon l'échelle de description) et les performances en temps de calculs (les algorithmes de contacts étant déterminants). Ce travail propose une approche multiéchelle du problème afin de répondre à ces verrous. Un premier modèle à l'échelle mesoscopique sera présenté, basé sur les algorithmes de détection de contact de la Méthode des Éléments Discrets (MED). Un deuxième modèle, cette fois à l'échelle microscopique (c'est à dire celle de la fibre) sera ensuite présenté. Les résultats de ces deux approches ont montré une capacité à prédire les mesures expérimentales de vitesse du projectile et à apporter plusieurs éléments de réponses quant aux hypothèses généralement prises dans les travaux de la littérature sur le sujet, notamment sur l'utilisation de fibres équivalentes.

Mots clés — Impact, Tissu, Méthode des Eléments Discrets, Kevlar.

1 Introduction

Le tissage de torons, ensemble de fibres au comportement mécanique dites "haute résistance (HR)", est utilisé pour réaliser des structures absorbantes de choc, et plus spécifiquement des impacts de projectile à des vitesses balistiques (supérieures à la centaine de mètres par seconde). Les gilets pare-balles, les systèmes d'absorption de débris dans les avions sont deux produits utilisant ces matériaux composés de plusieurs plis d'un tissage généralement en taffetas (tissage en deux dimensions). Le cas d'un impact sur ce type de tissage à des vitesses supérieures à 80 m s^{-1} sera considéré dans ce papier.

La simulation de l'impact d'un projectile sur une structure tissée en vue de prédire sa déformation et son endommagement jusqu'à la rupture peut être réalisée à deux échelles :

- l'échelle macroscopique consiste à représenter un milieu homogène qui prend en compte de manière continue les mécanismes de déformation du tissu et la rupture des fibres. La méthode des éléments finis a été utilisée dans ce sens entre autres dans [1, 2]. Deux modèles analytiques sont aussi proposés dans [3] et [4]. Enfin, une approche discrète basée sur un réseau masse-ressorts est aussi proposée dans [5], [6] et [7] ;
- l'échelle mesoscopique décrit chaque toron du tissage et prend en compte les contacts frottant entre eux, ainsi que leur rupture. Les travaux de [8, 9, 10, 11] discrétisent ainsi chaque toron avec un maillage éléments finis "coque" et dont la position initiale suit la trajectoire donnée par le tissage.

D'autres approches numériques sont aussi mises en place, notamment pour des applications non-dynamiques de mise en forme des textiles. Ces approches utilisent un couplage entre la représentation continue et discrète ([12, 13]) ou encore une description du toron par plusieurs fibres équivalentes ([14, 15]).

Une analyse des différences de résultats sur l'évolution de la vitesse du projectile entre les approches aux échelles macroscopiques et mesoscopiques peuvent être trouvées dans [16, 10]. Ces références montrent entre autre une limite à représenter le cas d'un impact sur un tissu encastré aux deux bords opposés.

Dans la suite de ce papier, un premier modèle à l'échelle mesoscopique est construit pour résoudre ce

cas d'impact. Afin de réduire le plus possible les temps de calcul, la représentation d'un réseau de masse ressort est utilisé mais cette fois à l'échelle du toron. L'implantation de ce réseau dans un code utilisant la méthode des éléments discrets ([17, 18, 19]) permet d'utiliser les algorithmes optimisés de détection de contact entre particule. En effet, la MED, initialement mise au point pour décrire des problèmes granulaires aux multiples contacts apparaît être une méthode adaptée au problème de gestion des contacts entre torons. Cependant, la représentation d'un toron par un système de masse-ressort impose plusieurs hypothèses sur son comportement mécanique.

Dans le but de comprendre les mécanismes de déformation dues à un impact à l'échelle de la fibre, la simulation d'un impact transversal sur un unique toron a été mise en place en suivant les approches déjà mise en oeuvre dans [20, 21, 22]. Cette fois, chaque fibre est représentée et le nombre d'hypothèses sur le problème est ainsi réduit.

2 Description des modèles et des implantations numériques

2.1 Modèle à l'échelle mésoscopique

La modélisation du comportement du toron dépend ici du choix de sa représentation géométrique, à savoir un réseau quadrillé de masse-ressorts (voir figure 1)

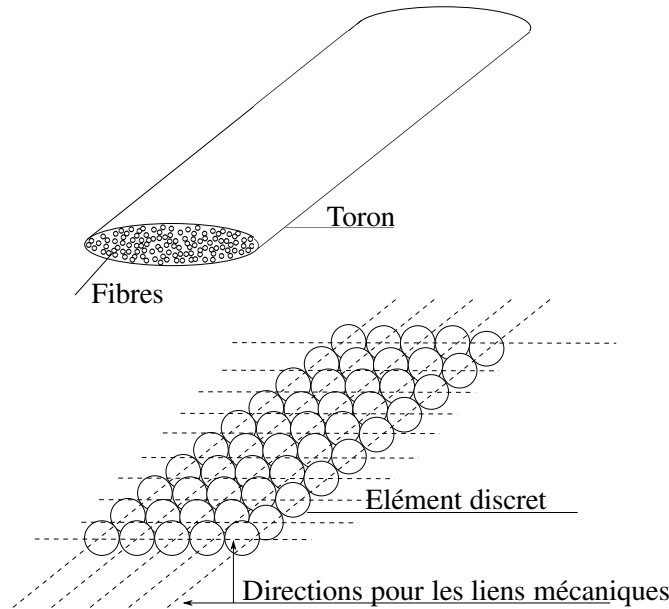


FIGURE 1 – Discretisation d'un toron.

Le comportement est supposé orthotrope, linéaire élastique et fragile. La rigidité en flexion, le cisaillement plan et les déformation hors du plan sont négligées. La relation contrainte/déformation est ainsi réduite dans le plan à :

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{E_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

avec E_1 et E_2 , respectivement les modules d'Young dans la direction longitudinale 1– et dans la direction transverse 2–. Le critère de rupture du toron est un critère en déformation maximale.

Du fait de la répartition ordonnée des liens mécaniques, aucun calibrage n'est nécessaire pour établir le lien entre le comportement macroscopique du toron et celui des rigidités des ressorts. Ainsi, les relations entre les modules du toron homogénéisé et les rigidités des ressorts sont obtenues analytiquement :

$$K_1 = \frac{E_1 S}{N_2 2R}, \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{K_1}{10}, \quad (3)$$

où R , S , et N_2 sont respectivement le rayon des particules (identique pour tout le domaine), l'aire de la section elliptique idéalisée du toron et le nombre de particules réparties dans la direction transverse. Pour la suite de ces travaux, cinq éléments seront choisis pour représenter la largeur d'un toron et la rigidité transverse K_2 sera choisi dix fois inférieure à celle dans la direction longitudinale.

Un schéma d'intégration temporel explicite basé sur celui de Verlet est utilisé pour résoudre les équations d'équilibre dynamique des éléments discrets. Les efforts de chaque particule sont issus des raideurs des ressorts et des contacts. Ces derniers prennent en compte la rigidité de contact par une méthode de pénalité et les frottements dynamiques via la loi de Coulomb régularisée. Les détails de l'implantation numérique du modèle peuvent être trouvés dans la référence [23].

2.2 Modèle à l'échelle microscopique

De la même manière que pour la représentation d'un toron, la fibre est elle aussi représentée par un réseau de masse-ressort. Ce réseau est cette fois unidirectionnel (voir figure 2).

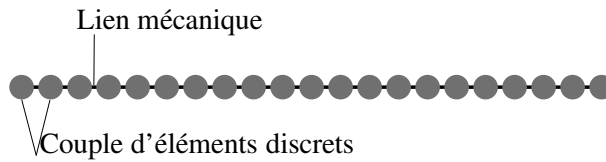


FIGURE 2 – Discrétisation de la fibre.

Le comportement de la fibre est supposé isotrope, linéaire élastique et fragile. Le critère de rupture est un critère en déformation maximale.

La masse de chaque particule m est donnée par la relation suivante :

$$m = \pi \frac{d_{fibre}^2}{4} \frac{l}{2} \frac{n_{fibre}}{n_{DES}} \rho, \quad (4)$$

avec le diamètre de la fibre d_{fibre} , le nombre de fibre considéré au sein du toron n_{fibre} , le nombre total de particule n_{DES} et la masse volumique du matériau constituant la fibre ρ .

La relation entre le module d'Young de la fibre E et la raideur des ressorts k est la suivante :

$$k = \frac{ES}{l_0}, \quad (5)$$

avec la section de la fibre S et la longueur initiale de chaque ressort l_0 . Les détails de l'implantation numérique du modèle peuvent être trouvés dans la référence [24].

3 Résultats et discussions

3.1 Impact balistique sur un taffetas de Kevlar

Le cas d'étude est identique à celui trouvé dans [10]. Il s'agit de l'impact à 245 m s^{-1} d'un projectile indéformable sur un seul pli de tissu taffetas. Les fibres composant les torons sont en Kevlar. Le carré de tissu de $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ n'est maintenu que sur deux côtés opposés. Une double symétrie est prise en compte dans le calcul. Le tableau 1 donne les paramètres matériaux et géométriques utilisés pour la simulation.

La figure 3 montre la progression de la déformation au cours de l'impact. La forme caractéristique pyramidale du tissu est retrouvée. Le dé-tissage est bien pris en compte au cours de l'impact, notamment au niveau des bords libres. La rupture du toron "primaire" est observée en premier avant d'atteindre la rupture des torons à proximité. Le temps de calcul de cette simulation est de l'ordre de 2h30 sur un processeur Intel Core i7-6700K.

Module d'Young du toron E_1	(GPa)	62
Largeur du toron	(mm)	0.59
Épaisseur du toron	(mm)	0.115
Densité	(kg/m ³)	1310
Déformation maximale	%	5.48
—		
Écartement entre torons	(mm)	0.746
Embuvage du tissu	(%)	4.12
Diamètre du projectile	(mm)	5.35
—		
Coefficient de frottement dynamique		0.19

TABLE 1 – Paramètres du tissu taffetas de Kevlar.

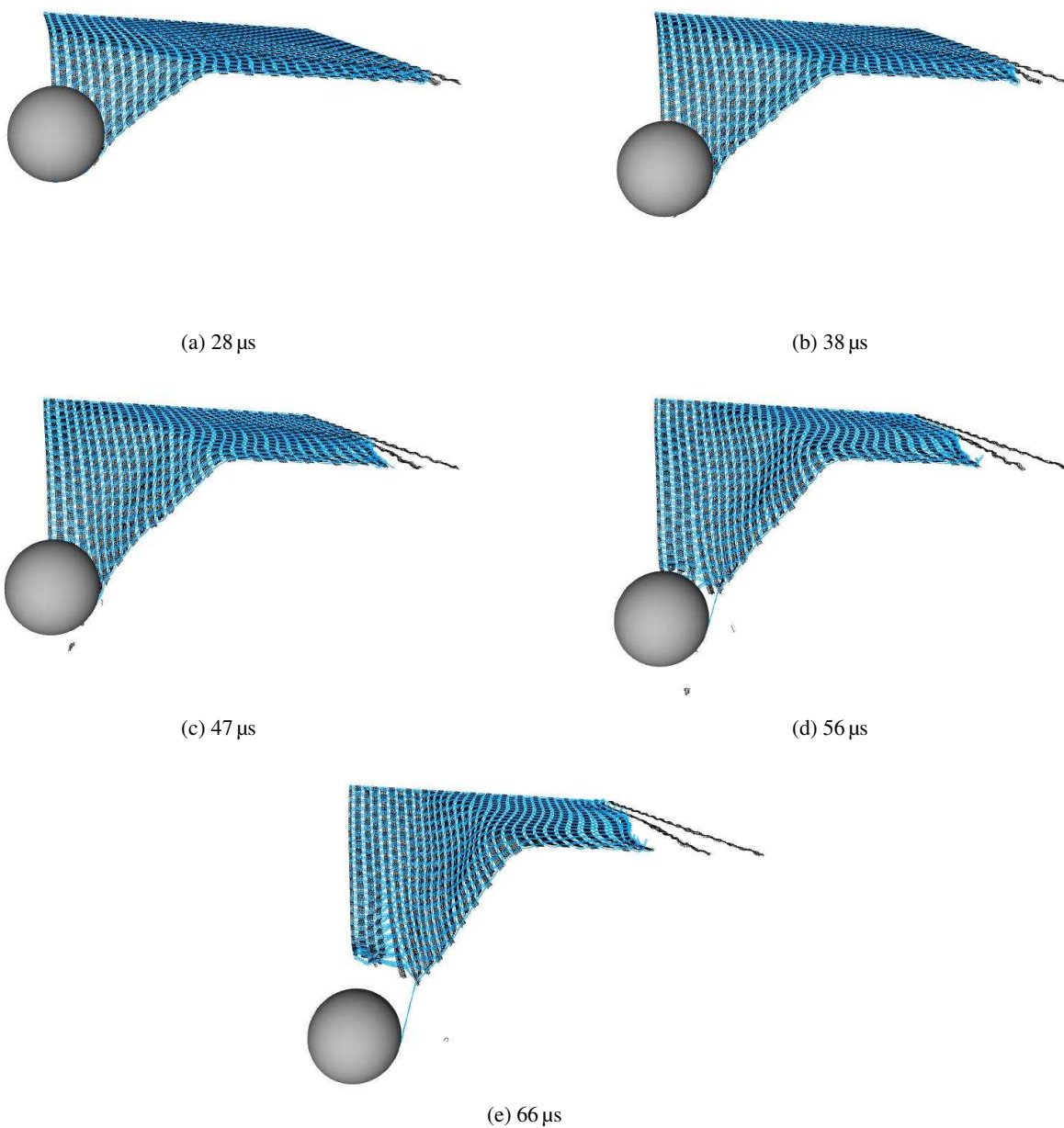


FIGURE 3 – États déformé du tissu à différents moments au cours d'un impact à 245 m s^{-1} .

La figure 4 compare les résultats de l'évolution de la vitesse du projectile au cours de trois impacts à 245, 90 et 60 m/s avec ceux obtenus dans [10]. La partie avant la rupture du premier toron est identique

avec les résultats obtenus par éléments finis. Une légère différence est ensuite observée après la première rupture qui peut être expliquée par l'absence de rigidité en flexion des torons dans les simulations proposées dans ce travail. Néanmoins, une mesure de la vitesse résiduelle du projectile issue de [25] pour un impact à 245 m/s montre une meilleure adéquation que les résultats de [10]. On voit ainsi l'importance de la prise en compte la plus fine possible des contacts entre torons pour des impacts à haute vitesse. La prise en compte de rigidité supplémentaire en flexion et en cisaillement dans la direction hors plan ne paraît pas nécessaire.

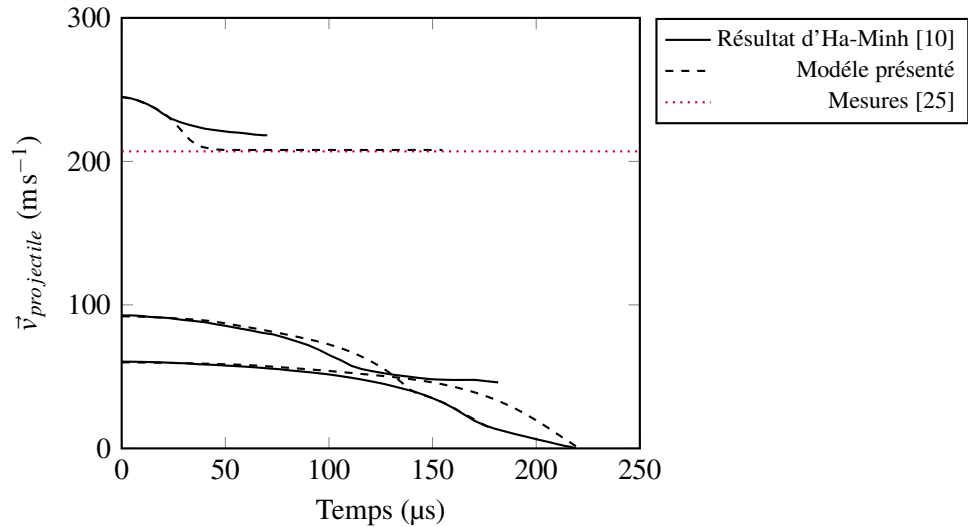


FIGURE 4 – Comparaison des résultats de simulation et des mesures de la vitesse du projectile pour différentes vitesses d'impact.

3.2 Impact transversal sur un toron

Il est proposé dans cette partie un autre cas de simulation afin de prendre en compte les mécanismes d'interaction entre fibres. La simulation proposée est un impact transversal sur un toron constitué de 400 fibres de Kevlar de diamètre égal à $12 \mu\text{m}$. Le projectile est supposé indéformable, cylindrique de diamètre 2.2 mm et d'une masse de 9.91 mg. Une symétrie est prise en compte dans la simulation. La vitesse d'impact est de 120 m/s (voir figure 5). La figure 6 représente la répartition circulaire initiale des fibres dans la section du toron.

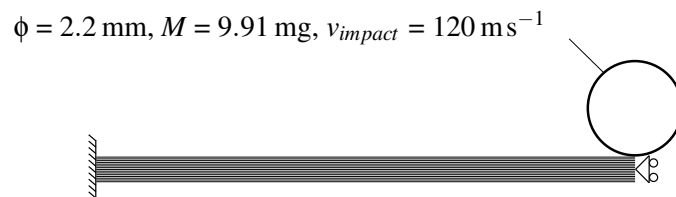


FIGURE 5 – Description de l'essai d'impact transversale sur un toron.

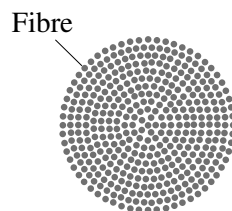


FIGURE 6 – Position initiale des fibres constitutives du toron (400 fibres).

Un bilan énergétique est d'abord analysé au cours de l'impact (figure 7). L'erreur sur la conservation de l'énergie au cours du calcul ne dépasse pas les 0.5%. L'évolution de l'énergie de déformation élastique

permet de retrouver l'instant de réflexion de l'onde transversale du toron. A partir de cette première réflexion, l'énergie de déformation augmente plus rapidement et atteint son maximum au moment de la rupture du toron. A ce moment là, l'énergie cinétique qui a diminuée tout au long de la mise en tension augmente brusquement par un relâchement élastique dû à la rupture. Il est à noter que l'énergie dissipée par frottement entre les fibres et le projectile est négligeable devant celle dissipée par frottement entre les fibres du toron. Cette dernière atteint près de 20% de l'énergie mise en jeu lors de l'impact.

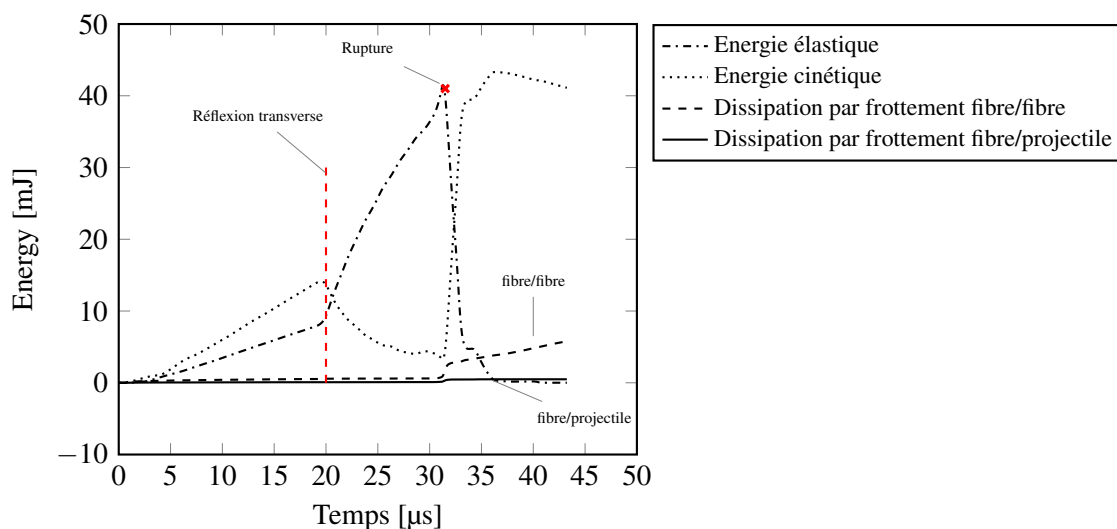


FIGURE 7 – Bilan d'énergie sur un toron impacté transversalement à 120 ms^{-1} .

Ce modèle nous permet également de discuter de la pertinence de l'utilisation de fibres équivalentes comme on le trouve dans les travaux de [26, 27]. La figure 8 présente les résultats de la même simulation mais cette fois en utilisant 100 et 25 fibres équivalentes. La comparaison sur la réponse à un impact transversal est réalisée sur la vitesse du projectile, l'énergie élastique, cinétique et celle dissipée par frottement entre les fibres. Avant la rupture, le comportement est identique. Les différences sont par contre non-négligeables après la rupture des premières fibres. Une équivalence uniquement géométrique ne permet donc pas de retrouver le comportement réel d'un toron lorsqu'il y a rupture.

4 Conclusions

A partir d'une méthode numérique discrète et de deux modèles à deux échelles de description, il a été montré à la fois la capacité de simuler un impact sur une structure tissée en un temps de calcul raisonnable et aussi de permettre une compréhension plus fine des mécanismes qui engendrent la déformation et la rupture d'un toron constitué de plusieurs centaines de fibres. Les perspectives de ce travail sont multiples, à la fois à l'échelle mesoscopique où les efforts sont poursuivis pour représenter des structures multi-plis et des tissages 3D, ainsi qu'à l'échelle microscopique où une étude paramétrique fine doit être réalisée pour isoler les hypothèses pertinentes à prendre en compte aux échelles supérieures afin de représenter le comportement d'un toron.

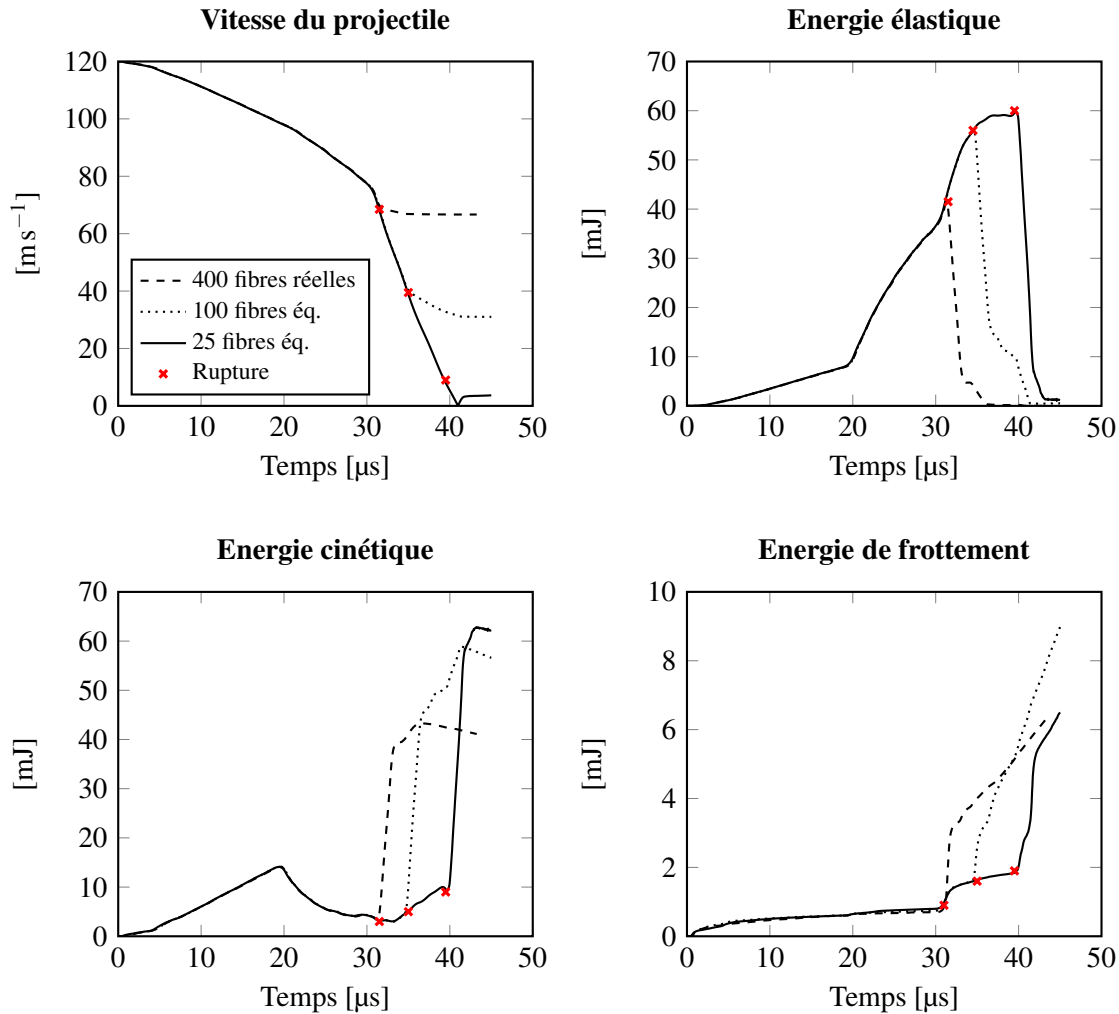


FIGURE 8 – Comparaison des résultats entre un calcul décrivant les 400 fibres du toron et des calculs utilisant des fibres équivalentes.

Références

- [1] Ali Shahkarami and Reza Vaziri. A continuum shell finite element model for impact simulation of woven fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 34(1) :104–119, January 2007.
- [2] C.T. Lim, V.P.W. Shim, and Y.H. Ng. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*, 28(1) :13–31, January 2003.
- [3] H.H. Billon and D.J. Robinson. Models for the ballistic impact of fabric armour. *International Journal of Impact Engineering*, 25(4) :411–422, April 2001.
- [4] Cuong Ha-Minh, Abdellatif Imad, François Boussu, and Toufik Kanit. On analytical modelling to predict of the ballistic impact behaviour of textile multi-layer woven fabric. *Composite Structures*, 99 :462–476, May 2013.
- [5] Bilel Ben Boubaker, Bernard Haussy, and Jean-François Ganghoffer. Discrete woven structure model : yarn-on-yarn friction. *Comptes Rendus Mécanique*, 335(3) :150–158, March 2007.
- [6] K. Joo and T. Jin Kang. Numerical Analysis of Multi-Ply Fabric Impacts. *Textile Research Journal*, 77(6) :359–368, June 2007.
- [7] David Jauffrès, James a. Sherwood, Corey D. Morris, and Julie Chen. Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming. *International Journal of Material Forming*, 3(S2) :1205–1216, November 2009.
- [8] Y. Duan, M. Keefe, T.a. Bogetti, and B.a. Cheeseman. Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric. *Composite Structures*, 68(3) :331–337, May 2005.
- [9] Y. Duan, M. Keefe, T.a. Bogetti, and B. Powers. Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(1) :33–43, January 2006.

- [10] Cuong Ha-Minh, Abdellatif Imad, Toufik Kanit, and François Boussu. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*, 69 :32–39, April 2013.
- [11] M.P. Rao, Y. Duan, M. Keefe, B.M. Powers, and T.a. Bogetti. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric. *Composite Structures*, 89(4) :556–566, August 2009.
- [12] P. Boisse, K Buet, A Gasser, and J Launay. Meso/macro-mechanical behaviour of textile reinforcements for thin composites. *Composites Science and Technology*, 61(3) :395–401, 2001.
- [13] P. Boisse, Alain Gasser, Benjamin Hagege, and Jean-Louis Billoet. Analysis of the mechanical behavior of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level. *Journal of Materials Science*, 40(22) :5955–5962, 2005.
- [14] Damien Durville. Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers. *International Journal of Material Forming*, 3(SUPPL. 2) :1241–1251, 2010.
- [15] T.D. Vu, Damien Durville, and P. Davies. Finite element simulation of the mechanical behavior of synthetic braided ropes and validation on a tensile test. *International Journal of Solids and Structures*, 58(April) :106–116, apr 2015.
- [16] M. Grujicic, W. C. Bell, G. Arakere, T. He, X. Xie, and B. a. Cheeseman. Development of a Meso-Scale Material Model for Ballistic Fabric and Its Use in Flexible-Armor Protection Systems. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(1) :22–39, April 2009.
- [17] Damien André, Ivan Iordanoff, Jean-luc Charles, and Jérôme Néauport. Discrete element method to simulate continuous material by using the cohesive beam model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 213-216 :113–125, March 2012.
- [18] Damien André, Mohamed Jebahi, Ivan Iordanoff, Jean-luc Charles, and Jérôme Néauport. Using the discrete element method to simulate brittle fracture in the indentation of a silica glass with a blunt indenter. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 265(8) :136–147, October 2013.
- [19] Damien André, Jean-luc Charles, Ivan Iordanoff, and Jérôme Néauport. The GranOO workbench, a new tool for developing discrete element simulations, and its application to tribological problems. *Advances in Engineering Software*, 74 :40–48, August 2014.
- [20] Gaurav Nilakantan. Filament-level modeling of Kevlar KM2 yarns for ballistic impact studies. *Composite Structures*, 104 :1–13, 2013.
- [21] Subramani Sockalingam, John W Gillespie, and Michael Keefe. Dynamic modeling of Kevlar KM2 single fiber subjected to transverse impact. *International Journal of Solids and Structures*, 67-68(May) :297–310, 2015.
- [22] S. Sockalingam, S. C. Chowdhury, J. W. Gillespie, and M. Keefe. Recent advances in modeling and experiments of Kevlar ballistic fibrils, fibers, yarns and flexible woven textile fabrics - a review. *Textile Research Journal*, (May), 2016.
- [23] Girardot, J. and Dau, F. A mesoscopic model using the discrete element method for impacts on dry fabrics. *Matériaux & Techniques*, 104(4) :408, 2016.
- [24] Del Sorbo, P., Girardot, J., Dau, F., and Iordanoff, I. Multi scale modelling of dry fabrics : application to impact. *Proc. 19th International Conference on Composite Structures (Porto, Portugal, September 2016)*, 2016.
- [25] M Alves and N. Jones. *Impact loading of lightweight structures*. Southampton ; Boston, Mass. : WIT Press, 2002.
- [26] Youqi Wang, Yuyang Miao, Daniel Swenson, Bryan A Cheeseman, Chian Feng Yen, and Bruce LaMattina. Digital element approach for simulating impact and penetration of textiles. *International Journal of Impact Engineering*, 37(5) :552–560, 2010.
- [27] Ying Wang, Xiaogang Chen, Robert Young, and Ian Kinloch. Finite element analysis of effect of inter-yarn friction on ballistic impact response of woven fabrics. *Composite Structures*, 135 :8–16, 2016.