



**HAL**  
open science

## Vers la géométrie réelle d'un tissu 3D interlock sur la précision de la simulation numérique à l'impact

Cuong Ha-Minh, Benjamin Provost, François Boussu, Daniel Coutellier,  
Abdellatif Imad

### ► To cite this version:

Cuong Ha-Minh, Benjamin Provost, François Boussu, Daniel Coutellier, Abdellatif Imad. Vers la géométrie réelle d'un tissu 3D interlock sur la précision de la simulation numérique à l'impact. 11e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01717090

**HAL Id: hal-01717090**

**<https://hal.science/hal-01717090>**

Submitted on 25 Feb 2018

**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.

Public Domain

# Vers la géométrie réelle d'un tissu 3D interlock sur la précision de la simulation numérique à l'impact

Cuong HA-MINH<sup>3\*</sup>, Benjamin PROVOST<sup>1,2</sup>, François BOUSSU<sup>1,2</sup>, Daniel COUTELLIER<sup>4</sup>,  
Abdellatif IMAD<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Lille 1, LML UMR CNRS 8107, F-59000 Lille, France; benjamin.provost@ensait.fr

<sup>2</sup> ENSAIT, GEMTEX, F-59100 Roubaix, France; francois.boussu@ensait.fr

<sup>3</sup> ENS Cachan DGM - LMT Cachan 61, F-94235 Cachan Cedex, France; haminh@lmt.ens-cachan.fr

<sup>4</sup> UVHC, LAMIH UMR CNRS 8201, F-59313 Valenciennes, France; daniel.coutellier@univ-valenciennes.fr

\* Auteur correspondant

**Résumé** — L'utilisation de renforts fibreux, de type tissu 3D interlock [1], dans les composites utilisés pour renforcer le blindage des structures métalliques soumises aux impacts du type fragment issu d'IED [2] (Improvised Explosive Device), semble être une alternative intéressante en terme d'efficacité/masse surfacique [3][4][5]. Un précédent modèle numérique du renfort fibreux [6], réalisé à partir d'une représentation géométrique idéale avec plusieurs hypothèses de simplifications à l'échelle mésoscopique, permet de simuler le mode de déformation globale de la structure sèche des renforts fibreux ainsi que les interactions entre les fils lors d'un impact. Afin d'améliorer la précision de la simulation du comportement à l'impact du renfort fibreux, la géométrie réelle de la structure a été analysée par le biais d'une analyse tomographique. Les observations par la tomographie ont indiqué que la section transversale des fils est forcément variable le long de leur trajet avec des formes différentes (elliptique, rectangulaire, trapézoïdale ou encore d'autres plus complexes). Ces résultats montrent que les hypothèses du modèle géométrique dans les travaux précédents sont assez fortes. Un cas-test numérique d'une traction sur une cellule de base du tissu 3D a indiqué que la position des fils dans la structure tissée n'est pas bien modélisée. Les contacts entre les fils ne sont pas proches de la réalité et les contraintes résiduelles dans les fils après le tissage n'ont pas été prises en compte. Ces arguments sont des possibilités pour expliquer une sous-estimation de la simulation numérique d'un impact balistique à partir de ce modèle géométrique sur la performance d'un tissu 3D interlock en comparaison avec des résultats expérimentaux.

**Mots clés** — Textile composite, modélisation, tissu 3D interlock chaîne, analyse tomographique

## 1. Introduction

Le blindage des véhicules terrestres doit faire face aux nouvelles menaces de type fragment à haute vitesse issus d'IED (engins explosifs improvisés) [2]. Les solutions de blindage existantes sont principalement fondées sur un couplage structure du véhicule en acier ou en aluminium avec des parties amovibles pour le sur-blindage en face avant tels que des carreaux de céramique, d'acier ou de plaques d'aluminium et des solutions de protection en face arrière comme des matériaux composites. Cependant, les performances des matériaux composites actuellement utilisés en tant que solution de protection semblent ne pas répondre aux nouvelles menaces et doivent être améliorées [7-9].

Pour améliorer le niveau de protection contre les fragments à haute vitesse, de nouvelles solutions composites à base de renfort fibreux de type tissu 3D interlock ont été proposées [10-11] et étudiées pour différentes vitesses d'impact. Ces solutions ont été fondées sur le modèle d'absorption de l'énergie cinétique du projectile par la structure, développé par Naik et al. [12-13], et reposant sur les hypothèses de la théorie de la propagation des ondes [14-15] au sein d'un matériau fibreux. Le comportement à l'impact observé sur les échantillons réels de tissus 3D et le mode de déformation

associé nous ont permis d'enrichir le modèle numérique du renfort fibreux utilisé pour des simulations à l'impact. Ce premier modèle se fonde sur l'utilisation d'une représentation géométrique idéale du renfort fibreux et d'un couplage judicieux de deux échelles de représentation de la structure (mésoscopique et macroscopique) [16]. Cependant, l'analyse tomographique des renforts fibreux testés à l'impact révèle des différences importantes en termes de positionnement des fils dans le tissu 3D et surtout de géométrie réelle des sections de fils. Les résultats de simulation numérique à l'impact peuvent donc s'avérer différent du comportement réel des structures testées. Ainsi, afin d'améliorer la précision de la simulation numérique à l'impact du renfort fibreux, il est proposé ici d'introduire une géométrie réelle au sein du modèle numérique, reconstituée à partir d'images obtenues par analyse tomographique.

## 2. Modélisations géométrique et numérique

### 2.1 Comparaison entre la modélisation idéale et l'analyse tomographique

Il est noté que les tissus 3D interlock sont les structures périodiques. En effet, un tissu est une répétition des cellules de base différentes. Le tissu interlock étudié dans ce papier porte une armure d'angle-couche par couche [16]. La figure 1c représente en 3D, l'enchevêtrement des fils de chaîne et trame entre eux, en utilisant un modèle de placement des fils standards, les fils ayant ici tous la même géométrie :

- Les sections transversales sont des cercles de même diamètre.
- La section transversale n'est pas variable le long du trajet des fils.

Si l'on résume l'ensemble des évolutions de ces fils sur un plan (Fig. 1b), les fils de trame (en coupe) sont en rouge, les fils de chaîne sont représentés selon leurs évolutions en vert, jaune ou bleu. Dans ce cas idéal, les fils de chaîne de même couleur se situent en même plan.

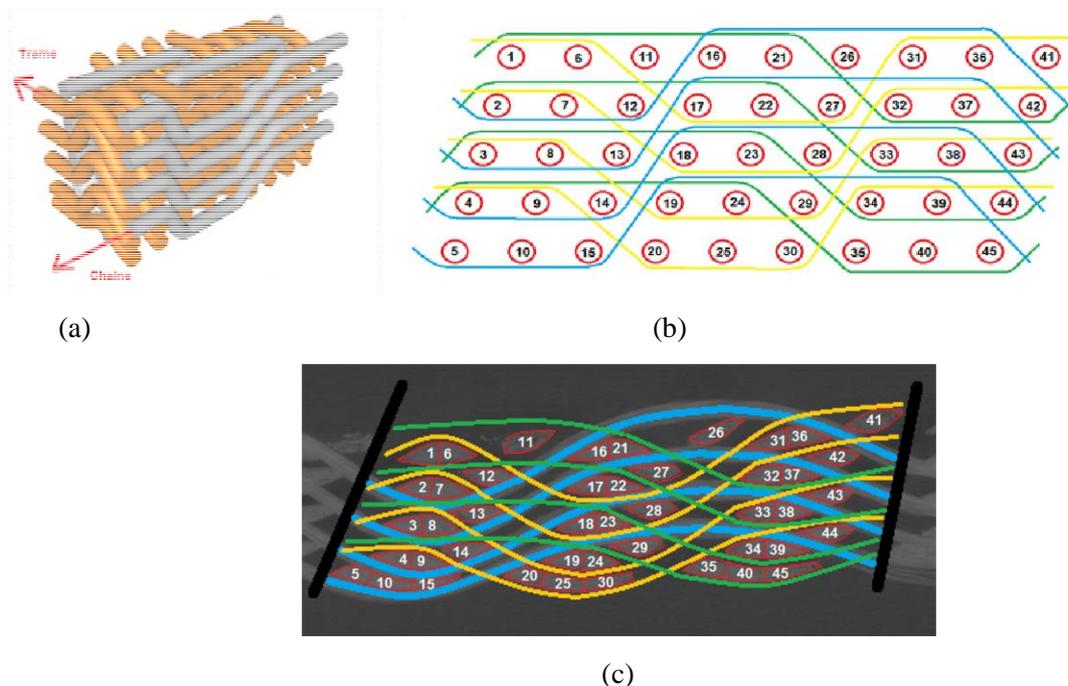


Fig 1. (a) Vue 3D de l'armure d'une cellule de base du tissu d'interlock 3D avec les fils de standard ; (b) Vue schématique en coupe des évolutions de fils de chaîne ; (c) Vue en coupe des évolutions de fils de chaîne à l'aide d'une image tomographique

Cette représentation ne permet que de montrer la forme et le trajet de standard des fils trame et chaîne dans une cellule de base, mais pas la variation de ces caractères géométriques comme dans la

réalité. En fait, les fils sont composés de milles fibres individuelles sèches. Elles sont donc fortement sensibles pendant le tissage aux sollicitations mécaniques différentes subies et durant l'ensemble du procédé. La figure 1c montre une image tomographique de la coupe des évolutions de fils de chaîne d'une cellule de base avec la même numérotation des fils de trame et une colorisation identique pour les fils de chaîne que celles dans la figure 1b. Les sections transversales des fils de trame ont fortement variées sur la forme (elliptique, triangle, rectangulaire, trapézoïdale ou encore d'autres plus complexes) ainsi que sur les dimensions. La figure 2 détaille les dimensions de ces sections et le tableau 1 fait un bilan de ces valeurs pour tous les fils de trame dans une cellule de base. En effet, on peut diviser en trois groupes : elliptique (fils 11-14, 26-29, 41-44) ; triangle (fils 1, 6, 2, 7, etc.) ; rectangulaire (fils 5, 10, 15, etc.)

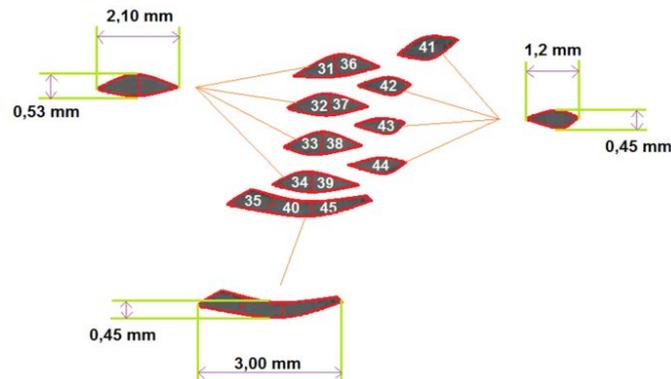


Fig 2. Dimensions des sections transversales des fils de trame dans une cellule de base

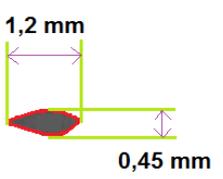
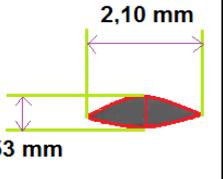
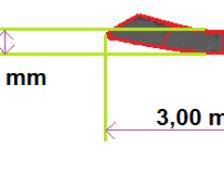
Type de section:			
Fils concernés:	11 - 12 - 13 - 14 - 26 - 27 - 28 - 29 - 41 - 42 - 43 - 44	[1-6] - [2-7] - [3-8] - [4-9] - - [16-21] - [17-22] - [18-23] - [19-24] - [31-36] - [32-37] - [33-38] - [34-39]	[5-10-15] - [20-25-30] - [35-40-45]

Tableau 1. Bilan des dimensions des sections transversales des fils de trame dans une cellule de base

La figure 3 représente l'image tomographique de la coupe dans la direction perpendiculaire aux fils de chaîne qui nous permet d'observer la forme des sections transversales de ces fils. Il est remarqué que la plupart de ces fils portent plus ou moins des sections transversales d'une forme rectangulaire. La figure 4 détaille les dimensions de ces sections et le tableau 2 fait un bilan de ces valeurs pour tous les fils de chaîne dans une cellule de base. On peut donc supposer que toutes les sections transversales des fils de chaîne sont rectangulaires avec une taille de 1×0,45 mm.

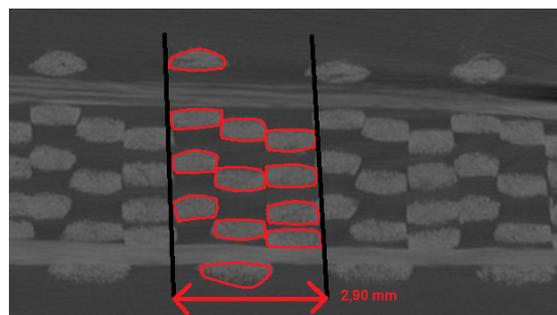


Fig 3. Vue de la coupe dans la direction perpendiculaire aux fils de chaîne

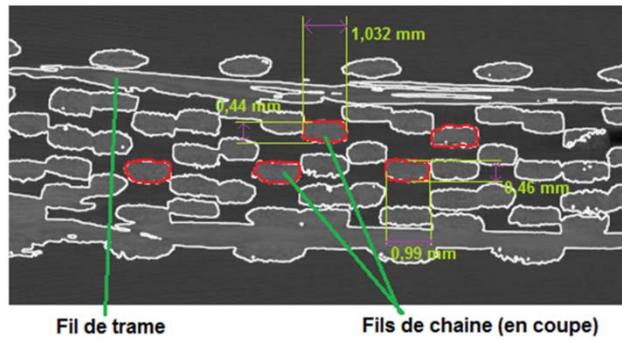


Fig 4. Dimensions des sections transversales des fils de chaîne dans une cellule de base

Type de section:	
Fils concernés:	Tout les fils de chaîne

Tableau 2. Bilan des dimensions des sections transversales des fils de trame dans une cellule de base

## 2.2 Modélisation numérique d'une traction simple

La figure 5 montre une simulation numérique du comportement de traction simple d'une cellule de base avec les fils Twaron 3360 dTex en utilisant les éléments coques épaisses [1, 6, 16]. Avec les hypothèses que les fils de chaîne portent une section transversale rectangulaire constante le long du trajet de ces fils et une forme elliptique pour les fils de trame. Les sections transversales des fils sont modélisées par un changement des épaisseurs des éléments utilisés pour chaque section. Autrement-dit, ce modèle a pris en compte des formes réelles des sections transversales des fils. Cependant, la variation de ces sections le long des fils ou entre les fils est toujours négligée. La traction dans ce cas-test est quasi-statique avec un taux de  $0,03 \text{ s}^{-1}$ . La figure 5 a indiqué que les contraintes de Von-Mises des fils de trame sont presque nulles partout. Cela signifie que ces fils ne sont pas encore compressés par les fils de chaîne qui ont été déplacés. Les résultats montrent bien que les contacts entre les fils de trame et chaîne n'ont pas été bien modélisés dans ce cas. D'autre part, il est noté que la stabilité de la structure d'un tissu interlock est assurée à l'aide des contraintes résiduelles entre les fils après le tissage. Dans ce cas, ces contraintes ont totalement été négligées.

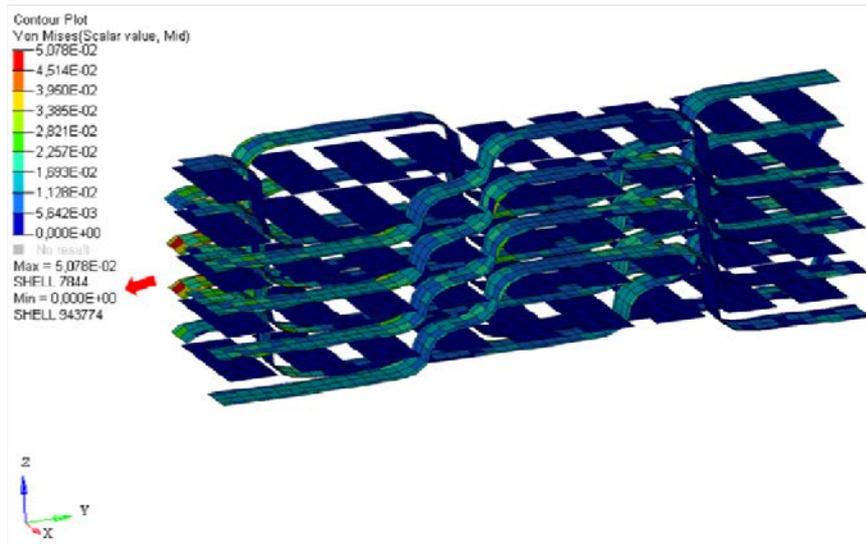


Fig 5. Contour Von-Mises de la traction quasi-statique d'une cellule de base à une déformation 1%

### 2.3 Modélisation numérique d'une traction simple

Une simulation numérique du comportement d'un tissu 3D d'interlock dans l'épaisseur de 4 couches avec le même matériau de Twaron 3360 ont été effectuée en utilisant les éléments coques épaisses comme montré dans la section précédente [1, 6, 16]. La figure montre une comparaison de l'évolution de la vitesse du projectile entre : l'expérience, le résultat numérique avec les propriétés du fil dynamique et résultat numérique avec ces propriétés en statiques. La vitesse d'impact dans ce cas est de 400 m/s et le tissu est perforé. Une fois que le projectile touche le tissu (à 0  $\mu$ s), la vitesse commence à diminuer jusqu'à une valeur constante (la vitesse résiduelle) après perforation du tissu. La vitesse résiduelle expérimentale est de 303 m/s, 305 m/s pour le modèle numérique utilisant les propriétés mécaniques du fil en dynamique et 232 m/s pour le modèle numérique utilisant les propriétés mécaniques en statique. Les résultats montrent que le modèle numérique utilisant les paramètres dynamiques est plus proche de la réalité. Toutefois, il reste encore toujours une sous-estimation du modèle la performance du tissu d'interlock. La raison peut venir de la partie géométrique qui n'est pas encore réelle. Un modèle géométrique plus réelle est donc indispensable.

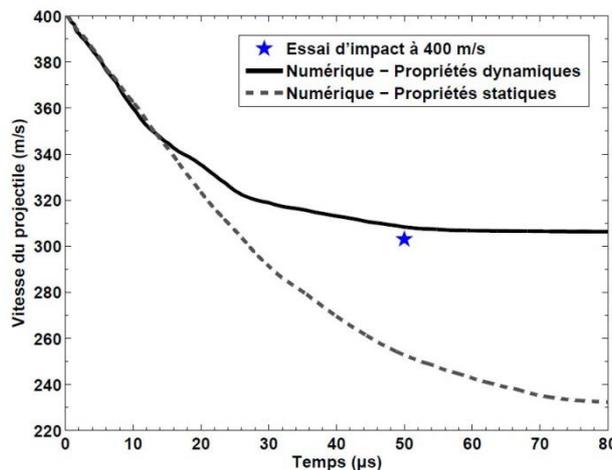


Fig 6. Comparaison de l'évolution de la vitesse du projectile entre : l'expérience, le résultat numérique avec les propriétés dynamiques et résultat numérique avec les propriétés statiques [16]

## 2.4 Vers la géométrie réelle avec la tomographie

La figure 7 montre une reconstruction de la géométrie d'un motif élémentaire d'un tissu interlock 3D. Avec ce modèle, toute la complexité géométrique de ce type de tissus est prise en compte. La variation des sections transversales et des trajets des fils est bien modélisée.

La reconstruction de la géométrie du motif élémentaire d'un tissu interlock 3D a nécessité plusieurs étapes, depuis l'image obtenue par tomographie du tissu jusqu'au maillage final utilisé pour la simulation numérique à l'impact, telle que représentée sur la figure 8.

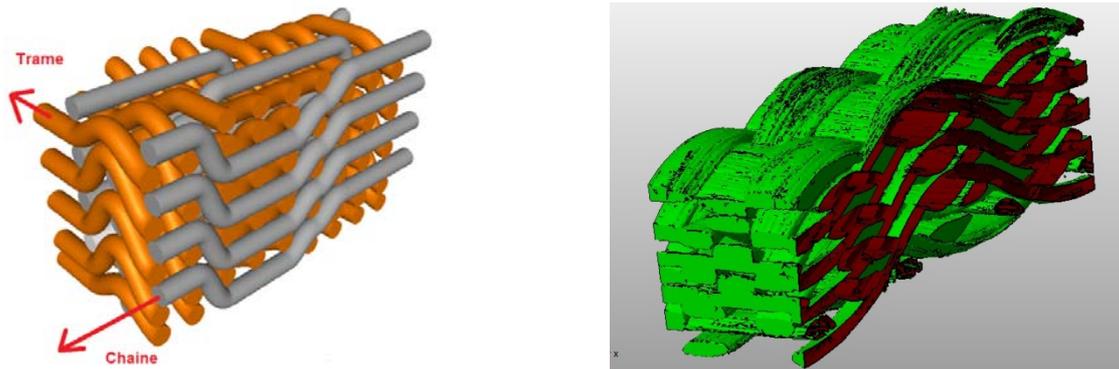


Fig.7: Reconstruction d'un motif élémentaire d'un tissu interlock 3D par la tomographie : (a) Vue 3D du motif élémentaire idéal du tissu interlock, (b) Géométrie reconstruite d'un motif élémentaire d'un tissu interlock 3D.

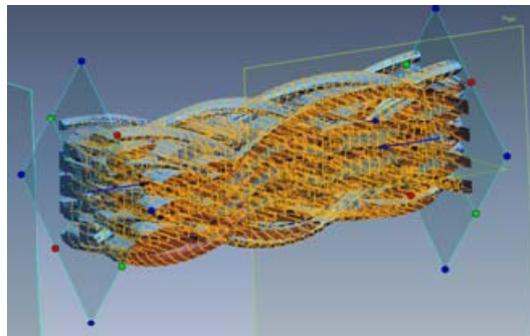


Fig 8. Maillage final du motif élémentaire du tissu 3D interlock

Par le biais de ce maillage plus précis que celui issu de la géométrie idéale initiale, la section des fils est reproduite de façon indépendante pour chaque fil de chaîne, telle que représentée en Figure 9.

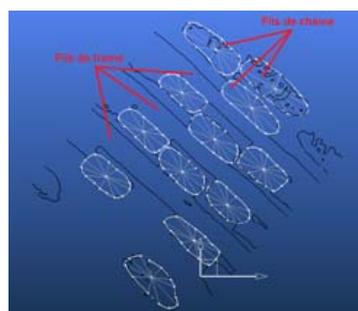


Fig 9. Représentation des différentes sections des fils de chaîne issues de la reconstruction géométrique du tissu interlock 3D

La non homogénéité de la géométrie réelle permet ainsi de créer un comportement à l'impact simulé numériquement plus proche de la réalité et met en évidence l'intérêt du modèle utilisé sur la précision obtenue. Cette première approche de simulation numérique pour des composites 3D soumis à l'impact balistique doit permettre de mieux concevoir la structure de tissage optimale pour des applications de sur-blindage.

### 3. Conclusion

Nous avons montré ici la grande différence entre la modélisation géométrique idéale et la réalité d'une structure interlock 3D. Même si la forme et les dimensions des sections transversales réelles ont été prises en compte à l'aide de la tomographie, l'hypothèse d'une section transversale constante le long des fils est encore forte. En plus, les contraintes résiduelles entre les fils qui jouent un rôle important dans la stabilité de la structure des tissus 3D ne sont jamais prises en compte. Ces raisons conduisent un résultat encore éloigné de la réalité du comportement de la cellule de base en traction statique, ainsi qu'une sous-estimation du modèle numérique sur la résistance des tissus interlocks 3D. La solution d'utiliser un modèle numérique à l'aide d'une reconstruction de la géométrie réelle de ces tissus via la tomographie est alors une première approche, même si l'approche numérique doit encore être améliorée.

### 4. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Institut Franco-Allemand Saint-Louis pour la réalisation de tous les essais à l'impact et la société Nexter Systems ainsi que la DGA pour leurs conseils et financement pour mener à bien ces recherches.

### Références

- [1] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crépin, A. Imad, Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact, *Engineering Failure Analyse* 18 (8), pp 2179-2187, 2011.
- [2] A. Bhatnagar, *Lightweight Ballistic Composites Military and Law Enforcement Applications*, Edition WP, ISBN 13:978-1-85573-941-3, 2006.
- [3] A. Miravete, *3-D textile reinforcements in composite materials*, WP, ISBN-13: 978-1-85573-376-3, 1999.
- [4] B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, D. Vallee, F. Rondot, J. Nussbaum, Comparison of damages on 2D and 3D warp interlock fabric due to high velocity impact, number 69, *Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures*, Politecnico di Torino, 18-20 June 2012.
- [5] B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, D. Vallee, F. Rondot, New 3D warp interlock composite for armouring of vehicles, 4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion, Thailand, 3-4 July 2012.
- [6] C. Ha-Minh, T. Kanit, F. Boussu, A. Imad, Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact, *Computational Materials Science* 50, (7), pp 2172-2184, 2011.
- [7] B. Dodd, F. Coghe, Damage caused to metals by kinetic and chemical energy projectiles [ed.] F. Teixeira-Dias, et al. 2010. *Security and Use of Innovative against terrorism - LWAG*. ISBN 978-972-789-289-1.
- [8] W.A. Gooch, M.S Burkins, Army research laboratory, analysis of threats projectiles for protection of light tactical vehicles. Army research laboratory. 2004. RP 89.
- [9] R. Vaziri et al. Materials response to ballistic impact in Lightweight ballistic composites, *Military and law enforcement applications*, Woodhead Publishing, 2006, 3, pp. 72-100.
- [10] M. Lefebvre, Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés Application au blindage de véhicules, thèse de doctorat soutenue le 07/12/2011 Université de Valenciennes.

- [11] B. Provost, Etude et réalisation d'une solution composite à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule, thèse de doctorat soutenue le 14/01/2013 Université de Valenciennes.
- [12] Naik, N.K. and Doshi, A.V., Ballistic impact behavior of thick composites: analytical formulation, 2005, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 43, pp. 1525-1536.
- [13] Naik, NK, Shrirao, P and Reddy, BCK. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Parametric studies, Material Science and Engineering : A. 12 05, 2005, Vol. 412, 1 - 2, pp. 104 - 116.
- [14] Naik, N.K, Shrirao, P. and Reddy, Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. B.C.K. 2006, International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, pp. 1521-1552. doi:10.1016/j.ijimpeng.2005.01.004.
- [15] Naik, N.K. and Doshi, Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies. A.V. 2008, Composite structures, Vol. 82, pp. 447-464. doi:10.1016/j.compstruct.2007.01.025.
- [16] C. Ha-Minh, Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique, thèse de doctorat soutenue le 17/11/2011.