

Vers une modélisation numérique multi-échelle robuste du comportement d'impact des matériaux tissés en utilisant les fibres équivalentes microscopiques

T. L. Chu¹, C. Ha-Minh², A. Imad³, T. Kanit³

¹Thuyloi University, Hanoi, Vietnam, longct@tlu.edu.vn

²Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France, cuong.ha-minh@ens-paris-saclay.fr

³ Université de Lille, ULR 7512-Unité de Mécanique de Lille-Joseph Boussinesq (UML), F-59000 Lille, France

Résumé — Une modélisation multi-échelle du comportement mécanique d'un tissu sec 2D soumis à un impact balistique est développée en combinaison entre une description mésoscopique pour les fils secondaires (non contact direct avec le projectile) et une microscopique pour les fils primaires (en contact direct avec le projectile) afin de prendre en compte les interactions importantes fibres/fibres et fibres/projectile dans la zone d'impact. Cependant, il faut noter qu'à l'échelle microscopique, un fil est composé de 400 fibres environ dont la prise en compte peut alourdir notablement les calculs. Pour cela, nous avons opté pour introduire la notion d'une "fibre équivalente" correspondant à 10 fibres. Ce qui donne au total 42 fibres équivalentes pour modéliser un fil. L'efficacité de cette stratégie multi-échelle a été démontrée par une comparaison en termes de vitesse du projectile et de réactions du projectile de ce modèle multi-échelle avec ceux obtenus dans le cas d'une modélisation mésoscopique complète bien validée avec l'expérience.

Mots clefs — Eléments finis, Tissus secs, Impact balistique, Multi-échelle, Fibre équivalente.

1. Instructions générales

Dans les études précédentes [2-6], nous avons réalisé des calculs numériques en vue d'une prédiction de la tenue à l'impact balistique des tissus en utilisant une modélisation mésoscopique. Le modèle mésoscopique utilise des éléments coques en considérant une section elliptique des fils. Ce type de modélisation peut décrire correctement les phénomènes d'impact : la formation d'une pyramide, la rupture des fils, la déformation et le glissement des fils, etc. Toutefois, il faut noter que cette modélisation ne prend pas en compte les mouvements des fibres constituant chaque fil du tissu. Il est nécessaire donc prendre en compte les mécanismes qui se produisent à l'échelle des fibres pour compléter nos connaissances concernant la réponse d'un tissu soumis à une charge balistique. En effet chaque fil comprend des centaines de fibres (Fig. 1) qui contribuent aux mécanismes de déformation et de rupture des fils et des tissus. La figure 1 montre le glissement, la compression et la traction des fibres situées sous le projectile lors de la phase de pénétration. On note un niveau important d'écrasement de quelques fils de chaîne et de trame avec une redistribution évidente des fibres dans la zone de l'impact du tissu tandis que d'autres fils voisins ont été poussés latéralement par le projectile [7].



Figure 1 – Détails de la zone d’impact d’un tissu Kevlar KM2 (vue face arrière du tissu) [7].

Cependant, un modèle entier du tissu à l’échelle microscopique peut avoir des millions d’éléments. C’est pour cette raison que la modélisation numérique à cette échelle demeure complexe et lourd au niveau du temps de calcul. Une combinaison des deux modèles (mésoscopique pour les fils secondaires qui n’ont pas de contact direct et microscopique pour les fils primaires qui contactent directement avec le projectile pendant un événement d’impact) est raisonnable pour développer un modèle multi-échelle afin de prendre en compte l’interaction entre les fibres mais aussi minimiser le temps de calcul. D’autre part, comme chaque fil comprend des centaines de fibres, une modélisation des fibres utilisant des éléments solides conduit à un nombre important d’éléments [7]. C’est pour cette raison qu’une telle modélisation reste limitée au niveau de son utilisation.

Dans cette étude, nous développons la stratégie de modélisation multi-échelle méso/microscopique ci-dessus pour le comportement d’impact d’un tissu 2D où les fils primaires sont décrits par une modélisation microscopique en utilisant les éléments coques qui ont été prouvés efficaces pour le comportement longitudinal dominant des fibres aramides [10]. Dans un souci d’alléger le temps des calculs, nous optons pour introduire la notion de "fibre équivalente", ceci permet de diminuer le nombre de fibres dans un fil. Autrement dit, au lieu de prendre en compte 400 fibres de chaque fil, nous considérons 42 fibres équivalentes au total pour décrire un fil à l’échelle microscopique. En fait, cette situation suppose que chaque "fibre équivalente" représente 10 fibres environ. Dans notre cas, en considérant que chaque groupe de dix fibres de diamètre de 12 μm est équivalent à une fibre de diamètre 36 μm (Fig. 2). De ce fait, le fil, constitué de 400 fibres, est représenté par seulement 42 fibres équivalentes (Fig. 3b) avec la même densité et les propriétés mécaniques. C’est la première fois cette approche est appliquée pour la prédiction du comportement d’impact des matériaux textiles secs, donc, dans le cadre de ce papier, nous travaillons sur une telle équivalence simple. Cette hypothèse est toutefois raisonnable, car le diamètre de la fibre équivalent est encore très petit devant les dimensions de la section droite d’un fil (de l’ordre dixième).

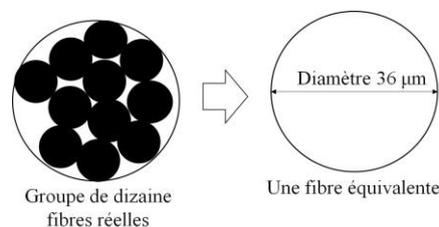


Figure 2 – Bases de la modélisation microscopique : Notion de la fibre équivalente.

Il est donc important de noter qu'il y a une différenciation entre le choix d'une modélisation mésoscopique où le fil est représenté par une section elliptique continue (Fig. 3a) et une modélisation microscopique où les fibres équivalentes constituent l'assemblage d'un fil (Fig. 3b).

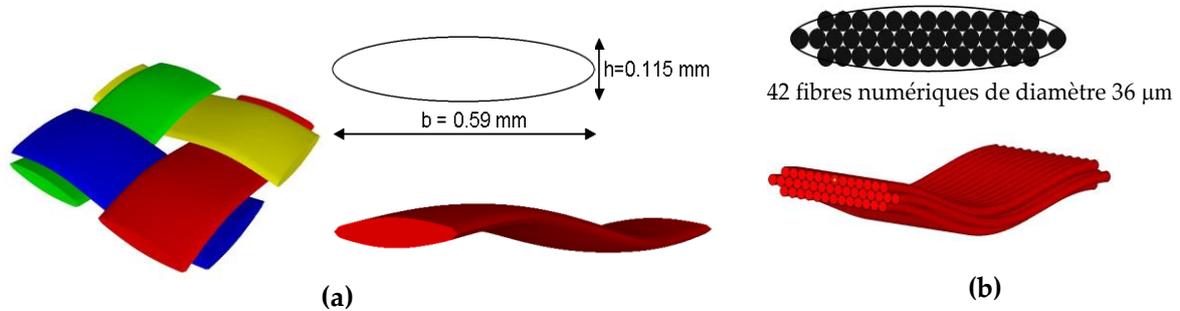


Figure 3 – Modélisation d'un fil : (a) Mésoscopique ; (b) Microscopique.

2. Modélisation

2.1. Composantes du système d'impact et modèle mésoscopique

Le matériau utilisé est un tissu 2D Kevlar KM2 de 50.6x50.6 mm avec les densités de trame et chaîne de 13.4 fils/cm, ce qui équivaut à une distance de 1.49 mm entre les fils. Le projectile est une sphère en acier avec un diamètre de 5.35 mm et une masse de 6.25×10^{-4} kg. Les tests d'impact balistique entre ce tissu et ce projectile pour les deux cas typiques : non perforation (60 m/s) et perforation (245 m/s) ont été utilisés pour valider notre modèle mésoscopique avec les éléments coques 3D dans les études précédentes. C'est la raison pour laquelle nous choisissons ce système d'impact, ainsi que le mésoscopique pour démontrer la performance du modèle multi-échelle méso/micro dans cette étude actuelle.

2.2. Modèle microscopique du comportement d'impact d'un fil avec les fibres équivalentes

En considérant une fibre équivalente de diamètre $36 \mu\text{m}$, cette section peut être modélisée géométriquement par une forme circulaire (Fig. 4a). Cette section peut être décrite par des éléments coques 3D avec des épaisseurs différentes choisies de telle sorte à décrire au mieux la surface de base de la "fibre équivalente" (Fig. 4b). Le nombre d'éléments nécessaires est choisi égal à 8 pour assurer la forme circulaire de la section transversale de la fibre (Fig. 4). Le maillage d'un fil, utilisant des éléments coques par les 42 fibres équivalentes, est illustré dans la figure 5.

Comme présenté dans Introduction générale, les fibres équivalentes sont supposées homogènes et orthotropes. Plusieurs travaux dans la littérature [1-7, 9-11], relatifs à la modélisation par éléments finis des tissus soumis à un impact balistique, supposent que les fibres ont un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture. Dans notre cas, la valeur expérimentale de la déformation à la rupture d'une fibre est égale à $\epsilon_R = 4,58\%$ qui est équivalente à une contrainte maximale à la rupture $\sigma_R = 3.88$ GPa. Les cinq constants élastiques pour une fibre Kevlar KM2 sont mesurées : E_{11} de 84.62 GPa, $E_{11} = E_{33}$ 1.34 GPa, G_{12} de 24.40 GPa, ν_{13} de 0.60, ν_{23} de 0.24 [8] où 1 est la direction longitudinale des fibres et 2,3 sont les directions transversales.

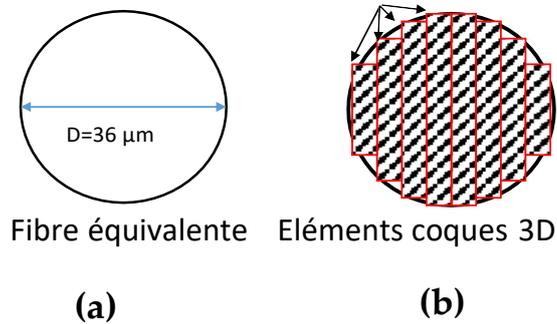


Figure 4 – Modélisation de la section transversale d'une fibre numérique par 8 éléments coques.

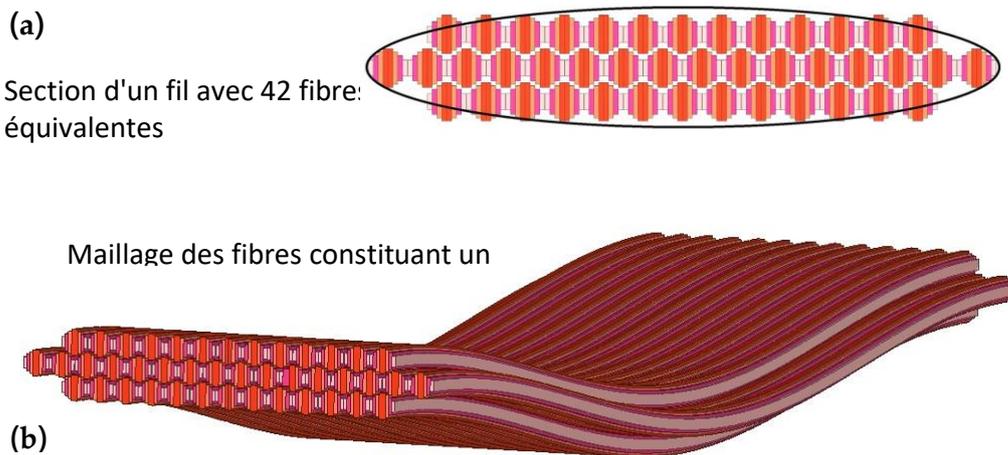


Figure 5 – Modélisation microscopique d'un fil par des éléments coques : (a) Section transversale ; (b) Vue globale.

2.3. Modélisation multi-échelle du comportement d'impact du tissu complet

Lors de l'impact d'un tissu, généralement, seulement les fils primaires qui sont en contact avec le projectile sont affectés. C'est pour cette raison que nous étudions le comportement balistique d'un tissu en modélisant uniquement les deux fils, centraux et croisés, à l'échelle microscopique en utilisant les fibres équivalente, dans un souci d'alléger le temps de calcul. Ainsi, les autres fils (les fils secondaires) sont modélisé à l'échelle mésoscopique. Cette modélisation hybride micro-méso est illustrée par la figure 6a. La figure 6b présente un modèle du quart d'un tissu pour minimiser le temps de calcul grâce à la symétrie de la configuration d'impact. Cette figure montre aussi les conditions aux limites utilisées, avec un tissu fixé aux 4 bords. La figure 7 montre le maillage des fils mésoscopiques ainsi que les deux fils microscopiques centraux du tissu.

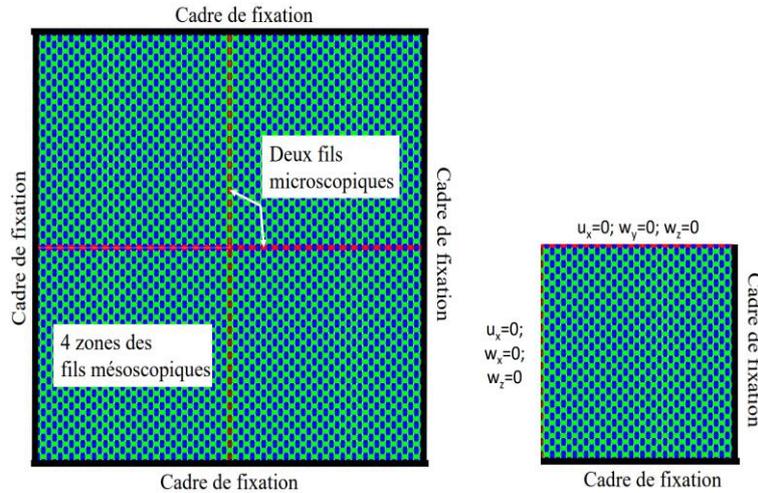


Figure 6 – Conditions aux limites de la modélisation microscopique : (a) Modèle complet ; (b) Quart du modèle.

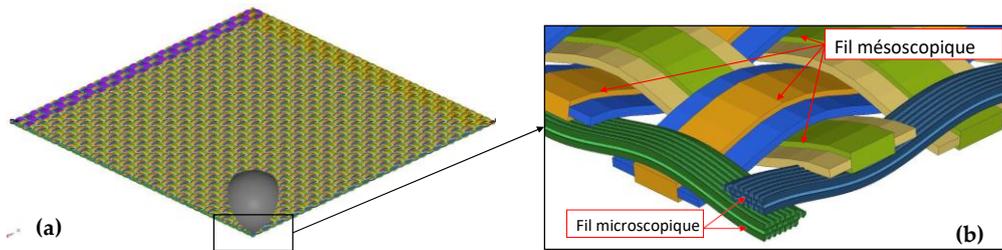


Figure 7 – Modèle multi-échelle méso-micro d'un tissu 2D avec des éléments coques.

2. Discussions

La figure 8 présente une comparaison du comportement d'un fil soumis à un impact $V_i = 245\text{m/s}$ utilisant une modélisation mésoscopique et microscopique en termes de la vitesse du projectile et de la force d'impact. On peut observer que tous les courbes de deux types de modélisation sont similaires. Toutefois, on note que le fil dans le modèle mésoscopique est plus rigide que celui microscopique. Ceci peut être expliqué par le fait que la prise en compte des fibres dans le modèle micro donne une certaine souplesse au tissu simulé.

Figure 9 illustre les évolutions d'endommagement à la zone d'impact du tissu des deux modèles utilisés : mésoscopique (Fig. 9a) et microscopique (Fig. 9b) entre 17 et 24 μs correspondant aux phases avant et après l'initiation de la rupture du premier fil. Globalement, les deux modèles décrivent correctement la phase d'initiation de la rupture des fils au voisinage de l'impact du projectile. Selon le modèle mésoscopique, la rupture du fil est guidée par la rupture de chaque élément, ce qui n'est pas vraiment conforme à la réalité. On note que la modélisation microscopique permet de mettre en évidence les ruptures à l'échelle des fibres, donnant lieu à une bonne description du phénomène de fibrillation. Ce phénomène constitue le mode essentiel de rupture des fils.

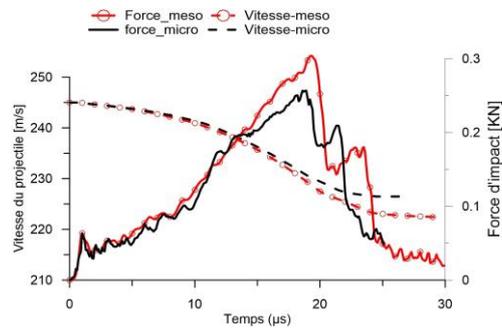


Figure 8 – Évolutions des vitesses du projectile et des forces d'impact : comparaison des modélisations méso et micro (multi-échelle).

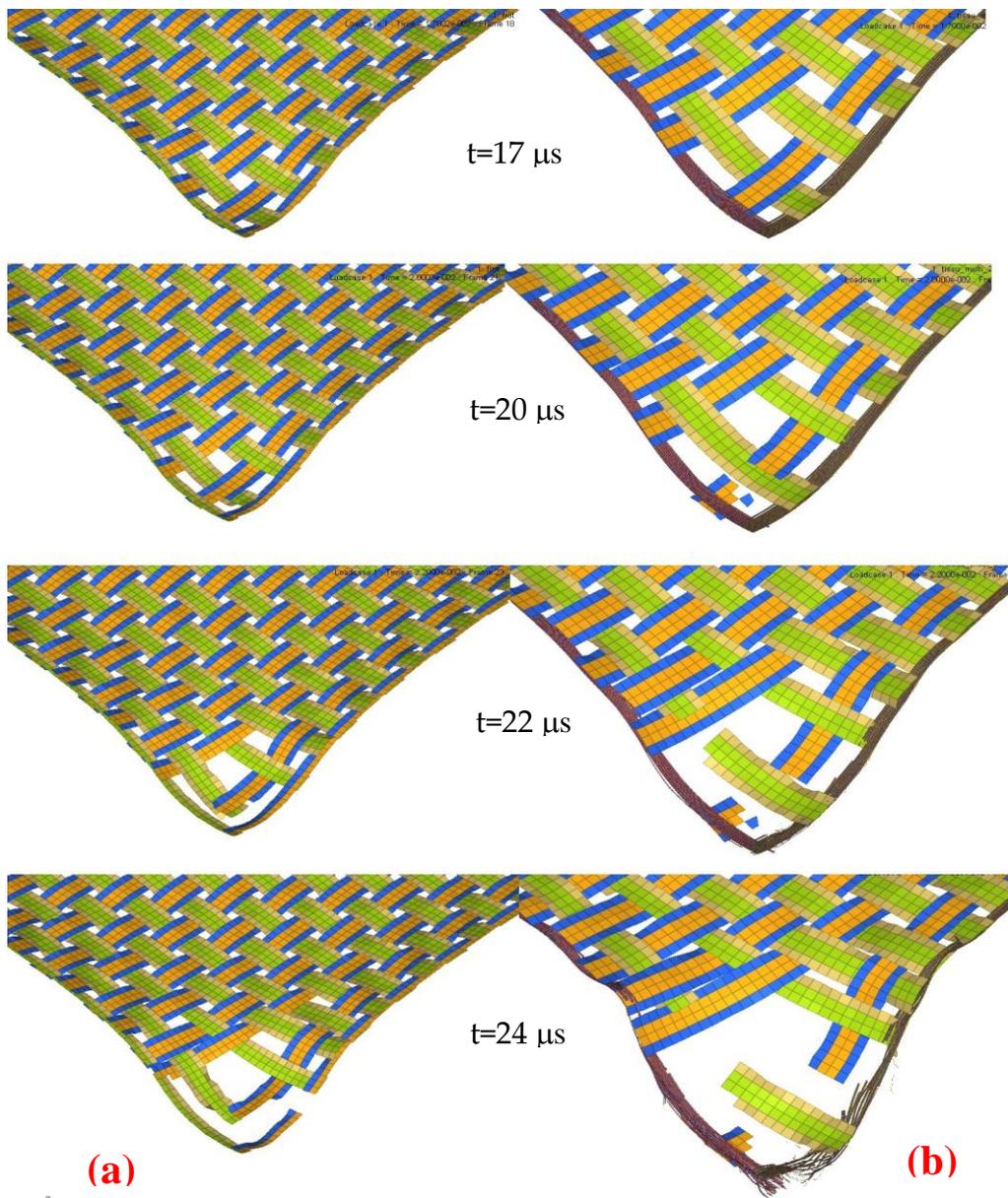


Figure 9 – Comparaison l'état d'endommagement du tissu à la zone d'impact à différents instants : (a) Modèle mésoscopique ; (b) Modèle microscopique.

3. Conclusions

Cette étude propose un modèle microscopique en utilisant la notion des fibres équivalentes qui permet de combiner avec le modèle mésoscopique dans une modélisation multi-échelle afin de prédire efficacement le comportement d'impact d'un tissu 2D sec avec les mécanismes de rupture essentiels. En plus, dans cette étude, les éléments coques 3D ont également été démontrés efficaces pour la modélisation microscopique du comportement des fils en comparaison avec les éléments solides souvent utilisés dans la littérature.

Références

- [1] B. Gu. Ballistic Penetration of Conically Cylindrical Steel Projectile into Plain-woven Fabric Target - A Finite Element Simulation. *Journal of Composite Materials*, 38(22) :2049–2074, 2004.
- [2] C. Ha-Minh. Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique. PhD thesis, Université Lille 1, 2011.
- [3] C. Ha-Minh, Boussu, F., Kanit, T., Crépin, D., and Imad, A. Effect of Frictions on the Ballistic Performance of a 3d Warp Interlock Fabric : Numerical Analysis. *Applied Composite Materials*, 19(3-4) :333–347, 2011.
- [4] C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, T. Kanit. Experimental and numerical investigation of a 3d woven fabric subjected to a ballistic impact. *International Journal of Impact Engineering*, 88 :91–101, 2016.
- [5] 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) :2172–2184, 2011.
- [6] C. Ha-Minh, B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, A. 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, Giens, France, 2013.
- [7] G. Nilakantan. Filament-level modeling of kevlar km2 yarns for ballistic impact studies. *Composite Structures*, 104 :1–13, 2013.
- [8] M. Cheng, W. Chen, T. Weerasooriya. Mechanical Properties of Kevlar KM2 Single Fiber. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 127(2) :197, 2005.
- [9] M. Rao, Y. Duan, M. Keefe, B. Powers, T. 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, 2009.
- [10] R. Barauskas, and A. Abraitiene. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA. *International Journal of Impact Engineering*, 34(7) :1286–1305, 2007.
- [11] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti, B. Cheeseman. Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric. *Composite Structures*, 68(3) :331–337, 2005.