
Prise en compte du contact-frottement au sein d'une assemblée à grand nombre de fibres pour l'identification des propriétés mécaniques de structures textiles

Damien Durville

LMSSMat - Ecole Centrale Paris - CNRS UMR 8579
Grande Voie des Vignes
F-92295 Châtenay-Malabry Cedex
damien.durville@ecp.fr

RÉSUMÉ. Une approche globale de la simulation du comportement de petits échantillons de structures textiles ou composites textiles, allant de l'élaboration du tissage à l'application de différents types de chargement est présentée dans cet article. S'appuyant sur une méthode adaptée de prise en compte des contacts-frottements au sein d'une assemblée de fibres, cette approche permet de traiter des structures composées de plusieurs centaines de fibres.

ABSTRACT. A comprehensive approach of the simulation of the mechanical behaviour of small samples of textile or textile composite structures, from the weaving process to the application of various loadings, is presented in this paper. Based on an appropriate method for the taking into account of contact-friction interactions within large assemblies of fibers, this approach allows to consider structures made of several hundreds of fibers.

MOTS-CLÉS : textile, fibres, contact-frottement, simulation, identification de comportement

KEYWORDS: textile, fibers, contact-friction, simulation, identification of mechanical behaviour

1. Introduction

Les besoins en modélisation se rapportant aux matériaux textiles mis en œuvre dans diverses applications industrielles se font sentir tant au niveau macroscopique, afin d'identifier le comportement non linéaire complexe de ce type de structures, qu'au niveau mésoscopique –qu'on rapportera ici à l'échelle des fibres– en vue de prévoir les éventuelles dégradations de ces constituants élémentaires. À côté d'autres approches à des échelles supérieures (voir par exemple (Hivet *et al.*, 2005), (Lomov *et al.*, 2007)), la démarche que nous présentons ici vise à simuler le comportement de petits échantillons de ces matériaux, depuis leur élaboration jusqu'à l'application de différents cas de chargement, en prenant en compte l'ensemble des fibres qui les constituent.

Au cœur de notre approche, c'est bien sûr la prise en compte des interactions de contact-frottement entre les fibres qui constitue la problématique essentielle. D'autres difficultés, se rattachant notamment aux questions de pilotage des conditions aux limites, de calcul de la configuration initiale a priori inconnue, et de prise en compte de liaisons entre les fibres et la matrice dans le cas de composites textiles, doivent par ailleurs être abordées pour aboutir à la modélisation visée.

Le nombre de fibres considérées et la taille du problème qui en découle constitue bien évidemment la limitation essentielle de notre approche. La possibilité de prendre en compte des structures composées de plusieurs centaines de fibres avec des temps de calcul raisonnables, comme le montrent les résultats présentés ici, permet cependant d'accéder à une description détaillée de ces structures, aussi bien d'un point de vue géométrique que mécanique.

2. Présentation générale de l'approche

Le logiciel de simulation par éléments finis développé suivant à l'approche présentée ici utilise une méthode de résolution implicite. Il s'applique à une structure représentant un petit échantillon de composite textile, composé de fibres et de matrice.

Les fibres de l'échantillon sont prises en compte à l'aide d'un modèle de poutre à cinématique enrichie, à neuf degrés de liberté par nœud, permettant de représenter des modes de déformations planes des sections des fibres en plus des déformations prises en compte par les modèles classiques de poutres. La matrice, quant à elle, est représentée par des éléments finis volumiques standards en grandes déformations. Les maillages générés pour la matrice et les fibres sont non compatibles, celui de la matrice étant réalisé plus grossièrement que celui des fibres, en recouvrant en partie les fibres extérieures du tissage. Des éléments de liaisons particuliers, associant des couples de particules matérielles, sont introduits pour assurer la liaison mécanique entre les fibres et la matrice.

3. Problématique de la détermination du contact

3.1. Position du problème

Nous utilisons dans le cas des structures textiles les méthodes de gestion du contact déjà mises en œuvre pour d'autres milieux enchevêtrés ((Durville, 2005),(Durville, 2007)). Le grand nombre de contacts apparaissant dans ce type de structures, dans des configurations géométriques variées, et avec d'importants déplacements relatifs, requiert la mise en œuvre de méthodes optimisées, tant du point de vue de la précision géométrique que de celui de l'efficacité en termes de coût de calcul.

3.2. Détermination géométrique des contacts

Notre approche repose sur la détermination d'éléments de contact ponctuels, constitués de paires de particules matérielles susceptibles d'entrer en contact, au niveau des zones où le contact peut se produire entre les fibres. Le processus de détermination du contact consiste en un premier temps à repérer ces zones de contact possible, puis à déterminer en ces zones, avec le maximum de précision géométrique possible, des paires de particules candidates au contact. L'ensemble de ce processus, sur lequel on doit itérer régulièrement au cours du calcul, doit répondre simultanément au souci de précision géométrique et à la recherche d'efficacité en termes de coût de calcul.

La discrétisation du contact, qui se traduit par la construction des éléments de contact discrets, est réalisée au niveau de chaque zone de proximité. Ces éléments sont construits à partir d'une géométrie intermédiaire, définie comme moyenne des portions de lignes constituant les zones de proximité, et dont le rôle essentiel est de fournir des directions de recherche du contact adaptées à la géométrie locale de l'enchevêtrement. Ce sont en effet les plans orthogonaux à cette géométrie intermédiaire qui sont utilisés pour déterminer les positions des particules candidates au contact sur la surface des fibres localement proches. Ces directions orthogonales à la géométrie intermédiaire s'avèrent bien mieux adaptées à la géométrie de la zone réelle de contact que des directions normales qui seraient déterminées à partir de chacune des surfaces des fibres prise isolément.

La méthode mise au point pour la création des éléments de contact s'adapte aux différentes configurations angulaires entre les fibres. La détermination des particules constituant les éléments de contact, et de la direction normale du contact, dépend de la configuration géométrique, et de ce fait doit donc être réactualisée à mesure que la solution évolue. Des itérations sur ce processus de détermination du contact (particules candidates et directions normales) sont prévues au niveau de chaque incrément de chargement.

3.3. *Modèles mécaniques pour le contact et le frottement*

La recherche de modèles offrant une convergence optimisée pour des structures comportant un grand nombre de contacts (autour d'une centaine de milliers pour les exemples présentés ici), constitue la difficulté essentielle dans la prise en compte des interactions. Une méthode de pénalisation linéaire, mais régularisée pour les très faibles pénétrations par une partie quadratique qui réduit considérablement les oscillations des états de contact, a été retenue. Ce type de méthode n'a cependant de réelle efficacité que si ses paramètres (raideur de pénalisation et profondeur de régularisation) sont ajustés en fonction de la situation locale du contact, c'est-à-dire en fonction des efforts qui s'exercent localement au niveau d'une zone de contact. Cependant, ces efforts locaux varient très largement d'une zone à l'autre d'une part, et au cours du chargement d'autre part. Afin de garantir la bonne convergence de l'algorithme global, nous avons choisi d'adapter la raideur de pénalisation pour chaque zone du contact, et tout au long du calcul, de telle sorte que la plus grande pénétration relevée sur une zone de contact ne dépasse pas un certain seuil.

Les efforts tangentiels, quant à eux, sont pris en compte par un modèle de frottement régularisé de type Coulomb.

4. Détermination de la configuration initiale

La détermination de la configuration initiale a priori inconnue du tissé est un point incontournable pour aborder l'identification du comportement. La méthode que nous proposons permet de reproduire le résultat du procédé d'élaboration du tissage. À partir d'une configuration nominale, dans laquelle toutes les mèches sont disposées dans un même plan, en s'interpénétrant donc au niveau de leurs croisements (Fig. 1), on impose de manière temporaire, au niveau de ces croisements, l'orientation de la direction de contact entre fibres de mèches différentes en fonction de l'ordre de superposition défini par le motif de tissage. En quelques étapes, ce processus permet de séparer les mèches selon l'armure choisie pour le tissage. La configuration initiale alors obtenue (Fig. 2) résulte donc d'un équilibre mécanique. Outre une description précise de la géométrie de l'enchevêtrement des fibres, ce calcul permet de tenir compte du chargement initial (déformations et contraintes), induit dans les fibres par la réalisation du tissage, pour aborder la phase ultérieure de simulation des tests de comportement.

5. Résultats de simulation

L'échantillon de composite textile modélisé pour les simulations présentées ici comporte 12 mèches de 28 fibres, soit 336 fibres au total. Le maillage

des fibres comporte environ 20 000 éléments de poutres. Pour la détection du contact, autour de 4500 zones de contact sont repérées, conduisant à la construction d'environ 80 000 éléments de contact. L'ensemble d'une simulation (calcul de la configuration initiale puis application d'un cas de chargement complet) prend une trentaine d'heures de calcul en utilisant six processeurs d'un cluster.

5.1. Calcul de la configuration initiale

Le calcul de la configuration initiale du tissé (Fig. 2), à partir de la configuration plane de départ (Fig. 1) est réalisé en 13 étapes. En simulant l'élaboration du tissé, il donne accès à de nombreuses informations sur l'arrangement des fibres au sein des mèches (Fig. 3), ou les courbures et contraintes initiales de celles-ci.

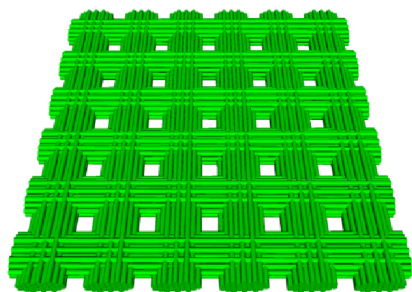


Figure 1. Configuration de départ

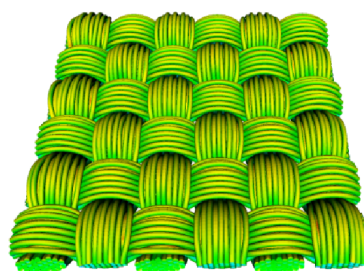


Figure 2. Configuration initiale calculée

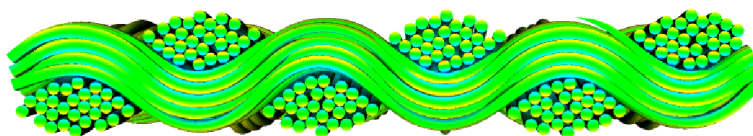


Figure 3. Coupe de la configuration initiale calculée

5.2. Simulation de tests de comportement

À partir du calcul de la configuration initiale du tissé, tout en conservant les contraintes résiduelles dans les fibres liées à l'élaboration du tissage, une sous-structure correspondant à la matrice élastique est ajoutée au tissé pour constituer l'échantillon de composite. Différents types de chargement peuvent alors être appliqués sur les bords de l'échantillon de manière à identifier son

comportement. Outre les tests classiques d'extensions biaxiales ou de cisaillement, on présente les déformées à l'issue de chargements en flexion (Fig. 4) et en torsion (Fig. 5).

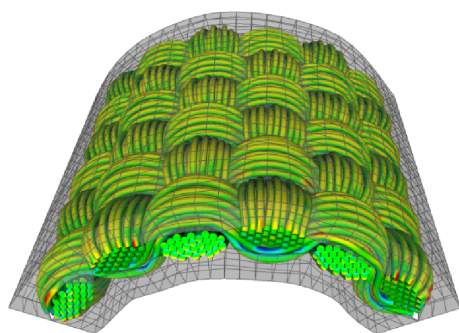


Figure 4. Flexion d'un échantillon de composite textile

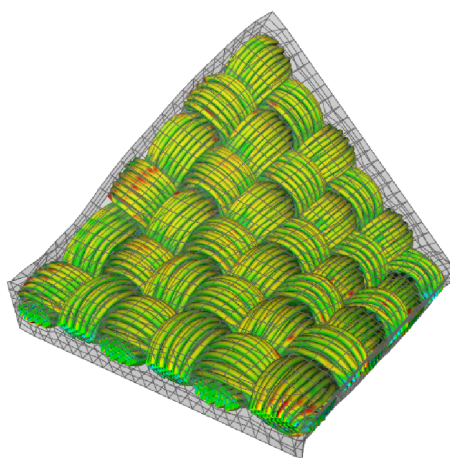


Figure 5. Torsion d'un échantillon de composite textile

6. Conclusion

La méthodologie présentée, qui se fonde essentiellement sur une approche spécifique de la détection et de la prise en compte des contacts-frottements au sein d'une assemblée de fibres, permet d'éclairer et de quantifier les phénomènes intervenant à l'échelle mésoscopique des interactions entre fibres au sein des matériaux textiles ou composites textiles. La possibilité de traiter des structures composées de plusieurs centaines de fibres en des temps de calcul abordables rend ce type de simulation adapté pour l'exploration du comportement de ces matériaux, tant aux échelles globales que locales.

7. Bibliographie

- Durville D., « Numerical simulation of entangled materials mechanical properties », *Journal of Materials Science*, vol. 40, n° 22, p. 5941-5948, 2005.
- Durville D., *Recent Advances in Textile Membranes and Inflatable Structures*, Springer Verlag, chapter Finite element simulation of the mechanical behaviour of textile composites at the mesoscopic scale of individual fibers, 2007.
- Hivet G., Boisse P., « Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 42, n° 1, p. 25-49, 2005.

Lomov S. V., Ivanov D. S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H., Hirosawa S.,
« Meso-FE modelling of textile composites : Road map, data flow and algorithms »,
Composites Science and Technology, 2007.