



**HAL**  
open science

# Une approche pour la simulation numérique des milieux enchevêtrés et des structures tissées

Damien Durville

► **To cite this version:**

Damien Durville. Une approche pour la simulation numérique des milieux enchevêtrés et des structures tissées. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-00274021

**HAL Id: hal-00274021**

**<https://hal.science/hal-00274021>**

Submitted on 23 Nov 2023

**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.

# Une approche pour la simulation numérique des milieux enchevêtrés et des structures tissées

Damien Durville

CNRS UMR 8579 / École Centrale Paris  
LMSSMat

Grande Voie des Vignes - 92295 Châtenay-Malabry Cedex  
damien.durville@ecp.fr

## Résumé :

*Une approche du comportement mécanique de milieux enchevêtrés par la simulation éléments finis à l'échelle des fibres est proposée dans ce papier. Cette approche, qui repose principalement sur une méthode originale de détection et de prise en compte des contacts entre fibres, permet de traiter des échantillons de quelques centaines de fibres. Des applications à des milieux enchevêtrés généralisés et à des matériaux composites textiles sont présentées comme résultats.*

## Abstract :

*An approach of the mechanical behaviour of entangled media by the means of finite element simulation at the scale of fibers is suggested in this paper. Lying essentially on an original method for the detection and taking into account of contacts between fibers, this approach allows to handle samples made of few hundreds of fibers. Applications to generalized entangled media and to woven textile composites are presented as results.*

## Mots-clefs :

**contact entre fibres ; milieux enchevêtrés ; matériaux tissés**

## 1 Introduction

La dénomination de milieux enchevêtrés recouvre une large gamme de matériaux et de structures constitués de fibres ou de fils entrelacés selon divers modes d'organisation, pouvant aller d'arrangements aléatoires comme dans les laines de verre, à des organisations structurées comme des câbles ou des tissés. Outre le comportement individuel des fibres, ce sont essentiellement les interactions de contact-frottement développées entre elles qui conditionnent le comportement non-linéaire de ces matériaux.

L'approche que nous présentons ici, qui vise à simuler le comportement d'échantillons de matériaux enchevêtrés, se situe à l'échelle des fibres et de leurs interactions. Elle repose sur un logiciel éléments finis prenant en compte chacune des fibres de l'échantillon à l'aide d'un modèle de poutre approprié, et qui s'attache surtout à détecter et à reproduire les interactions de contacts apparaissant entre ces fibres. Pour la détection de ces contacts, une méthode originale est mise en œuvre, fondée sur la détection de zones de proximité et la construction de géométries intermédiaires pour la génération d'éléments de contacts discrets.

Les modèles et algorithmes développés permettent d'aborder, avec des temps de calcul raisonnables, des structures comportant jusqu'à quelques centaines de fibres, et plusieurs dizaines de milliers d'éléments de contact. Il devient alors possible d'explorer le comportement d'échantillons de plus en plus réalistes de milieux enchevêtrés, afin d'identifier les paramètres de leurs comportements macroscopiques tout en décrivant avec précision à l'échelle locale l'état mécanique de chacune des fibres les constituant. Comme illustration, nous présentons des résultats

concernant deux types de milieux. Le premier cas étudié est celui de milieux fibreux aléatoires, de type laine de verre, pour lesquels nous avons tenté d'identifier des modèles de comportement en compression. Le deuxième champ d'application présenté est celui des matériaux tissés et des composites textiles. Après le calcul de la configuration initiale a priori inconnue, notre approche permet de simuler différents types de chargements sur de petits échantillons afin de caractériser leur comportement macroscopique.

## 2 Modélisation du contact au sein d'une assemblée de fibres

### 2.1 Méthode de détection du contact

Pour prendre en compte les interactions de contact-frottement au sein des assemblées de fibres que nous étudions, notre choix est de considérer des éléments de contact discrets, associant des couples de particules matérielles susceptibles d'entrer en contact en un lieu donné. Le processus de détection du contact consiste alors à déterminer l'ensemble de ces couples de particules matérielles candidates au contact. Les contacts au sein de la structure pouvant évoluer de manière continue au cours du chargement, ce processus de détermination du contact doit être régulièrement répété, et doit donc être d'un coût modéré en temps de calcul, tout en garantissant une grande précision au niveau géométrique.

Pour parvenir à cet objectif, la méthode développée consiste dans un premier temps à repérer des paires de portions de fibres proches, constituant des zones de proximité. Pour chaque zone de proximité est ensuite définie une géométrie intermédiaire, qui consiste en une ligne construite comme la moyenne des lignes moyennes des portions de fibres constituant la zone de proximité. Cette géométrie intermédiaire a pour but d'approcher la géométrie de la zone de contact réelle, a priori inconnue. Elle constitue localement un support géométrique pour la discrétisation géométrique du contact. Les lieux en lesquels le contact sera testé sont distribués sur cette géométrie, tandis que les plans orthogonaux à cette géométrie sont utilisés comme directions de recherche du contact, afin d'identifier les particules matérielles candidates au contact. Les directions de recherche déterminées à partir de cette géométrie intermédiaire s'avèrent beaucoup plus pertinentes que si elles avaient dû être définies à partir de la géométrie de l'une ou de l'autre fibre en contact. Le traitement ainsi proposé présente par ailleurs l'avantage d'être symétrique par rapport aux deux portions de fibres considérées.

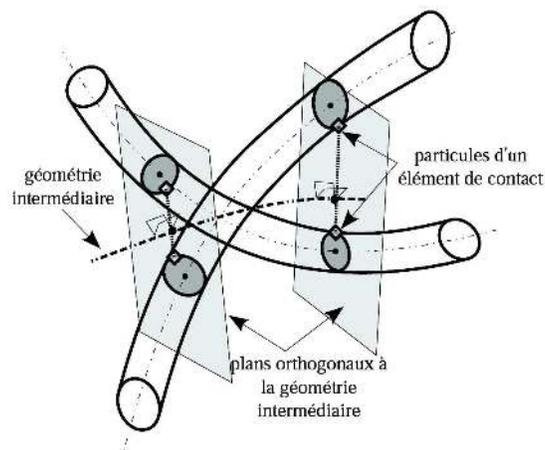


FIG. 1 – Illustration de la méthode de détection du contact

## 2.2 Modèles mécaniques pour les interactions de contact et de frottement

Le modèle mécanique utilisé pour la prise en compte du contact normal est un modèle de pénalisation régularisée, pour lequel la réaction normale de contact est prise proportionnelle à la pénétration au-delà d'un certain seuil, mais évolue quadratiquement par rapport à cette pénétration tant que celle-ci reste inférieure au seuil de régularisation. Cette régularisation stabilise de manière très notable les oscillations de contact. La question qui demeure quant aux modèles pénalisés est celle de la détermination du coefficient de pénalisation utilisé. L'influence de ce coefficient de pénalisation est prépondérante dans la mesure où, à effort d'interaction fixé, la pénétration entre les fibres est globalement proportionnelle à ce coefficient. Cette raison nous a conduit à adopter une stratégie adaptative pour la détermination de ce coefficient. Elle consiste à fixer une pénétration maximale autorisée, et à ajuster régulièrement au cours des itérations le coefficient de pénalisation au niveau de chaque zone de proximité de manière à ce que la pénétration maximale constatée sur cette zone ne dépasse pas la valeur fixée. Ceci permet donc d'adapter localement, et au cours du calcul, la raideur de contact au niveau de chaque zone de proximité.

Pour les efforts d'interaction de frottement dans les directions tangentielles, un modèle de frottement de Coulomb régularisé est employé.

L'optimisation des algorithmes liés à ces modèles permet de résoudre des problèmes incrémentaux impliquant de grands nombres d'éléments de contact (jusqu'à une centaine de milliers) en un nombre limité d'itérations (quelques dizaines), offrant la possibilité d'aborder des structures à grand nombre de fibres.

## 3 Application à des milieux enchevêtrés aléatoires

### 3.1 Introduction

L'objectif poursuivi dans cet exemple est d'identifier par la simulation le comportement en compression de milieux enchevêtrés de type laine de verre, en comparant les résultats obtenus avec ceux issus de développements analytiques proposés dans la littérature.

Les échantillons pris en compte ici ont été générés de manière aléatoire, en respectant une organisation de type périodique (Durville (2005)). On a cherché par ailleurs à mettre en lumière l'influence d'un paramètre dit de crêpage, indicateur de la tortuosité des fibres, considérées par ailleurs comme infiniment longues.

### 3.2 Résultats numériques

Les configurations initiales, et finales après une compression de 95 %, pour différents échantillons – trois pour chacun des paramètres de crêpage choisis – sont représentés sur la Figure 2.

L'observation des courbes d'efforts calculés sur ces échantillons (Fig. 3) permet d'identifier divers types de comportement. Si on retrouve, pour les fortes compressions, le comportement en  $(\epsilon^* - \epsilon)^{-\frac{3}{2}}$  proposé par Baudequin *et al.* (1999) sur le graphique (a), le second graphique (b), tout en montrant une tendance évoluant en fonction du crêpage, indique que pour les compressions jusqu'à 85 %, l'effort évolue comme la variation de densité relative à la puissance  $\frac{3}{2}$ . Enfin, le nombre de contacts apparaît dans une première approche proportionnel à la fraction volumique de fibres à la puissance  $\frac{2}{3}$ .

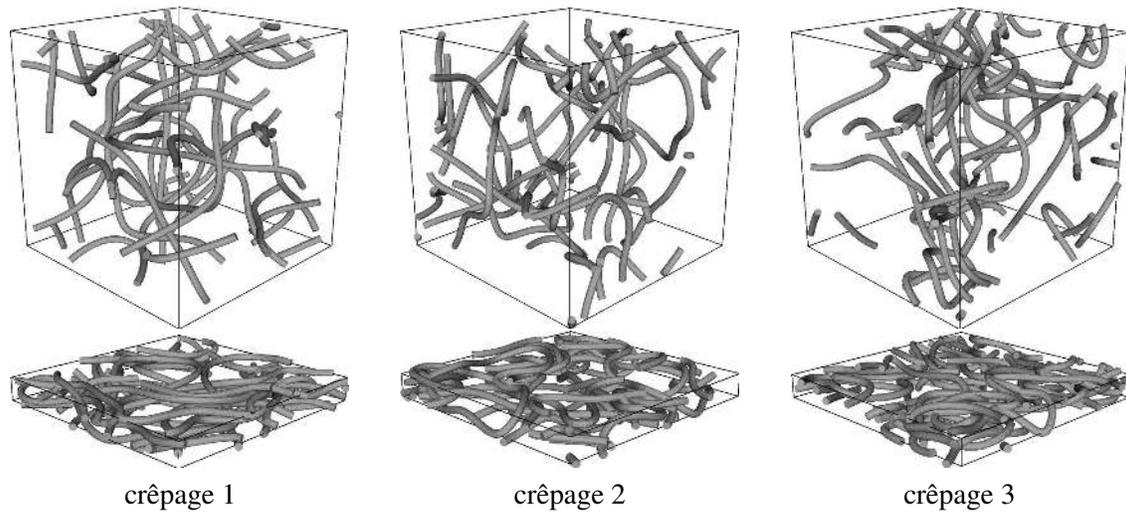


FIG. 2 – Configurations initiales et finales pour un des échantillons correspondant à chacun des paramètres de crêpage choisis

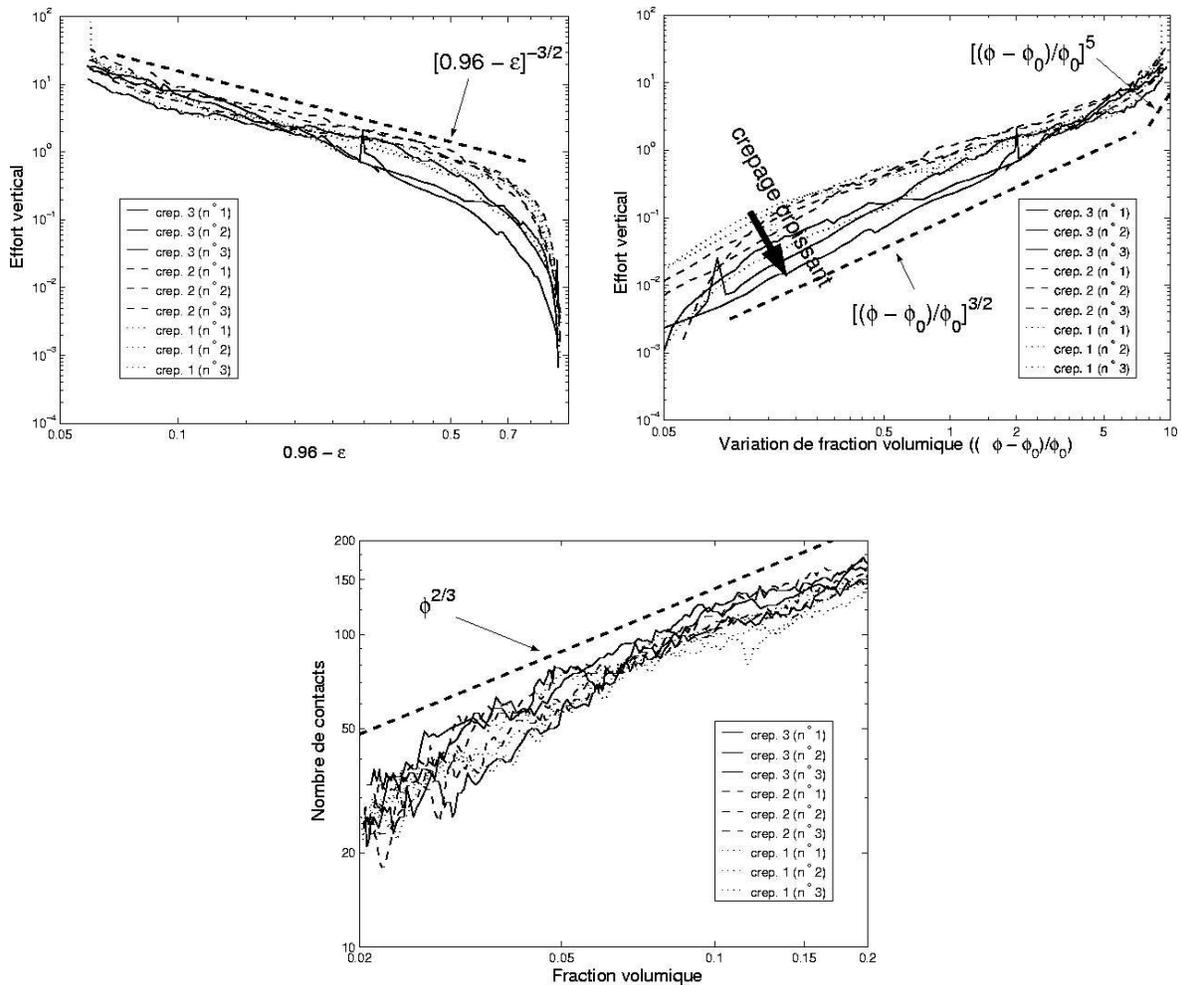


FIG. 3 – (a) : effort vertical en fonction de  $\epsilon^* - \epsilon$  - (b) : effort vertical en fonction de la variation de fraction volumique - (c) : variation du nombre de contacts en fonction de la fraction volumique (échelles logarithmiques)

## 4 Application aux matériaux textiles et composites textiles

### 4.1 Détermination de la configuration initiale

Dans le cas des matériaux tissés, la configuration initiale de la structure est a priori inconnue. Sa détermination constitue donc un passage obligé pour toute simulation avant d'aborder la reproduction de différents cas de chargement.

Pour calculer cette configuration initiale, nous proposons une méthode qui vise à reproduire le résultat du procédé de tissage. Nous partons d'une configuration dans laquelle toutes les mèches de fibres sont droites et positionnées dans un même plan, en s'interpénétrant donc au niveau de leurs croisements. Pendant une phase transitoire, alors que les contacts restent traités de manière standard entre les fibres appartenant à une même mèche, pour les contacts entre fibres de mèches différentes au niveau des croisements, nous imposons la direction normale de contact en fonction de l'ordre de superposition des mèches déterminé par le motif de tissage adopté. Quelques étapes suffisent, par ce moyen, à séparer les mèches conformément au motif de tissage.

L'échantillon dont les résultats sont présentés ici (voir Fig. 5 et 6) comporte 12 mèches de 28 fibres, soit 336 fibres au total, pour un maillage d'environ 20 000 éléments de poutre. Pour la détection du contact, autour de 4500 zones de contact sont repérées, conduisant à la construction d'environ 80 000 éléments de contact.

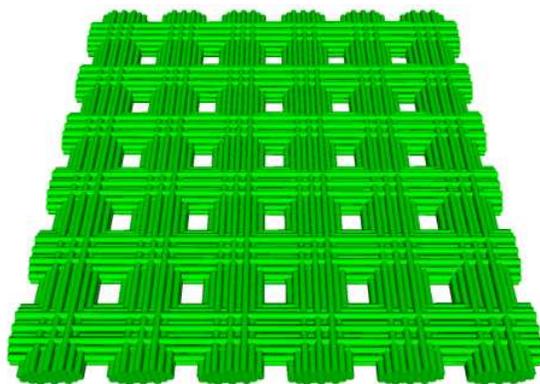


FIG. 4 – Configuration de départ

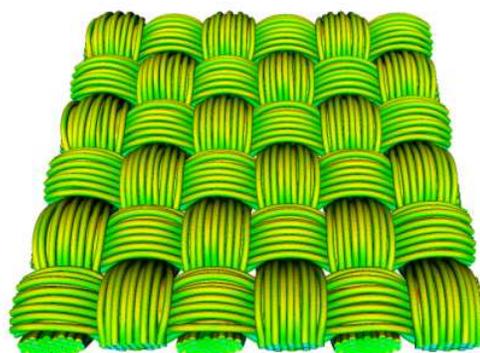


FIG. 5 – Configuration initiale calculée

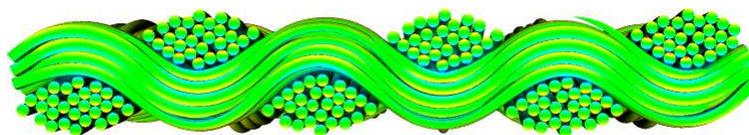


FIG. 6 – Coupe de la configuration initiale calculée

Cette manière de procéder permet de calculer la configuration initiale du tissé comme résultat d'un équilibre mécanique, en imposant simplement comme condition provisoire, le temps que le tissage soit formé, l'ordre de superposition des fibres au niveau des croisements entre les mèches, tout en laissant toute latitude aux fibres pour se réorganiser librement au sein des mèches (Fig. 6).

Les informations issues de ce calcul de configuration initiale sont potentiellement riches. Elles permettent de décrire la géométrie globale des mèches (trajectoires, formes des sections, densité), en renseignant sur des paramètres locaux tels que les courbures des fibres.

## 4.2 Simulation de divers cas de chargement

À l'issue du calcul de la configuration initiale, en gardant mémoire des contraintes résiduelles induites dans les fibres par le tissage, une matrice élastique est ajoutée au modèle de tissé. Des éléments de liaison spécifiques sont mis en œuvre pour assurer le couplage entre les maillages des deux sous-structures. Différents types de chargements, en flexion (Fig. 7), en cisaillement ou en torsion (Fig. 8) sont ensuite appliqués, permettant d'identifier le comportement macroscopique du composite sous ces chargements, tout en évaluant l'évolution des contraintes et déformations au niveau local dans les fibres. Le temps de calcul pour une simulation totale (calcul de la configuration initiale et application d'un cas de chargement) est d'une trentaine d'heures sur six processeurs d'un cluster.

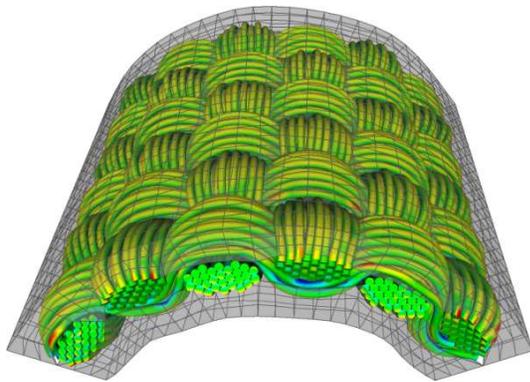


FIG. 7 – Flexion d'un échantillon de composite textile

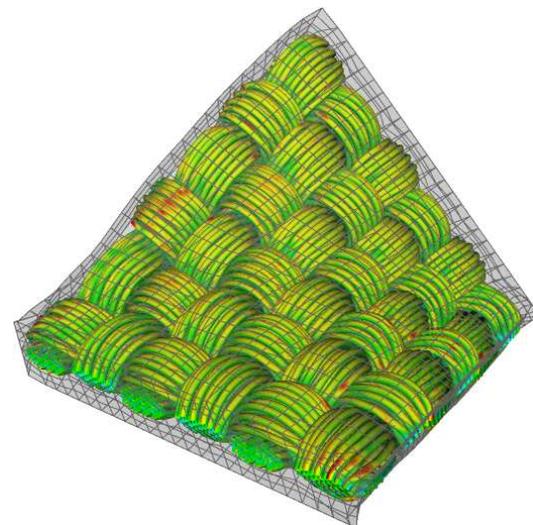


FIG. 8 – Torsion d'un échantillon de composite textile

## 5 Conclusion

Les résultats présentés sur deux types différents de matériaux enchevêtrés montrent que les méthodes, modèles et algorithmes développés font de la simulation numérique par élément finis à l'échelle des fibres un moyen d'exploration du comportement de ces milieux.

## Références

- Baudequin M., Ryschenkow G., Roux S. 1999 Non-linear elastic behaviour of light fibrous materials. *The European Physical Journal B* **12** 157-162
- Durville D. 2005 Numerical simulation of entangled materials mechanical properties. *Journal of Materials Science* **40** n°22 5941-5948
- Durville D. 2007 Finite element simulation of the mechanical behaviour of textile composites at the mesoscopic scale of individual fibers. *In Recent Advances in Textile Membranes and Inflatable Structures* (ed. E. Oñate and B. Kröplin) Springer Verlag.