



HAL
open science

Simulation et identification du comportement mécanique de milieux enchevêtrés en grandes déformations

Damien Durville

► **To cite this version:**

Damien Durville. Simulation et identification du comportement mécanique de milieux enchevêtrés en grandes déformations. 17e Congrès Français de Mécanique, Sep 2005, Troyes, France. pp.1-6. hal-04219219

HAL Id: hal-04219219

<https://hal.science/hal-04219219>

Submitted on 26 Sep 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.

Simulation et identification du comportement mécanique de milieux enchevêtrés en grandes déformations

Damien Durville

LMSSMat - École Centrale Paris / CNRS UMR 8579
Grande Voie des Vignes - 92295 Châttenay-Malabry Cedex
durville@mssmat.ecp.fr

Résumé :

Une méthode générale pour la détection et la prise en compte des interactions de contact-frottement au sein d'une collection de fibres soumises à de grandes déformations est présentée dans ce papier. Cette méthode s'appuie sur la création, dans les zones où le contact peut se produire, de géométries intermédiaires, utilisées à la fois pour fournir des directions de recherche adaptées, et comme support de discrétisation du problème de contact. Cette méthode est appliquée à la simulation de la compression d'échantillons fibreux générés aléatoirement, comportant de grands nombres de fibres et de contacts. La comparaison avec des résultats de la littérature sur différents types de laine montre la pertinence de cette approche pour l'identification du comportement mécanique de milieux enchevêtrés.

Abstract :

A general method for the detection and taking into account of contact-friction interactions within an assembly of fibers undergoing large deformations is suggested in this paper. It lies on the construction, in each region where contact is likely to occur, of intermediate geometries which are used to provide with both adapted contact search directions, and support for the discretization of contact problem. This method is applied to the simulation of the compression of fibrous samples with large numbers of fibers and contacts. Comparison with results of the literature concerning different types of wool proves the efficiency of the method for the identification of the mechanical behaviour of entangled media.

Mots-clefs :

contact-frottement entre poutres ; grandes déformations ; géométrie intermédiaire ; milieux enchevêtrés

1 Introduction

Les matériaux enchevêtrés peuvent se présenter sous des formes très différentes suivant la manière dont sont arrangés les fibres ou fils qui les constituent. Il peut s'agir aussi bien d'amas de nanotubes de carbone, de mèches de fibres textiles, de tissés, ou d'assemblage câblés. Dans tous les cas, le comportement mécanique macroscopique de ces matériaux dépend en grande partie des interactions de contact-frottement qui se développent entre les fibres, et se révèle à la fois complexe, en couplant par exemple de manières fortes certaines directions de sollicitations privilégiées, et fortement non-linéaire. Si l'on souhaite représenter, à une certaine échelle, ces matériaux comme des milieux continus, il n'en reste pas moins qu'ils apparaissent, à l'échelle mésoscopique, comme fondamentalement discrets. La simulation numérique à cette échelle mésoscopique constitue un moyen majeur d'investigation de leur comportement.

La simulation du comportement de milieux enchevêtrés demande à la base de pouvoir représenter le comportement de poutres en interactions de contact-frottement, et ce, dans le domaine des grandes déformations, étant donnée la grande souplesse de ces matériaux. La détection automatique des contacts entre poutres en grandes transformations constitue la difficulté essentielle

de ce type de simulation. Une première approche avait été proposée pour la modélisation du comportement interne des câbles métalliques [1]. Cette approche a été généralisée pour déboucher sur une méthode de prise en compte automatique des interactions de contact-frottement dans une collection quelconque de poutres en grandes déformations. La méthode repose sur une discrétisation a priori du problème de contact, à partir de géométries intermédiaires générées automatiquement dans les zones de proximité entre les fibres, conduisant à la construction d'éléments de contact discrets.

2 Détection des interactions de contact entre poutres en grandes déformations

2.1 Présentation de la problématique

La détection du contact au sein d'une collection de fibres en grands déplacements comporte plusieurs difficultés et contraintes, au nombre desquelles on peut citer : les grands déplacements relatifs attendus entre ces fibres, le nombre élevé de zones et d'éléments de contact, la faible dimension des rayons des fibres par rapport aux déplacements, la nécessité de détecter le contact en des endroits très précis tels qu'au croisement franc entre deux fibres, l'impossibilité de considérer des maillages compatibles entre les différentes fibres. Ces contraintes rendent problématique, voire impossible, le recours aux méthodes classiques de prise en compte du contact.

La modélisation du contact nécessite d'associer des parties de la structure que l'on prédit entrer en contact et entre lesquelles doivent être exprimées des interactions. Cette association de parties de la structure suppose l'utilisation d'une direction de recherche indiquant quelles entités seront mises en relation par le contact. Dans les méthodes classiques, on utilise souvent comme direction de recherche la direction normale à l'une des structures pour déterminer un vis-à-vis sur la structure opposée. Cependant, le choix de cette direction de recherche n'apparaît pas toujours bien adapté à la géométrie locale du contact, et conduit de plus à un traitement disymétriques des deux structures en contact. On peut essentiellement reprocher à ce choix de la direction normale comme direction de recherche le fait de ne tenir compte de la géométrie que de l'une des deux entités impliquées dans le contact.

2.2 Introduction d'une géométrie intermédiaire pour la détection du contact

L'idée de base sous-jacente aux développements que nous proposons vise à combler cette lacune en construisant, dans chaque région où le contact peut se produire, une géométrie dite intermédiaire, censée approcher la géométrie réelle de la zone de contact à l'équilibre, et définie dans cette optique comme une moyenne des géométries en regard.

L'introduction de cette géométrie intermédiaire permet d'approcher le contact, non plus en partant d'une des structures pour chercher un correspondant sur la structure en vis-à-vis, mais directement à partir de la géométrie intermédiaire, en utilisant comme direction de recherche les directions normales à cette dernière pour déterminer de manière symétrique des candidats au contact sur les deux parties en interaction. Cette géométrie intermédiaire permet donc d'une part d'utiliser des directions de recherche plus fiables par rapport à la surface réelle de contact, et d'autre part de retrouver un caractère symétrique de la détermination du contact par rapport aux structures impliquées.

2.3 Mise en œuvre et discrétisation du contact dans le cas des poutres

Les fibres des milieux enchevêtrés que nous souhaitons simuler sont prises en compte à l'aide d'un modèle de poutres présentant une cinématique enrichie décrite à l'aide de neuf degrés de liberté, et apte à rendre compte de modes de déformations planes des sections. Les modes de déformations accordés aux sections restent limités, ce qui permet de considérer dans une première approche que chaque zone de contact entre poutres se réduit à une ligne. Suivant la logique des modèles de poutres qui cherchent à décrire la géométrie des poutres à partir de leur fibre moyenne, l'approche géométrique du contact repose donc ici dans un premier temps sur des géométries linéiques.

On commence d'abord par repérer dans la collection de poutres des zones de proximité, c'est-à-dire des paires de portions de lignes moyennes satisfaisant un critère de proximité. On définit ensuite comme géométrie intermédiaire de cette zone de proximité, la moyenne entre les deux portions de lignes ainsi délimitées. Les directions normales à cette géométrie intermédiaire, représentée donc ici par une ligne, sont définies par les plans orthogonaux à cette ligne.

La discrétisation du problème de contact consiste à venir positionner sur cette géométrie intermédiaire linéique, un ensemble de points discrets en lesquels seront construits des éléments de contact, ceux-ci étant définis comme des couples de particules matérielles positionnées sur les surfaces des poutres, et prédites entrer en contact au lieu de définition de l'élément de contact. La détermination des particules constituant un élément de contact se fait en deux temps. Dans un premier temps, on identifie les sections candidates au contact au moyen de plans disposés orthogonalement à la géométrie intermédiaire, et régulièrement distribués le long de celle-ci. On positionne ensuite les particules candidates au contact sur le contour de ces sections en utilisant la projection, sur chacune de ces sections, de la direction entre les centres des deux sections retenues (voir FIG. 1).

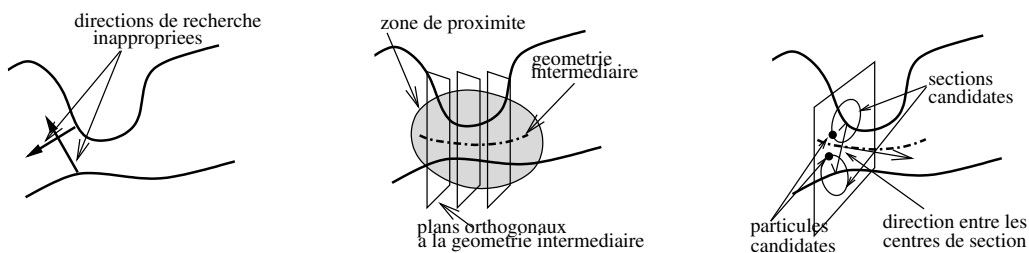


FIG. 1 – Création d'une géométrie intermédiaire pour la détermination de couples de particules candidates au contact

3 Aspects mécaniques et algorithmiques de la prise en compte des interactions de contact-frottement

La robustesse des algorithmes est un élément important de ce type de simulation mettant en jeu un nombre potentiellement élevé de contacts. Les conditions de non-interpénétration de contact sont prises en compte à l'aide d'un modèle de pénalisation, régularisé par l'introduction d'une réaction quadratique par rapport à la pénétration lorsque celle-ci est inférieure à un seuil déterminé en fonction du rayon des fibres. Cette régularisation permet d'amortir considérablement les oscillations possibles pour les éléments de contact dont l'état est hésitant.

Une grande amélioration de la stabilité de convergence est obtenue par ailleurs en adaptant, dans chaque zone de contact, le coefficient de pénalisation du contact de manière à ce que la pénétration maximale observée sur cette zone reste inférieure à un seuil fixé lui aussi en fonction du rayon des fibres. Cette amélioration est motivée par le fait que les efforts de contact sont très disparates d'une zone à l'autre, et d'une étape à l'autre, entraînant, si on considère un coefficient de pénalisation uniforme, des pénétrations très différentes. L'adaptation locale du coefficient de pénalisation, en homogénéisant les pénétrations sur l'ensemble de la structure, rend les algorithmes de contact beaucoup plus efficaces.

Pour ce qui concerne la prise en compte des efforts de frottement, un modèle de type Coulomb considérant un petit déplacement réversible avant le glissement est utilisé.

4 Résultats sur des échantillons aléatoires de laine

4.1 Présentation des tests

Afin de tester la pertinence et l'efficacité de la méthode, on a choisi de l'appliquer à des échantillons de fibres générées aléatoirement dans l'espace, représentant des milieux constitués de laine, pour lesquels des résultats analytiques et expérimentaux sont disponibles dans la littérature : van Wyk [3], pour la laine de mouton, et Baudequin et al. [2], pour la laine de verre.

Les géométries des fibres ont été générées de manière aléatoire. On a pour cela construit des séries de segments droits, caractérisés par trois paramètres aléatoires : leurs longueurs, et deux angles, de torsion et de flexion, permettant d'orienter deux segments successifs. Ces suites de segments droits ont été ensuite approchées par des B-splines. Les différents crêpages sont obtenus en jouant sur l'amplitude de variation de l'angle de flexion entre deux segments.

Pour mener ces tests, neuf échantillons aléatoires correspondant à trois crêpages différents, ont été construits (voir FIG. 2).

L'échantillon étudié a un côté de longueur unitaire, tandis que les fibres ont un diamètre de 0.03. Un module d'Young de 1 MPa, et un coefficient de Poisson de 0.3 ont été considérés pour le matériau.

4.2 Présentation des résultats

Les échantillons sont soumis à une compression imposée de 90 %, le chargement étant imposé progressivement sur environ 250 pas de temps, et des conditions de périodicité étant respectées entre faces opposées grâce à une correspondance entre extrémités de fibres successives. Chacun des échantillons étudiés comporte une cinquantaine de fibres, et présente autour de 11 000 degrés de liberté. Le nombre d'éléments de contact gérés augmente au fur et à mesure de la compression pour atteindre une valeur autour du millier d'éléments. Un coefficient de frottement de 0.2 a été considéré.

Les courbes d'efforts verticaux montrent des allures proches pour les différents échantillons, avec des tendances qui se détachent pour chacun des crêpages étudiés (FIG. 3). L'ajustement avec le modèle de van Wyk ne peut être obtenu sur l'étendue des déformations couvertes (FIG. 3.a) ; la validité de ce modèle restant restreinte aux faibles déformations. En revanche, l'effort vertical apparaît plus nettement corrélé avec la variation de densité relative (FIG. 3.b), avec un exposant $\frac{3}{2}$ jusqu'à un taux de compression de 85 %, puis un exposant 5 pour les fortes compressions, alors que les fibres ont tendance à s'organiser en géométries bidimensionnelles.

En reprenant les analyses faites sur la laine de verre par Baudequin et al. [2] dans le domaine

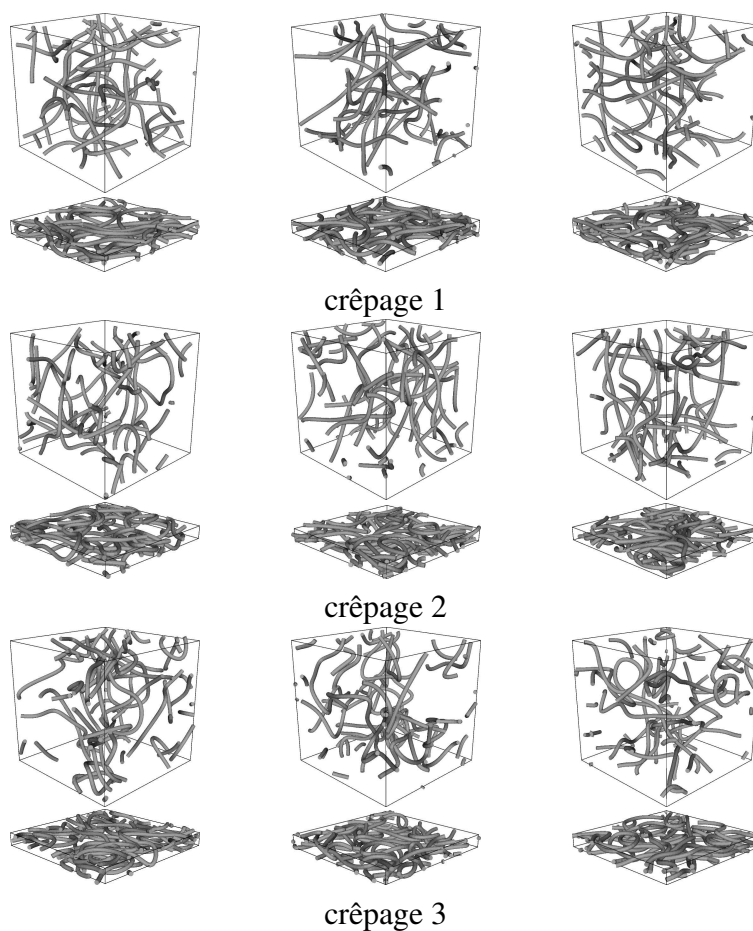


FIG. 2 – Configurations initiales et finales pour les neuf échantillons étudiés correspondant à trois valeurs de crêpage différentes

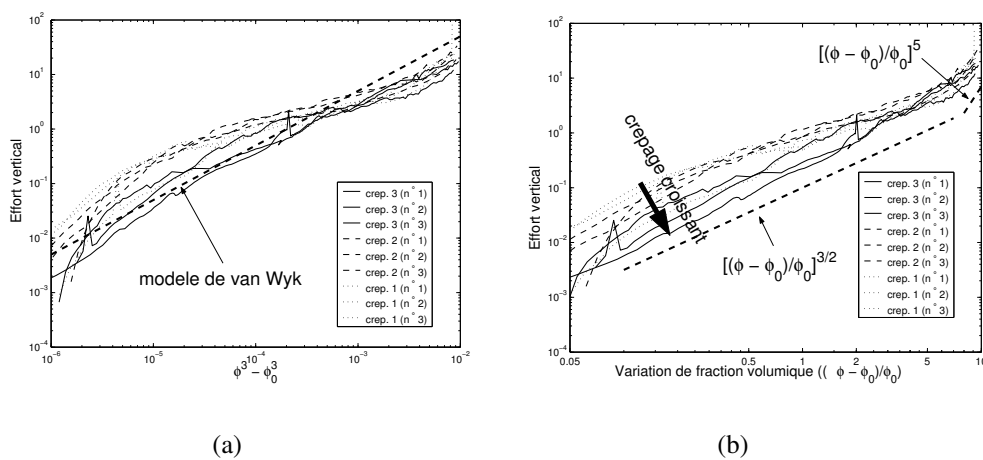


FIG. 3 – Effort vertical en fonction (a) : de la variation du cube de la densité, (b) : de la variation de fraction volumique (échelles logarithmiques)

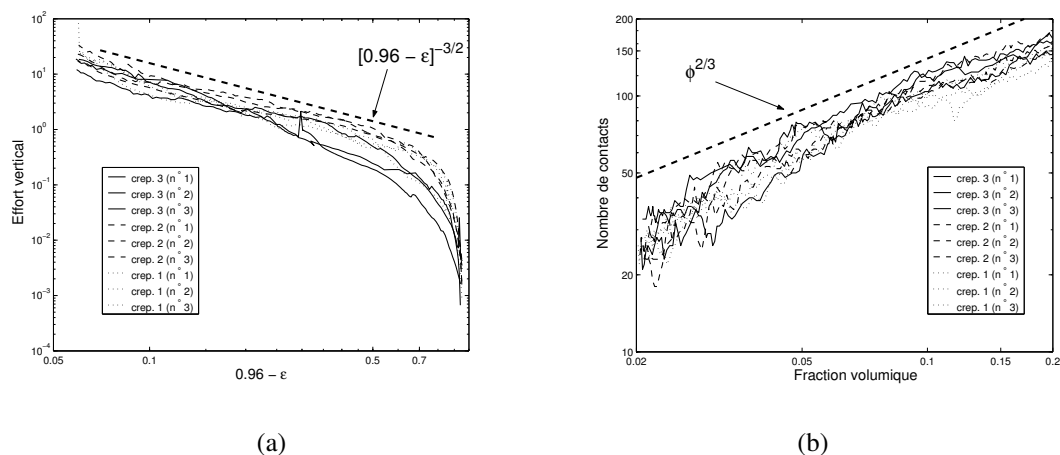


FIG. 4 – (a) : effort vertical en fonction de $\epsilon^* - \epsilon$, (b) : variation du nombre de contacts en fonction de la densité (échelles logarithmiques)

des fortes compressions, on retrouve aussi une très bonne corrélation entre l'effort vertical et un écart à une déformation maximale ($\epsilon^* - \epsilon$, avec $\epsilon^* = 0.96$) à la puissance $-\frac{3}{2}$ (FIG. 4.a).

Le meilleur accord concerne l'évolution du nombre de contacts, qui semble dans tous les cas rester proportionnel à la densité à la puissance $\frac{2}{3}$ (FIG. 4.b).

5 Conclusion

L'application de l'approche générale proposée à l'étude de la compression d'échantillons de laines, qui présentent un faible taux d'organisation des fibres, d'importants déplacements relatifs et un nombre élevé de contacts, ainsi que la cohérence des résultats obtenus sur ces tests, montrent la pertinence et l'efficacité de cette méthode pour l'étude et l'identification du comportement mécanique de milieux enchevêtrés très variés. Elle devrait pouvoir être utilisée à profit dans des domaines voisins, tels que celui de la simulation de structures textiles, tant au niveau des mèches élémentaires qu'à celui des tissages.

Références

- [1] D. Durville. Modélisation du comportement mécanique des câbles métalliques. *Revue Européenne des Éléments Finis*, 7(1-2-3) :9–22, 1998.
- [2] M. Baudequin, G. Ryschenkow, and S. Roux. Non-linear elastic behaviour of light fibrous materials. *The European Physical Journal B*, 12 :157–162, 1999.
- [3] C. M. van Wyk. Note on the compressibility of wool. *J. Textile Inst.*, 37 :285–292, 1946.