

Modélisation mésoscopique d'un assemblage de fils pour la simulation du comportement mécanique de conducteurs électriques

B. Durand¹, D. Durville¹, G. Vega²

¹ MSSMat, Ecole Centrale Paris, {baptiste.durand,damien.durville}@ecp.fr

² Nexans Research Center, guillaume.vega@nexans.com

Résumé — Certains conducteurs électriques organisés selon deux niveaux sont constitués d'un trop grand nombre de fils pour être simulés à un coût raisonnable à cette échelle. Nous proposons donc une méthode multi-échelle pour simuler le comportement mécanique de ces câbles en identifiant un modèle à une l'échelle intermédiaire. Nous présenterons d'abord les outils nécessaires à la construction d'un modèle à l'échelle des fils. Nous verrons ensuite comment identifier un modèle mésoscopique équivalent d'un sous-ensemble de fils torsadés à partir de simulations d'essais élémentaires.

Mots clés — multi-échelle, câbles, modèle mésoscopique, comportement non-linéaire

1 Motivations de l'étude

1.1 Problématique industrielle

Les fabricants de câbles électriques expriment le besoin de simuler le comportement mécanique de conducteurs comportant un très grand nombre de brins. Cependant la simulation de l'ensemble des fils est très coûteuse, voire inabordable, ce qui rend l'optimisation des paramètres de fabrication impossible. Nous proposons donc de simuler ces câbles à une échelle intermédiaire en mettant à profit la structure hiérarchique des câbles.

Structure d'un conducteur électrique

Les conducteurs auxquels on s'intéresse dans cette étude présentent deux niveaux d'organisation. À un premier niveau, ils sont réalisés en assemblant, selon un motif hélicoïdal régulier, des composants élémentaires appelés tordons, qui sont eux-mêmes obtenus, à un second niveau, en torsadant des mèches de fils initialement parallèles.

On distingue donc naturellement 3 échelles dans le câble : l'échelle des fils (micro), celle des tordons (méso) et celle du câble (macro).

Le cas de référence que nous étudions est un câble souple composé de 37 tordons comportant chacun de 36 à 42 fils pour un total de 1440 fils.

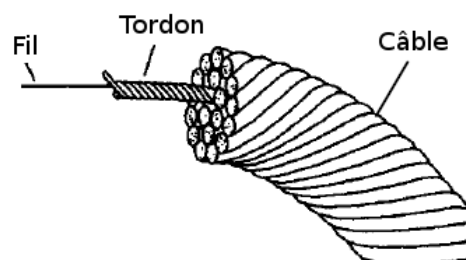


FIGURE 1 – Structure d'un câble

1.2 Démarche

Pour obtenir des coûts de simulation raisonnables, l'objectif de cette étude est de construire un modèle mésoscopique de tordon, qui permette de modéliser les câbles considérés comme des assemblages de tordons. Nous proposons donc de caractériser et d'identifier le comportement d'un tordon en construisant un modèle à l'échelle microscopique. Une des difficultés principales de cette démarche est la transition des propriétés du milieu discret vers un milieu continu.

2 Génération d'un modèle de tordon à l'échelle microscopique

2.1 Tordon de référence

Du fait du procédé d'élaboration des tordons qui consiste à torsader une mèche de quelques dizaines de fils de même longueur, les trajectoires des fils au sein d'un tordon sont complexes et aléatoires, ce qui ne permet pas de les prédire a priori. La simulation du procédé s'avère donc nécessaire pour générer le modèle de tordon.

Les trajectoires des fibres étant plus longues en périphérie qu'au centre du tordon, on observe en particulier des phénomènes de migration qui conduisent les différents fils à passer alternativement par des zones centrales et périphériques pour équilibrer leurs longueurs.

2.2 Fonctionnement de Multifil

Multifil est un code élément finis dont le fonctionnement est détaillé dans [1]. Il permet de simuler le comportement mécanique de milieux fibreux en discrétisant les fils avec des éléments finis poutre enrichis. Un algorithme permet de détecter les fils proches les uns des autres puis de créer des éléments bi-point de contact. Multifil est basé sur un algorithme itératif couplé à des mises à jour régulière des contacts. Multifil comprend également quelques outils pour prendre en compte certaines conditions limites. En particulier des conditions limites hiérarchisées aux extrémités permettant d'imposer des conditions globales sur l'ensemble des fils ou des conditions particulières fils par fils.

2.3 Résultats de mise en forme

En utilisant Multifil, nous avons pu modéliser la mise en forme d'un tordon de référence à partir d'une nappe de fils parallèles. Le choix des conditions limites aux extrémités du tordon est crucial dans ce modèle. Dans une première phase, appelée pré-tordonnage, nous utilisons des conditions rigides entre les fils. Dans une second temps, ces conditions limites sont remplacées par des conditions limites moyennées où seule la position moyenne des extrémités est fixée, ce qui permet un regroupement des fils aux extrémités du tordon.

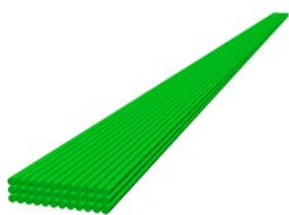


FIGURE 2 – Configuration initiale (0%)

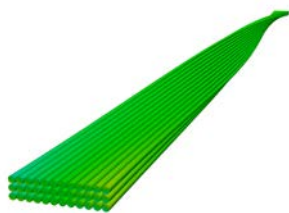


FIGURE 3 – Configuration après pré-tordonnage (25%)



FIGURE 4 – Configuration finale (100%)

Sur la figure suivante (Figure 5) représentant la distance à l'axe le long de certains fils, on constate que certains fils migrent bien entre le centre et la périphérie.

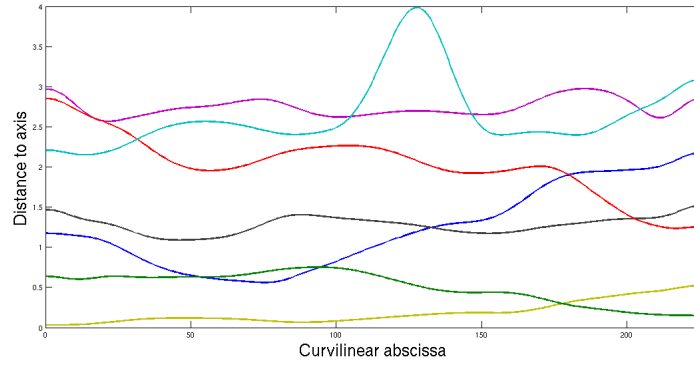


FIGURE 5 – Distance à l’axe médian le long de différents fils

3 Recherche d’un modèle mésoscopique

On cherche d’une part à représenter la cinématique à l’échelle mésoscopique à l’aide d’un modèle de poutre suffisamment riche pour représenter les déformations subies par le tordon, et d’autre part à identifier une loi de comportement associée qui permet de vérifier une équivalence énergétique entre les modèles aux échelles microscopique et mésoscopique.

3.1 Proposition d’une cinématique mésoscopique

Bien que le champ de déplacement à l’échelle micro soit discontinu dans les directions transverses du fait de la nature discrète de l’assemblage, on cherche à l’approcher par un modèle continu suffisamment riche. Nous proposons d’exprimer ce modèle continu à l’échelle mésoscopique sous la forme polynômiale suivante par rapport aux coordonnées transverse (ξ_1, ξ_2) , le degré de développement de ce polynôme restant à fixer en fonction de la finesse souhaitée :

$$\underline{u}(\underline{\xi}) = \underline{u}_0(\xi_3) + \sum_{p=1}^N \sum_{q=0}^p \xi_1^{p-q} \cdot \xi_2^q \cdot \underline{u}_{p-q,q}(\xi_3) \quad (1)$$

3.2 Essais élémentaires sur le modèle de tordon virtuel

En utilisant le modèle de tordon dont on a généré la configuration initiale dans la partie précédente, nous simulons des essais de sollicitations élémentaires (élongation, torsion, flexion, compression transverse). Ces tests nous donnent accès aux déplacements des centres de sections et aux énergies élastique et dissipée.

3.3 Interpolation de la cinématique à l’échelle mésoscopique

À partir des résultats obtenus sur les simulation de tests élémentaires de caractérisation à l’échelle microscopique, on propose d’identifier la cinématique à l’échelle mésoscopique. Cette étape consiste donc à interpoler le champ mésoscopique continu à partir du champ microscopique discret (Figure 6). Une fois cette fonction identifiée, nous pouvons aisément calculer le champs de déformation mésoscopique.

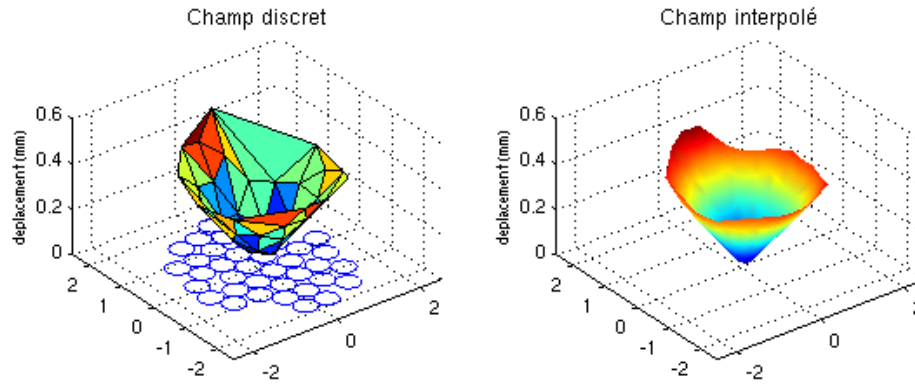


FIGURE 6 – Champ des déplacements des centres de section et son interpolation par un champ polynomial dans le cas de la torsion

3.4 Représentation mésoscopique des énergies

Dans la simulation micro, nous sommes capables de calculer les énergies élastiques dans les fils et les énergies dissipées aux contacts. Ces énergies sont alors intégrées dans les sections du tordon pour obtenir une description mésoscopique de l'énergie.

3.5 Identification de la relation énergie-déformation

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que nous étions capable de simuler à l'échelle micro divers sollicitations élémentaires sur un tordon puis d'en extraire des représentations mésoscopiques de la déformation, de l'énergie élastique et de l'énergie dissipée.

Nous cherchons maintenant la relation entre l'énergie et la déformation. Une fois dérivée, cette relation nous donne la loi de comportement équivalente. Nous nous inspirons pour cela des travaux de Charmetant [2] dans lesquels l'énergie de déformation est exprimée en fonction des invariants du tenseur de déformation.

Références

- [1] D. Durville. *Contact-friction modeling within elastic beam assemblies : an application to knot tightening*, Computational Mechanics, 49(6), 687-707, 2012.
- [2] A. Charmetant, E. Vidal-Sallé, P. Boisse *Hyperelastic modelling for mesoscopic analyses of composite reinforcements*, Composites Science and Technology, 71(14), 1623-1631, 2011.