



**HAL**  
open science

# Simulation de la mise en forme et du comportement mécanique de câbles supraconducteurs

Hugues Bajas, Damien Durville

► **To cite this version:**

Hugues Bajas, Damien Durville. Simulation de la mise en forme et du comportement mécanique de câbles supraconducteurs. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01412117

**HAL Id: hal-01412117**

**<https://hal.science/hal-01412117>**

Submitted on 8 Dec 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Simulation de la mise en forme et du comportement mécanique de câbles supraconducteurs

H. Bajas<sup>1</sup>, D. Durville<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMSSMat- Ecole Centrale Paris- CNRS UMR 8579  
Grande Voie des Vignes  
F-92295 Châtenay-Malabry Cedex  
hugues.bajas@ecp.fr  
damien.durville@ecp.fr

---

**Résumé** –Une approche élément finie est proposée pour l'étude comportementale des conducteurs d'ITER. Ces conducteurs sont formés d'un assemblage de brins supraconducteurs câblés inséré dans une conduite. Le comportement mécanique du câble sous divers chargements est en partie responsable de pertes de conduction dans les brins. Nous proposons l'utilisation et l'adaptation d'un code EF de calcul de structures dédié aux milieux enchevêtrés: MULTIFIL afin de quantifier l'apparition de déformations locales critiques dans les brins.

**Mots clés** – Modèle de poutre, contact-frottement, câble, identification de comportement

---

## 1 Introduction

Les conducteurs d'ITER de type câble en conduite sont composés d'un assemblage de brins supraconducteurs câblés sur plusieurs étages, introduit dans une gaine métallique. Chaque brin est constitué d'une structure composite multifilamentaire ( $Nb_3Sn$ ) implanté dans une matrice cuivre (Cu). Différentes campagnes de tests ont montré d'importantes dégradations des propriétés électromagnétiques des conducteurs en conditions opératoires ( $I=70kA$ ,  $T=4.2K$ ,  $B=11T$ ). Ces dégradations ont été attribuées au développement de déformations locales (essentiellement des flexions et des pincements au niveau des contacts) dans les brins dues aux chargements thermique et magnétique appliqués [1]. Il est en effet reconnu que les propriétés supraconductrices des filaments  $Nb_3Sn$  sont extrêmement sensibles à la déformation. La complexité du système rend nécessaire le développement d'un modèle numérique pour la prédiction des déformations locales des brins en configuration câblés soumis aux chargements caractéristiques des câbles en conduite.

L'adaptation du code MULTIFIL a permis la simulation du processus de câblage des conducteurs pour la détermination de la géométrie initiale de câble a priori inconnue. La structure obtenue peut ensuite être soumise à divers chargements axiaux ou transverses.

Après une introduction au modèle, avec une attention particulière portée sur les interactions de contacts entre poutres, nous présenterons les conditions aux limites du système. Une simulation du processus de mise en forme des conducteurs avec application de chargements mécaniques est ensuite exposée.

## 2 Présentation du modèle numérique

### 2.1 Poutre à cinématique enrichie : neuf degrés de liberté par nœud

L'utilisation d'un modèle de poutre à cinématique enrichie à neuf degrés de liberté permet la détermination de la totalité des composantes du tenseur des déformations tridimensionnelles. Le modèle de poutre est décrit par trois vecteurs:  $\mathbf{x}_0(\xi_3, t)$  positionnant le centre des sections le long de l'axe de la poutre  $\xi_3$ , ainsi que  $\mathbf{g}_1(\xi_3, t)$  et  $\mathbf{g}_2(\xi_3, t)$  représentant des vecteurs directeurs de section.

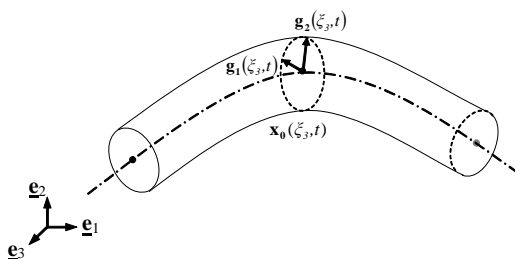


Figure 1 – Modèle de poutre à neuf degrés de liberté

Ce formalisme en grandes déformations permet de prendre en compte, en plus des termes traditionnels de poutre (élongation, flexion, cisaillement) des déformations planes des sections des poutres. Le code MULTIFIL permet la modélisation de plusieurs centaines de poutres en interaction de contact-frottement [2].

### 2.2 Détection automatique des contacts entre poutres

La possibilité qu'offre le modèle à détecter de façon automatique la création ou l'annihilation de points de contact s'avère particulièrement adaptée à la problématique des câbles. Une approche symétrique pour la détection de zones de contacts entre poutres est mise en œuvre par l'introduction de géométries moyennes, supports de discrétisation (éléments de contacts) pour la détermination des directions de recherche de contacts. Direction prise normal aux géométries moyennes. L'approche originale de MULTIFIL pour le traitement des interactions de contact-frottement entre poutres en grande déformation est largement décrite dans [3].

### 2.3 Modèle mécanique des interactions de contacts

Pour la structure câblée considérée, la disparité des zones de contacts de la géométrie et l'évolution des chargements appliqués sont tous deux cause d'une importante variabilité dans les efforts de contact. Le traitement des interactions de contacts est en conséquence un point crucial du modèle de câbles. La loi de comportement mécanique de contact utilisée dans le modèle est définie par une méthode de pénalisation. Dans une zone de contact, celle-ci établit une proportionnalité entre effort de contact et pénétration mesurée par l'introduction d'un coefficient de pénalisation. En dépit de la diversité des efforts de contacts attendue, une stabilité des pénétrations est néanmoins souhaitée. C'est pourquoi, plutôt qu'un modèle de contact où la pénalisation est fixée, on préfère effectuer un contrôle de la pénétration maximale au niveau de chaque zone de contact. On choisit de réaliser ce contrôle des pénétrations en adaptant régulièrement le coefficient de pénalisation pour chaque zone de contact. La méthode itérative utilisée pour l'adaptation du coefficient de pénalisation est ici introduite.

Une structure câblée est composée de  $N$  poutres en interaction de contact. Chaque poutre

possède  $i$  zones de contact où le contact est détecté. Chaque zone porte  $j$  éléments de contact mesurant une pénétration locale  $\delta_j$ . Chaque zone est également caractérisée par son coefficient de pénalisation  $k_i$ . Pour traiter du contact, on pénalise les pénétrations mesurées en appliquant une force de contact prise linéairement proportionnelle au produit de la pénétration locale  $\delta_j$  par le coefficient de pénalisation ajusté  $k_i$  de la zone. En outre, une régularisation de cette relation de proportionnalité est réalisée dans le but d'éliminer les discontinuités inhérentes à la transition contact actif/contact inactif comme décrit dans [3].

Dans la méthode exposée, on souhaite que la pénétration maximale détectée dans la zone de contact considéré ne dépasse pas une certaine valeur définie comme la pénétration maximale autorisée  $\delta_{max}$ . Cette condition peut s'écrire pour une zone de contact  $i$ :

$$\delta_i \leq \delta_{max} \quad \text{avec} \quad \delta_i = \max(\delta^j)$$

Au niveau de chaque zone  $i$ , l'ajustement du coefficient de pénalisation  $k_i$  doit alors permettre le respect de cette condition de pénétration. Pour une zone  $i$  considérée, on adapte  $k_i$  de façon itérative en fonction de l'état de pénétration maximale  $\delta_i$  de cette zone :

$$k_i^{n=0} = \kappa, \quad \kappa \text{ pénalisation initiale fixée pour tout } i \text{ à } n = 0$$

$$k_i^n = \frac{\delta_i}{\delta_{MAX}} k_i^{n-1} = \gamma \times k_i^{n-1}$$

De cette manière, la pénalisation augmentera ( $\gamma > 1$ ) ou diminuera ( $\gamma < 1$ ) de manière à ramener la pénétration maximale mesurée à la valeur maximale autorisée. Par ailleurs, pour ce processus itératif, on définit un critère d'arrêt représentatif de la stabilisation des valeurs  $k_i$ . On effectue alors un test de convergence sur le taux de variation de la valeur moyenne des  $k_i$ .

$$\tau_k = \frac{\hat{k}^n - \hat{k}^{n-1}}{\hat{k}^n} \leq \alpha(\%)$$

Les variations de chargements appliqués à la structure, significatifs des conducteurs étudiés, nécessitent de porter une attention particulière à la stabilisation de la pénalisation.

### 3 Principales étapes de la simulation

#### 3.1 Processus de câblage et mise en forme des conducteurs

Classiquement, un conducteur est mis en forme au moyen de machines de câblage formant successivement les différents étages du câble. Ce câble formé est inséré dans une conduite en acier (SS 316LN) pour passer ensuite en filière jusqu'à obtention du taux de vide désiré. Notre modèle propose la simulation d'un processus de mise en forme analogue pour la détermination de la géométrie initiale des conducteurs. Un assemblage de poutres préalablement positionnées dans une configuration théorique donnée est radialement compacté au moyen d'un outil rigide mobile. Un tel assemblage est définie par composition d'hélices déterminant une structure câblée à taux de vide donné (~70%) et pas de torsades fixés. Des conditions cinématiques de contacts sont appliquées entre structure et outil. Pour notre mise en forme, la compaction radiale de la structure mène à réduire le taux de vide jusqu'à une valeur donnée (32% par exemple). Une géométrie finale de câble est alors obtenue. Typiquement, le code permet de mettre en forme un câble composé de quelques centaines de brins. Un exemple est proposé au paragraphe 5.1.

#### 3.2 Traitement thermique des câbles en conduite

Un traitement thermique est réalisé sur les câbles en conduite dans le but de faire apparaître la phase supraconductrice des filaments des brins câblés. Il est communément admis qu'un tel traitement a pour effet de relaxer toutes contraintes accumulées lors de la mise en forme. Pour simuler ces effets, les contraintes internes du modèle sont réinitialisées à l'issue de la

compaction, en considérant comme nouvelle position initiale de la structure celle obtenue à l'issue de la mise en forme.

### 3.3 Chargement axial et transverse des conducteurs

Typiquement, les conducteurs étudiés sont soumis à deux types de chargements, l'un d'origine thermique, l'autre d'origine électromagnétique. Le rétreint thermique lié à la baisse de température entre la cuisson (923 K) et le fonctionnement (5 K), conjuguée au différentiel de dilatation thermique entre la gaine et le câble provoque un chargement de compression axiale de la structure câblée de l'ordre de 0.005. De plus, les forces de Lorentz appliquées au conducteur en condition d'opération entraînent de leur côté, une compression transverse très importante du câble. Ces deux types de chargements peuvent être simulés dans le code en appliquant au câble des déplacements ou efforts longitudinaux et transverses. Deux exemples sont donnés aux paragraphes 5.2 et 5.3.

### 3.4 Propriétés des matériaux

La simulation de la mise en forme est réalisée en utilisant une loi de comportement des brins purement élastique. Pour les essais mécaniques, on utilise un modèle pseudoplastique basé sur une adaptation locale de la raideur du matériau en fonction de la déformation longitudinale. On reproduit de la sorte les comportements non linéaires identifiés sur des essais de traction. Les données matériaux du modèle sont issues des tests expérimentaux menés sur brins unitaires comme exposés dans [4].

## 4 Conditions aux limites du modèle

Une des problématiques récurrentes pour la modélisation des câbles concerne les conditions à appliquer aux extrémités de chaque brin. La cinématique des nœuds aux extrémités est a priori inconnue et doit donc être anticipée de manière à simuler les effets des portions de câble non modélisées de part et d'autre de l'échantillon. Des conditions limites pertinentes doivent alors permettre de modéliser un échantillon de longueur limitée, de manière à ce qu'il soit représentatif d'un modèle considéré comme infiniment long. Les conditions aux limites doivent être définies pour les nœuds extrêmes, selon les trois directions de l'espace :  $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{e}_2$  les directions du plan transverse et  $\mathbf{e}_3$  l'axe du câble. Selon l'axe  $\mathbf{e}_3$  du câble, on fixe les nœuds à gauche ; les extrémités de droite sont laissées libres. Dans le plan transverse ( $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{e}_2$ ), le principal besoin de contraindre les déplacements aux limites tient à la volonté d'empêcher l'apparition de comportements non réalistes aux extrémités du câble. En l'absence de conditions aux limites dans les directions transverses, on observerait un déroulement ou une décohérence des torons formés au fur et à mesure que les efforts appliqués augmentent. On voudrait limiter ces déplacements transverses sans fixer de blocages absolus qui auraient pour conséquence de rigidifier arbitrairement les sections extrêmes par rapport au reste du câble.

Dans la méthode proposée, on cherche à équilibrer les déplacements transverses des nœuds extrêmes de gauche et de droite. Pourtant la structure étudiée n'étant pas périodique, on ne peut établir de correspondance directe entre ces nœuds extrêmes. On propose alors de lier chaque nœud  $N_i$  d'une extrémité du câble aux deux nœuds  $N_{j1}$  et  $N_{j2}$  de l'autre extrémité les plus proches selon les directions du plan transverse. On parle alors de pseudopériodicité. Pour lier deux nœuds couplés  $N_i$  et  $N_{j1}$ , on souhaite imposer la condition cinématique suivante à leurs déplacements :

$$(\mathbf{u}_{N_i} \cdot \mathbf{e}_\alpha) - (\mathbf{u}_{N_{j1}} \cdot \mathbf{e}_\alpha) = 0 \quad , \quad \alpha = 1,2$$

On traite alors cette condition par pénalisation. Ceci étant, ces conditions relatives ne permettent pas le blocage du mouvement de corps rigide restant: la rotation autour de l'axe du câble. On

propose de contrôler les déplacements des nœuds extrêmes de façon à annuler le déplacement orthoradial moyen.

## 5 Résultats de la simulation

### 5.1 Mise en forme de câbles

Le calcul de la géométrie initiale de câbles est de première importance dans l'étude de leurs comportements mécaniques. On présente ici en exemple le résultat d'une mise en forme d'un échantillon de 200mm, composé de 180 brins en configuration 3x3x4x5 jusqu'à obtention d'un taux de vide de 32%.

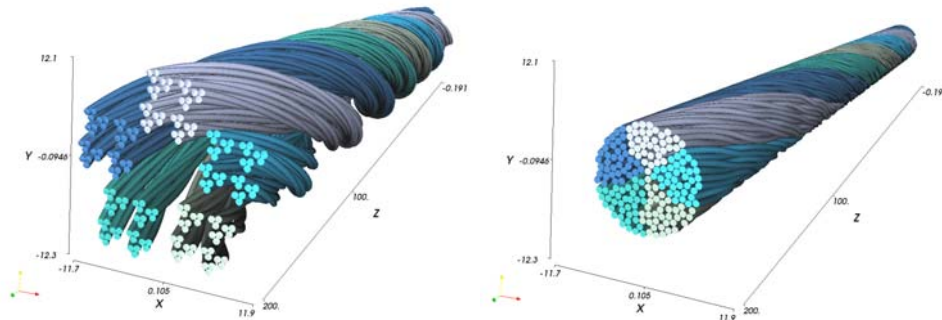


Figure 2 – Mise en forme d'un 3x3x4x5 par compaction radiale

### 5.2 Traction/Compression axiale

Le calcul de la mise forme donne des géométries de câble qualitativement satisfaisantes. Néanmoins la validité des modèles formés ne peut être montrée quantitativement qu'en appliquant des chargements mécaniques simples à la structure calculée. On propose ici pour un essai de traction uniaxial sur une échantillon 3x3x4 de 100mm de long, une confrontation des résultats numériques à un essai expérimental tiré de [4]. Le comportement du câble est retrouvé en utilisant uniquement comme donnée matériau une loi pseudoplastique identifiée sur brins unitaire droit.

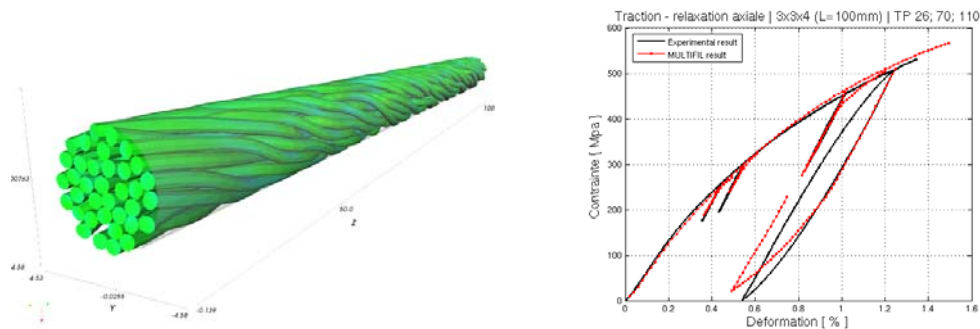


Figure 3 – Traction et relaxation axiale d'un 3x3x4  
~confrontation résultat expérimental~

### 5.3 Compression transverse

Dans une optique de validation du modèle, on propose de comparer les résultats expérimentaux et numériques pour une compression transverse d'un câble 3x3x4x5 de 100mm de long (**fig. 4**). Le modèle permet l'étude de l'influence de la configuration de câblage. On montre ici les résultats obtenus pour un câble 3x3x5 de 75 mm de long. L'influence du taux de vide (32 et 35 %) est regardée en terme de distribution de déformations pour un effort transverse appliqué identique de 40kN/m.

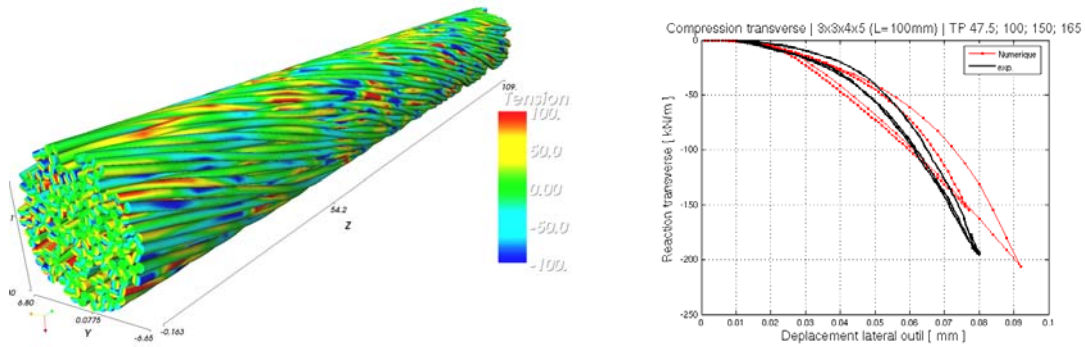


Figure 4 – Compression et relaxation transverse d'un 3x3x4x5  
~confrontation résultat expérimental~

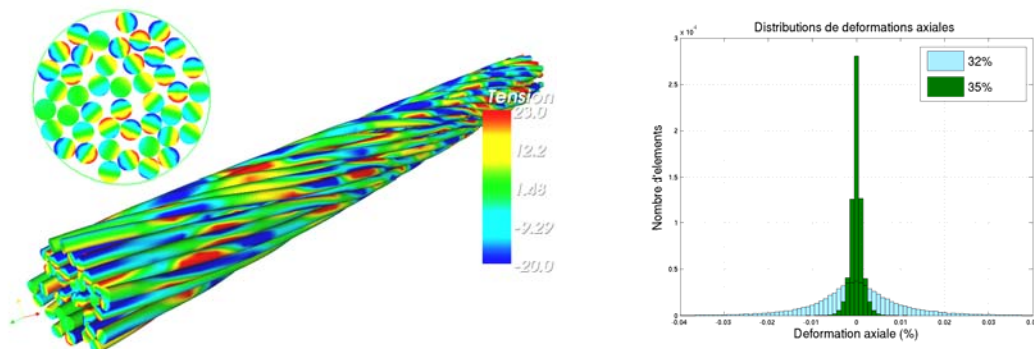


Figure 5 – Distribution de déformations d'un 3x3x5 pour deux taux de vide différents

## 6 Conclusion

Le code de calcul MULTIFIL s'est montré adapté à la modélisation de câbles. Ses capacités à traiter des problématiques d'évolution de situations de contacts permettent de simuler aussi bien le processus de mise en forme de câbles en conduite que les divers chargements caractéristiques des conducteurs supraconducteurs. Une attention particulière doit être portée sur les conditions aux limites du problème de câble. On introduit en ce sens une notion de pseudopériodicité pour l'application de conditions cinématiques adéquates à chaque extrémité de brin. Par ailleurs, la complexité des interactions de contacts entre brins du câble sous chargements nécessite l'utilisation d'une méthode de pénalisation consistante en terme de contrôle des pénétrations. La confrontation des modèles MULTIFIL à différents résultats expérimentaux semble montrer la robustesse de la méthode.

## Références

- [1] D. Ciazynski. Review of Nb<sub>3</sub>Sn conductors for ITER. *Fusion Engineering and Design*, 82 (2007) 488–497.
- [2] D. Durville, Numerical simulation of entangled materials mechanical properties. *Journal of Materials Sciences* **40**, n°22 5941-5948.
- [3] D. Durville. Modélisation du comportement mécanique des câbles métalliques. *Revue Européenne des Eléments Finis*, Vol. 7, n° 1-2-3, p. 9-22, 1998, 1998.
- [4] A. Nijhuis. A solution for transverse load degradation in ITER Nb<sub>3</sub>Sn CICC's : verification of cabling effect on Lorentz force response. *Superconductor Science and Technology*, 2008.