

Approche éléments finis du comportement mécanique de câbles supraconducteurs pour le réacteur ITER

H. BAJAS^a, D. DURVILLE^a

a. 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 éléments finis est proposée pour l'étude du comportement mécanique des conducteurs d'ITER. Ces conducteurs sont constitués d'un assemblage de brins supraconducteurs câblés inséré dans une conduite métallique. Le comportement mécanique complexe du câble sous divers chargements est en partie responsable de pertes de conductivité du conducteur. Nous proposons l'utilisation et l'adaptation d'un code EF de calcul de structures dédié aux milieux enchevêtrés MULTIFIL, afin d'évaluer les déformations à l'échelle locale dans les brins responsables des dégradations des propriétés conductrices. La simulation porte sur la mise en forme des câbles et sur l'application de divers chargements mécaniques.

Abstract :

A finite element method is proposed in order to study ITER conductor's mechanical behaviour. ITER conductors are composed of more than thousand strands cabled all together and inserted in a jacket. Their mechanical behaviour under various loadings is one of the driven factors to explain the observed current carrying capacity degradations of these conductors. The use and adaptation of the dedicated FEM MULTIFIL code is performed so as to identify and quantify local critical strain occurrences responsible for losses of conductivity within strands of the conductors.

1 Introduction

Le complexe d'aimants du réacteur ITER tire avantage de la technologie des conducteurs de type câble en conduite pour générer les puissants champs magnétiques nécessaires au confinement du plasma. Les conducteurs d'ITER sont composés d'une structure câblée de brins cuivre et de brins composites multifilamentaires insérée dans une gaine d'acier. Les conditions d'utilisation de ces conducteurs rendent nécessaire l'utilisation du matériau supraconducteur Nb₃Sn comme constituant des filaments des brins composites. En effet, à température cryogénique ($T_{op} \sim 5K$), ce matériau possède des caractéristiques supraconductrices stables vis-à-vis du champ magnétique ($B_{op} \sim 11T$) et de la densité de courant nécessaire ($J_{op} \sim 2kA/mm^2$). Cependant, il a été montré que les déformations subies par les brins de Nb₃Sn limitent nettement leur conductivité [1]. Au dessus d'un seuil critique de déformation, le comportement fragile du Nb₃Sn peut en outre entraîner des ruptures de filaments identifiées dans [2].

Les dégradations significatives des propriétés supraconductrices des différents câbles en conduite testés ont été attribuées au développement de déformations locales des brins -essentiellement des flexions et des pincements au niveau des contacts- soumis aux chargements thermique et électromagnétique caractéristiques des conducteurs d'ITER [3]. La difficulté à déterminer les valeurs locales de déformations dans des structures câblées complexes a mené au développement de différents modèles numériques [4][5]. Nous proposons ici une nouvelle approche pour la prédiction des déformations locales dans les câbles supraconducteurs par l'adaptation du code de calcul éléments finis MULTIFIL dédié aux milieux enchevêtrés [6]. Nous présenterons brièvement le modèle dans une première partie pour exposer ensuite les différentes étapes de la simulation du comportement mécanique des conducteurs d'ITER. La dernière partie concernera les résultats de la modélisation de câble pour différents cas de chargements.

2 Introduction au code de calcul EF: MULTIFIL

MULTIFIL est un code de calcul développé à l'Ecole Centrale Paris dans le cadre de la simulation des milieux enchevêtrés. Ce code résout l'équilibre d'assemblages de poutres en interaction de contact-frottement sous chargements quasi-statiques par l'utilisation d'un schéma implicite. Nous présentons brièvement dans ce paragraphe les éléments spécifiques du code, à savoir son modèle de poutre, son modèle de contact-frottement et ses conditions aux limites spécifiques à la simulation de câbles.

2.1 Poutre à cinématique enrichie

Une des caractéristiques du code est l'introduction d'un modèle de poutre à cinématique enrichie à neuf degrés de liberté par nœud. Ce modèle permet la détermination de la totalité des composantes du tenseur des déformations tridimensionnelles. La cinématique de chaque section de poutre est alors décrite au moyen de trois vecteurs ; l'un positionnant le centre de chaque section le long de l'axe de la poutre, les deux autres représentant des vecteurs directeurs de section. Ce formalisme 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 grandes déformations et en interaction de contact-frottement [7].

2.2 Détection et traitement automatique du contact

Une autre particularité du code MULTIFIL est sa capacité à détecter de façon automatique les contacts dans un assemblage de poutres. Le modèle propose la détection de zones de contacts entre poutres reposant sur l'introduction de zones de proximité et de géométries intermédiaires moyennes. Les géométries intermédiaires fournissent les directions de recherche de contacts et sont le support de discrétisation pour la création d'éléments de contacts. Les interactions de contacts sont alors traitées par une méthode de pénalisation utilisant un coefficient de pénalisation variable selon la zone de contact considérée. L'approche originale MULTIFIL pour le traitement des interactions de contact-frottement est largement décrite dans [6].

2.3 Conditions aux limites

La simulation du comportement de câbles sous divers chargements mécaniques nécessite l'utilisation de conditions limites adéquates à appliquer aux extrémités de chaque brin. Pour les câbles considérés, le rôle des conditions limites est de représenter les effets des portions de câble non modélisées de part et d'autre d'un l'échantillon. Un blocage absolu des nœuds extrêmes dans le plan transverse n'est pas envisageable car les sections extrêmes seraient alors rigidifiées par rapport au reste du câble. Nous cherchons alors à relier les déplacements des nœuds dans les directions transverses aux deux extrémités du câble de manière à ce que les sections de gauche et de droite du câble se comportent de façon similaire.

Dans le cas d'une structure câblée périodique, il serait idéalement possible d'égaliser des déplacements des nœuds extrêmes en établissant une correspondance exacte entre les positions des nœuds des sections de gauche et de droite. Néanmoins, le câble considéré n'étant pas périodique, une telle correspondance n'est pas possible. Par conséquent, on propose plutôt de lier les nœuds extrêmes selon un critère de proximité dans le plan transverse. Chaque nœud N_i d'une extrémité du câble est alors couplé aux deux nœuds N_{j1} et N_{j2} de l'autre extrémité les plus proches selon les directions \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 du plan transverse. Pour deux nœuds couplés N_i et N_{j1} , on souhaite ensuite imposer la condition cinématique suivante à leurs déplacements :

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

Cette condition est alors traitée par pénalisation pour chaque nœud extrême. Pour ce qui concerne le blocage des mouvements de corps rigides, non contrôlés par les conditions de type pseudo-périodique, nous proposons de contrôler les déplacements des nœuds extrêmes de façon à annuler le déplacement orthoradial moyen. Les déplacements aux limites sont alors également pénalisés par rapport à la moyenne des déplacements orthoradiaux. Concernant les conditions limites longitudinales, les nœuds de la section de droite sont fixés pendant que ceux de la section de gauche sont laissés libres. Ces conditions limites seront utilisées tout au long de la modélisation de câbles présentée.

3 Introduction à la simulation des câbles en conduite

La modélisation des conducteurs proposée ici consiste en l'application de chargements mécaniques successifs à un assemblage de brins câblés. Trois types de chargements sont alors considérés et simulent respectivement : la mise en forme des conducteurs par une compaction radiale, le rétreint thermique par une compression axiale et les forces de Lorentz par une compression transverse. Une description de ces trois types de chargement est maintenant exposée.

3.1 Simulation du processus de mise en forme

La simulation du processus de mise en forme a pour but de déterminer la géométrie initiale des conducteurs a priori inconnue. Cette simulation peut être vue comme une méthode équivalente au processus réel de formage en terme d'obtention de géométrie finale de câble.

Un assemblage de poutres préalablement positionnées dans une configuration théorique donnée est radialement compacté au moyen d'un outil rigide cylindrique mobile. L'assemblage initial est ici défini par composition d'hélices déterminant une structure câblée à taux de vide donné (~70%) et pas de torsades fixés. Les conditions cinématiques de contact entre poutres et outil permettent à l'issue de la compaction d'obtenir un câble formé à un taux de vide souhaité (32% par exemple). Pour illustrer cela un exemple est donné sur la figure 2. Le câble ainsi formé sera ensuite utilisé pour tester les chargements mécaniques caractéristiques des conducteurs.

Par ailleurs, une remise à zéro des contraintes est réalisée à l'issue de la mise en forme. Cette remise à zéro peut être considérée comme équivalente à la relaxation des contraintes des brins du câble due au traitement thermique subi par les conducteurs réels [5].

3.2 Simulation du rétreint thermique

Le rétreint thermique mentionné plus haut est lié à la baisse de température entre la cuisson (923 K) et le fonctionnement (5 K) conjugué au différentiel de dilatation thermique entre la gaine et le câble. Il provoque, comme mentionné dans [10] un chargement de compression axiale du câble de l'ordre de 0,006. Nous proposons de simuler cet effet sur un câble formé en imposant un même incrément de déplacement à chaque extrémité de brins. Nous pouvons alors déterminer la caractéristique 'contrainte (MPa)-déformation (%)' du câble.

De plus l'hypothèse exposée dans [3] suppose que le câble est solidaire de sa gaine. Nous représentons ceci en bloquant les déplacements orthoradiaux des nœuds en contacts avec l'outil rigide.

3.3 Simulation des efforts transverses

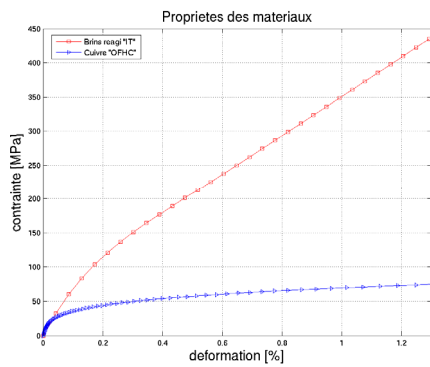
Le dernier type de chargement simule une expérience de compression transverse de type presse comme décrite dans [4]. Ce test mécanique se rapproche des effets qu'auraient les forces de Lorentz sur un conducteur en situation de fonctionnement. Pour modéliser cet essai, deux outils cylindriques concentriques sont placés autour d'un câble formé. La simulation consiste alors à appliquer un incrément de déplacement latéral à un des outils; l'autre restant fixe. Ce déplacement entraîne la compression transverse du câble. Nous pouvons ainsi déterminer la caractéristique 'effort transverse (kN/m)-déplacement outil (mm)' du câble.

Après un certain nombre d'étapes de chargement, il est possible de déplacer l'outil de façon à décharger la structure. En répétant ces trajets de chargement, nous pouvons réaliser des cycles de chargements transverses.

3.4 Propriétés des matériaux des câbles ITER

Nous utilisons d'une part un comportement purement élastique ($E_{\text{Young}} = 100 \text{ GPa}$) pour la mise en forme des câbles et d'autre part des lois de comportement identifiées pour la simulation des chargements faisant suite à la remise à zéro des contraintes. La figure 1 présente les caractéristiques contrainte-déformation identifiées sur brins droits en traction uniaxiale pour des brins cuivre OFHC et composites supraconducteurs « Internal Tin » issue de [8][9].

Ces caractéristiques matériaux sont représentées dans le code par un modèle pseudoplastique. Le module élastique est alors pris sous la forme d'une fonction non linéaire de la déformation axiale (FIG.1).



$$\sigma_{IT} = E_e \cdot \epsilon \quad \text{pour } 0 < \epsilon \leq \epsilon_0$$

$$E_e = 74,0 \text{ GPa} ; \epsilon_0 = 0,0006$$

$$\sigma_{IT} = E_p \cdot \epsilon + B(1 - e^{(-C \cdot \epsilon)}) \quad \text{pour } \epsilon_0 < \epsilon \leq +\infty$$

$$E_p = 27,8 \text{ GPa} ; B = 39,28 ; C = 1099,69$$

$$\sigma_{Cu} = E_e \cdot \epsilon \quad \text{pour } 0 < \epsilon \leq \epsilon_0$$

$$E_e = 136,6 \text{ GPa} ; \epsilon_0 = 0,000052631$$

$$\sigma_{Cu} = \sum_{i=1}^{i=3} a_i \cdot \exp(b_i \cdot \epsilon) \quad \text{pour } \epsilon_0 < \epsilon \leq +\infty$$

$$a_i = [-13,989, -20,286, -55,701] ; b_i = [6381,034, 821,077, 72,677]$$

FIG. 1 – Fonctions identifiées sur brins cuivre et supraconducteur

4 Résultats numériques et analyses

Dans ce paragraphe nous présentons et discutons les résultats obtenus pour les trois types de chargements exposés plus hauts.

4.1 Exemples de mise en forme de câbles

La figure 2 montre la configuration initiale et la configuration calculée pour un échantillon de 200mm, contenant 180 brins, câblés selon le schéma 3x3x4x5 avec pour pas de torsade respectif {45 ; 85 ; 125 ; 160} mm. Pour un taux de 32%, le cosθ du câble est de 0.978 en parfait accord avec la valeur rapportée dans [10]

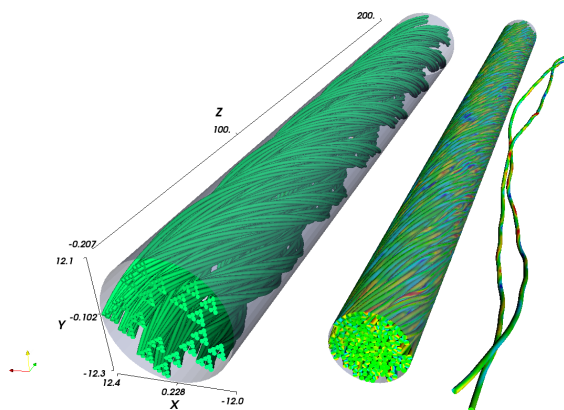


FIG. 2 – Exemple de mise en forme de câble : 3x3x4x5 | L = 200 mm | TV=32% | {45 ; 85 ; 125 ; 160} mm

Nous montrons sur la figure 3.a. deux résultats de mise en forme d'un câble 3x3x4x5 utilisant deux sets de pas de torsade différents : l'option I {45 ; 85 ; 125 ; 160} mm et l'option II {40 ; 140 ; 190 ; 300} mm. Le graphique exposé présente les distributions de courbures locales des brins pour deux taux de vide atteints : 34% et 30%.

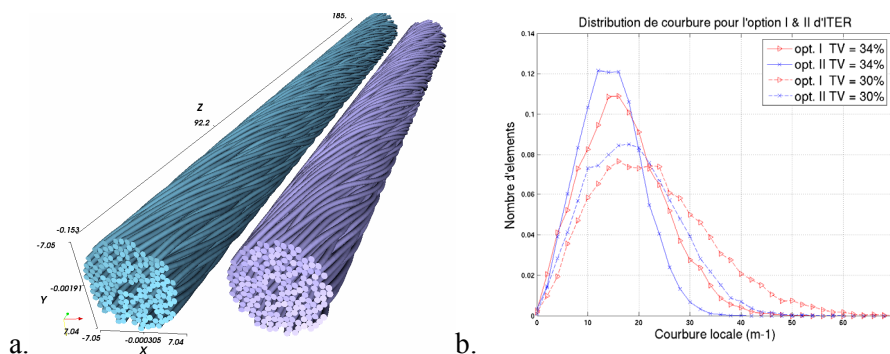


FIG. 3 – Mise en forme pour deux sets de pas de torsade (a.) et distributions de courbures locales (b.)

Les distributions FIG.3.b montrent la variabilité considérable des valeurs de courbures des brins ainsi que l'influence du taux de vide considéré. De telles configurations de câbles formés pourront dans la suite de nos travaux être testées afin d'observer la dépendance du comportement mécanique au taux de vide et au pas de torsade en terme d'évolution des déformations locales des brins.

4.2 Exemples de traction/compression axiale de câbles

Nous présentons dans ce paragraphe l'étude de l'influence des pas de torsade sur le comportement d'un câble 3x3x5 soumis à un chargement axial. Trois échantillons possédant des pas différents sont préalablement mis en forme à un taux de vide de 32%. Un déplacement imposé négatif (compression) puis positif (traction) leur est ensuite appliqué. Les courbes de chargement 'contrainte (MPa)-déformation (%)' et les distributions de contraintes à la valeur de compression maximale sont présentées.

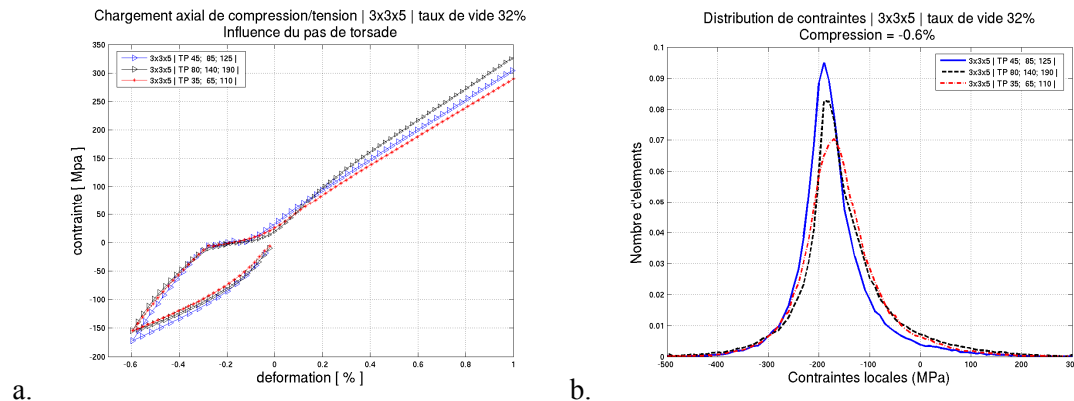


FIG. 4 – Chargement axial sur câble 3x3x5 pour différents sets de pas de torsade
 a. contrainte-déformation | b. distribution de contraintes

Les courbes obtenues en a. montrent des comportements assez similaires. Nous observons néanmoins une rigidification des câbles avec l'augmentation des pas de torsade. Ceci semble cohérent avec un effet de ressort d'autant plus important que les pas de torsade sont petits.

En terme de distribution de contraintes, nous observons des courbes centrées autour de -200MPa signifiant que les brins du câble sont globalement en compression. Une déviation du pic des courbes vers des contraintes plus grandes est observée qui ne semble pas être monotone avec l'augmentation des pas de torsade. D'autre part, il est intéressant de noter que le modèle prédit des queues de distribution en tension entre 200 et 300MPa correspondant à des déformation comprise entre 0.45 et 0.8%. Face à ces résultats et comme rapporté dans [2], il est doré et déjà possible d'envisager des ruptures de filaments très localisées dans les brins d'un câble de 45 brins comprimé axialement à hauteur de -0.6%.

4.3 Exemples de compression transverse

Nous exposons dans ce paragraphe les résultats obtenus pour la compression transverse de câbles formés en configuration 3x3x5 à un taux de vide de 32%. Cette étude concerne l'influence de différents paramètres sur la caractéristique 'effort transverse (kN/m)-déplacement outil (mm)'.

Dans un premier temps, nous présentons sur la figure 5.a. l'effet du pas de torsade. Le chargement transverse est réalisé au cours de trois cycles successifs pour un effort maximale de 40kN/m. Un coefficient de frottement entre brins de 0,1 est ici utilisé.

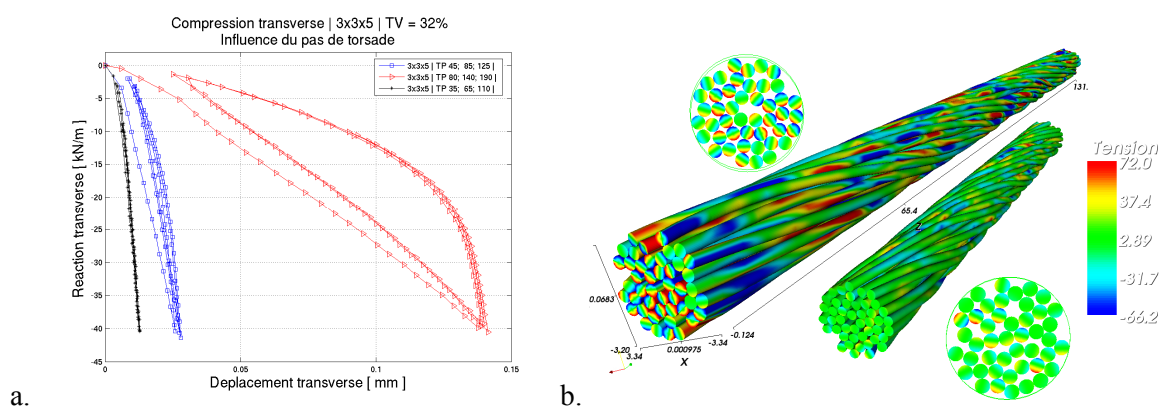


FIG. 5 – Chargement transverse sur câble 3x3x5 pour différents sets de pas de torsade
 a. effort transverse-déplacement outil | b. visualisation des deux premiers cas à 40kN/m

La première remarque concerne la forte dépendance des résultats aux pas de torsade considérés. La pente des courbes à la charge est d'autant plus raide que les pas de torsade sont petits. De plus, pour atteindre l'effort demandé, un déplacement d'outil d'autant plus important que les pas de torsade sont grands est nécessaire. Pour un taux de vide donné, ceci correspond finalement à une souplesse transverse d'autant plus grande que les pas de torsade sont longs. La deuxième remarque concerne le fait que le trajet de chargement linéaire à la charge ne se retrouve pas lors de la décharge. Nous remarquons enfin pour les trois cas traités une légère différence entre les pentes de charge du premier cycle et les suivants. Ceci est synonyme d'une rigidification transverse du câble qui semble être due à un réarrangement des brins lors du premier chargement comme observé lors de la visualisation (un exemple donné sur FIG.5.b).

Sur les figures 6.a & b, nous montrons l'influence de l'ajout de cuivre dans le triplet du premier étage de câblage ainsi que l'influence du coefficient de frottement. Globalement, le cuivre a tendance à assouplir le câble ainsi qu'à agrandir la surface du cycle. D'un autre côté l'augmentation du coefficient de frottement a tendance à rigidifier le câble ainsi qu'à diminuer la surface du cycle.

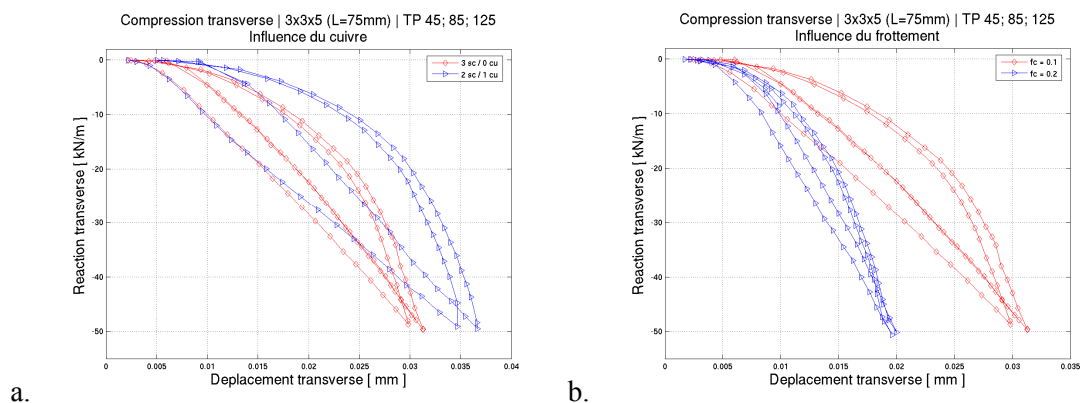


FIG. 6 – Chargement transverse sur câble 3x3x5 à un taux de vide de 32%
a. influence du cuivre | b. influence du coefficient de frottement

5 Conclusion

L'utilisation du code de calcul MULTIFL pour la modélisation des câbles en conduite semble donner jusqu'à présent des résultats cohérents d'une part pour la simulation de leur processus de mise en forme et d'autre part pour l'application de chargements axiaux et transverses. Le développement des conditions limites de type pseudo-periodique a permis une avancée significative dans la simulation des câbles en s'affranchissant de blocages absolus non pertinents. Une étude plus poussée est encore nécessaire pour saisir pleinement quels sont les paramètres prédominants dans le comportement de câbles. Les mécanismes globaux favorisant l'apparition de déformations localisées endommageantes à l'échelle des brins restent à comprendre. En particulier la question de l'importance des flexions par rapport aux efforts de contacts demeure en suspens.

References.

- [1] A.Godeke, Performance Boundaries in Nb₃Sn Superconductors, PhD Thesis, University of Twente, Netherlands, 2005
- [2] M.C. Jewell, The Effect of Strand Architecture on the Fracture Propensity of Nb₃Sn Composite Wires
- [3] D. Ciazynski, Review of Nb₃Sn conductors for ITER. Fusion Engineering and Design, 82 (2007)
- [4] A. Nijhuis, A solution for transverse load degradation in ITER Nb₃Sn CICCs: verification of cabling effect on Lorentz force response. Superconductor Science and Technology, 2008.
- [5] N. Mitchell, Operating Strain effect in Nb₃Sn cable-in-conduit conductors. Superconductor Science and Technology. 18, 2005
- [6] 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.
- [7] D. Durville, Numerical simulation of entangled materials mechanical properties. Journal of Materials Sciences 40, n°22 5941-5948.
- [8] N. Mitchell, Finite element simulation of elasto-plastic processes in Nb₃Sn strands. Cryogenics 45, 2005
- [9] A. Nijhuis, Axial tensile stress-strain characterization of ITER model coil type Nb₃Sn strands in TARSIS. Superconductor Science and Technology. 18, 2005
- [10] N.Dolgetta, J.L. Duchateau, Final Report on Manufacture of sub-size samples, CEA internal note, 2007.