

Coordination de la Formation par la Recherche

## Sujet de Thèse CEA "SUJET-LABO 2018"

*Référence du dossier :*

*Pôle :* DRF

*N° :* SL-DRF-18-0581

### 1 - Laboratoire d'accueil au CEA

Centre : **Cadarache**

Département/Service : **IRFM / Service Tokamak Exploitation et Pilotage**

Nom du laboratoire : **GCRY/Groupe Cryomagnétisme**

### 2 - Titre du sujet de thèse

**Modélisation mécanique des câbles supraconducteurs pour les aimants de fusion sous chargements électromagnétiques et thermiques cycliques**

### 3 - Thématique de Recherche

**Sciences pour l'ingénieur / Mécanique, énergétique, génie des procédés, génie civil**

### 4 - Pièce jointe

Y a-t-il une pièce jointe associée ? **Non**

Intitulé de la pièce jointe :

## 5 - Résumé

Les grands aimants de fusion sont constitués de câbles supraconducteurs utilisant des brins en Niobium-étain (Nb3Sn) et opérant à 4,5K. Ce matériau, devenu la référence des projets actuels, présente l'inconvénient d'être extrêmement sensible à la déformation. Or ces aimants sont soumis à des chargements mécaniques intenses et cycliques (dilatation différentielle thermique, force de Lorentz) qui conduisent à la dégradation de leurs propriétés. Cela introduit une incertitude quant aux performances finales des aimants, et peut conduire à la restriction de l'opération de la machine, et aller jusqu'à provoquer des transitions résistives (quenches) prématurées. L'enjeu de la thèse est d'aborder la mécanique fine de ces câbles, et d'identifier les paramètres de design et de chargement qui conduisent à la dégradation des performances. Cette thèse se base sur un travail déjà engagé par l'École Centrale Supélec, le CEA et ITER dans le cadre du développement d'un code de calcul (Multifil) modélisant les brins supraconducteurs et leurs déformations sous chargement mécanique. La thèse comporte une partie numérique (développement et amélioration du code Multifil), des analyses d'essais (sur des câbles ITER) et une partie expérimentale permettant de qualifier et améliorer le modèle. La thèse se déroulera pour partie à l'École Centrale Supélec et pour partie au CEA Cadarache.

## 6 - Exposé du sujet

Les aimants qui génèrent les champs magnétiques pour les machines de fusion sont constitués de câbles supraconducteurs opérant à température cryogénique et utilisant des brins en Niobium-étain (Nb3Sn). Ce matériau, grâce à ses excellentes propriétés supraconductrices, sa facilité de mise en forme et son coût en baisse, est devenu la référence des projets de tokamaks actuels et futurs (JT-60SA, ITER, DEMO). Cependant, ce matériau présente l'inconvénient d'être extrêmement sensible à la déformation (rupture fragile des filaments au-delà de 0.5% de tension). Or les aimants de fusion sont soumis à des chargements mécaniques intenses (traitement thermique à 650 degrés puis refroidissement à 4,5K engendrant des dilatations différentielles, force de Lorentz) qui conduisent à la dégradation de leurs propriétés de manière la fois réversible et irréversible selon les mécanismes. Cela introduit une incertitude quant aux performances finales des aimants qui peut conduire à la restriction de la fenêtre d'opération de la machine, et aller jusqu'à provoquer des transitions résistives (quenches) prématurées, ce qui met en danger l'intégrité du système d'aimant et du tokamak.

Le problème à traiter est donc multi-échelles (du brin au câble à l'aimant) et multi-physiques (thermique, mécanique, électromagnétisme). C'est une thématique importante pour des projets en cours (ITER devra fonctionner avec un système toroïdal dont les performances sont non stabilisées et difficiles à prévoir), et critique pour les projets à venir, y compris en dehors du domaine de la fusion (Aimants Nb3Sn en cours de fabrication et test au CERN par exemple).

L'enjeu principal de la thèse est d'aborder la mécanique fine de ces câbles, et d'identifier les paramètres de design et de chargement qui conduisent à la dégradation des performances.

Cette thèse se base sur un travail déjà engagé par l'École Centrale Supélec (ECS), le CEA et ITER dans le cadre du développement d'un code de calcul (Multifil) modélisant les brins supraconducteurs et leurs déformations sous tous types de chargements mécaniques. Le code a déjà été utilisé pour modéliser des câbles de fusion et identifier des indicateurs mécaniques importants [1] [2] (trajectoires, déformations, rigidité etc...), mais n'a pas permis d'identifier les mécanismes de dégradation sous chargement cyclique ni d'augmenter notre capacité prédictive.

La thèse tentera d'appréhender les phénomènes mécaniques cycliques complexes qui apparaissent dans le câble : contacts entre brins, contacts câble-gaine, phénomène de Rochet, chargement multidirectionnel, plasticité transverse. Ces phénomènes sont encore très imparfaitement traités par le code et jouent un rôle important dans la répartition interne des efforts du câble.

Le projet de thèse comprend donc une partie théorique permettant de quantifier et rationaliser ces phénomènes (identification, mise en équation, validation expérimentale) afin de pouvoir les réduire et les intégrer dans le modèle numérique. Cette première phase doit aussi s'appuyer sur des campagnes expérimentales ainsi que sur des modèles numériques locaux (pour traiter le cas local du contact par exemple).

Dans un second temps, le modèle ainsi créé doit être validé à l'échelle du câble sur des propriétés mécaniques ou géométriques. Cela peut se faire dans le cadre d'exams destructifs de câbles, ou de mesures de propriétés mécaniques macroscopiques sur des bancs de tests dédiés (traction/compression transverse).

Enfin, le modèle doit être utilisé pour modéliser des conducteurs existants et testés dans le cadre de la qualification des conducteurs d'ITER, et permettre d'identifier qualitativement et quantitativement les facteurs de design et de chargements qui conduisent à la dégradation cyclique des conducteurs. Pour cela, il sera important de faire correspondre les caractéristiques mécaniques du câble (champ des déformations dans les brins) avec les performances électriques (courant critique, index de transition). Cette phase devra être faite en lien avec le code de modélisation électrique CARMEN développé au CEA, et permettra d'aborder l'aspect multi-physique du problème.

La thèse est proposée par le CEA en co-tutelle avec l'École Centrale Supélec, et se déroulera en grande partie à l'ECS, mais des séjours au CEA de Cadarache sont prévus pour les aspects expérimentaux et modélisation électrique.

La thèse propose un sujet au cœur des préoccupations actuelles d'ITER, et qui peut être un vrai verrou technologique pour les aimants du futur. La problématique dépasse le cadre fusion et permet de s'intéresser à des sujets de couplage d'échelle sur des phénomènes variés. Les campagnes d'essais ITER seront riches d'enseignement pour la thèse et pour le candidat. Les équipes d'encadrement ECS (Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux) et CEA (Groupe AIMants Supraconducteurs) ont déjà des liens forts et une expertise reconnue sur cette thématique.

[1] - Approche éléments finis du comportement mécanique de câbles supraconducteurs pour le réacteur ITER.

[2] - Mechanical and electrical modeling of strands in two ITER CS cable designs

## **7 - Collaborations (éventuelles) prévues**

Laboratoire : **MSSMat**

Organisme : **Ecole Centrale Supélec**

Responsable : **Durville Damien**

Raison de la collaboration :

**L'école Centrale-Supélec développe depuis plusieurs années un code de calcul pour la modélisation mécanique des câbles de fusion.**

Duree : **36**

## **8 - Partenariat(s) industriels prévu(s) (éventuellement)**

## 9 - Correspondant chargé du suivi de la thèse au CEA

Nom: **Torre**

Prénom: **Alexandre**

Adresse : **CEA Cadarache  
13108 St-Paul lez durance CEDEX  
DSM/IRFM/STEP/GCRY  
Bat 513 / pièce 33**

Téléphone **0442257442**

@mail: **alexandre.torre@cea.fr**

Habilitation à diriger des recherches : **Non**

Organisme de rattachement : **CEA**

Combien de thèses avez-vous déjà **0**

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2018/2019 ? **1**

## 10 - Directeur de thèse

Nom: **DURVILLE**

Prénom: **Damien**

Adresse : **CNRS UMR 8579,**

Téléphone:

@mail: **durville@mss.ecp.fr**

Habilitation à diriger des recherches : **Non**

Organisme de rattachement : **Ecole Centrale Paris**

Combien de thèses avez-vous déjà encadrées

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2018/2019 ?