

---

## Rapport Groupe de Travail

### **Modélisation et caractérisation de supraconducteurs à haute température critique en vue d'applications en génie électrique.**

---

Noms des animateurs et rattachement institutionnel :

Bruno Douine, GREEN Université de Lorraine

Arnaud Badel, G2Elab Grenoble

Date de création 7/6/2016

#### **Contour scientifique**

Le développement de nouveaux supraconducteurs à haute température critique (SHTC) sous la forme de rubans pour les câbles ou de supraconducteurs massifs, permet d'envisager de nouvelles applications en électrotechnique (e.g. lévitation supraconductrice) ou d'améliorer les performances des systèmes existants (e.g. moteurs). Pour l'étude de ces applications industrielles, il est nécessaire de connaître les caractéristiques électromagnétiques de ces nouveaux matériaux qu'ils soient sous forme de fils, de rubans ou de pastilles massives. Pour tous les supraconducteurs, la difficulté réside principalement dans la reconstitution de loi électrique locale  $E(J,B,T)$  à partir des mesures.

Les SHTC présentent des spécificités qui rendent complexes la résolution des problèmes à traiter, en particulier:

- forte anisotropie,
- structure hétérogène,
- résolution de problèmes couplés magnétothermiques fortement non-linéaires.

Le Groupe de Travail doit permettre la mise en commun des connaissances et savoir-faire des différents participants sur ce sujet fondamental indispensable au développement des applications. De plus, cela va développer les collaborations existantes ou en créer de nouvelles. Cela permet à court ou moyen terme de conforter le réseau national autour des supraconducteurs et de leurs applications.

## **Liste des contributeurs au 1/12/2016**

Prénom et nom	Laboratoire - tutelle	Adresse mail
Bruno Douine	GREEN	bruno.douine@univ-lorraine.fr
Jean Lévêque	GREEN	jean.leveque@univ-lorraine.fr
Kevin Berger	GREEN	kevin.berger@univ-lorraine.fr
Hocine Menana	GREEN	hocine.menana@univ-lorraine.fr
Pascal Tixador	G2Elab, Grenoble	pascal.tixador@neel.cnrs.fr
Arnaud Badel	G2Elab, Grenoble	arnaud.Badel@grenoble.cnrs.fr
Gérard Meunier	G2Elab, Grenoble	Gerard.Meunier@g2elab.grenoble-inp.fr
Guillaume Escamez	NEXANS Lyon	guillaume.escamez@gmail.com
Xavier Chaud	LNCMI, Grenoble	xavier.chaud@lncmi.cnrs.fr
Loic Quéval	GEEPS	loic.queval@geeps.centralesupelec.fr
Abelin Kameni	GEEPS	abelin.kameni-ntichi@geeps.centralesupelec.fr
Jacques Noudem	CRISMAT, Caen	jacques.noudem@ensicaen.fr

Le GT sera aidé dans son travail par la Commission de Cryogénie et de Supraconductivité de l'Association Française du Froid dont le bureau est composé de plusieurs membres du GT.

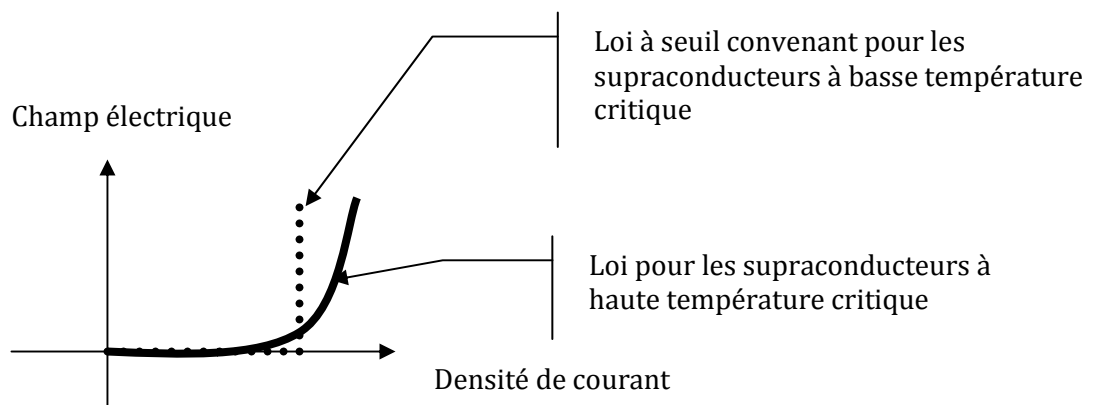
### **Etat de l'art et prospectives**

La recherche dans le domaine des matériaux supraconducteurs est extrêmement variée, depuis la physique du solide jusqu'à l'élaboration de matériaux et la définition de processus industriels de fabrication. Quasi indépendamment, des travaux de recherches sont menés sur les applications des supraconducteurs en génie électrique, depuis les composants électroniques de quelques grammes fonctionnant à des fréquences supérieures au THz jusqu'aux générateurs montés sur les mâts d'éoliennes (pour une puissance de l'ordre de 10MW) et les moteurs de propulsion marine qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de MW et pèsent plusieurs dizaines de tonnes.

### **Thèmes scientifiques traités dans le GT**

Les thèmes scientifiques abordés par ce GT sont la modélisation et la caractérisation des supraconducteurs.

Les matériaux supraconducteurs ont des lois de comportement électriques (champ électrique en fonction de la densité de courant) fortement non linéaires et qui dépendent de nombreux paramètres (température, induction magnétique propre ou appliquée). Ils se distinguent des matériaux à basse température critique par une transition plus progressive qui ne peut être décrite par une loi à seuil.



Dans le cas général, nous pouvons écrire :  $E = E_c \left( \frac{j}{J_c(T, B)} \right)^{N(T, B)}$ .

Des mesures sur les matériaux à haute température critique montrent que  $N$  peut être compris entre 3 et 30 selon la valeur du champ magnétique appliqué et de la température.

La connaissance de ces lois de comportement permet, par exemple, de calculer analytiquement ou numériquement les pertes dans les supraconducteurs. Le calcul de ces pertes est primordial lors de la mise au point de systèmes utilisant ces matériaux notamment pour dimensionner la partie cryogénique.

Pour arriver à la détermination des paramètres  $J_c(T, B)$  et  $N(T, B)$ , qui sont les grandeurs nécessaire et suffisantes à connaître, nous devons tendre vers deux objectifs :

- Mettre en œuvre des outils expérimentaux simples et performants. En effet actuellement que ce soit la méthode par mesure d'aimantation magnétique ou la mesure directe électrique ne donne pas des paramètres corrects mais des valeurs approximatives. Pour un même matériau supraconducteur les paramètres trouvés diffèrent suivant la méthode utilisée et les dimensions des échantillons. L'utilisateur doit se contenter de ces résultats et doit souvent surdimensionner son système. Malgré cela on s'aperçoit que des prototypes expérimentaux (limiteur de courant par exemple) ne sont pas au point par manque d'informations sur ces paramètres ou sur les pertes en fonctionnement. Les deux méthodes de détermination des paramètres sont dites méthodes de caractérisation continu ou DC car elles imposent un champ magnétique continu ou un courant continu à l'échantillon. Les difficultés des mesures résident dans la précision demandée de la chaîne de mesure (mesurer quelques microvolts lorsque l'échantillon est traversé par des centaines d'Ampères en mesure directe électrique ou soumis à des champs magnétiques de plusieurs Tesla). On peut aussi utiliser une méthode de caractérisation dite alternative ou AC qui mesure les pertes engendrées dans un échantillon supraconducteur soumis à un champ magnétique ou à un courant électrique alternatif.

- Valider les modèles (relations  $J_c(B, T)$ ,  $N(T, B)$ ) en recoupant résultats de mesure et résultats de simulation, en analysant les limites des relations analytiques issus des modèles classiques utilisés pour les supraconducteurs à basse température critique et, le cas échéant, les modifier dans la mesure du possible. Bien entendu, des études théoriques expliquant ces comportements constituent un autre volet de nos études.

### **Actions menées et à venir**

Au cours de la première réunion du GT qui a eu lieu le 7/6/2016 à Grenoble, les membres du GT ont proposé de :

a) Mettre en commun sur une « dropbox » gérée par ou plusieurs membres pour pouvoir partager des documents de type thèse, rapports de stage master... La plateforme CNRS dédiée à cela a été choisie. Cette dropbox pourrait s'appeler le Réseau National de Connaissance des activités supras françaises.

b) Monter un projet ANR commun aux membres du GT. Le sujet serait à définir dans les prochains mois tout en sachant que les projets ANR sont concurrentiels et donc qu'il sera difficile que ce genre de projet ANR commun soit bien évalué.

c) Organiser un premier workshop d'une journée à Paris au premier semestre 2017 (mars-avril)

Le ou les sujets de celui-ci sont encore à définir clairement.

Deux sujets semblent intéressants à traiter :

- les pertes AC dans les rubans HTS
- les massifs HTS (aimantation, carte de champ magnétique...)

Le choix de ces deux sujets permettrait à chaque membre du GT de trouver un intérêt à ce workshop.

Au niveau de la modélisation le GT va définir des benchmarks sur ces deux sujets.

d) Ecrire un article de synthèse sur les travaux français dans le domaine de la supraconductivité appliquée tous les ans ou tous les deux ans. Il serait proposé à une revue internationale dans le but de rendre visible le GT au niveau international.