

Modélisations numériques des pertes en régime variable dans des tubes supraconducteurs

Guillaume Escamez^{1,2}, Arnaud Badel², Pascal Tixador², Gérard Meunier², Brahim Ramdane², Arnaud Allais¹, Christian Eric Bruzek³

¹ Nexans Research Center, 170 avenue Jean Jaurès, F-69353 Lyon Cedex 07, France

² Univ. de Grenoble Alpes, G2Elab/Ins NEEL, F-38042 Grenoble, France.
CNRS, G2Elab/Ins NEEL, F-38042 Grenoble, France.

³ Nexans, 4-10 rue Mozart, Le Christophe 2, F-92587 Clichy Cedex, France

RESUME – La découverte des supraconducteurs à haute température critique (HTS) permet aujourd’hui d’envisager leur utilisation à grande échelle. Le coût réduit de la cryogénie et leur forte stabilité permettent l’implémentation des supraconducteurs HTS dans le réseau électrique industriel (limiteurs de courant, câbles de puissance,...). Des études doivent porter sur l’optimisation de ces conducteurs notamment au niveau des pertes AC générées en alternatif ou par les contenus harmoniques pour les réseaux DC. Nexans et l’université de Grenoble étudient aujourd’hui l’optimisation de câbles supraconducteurs fonctionnant à une température de 77 K dans le but de réduire les pertes AC. Le câble de puissance étudié est composé de tubes supraconducteurs fins développés par la société Nexans. Le principal défi dans ces simulations numériques est la résolution d’un problème électro-magnétique impliquant un grand nombre de conducteurs. Des techniques d’homogénéisation et de calcul de champ magnétique de proche en proche ont été développées.

MOTS-CLES – supraconducteur, HTS, pertes AC, modélisation

1. Contexte

La découverte des supraconducteurs à haute température critique ouvre aujourd’hui le champ des possibles à de nombreuses applications nécessitant par exemple l’utilisation de forts courants. Plusieurs projets d’envergure utilisant cette technologie ont été réalisés (câbles d’énergie, limiteurs de courant). Certaines limitations empêchent aujourd’hui son utilisation à plus grande échelle : stabilité de l’état supraconducteur, pertes AC... Différentes études doivent aujourd’hui être menées sur l’optimisation de ces dispositifs. Nexans développe des conducteurs déposés innovants à base d’YBaCuO de forme cylindrique, adaptés pour augmenter les densités de courant et pour gagner ainsi encore en compacité. Dans le cas d’un câble pouvant transporter des courants supérieurs au kilo ampère, les pertes AC sont une grandeur très importante car elles impactent le dimensionnement du système cryogénique et le coût de fonctionnement. Si la modélisation des pertes AC sur des rubans YBaCuO ou des conducteurs à basse température critique (NbTi, Nb₃Sn...) est bien connue, très peu de travaux existent sur des tubes fins. Le G2Elab et l’Institut Néel travaillent avec la société Nexans sur la modélisation et la simulation numérique des pertes AC dans des tubes supraconducteurs dans le but de comparer cette géométrie par rapport aux rubans et optimiser le conducteur et le câble pour réduire les pertes AC.

2. Modélisation de tube supraconducteur

Les rubans d’YBaCuO présentent de nombreux désavantages s’ils sont utilisés pour la conception de câbles de puissance fonctionnant à l’azote liquide. La géométrie classique des rubans fins ne permet pas un taux de compacité optimal. Les rubans sont également ductiles et ne peuvent subir de fortes contraintes, ce qui limite les pas de torsadage. L’alternative développée par Nexans est un fil supraconducteur cylindrique à base de couches déposées [1]. Ces tubes

présentent un diamètre intérieur de l'ordre de 0.9 mm et une épaisseur de couche supraconductrice de 2 μm. Le prototype de câble supraconducteur envisagé par Nexans vise à transporter un courant supérieur à 1000 A. Pour cela de nombreux brins supraconducteurs seront torsadés dans l'âme du câble. De nombreux paramètres doivent être optimisés lors de la conception de ce câble : pas de torsadage, nombre de couches, épaisseur des couches. Une étude est par conséquent menée sur la modélisation des brins supraconducteurs dans leur environnement magnétique avec l'estimation des pertes AC à l'aide d'un logiciel d'éléments finis. La finesse de la couche supraconductrice par rapport au diamètre intérieur (rapport environ 1000) pose de nombreux problèmes de maillage et de convergence. En effet pour le calcul des pertes AC, seule la couche supraconductrice des tubes et son proche environnement sont importants. Le grand nombre de tubes supraconducteurs dans le câble posent de réels problèmes de maillage avec des couches de supraconducteur de l'ordre du micromètre. Pour pallier à ce problème, des techniques d'homogénéisation des lois de comportement ont été étudiées en partant d'un modèle simple d'un tube supraconducteur HTS sous champ propre (champ lié au seul courant de transport) et sous champ extérieur imposé. Un modèle de tube supraconducteur a été développé avec l'aide de logiciels commerciaux (FLUX® et COMSOL®) et comparé aux valeurs analytiques calculés pour un tube sous champ propre avec le modèle de Bean [2][3]. Différentes lois de comportement pour le supraconducteur ont été étudiées. La figure 1 présente les pertes AC dans un tube d'YBCO avec la loi de comportement classique en puissance liant le champ électrique E à la densité de courant J :

$$E = E_c \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} \frac{J}{J_c} \quad (1) \text{ avec } J_c : \text{ densité de courant critique définie pour le champ électrique } E_c \text{ (100 } \mu\text{V/m)}$$

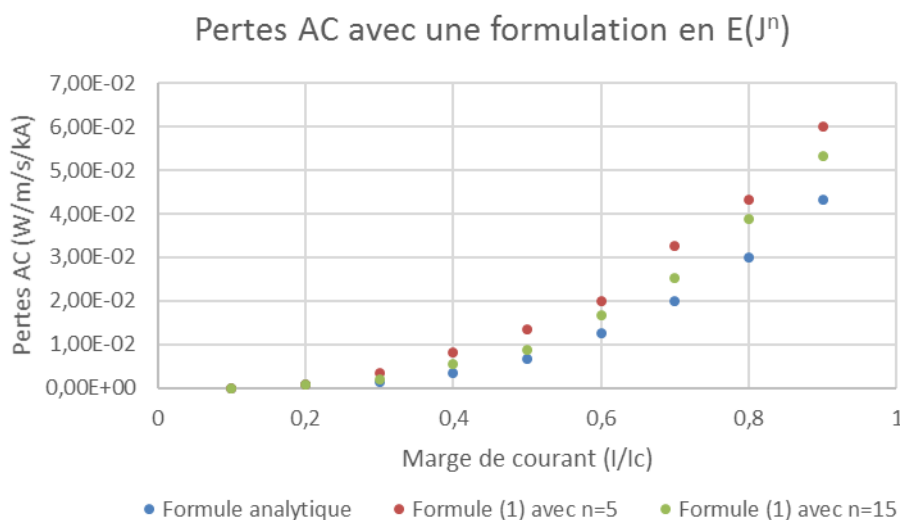


Figure 1 : Pertes AC en fonction de la marge de courant pour différentes valeurs de n à 50 hertz

D'autres formulations [4] ont été testées dans le but de se rapprocher du comportement d'un tube supraconducteur. En plus de simulations de pertes AC sous champ propre, les pertes AC peuvent être générées par un champ magnétique extérieur variable. Une étude complète de ces phénomènes est menée pour décrire ensuite le comportement d'une phase d'un câble de puissance composé de nombreux tubes apposés et torsadés entre eux. Des techniques d'homogénéisation sont ensuite utilisées pour pouvoir modéliser le problème à l'aide d'un logiciel de calcul d'éléments finis. Des modèles de calcul de pertes sont parallèlement réalisés pour rendre compte de la possibilité d'utiliser le conducteur MgB₂ comme alternative au YBaCuO dans un câble de puissance. Différents travaux ont été publiés sur les pertes pour ce conducteur mais il convient de rafraîchir ces résultats dans le cadre de plusieurs conducteurs en parallèle. Les techniques d'homogénéisation précédemment citées s'appliquent aussi dans ce cas.

3. Conclusion

Dans le but de créer des logiciels d'optimisation pour la conception d'un câble de puissance utilisant des supraconducteurs à haute température critique, des modèles de calcul de pertes AC pour différents conducteurs et différentes géométries sont étudiés. La génération des résultats à partir de ces modèles sera validée à l'aide d'un banc expérimental développé conjointement par l'université de Grenoble et Nexans, en particulier dans le cadre du projet EUROTAPES.

4. Références

- [1] C. E. Bruzek, A. Allais, S. Morice, C.-F. Theune, S. Petit, M. Mikolajczyk, N. Dechoux, C. Jimenez, E. Sarigiannidou, L. Porcar, J. Soubeyroux, P. Odier, and T. Waeckerle, “New HTS 2G Round Wires,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 5800204–5800204, Jun. 2012.
- [2] W. T. Norris, “Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac : isolated conductors and edges of thin sheets,” *J. Appl. Phys.*, vol. 3, no. 1930, pp. 489–507, 1969.
- [3] B. Douine, “Étude des pertes dans les supraconducteurs,” 2001.
- [4] M. Therasse, “Réalisation et étude de couches minces supraconductrices pour des applications industrielles,” Université de Genève, 2009.