

Caractérisation de rubans supraconducteurs pour des applications en génie électrique

Bruno Douine, Sara Fawaz, Hocine Menana, Yazid Statra
Université de Lorraine, GREEN, F-54000 Nancy, France

RESUME – La connaissance des caractéristiques d'un matériau supraconducteur est très importante pour les utilisateurs. Dans cet article sont exposées des méthodes de caractérisation DC et AC. Les méthodes présentées sont les plus utilisées jusqu'à maintenant. Nous présentons des améliorations de ces méthodes en vue de caractériser les rubans supraconducteurs HTC pour les applications en électrotechnique..

Mots-clés— Matériau supraconducteur, caractérisation..

1. INTRODUCTION

Les rubans supraconducteurs ont la propriété de transporter du courant avec des densités de courant beaucoup plus fortes que les conducteurs classiques avec des pertes quasi nulles en courant continu et très faibles en courant alternatif. Ces matériaux sont caractérisés par trois paramètres qui sont la température critique T_C , le champ magnétique critique H_C et la densité de courant critique J_C [1-2].

Dans les supraconducteurs, la relation entre J et E peut être mise sous la forme :

$$\vec{E}(J, B) = E_c \left(\frac{J}{J_c(B, T)} \right)^{n(B, T)} \frac{\vec{J}}{J} \quad (1)$$

Pour les supraconducteurs à basse température critique (BTC), l'exposant n est grand et vaut plusieurs dizaines. Mais pour les supraconducteurs à haute température critique (HTC) n varie entre 7 et 30. La valeur de n est déterminée à partir de courbes expérimentales. Si n tend vers l'infini on retrouve le modèle de l'état critique créé par Bean [3]. Celui-ci impose que la densité locale de courant dans un matériau supraconducteur est soit nulle, soit égale à sa valeur critique J_c :

$$J = \pm J_c \text{ ou } J = 0 \quad (2)$$

Les relations $J_C(B)$ utilisées les plus couramment dans la littérature sont (tableau 1) les modèles de Bean [3], de Kim [4] et linéaire [5-6].

L'étude des pertes dans les matériaux supraconducteurs est nécessaire à la mise au point d'applications dans le domaine de l'électrotechnique pour dimensionner le système cryogénique permettant de maintenir le matériau à l'état supraconducteur.

De nombreux travaux ont déjà porté sur le calcul de ces pertes [2-3] dans différents cas :

- Cylindre et plaque soumis à un champ variable externe en considérant J_C constant (Carr 1983).

- Plaque soumise à un champ variable externe en considérant J_C dépendant du champ magnétique B (Fournet et Mailfert, 1970)

- Cylindre parcouru par un courant de transport en considérant J_C constant [1,7]

Ces calculs sont basés sur l'utilisation du modèle de Bean.

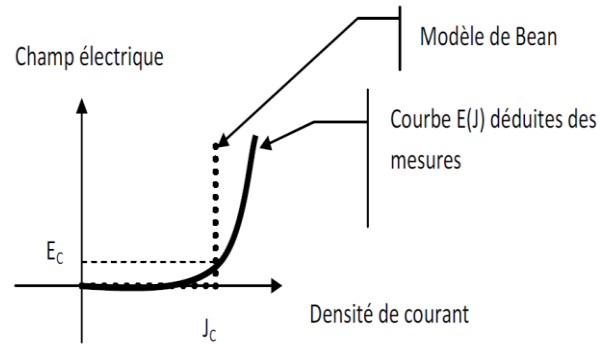


Fig. 1. Courbe $E(J)$ d'un supraconducteur

TABLEAU 1 : Les relations $J_C(B)$ les plus couramment utilisées

$J_{CB} = J_{C0}$ independant of B	Bean [3]
$J_{CK}(B) = \frac{J_{C0}}{\left(1 + \frac{ B }{B_{K0}}\right)}$	Kim [4]
$J_{CL}(B) = \frac{J_{C0}(B_{j0} - B)}{B_{j0}}$	Linéaire [5]

J_{C0} , B_{K0} and B_{j0} sont des constantes positives.

Dans cet article nous présentons la méthode électrique de détermination de $J_C(B)$ et la méthode de détermination des pertes AC d'un rubans supraconducteur HTC.

2. METHODE ELECTRIQUE DE DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA DENSITE DE COURANT CRITIQUE

Les mesures électriques de densité de courant critique des matériaux supraconducteurs sont habituellement accomplies par la méthode de mesure 4-points [6;9]. L'échantillon est alimenté par un courant continu I et une différence tension U aux bornes de l'échantillon est relevée par deux fils indépendants des amenées de courant. De manière simple voire simpliste on tire E de U par $U=E.L$ avec L la distance entre les prises de potentiel et J de I par $J=I/S$ avec S la section de l'échantillon. Ces relations ne sont valables théoriquement que si la densité de courant a entièrement pénétré l'échantillon c'est à dire dans le cas où le courant est suffisamment grand mais on utilise en général ces relations aussi en faible courant. De plus, pour les courants forts, des effets thermiques dus aux pertes dans le matériau supraconducteur et dans les résistances de contact supra-cuivre empêchent de réaliser des mesures parfaitement isothermes. Il faut donc rester prudent sur les courbes $E(J)$ déduites de ces mesures. De $E(J)$ on tire la valeur de J_c en appliquant un critère de champ électrique de $1\mu V/cm$.

Pour obtenir la courbe $J_c(B)$ expérimentale, l'échantillon alimenté avec un courant I est soumis à un champ magnétique extérieur B_{ext} parallèle à son axe. La tension U est mesurée en fonction de I pour différents champs magnétiques extérieurs

B_{ext} . Pour différencier la relation $J_c(B)$ locale présente dans le matériau de celle déduite des mesures cette dernière est notée $J_{mc}(B_{ext})$ par la suite".

Des mesures ont été faites sur un ruban supraconducteur BiSCCO dont les dimensions sont les suivantes : rayon intérieur $R_i=3,8mm$, rayon extérieur $R_e=5mm$, section $S=33mm^2$ et distance entre les prises de potentiel $h=11,7 cm$. Hors champ magnétique extérieur, le courant critique mesuré est égal à $J_{mc0} = A$, avec un critère de $1\mu V/cm$.

$J_{mc}(B_{ext})$ et $J_c(B)$ sont différents car :

- $J_c(B)$ est une grandeur microscopique et $J_{mc}(B_{ext})$ est une grandeur macroscopique
- B n'est pas égal à B_{ext} à cause du champ magnétique propre

$$B_{SF}, \vec{B} = \vec{B}_{SF} + \vec{B}_{ext}, B = \sqrt{B_{SF}^2 + B_{ext}^2}.$$

Quand la valeur de B_{ext} est suffisamment grande, B_{SF} devient négligeable et les valeurs de $J_{mc}(B_{ext})$ sont très proches de $J_c(B)$. Au contraire quand B_{ext} est proche de B_{SF} , $J_{mc}(B_{ext})$ peut-être très différent de $J_c(B)$. La loi $J_c(B)$ théorique est tiré du modèle de Kim et correspond le mieux aux mesures :

$$J_c(B) = \frac{4.6 \times 10^6}{1 + \frac{B}{0.004}} \quad (3)$$

Le modèle de Kim a été choisi car il est le plus approprié pour décrire le comportement de $J_c(B)$ dans le cas des composés granulaire de BiSCCO [8].

3. DETERMINATION DES PERTES AC

Dans ce chapitre la détermination des pertes dans les supraconducteurs est présentée et porte sur deux cas :

- Le calcul et la mesure des pertes en champ propre, c'est à dire que l'échantillon est parcouru par un courant de transport et non soumis à un champ magnétique extérieur. C'est par exemple le cas des câbles de courant de transport qui ont été déjà mis en place pour la première fois dans un

réseau électrique à New York depuis 2009. L'importance de la variation de la densité de courant critique avec le champ magnétique est mise en évidence dans cette partie.

- La mesure et l'analyse des pertes dans une bobine supraconductrice composée de rubans supraconducteurs HTC. Le but ici est d'évaluer la proportion de pertes dans le matériau supraconducteur par rapport aux pertes dans la matrice. Une des applications de ces travaux est la prévision des pertes dans les enroulements d'un moteur supraconducteur.

$$J_c(B) = \frac{3\Delta M(H)}{2R} \quad (4)$$

4. REFERENCES

- [1] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford science publications, 1983.
- [2] P. Tixador, Les supraconducteurs, Hermès, 1995.
- [3] C. P. Bean, "Magnetization of high field superconductors", Review of modern physics, 1964, p. 31-39
- [4] Y. B. Kim, C. F. Hempstead., A. R. Strnad, "Critical persistent currents in hard superconductors", Phys. Rev. Lett., volume n°9, 1962, pp. 306-309.
- [5] J. H. P. Watson, "Magnetization of Synthetic Filamentary Superconductors, the dependence of the critical current density on temperature and magnetic field", J. Appl. Phys., vol.39, n°7, juin 1968, pp.3406-3413.
- [6] B. Douine, K. Berger, J. Leveque, D. Netter, A. Rezzoug, "Influence of $J_c(B)$ on the full penetration current of superconducting tube" Physica C, vol. 443, pp. 23-28, 2006.
- [7] B. Douine, K. Berger, J. Pienkos, J. Leveque, D. Netter, "Analytical calculation of the instantaneous power in a current carrying superconducting tube with $J_c(B)$ ", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 18, n°3, septembre 2008, pp.1717-1723
- [8] S. Senoussi, "Review of the critical current densities and magnetic irreversibilities in high T_c superconductors", Journal de physique III, Vol. 2, 1992, pp. 1041-1257.
- [9] B. Douine, K. Berger, J. Leveque, D. Netter, O. Arbey, N. Barthelet, "Self field effect compensation in a HTS tube", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 18, n°3, septembre 2008, pp.1698-1703.
- [10] B. Douine, J. Leveque, S. Mezani, "JC(B) determination method with the help of the virgin magnetization curve of a superconducting cylinder", I.E.E.E. transactions on applied superconductivity, vol. 20 (2), pp.82-86, 2010.