



HAL
open science

Caractérisation électromagnétique de matériaux conducteurs non conventionnels

Hocine Menana, Bruno Douine, Kévin Berger, Jean Lévêque, Melika Hinaje

► **To cite this version:**

Hocine Menana, Bruno Douine, Kévin Berger, Jean Lévêque, Melika Hinaje. Caractérisation électromagnétique de matériaux conducteurs non conventionnels. Symposium de Génie Electrique (SGE 2016): Electrotechnique du Futur (EF), Electronique de Puissance du Futur (EPF) et Matériaux pour le Génie Electrique (MGE), Jun 2016, Grenoble, France. p. 44, id. 87106 - SP-2: 25. hal-01286551v1

HAL Id: hal-01286551

<https://hal.science/hal-01286551v1>

Submitted on 11 Mar 2016 (v1), last revised 23 Jun 2016 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation électromagnétique des matériaux conducteurs nonconventionnels

Hocine MENANA, Bruno DOUINE, Kévin BERGER, Jean LEVEQUE, Melika HINAJE
GREEN, Université de Lorraine, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France.

RESUME – Cet article présente une synthèse de quelques approches développées pour la caractérisation électromagnétique de deux types de matériaux conducteurs non-conventionnels : les matériaux composites à fibres de carbone et les supraconducteurs. Chacun de ces matériaux présente des propriétés spécifiques et, de ce fait, exige des approches de caractérisation particulières.

Mots-clés—Caractérisation électromagnétique, conductivité électrique, composites conducteurs, supraconducteurs.

1. INTRODUCTION

La connaissance des lois de comportement des matériaux est primordiale pour leur intégration dans les codes de simulation pour le dimensionnement et l'optimisation des systèmes. Hélas, les propriétés physiques des matériaux, mêmes conventionnelles, ne sont pas toujours connues de manière précise ; une caractérisation une fois le matériau construit est souvent nécessaire. Ce besoin est encore plus accru lorsqu'il s'agit de matériaux non conventionnels tels que les matériaux composites ou supraconducteurs. En effet, ce sont des matériaux synthétiques dont les propriétés peuvent varier considérablement d'un échantillon à un autre en fonction de la composition qui n'est pas toujours parfaitement maîtrisée.

La caractérisation des matériaux nécessite un travail théorique important et la mise au point de techniques expérimentales dont la mise en œuvre peut s'avérer parfois très difficile, en particulier pour ce type de matériaux dont la structure peut être complexe et anisotrope, et qui peuvent présenter des comportements fortement non-linéaires. On peut distinguer deux types de méthodes de caractérisation: les méthodes directes et indirectes. Les méthodes directes sont basées sur la mesure de grandeurs locales (champs), et les méthodes indirectes, sur la mesure de grandeurs globales (courant, tension, impédance). Les mesures indirectes sont souvent plus simples à mettre en œuvre, mais, elles présentent la difficulté de la reconstitution d'une loi locale à partir de mesures de grandeurs globales. Dans les deux cas le problème de la modélisation physique des phénomènes et de leur simulation numérique reste entier. L'autre aspect de ce problème est qu'une fois connue la loi de comportement d'un échantillon, il faut la développer à l'échelle d'un composant, comme par exemple : passer d'un échantillon de fil supraconducteur à une bobine supraconductrice dans son environnement.

La caractérisation des matériaux est un domaine très large, ainsi, nous nous limitons ici à la caractérisation de la conductivité électrique des matériaux composites à fibres de

carbone et des supraconducteurs. L'objectif étant de donner un aperçu des difficultés rencontrées et de quelques approches développées pour la caractérisation de ces deux types de matériaux qui présentent des propriétés physiques et géométriques non-conventionnelles.

2. MATERIAUX COMPOSITES A FIBRES DE CARBONE

Les matériaux composites ont de nombreux avantages comparés aux matériaux conventionnels, notamment la légèreté et la résistance mécanique. Leur utilisation s'est généralisée à plusieurs secteurs industriels tels que l'aérospatial, les transports sous toutes ses formes, la santé et les loisirs. Certains types de matériaux composites sont conducteurs d'électricité et sont, de ce fait, actifs du point de vue électromagnétique, même en basses fréquences. La caractérisation de la conductivité de ces matériaux est d'un intérêt majeur pour les systèmes qui les intègrent (CEM, CND...) Nous nous sommes particulièrement intéressés aux matériaux composites à fibres de carbone à matrice organique (CFRPs), dont la structure est présentée dans la Fig.1. Ils sont composés de plusieurs couches (plis) unidirectionnels d'environ 125 μm d'épaisseur, empilées avec différentes orientations de fibres. Chaque pli est constitué de fibres de carbone alignées dans la même direction et noyées dans une matrice en polymère. Le diamètre des fibres varie de 8 à 15 μm ; ainsi une dizaine de fibres sont disposées suivant l'épaisseur d'un pli [1]. Dans chaque pli, la conductivité électrique dépend de la nature et de la fraction volumique des fibres. Elle varie entre 5×10^3 et 5×10^4 S/m dans la direction des fibres, et entre 10 et 2×10^2 S/m dans la direction transversale [2]. Lorsque les plis sont assemblés par l'opération de polymérisation, des contacts se créent entre les fibres des plis adjacents, donnant lieu à une conductivité suivant l'épaisseur du stratifié, et dont la valeur est d'environ la moitié de la valeur de la conductivité dans la direction transversale aux fibres dans un pli [2].

Les difficultés rencontrées dans la caractérisation de ce type de matériaux sont liées à leurs structures hétérogènes en couches minces et à leurs fortes anisotropies qui compliquent à la fois la modélisation et les mesures. Des méthodes d'homogénéisation et de caractérisation en courant continu à l'aide de la méthode des pointes ont été utilisées pour déterminer la conductivité des CFRPs. L'homogénéisation consiste à définir les propriétés globales du matériau à l'échelle macroscopique, grâce aux informations dont on dispose à l'échelle microscopique. Il est donc nécessaire de connaître la structure du matériau et les propriétés physiques de ses constituants [3]. La mesure directe

par la méthode des points est associée à la résolution analytique de la loi d'Ohm et de la loi de conservation du courant électrique sur des géométries relativement simples [4]. Cependant, cette méthode dépend fortement du positionnement des points.

Comme alternative à ces méthodes, nous avons développé une méthode de caractérisation par courants de Foucault, basée sur une structure originale de capteur rectangulaire tournant [5].

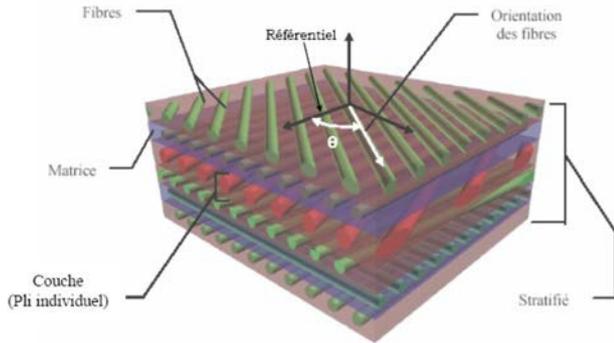


Fig. 1 Structure d'un stratifié en composite à fibres de carbone (CFRP)

3. MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS

Les matériaux supraconducteurs ont la propriété de transporter un courant continu ou alternatif avec des pertes nettement plus faibles que les conducteurs classiques. D'autre part, ils peuvent supporter des densités de courant très importantes. Ils se trouvent sous différentes formes : pièces massives, conducteurs mono ou multi filamentaires et films. Ils sont caractérisés par trois grandeurs critiques qui sont la température critique T_c , le champ magnétique critique H_c et la densité de courant critique J_c [6]. Le matériau est supraconducteur en dessous d'une surface critique représentée dans la Fig.2, au-delà, le matériau est à l'état normal.

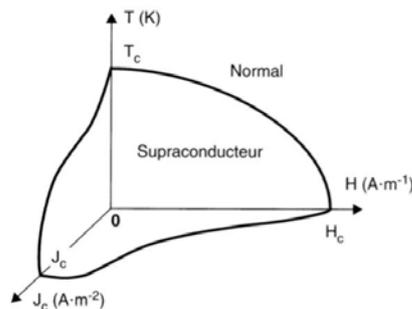


Fig. 2 Surface critique d'un supraconducteur

La relation $E(J)$ entre le champ électrique E et la densité de courant J est non linéaire et dépend de l'induction B et de la température T . Elle s'exprime comme suit :

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

Le paramètre n varie entre 5 et 50 pour les supraconducteurs à Haute Température critique (HTc) et vaut plusieurs dizaines pour les supraconducteurs à Basse Température critique (BTc). Le champ électrique critique E_c est généralement fixé à $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ [7]. Les expressions les plus utilisées pour représenter J_c sont : le modèle de Bean (J_c constant), le modèle de Kim [7]. La linéarisation du modèle de Kim a notamment permis le calcul analytique des pertes et de la répartition de courant dans un matériau supraconducteur [8].

La loi $J_c(B)$ d'un matériau supraconducteur peut être déterminée de plusieurs façons [9]. Deux méthodes sont

particulièrement utilisées : une méthode électrique, où l'échantillon est en contact avec le système de mesure, et une méthode magnétique, où l'échantillon n'est pas en contact avec le système de mesure.

Dans la méthode électrique, on relève la courbe $U(I)$ en courant continu. Les mesures électriques de densité de courant critique sont habituellement accomplies par la méthode de mesure à 4-points [9]. Pour obtenir la courbe $J_c(B)$, la tension U est mesurée en fonction de I pour différentes valeurs du champ magnétique extérieur B_{ext} . C'est une méthode simple à mettre en œuvre, mais elle présente certains inconvénients, dont la présence permanente du champ magnétique propre créé par l'échantillon et qui vient se superposer au champ magnétique extérieur imposé. Pour des valeurs du champ magnétique extérieur proches de celles du champ propre du matériau, la relation $J_c(B)$, qui est une relation locale (microscopique), peut être très différente de $J_c(B_{\text{ext}})$ mesurée, qui, quant à elle est une grandeur macroscopique. Une méthode de compensation du champ propre a été proposée par Douine *et al.* [10]. Les relations utilisées ne sont valables théoriquement que si la densité de courant pénètre entièrement l'échantillon, c'est-à-dire dans le cas où le courant est suffisamment grand. D'un autre côté, pour les forts courants, 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.

La méthode magnétique consiste à appliquer un champ magnétique extérieur à un échantillon supraconducteur et à relever son aimantation créée par des supra-courants. L'avantage de cette méthode est l'absence de contact avec la mesure. L'inconvénient est que la détermination des paramètres à partir de l'aimantation est basée sur des hypothèses fortes : elle suppose l'utilisation de géométries bien spécifiques et se base sur le modèle de Bean où J_c est constant afin d'obtenir $J_c(B)$. Par ailleurs, cette méthode est valide uniquement si l'échantillon est complètement pénétré par le champ magnétique.

4. REFERENCES

- [1] L. Berreur, B. De Maillard, S. Nöspinger, "L'industrie française des matériaux composites", Rapport de synthèse, 13 Mai 2002.
- [2] S. B. Pratap, and W. F. Weldon, "Eddy current in anisotropic composites applied to pulsed machinery", IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 2, pp.437-444, March 1996.
- [3] D. Trichet, E. Chauveau, and J. Fouladgar "Asymptotic Calculation of Equivalent Electromagnetic and Thermal Properties for Composite Materials", IEEE Trans. Mag., vol. 36, no. 4, pp. 1193-1196, July 2000.
- [4] J. B. Park, T. K. Hwang, H. G. Kim and Y. D. Doh, "Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composites", Smart Mat. Struct., vol. 16, pp. 57-66, 2007.
- [5] H. Menana, M. Féliachi, "Electromagnetic Characterization of the CFRPs anisotropic conductivity: modeling and measurements", Eur. Phys. J. Appl. Phys. 53, 21101, 2011.
- [6] P. Tixador., Les supraconducteurs, Paris, Hermès, 1995.
- [7] B. Douine, K. Berger, J. Lévêque, 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.
- [8] B. Douine, K. Berger, J. Pienkos, J. Lévêque, 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, pp.1717-1723, Sept. 2008.
- [9] S. Senoussi, "Review of the critical current densities and magnetic irreversibilities in high T_c superconductors", Journal de physique III, vol. 2, pp. 1041-1257, 1992.
- [10] B. Douine, K. Berger, J. Lévêque, D. Netter, O. Arbey, N. Barthelet, "Self field effect compensation in a HTS tube", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 18, n°3, pp.1698-1703, Sept. 2008.