

Détermination de la caractéristique $E(J, B)$ d'un ruban supraconducteur, à partir de mesures sur une bobine, et d'un champ magnétique appliqué par des aimants permanents

Julien LECLERC, Kévin BERGER, Bruno DOUINE, Jean LÉVÊQUE

GREEN, Université Henri Poincaré Nancy 1,
Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy
julien.leclerc@green.uhp-nancy.fr, kevin.berger@green.uhp-nancy.fr,
bruno.douine@green.uhp-nancy.fr, jean.leveque@green.uhp-nancy.fr

Résumé – Nous proposons une méthode originale de caractérisation des rubans supraconducteurs à partir de mesures électriques sur une bobine. Le principe est de mesurer la caractéristique tension-courant du solénoïde pour différentes inductions magnétiques extérieures appliquées. Un algorithme permet ensuite de trouver les paramètres d'un modèle de la loi $E(J, B)$ du supraconducteur qui approxime au mieux les courbes expérimentales. Cette méthode possède de nombreux avantages par rapport aux mesures classiques par courant de transport. Par exemple, les tensions sont plus faciles à mesurer. Ce procédé a été utilisé pour caractériser un ruban BiSCCO, refroidi à l'azote liquide, en utilisant des aimants permanents comme source d'induction magnétique extérieure. Les paramètres de plusieurs modèles ont ainsi pu être obtenus et comparés.

ABSTRACT – We propose an original method for the characterization of superconducting tapes from electrical measurements on a coil. The principle is to measure the voltage-current characteristic of the solenoid for different external applied flux density. An algorithm is then used to find parameters of a model of the $E(J, B)$ law that best fit experimental curves. This method has many advantages compared to the conventional measurements on shorts samples. For example, voltages are easier to measure. This process was used to characterize a BiSCCO tape, cooled into liquid nitrogen, using permanent magnets as a source of external flux density. Parameters of several models have been obtained and compared.

Mots-clés – supraconducteurs, caractérisation, ruban, champ magnétique, aimant permanent, bobine.

1. Introduction

La découverte en 1986 des supraconducteurs à haute température critique a suscité un vif intérêt auprès de la communauté des électrotechniciens. En effet, ces matériaux pouvant être utilisés à des températures supérieures à 30 K, leur refroidissement peut être assuré avec une puissance cryogénique moindre que celle requise par les supraconducteurs à basse température critique. Leurs propriétés électriques et magnétiques remarquables permettent d'envisager la création de nouveaux appareils, par exemple les limiteurs de courant [1], ou d'accroître les performances de dispositifs existants [2], telles que les machines électriques [3].

Cependant, le dimensionnement de bobinages supraconducteurs nécessite de connaître les propriétés du fil utilisé, plus particulièrement la loi de variation du champ électrique E en fonction de la densité de courant J et de l'induction magnétique B , i.e., la loi $E(J, B)$.

Cette loi est habituellement déterminée par une mesure électrique sur un échantillon court de quelques centimètres. Avec cette méthode appelée « méthode électrique » ou « par courant de transport » (qui sera notée par la suite méthode CT), la tension U est relevée en fonction du courant I par une mesure 4 fils pour plusieurs inductions extérieures appliquées B_{ext} [4]. On déduit la loi $E(J, B_{ext})$ de ces mesures $U(I, B_{ext})$ grâce aux simples relations $J = I/S$ et $E = U/L$, S étant la section du conducteur et L la distance entre les prises de potentiels.

Cependant, cette méthode a trois principaux inconvénients. Premièrement, les tensions aux bornes de l'échantillon sont extrêmement faibles (quelques microvolts), donc très difficiles à mesurer. Deuxièmement, les mesures ne sont pas effectuées dans les futures conditions d'utilisation du conducteur car il n'est pas bobiné. Troisièmement, la loi obtenue

ne dépend que de l'induction extérieure B_{ext} et non de l'induction réelle B car l'induction propre de l'échantillon est négligée [5]. Pour remédier à ces problèmes, nous proposons une méthode originale de caractérisation des rubans supraconducteurs.

Le principe est d'effectuer des mesures de la caractéristique tension-courant d'une bobine supraconductrice, conçue à partir de quelques mètres du conducteur à caractériser. Ces mesures sont effectuées pour différentes valeurs d'induction magnétique appliquée B_{ext} . Un modèle comportant plusieurs paramètres doit également être choisi pour représenter correctement la loi du supraconducteur. Un algorithme informatique permet ensuite de déterminer les paramètres de ce modèle, qui approchent au mieux les courbes expérimentales, en tenant compte de l'induction propre de la bobine. Le conducteur est ainsi caractérisé dans ses conditions futures d'utilisation. De plus, les tensions aux bornes de la bobine sont beaucoup plus importantes que dans le cas d'un échantillon court, donc plus faciles à mesurer.

Cette méthode a été utilisée pour caractériser un ruban BiSCCO fabriqué par Trithor. Le champ magnétique a été appliqué à la bobine en utilisant deux aimants NdFeB. Cela permet d'éviter l'utilisation d'une bobine de champ qui est plus coûteuse et nécessite une alimentation supplémentaire.

2. Description de la méthode

2.1 Calcul numérique

Le fonctionnement de la méthode repose sur le calcul numérique. Il s'agit de trouver les paramètres d'un modèle qui permettent d'approcher au mieux les mesures. Pour ceci, un programme a été développé sous Matlab.

La caractéristique $E(J, B)$ du ruban supraconducteur est modélisée par une loi en puissance (1), E_c étant le champ électrique critique usuellement de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$. Différents modèles peuvent être utilisés pour représenter la dépendance en B de J_c et de n (Tableau 1). Par exemple, le Modèle 1 est inspiré du modèle de Kim [6]. $|B_{\perp}|$ est la valeur absolue de la composante de l'induction perpendiculaire à la plus grande face du ruban.

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

Le rayon intérieur de la bobine est noté R_i , le rayon extérieur R_e et l'épaisseur totale Ep . Une fonction permet de calculer, grâce à l'expression (2), la courbe tension-courant théorique de cette bobine, notée $U_{th}(I_{th}, B_{ext})$, pour un jeu de paramètres du modèle donné, et pour une certaine induction appliquée. Pour ceci, l'induction magnétique B doit être calculée en tout point de la bobine. Elle est la somme de l'induction propre B_{self} et de celle créée par les aimants B_{ext} . L'induction propre est calculée grâce à la méthode décrite dans [7]. Celle-ci se révèle être plus performante que l'utilisation directe de la loi de Biot et Savart, en raison d'un temps de calcul plus court. L'induction produite par les aimants est, quant à elle, calculée par la méthode ampérienne [8].

$$U_{th}(I_{th}, B_{ext}) = \frac{4\pi N}{L(R_e - R_i)} \int_0^{Ep/2Re} \int_{R_i} E \left(\frac{I_{th}}{S}, B_{ext}(r, z) + B_{self}(r, z) \right) r dr dz \quad (2)$$

Tableau 1. Modèles utilisés pour représenter la dépendance en B de J_c et n

Modèle	$J_c(B)$	$n(B)$
Modèle 1	$\frac{J_{c1}}{1 + B_{\perp} / B_{j1}}$	$\frac{n_1}{1 + B_{\perp} / B_{n1}}$
Modèle 2	$\frac{J_{c2}}{(1 + B_{\perp} / B_{j2})^{\beta_2}}$	$\frac{n_2}{1 + B_{\perp} / B_{n2}}$
Modèle 3	$\frac{J_{c3}}{(1 + \sqrt{k B_{j1}^2 + B_{\perp}^2} / B_{j3})^{\beta_3}}$	$\frac{n_3}{1 + B_{\perp} / B_{n3}}$

L'intégrale double présente dans l'équation (2) est calculée grâce à la fonction *dblquad* disponible dans Matlab. En admettant que le courant est uniformément réparti à travers la section S du supraconducteur, il est possible d'obtenir la tension aux bornes de la bobine pour une valeur quelconque de courant imposé. Les courbes $U_{th}(I_{th}, B_{ext})$ peuvent ainsi être reconstituées, et ce, pour différentes valeurs d'induction appliquée, e.g., pour différentes positions des aimants.

La fonction de minimisation *lsqnonlin* de Matlab est ensuite utilisée pour trouver les paramètres du modèle qui approximent au mieux les courbes expérimentales. Comme expliqué dans le paragraphe suivant, il est préférable de disposer de plusieurs courbes $U_{th}(I_{th}, B_{ext})$, chacune mesurée avec une induction appliquée différente, puis d'effectuer la minimisation sur l'intégralité des points de mesure. En effectuant la minimisation de (3), n_p étant le nombre de points de mesure par courbe et n_c le nombre de courbes, l'algorithme converge très lentement vers la solution. La minimisation de (4) est plus performante car elle permet de trouver la solution en un temps beaucoup plus court (environ 10 fois moins d'itérations sont nécessaires).

$$err_1 = \sum_{k=1}^{n_c} \sum_{i=1}^{n_p} (U_{th(i,k)} - U_{exp(i,k)})^2 \quad (3)$$

$$err_2 = \sum_{k=1}^{n_c} \sum_{i=1}^{n_p} (\ln(U_{th(i,k)}) - \ln(U_{exp(i,k)}))^2 \quad (4)$$

Afin d'évaluer l'erreur commise sur la détermination des paramètres en fonction du nombre de courbes utilisées, plusieurs recherches de paramètres ont été effectuées, à partir de courbes générées via Matlab puis bruitées. Il en est ressorti que, plus le nombre de courbes utilisées est important, plus l'erreur sur les paramètres trouvés est faible. De plus, l'utilisation de notre méthode est impossible avec une seule courbe, car un très faible bruit (0,018 % de la tension critique soit environ 1 μ V dans le cas de la bobine qui a été utilisée expérimentalement) induit une très grande erreur sur les résultats (plus de 100 % d'écart sur certains paramètres).

L'erreur induite par les imperfections du bobinage est quant à elle négligeable. En effet, les mesures étant effectuées sur une longueur de ruban importante, leur effet est minime devant la tension générée par le reste du conducteur.

2.2 Dispositif expérimental

Les caractéristiques de la bobine utilisée pour les expérimentations, sont présentées dans le Tableau 2. Le modèle choisi, dans un premier temps, pour représenter la loi $E(J, B)$ du ruban, est celui décrit par le Modèle 1. Dans cette modélisation, seule l'induction perpendiculaire au ruban est prise en compte. En effet, celle-ci dégrade beaucoup plus les propriétés du ruban que l'induction parallèle [9]. Ainsi, l'effet de cette dernière est négligé. Par conséquent, l'induction appliquée à la bobine devra avoir une forte composante perpendiculaire au ruban pour que son influence sur la mesure puisse être perceptible.

Le dispositif expérimental utilisé pour les mesures est présenté sur la Figure 1. Deux aimants NdFeB, ayant deux pôles identiques qui se font face, sont placés de part et d'autre de la bobine. Ils permettent d'appliquer une induction magnétique principalement radiale à cette dernière, c'est-à-dire, perpendiculaire au ruban. Le tout est maintenu par des brides en aluminium, qui, vissées sur une tige filetée en laiton, permettent aussi d'ajuster la distance d entre les aimants. C'est en faisant varier cette distance que des valeurs différentes d'induction magnétique peuvent être appliquées à la bobine. Les caractéristiques des aimants sont présentées dans le Tableau 3.

L'ensemble a été refroidi à 77 K, température de l'azote liquide. Les mesures électriques ont été effectuées par la méthode des 4 fils. Une alimentation de puissance Xantrex XFR 7.5-300 réglée en courant a permis d'alimenter la bobine. La tension a été mesurée en différentiel via un nanovoltmètre Keithley 2182 relié à deux fils servant de prises de potentiel.

Tableau 2. Caractéristiques de la bobine supraconductrice.

Type de bobinage	1 double galette
Rayon intérieur R_i	30,5 mm
Rayon extérieur R_e	56,5 mm
Epaisseur E_p	8,2 mm
Nombre de spires N	206
Section du fil S	0,814 mm ²
Matériau	BiSCCO

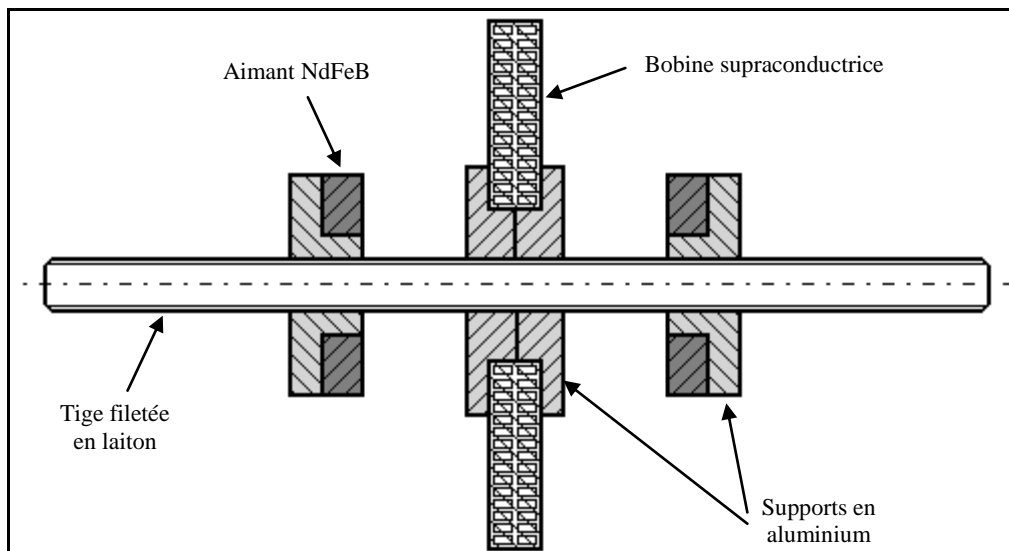


Figure 1 : Schéma du support permettant le maintien et le positionnement de la bobine et des deux aimants.

Tableau 3. Caractéristiques des aimants utilisés pour imposer une induction magnétique extérieure à la bobine supraconductrice

Matériau	NdFeB-N38
Induction rémanente @77 K	1,26 T
Rayon intérieur	10 mm
Rayon extérieur	25 mm
Epaisseur	10 mm

3. Résultats expérimentaux

Les mesures ont été effectuées pour 5 positions différentes des aimants. La recherche des paramètres a tout d'abord été réalisée en utilisant le Modèle 1. Les courbes expérimentales ainsi que leurs approximations sont présentées dans la Figure 2 et les paramètres optimaux obtenus sont fournis dans le Tableau 4.

Les points de mesure montrent bien une caractéristique en puissance, comme celle décrite par (1) : pour chaque valeur d'induction magnétique appliquée, la courbe $\ln(U/U_c) = f(\ln(I/I_0))$ est approximativement une droite, U_c et I_0 étant respectivement la tension critique de la bobine et un courant de normalisation de 1 A. Les légères non-linéarités observées, en particulier sur les mesures pour $d = 224$ mm, sont dues au champ magnétique propre de la bobine. De plus, l'effet de l'induction magnétique extérieure est très visible : plus celle-ci est élevée, plus les courbes sont décalées vers la gauche, car le courant critique diminue, et plus leur pente devient faible, car l'exposant de la loi en puissance diminue aussi.

Nous pouvons remarquer qu'un écart significatif subsiste entre les mesures et leur approximation avec le Modèle 1. Le résidu de cette minimisation est de 0,023 par point. C'est pourquoi, nous avons décidé de tester d'autres modèles.

Les modèles 2 et 3 (Tableau 1) permettent d'obtenir des résidus beaucoup plus réduits. Ils sont environ 7 fois plus faibles. La Figure 3 montre un tracé des courbes expérimentales et de leur approximation en utilisant le Modèle 3. Nous pouvons remarquer que ce modèle permet d'approcher beaucoup mieux les valeurs expérimentales que le Modèle 1. Le Tableau 4 montre les paramètres optimaux obtenus pour les trois modèles ainsi que la valeur de leurs résidus. Au vu de ces derniers, nous pouvons conclure que les modèles 2 et 3 représentent plus fidèlement le comportement du supraconducteur car les résidus de leur approximation sont plus faibles.

Le Modèle 3 tient compte de l'effet de la composante parallèle au ruban. Cependant, la faible valeur du paramètre k , montre bien qu'elle peut être négligée.

Le tracé des courbes $J_c(B_{\perp})$ et de $n(B_{\perp})$ pour les trois modèles (Figure 4) montre que les modèles 2 et 3 sont très proches. Ceci renforce l'idée que la caractéristique réelle du ruban doit être très semblable à ces deux modèles. Le Modèle 1 est quand à lui plus éloigné. Les valeurs de J_c et n observées à induction magnétique nulle montrent des valeurs légèrement inférieures à des mesures effectuées antérieurement dans notre laboratoire, sur des échantillons courts. La dégradation progressive du supraconducteur au cours du temps, provoquée par de multiples cycles de refroidissement-réchauffement, peut expliquer la différence observée.

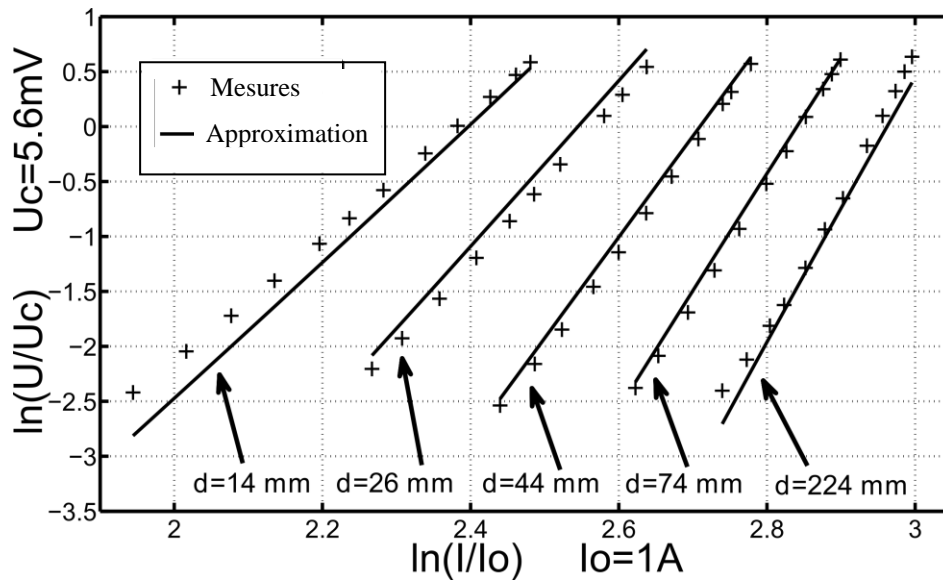


Figure 2 : Comparaison des mesures électriques effectuées sur la bobine, et de leurs approximations en utilisant le Modèle 1.

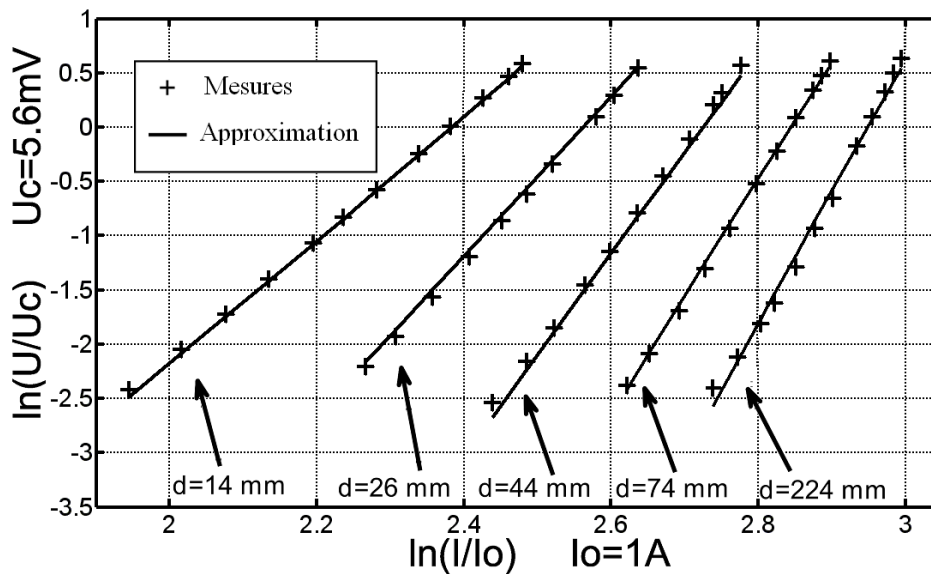


Figure 3 : Comparaison des mesures électriques effectuées sur la bobine, et de leurs approximations en utilisant le Modèle 3.

Tableau 4. Paramètres optimaux et résidus obtenus lors de la minimisation de (4) pour chacun des trois modèles.

Modèle 1		Modèle 2		Modèle 3	
J_{c1}	57,2 A/mm ²	J_{c2}	36 A/mm ²	J_{c3}	37,3 A/mm ²
B_{j1}	0,035 T	B_{j2}	0,379 T	B_{j3}	0,307 T
n_1	9,17	n_2	12	n_3	11,7
B_{n1}	0,275 T	B_{n2}	0,124 T	B_{n3}	0,129 T
		β_2	3,66	β_3	3,15
				k	0,0951
Résidu	0,023 par point	Résidu	0,0033 par point	Résidu	0,0032 par point

Pour utiliser les résultats de cette caractérisation dans le calcul d'un bobinage supraconducteur, il serait donc préférable d'utiliser les modèles 2 ou 3, le Modèle 3 étant plus approprié si l'induction magnétique possède une forte composante parallèle au ruban. Cependant, ayant une expression plus compliquée que celle du Modèle 1, il est possible que lors de leur implantation dans un logiciel de calcul numérique, le temps nécessaire à la résolution du problème devienne plus long.

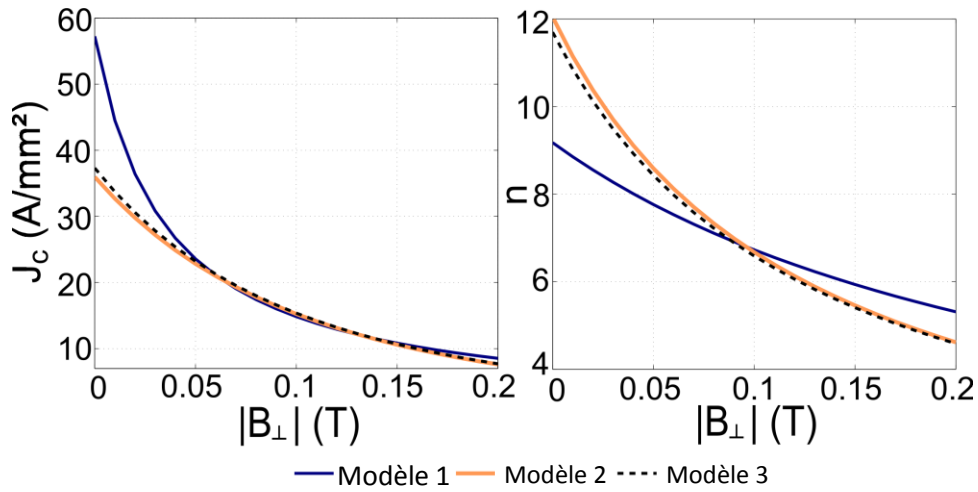


Figure 4 : Tracé des courbes $J_c(B_{\perp})$ et $n(B_{\perp})$ pour les trois modèles décrits dans le Tableau 1, avec les paramètres optimaux obtenus.

4. Comparaison de la nouvelle méthode et de la méthode de mesure par courant de transport au niveau de leur coût et de leur précision.

Dans cette section, les signaux temporels sont écrits en minuscules. Leur valeur efficace correspondante portent le même nom de variable mais commencent par une majuscule.

4.1 Estimation du rapport signal sur bruit

4.1.1 Nouvelle méthode

Nous avons estimés le rapport signal sur bruit obtenu par notre nouvelle méthode en fonction du nombre de spires de la bobine test. Ce calcul est effectué pour une tension mesurée U_m égale à la tension critique :

$$U_m = 2\pi R_{moy} N E_c \quad (5)$$

$$\text{avec } R_{moy} = \frac{R_i + R_e}{2} = R_i + \frac{N e_p}{4}$$

e_p étant l'épaisseur du ruban supraconducteur.

La tension de bruit $u_b(t)$ est composée de deux parties. La première, notée $u_{bc}(t)$, est de valeur efficace constante et correspond au bruit interne du nanovoltmètre. La seconde, $u_{bv}(t)$, est une tension induite par la variation du champ magnétique $db_{ext}(t)/dt$ présent dans l'environnement de la mesure. Nous admettons que :

$$U_b = U_{bv} + U_{bc} \quad (6)$$

Cette dernière expression valable si $u_{bv}(t)$ et $u_{bc}(t)$ sont des signaux sinusoïdaux en phase. Nous admettons, afin de simplifier l'étude que c'est le cas. Nous nous permettons de faire cette hypothèse car, il ne s'agit pas ici d'obtenir des résultats précis, mais plutôt une estimation du rapport signal sur bruit. Notons que, si l'on ne considère que le premier harmonique de ces tensions, l'hypothèse des signaux en phase est la plus défavorable.

$u_{bv}(t)$ est égale à la dérivée du flux total traversant la bobine par rapport au temps, nous avons donc :

$$U_{bv} = \omega B_{ext} S_{tot} \quad (7)$$

Notons que si $u_{bv}(t)$ est sinusoïdal, alors $b_{ext}(t)$ l'est nécessairement aussi, ω étant la pulsation du signal.

S_{tot} est la somme des sections de chaque spires de la bobine. Elle peut s'exprimer sous cette forme :

$$S_{tot} = \frac{N\pi}{3} \left(R_{moy}^2 \frac{4N-4}{N-2} - R_i R_e \frac{N+2}{N-2} \right) \quad (8)$$

Nous obtenons finalement, à partir des équations (6), (7) et (8) :

$$U_b = \omega B_{ext} \frac{N\pi}{3} \left(R_{moy}^2 \frac{4N-4}{N-2} - R_i R_e \frac{N+2}{N-2} \right) + U_{bc} \quad (9)$$

Soit :

$$U_b = \omega B_{ext} \frac{N\pi}{3} \left(\left(R_i + \frac{Ne_p}{4} \right)^2 \frac{4N-4}{N-2} - R_i \left(R_i + \frac{Ne_p}{2} \right) \frac{N+2}{N-2} \right) + U_{bc} \quad (10)$$

Le nanovoltmètre permet d'effectuer rapidement un grand nombre de mesures. Au sens statistique, il mémorise une population composée de N mesures de tension. Il permet ensuite de calculer des grandeurs statistiques sur cette population, notamment l'écart-type. L'écart-type σ d'une population composée de N mesures d'une tension $u(t)$ contenant une tension de bruit $u_b(t)$ est définie par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u(t_i) - \langle u(t) \rangle)^2}$$

Dans notre cas, le signal utile est une tension continue de valeur U_m . Etant donné que la valeur moyenne d'une tension de bruit est nulle, nous avons : $u(t_i) - \langle u(t) \rangle = u(t_i) - U_m = u_b(t_i)$.

Donc :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_b(t_i)^2}$$

Si N est grand :

$$\sigma = \sqrt{\langle u_b(t_i)^2 \rangle} = U_b \quad (11)$$

L'écart-type de la population mesurée par le nanovoltmètre correspond donc à la valeur efficace de la tension de bruit.

Nous avons programmés le nanovoltmètre pour qu'il acquière une population composée de 1000 mesures de tension. Dans un premier temps nous avons effectués ces mesures en court-circuitant l'appareil par un court fil torsadé. L'écart-type ainsi obtenu est de $1,53 \mu\text{V}$. Il est égal, d'après l'équation (11) à U_b . La mesure est ici effectuée avec un nombre de spires N nulle. En utilisant (9), nous obtenons $U_b = U_{bc} = 1,53 \mu\text{V}$.

De même, lors des mesures sur la bobine supraconductrice, l'écart-type obtenu était de $33 \mu\text{V}$. En introduisant dans (10) les caractéristiques géométriques de la bobine, nous obtenons $\omega B_{ext} = 2,28 \cdot 10^{-5} \text{T/s}$.

Ainsi, à partir des équations (5) et (10) nous pouvons exprimer le rapport signal sur bruit, en dB, en fonction du rayon intérieur de la bobine, de l'épaisseur du ruban et du nombre de spires :

$$\left(\frac{\text{Signal}}{\text{Bruit}} \right)_{dB} = 20 \log \left(\frac{2\pi N E_c \left(R_i + \frac{Ne_p}{4} \right)}{2,28 \cdot 10^{-5} \frac{N\pi}{3} \left(\left(R_i + \frac{Ne_p}{4} \right)^2 \frac{4N-4}{N-2} - R_i \left(R_i + \frac{Ne_p}{2} \right) \frac{N+2}{N-2} \right) + 1,53 \cdot 10^{-6}} \right) \quad (12)$$

4.1.2 Méthode de mesures par courant de transport

Des mesures ont été effectuées dans notre laboratoire sur un échantillon court. Par la même méthode que précédemment, nous avons mesuré une tension de bruit ayant une valeur efficace de $1,77 \mu\text{V}$ pour une tension moyenne égale à la tension critique, c'est-à-dire $10 \mu\text{V}$. Le rapport signal sur bruit obtenu lors de mesures sur échantillons courts est donc de $20 \log(10/1,77)$ soit $15,04 \text{ dB}$.

4.2 Evaluation des coûts

Le Tableau 5 récapitule les différents appareils nécessaires pour chaque méthode ainsi que leur coût. Le prix de notre nouvelle méthode dépend de la longueur de ruban utilisé, c'est-à-dire du nombre de spires de la bobine. Le prix P_r du ruban peut facilement être évalué grâce à l'expression suivante :

$$P_r = 2\pi \left(R_i + \frac{Ne_p}{4} \right) C \quad (13)$$

C étant le prix du ruban supraconducteur au mètre.

Le coût de la méthode CT peut être évalué en sommant le prix des différents matériels nécessaires. Le résultat obtenu est de $17\,500 \text{ €}$. De même, le coût de notre nouvelle méthode est estimé à une valeur de $12\,100 \text{ €}$, auquel il faut ajouter le prix du ruban supraconducteur, que l'on peut calculer grâce à (13).

Tableau 5. Matériel nécessaire pour la méthode de mesure par courant de transport et pour la nouvelle méthode proposée.

	Méthode par courant de transport	Nouvelle méthode	Coût
Alimentation en courant	✓	✓	8000 €
Nanovoltmètre	✓	✓	4000 €
Bobine de champ 100 mT (cuivre)	✓		500 €
Alimentation bobine de champ	✓		5000 €
Aimants		✓	100 €
Ruban supraconducteur (BiSCCO)	10 cm	Longueur variable	20 €/m

4.3 Comparaison des méthodes

A partir de l'équation (12), du résultat obtenu dans la section 4.1.2 et des coûts évalués dans la section 4.2, il est possible de tracer, pour chaque méthode, le rapport signal sur bruit en fonction du coût afin de pouvoir effectuer une comparaison, voir Figure 5. Les caractéristiques géométriques R_i et e_p utilisées dans (12) sont celles de la bobine ayant été utilisée expérimentalement. Notons que le coût de la méthode de mesure CT est fixe tandis que celui de la nouvelle méthode dépend de la longueur de ruban utilisée.

Le rapport signal sur bruit de notre nouvelle méthode est, sur une large plage de coût, largement supérieur à celui de la méthode CT. Il présente un maximum à 12 600 €, ce qui correspond à une bobine de 68 spires. Si l'on se place à ce maximum, l'économie réalisée est de 4 900 €, et le gain sur le rapport signal sur bruit est de 27 dB.

Nous pouvons donc conclure que notre nouvelle méthode est plus intéressante que la méthode CT, tant sur la précision et la facilité des mesures que sur la somme investie pour mettre en place le dispositif expérimental.

Cependant, pour être plus précis dans le cas de la caractérisation de plusieurs échantillons, il faut tenir compte du prix de chaque expérimentation. Une fois le matériel acheté, il faut ajouter 2 € de ruban pour chaque caractérisation avec la méthode CT. Notre nouvelle méthode nécessite, si l'on travaille avec une bobine de 68 spires, d'utiliser 543 € de ruban. Ainsi, au delà de 9 expérimentations, la méthode CT devient plus intéressante au niveau du coût que notre nouvelle méthode. Cette dernière conserve cependant de nombreux avantages.

Lors de nos expérimentations, nous n'avons pas travaillé avec une bobine permettant d'obtenir le meilleur rapport signal sur bruit car celle-ci n'a pas été spécialement fabriquée pour cette étude.

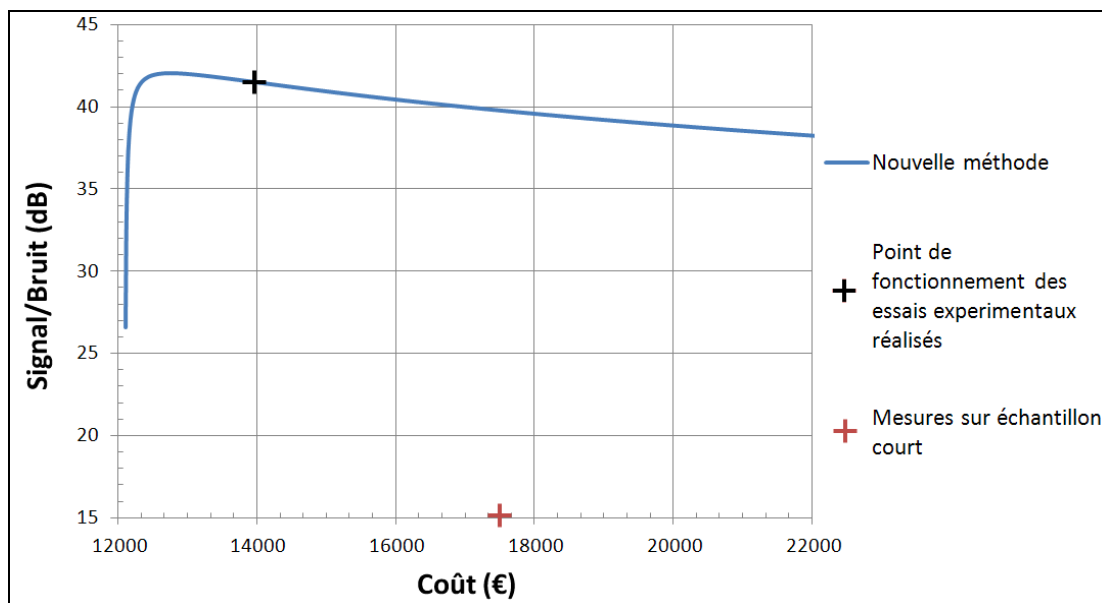


Figure 5 : Rapport signal sur bruit en fonction du coût de la mesure pour la nouvelle méthode et pour la méthode de mesure par courant de transport.

5. Conclusion

La méthode de caractérisation des rubans supraconducteurs présentée dans cet article possède plusieurs avantages. Outre des facilités de mesure accrues par rapport à la méthode CT, le conducteur est caractérisé dans ses conditions futures d'utilisation. De plus, l'induction magnétique propre du ruban est prise en compte. Nous pouvons imaginer utiliser cette méthode pour obtenir les caractéristiques du supraconducteur en fonction de son rayon de courbure ou des contraintes mécaniques qu'il subit au sein du bobinage. Il serait même possible de comparer l'impact de différents procédés de bobinage sur les caractéristiques du supraconducteur. Par ailleurs, le temps nécessaire pour effectuer les mesures est relativement court, de quelques heures, et le calcul numérique est très rapide, environ 1 min.

Les essais expérimentaux ont montré que cette méthode permet bien de déterminer les paramètres optimaux de modèles représentant la loi $E(J, B)$ du supraconducteur. Plusieurs modèles ont été testés avec succès. Nous avons pu constater que les modèles 2 et 3 représentent plus fidèlement le comportement du supraconducteur tandis que le Modèle 1 ne permet pas d'approximer convenablement les courbes expérimentales.

Par ailleurs, l'induction magnétique a été appliquée à la bobine grâce à l'utilisation d'aimants permanents, ce qui est un autre avantage. En effet, ceux-ci permettent d'obtenir facilement une induction de 200 mT au niveau de la bobine. Ils évitent l'utilisation d'une bobine de champ associée à son alimentation, dispositif qui serait plus contraignant.

Notre nouvelle méthode permet aussi de réduire l'investissement initial en matériel coûteux par rapport à la méthode CT tout en augmentant le rapport signal sur bruit de la mesure. Cette dernière est ainsi plus précise et plus aisée à effectuer.

La méthode a été ici appliquée à un ruban supraconducteur. Cependant, elle peut aussi l'être sur des fils. Par ailleurs, nous avons choisi d'utiliser un modèle en puissance pour représenter la loi $E(J, B)$ du conducteur. Or, il est possible d'utiliser tout autre modèle. Les modifications à apporter au programme informatique sont minimes et peuvent être réalisées en quelques minutes.

Références

- [1] M. Noe et M. Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status", *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, p. R15-R29, 2007.
- [2] A. Rezzoug, J.-P. Caron, J. Lévêque, D. Netter, B. Douine, K. Berger, et E. H. Ailam, "Les supraconducteurs: des propriétés aux applications électrotechniques", EF'2003.
- [3] S. S. Kalsi, "Development status of superconducting rotating machines", presented at the IEEE PES Meeting, vol. 1, p. 401-403.
- [4] T. Kikegawa et al., "Measurement of critical current for bulk superconductors by transport method", *Physica C: Superconductivity*, vol. 426-431, p. 649-653, 2005.
- [5] B. Douine, K. Berger, J. Leveque, D. Netter, O. Arbey, et N. Barthelet, "Self Field Effect Compensation in an HTS Tube", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 18, n° 3, p. 1698-1703, 2008.
- [6] Y. Kim, C. Hempstead, et A. Strnad, "Critical Persistent Currents in Hard Superconductors", *Physical Review Letters*, vol. 9, n° 7, p. 306-309, 1962.
- [7] L. Urankar, "Vector potential and magnetic field of current-carrying finite arc segment in analytical form, Part III: Exact computation for rectangular cross section", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 18, n° 6, p. 1860-1867, 1982.
- [8] A. Rezzoug, "Machine synchrone à plots ferromagnétiques aimantés à saturation par une bobine supraconductrice. Aspect théoriques et expérimentaux.", Thèse de doctorat, INPL, 1987.
- [9] L. Martini, A. Gandini, L. Rossi, V. Ottoboni, et S. Zannella, "Anisotropy of Bi-2223/Ag tapes by electrical and magnetic characterizations", *Physica C: Superconductivity*, vol. 261, n° 3-4, p. 196-200, 1996.