



HAL
open science

Modélisation des pertes AC d'un conducteur MgB2 pour câbles fort courant

Guillaume Escamez, Frédéric Sirois, Maxime Tousignant, Brahim Ramdane,
Gérard Meunier, Arnaud Badel, Pascal Tixador, Christian Eric Bruzek

► **To cite this version:**

Guillaume Escamez, Frédéric Sirois, Maxime Tousignant, Brahim Ramdane, Gérard Meunier, et al..
Modélisation des pertes AC d'un conducteur MgB2 pour câbles fort courant. Symposium de Genie
Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361713

HAL Id: hal-01361713

<https://hal.science/hal-01361713>

Submitted on 7 Sep 2016

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.

Modélisation des pertes AC d'un conducteur multifilamentaire MgB₂ pour câbles fort courant

Guillaume ESCAMEZ^{1,2}, Frédéric SIROIS³, Maxime TOUSIGNANT³, Brahim RAMDANE⁴, Gérard MEUNIER⁴, Arnaud BADEL², Pascal TIXADOR², Christian-Éric BRUZEK¹

¹ Nexans France 4-10 rue Mozart, F92587, Clichy Cedex, France

² Université Grenoble Alpes/CNRS, G2Elab/Institut Néel, 38042 Grenoble, France

³ Polytechnique Montréal, Montréal (QC), Canada

⁴ Université Grenoble Alpes/CNRS, G2Elab, 38042 Grenoble, France

Les supraconducteurs sont capables de transporter des densités de courant bien supérieures aux conducteurs classiques et sont donc particulièrement adaptés pour des câbles fort courant compacts. Toutefois ils fonctionnent à de très basses températures ce qui nécessite le dimensionnement d'un système cryogénique. Pour estimer les pertes dans le câble, il convient d'étudier les différents mécanismes de pertes à l'intérieur du câble supraconducteur. Les pertes AC doivent être calculées avec précision. Le supraconducteur MgB₂ qui est aujourd'hui un sérieux candidat pour ces applications est ainsi étudié. Un modèle numérique a été réalisé. Ce modèle 3-D prend en compte les propriétés non linéaires du supraconducteur ainsi que les propriétés magnétiques des matériaux présents. Les pertes AC dans le conducteur ont ensuite été calculées sous plusieurs logiciels basés sur différentes formulations pour valider les résultats obtenus.

Supraconducteurs, Éléments-finis, MgB₂, Pertes AC, modélisation numérique

1. INTRODUCTION

En 2001, des propriétés supraconductrices ont été découvertes dans le Magnésium Diboride MgB₂ [1]. Aujourd'hui la compagnie *Colombus SPA* [2] produit ce supraconducteur dans de grandes longueurs. Ce supraconducteur possède une température critique de 39 K rendant la possibilité d'utiliser de l'Hélium liquide ou gazeux comme liquide comme refroidissement. Les densités de courant dans le conducteur sont supérieures à 600 A/mm² sous champ propre. En 2014, Amalia Ballarino et al [3] ont battu le record de courant à l'intérieur d'un câble supraconducteur MgB₂ avec une valeur de 30 kA à 4.2 K et 5 kA à 20 K en réalisant un démonstrateur pour le CERN. L'objectif est d'alimenter avec des câbles MgB₂ de 150 kA, certaines installations du tunnel. La forme cylindrique du conducteur associée à sa bonne tenue mécanique permettent la création de bobinage il est ainsi également envisagé pour la réalisation de SMES [4] ou de moteurs [5].

2. PERTES AC DANS LES SUPRACONDUCTEURS

Les supraconducteurs ne présentent pas de résistivité mesurable dans les conditions normales de fonctionnement. Cette absence de résistivité n'implique pas forcément une absence de pertes. Lorsqu'un supraconducteur est soumis à un environnement variable dans le temps (par exemple un courant sinusoïdal), il se crée une variation temporelle d'induction magnétique à l'intérieur du supraconducteur, ce qui engendre la création d'un champ électrique et ainsi des pertes en accord avec l'équation de Maxwell-Faraday :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

Avec \vec{E} le champ électrique et \vec{B} le champ magnétique. Pour un signal périodique de fréquence f , les pertes moyennes dans le conducteur de volume V s'écrivent :

$$P_{AC} = f \int_0^{1/f} \left(\iiint_V \vec{J} \vec{E} dV \right) dt \quad (2)$$

Avec V le volume du conducteur et \vec{J} la densité de courant. Aux températures de fonctionnement comprises entre 4.2 K et 20 K le coût très élevé de la cryogénie (hélium gazeux) impose de minimiser les pertes. Ceci tend à limiter l'utilisation des supraconducteurs à des dispositifs DC et non AC. Toutefois, même avec un contenu DC, les harmoniques présents sur le réseau induisent des pertes. Il est donc nécessaire de modéliser les pertes AC dans ce type de conducteur. Pour pouvoir estimer les pertes AC dans un câble complet notre approche a été dans un premier temps de considérer un conducteur élémentaire puis de considérer le câble entier.

3. CONDUCTEUR ÉTUDIÉ

3.1. Géométrie et maillage

Le conducteur MgB₂ étudié est un conducteur multifilamentaire composé de 36 filaments supraconducteurs dans une matrice de nickel pur (méthode PIT). Les filaments sont répartis sur trois couches concentriques comprenant respectivement 6-12-18 filaments. La présence de nickel permet une bonne diffusivité thermique pour le refroidissement et sert de *shunt* dans le cas où le conducteur vient à transiter (courant qui ne passe plus dans les supraconducteurs). Une couche externe de monel est ajoutée pour des raisons mécaniques. Une image réalisée au Microscope électronique à balayage (MEB) est présentée en Fig. 1 ainsi que la géométrie 3-D du conducteur.

3.2. Propriété supraconductrice

La non-linéarité de la loi de comportement E-J des supraconducteurs a été modélisée en utilisant une loi de puissance dite *loi de percolation* :

$$E(|J|) = \begin{cases} 0 & \text{si } |J| \leq J_{c0} \\ \frac{E_c}{\eta} \left(\frac{|J|}{J_{c0(B)}} - 1 \right)^{\eta} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

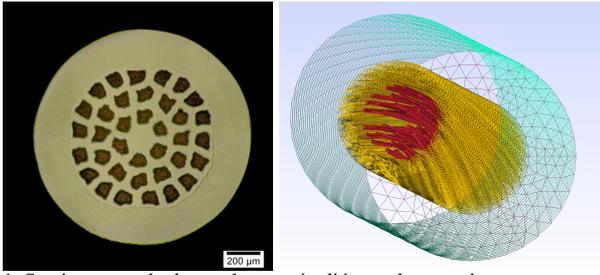


Fig. 1. Section normale du conducteur étudié avec les grandeurs caractéristiques. Les filaments de MgB_2 (rouge) sont dans une matrice de nickel entourée d'une bague de monel (en orange).

La valeur de J_{c0} correspond à la valeur minimale de densité de courant pour lequel on observe une dissipation sur le conducteur (apparition de tension). Des mesures on défini la densité de courant critique J_c du conducteur (en A/m^2) pour un champ électrique $E_c=100 \mu V/m$. Cette valeur de J_c ramenée à la section du matériau donne le courant critique I_c (en A). Le préfacteur η est ainsi défini par $\eta=(J_c/J_{c0}-1)^{n_0}$. La valeur n_0 qui a pour avantage de ne pas trop varier avec la température et le champ magnétique (comparée à d'autres lois de comportement supraconductrices) a des valeurs de l'ordre de 5-10 (cf Fig. 3).

Pour pouvoir implémenter l'évolution du courant critique (donc de J_{c0}) et quantifier la valeur de n_0 avec le champ magnétique extérieur, une mesure expérimentale de courant critique sur un fil a été réalisée au LNCMI de Grenoble. La mesure a été réalisée sur un échantillon MgB_2 de 1.13 mm de diamètre. Étant donné que l'augmentation du diamètre du fil s'accompagne d'une augmentation de MgB_2 dans le fil, il est possible de considérer que l'augmentation des performances est linéaire avec la fraction volumique de MgB_2 . La mesure a été réalisée sous helium liquide (et gazeux) dans un trou de champ de 400 mm avec un aimant capable de générer 10 T homogène sur l'échantillon. Puisque les filaments supraconducteurs sont dans une matrice métallique, des longueurs de transfert importantes sont à prendre en compte. Elles permettent de faire passer l'intégralité du courant dans le supraconducteur. Le rayon de courbure du fil MgB_2 est de l'ordre de 250 mm ce qui exclu la création de bobines compactes, il est donc nécessaire de mesurer les performances du fil sur un échantillon droit sur une canne de mesure pouvant accueillir ce type de long échantillon (environ 200 mm) [6]. Des radiateurs situés proches de l'échantillon permettent de vaporiser l'helium liquide et ainsi de réaliser des mesures sous température variable. La source de courant utilisée est une source 3 kA-5 V. L'évolution des courants critiques I_c en fonction de l'induction magnétique extérieure sous différentes températures est rapportée en Fig. 2.

Dans ces mesures, on observe une baisse des performances avec l'augmentation du champ et de la température en accord avec tout supraconducteur. Le champ critique du MgB_2 est de l'ordre de 10 T à 4.2 K [7] ce qui n'est pas ce qui est observé sur les mesures. Ceci peut être du à la pureté du mélange MgB_2 . De ces mesures, il est aussi possible de définir la valeur de $J_{c0}=0.9 \cdot J_c$, ce qui correspond en moyenne aux valeurs obtenus lors des mesures. Concernant les valeurs de n_0 , il est toujours difficile d'extrapoler seulement en se basant sur le début de la courbe de transition car au dessus du courant critique, le risque d'endommager l'échantillon est réel. Toutefois, avec ce type de conducteur où la matrice métallique est importante en terme de fraction volumique, il est possible de monter un peu plus haut en courant (+20-30 % de I_c) et donc avoir une meilleure précision sur la courbe. Les valeurs de n_0 associées à la mesure sont données en Fig. 3

Comme attendu, les valeurs ne varient pas beaucoup avec le champ magnétique ainsi qu'avec la température. Les valeurs de n_0 sont comprises entre 6 et 11. Pour pouvoir valider ces va-

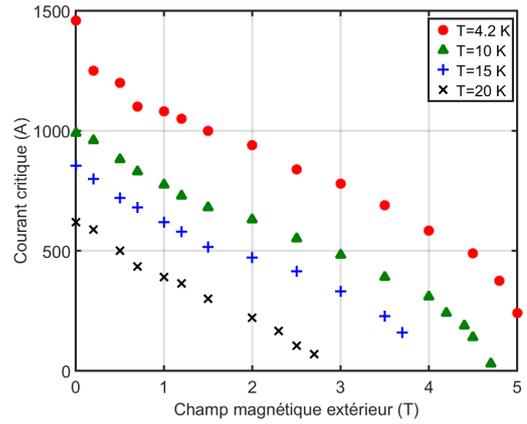


Fig. 2. Courant critique d'un échantillon MgB_2 de diamètre 1.13 mm sous divers champs et à diverses températures.

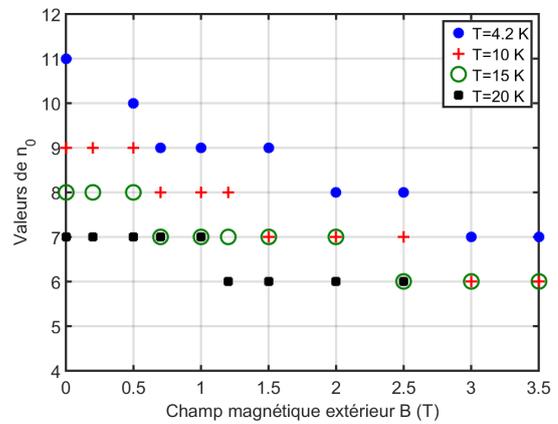


Fig. 3. Valeurs de n_0 associées aux mesures de la Fig. 2.

leurs, il serait intéressant d'utiliser une source de courant pulsé fournissant des valeurs de courant entre 0 et 1 kA sur des temps très courts (< 10 ms) pour éviter d'échauffer le matériau et les amenées de courant en cuivre. Toutefois, compte tenu de l'inductance de la canne de mesure, une tel source n'est pas à notre disposition.

3.3. Caractérisation des éléments métalliques

Le procédé de fabrication du fil utilise deux matériaux, le nickel qui sert de matrice aux filaments de MgB_2 et la couche externe de monel (cupro-nickel) qui est ajoutée à la fin du processus de fabrication. Ces deux matériaux subissent un certain nombre de déformations, mais aussi des recuits. Ainsi leurs propriétés résistives et magnétiques sont grandement affectées. Pour réaliser des simulations numériques avec un modèle le plus réaliste possible, une série de mesure de résistivité, mais aussi de perméabilité magnétique ont été réalisés. Les échantillons mesurés ont subi les mêmes contraintes mécaniques et thermiques que le fil MgB_2 assurant ainsi une bonne cohérence aux résultats obtenus.

3.3.1. Nickel

Résistivité La mesure de résistivité de l'échantillon de nickel a été réalisée dans un cryostat rempli d'helium liquide. Le courant injecté dans l'échantillon est de 10 mA et la tension a été mesurée avec un nanoVoltmètre. La mesure a été effectuée sur plusieurs jours pour permettre à l'échantillon de se réchauffer de manière naturelle à mesure que l'helium s'évapore. Sur la Fig. 4

est tracée la résistivité en fonction de la température.

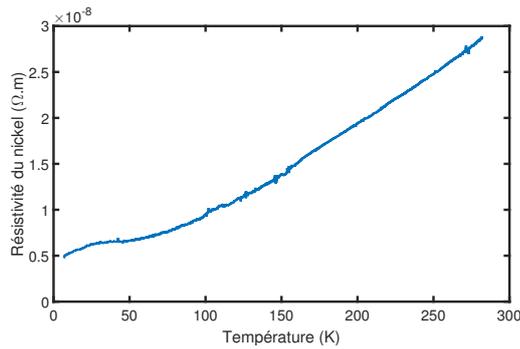


Fig. 4. Résistivité du nickel en fonction de la température, de 4,2 K à l'ambiante.

Perméabilité magnétique Les mesures de perméabilité magnétique, d'abord avec un champ magnétique longitudinal à l'échantillon et ensuite transversal à celui-ci, ont été faites à l'Institut Néel dans le département de magnétométrie. Les mesures sont réalisées sur un magnétomètre à extraction basse température capable de mesurer sur une plage de ± 7 T entre 4,2 K et 290 K. L'aimantation de l'échantillon de nickel avec un champ magnétique longitudinal entre 4,2 K et 200 K est présentée en Fig. 5.

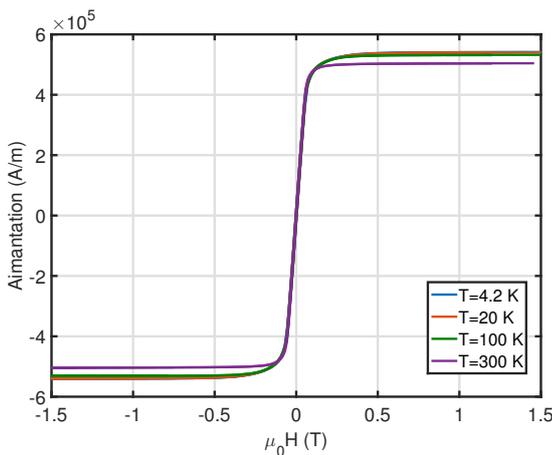


Fig. 5. Perméabilité magnétique de l'échantillon de nickel avec un champ magnétique longitudinal sous température variable.

Dans ces mesures, on peut voir que l'aimantation du nickel ne varie pas beaucoup avec la température. En effet entre 4,2 K et 300 K, il n'y a que peu de différence et seulement sur le champ de saturation. De ces mesures on peut modéliser les résultats à 4,2 K par l'équation :

$$B(H) = \mu_0(H + M(H)) = \mu_0(H + \sigma(\beta - 1) \tanh(H/\sigma)) \quad (4)$$

Où $\sigma_{nickel} = 7,5 \cdot 10^4$ A/m et $\beta_{nickel} = 8,23$. Pour préparer l'échantillon qui fait 4 mm de longueur, une technique d'électro-érosion a été utilisée pour couper le fil. Cette technique permet une coupure nette et locale et ainsi d'éviter d'endommager le conducteur, notamment ses propriétés magnétiques. Toutefois, pour pouvoir statuer sur l'anisotropie de l'échantillon, une seconde mesure en champ transverse a été faite et comparée à la précédente en Fig. 6.

Dans ces mesures on peut observer le comportement anisotrope magnétique de l'échantillon de nickel. Toutefois pour

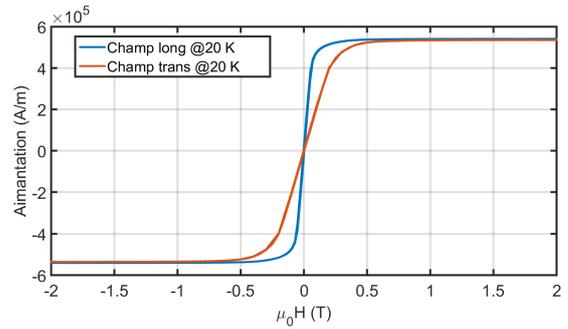


Fig. 6. Perméabilité magnétique de l'échantillon de nickel avec un champ magnétique transversal et longitudinal à 20 K.

nos modèles numériques, une perméabilité relative magnétique isotrope a été implémentée car les aimantations de saturation sont très basses. De plus, l'échantillon ne possède pas de comportement hystérique observable (< 30 mT) ce qui simplifie le modèle numérique. Dans du nickel pur, l'hystérésis du nickel est environ de 50 mT [8] mais à cause des différents traitements thermiques et mécaniques il est vraisemblable que le nickel utilisé ait perdu son comportement hystérique [9, 10]. Une autre explication est que le nickel est dopé avec d'autres constituants perdant ainsi ses propriétés hystériques. De ces mesures, il est possible de modéliser avec précision le comportement électrique et magnétique du nickel.

3.3.2. Monel

Le monel est une variété de cupronickel déposé autour du fil pour lui garantir de bonnes propriétés mécaniques et pour le protéger. Ce matériau normalement non magnétique et à forte résistivité a été caractérisé par une mesure de résistivité en fonction de la température et de perméabilité magnétique relative.

Résistivité La résistivité du monel a aussi été mesurée en fonction de la température en utilisant le même dispositif que pour le nickel et le résultat est représenté en Fig. 7.

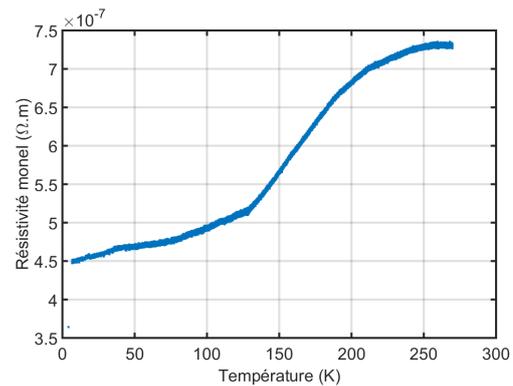


Fig. 7. Résistivité du monel en fonction de la température.

On observe que la résistivité du monel est deux ordres de grandeur supérieure à la résistivité du nickel ce qui était attendu. Cette couche de forte résistivité augmente les longueurs de transfert pour injecter du courant dans le conducteur.

Perméabilité magnétique L'aimantation du matériaux est représentée en Fig. 8 à différentes températures.

On peut observer qu'à 300 K, l'aimantation est linéaire avec $\mu_0 H$. Plus la température baisse et plus le comportement magnétique du monel se fait voir avec une saturation autour de 50 mT pour une aimantation de 1,5 A/m à 100 K et à

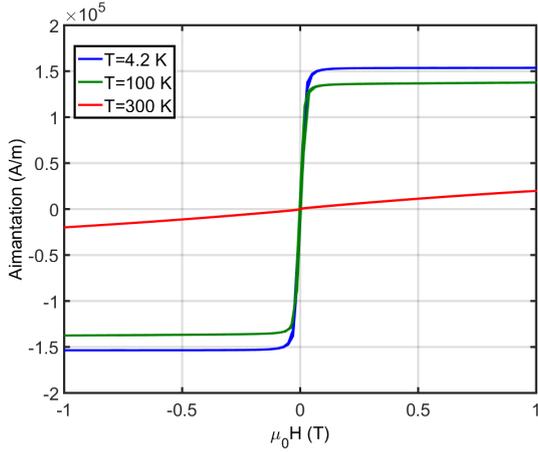


Fig. 8. Aimantation de l'échantillon de monel à l'aide d'un magnétomètre à extraction.

4,2 K. Au vue de l'aimantation de saturation du monel, le comportement magnétique peut en première approximation être négligé. Toutefois nous avons décidé de le prendre en compte en utilisant (4) avec comme paramètres $\sigma_{monel} = 2, 10^4$ A/m et $\beta_{monel}=8,64$. Des mesures, on peut aussi observer l'absence de comportement hystérétique pour le monel.

Après avoir caractérisé le fil MgB₂ en termes de performance (loi de comportement du supraconducteur complètement définie) mais aussi pour les propriétés électriques des métaux présents dans le conducteur, il est possible de réaliser un modèle réaliste du fil en éléments finis et de le résoudre.

4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Compte tenu de la géométrie multifilamentaire torsadée ainsi que de la présence d'une matrice magnétique, des pertes liées aux courants de rebouclage dans la matrice vont exister. Ceci impose une modélisation 3-D de l'ensemble du conducteur et seulement des filaments supraconducteurs. Cette modélisation, en plus de conduire à la résolution de problèmes numériques de plusieurs centaines de milliers d'éléments, peut poser des soucis de convergence surtout dans le cas où deux non linéarités sont présentes dans le modèle : non linéarité de la loi E-J supraconductrice et non linéarité de la perméabilité magnétique des métaux. La majorité des calculs a été réalisée sous le logiciel Daryl-Maxwell qui a été conçu dans l'optique de résoudre des problèmes de grande taille avec des matériaux supraconducteurs [11]. Le logiciel FLUX® [12] a aussi été utilisé pour valider des exemples simples. Le logiciel Daryl-Maxwell utilise une formulation en \vec{H} pour résoudre le problème c'est-à-dire résoudre le champ magnétique \vec{H} suivant la loi de Maxwell-Faraday $\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$:

$$\nabla \times (\rho(|\vec{H}|)\nabla \times \vec{H}) = -\mu_0 \frac{\partial \mu_R(H)\vec{H}}{\partial t} \quad (5)$$

Avec ρ la résistivité et μ_R la perméabilité magnétique relative des matériaux. Pour relier le champ magnétique à la densité de courant, l'équation de Maxwell-Ampère est utilisée :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (6)$$

Concernant la géométrie et le maillage associé, ceux-ci ont été réalisés par une extrusion hélicoïdale d'une représentation de la face normale, dont les dimensions ont été déduites de Fig. 1. Le maillage généré, composé de prismes, a ensuite été découpé en tétraèdres. Cette technique permet un maillage relativement fin dans les conducteurs supraconducteurs, là où se développent

majoritairement les densités de courant. Sur cette géométrie, le nombre d'éléments du maillage est égal à 659 250 et le nombre de degrés de liberté est égal à 770 725. Dans notre modèle, les barrières de diffusion qui entourent les filaments de MgB₂ ont été négligées car leur composition n'est pas connue avec certitude [13] ce qui peut influencer les pertes par couplage comme cela est expliqué plus loin. Les calculs ont été réalisés à 4,2 K pour profiter au maximum des performances du supraconducteur (I_c maximal à 4,2 K). Les valeurs retenues pour l'implémentation du modèle sont rappelées dans le Tableau. 1.

Tableau 1. Résistivité des domaines non supra et valeur de n_0 du modèle numérique.

Grandeur	Valeur
ρ_{nickel}	$4,5.10^{-9} \Omega.m$
ρ_{monel}	$4,58.10^{-7} \Omega.m$
ρ_{air}	$10^{-3} \Omega.m$
n_0	10

4.1. Résultats préliminaires

Plusieurs simulations ont été réalisées pour montrer la faisabilité technique de ce type de calcul en considérant des géométries plus simples [14]. Dans ces simulations, on peut noter que seul le temps de calcul est pour l'instant un problème pour la réalisation de calculs sur le fil avec l'ensemble des dépendances considérées. En effet, les temps de simulation, en ne prenant en compte que les supraconducteurs, sont compris entre 3 et 12 jours et une prise en compte de la non-linéarité des perméabilités magnétiques peut mener à une augmentation des temps de calculs d'environ 30 %.

Dans cet article sont présentés les résultats sur la géométrie réelle (36 filaments) en ne considérant que les filaments supraconducteurs (pas de matrice). Plusieurs simulations ont été réalisées sous champ magnétique extérieur dont une représentation se trouve en Fig. 9.

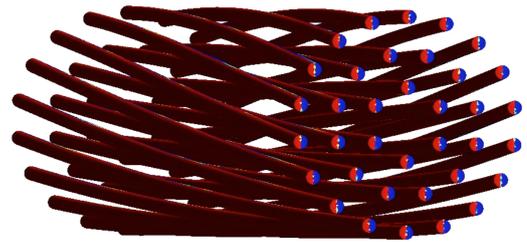


Fig. 9. Distribution de densités de courant dans le cas d'un champ magnétique extérieur à 5 ms. En rouge les densités de courant $+J_c$ et en bleu $-J_c$.

Les pertes AC sont présentées dans le tableau 2 en prenant en compte des courants et champ sinusoïdaux (transverse aux filaments) de fréquence 50 Hz.

Les résultats sont très proches pour l'ensemble des cas simulés avec un écart observé d'environ 8 %. Dans ce cas de figure (pas de matrice prise en compte), une modélisation 2-D est seulement suffisante pour simuler ces problèmes. Toutefois, lorsque il y a l'existence d'une matrice conductrice, le modèle 3-D est nécessaire et sa résolution doit être rapide pour pouvoir optimiser les applications supra. .

Tableau 2. Pertes AC (J/cycle) dans les supraconducteurs (sans considerer de matrice).

Courant	Champ extérieur	DarylMaxwell	Flux®
350 A	without	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$6.45 \cdot 10^{-5}$
sans	50 mT	$5.45 \cdot 10^{-6}$	$5.72 \cdot 10^{-6}$
sans	100 mT	$2.36 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$
sans	300 mT	$1.96 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$

5. CAS D'APPLICATION

Le modèle numérique développé dans cet article vise à dimensionner le système cryogénique pour des câbles supraconducteurs fort courant MgB_2 . Comme exemple, il a été utilisé pour le calcul des pertes AC dans le projet européen Best-Paths [15].

5.1. Projet Best-Paths

Le projet Best-Paths, commencé en 2015 pour une durée de 4 ans, vise à étudier de nouvelles architectures pour le réseau électrique européen notamment avec l'utilisation du HVDC. Ce projet inclut la réalisation et le test d'un démonstrateur de câble supraconducteur MgB_2 capable de transporter une puissance de 3.2 GW pour un courant assigné de 10 kA.

5.2. Principe de calcul

Le modèle réalisé pour le fil est trop complexe pour pouvoir étendre celui-ci à une application industrielle sans avoir recourt à certaines techniques de calcul. Pour pouvoir calculer les pertes AC d'un dispositif constitué de plusieurs fils MgB_2 , notre étude multi-échelle se déroule en deux temps. Dans un premier temps, une étude magnétique stationnaire du dispositif est réalisée pour calculer la distribution de champ magnétique sur l'ensemble des conducteurs. Une fois cette valeur connue, une simulation de pertes AC sur le brin MgB_2 (présentée en 4) est réalisée avec le courant de transport du fil et le champ magnétique déduit de l'étude stationnaire. Cette seconde partie est nécessaire due au fait que les modèles analytiques sont souvent incomplets : pas d'expression dans le cas d'un courant et d'un champ extérieur pour le calcul des pertes dans les filaments supra, pertes dans la matrice calculées en considérant une seule couche de filament.

5.3. Étude magnétique macroscopique

Compte tenu du courant critique d'un fil MgB_2 de diamètre de 1.33 mm (environ 850 A à 20 K-0.6 T), le câble supraconducteur peut-être constitué de 18 fils MgB_2 repartis uniformément transportant chacun environ 550 A. Une étude magnétique stationnaire permet de calculer le champ magnétique sur chaque fil pour un dimensionnement de 10 kA. La fig. 10 montre le calcul de la distribution de champ magnétique pour le câble de 10 kA avec un modèle complet (prend en compte les non linéarités des matériaux). Cette étude a été réalisée sous COMSOL avec une formulation en potentiel vecteur magnétique A .

De cette simulation numérique on peut trouver un champ magnétique sur chaque fil de 0.55 T en moyenne.

5.4. Pertes AC dans le fil

Il existe deux modes dans lequel le câble peut fonctionner : soit en pur AC (50 Hz sans harmoniques) soit en DC. Toutefois, à cause de l'électronique de puissance des redresseurs, le courant DC possédera des harmoniques AC de courant qui vont générer des pertes AC. Ces oscillations sont de l'ordre de 1 % par rapport à la valeur DC nominale. Pour évaluer les pertes AC dans les deux modes de fonctionnement du câble (AC ou DC avec harmoniques), on réalise plusieurs simulations numériques

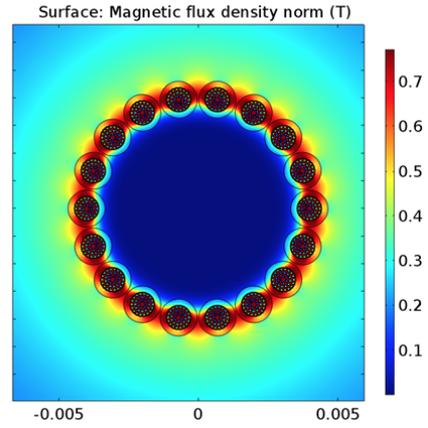


Fig. 10. Étude magnétique stationnaire du câble pour le calcul du courant critique de chaque fil.

en utilisant le modèle numérique développé en 4.

5.4.1. Fonctionnement en AC

Un courant alternatif de 550 A a été injecté à l'intérieur du modèle auquel a été ajouté un champ magnétique extérieur transverse en phase (50 Hz). Les pertes AC calculées à l'aide du modèle sont présentées en Fig. 11. Sur la figure, sont tracées les pertes réduites en fonction de la valeur de l'induction magnétique extérieure. Compte tenu que la résistivité des matériaux métalliques et de leurs perméabilités magnétiques qui varient peu avec la température entre 4,2 K et 30 K. Il est possible juste en utilisant le courant critique à la bonne température (à 0 T) d'estimer les pertes pour le dispositif complet à partir des pertes normalisées à 4,2 K ($Q/\mu_0 I_c(0 T)^2$). Les valeurs analytiques sont aussi tracées à titre de comparaison. Sur la figure, le *modèle complet* prend en compte toutes les dépendances (courant en fonction de B et μ_R) et le *modèle réduit* ne prend pas en compte les perméabilités magnétiques des matériaux. Ceci a été fait pour observer l'influence des perméabilités magnétiques sur les pertes calculées.

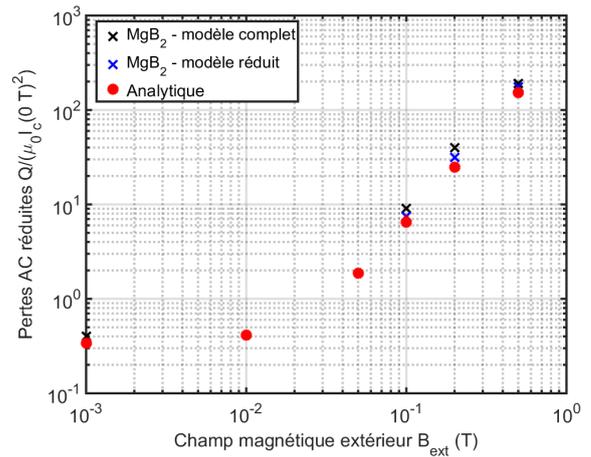


Fig. 11. Pertes AC réduites pour un courant de 550 A et une induction magnétique extérieure transverse.

Les 2 régimes à savoir le régime où les filaments supraconducteurs sont partiellement pénétrés et le régime où ils sont complètement pénétrés sont bien visible avec deux pentes distinctes en fonction du champ magnétique. On observe de très fortes valeurs pour les pertes analytiques et calculées qui interdisent l'utilisation de ce câble en pur AC (pertes de l'ordre de

la centaine de Watt à 20 K). Ceci est lié aux pertes par couplage qui sont générées par la circulation de courant à l'intérieur de la matrice notamment le passage de courant entre les filaments à travers la matrice. La formule analytique de ces pertes est donnée par l'équation [16] :

$$P = \frac{AB_{ext}^2}{2\mu_0} \left(\frac{\tau}{1-N} \right) \frac{\omega^2}{1+\omega^2\tau} \quad (7)$$

avec $\tau = (1-N) \frac{\mu_0}{\rho_t} \left(\frac{l_p}{2\pi} \right)^2$. Dans cette formule, N représente le coefficient de démagnétisation, calculé analytiquement à 0.6 [17], ρ_t la résistivité transverse de la matrice de nickel ($\rho_t=4,5 \text{ n}\Omega.m$) et A la surface du conducteur (sans la couche de monel). Le pas de torsade des filaments l_p est de 120 mm. Le champ magnétique extérieur de valeur pic B_{ext} et de pulsation $\omega=2\pi f$ ($f=50 \text{ Hz}$).

Dans le conducteur MgB_2 , le pas de transposition est important et augmente les pertes par couplage. Dans notre modèle numérique, ρ_t a été approximé comme la résistivité mesurée de l'échantillon de nickel ce qui n'est pas vrai car la composition de la couche de diffusion n'est pas connue. De cette figure, il est possible de voir qu'en prenant en compte l'ensemble des dépendances, on observe une différence de l'ordre de 30 % entre le modèle complet et l'analytique et autour de 10 % pour le modèle réduit et l'analytique. Entre le calcul analytique et le modèle réduit ceci est expliqué par la prise en compte du courant critique en fonction de l'induction magnétique et des courants dans le monel. Pour la différence entre l'analytique et le modèle complet, la prise en compte des perméabilités magnétiques concentre les lignes de champ sur les filaments ce qui augmente les pertes.

En conclusion, il est possible de voir que les pertes AC sont trop grandes pour une application industrielle en AC, ceci vient notamment de l'architecture du fil MgB_2 avec un long pas de transposition et une matrice à forte conductivité. L'ajout de barrières sur les filaments de MgB_2 pourraient permettre une baisse substantielle des pertes.

5.4.2. Fonctionnement en DC+AC

Compte tenu du fort coût de la cryogénie à 20 K, une utilisation de ces câbles en DC est envisagée. Toutefois, sur le réseau, des harmoniques de courant existent et vont induire des pertes AC dans le câble. La grande longueur du câble (inductance et résistance) fait office de filtre passe bas et va donc réduire une partie des harmoniques. Pour notre étude, nous avons considéré un seul harmonique, à 50 Hz, avec une amplitude représentative du spectre complet, ce qui donne une bonne approximation des pertes du spectre complet [18, 19]. Une simulation en prenant en compte une ondulation de 1 % sur les valeurs de courant et de champ magnétique DC du câble a été réalisée. La Fig. 12 présente les pertes AC calculées analytiquement ainsi que la valeur calculée numériquement avec le modèle complet.

Sur cette figure, on observe (comme c'était le cas pour le fonctionnement AC) que les pertes dans la matrice (par couplage) sont fortement prépondérantes par rapport aux pertes par hysteresis (dans les supraconducteurs). Le modèle numérique est relativement proche des résultats analytiques (différence de 20 %), ceci s'explique par le fait qu'à cette valeur de champ DC, les matériaux magnétiques sont saturés.

5.5. Réflexions sur le conducteur

De ces deux exemples de calculs, il ressort que les pertes par couplage sont un réel problème pour l'utilisation du fil MgB_2 que ce soit en AC ou même en DC (pertes tout juste acceptables pour 1 % de contenu harmonique). Pour pouvoir baisser les pertes totales dans les conducteurs pour une application DC, il est possible d'étudier différentes architectures de fil en jouant sur deux paramètres du conducteur : la valeur de la résistivité

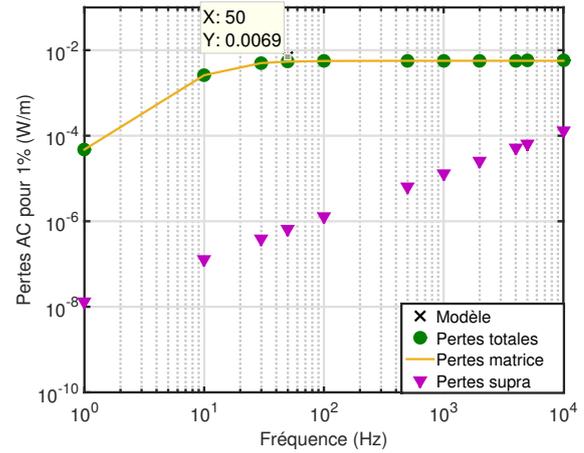


Fig. 12. Pertes AC (en W/m) pour un ondulation AC de 1 % superposée au contenu DC.

transverse et le pas de torsade des filaments supraconducteurs. La Fig. 13 présente des résultats dans la configuration actuelle ainsi que d'autres obtenus en jouant sur ces deux paramètres.

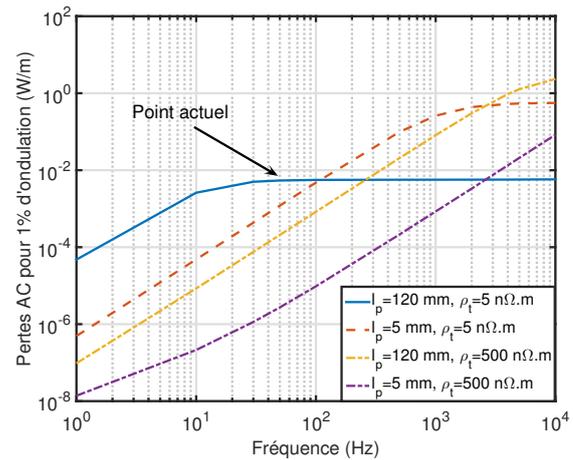


Fig. 13. Pertes AC pour 1 % d'ondulations dans différentes configurations de fils MgB_2 avec ρ_t la résistivité transverse et l_p le pas de torsade.

De ces calculs (analytiques), on observe qu'il est possible de baisser fortement les pertes AC générées par des ondulations de 1 %. Une augmentation de la résistivité transverse va baisser fortement les pertes dans le conducteur. Dans notre modèle, les barrières ont été négligées ce qui peut conduire à des erreurs. On montre que des barrières plus résistives entraîneraient une baisse des pertes par couplage. De plus baisser le pas de torsade des filaments permet une seconde baisse des pertes AC dans le conducteur. Pour l'instant, le modèle n'est pas pertinent pour une application pure AC car les pertes calculées sont trop importantes mais potentiellement pratique pour d'éventuels optimisations dans le cas où l'architecture du conducteur est optimisée

6. CONCLUSIONS

Dans cet article, il est présenté la création d'un modèle numérique de calcul de pertes pour un fil MgB_2 . Prenant en compte les propriétés du supraconducteur, mais aussi de la matrice magnétique, ce modèle permet de calculer les pertes AC générées par la superposition d'un courant de transport et d'un champ magnétique, analogue à l'environnement d'un câble. Après le calcul

des pertes AC pour différentes valeurs de courant et de champ magnétique extérieur, le calcul sur le câble complet est réalisé dans deux cas de figures différents : en pur AC ou en DC (avec des harmoniques). Il en sort que le fil n'est pas adapté pour des applications avec trop de contenu AC. Il est donc intéressant de travailler l'architecture du fil pour optimiser les applications avec du MgB₂.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le projet Européen BEST PATH [15].

8. RÉFÉRENCES

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature*, vol. 410, no. 63-64, 2001.
- [2] Columbus, "Columbus Superconductors SPA." [Online]. Available : <http://www.columbussuperconductors.com/>
- [3] A. Ballarino, "Development of superconducting links for the Large Hadron Collider machine," *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 4, p. 044024, apr 2014.
- [4] N. Atomura, T. Takahashi, H. Amata, T. Iwasaki, K. Son, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, T. Shintomi, Y. Makida, T. Takao, K. Munakata, and M. Kajiwara, "Conceptual design of MgB₂ coil for the 100 MJ SMES of advanced superconducting power conditioning system," *Physics Procedia*, vol. 27, pp. 400–403, 2012.
- [5] A. B. Abrahamsen, N. Magnusson, B. B. Jensen, D. Liu, and H. Polinder, "Design of an MgB₂ race track coil for a wind generator pole demonstration," *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 507, no. 3, p. 032001, may 2014.
- [6] Y. Miyoshi, A. Badel, X. Chaud, T. Benkel, B. Vincent, P. Tixador, J. Marpaud, F. Debray, T. Lécresse, M. Devaux, P. Fazilleau, and J.-m. Rey, "Performance Tests of Prototype High-Field HTS Coils in Grenoble," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, 2015.
- [7] G. Fuchs, K.-H. Müller, A. Handstein, K. Nenkov, V. N. Narozhnyi, D. Eckert, and M. Wolf, "Upper critical field and irreversibility line in superconducting MgB₂," *Solid State Communications*, vol. 118, no. 10, 2001.
- [8] G. Ausanio, A. C. Barone, V. Iannotti, L. Lanotte, S. Amoruso, R. Bruzese, and M. Vitiello, "Magnetic and morphological characteristics of nickel nanoparticles films produced by femtosecond laser ablation," *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 18, 2004.
- [9] M. S. Boley, D. a. Franklin, and D. K. Rigsbee, "Heat treatment effects on sensitivity and hysteresis loops of magnetoelastic torque transducers," *Journal of Applied Physics*, vol. 87, no. 9, p. 7073, 2000. [Online]. Available : <http://link.aip.org/link/JAPIAU/v87/i9/p7073/s1{&}Agg=doi>
- [10] R. Morita, S. Kobayashi, A. G. Odeshi, J. A. Szpunar, K. Miura, and Y. Kamada, "Effects of high-strain-rate deformation on magnetic hysteresis in high-tensile steels," *AIP Advances*, vol. 6, no. 5, p. 055903, 2016. [Online]. Available : <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/adva/6/5/10.1063/1.4942824>
- [11] G. Escamez, F. Sirois, A. Badel, G. Meunier, B. Ramdane, and P. Tixador, "Numerical impact of using different E-J relationships for 3-D simulations of AC losses in MgB₂ superconducting wires," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 3, 2016.
- [12] CEDRAT, "FLUX software." [Online]. Available : <http://www.cedrat.com/>
- [13] G. Jiao, C. Li, G. Liu, A. Sulpice, Q. Wang, X. Xiong, G. Yan, F. Yang, and P. Zhang, "Influence of Nb Diffusion Layer on Superconductivity of MgB₂/Nb/Cu Wires," *Rare Metal Materials and Engineering*, vol. 42, no. 5, pp. 881–884, 2013. [Online]. Available : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00984674>
- [14] G. Escamez, F. Sirois, V. Lahtinen, A. Stenvall, A. Badel, P. Tixador, B. Ramdane, G. Meunier, R. Perrin-Bit, and C.-E. Bruzek, "3-D numerical modelling of AC losses in multi-filamentary MgB₂ wires," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, 2016.
- [15] BEST-PATHS, "BEST-PATHS project."
- [16] M. N. Wilson, *Superconducting magnets*. Oxford Science Publications, 1982.
- [17] T. Klein, L. Lyard, J. Marcus, Z. Holanova, and C. Marcenat, "Magnetic field dependence of the coherence length and penetration depth of MgB₂ single crystals," *Physical Review B*, vol. 73, no. 18, pp. 1–6, 2006.
- [18] M. Tsuda, D. Miyagi, and T. Hamajima, "Transport Current Loss Characteristics of HTS Tape With Odd-Order Harmonic Current," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, pp. 3–6, 2012.
- [19] M. Spektor, V. Meerovich, V. Sokolovsky, and L. Prigozhin, "AC losses in thin coated conductors under non-sinusoidal conditions," *Superconductor Science and Technology*, vol. 25, no. 2, p. 025008, feb 2012. [Online]. Available : <http://stacks.iop.org/0953-2048/25/i=2/a=025008?key=crossref.52defc0bb8afe1b1ce2a20ca50e748ac>