



HAL
open science

Caractérisation électrique haute fréquence d'un fil de cuivre possédant un revêtement de Nickel

Daniel Roger, Stéphane Duchesne, Guillaume Parent, Mustapha Toudji,
Vadim Iosif

► **To cite this version:**

Daniel Roger, Stéphane Duchesne, Guillaume Parent, Mustapha Toudji, Vadim Iosif. Caractérisation électrique haute fréquence d'un fil de cuivre possédant un revêtement de Nickel. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361611

HAL Id: hal-01361611

<https://hal.science/hal-01361611>

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.

Caractérisation électrique haute fréquence d'un fil de cuivre possédant un revêtement de Nickel

Daniel ROGER, Stéphane DUCHESNE, Guillaume PARENT, Vadim IOSIF, Mustapha TOUDJI
 Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE)
 F-62400, Béthune, France
 Email: stephane.duchesne@univ-artois.fr

RESUME – Cette étude présente l'évolution des caractéristiques d'un fil de cuivre capable de travailler à 500°C possédant un revêtement céramique, déposé sur une couche de Nickel servant de barrière de diffusion pour la réalisation de bobinage de machines électriques capables de fonctionner à Hautes Températures (500°C) avec une alimentation MLI. Les caractéristiques en fréquence et en température de ce fil sont indispensables pour sa mise en œuvre au sein d'une machine électrique. Cette étude présente une approche analytique des phénomènes intervenant dans ce type de conducteur lorsque la fréquence des signaux augmente. Cette approche analytique repose sur l'étude d'un fil seul. La dernière partie discutera des voies de développement possible pour la suite de cette étude.

Mots-clés – Bobinage, Machine Haute Température, Fil céramique, Revêtement Nickel, Oxydation du cuivre

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la température admissible au cœur des bobinages des machines et l'augmentation de la vitesse de rotation du rotor sont des voies prometteuses pour le développement des futures applications embarquées. Optimiser la taille et la masse embarquée à bord des avions ou des futurs véhicules électriques implique d'augmenter la densité de courant dans les conducteurs, et donc le gradient thermique, puisque l'induction dans la machine est limitée par les performances des tôles magnétiques. Des 3 constituants essentiels des machines tournantes que sont les tôles du circuit magnétique, les alliages conducteurs des bobinages ainsi que le Système d'Isolation Electrique (SIE) le seul qui peut difficilement dépasser cette limite est le SIE. En effet, ce dernier est principalement constitué de polymères organiques qui ne conservent leurs caractéristiques optimales que jusque 200 °C ou 240 °C pour les plus performants [1]. Le cuivre utilisé pour la circulation des courants n'est pas limité avant 900 °C, et l'aluminium perd, quant à lui, ses propriétés mécaniques à partir de 500°C. Cependant, leur résistance au passage du courant augmente sensiblement avec l'accroissement de la température et, dans le cas du cuivre, il faut résoudre un problème d'oxydation se produisant aux alentours de 200 °C. La solution la plus courante consiste à utiliser une couche de nickel ou d'argent placée au contact du cuivre pour prévenir l'oxydation. Cependant cette couche supplémentaire peut modifier de manière très significative les performances électriques du fil ainsi obtenu. En effet le nickel, qui est le plus couramment utilisé en raison de son coût assez faible, présente des valeurs de conductivité médiocre. De plus il s'agit d'un matériaux ferromagnétique qui possède une perméabilité relative de l'ordre de quelque centaines et une induction à saturation relativement faible. Enfin, sa température de

curie assez basse ($T_{Curie} = 355^{\circ}\text{C}$) va influencer notablement les performances du fil lorsque sa température de fonctionnement va augmenter. Pour toutes ces raisons, il est nécessaire de caractériser avec soin ce fil pour quantifier l'impact de son utilisation au sein d'une machine électrique destiné à travailler à température élevée. Cette étude va se concentrer sur la caractérisation à température ambiante. Les variations de température pourront être prise en compte en modifiant les valeurs des différents paramètres introduits. L'objectif de cette étude est de donner un modèle analytique du comportement fréquentiel d'un fil de cuivre nickelé afin d'en déduire sa résistance équivalente. Dans une première partie cet article présentera le fil utilisé. Ensuite un dispositif de caractérisation de la couche de nickel présente sur le fil permettra d'obtenir les courbes $B = f(H)$ indispensables pour le calcul des phénomènes fréquentiels. La troisième partie sera dédié à la présentation du modèle analytique et à sa validation théorique via une simulation Eléments Finis. Enfin, la dernière partie sera consacrée à une discussion sur l'orientation à donner aux futurs travaux sur ce sujet.

2. PRÉSENTATION DU FIL INORGANIQUE

Cette étude a été menée sur un fil à isolation céramique : le Cerafil 500. Ce fil a été conçu pour fabriquer des bobinages à haute fiabilité afin de rester en service même lors de fortes surcharges thermiques [2] ou dans des conditions environnementales très dures. Ce conducteur est utilisé dans les industries aéronautiques ou pétrolières pour lesquelles les contraintes en température peuvent être très élevées. Sa température optimale d'utilisation est située dans une gamme allant de -90 à 500 °C en régime permanent. Il peut, néanmoins, travailler jusqu'à 1000 °C en pointe. Il est aussi couramment utilisé dans l'industrie nucléaire pour le câblage des capteurs situés au plus près du cœur car il est à même de résister aux différents rayonnements ionisants. Grâce aux propriétés de la céramique utilisée, il possède une bonne résistance à la corrosion ou aux agressions chimiques ou climatiques. Ce fil est disponible via deux références commerciales différentes qui regroupent des caractéristiques techniques identiques. L'âme conductrice est composée (en masse) de cuivre à 73 % et d'un revêtement plaqué à 27 % de nickel. L'épaisseur d'isolation céramique varie entre 5 et 10 μm , et, est composée d'un mélange regroupant principalement de l'alumine (Al_2O_3) et du dioxyde de silicium (SiO_2). La figure 1 présente une coupe de fil mettant en évidence les différentes couches (Cu, Ni et céramique).

L'ajout d'une couche de nickel sert principalement à protéger le cuivre lorsque la température augmente [3]. En effet, au delà de 200 °C un phénomène d'oxydation du cuivre va conduire à une réaction entre les atomes d'oxygène présents dans la céramique. Cette oxydation se manifeste principalement par une migration des atomes de cuivre dans la couche céramique ce qui se traduit par une réduction de l'épaisseur apparente de la couche isolante et donc à une dégradation de la tenue en tension du fil

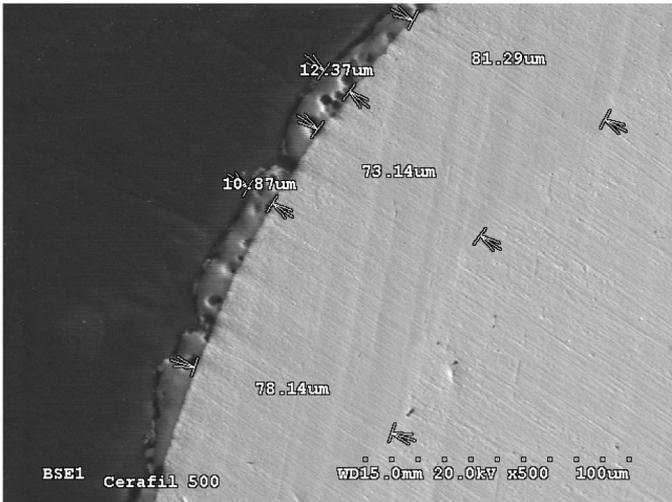


Fig. 1. Observation d'une section de fil au Microscope Électronique à Balayage

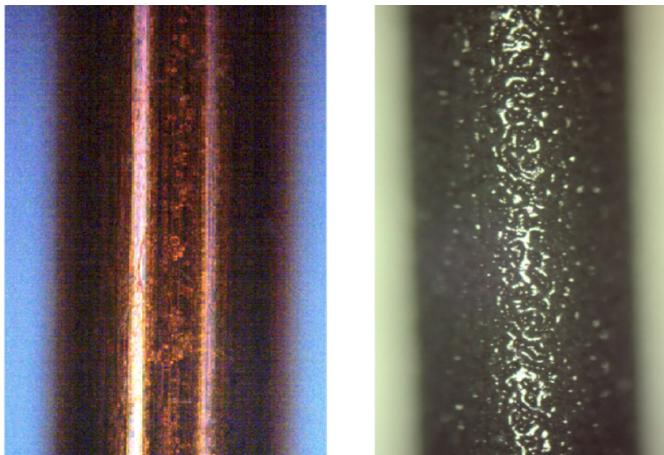


Fig. 2. Comparaison de l'état de surface d'un fil standard (à gauche) et d'un fil à isolation céramique (à droite)

[4].

Après l'application de la couche isolante, la surface présente un revêtement de céramique vitrifiée. Ce fil présente, cependant des caractéristiques mécaniques limitées pour un bobinage. Le revêtement céramique est relativement fragile et ne supporte que modérément les déformations. Pour preuve, le rayon de courbure minimal préconisé pour le Cerafil 500 est égal à 5 fois le diamètre extérieur du conducteur. La Fig. 2 présente la surface extérieure du fil étudié en comparaison avec un fil émaillé classique utilisant une isolation standard à base de Polyester-Imide et de Polyamide-Imide (PEI-PAI). Ces images montrent bien les différences importantes existantes entre un fil standard et l'isolation céramique de notre fil. En effet, la surface de céramique est particulièrement chaotique. Ceci impacte notablement les performances électrique du fil, notamment pour l'isolation. Plusieurs études ont été consacrées à l'étude des caractéristiques d'isolation de la couche céramique de ce fil et ont mis en évidence sa compatibilité avec les niveaux de tension que l'on peut trouver dans une machine électrique classique [5, 6].

3. CARACTÉRISATION DU FIL

Les caractéristiques électriques et magnétiques du nickel sont fortement dépendantes de la qualité et de la pureté du matériau utilisé. Son application autour d'un fil de cuivre dans un processus mécano-chimique très contraignant va aussi impacter de manière notable les caractéristiques de la couche extérieure du fil étudié. Les paramètres du nickel ont une influence très forte sur les valeurs de la résistance équivalente du fil en HF obtenue ana-

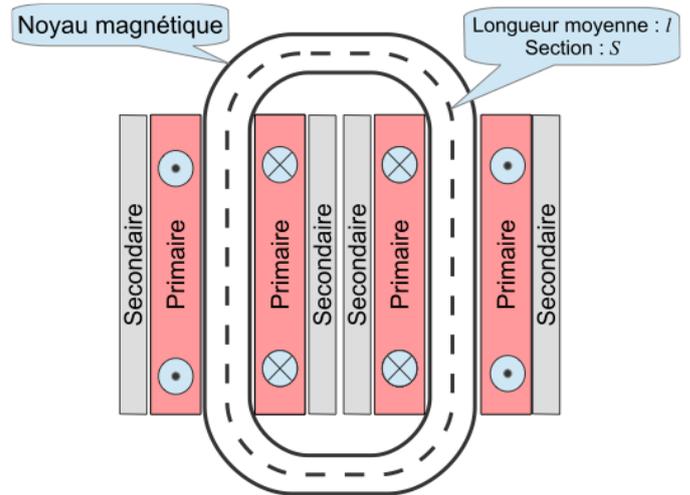


Fig. 3. Schéma de principe permettant la caractérisation de la couche de nickel

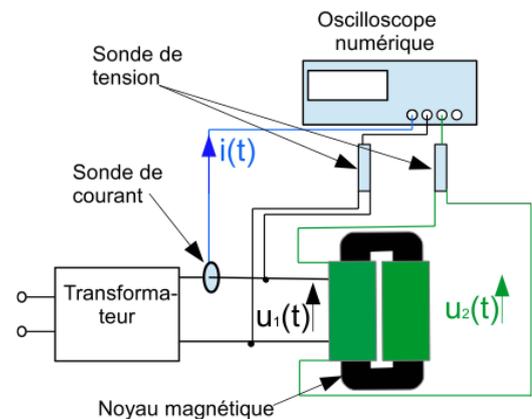


Fig. 4. Schéma de la chaîne de mesure

lytiquement. Il est donc indispensable de caractériser au mieux la couche de nickel présente sur le fil.

3.1. Dispositif de mesure

Pour estimer les propriétés magnétiques de la couche de nickel déposée sur le cuivre, un dispositif expérimental inspiré du cadre Epstein a été mis en place. Le circuit magnétique testé est composé d'une bobine rectangulaire réalisée avec le fil nickelé. Dans le noyau magnétique ainsi obtenu, la couche de nickel possède une influence importante car les lignes de champ magnétique se concentrent dans le nickel. Le cuivre, qui est au centre de chaque fil n'a, quant à lui, qu'une influence négligeable puisqu'il est faiblement diamagnétique ($\mu_R \approx 1$). La mesure est réalisée à une fréquence très basse de manière à limiter le plus possible les effets liés aux courants induits. La fig. 3 présente le schéma de principe du dispositif expérimental.

Des caractéristiques magnétiques d'un nickel travaillé à froid sont disponibles dans la littérature [7]. Elles montrent que la saturation du nickel requiert un champ magnétique de l'ordre de 15000 A m^{-1} . La force magnétomotrice nécessaire au primaire, pour un cadre de 25 cm de longueur, est donc de l'ordre de 3750 A m^{-1} .

Le noyau magnétique du dispositif expérimental est composé de 31 fils nickelés 0.8 mm de diamètre, sa longueur moyenne est de 224 mm. Le primaire comporte au total $N_1 = 2940$ spires ce qui permet d'obtenir la force magnétomotrice nécessaire avec un courant primaire raisonnable de quelques A. Le secondaire nécessite moins de spires ($N_2 = 280$ spires) car le dispositif de mesure utilisé présente une grande sensibilité. La Fig. 4 présente la totalité de la chaîne de mesure utilisée.

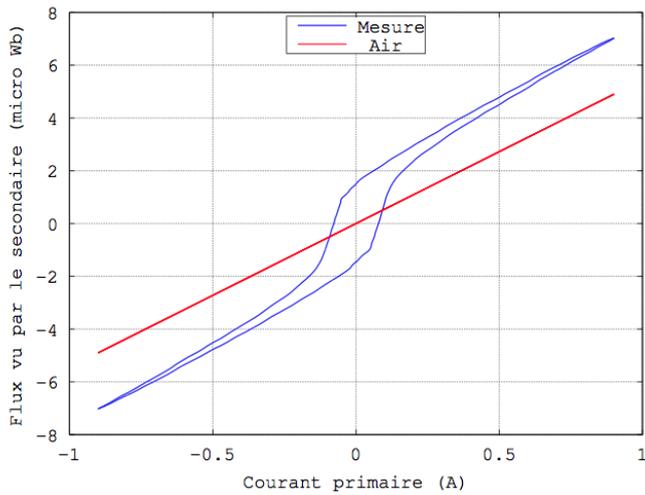


Fig. 5. Flux embrassé par le secondaire en fonction du courant primaire

3.2. Mesures

Les résultats bruts obtenus sont présentés à la fig. 5. L'évolution du flux vu par le secondaire en fonction du courant primaire (courbe bleue) est tracée ainsi qu'une estimation du flux qui serait embrassé par un enroulement secondaire de même dimensions placé dans l'air (courbe rouge).

Cette figure met en évidence les limites du système expérimental mis en œuvre, en montrant l'importance relative du flux dans l'air par rapport au flux dans le nickel pour les champs élevés. Ce résultat est assez logique car l'épaisseur de la couche de nickel déposée sur le cuivre ne vaut que $70\ \mu\text{m}$ pour un rayon total de $400\ \mu\text{m}$. De plus, avec un enroulement primaire comportant beaucoup de spires, le diamètre moyen des enroulements secondaires devient relativement grand. La section du nickel est par conséquent petite par rapport à la section vue par les enroulements secondaires et l'influence du flux de fuite est alors clairement visible. Le comportement non-linéaire aux faibles courants est cependant clairement mis en évidence. Pour modéliser les effets électromagnétiques de la couche de nickel qui recouvre le fil de cuivre, il est important d'estimer ses propriétés magnétiques en mesurant l'évolution de l'induction dans le matériau en fonction du champ magnétique appliqué. Cependant, le champ magnétique qui excite l'air et le cuivre est le même que celui qui excite le nickel en vertu de la règle de la conservation de la composante tangentielle du champ lors du passage d'un milieu à un autre. Il est donc possible de corriger la courbe obtenue pour s'affranchir du flux dans l'air.

L'estimation de l'induction dans le nickel est toutefois délicate car le flux dans le nickel est égal à la différence entre le flux mesuré et le flux estimé dans l'air. Le calcul de cette valeur ne peut être estimé qu'avec une précision limitée car la position réelle des spires de l'enroulement secondaire est inconnue, ce qui introduit une erreur sur l'estimation du flux dans l'air. Toutefois cette erreur peut être réduite en jouant sur la géométrie de la bobine pour faire correspondre les bobines d'excitation à la plus grande longueur possible du noyau. Pour un cadre Epstein classique, cette difficulté est résolue par un positionnement précis de chaque spire de l'enroulement secondaire et par l'ajout d'une bobine de compensation du flux dans l'air [8]. La photographie du dispositif présentée à la fig. 6 met en évidence la répartition des sections du circuit magnétique situées sous une bobine d'excitation.

Les résultats, corrigés de manière à éliminer l'influence de l'air, sont présentés à la fig. 7 pour un courant d'excitation assez faible ($0.3\ \text{A}_{\text{eff}}$) de façon à mettre en évidence les problèmes non-linéaires qui nous intéressent. La courbe bleue correspond à un champ croissant et la verte à un champ décroissant. La zone non-linéaire est obtenue pour des induction supérieures à envi-

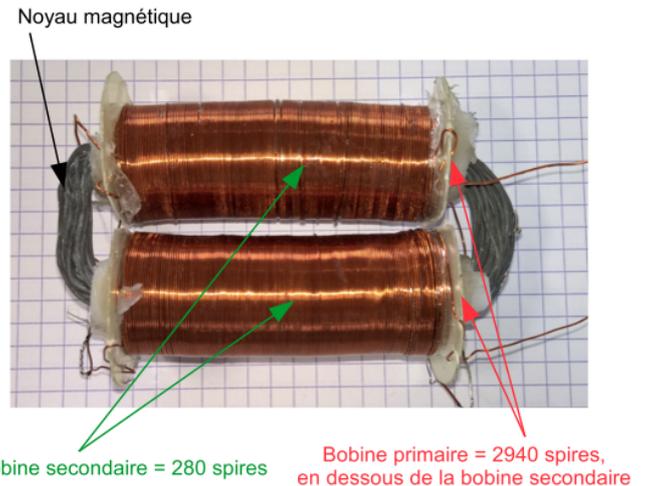


Fig. 6. Cadre utilisé pour l'estimation des caractéristiques mag.étiques du nickel

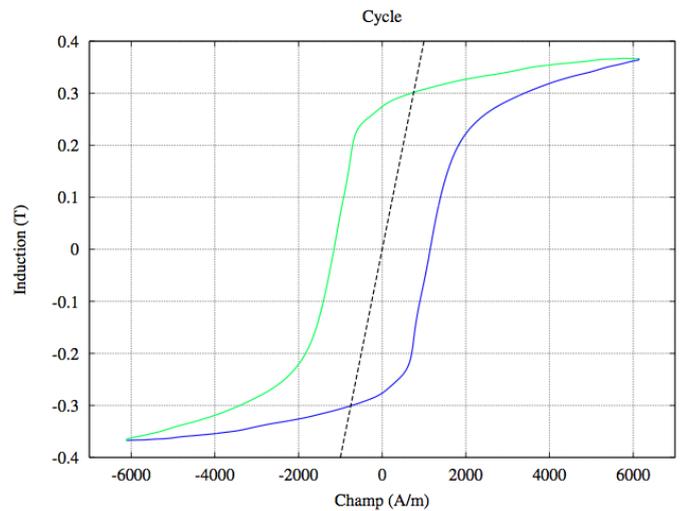


Fig. 7. Cycle d'hysteresis corrigé

ron $0.3\ \text{T}$ Cette valeur est plus faibles que celle trouvée dans littérature scientifique [7] mais le fait de déposer une couche de nickel sur du cuivre suppose des opérations complexes et des contraintes thermiques importantes qui justifient probablement ces différences.

Le cycle d'hystérésis relevé sur un noyau magnétique réalisé avec le fil étudié permet d'estimer la perméabilité du nickel en traçant une droite parallèle aux parties linéaires du cycle. La pente de la droite correspond $\mu_R \simeq 320$ lorsque la valeur crête de l'induction est inférieure à $0.3\ \text{T}$. Cette valeur de la perméabilité, ainsi que la valeur de la conductivité du nickel trouvée dans la littérature, seront utilisées pour modéliser les phénomènes électromagnétiques liés à l'effet de peau et aux effets de proximité dans les bobines constituées de fil nickelé.

4. APPROCHE ANALYTIQUE

4.1. Répartition ohmique : diviseur de courant

Lorsque le fil nickelé est utilisé pour fabriquer une bobine ou un câble, le courant se répartit dans les deux matériaux conducteurs. Aux basses fréquences, lorsque les effets des courants induits par les variations du champ magnétique sont négligeables, les deux matériaux peuvent être modélisés par des résistances connectées en parallèle et alimentées par une source de tension unique. En négligeant les effets tridimensionnels qui existent au voisinage des extrémités du fil où le courant se répartit dans le fil, le potentiel en chaque point de la longueur du fil, peut être

calculé par la formule du diviseur de tension. Il n'y a aucune différence de potentiel entre la couche de nickel et l'âme centrale en cuivre. Par conséquent, pour un fil beaucoup plus long que son diamètre, aucun courant ne traverse la frontière entre le cuivre et le nickel. Les courants i_{Cu} et i_{Ni} peuvent alors être obtenus à partir du courant total i_0 en utilisant le principe du diviseur de courant. Les résistances peuvent, quant à elles, être calculées avec l'expression courante $R = \rho \frac{l}{S}$ en fonction de la résistivité de chaque matériau (ρ_{Ni} et ρ_{Cu}) et des sections S_{Ni} et S_{Cu} offertes au passage du courant. La longueur l du fil est la même pour les deux parties du fil, elle n'intervient donc pas dans le calcul de la répartition des courants.

$$i_{Cu} = i_0 \frac{\frac{\rho_{Ni}}{S_{Ni}}}{\frac{\rho_{Cu}}{S_{Cu}} + \frac{\rho_{Ni}}{S_{Ni}}} \quad (1)$$

et

$$i_{Ni} = i_0 \frac{\frac{\rho_{Cu}}{S_{Cu}}}{\frac{\rho_{Cu}}{S_{Cu}} + \frac{\rho_{Ni}}{S_{Ni}}} \quad (2)$$

La répartition du courant dans les deux parties du fil ne dépend alors que de la résistivité de chaque matériau et de la section qu'il offre au passage du courant. Le concept du diviseur de courant ne prend en compte que les phénomènes ohmiques liés à la différence des résistivités et à l'épaisseur de la couche de nickel. La seconde étape du calcul consiste à prendre en compte les phénomènes électromagnétiques qui conduisent à l'effet de peau.

4.2. Effet de peau

L'effet de peau est bien décrit dans la littérature pour les fils cylindriques constitués d'un matériau unique, le cuivre par exemple [9]. Il est également bien décrit pour les tôles magnétiques des transformateurs [10, 11]. Les méthodes développées dans les ouvrages classiques ne s'appliquent pas aux ob-

jets composés de deux matériaux, encore moins lorsque l'un de ceux-ci est magnétique. Il est cependant possible de reprendre une approche purement analytique du phénomène pour étendre les méthodes disponibles dans la littérature afin d'estimer les phénomènes dans la limite des hypothèses posées.

Le courant induit par les variations de l'induction magnétique s'oppose au courant imposé par la source et cette action est plus forte au centre du fil. Il faut donc calculer la distribution du champ magnétique dans les conducteurs. Il est possible d'appliquer les équations de Maxwell à chaque partie du fil en vérifiant les conditions aux limites définies aux deux frontières : entre le cuivre et le nickel et entre le nickel et l'air. Les calculs analytiques ne sont, cependant, possibles que lorsque les matériaux sont supposés linéaires (μ_R constant), car ils sont basés sur le principe de superposition.

Un fil cylindrique rectiligne situé loin de toute influence magnétique extérieure se résume à un problème électromagnétique qui possède une symétrie cylindrique. Le repère cylindrique $(\vec{1}_r, \vec{1}_\theta, \vec{1}_z)$ centré sur le fil permet de bénéficier de cette symétrie (fig. 8). Le vecteur densité de courant est toujours dans la direction du fil, $\vec{J} = J \vec{1}_z$ où J est un scalaire qui représente la composante unique de la densité de courant. Avec un tel repère, le champ n'a qu'une seule composante, $\vec{H} = H \vec{1}_\theta$ où H est un scalaire qui représente la composante unique du champ magnétique. Les lignes de champ sont donc des cercles concentriques centrés sur l'origine du repère. Avec la symétrie cylindrique, le champ magnétique est tangent en tous points des deux frontières, à la fois sur celle qui sépare le cuivre du nickel et sur celle qui délimite le rayon extérieur du nickel. Le théorème d'Ampère stipule que la composante tangentielle est conservée aux frontières [9] ce qui implique que le champ magnétique est une fonction continue le long du rayon, depuis le centre du fil à une valeur de r qui dépasse le rayon du fil.

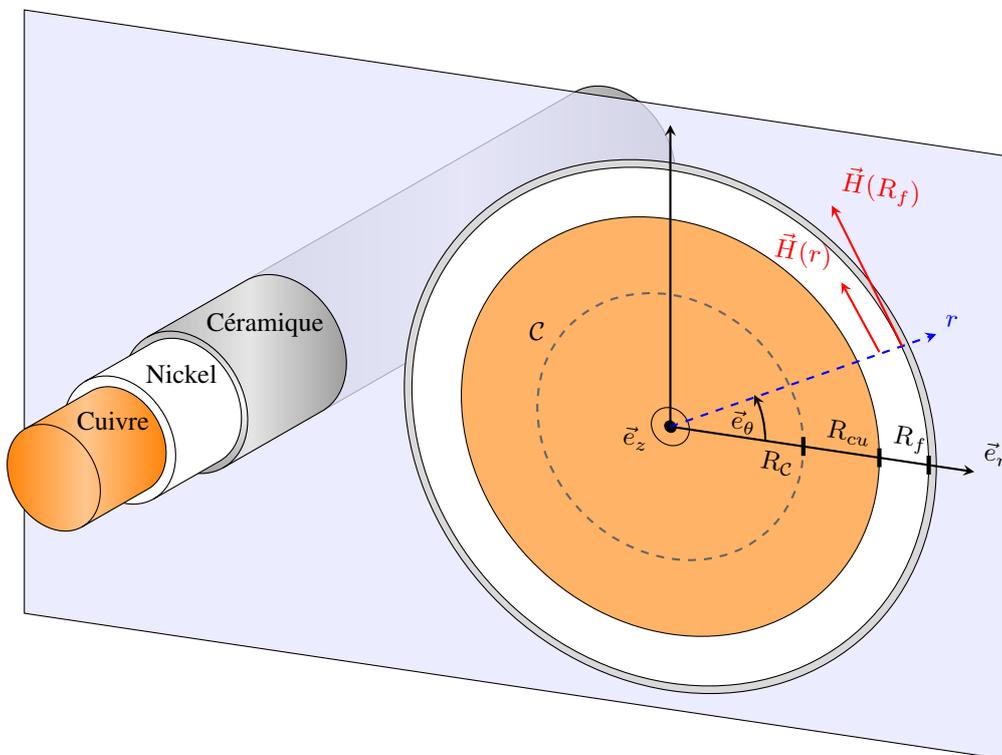


Fig. 8. Définition d'un repère cylindrique dans une coupe transversale du fil

4.2.1. Dans le cuivre ($r \leq R_{cu}$)

L'application de la forme intégrale du théorème d'ampère (3) à un contour circulaire \mathcal{C} situé dans le cuivre montre que le champ $\vec{H}(r)$ sur ce contour ne dépend que la densité de courant qui traverse la surface \mathcal{S} délimitée par le contour fermé \mathcal{C} . Les vecteurs densité de courant situés à l'extérieur de ce contour n'influent pas sur le champ sur le contour \mathcal{C} , le courant dans le nickel n'a donc pas d'influence sur le champ dans le cuivre.

$$\oint_{\mathcal{C}} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_{\mathcal{S}} \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

En alternatif, les courants induits modifient le courant dans le contour \mathcal{C} . Cet effet est pris en compte en utilisant la forme locale du théorème d'Ampère (4). Dans cette expression \vec{J} représente les courants induits et \vec{J}_S le courant imposé par la source extérieure. \vec{J}_S est orienté dans l'axe du fil, et ne possède qu'une composante selon \vec{e}_z qui est constante. L'influence des courants de déplacement $\epsilon d\vec{E}/dt$ est négligée.

$$r\vec{ot}(H(r)) = \vec{J}(r) + \vec{J}_S \quad (4)$$

Les courants induits dépendent de la conductivité σ du cuivre et du champ électrique \vec{E} déterminé par la loi de Maxwell-Faraday (5).

$$r\vec{ot}(E(r)) = -\frac{d\vec{B}(r)}{dt} \quad (5)$$

En régime sinusoïdal, et en considérant que \vec{J}_S est uniforme sur toute la section du cuivre, il est possible d'obtenir l'équation différentielle (6) qui régie le système en introduisant le coefficient $\gamma^2 = j\omega\mu\sigma$ qui est homogène à l'inverse du carré d'une distance (m^{-2}).

$$r^2 \frac{d^2 \underline{H}(r)}{dr^2} + r \frac{d\underline{H}(r)}{dr} - (1 + r^2 \gamma^2) \underline{H}(r) = 0 \quad (6)$$

Il est alors possible d'exprimer l'expression (6) à l'aide d'une variable x avec $x = \gamma r$ qui n'a alors plus de dimension.

$$x^2 \frac{d^2 \underline{H}(x)}{dx^2} + x \frac{d\underline{H}(x)}{dx} - (1 + x^2) \underline{H}(x) = 0 \quad (7)$$

Le coefficient γ possède une importance particulière qui permet la définition de l'épaisseur de peau δ grâce à l'expression (8).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (8)$$

L'équation 7 est connue dans la littérature scientifique [12], c'est une équation de Bessel modifiée de rang $n = 1$. Sa solution générale est une combinaison linéaire des deux fonctions de Bessel, celle de première espèce $I_1(x)$ et celle de seconde espèce $K_1(x)$. La solution générale de l'équation (7) est donnée par :

$$\underline{H}_{cu}(x) = C_1 I_1(x) + C_2 K_1(x) \quad (9)$$

où C_1 et C_2 sont des constantes complexes qui dépendent des valeurs imposées aux limites.

Dans le cuivre, le champ magnétique est nul au centre, en $r = 0$. La variable $x = \gamma r$ est un complexe dont le module est nul en $r = 0$. Le fait que le module de la fonction $K_1(x)$ tende vers l'infini lorsque x tend vers zéro impose de choisir $C_2 = 0$. Il ne reste donc qu'une seule solution et une seule constante C_1 à déterminer.

La constante C_1 doit être calculée en fonction de la valeur du champ magnétique à la frontière qui sépare le cuivre du nickel. En appliquant la forme intégrale du théorème d'Ampère,

le champ à la frontière dépend du courant imposé dans le cuivre i_{Cu} par le circuit extérieur.

$$\underline{H}(R_{Cu}) = \frac{i_{Cu}}{2\pi R_{Cu}} \quad (10)$$

ce qui donne :

$$C_1 = \frac{\underline{H}(R_{Cu})}{I_1(\gamma R_{Cu})} \quad (11)$$

4.2.2. Dans le nickel ($R_{cu} \leq r \leq R_f$)

Le cylindre de nickel est placé dans le champ magnétique externe créé par le courant qui circule dans l'âme de cuivre en plus de celui qui est créé par le courant dans le nickel. Cette particularité doit être prise en compte en notant que le champ à la frontière entre le cuivre et le nickel, pour $r = R_{Cu}$, est imposé par le courant dans l'âme de cuivre donné par la relation (10).

Les équations qui décrivent les phénomènes électromagnétiques dans le nickel sont celles du paragraphe précédent à condition de prendre les caractéristiques ρ , σ et μ du nickel. L'épaisseur de peau δ est beaucoup plus petite que dans le cuivre car le nickel est un matériau magnétique doux de perméabilité magnétique μ élevée.

La solution est une combinaison linéaire des fonctions de fonctions de Bessel $I_1(x)$ et $K_1(x)$ de la même forme que l'expression (9). Les constantes C_1 et C_2 sont cette fois calculées en fonction des deux conditions aux limites exprimées par (12) à la frontière entre le cuivre et le nickel et par (13) à la limite extérieure du fil.

$$\underline{H}_1 = \frac{i_0 C_{Cu}}{2\pi R_{Cu}} \quad \text{pour } x_1 = \gamma R_{Cu} \quad (12)$$

$$\underline{H}_2 = \frac{i_0}{2\pi R_f} \quad \text{pour } x_2 = \gamma R_f \quad (13)$$

Ces deux conditions aux limites correspondent à un système de deux équations à deux inconnues qui sont C_1 et C_2 .

$$\underline{H}_1 = C_1 I_1(x_1) + C_2 K_1(x_1) \quad (14)$$

$$\underline{H}_2 = C_1 I_1(x_2) + C_2 K_1(x_2) \quad (15)$$

Les constantes C_1 et C_2 sont alors obtenues en inversant le système (14 et 15) sous sa forme matriciel :

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1(x_1) & K_1(x_1) \\ I_1(x_2) & K_1(x_2) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{H}_1 \\ \underline{H}_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

4.2.3. Densité de courant dans le fil composite

La densité de courant en tout point du fil composite est calculée à partir de l'équation de Maxwell (4) et du champ magnétique donné par la relation (9) en prenant en compte les constantes définies avec les conditions aux frontières.

$$\underline{J}(r) = \frac{1}{r} \underline{H}(r) + \frac{d\underline{H}(r)}{dr} \quad (17)$$

La densité de courant s'exprime donc en fonction des fonctions de Bessel $I_1(x)$, $K_1(x)$ et de leurs dérivées par rapport à x notées $I_1'(x)$, $K_1'(x)$.

$$\underline{J}(r) = \frac{1}{r} [C_1 I_1(\gamma r) + C_2 K_1(\gamma r)] + C_1 \gamma I_1'(\gamma r) + C_2 \gamma K_1'(\gamma r) \quad (18)$$

en choisissant les constantes C_1 et C_2 correspondantes, en fonction de r , dans le matériau considéré.

4.3. Comparaison avec des résultats obtenus par Élément Fini

Cette approche analytique peut être corroborée à l'aide d'une simulation Éléments Finis réalisée dans les mêmes conditions. Pour cela une simulation magnéto-harmonique est faite en 2D sur une section de Cerafil500 de 0.8mm de diamètre. Les résultats présentés aux fig. 9 et 10 sont obtenus pour un courant crête de 5 A à une fréquence $f = 1$ kHz. Compte tenu de la résistivité ($\rho = 1.7210^{-8} \Omega \cdot m^{-1}$ pour le cuivre et $\rho = 8.710^{-8} \Omega \cdot m$ pour le nickel) et de la perméabilité relative ($\mu_R = 1$ pour le cuivre et $\mu_R = 320$ pour le nickel), l'épaisseur de peau vaut $\delta = 2080 \mu m$ pour le cuivre et $\delta = 264 \mu m$ pour le nickel. Dans le cuivre, comme dans le nickel, les épaisseurs de peau calculées sont plus grandes que les sections des conducteurs. La répartition des densités de courant est donc principalement ohmique, les phénomènes électromagnétiques dans le fil sont négligeables.

Lorsque la fréquence est plus élevée, les effets des courants induits dans la couche de nickel sont très importants. Les fig. 11 et 12, tracées à $f = 100$ kHz, illustrent ces phénomènes. Les phénomènes s'accroissent encore à 1 MHz (fig. 13 et 14) et le champ est pratiquement nul dans une grande partie du nickel au prix de courants induits très importants.

À $f = 100$ kHz l'épaisseur de peau vaut 209 μm dans le cuivre et 26 μm dans le nickel. Elles ne valent plus que 66 μm dans le cuivre et 8.3 μm dans le nickel à $f = 1$ MHz. Dans le cuivre, le champ est toujours nul au centre de l'âme de cuivre. Les phénomènes sont très différents dans la couche de nickel dont l'épaisseur vaut respectivement 2.7 et 8.4 fois l'épaisseur de peau dans ce matériau. Le champ au centre de la couche de nickel est beaucoup plus faible que près des limites.

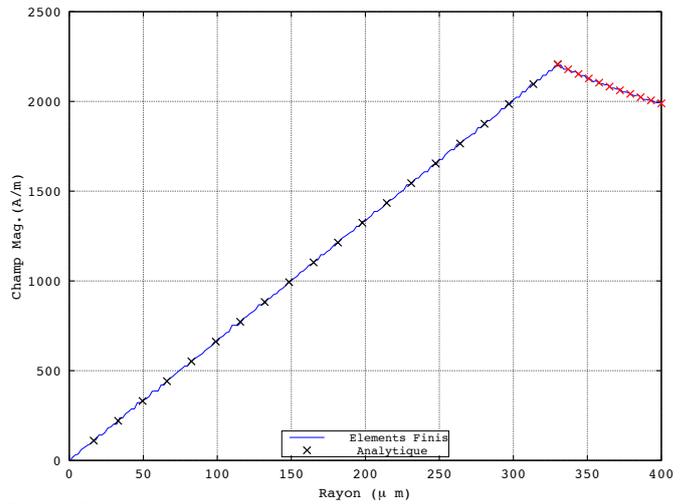


Fig. 10. Comparaison des champs obtenus analytiquement et par éléments finis à f kHz.

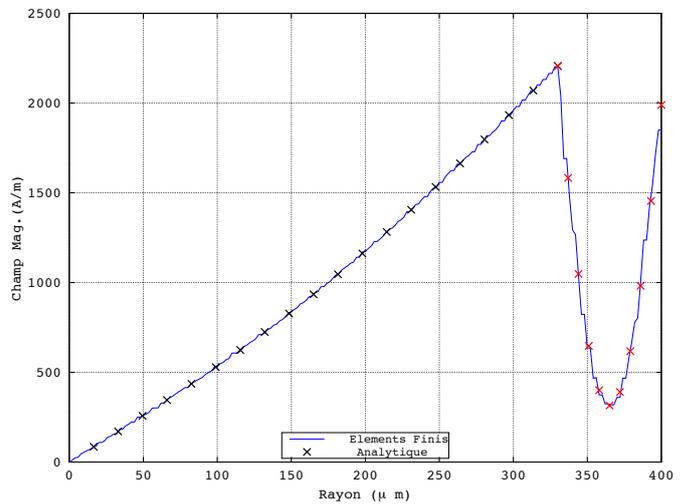


Fig. 11. Comparaison des champs obtenus analytiquement et par éléments finis à $f = 100kHz$.

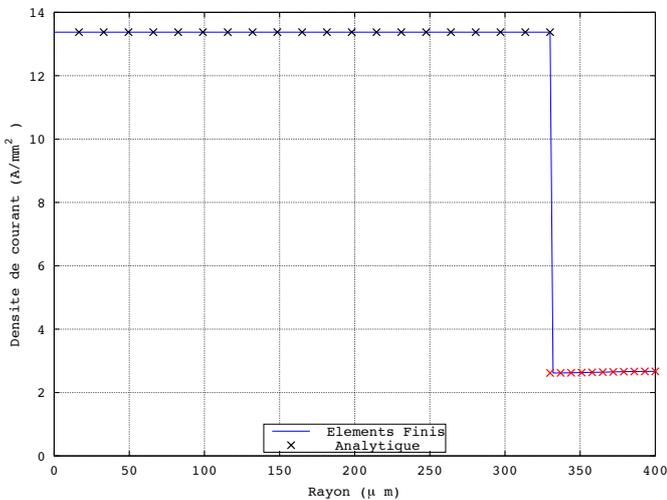


Fig. 9. Comparaison des densités de courant obtenues analytiquement et par éléments finis à $f=1$ kHz.

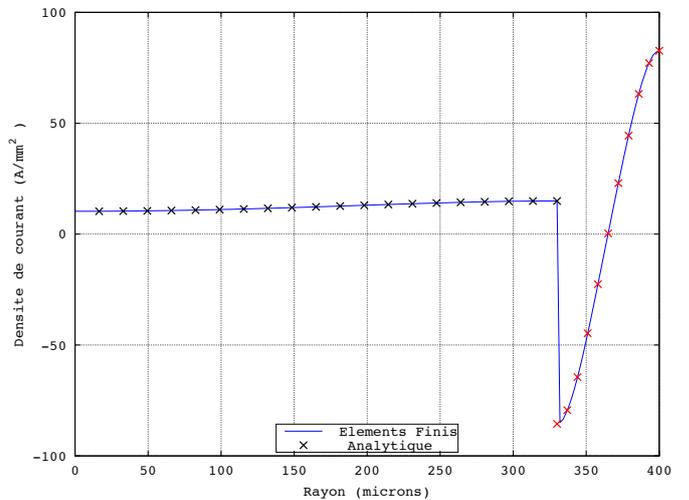


Fig. 12. Comparaison des densités de courant obtenues analytiquement et par éléments finis à $f = 100kHz$.

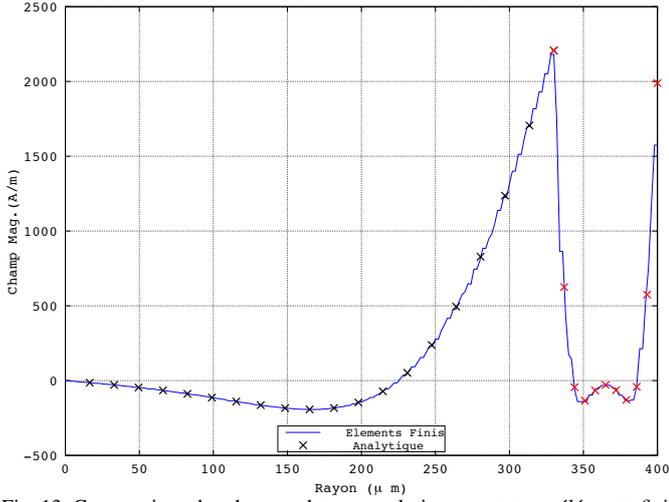


Fig. 13. Comparaison des champs obtenus analytiquement et par éléments finis à $f = 1MHz$.

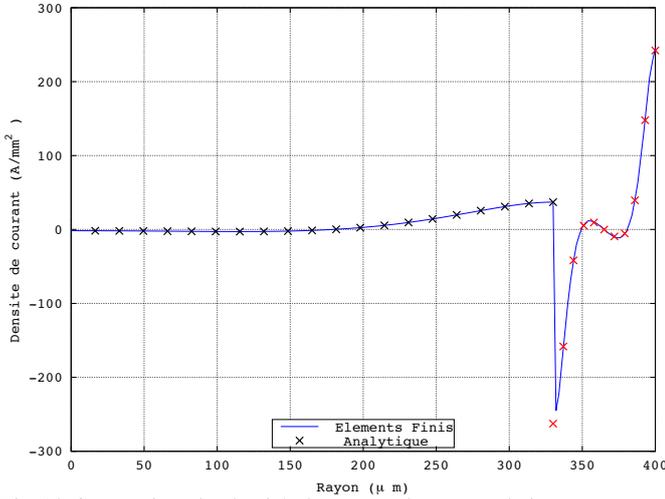


Fig. 14. Comparaison des densités de courant obtenues analytiquement et par éléments finis à $f = 1MHz$.

Pour les trois fréquences choisies, le calcul analytique et la méthode des éléments finis donnent des résultats identiques. Ceci valide l'approche analytique présentée.

4.4. Résistance équivalente du fil en haute fréquence

Il est possible de calculer la résistance en calculant la puissance dissipée dans les deux matériaux du fil à une fréquence donnée. La densité volumique de puissance en chaque point des matériaux conducteurs dépend de la résistivité au point considéré et du carré de la densité de courant au même point. La densité de puissance est exprimée en $W m^{-3}$.

$$P_v(r, t) = \rho J^2(r, t) \quad (19)$$

La densité de courant est une fonction du temps qui peut être obtenue à partir du nombre complexe $\underline{J}(r)$ calculé précédemment.

$$P_v(r, t) = \rho \Re \left\{ \underline{J}(r) \exp(j\omega t) \right\}^2 \quad (20)$$

$$= \rho |\underline{J}(r)|^2 \cos^2 \left\{ \omega t + \arg \{ \underline{J}(r) \} \right\} \quad (21)$$

La valeur moyenne de la densité de puissance s'exprime donc :

$$\langle P_v(r, t) \rangle = \frac{1}{2} \rho |\underline{J}(r)|^2 \quad (22)$$

La densité volumique de puissance dépend donc du carré du module du nombre complexe calculé avec les fonctions de Bessel et leurs dérivées. La puissance moyenne dans une longueur l donnée du fil est obtenue en intégrant la densité volumique de puissance sur la section du fil. Cette intégration est faite en décomposant la surface en couronnes élémentaire de rayon inter r et de largeur dr .

$$P_{moy} = l \int_{r=0}^{R_f} \frac{1}{2} \rho |\underline{J}(r)|^2 [\pi(r + dr)^2 - \pi r^2] \quad (23)$$

En calculant numériquement cette intégrale et en prenant en compte la résistivité et la densité de courant dans chaque matériau, la résistance équivalente R_{eq} pour une longueur l du fil peut être calculée.

$$R_{eq} = \frac{P_{moy}}{I/(I/\sqrt{2})^2} \quad (24)$$

La figure 15 donne cette valeur pour un mètre de fil de cuivre de diamètre 0.8 mm protégé par une couche de 70 μm de nickel. La figure 16 tracée pour un fil de cuivre ayant le même diamètre extérieur montre que la couche de nickel a une grande influence sur la résistance équivalente en fonction de la fréquence.

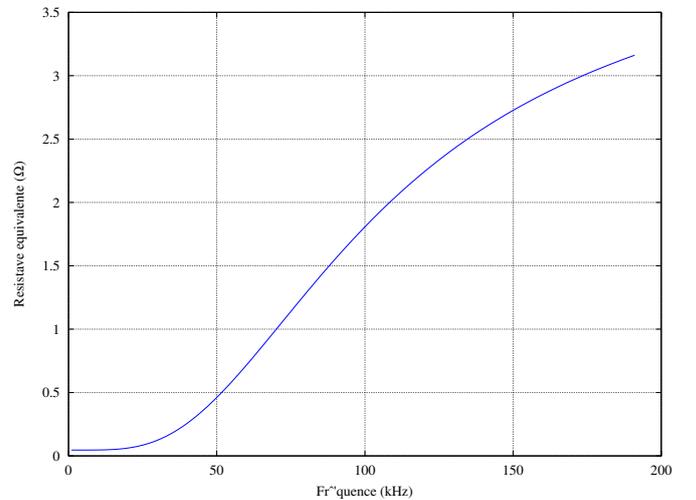


Fig. 15. Evolution de la résistance équivalente par mètre du fil composite en fonction de la fréquence.

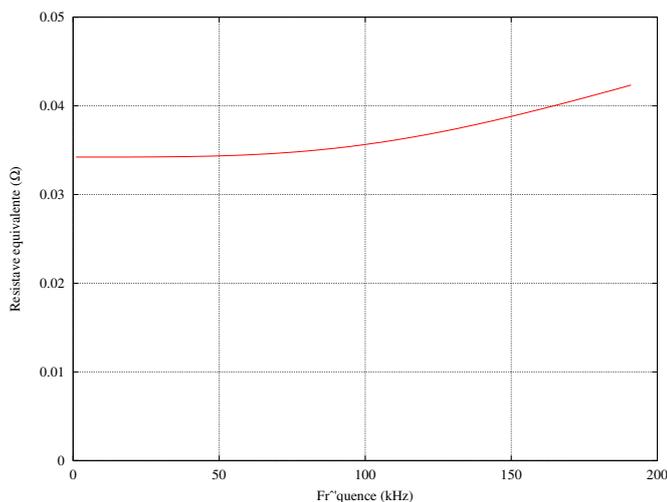


Fig. 16. Evolution de la résistance équivalente par mètre de fil en cuivre de même diamètre en fonction de la fréquence.

Cette approche analytique permet de calculer la résistance équivalente d'un fil de cuivre protégé de l'oxydation par une couche de nickel possédant des propriétés magnétiques. En HF, la résistance équivalente du fil protégé par une couche de nickel est beaucoup plus importante que pour un fil de cuivre classique. Ce calcul est basé sur des hypothèses qui ont forcément un caractère restrictif, le fil est, notamment, supposé isolé de toute autre influence électromagnétique extérieure. Cette hypothèse peut être vérifiée en utilisant une simulation Elements Finis plus génériques et en comparant les résultats avec des mesures effectuées sur un fil de même diamètre.

5. DISCUSSION

Les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur que les mesures réalisées sur les échantillons de fil nickelé avec une marge d'erreur néanmoins assez importante. Cela est dû en partie à la dépendance très forte de la résistance calculée aux faibles variations de deux paramètres :

- l'épaisseur de nickel
- la perméabilité relative du nickel

Ces deux paramètres sont assez difficiles à estimer. En effet, plusieurs microscopies ont clairement mis en évidence que la frontière entre le cuivre et le nickel n'était pas régulière. En conséquence, les sections efficaces de nickel sont estimées avec une erreur non négligeable. Le calcul analytique fait l'hypothèse d'un comportement linéaire du système pour pouvoir appliquer le théorème de superposition, en réalité la perméabilité relative du nickel dépend des niveaux de champ magnétique appliqués. Il est donc délicat de réduire le comportement hystérétique du nickel à un seul paramètre scalaire μ_R .

Il est donc nécessaire d'affiner les mesures de résistance réalisées afin d'être à même de réaliser le calcul analytique pour un point de fonctionnement identique. Il faut donc identifier précisément l'épaisseur de nickel présente autour du fil de cuivre afin d'en déduire une section équivalente comparable. Il faut également déterminer avec précision les niveaux de champ présents dans le nickel pendant la mesure pour en déduire la valeur de la perméabilité à utiliser.

Par ailleurs, le calcul analytique est basé sur des hypothèses qui ont forcément un caractère restrictif : le fil est supposé isolé, de toute autre influence électromagnétique extérieure. S'il est utilisé pour construire une bobine, le champ magnétique créé par les autres spires aura une influence sur la répartition de la densité de courant à l'intérieur du fil considéré (effet de proximité). La couche de nickel a un effet de blindage magnétique entre les spires qu'il sera nécessaire de prendre en compte dans les études à venir. Ces phénomènes doivent être étudiés par la méthode des

éléments finis en prenant en compte la non-linéarité de la courbe $B(H)$ du nickel.

6. CONCLUSIONS

La méthode proposée permet de faire une première évaluation de la résistance équivalente d'un fil de cuivre comportant une couche de nickel à l'extérieure en guise de protection contre l'oxydation. Le nickel est un matériau dont la conductivité est médiocre qui possède également des propriétés ferromagnétique. Il en résulte une accentuation du phénomène de peau dans la couche de nickel située autour du cuivre. La résistance équivalente de ce fil en HF prend donc des valeurs plus importantes que celles d'un fil classique. Les résultats obtenus présente une marge d'erreur assez importante par rapport aux mesures effectuées, ce qui s'explique par l'importance des paramètres liés au nickel.

Il est prévisible que l'amortissement des oscillations HF provoquées par les fronts raides soit plus marqué du fait de l'augmentation des résistances série d'un bobinage. La couche de nickel peut donc avoir des effets positifs sur les surtensions reçues par une telle machine lorsqu'elle est alimentée en MLI [13].

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les membres du Laboratoire des Procédés Céramiques et Matériaux Associés (LMPCA) pour les analyses microscopiques effectuées sur les différents échantillons de fil à isolation céramique.

8. RÉFÉRENCES

- [1] F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec, C. Petit, J. S. Michel, and A. Anton, "Dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C)," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on*. IEEE, 2006, pp. 740-743.
- [2] CeramaWire, "High temperature magnet wire, technical specifications," www.ceramawire.com, Tech. Rep.
- [3] S. Jumonji, J. Senoo, K. Ueda, S. Chabata, S. Amano, and A. Ono, "Super heat resistant ceramic insulated wire," in *Electrical Electronics Insulation Conference, 1995, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. Proceedings*. IEEE, 1995, pp. 557-563.
- [4] Y. Zhu, K. Mimura, and M. Isshiki, "Oxidation mechanism of copper at 623-1073 k," *Materials transactions*, vol. 43, no. 9, pp. 2173-2176, 2002.
- [5] D. Cozonac, V. Mihaila, G. Vélú, S. Duchesne, and J. P. Lecoite, "Opportunities for winding wires compatible with high temperatures in the range of 500 c," in *IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*. Bologna (Ita), juillet 2013, p. ID 1209, (Poster).
- [6] V. Iosif, D. Roger, S. Duchesne, and G. Velu, "Experimental characterization of the maximum turn-to-turn voltage for inorganic high temperature motor," in *Electrical Insulation Conference (EIC), 2014*, June 2014, pp. 69-73.
- [7] L. Li, "Stress effects on ferromagnetic materials : investigation of stainless steel and nickel," 2004.
- [8] IEC, 60404-2 : *Matériaux magnétiques — Partie 2 : Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des tôles et bandes magnétiques au moyen d'un cadre Epstein*, CEI IEC Std., 1996.
- [9] J.-P. Pérez, R. Carles, and R. Fleckinger, *Electromagnétisme Fondements et applications*, Masson, 1990.
- [10] C.-A. Schulz, D. Roger, S. Duchesne, and J.-N. Vincent, "E.m.f. between magnetic transformer sheets : theoretic aspects," in *Conference ISEF - Araras (France)*, 2009.
- [11] J.-P. Bielawski, S. Duchesne, D. Roger, C. Demian, and T. Belgrand, "Contribution to the study of losses generated by interlaminar short-circuits," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 4, pp. 1397-1400, April 2012.
- [12] M. N. O. Sadiku, *Numerical techniques in electromagnetics with Matlab - Third edition*, CRC press, 2009.
- [13] R. Kerkman, D. Leggate, and G. Skibinski, "Interaction of drive modulation and cable parameters on ac motor transients," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 3, pp. 722-731, May 1997.