

Homogénéisation numérique de noyaux en ferrite pour l'électronique de puissance

Riccardo Scorretti^{1,2}, Vittorio Bertolini², Marco Stella², Antonio Faba², Ermanno Cardelli²

¹⁾ Lab. Ampère – UMR 5005 CNRS, Lyon, France

²⁾ University of Perugia, Italy

Email : riccardo.scorretti@unipg.it

Résumé—Une méthode simple d'homogénéisation de noyaux de ferrite est mise en œuvre par la méthode des Éléments Finis. Les résultats obtenus sont comparés à des mesures expérimentales avec deux ferrites différentes.

I. INTRODUCTION

Les ferrites sont les matériaux magnétiques les plus adaptés aux moyenne-haute fréquence (jusqu'à plusieurs dizaines de MHz) en raison de leur haute perméabilité magnétique et faible conductivité électrique. Leur structure cristallographique est constituée de grains conducteurs à haute perméabilité, entourés de minces frontières diélectriques. Le but de ce travail est de modéliser les pertes dans les noyaux de ferrite.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Homogénéisation

De nombreux travaux existent sur l'homogénéisation numérique, dont la plupart font appel à des méthodes complexes comme la FEM multi-échelle. L'hypothèse de médias périodiques est souvent nécessaire. Dans la gamme de fréquences utilisées en électronique de puissance la frontière entre les grains se comporte comme un diélectrique avec perte; les courants de Foucault suivent des chemins macroscopiques. Nous proposons une méthode alternative pour déterminer les propriétés équivalentes des ferrites, à partir de l'hypothèse (limitative) que pour tout chemin γ l'on puisse écrire :

$$\int_{\gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{\gamma} \mathbf{e} \cdot d\mathbf{l} \quad (1)$$

où les lettres majuscules/minuscules désignent respectivement des quantités homogénéisées/microscopiques :

$$\mathbf{e} = \begin{cases} \mathbf{e}_g & \text{dans le grain} \\ \mathbf{e}_b & \text{dans la frontière} \end{cases} \quad (2)$$

Il est crucial de souligner que cette hypothèse n'est acceptable que si les lignes de courant sont principalement intergranulaires. Pour tout chemin mésoscopique γ aligné avec \mathbf{e} la circulation le champ électrique s'écrit :

$$\int_{\gamma} \mathbf{e} \cdot d\mathbf{l} \simeq \ell E \simeq \ell \delta_g e_g + \ell \delta_b e_b \quad (3)$$

où $\ell = |\gamma|$ est la longueur du chemin, δ_g et δ_b sont les proportions linéaires du grain et de la frontière respectivement, qui peuvent être déterminés expérimentalement. Le champ électrique macroscopique s'écrit donc :

$$\mathbf{E} = \delta_g \langle \mathbf{e}_g \rangle + \delta_b \langle \mathbf{e}_b \rangle \quad (4)$$

où $\langle \cdot \rangle$ indique la moyenne spatiale le long de γ . La densité de courant s'écrit :

$$\mathbf{j} = \begin{cases} \mathbf{j}_g = \sigma_g \mathbf{e}_g & \text{dans le grain} \\ \mathbf{j}_b = (\sigma_b + j\omega\epsilon_b) \mathbf{e}_b & \text{dans la frontière} \end{cases} \quad (5)$$

La densité de courant macroscopique s'écrit :

$$\mathbf{J} = \langle \mathbf{j} \rangle \quad (6)$$

où $\langle \cdot \rangle$ indique la moyenne spatiale sur toute surface mésoscopique Σ . En utilisant (4)-(6) on retrouve l'expression de la résistivité électrique homogénéisée, qui n'est valable qu'à la condition que les chemins de courant soient majoritairement inter-granulaires :

$$\rho^{eq} = \langle \rho \rangle = \delta_g \rho_g + \delta_b \rho_b \quad (7)$$

où $\rho_g = 1/\sigma_g$ et $\rho_b = 1/(\sigma_b + j\omega\epsilon_b)$ sont les résistivités (complexes) respectivement des grains et des frontières. En utilisant des arguments similaires on retrouve l'expression de la réductivité homogénéisée :

$$\nu^{eq} = 1/\mu^{eq} = \delta_g \nu_g + \delta_b \nu_b \quad (8)$$

B. Formulation FEM

Un modèle axisymétrique de noyau de ferrite est discrétisé en utilisant une formulation FEM \mathbf{H} :

$$(\rho^{eq} \text{curl } \mathbf{H}, \text{curl } \mathbf{H}') + j\omega(\mu^{eq} \mathbf{H}, \mathbf{H}') = 0 \quad (9)$$

où la force magnétomotrice NI est imposée en utilisant la condition aux limites de Dirichlet sur $\mathbf{n} \times \mathbf{H}$. Afin de valider l'homogénéisation nous avons effectué des simulations où un nombre limité de grains/frontières sont discrétisés, en utilisant cette même formulation avec des quantités microscopiques.

C. Caractérisation des ferrites

Des mesures ont été réalisées en utilisant deux ferrites différentes, à savoir N30 et T38. Les paramètres requis pour la caractérisation du matériau sont : la perméabilité magnétique (μ_r^{eq}), la conductivité électrique du grain et de la frontière (σ_g et σ_b), la permittivité électrique de la frontière (ϵ) et les rapports δ_g et δ_b . La perméabilité magnétique peut être obtenue par une mesure voltampérométrique. Les rapports δ_g et δ_b sont évalués par des mesures optiques à l'aide d'un microscope optique ou électronique. La procédure d'estimation des paramètres électriques (σ_g, σ_b et ϵ) est expliquée dans [1]. L'impédance (complexe) du matériau est mesurée du courant continu jusqu'à des dizaines de MHz. Ensuite, un circuit équivalent $R_g - R_b || C_b$ (Fig. 1) est identifié, à partir duquel σ_g , σ_b et ϵ_b sont calculés (Tab. I).

TABLE I
PARAMÈTRES DES FERRITES

	σ_g (S/m)	σ_b (S/m)	ϵ_b	μ_r^{eq}	δ_b
T38	25	6.67×10^{-4}	33	10000	5.9×10^{-5}
N30	13.9	1.3×10^{-4}	8	4300	4.9×10^{-5}

III. RÉSULTATS

A. Validité de l'homogénéisation

Afin de valider (7)–(8) nous avons comparé les calculs sur un noyau homogénéisé avec un noyau où 100 grains ont été discrétisés en grille régulière. En raison de la symétrie de rotation, les grains ainsi discrétisés correspondent à des anneaux dans l'espace 3D réel. Les calculs ont donc été effectués en utilisant $\rho = \rho_g$ et $\rho = \rho_b$, mais avec la perméabilité homogénéisée μ^{eq} . Il n'a pas été possible d'utiliser des

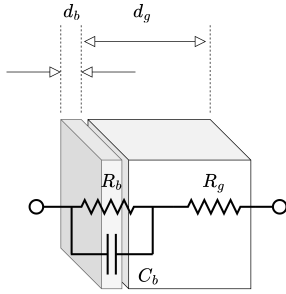


FIGURE 1. Modèle circuital grain/frontière

paramètres réalistes pour l'épaisseur de la frontière, donc un « faux » matériau a été simulé. Néanmoins, la théorie devrait être valable à condition que la résistance de la frontière soit bien inférieure à la résistance du grain, c'est-à-dire :

$$\kappa = \frac{d_g |\sigma_b + j\omega\epsilon_b|}{d_b \sigma_g} \ll 1 \quad (10)$$

où le rapport κ est déduit du modèle circuit équivalent grain/limite représenté sur la figure 1. Dans la figure 2 sont représentées la densité de courant calculée en utilisant le modèle discret (en haut) et le modèle homogénéisé correspondant du noyau (en bas). On observe une certaine ressemblance entre les lignes de courant des deux modèles. Les pertes par courants de Foucault dans le cœur sont calculées dans le cas du modèle discret et homogénéisé :

$$W = \text{Re} [\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}^*] = \text{Re} [e \cdot \mathbf{j}^*] \quad (11)$$

On observe que le modèle homogénéisé fournit une précision acceptable pour $\kappa < 1$. Par exemple à 100 kHz l'erreur relative est inférieure à 2% pour $\kappa = 1$, alors qu'elle monte à 36% pour $\kappa = 10$ (les détails seront donnés dans un article plus complet).

B. Comparaison avec des mesures expérimentales

Nous avons comparé les pertes mesurées avec les ferrites T38 et N30 avec les calculs pour plusieurs fréquences. Les résultats obtenus sont mitigés : le modèle fournit des valeurs

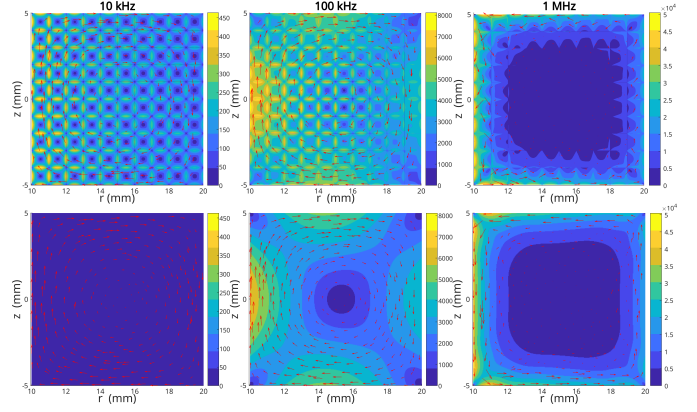


FIGURE 2. Courant induit à plusieurs fréquences dans le modèle discret (en haut) et le modèle homogénéisé correspondant (en bas).

assez précises pour la T38, alors que les pertes sont sous-estimées pour la N30 (figure 3). Les pertes mesurées sont bien proportionnelles à f^2 , mais il existe un rapport d'environ 3 entre les pertes mesurées et calculées.

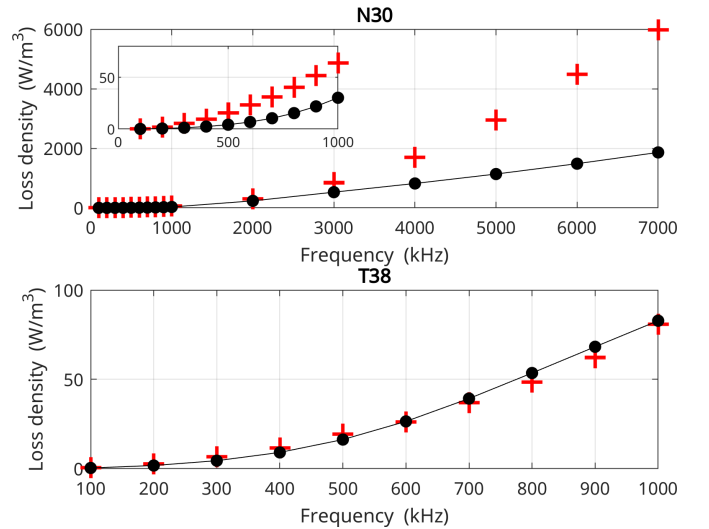


FIGURE 3. Densité de perte mesurée (+) et calculée (ligne) dans les ferrites N30 (en haut) et T38 (en bas).

IV. CONCLUSION

La théorie de proposée est validée, dans les limites de l'hypothèse de courants inter-granulaire. Les pertes calculées sont en accord avec les mesures réalisées avec la ferrite T38, alors qu'elles sont sous-estimées avec la N30. Des mécanismes dissipatifs différents des courants de Foucault peuvent expliquer ces résultats [2].

RÉFÉRENCES

- [1] Dobák, S.; Beatrice, C.; Tsakaloudi, V.; Fiorillo, F. Magnetic Losses in Soft Ferrites. *Magnetochemistry* 2022, 8, 60. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8060060>
- [2] F. Fiorillo, C. Beatrice, O. Bottauscio and E. Carmi, "Eddy-current losses in Mn-Zn ferrites", *IEEE Trans. Mag.* **50**(2), pp. 1 – 5, 2021.