



**HAL**  
open science

## Modèle fréquentiel large bande pour inductances de filtrage CEM

Fabien Sixdenier, Ousseynou Yade, Christian Martin, Arnaud Bréard,  
Christian Vollaire

► **To cite this version:**

Fabien Sixdenier, Ousseynou Yade, Christian Martin, Arnaud Bréard, Christian Vollaire. Modèle fréquentiel large bande pour inductances de filtrage CEM. Symposium de Génie Electrique (SGE'18), Jul 2018, Nancy, France. hal-01875948

**HAL Id: hal-01875948**

**<https://hal.science/hal-01875948>**

Submitted on 18 Sep 2018

**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.

# Modèle fréquentiel large bande pour inductances de filtrage CEM

Fabien SIXDENIER<sup>(1)</sup>, Ousseynou YADE<sup>(2)</sup>, Christian Martin<sup>(1)</sup>, Arnaud Bréard<sup>(2)</sup> et Christian Vollaire<sup>(2)</sup>

(1) : Univ Lyon, UCB Lyon 1, CNRS, AMPERE, Villeurbanne, F-69100, France

(2) : Univ Lyon, ECL, CNRS, AMPERE, Ecully, F-69134, France

**Concevoir un filtre passif contre les perturbations électromagnétiques est une tâche plus difficile qu'il n'y paraît. En effet, une fois les valeurs nécessaires des composants choisis, il faut en dimensionner certains. C'est bien souvent le cas des inductances de mode commun et de mode différentiel. On demande à ces composants de continuer à être efficaces à très haute fréquence malgré l'apparition de nouveaux phénomènes qui étaient négligeables à basse fréquence (chute de perméabilité, capacité parasite des bobinages). Deux difficultés majeures sont à prendre en compte lorsqu'on veut concevoir ces inductances. La première consiste à prendre en compte le comportement fréquentiel des matériaux magnétiques constituant les inductances. La deuxième difficulté réside dans la prédiction de la capacité parasite des bobinages. Ces deux phénomènes vont influencer sur les performances globales du filtre en haute fréquence. Nous proposons ici des méthodes pour simuler le comportement fréquentiel d'inductances de filtrage. Une première partie se concentrera sur la prise en compte du comportement fréquentiel de la perméabilité complexe et la deuxième se concentrera sur la partie évaluation des capacités parasites des bobinages. Le tout permettra de bâtir un modèle fréquentiel large-bande pouvant être simulé dans un logiciel circuit. Toutes ces méthodes pourront alors servir à optimiser globalement le comportement d'un filtre CEM.**

*Logiciel circuit, filtre CEM, perméabilité complexe, capacités parasites...*

## INTRODUCTION

Les convertisseurs statiques ont fait des progrès considérables ces dernières années grâce à une meilleure connaissance des interrupteurs statiques et des propriétés semi-conductrices de différents matériaux (*SiC*, *GaN*). Ces connaissances ont permis d'augmenter la fréquence des convertisseurs statiques et ainsi de réduire le volume des composants passifs nécessaires. Malheureusement, cette augmentation des fréquences de découpage a l'inconvénient de générer un plus haut niveau de perturbations électromagnétiques nuisant alors à la compatibilité électromagnétique (CEM). Les perturbations conduites se subdivisent en :

- perturbations de mode commun (MC)
- perturbations de mode différentiel (DM)

Généralement chaque type de perturbations est filtré par un circuit passif *LC*. Les condensateurs sont choisis en premier car ils s'agit de composants « sur étagère ». Les composants magnétiques, eux, sont souvent conçus à partir d'une feuille blanche. Il faut alors choisir le matériau magnétique, la taille du circuit magnétique, le nombre de spires, le type de conducteurs... Les ingénieurs et les chercheurs se sont alors impliqués dans le développement de logiciels de conception de ces composants passifs ou de méthodes permettant d'en faciliter la conception [1], [2], [3].

Les matériaux magnétiques ont une limite d'utilisation en fréquence représentée par la fin du plateau de la partie réelle de la perméabilité complexe  $\underline{\mu}$  eq. (1).

$$\underline{\mu} = \mu' - j\mu'' \quad (1)$$

Dans l'équation (1), tous les termes dépendent de la fréquence (excepté le nombre imaginaire pur  $j$ ). Plusieurs approches

existent pour modéliser ce comportement dont on trouve un bon état de l'art dans la thèse [4]. Il ressort de cet état de l'art, que beaucoup d'approches requièrent une ou plusieurs mesures sur le système quasi-final pour en identifier un des éléments. Certaines autres approches, obtiennent parfois des résultats physiquement aberrants (exemple perméabilité négative).

L'évaluation des capacités parasites des bobinages est une tâche tout autant voire plus difficile que la première. On trouve également dans la littérature, un grand nombre de formules empiriques qui prennent pour origine les solutions de problèmes classiques d'électrostatique, tel que deux conducteurs cylindriques infinis et parallèles l'un à l'autre ou un conducteur cylindrique infini en interaction avec un plan infini lui aussi. On trouve alors plus ou moins d'hypothèses simplificatrices pour se ramener à une relation analytique qui serait fonction du nombre de spires, de la nature des isolants en présence ainsi que de dimensions géométriques. On trouve dans [3], un bel exemple avec une explication détaillée d'une telle approche.

Afin de construire un modèle à la fois suffisamment simple pour être intégré dans une démarche de conception et suffisamment précis pour que les objets conçus et construits aient des caractéristiques aussi proches que possibles, nous proposons aussi d'adapter un modèle de perméabilité [5] qui permet d'insérer directement les équations représentatives dans un logiciel de type circuit (LTSPICE) sous forme d'équations de Laplace. C'est cette partie qui sera expliquée dans ce résumé. Dans la version étendue, on trouvera la partie concernant l'évaluation des capacités parasites des bobinages qui fera appel à des solutions analytiques qui feront appel le moins possible à des hypothèses simplificatrices (exemple : solution exacte de deux conducteurs cylindriques finis chargés parallèles entre eux ou non).

## MODÈLE ET IMPLÉMENTATION

### Modèle de matériaux magnétiques

On trouve un certain nombre de modèles analytiques dans la littérature pour modéliser la perméabilité complexe, à base de cascades de fonctions de transfert du premier [6] ou du deuxième ordre [7] ou encore par des fractions rationnelles de haut degré [4]. Le modèle de Nomura est un modèle empirique qui utilise la conjonction de deux lignes droites sur une échelle log-log. Il en ressort l'équation (2) capable de modéliser assez finement  $\mu'$  ou  $\mu''$ .

$$\mu(f) = \frac{10^{a_2 \log_{10}(f) + b_2}}{1 + 10^{(a_2 - a_1) \log_{10}(f) + (b_2 - b_1)}} \quad (2)$$

$a_1$ ,  $a_2$  sont les pentes et  $b_1$  et  $b_2$  sont les ordonnées à l'origine, des droites mentionnées précédemment, respectivement. Ainsi, pour un matériau donné, les utilisateurs doivent identifier 4 paramètres par courbe, soit 8 au total. Pour obtenir une meilleure précision, nous avons identifié ces paramètres numériquement.

## Implémentation dans LTSPICE

Ici, nous expliquons comment implémenter le modèle dans le logiciel LTSPICE à partir de sa bibliothèque de composants et de fonctions mathématiques disponibles. Nomura [5] a utilisé des sources de tensions "comportementales" (comprendre contrôlées par une équation) pour représenter la partie inductive et résistive de l'inductance. Dans notre cas, nous allons séparer les domaines électriques et magnétiques. Ainsi les parties inductives et résistives coté électrique sont représentées coté magnétique par une capacité ( $C_\mu$ ) et une résistance ( $R_\mu$ ) reliées en série [2].

$$C_\mu = \frac{\mu_0 A_e (\mu'^2 + \mu''^2)}{\mu' MPL} \quad (3)$$

$$R_\mu = \frac{\mu'' MPL}{\mu_0 \omega A_e (\mu'^2 + \mu''^2)} \quad (4)$$

Dans les équations (3) et (4),  $A_e$  est la section du circuit magnétique,  $MPL$  est la longueur moyenne et  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide. La figure 1 présente un exemple d'implémentation.  $B1$  et  $B2$  sont des sources de tension contrôlées en courant. Elles servent à représenter le bobinage et le passage entre les domaines électriques et magnétiques (gyrateur).  $B\_R\_mu$  et  $B\_C\_mu$  sont des sources de tension comportementales qui reproduisent le comportement de la capacité  $C_\mu$  et de la résistance  $R_\mu$  (équations ((3)) et (4)). A noter que les résistances fictives  $R1$  et  $R3$  sont là uniquement pour empêcher l'association de sources de tension en parallèle. On a également un aperçu de comment programmer les fonctions mathématiques via des directives SPICE (.func dans la figure 1).

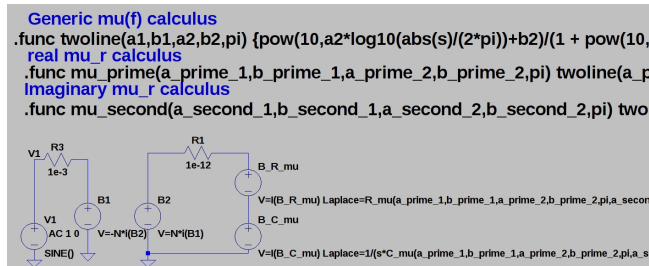


Fig. 1. Implémentation du modèle de Nomura dans LTSPICE

## RÉSULTATS

### Modèle de matériaux magnétiques

Nous avons testé le modèle sur deux matériaux nanocristallins de valeur de perméabilité très différente. L'un appartient à la catégorie des tores Nanophy ( $\mu_r \approx 30000$ ) et le second à la catégorie  $K\mu$  ( $\mu_r \approx 200$ ) tous deux issus de la société Aperam®. Les parties réelles et imaginaires de la perméabilité complexe ont été extraites de mesures faites avec un impédancemètre HP4294A. C'est à partir de ces mesures que les paramètres du modèle ont été identifiés. Les résultats de cet identification pour les deux matériaux sont reportés dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres du modèle de Nomura

Nanophy cores ( $\mu_r \approx 30000$ )				
	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$
$\mu'$	-0.0116	-1.1483	4.6099	10.30
$\mu''$	0.5303	-0.8063	1.5041	8.368
$K\mu$ cores ( $\mu_r \approx 200$ )				
	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$
$\mu'$	0.0003	-1.56	2.356	13.84
$\mu''$	1.0054	-0.627	-5.29	6.745

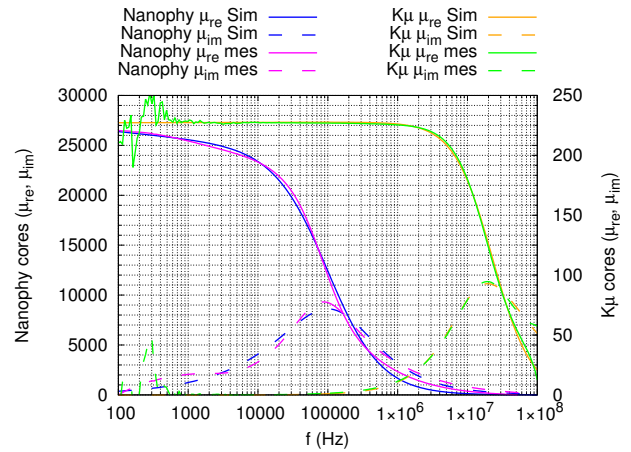


Fig. 2. Parties réelle  $\mu_{re}$  et imaginaire  $\mu_{im}$  simulées (sim) et mesurées (mes) pour les matériaux Nanophy (axe de gauche) et les matériaux  $K\mu$  (axe de droite)

On peut voir sur la figure 2 que les courbes simulées et mesurées sont en très bon accord. Le matériau  $K\mu$  est un peu mieux représenté que son homologue Nanophy. Nous pourrions donc, avec un bon indice de confiance, réutiliser ces paramètres et faire varier le nombre de spires et les dimensions du circuit magnétique et ainsi prédire le comportement fréquentiel d'une inductance de filtrage en prenant bien en compte la variation de la perméabilité complexe et ses conséquences sur la solution de filtrage envisagée.

## CONCLUSION

L'intérêt de cette approche est qu'elle permet de séparer les domaines électriques (bobinage) et magnétiques (circuit et matériau magnétique) et de se concentrer sur une partie à la fois. Le modèle LTspice reste relativement simple et certaines parties peuvent être empaquetées (bobinage et circuit magnétiques) pour réaliser des sous-circuits qui seront connectés ensemble ensuite afin de constituer la solution de filtrage. Il reste, pour être complet, à trouver une méthode afin d'estimer les capacités parasites des bobinages qui interviennent assez tôt en fréquence si le nombre de spires est élevé et qu'elles sont proches les unes des autres. Ce sera l'objet de la version étendue.

## RÉFÉRENCES

- [1] C. Henkenius, N. Fröhleke, and J. Böcker, "Numerical optimization of passive line filter components for suppression of electromagnetic interference (emi)," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016 IEEE*. Long Beach, CA, USA : IEEE, 20-24 March 2016.
- [2] F. Mesmin, F. Sixdenier, H. Chazal, and A. Kedous-Lebouc, "Improvement of emi filters performance by taking into account frequency-dependant magnetic material properties." in *Proceedings of the 18th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*. Sydney : Australia : Compumag 2011, July 2011.
- [3] M. Kovacic, Z. Hanic, S. Stipetic, S. Krishnamurthy, and D. Zarko, "Analytical wideband model of a common-mode choke," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 27, no. 7, pp. 3173–3185, 2012.
- [4] C.-E. C. QUISPE, "HF characterization and modeling of magnetic materials for the passive components used in EMI filters," 2013.
- [5] K. Nomura, N. Kikuchi, Y. Watanabe, S. Inoue, and Y. Hattori, "Novel spice model for common mode choke including complex permeability," in *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, March 2016, pp. 3146–3152.
- [6] L. Dalessandro, W. Odendaal, and J. Kolar, "Hf characterization and nonlinear modeling of a gapped toroidal magnetic structure," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 21, no. 5, pp. 1167–1175, 2006.
- [7] T. Tsutaoka, "Frequency dispersion of complex permeability in mn-zn and ni-zn spinel ferrites and their composite materials," *Journal of Applied Physics*, vol. 93, no. 5, pp. 2789–2796, 2003.