HAL
open science

Dimensionnement et mise en forme d'inductances pour convertisseurs de puissance

Gaëlla Frajer, Gérard Delette, Cyril Rado, Hervé Chazal, Pierre Perichon, Olivier Isnard, Florence Servant

To cite this version:

Gaëlla Frajer, Gérard Delette, Cyril Rado, Hervé Chazal, Pierre Perichon, et al.. Dimensionnement et mise en forme d'inductances pour convertisseurs de puissance. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361566

HAL Id: hal-01361566

https://hal.science/hal-01361566

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.

Dimensionnement et mise en forme d'inductances pour convertisseurs de puissance

Gaëlla FRAJER[1,2], Gérard DELETTE[1,2], Cyril RADO[1,2], Hervé CHAZAL[1,4], Pierre PERICHON[1,2], Olivier ISNARD[1,3], Florence SERVANT[1,2]

(1) Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France
(2) CEA, LITEN - CEA Grenoble, 38054 Grenoble Cedex 9
(3) CNRS, Institut Néel, 25 rue des martyrs 38042 Grenoble Cedex 9
(4) Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble G2Elab, Université Grenoble Alpes, 38031, Grenoble Cedex 1

RESUME – Les convertisseurs de puissance utilisent des composants magnétiques passifs qui interviennent à hauteur de 40 % dans le volume et le coût du convertisseur. La montée en fréquence des composants actifs, notamment via la technologie GaN, permet d'envisager une réduction importante de la taille des inductances dès lors que les pertes magnétiques seront contrôlées. Deux voies complémentaires peuvent permettre d'atteindre cet objectif : (i) la réduction des dissipations en fréquence au sein du matériau magnétique et (ii) la mise en forme d'architectures plus favorables pour la gestion thermique des inductances. Le procédé de coulage en bande a été mis en œuvre pour réaliser des noyaux magnétiques à partir de ferrite spinelle. Une méthodologie de dimensionnement spécifique a permis de déterminer les facteurs de forme optimaux. Elle s'appuie sur des caractérisations de pertes magnétiques.

Mots-clés—inductance, convertisseur, haute fréquence, dimensionnement, pertes, ferrites

1. INTRODUCTION

Les convertisseurs de puissance par découpage sont de plus en plus présents dans les systèmes électroniques nomades, les véhicules électriques et la distribution d'électricité, couvrant ainsi une large gamme de puissance (quelques W à plusieurs 100 kW). Les gains sur la vitesse de commutation des composants actifs actuels offrent la possibilité de faire fonctionner les convertisseurs à des fréquences de découpage supérieures à 1 MHz. Cette montée en fréquence aura un effet bénéfique sur le volume des composants passifs qui représentent typiquement 40% du volume et du coût des convertisseurs. En effet, une part importante des composants passifs est constituée par les inductances dont le volume est inversement proportionnel à la fréquence de découpage. Le principal verrou à la montée en fréquence des convertisseurs provient des matériaux magnétiques constituant le cœur des inductances qui sont le siège de dissipations thermiques. Ces pertes trouvent leurs origines dans les processus dynamiques d'aimantation (déplacement de parois et rotation de spins) et augmentent toujours avec la fréquence. Malgré les optimisations apportées aux matériaux magnétiques, il devient primordial de pouvoir évacuer la chaleur produite au sein des inductances dont le volume et la surface d'échange thermique se réduisent.

Actuellement, les inductances répondant aux spécifications de convertisseur de puissance > 1 kW sont réalisées avec des composants monolithiques classiques. Les matériaux magnétiques utilisés, présentant un niveau de perte acceptable entre 1 et 5 MHz, sont des ferrites de structure spinelle de type NiZn $(Ni,Zn)Fe_2O_4$. Le comportement en fréquence de ces matériaux peut encore être amélioré via notamment l'ajout de Co et le contrôle de la microstructure (taille des grains) [1], [2]. Toutefois, la taille des noyaux d'inductance est conditionnée par la surface d'échange thermique nécessaire à l'évacuation de la chaleur dissipée. Actuellement, la puissance spécifique transférée par les inductances est au mieux de l'ordre de 50 W/cm^3. Ce facteur de mérite pourrait être amélioré par une configuration des noyaux magnétiques plus favorable aux échanges thermiques.

La première partie de cet article décrit la méthodologie de dimensionnement permettant d'optimiser la surface d'échange thermique des noyaux d'inductance en fonction des pertes magnétiques. Les caractéristiques magnétiques de la poudre de ferrite utilisée pour ces prototypes de noyaux sont présentées dans la partie suivante. Le procédé de mise en forme spécifique utilisé pour produire ces noyaux est présenté dans la dernière partie, il est basé sur la technique de coulage en bande.

2. DIMENSIONNEMENT

2.1. Paramètres de construction de l'inductance

Le dimensionnement du noyau magnétique est effectué pour une puissance électrique P_{tot} = 1 kW. Le convertisseur considéré est un dispositif test de type élévateur de tension (V_e = 200 et V_s = 400 Volts) fonctionnant avec une fréquence de découpage F = 5 MHz. La valeur de l'inductance qui est nécessaire pour ce convertisseur est directement donnée par :

$$L = \frac{V_e^2 D}{F \times r \times P} \quad (1)$$

Le facteur d'ondulation du courant $r = \Delta I_L/I_{DC}$ est pris à la valeur typique de 0,4 et le rapport cyclique D est dans ce cas égal à 0.5. La valeur d'inductance à réaliser est alors L = 10 µH.

Cette valeur d'inductance est reliée aux caractéristiques du noyau magnétique par :

$$L = \mu_0 \mu_e N^2 \frac{A}{l_e} = \mu_0 \mu_e N^2 \frac{V}{l_e^2} \quad (2)$$

La méthodologie utilisée pour dimensionner la forme du noyau consiste à déterminer les valeurs optimales des paramètres de construction de l'inductance : perméabilité effective (μ_e), le nombre de spires (N), la section du noyau (A), sa longueur effective (l_e). Les contraintes de dimensionnement sont les suivantes :

(i) Les pertes dans le noyau P_d sont limitées de façon à garantir un rendement de puissance $\eta = (P_{tot} - P_d)/P_{tot}$ donné.

(ii) Le volume du noyau V est imposé de façon à atteindre une puissance volumique donnée de 100 W/cm^3.

Ces deux contraintes induisent des relations de dépendance entre les différents paramètres de construction. Les hypothèses utilisées pour obtenir ces relations sont explicitées ci-dessous.

La puissance totale transitant dans le noyau P_{tot} est fonction de l'induction B:

$$P_{tot} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu_e} FV \quad (3)$$

Les pertes dissipées dans le noyau P_d sont données par la loi de Steinmetz :

$$P_d = V K_p F^{\alpha} B^{\beta} \quad (4)$$

Où K, α et β sont des paramètres spécifiques du matériau magnétique. Les matériaux considérés dans cette étude sont des ferrites de structure spinelle. Ces matériaux oxydes sont caractérisés par des valeurs de résistivité électrique élevées et l'on considérera que les pertes sont indépendantes de la géométrie du noyau. Par railleurs les pertes cuivre dans les enroulements ne sont pas prises en compte à ce stade.

En combinant les relations (3) et (4) on obtient une première condition portant sur la perméabilité effective du noyau :

$$\mu_e = \left[\frac{P(1-\eta)}{K} \frac{V^{\beta/2-1}}{F^{\alpha-\beta/2}}\right]^{2/\beta} \frac{1}{2\mu_0 P} \quad (5)$$

La perméabilité effective est ajustée par l'épaisseur de l'entrefer (g) :

$$\mu_e = \mu_i \frac{l_e}{l_e + g(\mu_i - 1)} \quad (6)$$

La combinaison des relations (2) et (6) permet d'éliminer le terme l_e (longueur effective) et d'obtenir une seconde condition portant sur le rapport entre le nombre de spires et la valeur de l'entrefer.

$$\frac{N}{g} = \left\{\left(\left[\frac{\mu_i + \mu_e}{\mu_i - \mu_e}\right]^2 - 1\right) \frac{[\mu_i - 1]^2 \left[\frac{L}{V}\right]}{4\mu_0 \mu_i}\right\}^{0,5} \quad (7)$$

2.2. *Prise en compte des échanges thermiques*

L'élévation de température au sein du noyau est déterminée en considérant un régime de convection par air à la surface du noyau pour évacuer la chaleur produite par les pertes magnétiques. On suppose que toutes les surfaces extérieures contribuent de façon identique à l'échange thermique. Une valeur typique du coefficient d'échange considérée pour l'analyse est h = 20 W/m^2/K. En régime permanent on a :

$$\Delta T = \frac{P_d}{\mathrm{hS}} = \frac{(1-\eta)P_{tot}}{\mathrm{hS}} \quad (8)$$

Dans la suite, on cherchera à favoriser des configurations géométriques dans lesquelles l'échange thermique en surface est maximum. Cela conduit notamment à optimiser les inductances dont les paramètres de construction vérifient les contraintes données en 2.1 de façon à augmenter la surface extérieure.

2.3. *Prise en compte des fuites magnétiques*

Les relations analytiques (1)-(7) ont été obtenues en considérant que l'inductance formait un circuit magnétique parfait. Or, le confinement du flux magnétique dans le noyau n'est pas parfait compte tenu des faibles valeurs de perméabilité des matériaux utilisés (cf. tableau 1). De ce fait, une partie des lignes de flux rebouclent dans l'air, donnant lieu à une inductance supplémentaire s'ajoutant à la valeur donnée par (2). Le calcul des inductances de fuite a été réalisé par une approche numérique en utilisant le logiciel Flux 2D® (commercialisé par Cedrat [3]).

3. Optimisation

3.1. *Influence du matériau*

On compare dans un premier temps deux ferrites commerciaux (Ferroxcube [4]) de type NiZn (4F1) et 3F4 (MnZn). Les coefficients de la loi de Steinmetz pour ces deux nuances sont indiqués dans le Tableau 1. Le dimensionnement a été effectué en utilisant les relations (5) et (6) pour un rendement de 97 %. On constate que seul le ferrite NiZn permet de maintenir une valeur d'entrefer acceptable (3 % de la longueur du circuit magnétique) jusqu'à la fréquence de 5 MHz. Avec le ferrite MnZn, l'entrefer atteindrait 25 % de la longueur effective, ce qui conduirait à des fuites importantes.

Tableau 1. Paramètres des inductances pour des différents ferrites

ferrite	K (P en W/m3)	α (F en Hz)	β (B en T)	μ_i	g/l_e 1 MHz %	g/l_e 5 MHz %
NiZn 4F1	194.7	1.08	2.07	80	3 %	3,2 %
MnZn 3F4	1.1 10^{-8}	2.8	2.4	900	2.8 %	25 %

3.2. *Influence du facteur de forme*

La configuration du noyau retenue est de type E-E, elle est paramétrée par les grandeurs géométriques définies sur la Fig. 1. Dans cette configuration, le bobinage (non représenté) est réalisé dans la partie centrale, autour de l'entrefer. Cette géométrie est caractérisée par un facteur de forme $f = 2H_{tot}/w$ qui est faible pour des formes compactes et devient élevé pour des configurations planaires. L'objectif est de déterminer les valeurs optimales de ces paramètres pour réduire l'échauffement du noyau.

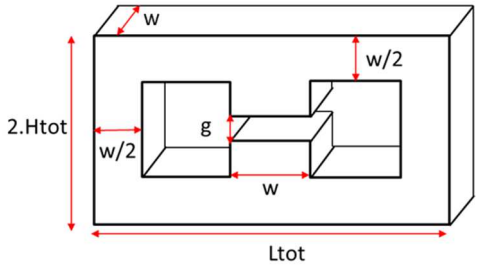

Fig. 1 Noyau d'inductance paramétré

Les calculs ont été réalisés en imposant le volume total du noyau V = 10 cm^3, un rendement de 97 %, et un ferrite NiZn de type 4F1. Les différents facteurs de forme du noyau considérés

sont compris entre 4 et 30. Pour f = 4 (forme compacte), on trouve que l'élévation de température est maximale (ΔT = 400 K). L'échauffement diminue lorsque ce facteur de forme augmente, c'est-à-dire lorsque que l'on tend vers une inductance planaire. Dans ce cas en effet, la surface d'échange s'accroit ce qui permet de mieux évacuer la chaleur produite par les pertes magnétiques (cf. Tableau 2).

Toutefois, les calculs par Eléments Finis montrent que les fuites magnétiques s'accroissent lorsque le facteur de forme augmente. La valeur d'inductance s'écarte significativement de la valeur cible (10 µH) pour les configurations les plus « étalées ».

Tableau 2. Caractéristiques des inducantces vs le facteur de forme

f	w (mm)	Ltot (mm)	Htot (mm)	g (mm)	N spires	ΔT (K)	L (µH)
4	10,8	27,9	20,1	2,8	16	403	11,14
7.5	8,1	50,3	30,4	5,1	29	245	11,88
15	**6,3**	**83,8**	**47,1**	**8,4**	**49**	**95**	**12,76**
20	5,6	106,2	58,5	10,7	61	60	13,46
28	5,0	128,5	70,0	12,9	74	42	14,20

Qualitativement, ce résultat s'explique par le schéma illustré Fig. 2 où l'on met en évidence la contribution croissante du rebouclage des lignes de flux dans l'air situé autour du noyau bobiné. Dans notre cas, un compromis peut être obtenu pour une valeur de f = 15 (cf. Tableau 2). Dans ce cas, l'échauffement du noyau reste limité à ΔT<100 K avec les hypothèses retenues.

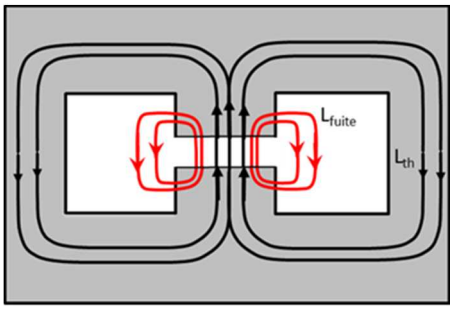

Fig. 2 Illustration des fuites dans les noyaux de fort facteur de forme

4. Approche experimentale

Les sections précédentes montrent l'intérêt de réaliser des noyaux de forme planaires pour pouvoir bénéficier d'une surface d'échange thermique importante. Ces configurations permettent de tirer profit de la montée en fréquence du convertisseur pour réduire significativement le volume des composants passifs. Toutefois les formes de noyaux proposées par les fournisseurs ne couvrent pas les configurations qui ont été dimensionnées, notamment dans le cas de la nuance 4F1, seule compatible avec la gamme de fréquence envisagée (1-5 MHz). Dans ce contexte, il a été nécessaire de mettre au point un procédé original de mise en forme de ces noyaux. Cette démarche est présentée dans cette section.

4.1. Méthodologie

Un procédé spécifique basé sur la technique de coulage en bande a été mis au point au laboratoire LMA du CEA-LITEN afin de pouvoir réaliser les noyaux planaires. Cette étude a été réalisée à partir d'une poudre de ferrite $(Ni,Zn)Fe_2O_4$ approvisionné chez la société PPT, USA (ref. BP80). En parallèle, les matériaux obtenus ont été caractérisés en fréquence afin d'adapter les paramètres de construction des inductances aux valeurs réelles de pertes mesurées sur ce matériau.

4.2. Mesure des propriétés magnétiques

4.2.1. Réalisation des échantillons

Des échantillons toriques ont été mis en forme à partir de la poudre PPT pour effectuer les mesures de perméabilité et de pertes en fréquence. Le rapport Ni/Zn déterminé sur les poudres par DRX est de l'ordre de 2,3 et les analyses chimiques ont montré que cette poudre contient du Co, comme la nuance 4F1. Il s'agit d'une poudre atomisée avec un liant pour former des particules de 80 µm de diamètre médian constituées de grains agglomérés. L'analyse granulométrique montre une distribution bimodale de la taille des particules. Après déliantage par un traitement thermique de 3 h à 400 °C dans un four à moufle sous air, on mesure par la technique BET une valeur de surface spécifique de la poudre d'environ 6 m^2/g. La poudre a été compactée par pressage isostatique à froid. Les cycles de frittage effectués sont de 1280°C-4h pour le tore sans Bi_2O_3 et de 1220°C-2h pour les tores avec Bi_2O_3. Le tore NiZn a une densité après frittage de 4,8g/cm^3 alors que les tores NiZn + 0,2 ou 0,4% de Bi_2O_3 ont respectivement des densités de 5,01 g/cm^3 et 5,03 g/cm^3.

La Fig. 3 présente les microstructures obtenues sur des coupes polies et attaquées thermiquement pour révéler les joints de grains. La microstructure des tores est bimodale avec une forte porosité intragranulaire lorsque le fondant Bi_2O_3 est utilisé. La quantité de Bi_2O_3 ajoutée pour améliorer la densification a dans ce cas entrainé un grossissement de grains. Cet effet est prévu dans la littérature pour des concentrations comprises en 0,2 et 0,45% massique de Bi_2O_3 [5], [6]. La porosité résiduelle est alors nettement de type intragranulaire car les pores peuvent être incorporés dans les grains au cours de la croissance des grains.

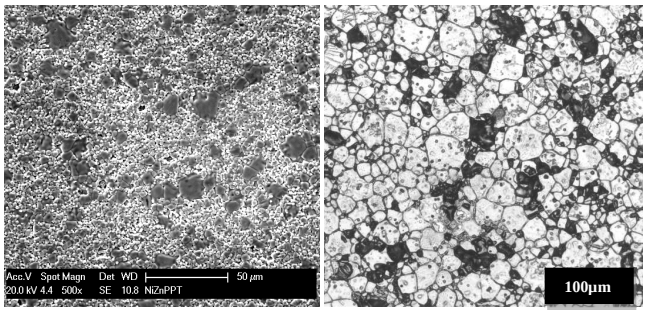

Fig. 3 Microstructure de $(Ni,Zn)Fe_2O_4$ PPT par MEB (gauche) et $(Ni,Zn)Fe_2O_4$ PPT + 0.2% de Bi_2O_3 par microscope optique (droite)

4.2.2. Techniques de mesure

La mesure de perméabilité en fréquence a été réalisée au G2ELab avec un analyseur d'impédance Agilent 4294A et l'utilisation d'un bornier spécifique au test de matériaux magnétiques Agilent 16454A.

Les pertes magnétiques ont été mesurées de manière fluxmétrique : du courant au primaire d'un transformateur se déduit le champ magnétique et de la tension à vide au secondaire se déduit le flux. A ces fréquences (qq. MHz) et pour des facteurs de pertes très faibles (de l'ordre de 3%), il faut alors veiller à compenser les temps de propagation des sondes et délais

d'acquisition introduits par la chaîne d'acquisition. Un délai d'acquisition entre les mesures de tension et courant de 0.1ns cause alors une erreur sur les pertes de 6%. Pour garantir la précision des mesures, un oscilloscope R&S RTO1024 à échantillonnage simultané est utilisé et les temps de propagation sont ensuite compensés numériquement par une méthode de compensation d'énergie réactive [7]. La température des échantillons est enfin contrôlée à l'aide d'un bain thermostaté aux températures souhaitées.

4.2.3. Résultats

Les spectres de perméabilité complexe mesurés sur les échantillons NiZn sont présentés sur la Fig. 4. La perméabilité statique de l'échantillon préparé sans Bi_2O_3 est de l'ordre de 80, comme annoncée par le fournisseur. Les perméabilités statiques des échantillons avec Bi_2O_3 sont relativement similaires et plus élevées. Cette augmentation s'explique par une microstructure plus dense et des grains plus gros [8], [9].

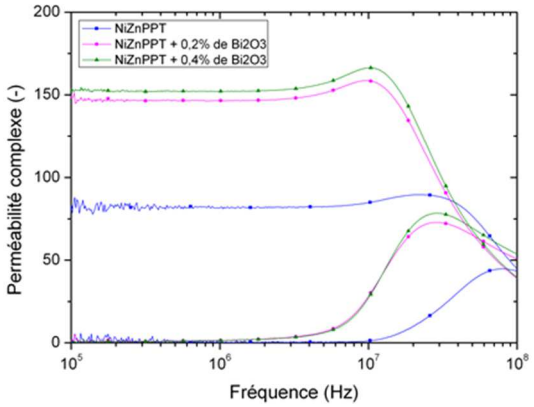

Fig. 4 Perméabilité complexe mesurée sur ferrites NiZn

Les courbes de perméabilité peuvent être décomposées en séparant les contributions des deux mécanismes d'aimantation connus : les vibrations des parois et la rotation des spins [10].

$$\mu = \mu' + i\mu'' = 1 + \chi_{spin} + \chi_{DW} \qquad (9)$$

Avec

$$\mu' = \chi'_{sp} \frac{[(1-\omega^2/\omega_{SP}^2\,(1-\alpha^2)]}{[(1-\omega^2/\omega_{SP}^2\,(1+\alpha^2)]^2 + 4\alpha^2\,\omega^2/\omega_{SP}^2} + \chi'_{DW} \frac{1-\omega^2/\omega_{DW}^2}{[1-\omega^2/\omega_{DW}^2]^2 + \beta^2\omega^2/\omega_{DW}^2} \qquad (10)$$

$$\mu'' = \chi'_{SP} \frac{\alpha\,\omega/\omega_{SP}\,[(1+\omega^2/\omega_{SP}^2\,(1+\alpha^2)]}{[(1-\omega^2/\omega_{SP}^2\,(1+\alpha^2)]^2 + 4\alpha^2\,\omega^2/\omega_{SP}^2} + \chi'_{DW} \frac{\beta\,\omega/\omega_{DW}}{[1-\omega^2/\omega_{DW}^2]^2 + \beta^2\omega^2/\omega_{DW}^2} \qquad (11)$$

Dans ces relations les paramètres sont d'une part, χ'_{sp} la susceptibilité statique, α le coefficient d'amortissement, ω_{SP} la pulsation propre pour la partie associée à la rotation des spins, et d'autre part, χ'_{DW} la perméabilité statique, β le coefficient d'amortissement et ω_{DW} la pulsation propre pour la contribution des parois. L'ajustement des formes analytiques (10) et (11) a été réalisé en minimisant une fonction erreur définie comme la somme des modules des écarts entre les perméabilités mesurées et ajustées :

$$Err = \sum \sqrt{\frac{\left[\left(\mu'_{exp} - \mu'\right)^2 + \left(\mu''_{exp} - \mu''\right)^2\right]}{\left(\mu'_{exp} + \mu''_{exp}\right)^2}} \qquad (12)$$

Les paramètres d'ajustement des courbes expérimentales de la Fig. 4 sont indiqués dans le Tableau 3. L'écart maximal sur le module de la perméabilité est dans tous les cas inférieur à 5 %.

Les valeurs des paramètres issues de l'ajustement dépendent de la fonction de minimisation utilisée (9), toutefois les différences entre les cas étudiés, discutées dans la suite, restent significatives.

Tableau 3 Paramètres d'ajustement des spectres de perméabilité en utilisant la fonction de minimisation (12) et les formes (10) et (11)

Ech.	χ'_{sp}	$\omega_{SP}/2\pi$ (MHz)	α	χ'_{DW}	$\omega_{DW}/2\pi$ (MHz)	β
NiZn	73	275	1,7	9	60	0,5
NiZn+0.2% Bi_2O_3	103	192	2,2	45	31	1,04
NiZn+0.4% Bi_2O_3	109	185	2,1	45	31	0,97

La perméabilité statique, $\chi'_{w=0}$ comprend une part majoritaire apportée par les rotations de spin χ'_{sp}, pour les trois compositions. On constate que χ'_{sp} est plus faible pour l'échantillon le moins dense, ce qui peut être la conséquence des champs démagnétisants dus à la plus forte porosité au sein de cet échantillon. On remarque également que pour les microstructures à gros grains, la susceptibilité liée aux déformations des parois χ'_{DW} devient significative. Cette évolution peut être la conséquence d'une transition de grains majoritairement mono-domaine vers des grains multi-domaines, ou la conséquence de l'augmentation de la mobilité des parois au sein de grains multi-domaines, lorsque la taille de grain s'accroit [11]. La présence d'un pic sur le spectre de relaxation de la perméabilité réelle μ' peut être corrélée à l'observation de microstructures hétérogènes. L'ensemble de ces résultats est en accord avec le modèle de Globus [11]. Enfin le déplacement du pic sur le spectre de μ'' vers les basses fréquences, observé avec la croissance des grains (Fig. 4), traduit également la participation des mouvements de parois au processus de dissipation.

4.3. Mesures des pertes en fréquence sur tores

La mesure du cycle d'hystérésis en fréquence permet de connaître les pertes magnétiques pour différents niveaux d'induction. La Fig. 5 présente les pertes obtenues sur ce matériau. On note que les pertes en fréquence (1.5 MHz, 25 mT) sont réduites d'un facteur 2 sur les échantillons denses.

On peut interpréter ce résultat en considérant que la porosité, présente de façon importante dans la microstructure frittée sans fondant, conduit à une augmentation de la part des pertes par hystérésis dans les pertes globales. L'augmentation de la densité permet de diminuer ces pertes [11]. Toutefois l'augmentation simultanée de la taille de grain pourrait limiter l'effet bénéfique d'une meilleure densification. En effet, les tailles de grain élevées entravent de moins en moins le déplacement de parois. Ces mouvements de parois s'accompagnent alors de dissipation à haute fréquence et contribuent donc aux pertes mesurées [12]. Rappelons que l'obtention d'une microstructure dense à petits grains (1-3 µm) est connue pour minimiser efficacement les pertes [13].

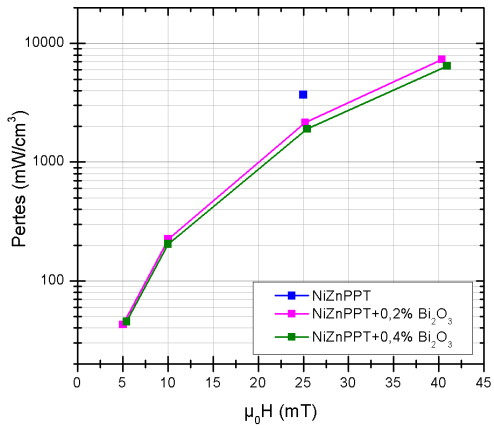

Fig. 5 Mesure des pertes à 1,5MHz sur des tores $(Ni,Zn)Fe_2O_4$.

4.4. *Mise en forme par coulage en bande*

Le coulage en bande est un procédé de métallurgie de poudres adapté à la réalisation de formes planaires de grandes dimensions à faible coût. La technique consiste à disperser le matériau sous forme de poudre dans un mélange de solvants, liants et plastifiants. D'après les expériences précédentes, la poudre utilisée est NiZn PPT + 0.25% de Bi_2O_3. La formulation a été optimisée de manière à obtenir une bande relativement épaisse qui reste souple et résistante pour être facilement manipulée. La suspension est étalée sur une surface plane à l'aide d'un sabot équipé d'une lame. La hauteur de l'espace entre la lame et le support est définie pour obtenir une bande d'épaisseur uniforme et sans aucune fissure. De telles fissures peuvent apparaitre sous l'effet des tensions capillaires lors de l'évaporation des solvants. Avec la formulation choisie, l'épaisseur d'une bande coulée est de 600µm. Après séchage, elle est réduite à environ 220 µm.

Pour obtenir les dimensions souhaitées pour la réalisation de formes planaires, il est nécessaire de thermocoller entre 15 et 20 bandes. Les bandes découpées par découpe laser sont empilées et placées entre des feuilles de papier siliconé antiadhésives. Le thermocollage est une étape essentielle puisqu'il assure la cohésion entre les bandes en évitant le fluage. Ainsi, un outillage en laiton a été usiné. Les positions sont réglables pour s'adapter à différentes largeurs et longueurs de bandes. Les bandes sont thermocollées à 90°C. Elles sont ensuite déliantées sous air en suivant un cycle qui a été défini suite à une analyse thermogravimétrique et frittées à 1220°C-2h. Cette étape de déliantage est importante car une élimination trop rapide des liants organiques peut créer des fissures ou des cloques. A l'issue du frittage, l'épaisseur des bandes est de 3 mm avec une densité de 5.03 g/cm^3 ce qui est cohérent avec les résultats trouvés précédemment (cf. Fig. 6).

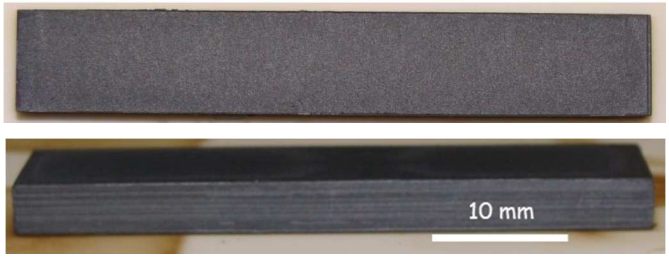

Fig. 6 Exemple de bande épaisse en ferrite type $(Ni,Zn)Fe_2O_4$

Il a été vérifié au MEB que les interfaces entre les bandes thermocollées et frittées sont exemptes de fissures ou de délaminage. La microstructure observée sur une fractographie (cf. Fig. 7) est cohérente avec celle observée sur les échantillons mis en forme par pressage en matrice et frittage.

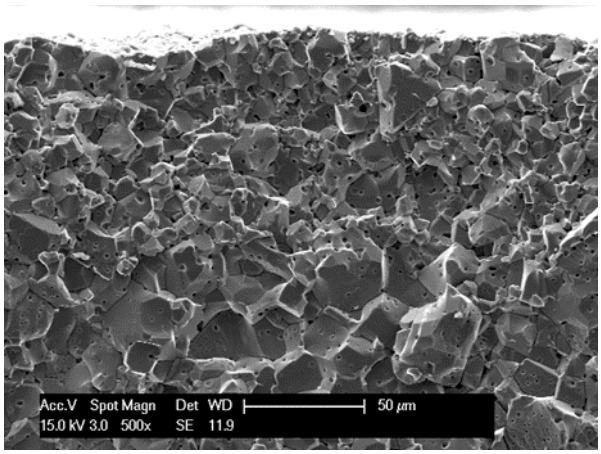

Fig. 7 Microstructure MEB près du bord libre d'une bande épaisse de $(Ni,Zn)Fe_2O_4$ + Bi_2O_3 obtenue par coulage en bande et thermocollage

On retrouve le grossissement de grain déjà mentionné au paragraphe 4.2.1 et la répartition uniforme d'une fine porosité résiduelle. Ce grossissement est moins marqué au-delà d'une profondeur d'environ 50 µm située sous la surface libre, vraisemblablement du fait de la volatilité du fondant au cours du frittage.

Les sections droites épaisses obtenues par coulage en bande peuvent enfin être assemblées pour former le noyau magnétique complet. Le schéma de la Fig. 8 montre un exemple de noyau magnétique réalisé par cette technique. Dans cet exemple, les dimensions ont été adaptées en tenant compte des pertes mesurées sur le matériau PPT et pour permettre le fonctionnement d'un convertisseur de 250 W entre 1 et 5 MHz. Ce prototype est en cours de réalisation au CEA-LITEN.

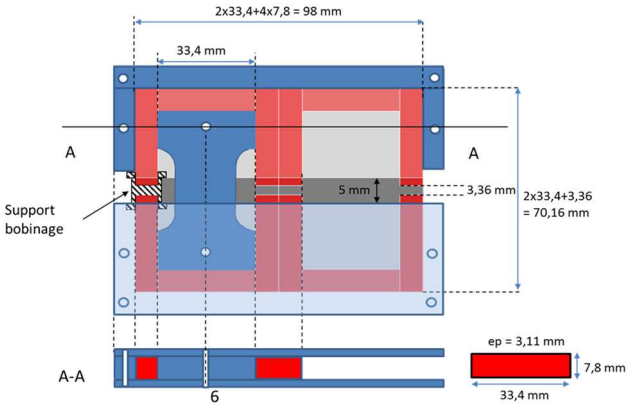

Fig. 8 Exemple de noyau magnétique réalisé par assemblage de bandes de NiZn (en rouge les eléments magnétiques, en bleu les supports en alumine)

5. Conclusions

Les travaux présentés ont permis de définir les formes de noyaux d'inductance compatibles avec un fonctionnement à haute fréquence (> 1 MHz) au sein de convertisseurs DC/DC. Ces configurations ne sont pas standard du fait de leur rapport de forme. Les travaux réalisés ont permis de montrer la faisabilité d'une mise en forme par la technique de coulage en bande, à partir de poudre de ferrite NiZn. Le frittage de cette poudre reste cependant à optimiser afin d'obtenir une microstructure qui minimise les pertes en fréquence.

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet MATGAN soutenu par l'institut CARNOT Energies du Futur.

7. REFERENCES

[1] A. Lucas, R. Lebourgeois, F. Mazaleyrat, and E. Laboure, "Temperature dependence of spin resonance in cobalt substituted NiZnCu ferrites," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 18, p. 182502, Nov. 2010.

[2] A. Lucas, R. Lebourgeois, F. Mazaleyrat, and E. Labouré, "Temperature dependence of core loss in cobalt substituted Ni-Zn-Cu ferrites," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 323, no. 6, pp. 735–739, Mar. 2011.

[3] "Flux." [Online]. Available: http://www.cedrat.com/fr/logiciels/flux.html. [Accessed: 22-Apr-2016].

[4] Ferroxcube, "Soft Ferrites And Accessories, Data Handbook." 2013.

[5] K. Sun, Z. Lan, Z. Yu, L. Li, J. Huang, and X. Zhao, "Grain growth, densification and magnetic properties of NiZn ferrites with Bi2O3 additive," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 23, p. 235002, Dec. 2008.

[6] H. Su, X. Tang, H. Zhang, L. Jia, and Z. Zhong, "Influences of Bi2O3 additive on the microstructure, permeability, and power loss characteristics of Ni–Zn ferrites," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 19, pp. 3183–3186, Oct. 2009.

[7] M. Mu, F. C. Lee, Q. Li, D. Gilham, and K. D. Ngo, "A high frequency core loss measurement method for arbitrary excitations," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, 2011, pp. 157–162.

[8] O. F. Caltun, L. Spinu, A. Stancu, L. D. Thung, and W. Zhou, "Study of the microstructure and of the permeability spectra of Ni–Zn–Cu ferrites," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 242–245, Part 1, pp. 160–162, Apr. 2002.

[9] H. Su, H. Zhang, X. Tang, and Y. Jing, "Influence of microstructure on permeability dispersion and power loss of NiZn ferrite," *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 9, p. 093903, May 2008.

[10] T. Nakamura, "Low-temperature sintering of Ni□Zn□Cu ferrite and its permeability spectra," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 168, no. 3, pp. 285–291, Apr. 1997.

[11] A. Globus, "I.-Magnetization mechanisms some physical considerations about the domain wall size theory of magnetization mechanisms," *J. Phys. Colloq.*, vol. 38, no. C1, pp. C1–1, 1977.

[12] *Magnétisme. Tome 1I, Matériaux et applications - Etienne Du Tremolet De Lacheisserie*. EDP Sciences, 2000.

[13] P. J. V. der Zaag, A. Noordermeer, and P. J. V. D. Valk, "Sintered transformer or inductor core of nizn ferrite material," US5871662 A, 16-Feb-1999.