

Prototypage rapide de transformateurs planar

Jean Sylvio NGOUA TEU MAGAMBO, Simon THOMY, Reda BAKRI, Xavier MARGUERON, Philippe LE MOIGNE

Univ. Lille, Centrale Lille, Arts et Metiers ParisTech, HEI, EA 2697 - L2EP - Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, F-59000 Lille, France

RESUME – La conception rapide de prototypes de laboratoire est intéressante pour permettre la validation, à moindre frais, de dimensionnements spécifiques de transformateurs planar. Avec l'apparition des Fabrication Laboratory (FabLab), il devient possible, en utilisant les outils et machines disponibles dans ces derniers, de réaliser de manière assez simple, rapide et peu coûteuse, des prototypes de transformateur planar en technologie feuillard. Cet article présente donc une méthodologie permettant de concevoir ce type de composant, pour des puissances de quelques kilowatts, en utilisant le matériel usuel des FabLab.

Mots-clés—*Transformateur planar, FabLab, conception, méthodologie, caractérisation.*

1. INTRODUCTION

Lors du développement d'un convertisseur d'Electronique de Puissance (EP), les composants magnétiques sont souvent dimensionnés et développés de manière spécifique, à partir d'un cahier des charges, pour maximiser les performances du convertisseur. Pouvoir valider un dimensionnement à l'aide d'un prototype est indispensable mais cette phase de prototypage peut s'avérer très coûteuse.

Les composants magnétiques planar (CMP) sont constitués de spires réalisées en circuit imprimé (PCB) multicouches ou en technologie feuillard, le tout étant assemblé dans un noyau ferrite de forme aplatie [1]. Ce type de composant est particulièrement dédié aux systèmes embarqués et aux transports, là où les critères de poids, de volume et de densité de puissance sont primordiaux [2].

Pour les composants planar, les solutions technologiques pour les enroulements sont donc de deux types : les PCB multicouches ou les plaques de cuivre découpées (feuillard). La 1^{ère} technologie est très intéressante en termes d'intégration et de répétabilité industrielle, à condition de maîtriser la conception de PCB multicouches, avec des couches de cuivre d'une centaine de micromètre au minimum. La seconde solution donne lieu à des enroulements de composants plus volumineux et dont les performances sont moins aisément répétables. Cependant, dans le 1^{er} cas, le développement de prototypes est excessivement coûteux et demande un certain savoir-faire ainsi que du temps de conception et de réalisation. Dans le 2nd cas, il est plus simple de réaliser des prototypes « maisons », notamment en utilisant les différents outils présents dans les Fabrication Laboratory (FabLab) [3-5], présents maintenant un peu partout en France et à l'International.

Dans cet article, nous présentons donc une méthodologie de conception de transformateurs planar qui permet de réaliser, de manière simple, des prototypes de composants planar de quelques kilowatts.

Après avoir présenté le contexte de FabLab et la philosophie de conception associée, le processus de développement d'un composant magnétique planar haute fréquence (HF) sera évoqué. La démarche complète de fabrication ensuite sera présentée, sur la base du développement d'un prototype de transformateur planar 2kW/100kHz en technologie feuillard. Le prototype sera ensuite caractérisé et testé d'un point de vue thermique avant de conclure quant aux limitations de cette méthodologie de conception de composants magnétique planar feuillard.

2. FABRICATION LABORATORY (FABLAB)

Avant d'aborder la partie conception à proprement parler, il est nécessaire de parler un peu des FabLabs. Les premiers FabLabs sont apparus dans les années 2000 [3]. Ces ateliers de fabrication ont été créés pour susciter de la création open-source, de la co-création et une production plus locale [4], en s'appuyant sur des machines spécifiques et outils performants.

L'émergence des FabLabs est liée à une nouvelle philosophie de conception : « Faites-le vous-même » (Do-It-Yourself, DIY) et « faites-le en local ». En 2016, 490 FabLabs étaient recensés dans 72 pays différents [3], mais ce nombre continue de croître très rapidement. Ce développement est très lié à la démocratisation des techniques d'impression 3-D. En effet, cette technique, aussi appelée « additive manufacturing », est en plein essor et s'applique à de nombreux domaines techniques [5]. En EP, des techniques d'impression 3-D ont récemment été appliquées aux inductances sans noyau magnétique [6] et inductances planar de faible puissance [7].

En plus d'imprimantes 3-D, on retrouve donc, dans ces FabLabs, de nombreux outils et machines spécifiques permettant de couper, tailler, graver toutes sortes de matériaux et de produits [8]. L'émergence de ces centres de fabrication trouve un intérêt certain auprès de « Makers » et les universités s'intéressent de plus en plus aux bénéfices de tels équipements pour la formation d'ingénieurs et techniciens de demain [9], aux techniques de prototypage rapide.

Ce travail est basé sur le FabLab « Make » présent à Centrale Lille. On y trouve notamment une découpe laser, une fraise à

commande numérique et des imprimantes 3D, en plus des outils classiques et matériel d'électronique.

3. DEMARCHE DE CONCEPTION D'UN COMPOSANT MAGNETIQUE PLANAR

La démarche générale de conception de transformateurs (Fig.1) s'applique, bien entendu, pour les composants magnétiques planar.

Sur la base d'un cahier des charges, un pré-dimensionnement est réalisé pour choisir un noyau magnétique et spécifier les caractéristiques des enroulements. Des estimations (pertes, températures, valeurs de self magnétisante et de fuite) sont ensuite réalisées en se basant sur des modèles et formulations analytiques. Ces modèles doivent permettre le dimensionnement au plus juste du CMP. Ils doivent donc être adaptés aux spécificités des composants planar (noyaux magnétiques, conducteurs de forme rectangulaire, aspect multicouches...) [10]. Les différentes valeurs obtenues peuvent ensuite être vérifiées via un modèle numérique type éléments finis (FEM) 2-D ou 3-D. L'aspect thermique conditionne le bon fonctionnement du composant. Il est donc primordial d'avoir recours à un modèle thermique, qui soit lui aussi basé sur des éléments-finis ou sur un modèle spécifique de type réseau de résistances nodales [11]. Le processus se poursuit par la phase de réalisation et de la validation du composant. Cette dernière étape est elle-même décomposée en deux. Il convient premièrement de caractériser le composant développé en « petit signal » pour valider les valeurs des paramètres clés du composants (résistances, inductances, capacités parasites...). La seconde étape consiste à tester le composant en puissance pour confirmer la validation du dimensionnement.

Le travail présenté dans cet article est lié aux étapes de prototypage et de caractérisation. La démarche de développement, dans un environnement FabLab, d'un transformateur planar de puissance va maintenant être détaillé.

4. REALISATION D'UN PROTOTYPE DE TRANSFORMATEUR PLANAR DANS UN ENVIRONNEMENT FABLAB

La démarche de conception et le détail des différentes opérations sont présentés ici en prenant l'exemple d'un transformateur planar 2kW/100kHz à deux enroulements.

4.1. Cahier des charges du prototype

Les spécifications électriques du prototype sont listées dans le Tableau 1. Ce composant est dimensionné pour fonctionner

dans un onduleur pleine onde à 100kHz. La tension efficace au primaire est de 400V tandis que celle du secondaire est de 20V.

Tableau 1. Spécifications du transformateur.

Puissance	2 kW	Fréquence de découpage	100 kHz
Tension eff. primaire	400 V	Self magnétisante	0.5 mH
Rapport de transformation	0.05		

Comme contrainte de dimensionnement, un ΔT_{\max} est fixé à 120°C pour une température ambiante de 22°C et un fonctionnement sans refroidisseur, en convection naturelle.

4.2. Dimensionnement et choix de conception

Le noyau magnétique est choisi sur la base de la méthode du produit des aires [12]. Le produit de la surface de bobinage (A_w) et de la section du noyau magnétique (A_c) est proportionnel à la puissance maximale du transformateur (1).

$$A_p = A_w A_c = \frac{P_{\max}}{K_f K_r B_c F_{sw} J_w} \quad (1)$$

Avec P_{\max} : puissance maximale

K_f : facteur de forme de l'alimentation

K_r : coefficient de remplissage de la fenêtre

B_c : induction magnétique crête

F_{sw} : fréquence de découpage

J_w : densité de courant

En prenant les hypothèses de dimensionnement données dans [2], le produit des aires pour ce prototype donne une valeur $A_p = 54000 \text{ mm}^4$. Le noyau planar permettant d'obtenir une valeur proche est la combinaison d'un noyau E64 et d'un PLT64 [13].

Afin de minimiser les enroulements et couches conductrices, le nombre de spires primaires est fixé à 20, tandis que le secondaire n'est constitué que d'une seule spire. Les épaisseurs des couches conductrices sont prises différentes pour les deux enroulements. Ainsi, on a une épaisseur de 210µm pour les enroulements primaires et 350µm pour les couches secondaires. Ces tailles différentes sont un des avantages des transformateurs planar en technologie feuillard. En effet, en PCB, toutes les couches auraient dû posséder la même épaisseur.

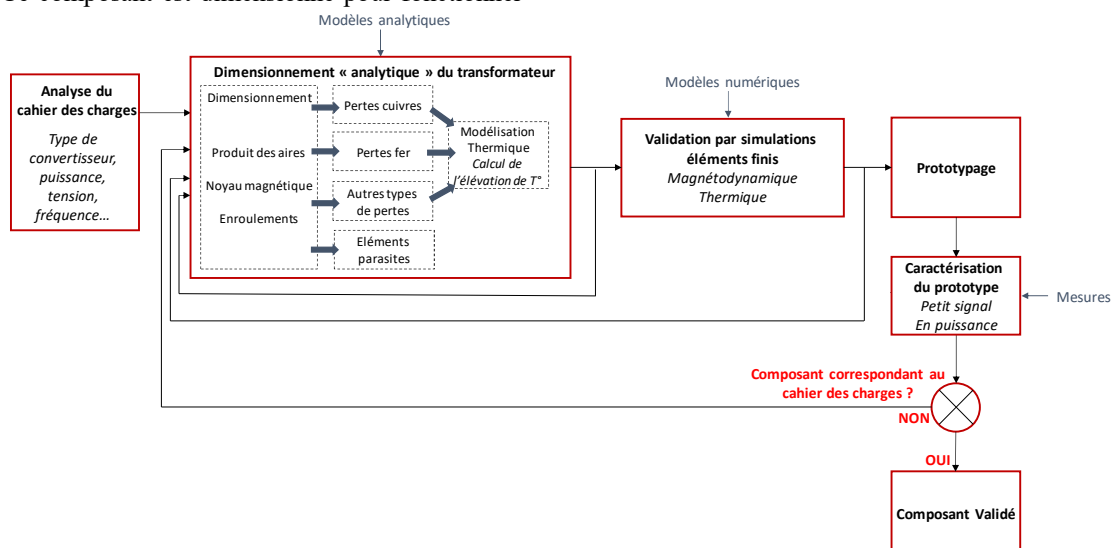


Fig. 1. Démarche générale de conception d'un composant magnétique.

La Fig.2 présente la description des conducteurs dans la fenêtre de bobinage. Les enroulements primaires et secondaires sont entrelacés. Le primaire est donc constitué de 20 spires réparties sur 4 couches tandis que le secondaire possède 5 conducteurs sur 5 couches différentes. Tous les conducteurs secondaires sont reliés en parallèle pour ne former qu'une seule spire. Les dimensions des conducteurs sont fixées pour respecter la densité de courant considérée dans (1).

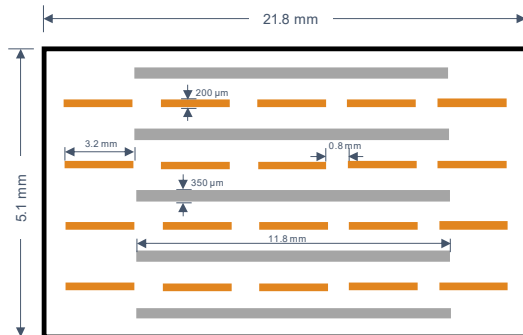


Fig. 2. Description de la fenêtre du transformateur.

La Fig.3 présente une vue éclatée du modèle 3-D du prototype de transformateur, ainsi qu'une vue du modèle assemblé.

Le pertes cuivre sont évaluées à 21.1W par respectivement, la méthode de Dowell [14] pour l'enroulement primaire et celle de Ferreira [15] pour l'enroulement secondaire. Les pertes fer sont, quant à elles estimées à 4.84W par l'expression de Mulder [16]. Ces valeurs de pertes conduisent à une élévation de température de 78°C pour une température ambiante de 22°C. Ces différentes valeurs ont été confirmées par des simulations éléments finis sous ANSYS [17].

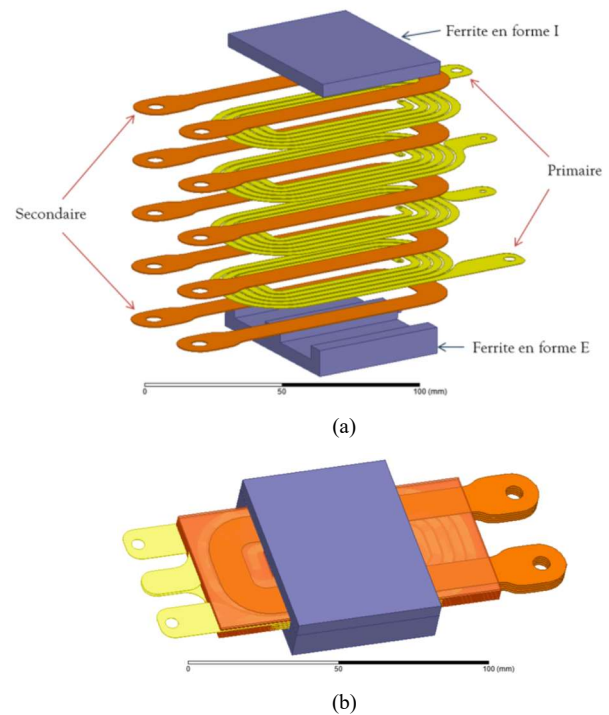


Fig. 3. Modèle 3-D du transformateur : (a) Vue éclatée et (b) Transformateur assemblé avec couches isolantes.

4.3. Processus de fabrication

La Fig.4 présente une vue d'ensemble du processus de fabrication du prototype avec les différentes machines et éléments du transformateur planar. La première phase du prototypage consiste à modéliser les différents éléments du composant à partir d'un outil de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) [17].

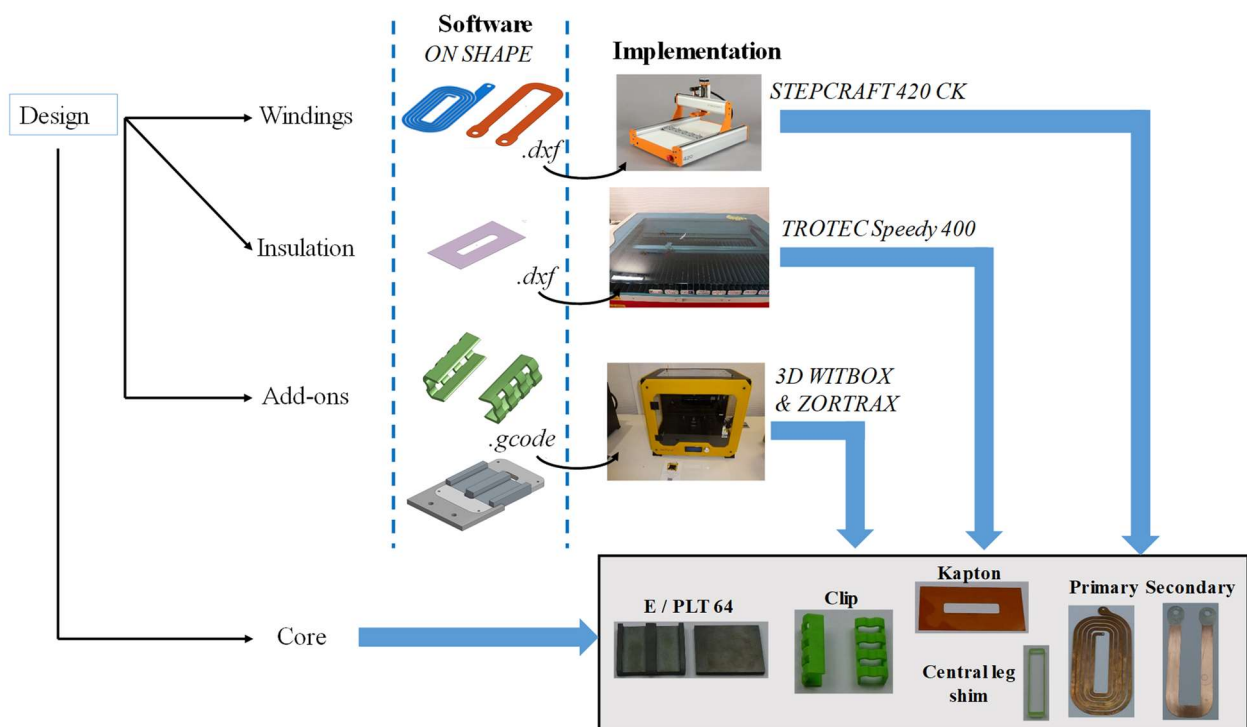


Fig. 4. Conception du prototype : Vue d'ensemble des éléments, machines et réalisations.

4.4. Conception des différents éléments

Chaque élément du transformateur est ensuite réalisé indépendamment (Fig.4) :

- Les spires primaires et secondaires sont découpées dans des plaques de cuivre à l'aide d'une CNC STEPCRAFT CK 420 (Fig.5a). Pendant cette étape de découpage, un lubrifiant doit être aspergé régulièrement sur les couches. Ceci présente deux avantages : La fraise est refroidie et les copeaux de cuivre n'attachent pas. Les couches secondaires (en parallèle) sont toutes identiques tandis que celles au primaire sont différentes pour permettre la connexion en série des 4 couches.
- Les isolants inter-couches en Kapton (75 μm d'épaisseur) sont découpés suivant la forme du noyau à l'aide d'une découpe laser TROTEC Speedy 400. D'autres couches de Kapton sont découpées à la taille du noyau PLT64 pour pouvoir régler l'entrefer du noyau magnétique.
- Des clips de serrages (Fig.5b) et un anneau de centrage (pour les enroulements primaires) sont réalisés par impression 3D (3D WITBOX & ZORTRAX).
- Un socle de positionnement des spires secondaires est lui aussi réalisé à l'aide de la découpe laser. Des plots de centrage permettront de bien aligner les différentes couches secondaires.

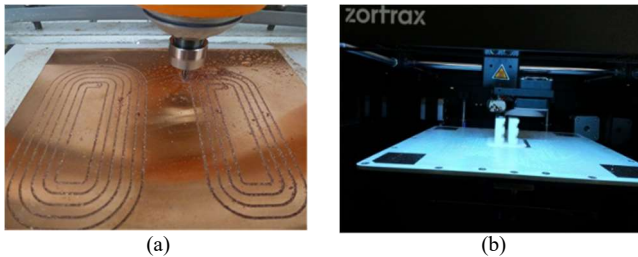


Fig. 5. Exemple de conception des éléments de base : (a) Découpage des enroulements et (b) Impression 3-D des clips de serrage.

4.5. Assemblage

L'assemblage des différents éléments s'effectue ensuite couche par couche en partant de la base du noyau magnétique maintenu dans le socle de positionnement (Fig.6-Etape1). Des couches de Kapton sont ajoutées (Fig.6-Etape2) avant de positionner la première couche de l'enroulement secondaire (Fig.6-Etape3). Des couches isolantes sont ensuite ajoutées (Fig.6-Etape4) avant de positionner la première couche de l'enroulement primaire (Fig.6-Etape5). L'anneau de centrage permet un bon positionnement des couches primaires.

L'empilement des différentes couches se poursuit, en alternant couches isolantes et couches conductrices, tout en respectant l'agencement présenté Fig.2. A ce stade, il faut être vigilant à réaliser correctement la mise en série des différentes couches primaires. Cette opération se fait par soudure mais nécessite, au préalable, d'avoir conçu des terminaisons de couches permettant de réaliser ces connexions.

Lorsque la dernière couche secondaire est positionnée, des couches isolantes sont ajoutées pour remplir la fenêtre de bobinage. D'autres couches isolantes, de la taille du noyau PLT64, peuvent être insérées entre le noyau E et le PLT pour régler la valeur de l'entrefer.

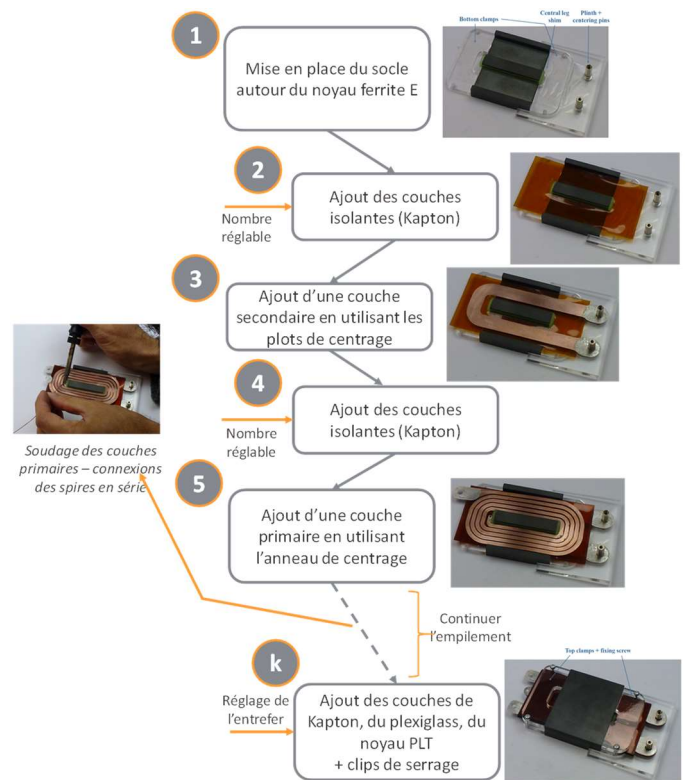


Fig. 6. Processus d'assemblage.

Des clamps en plexiglass sont ensuite vissés pour permettre de maintenir l'empilement des enroulements. Des clips de serrage sont ajoutés pour maintenir les deux parties du noyau magnétique. Enfin, le socle de positionnement peut être retiré.

4.6. Prototype final

Le prototype final (Fig.7) pèse 245g pour un volume d'environ 105mm*63mm*16mm.

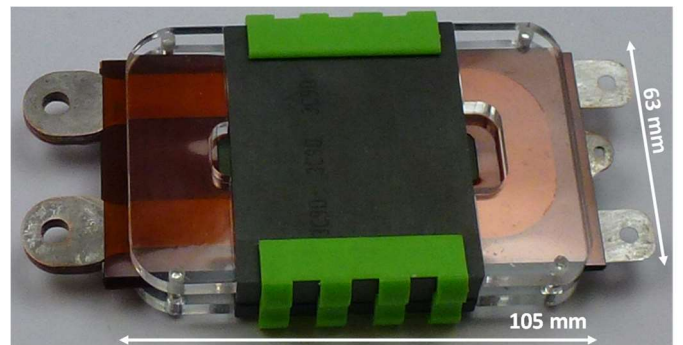


Fig. 7. Prototype de transformateur planar.

5. CARACTERISATIONS ET TESTS

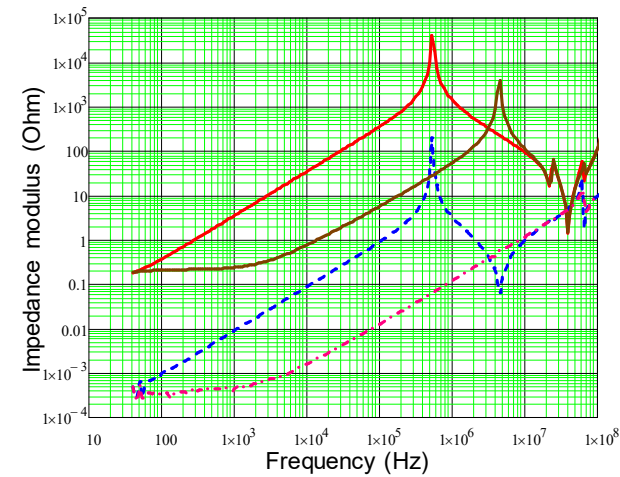
Pour valider le bon fonctionnement du prototype et le comparer au cahier des charges, deux types d'essais sont menés : premièrement une caractérisation petit signal et deuxièmement des essais en puissance.

5.1. Caractérisation par mesures d'impédances

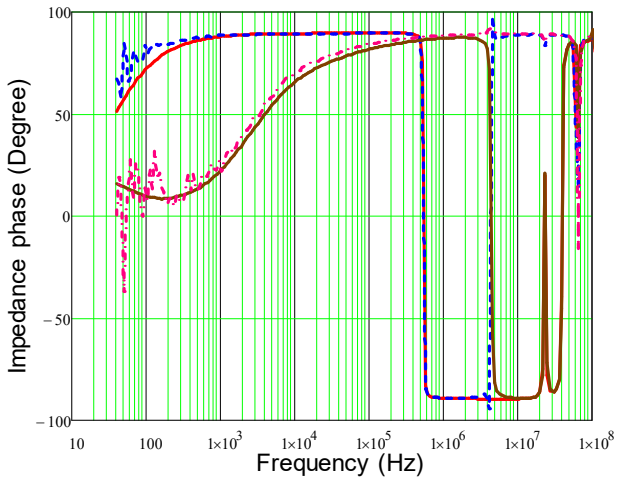
Une caractérisation petit signal est réalisée à l'aide d'un pont d'impédance HP4294A. Les résistances DC sont, quant à elles, mesurées via un micro-ohmmètre CA 6250.

La Fig.8 présente les modules des impédances (Fig.8a) et leur phase (Fig.8b), relevés pour des essais à vide et en court-circuit (Fig.8c). Les valeurs des éléments du schéma équivalent

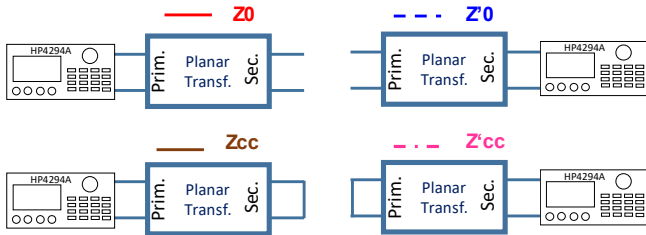
du transformateur (Fig.9) sont extraites de ces mesures suivant la méthode présentée dans [19].



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Impédances à vide et en court-circuit : (a) modules, (b) phases et (c) description des mesures.

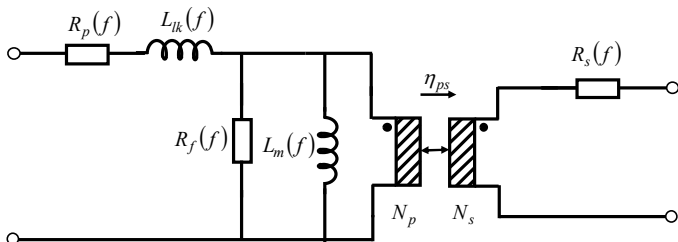


Fig. 9. Schéma équivalent du transformateur à 2 enroulements (parties magnétique et pertes).

Ces allures d'impédances sont typiques de mesures à vide et en court-circuit sur un transformateur HF. Ces premiers essais confirment donc que le composant fabriqué fonctionne comme un transformateur. Quelques valeurs expérimentales sont comparées aux valeurs théoriques dans le Tableau 2. Le rapport de transformation est bien de 0.05. Les valeurs de résistances DC et d'inductance magnétisante sont assez proches. Il en est de même pour l'évolution des résistances AC.

Concernant la valeur de l'inductance de fuite, on peut se rendre compte que la valeur déterminée expérimentalement est assez éloignée de la valeur théorique basée sur le modèle présenté dans [20]. Cette différence notable peut s'expliquer, en partie, par l'impact du court-circuit lors de la mesure Zcc (Fig.8c). En effet, les deux bornes secondaires sont espacées de 3.2cm. Lorsque l'on court-circuite l'enroulement secondaire, l'impédance du conducteur (résistance + inductance) servant de court-circuit, n'est pas négligeable. Une dizaine de nano-henry au secondaire se traduit par 4μH d'inductance de fuite ramenée au primaire, ordre de grandeur de la valeur théorique.

Le manque de précision sur cette valeur peut être aussi dû à la phase d'assemblage manuelle des différentes couches car il est finalement difficile, malgré toutes les précautions prises, d'assurer un positionnement exact des conducteurs.

Tableau 2. Paramètres du schéma équivalent.

Elément	Valeur théorique	Valeur expérimentale
Rapport de transformation	0.05	0.05
Inductance magnétisante (mH)	0.53	0.56
Résistance primaire DC (mΩ)	105.6	111.8
Résistance secondaire DC (mΩ)	0.22	0.198
Inductance de fuite (μH) basse fréquence (ramenée au primaire)	4.45	16

5.2. Caractérisation en puissance

Après ces essais de caractérisation petit-signal, des essais à vide et en court-circuit ont été réalisés en puissance via l'onduleur HF à 100kHz. La Fig.10 présente les relevés par caméra thermique Fluke Ti95.

Pour l'essai à vide (Fig.10a), sous une tension RMS de 400V, les pertes sont estimées à 4.6W. La température dans le noyau monte à 43°C pour une température ambiante de 23.3°C.

Pour l'essai en court-circuit (Fig.10b), la tension est réduite à environ 40V au primaire pour atteindre un courant de 100 A au secondaire. La puissance mesurée est de 23.7W, ce qui engendre une élévation de température de 76.9°C par rapport à la température ambiante (23.4°C). Sur le relevé thermique, on peut aussi noter un point chaud côté conducteur secondaire à 134°C. Une attention particulière doit donc être portée sur cet enroulement secondaire.

6. DISCUSSION

Ces premiers résultats ont montré que le transformateur dimensionné et fabriqué en FabLab fonctionnait et présentait des caractéristiques assez proches de celles déterminées via des modèles analytiques et des simulations éléments-finis. Cependant, des investigations doivent encore être menées, notamment autour de la détermination de la valeur de l'inductance de fuite qui est assez éloignée de la valeur théorique. Les deux pistes évoquées ci-dessus peuvent être

source d'erreur, tout comme la méthode de caractérisation qu'il faudrait peut-être revoir. En effet, avec ce type de transformateur abaisseur / fort courant au secondaire, il devient délicat de déterminer expérimentalement les valeurs des impédances au secondaire.

D'autres essais seront aussi menés en puissance pour atteindre la puissance nominale pour laquelle le transformateur a été dimensionné.

Il semblerait aussi pertinent, à ce stade, de s'intéresser au vieillissement des enroulements (couches de cuivre et isolant kapton) lorsque ces derniers sont soumis à des températures anormalement élevées (point chauds).

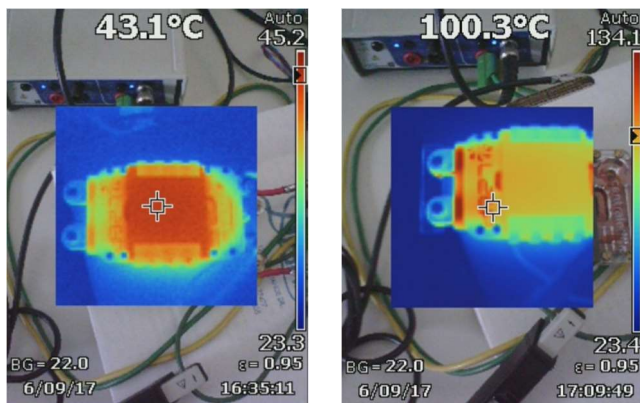


Fig. 10. Mesure de la température : (a) Essai à vide et (b) Essai avec court-circuit au secondaire.

7. CONCLUSIONS

Dans cet article, une méthodologie de conception et réalisation, dans un FabLab, de prototypes de transformateurs planar en technologie feuillard a été présentée. Chaque élément du transformateur est réalisé indépendamment avant d'être assemblé. Les différentes astuces et contraintes de fabrication ont été évoquées. Le prototype de 2kW conçu a ensuite été caractérisé et testé pour valider son bon fonctionnement.

En se basant sur des outils présents dans un FabLab, le développement de tel prototype devient alors réalisable pour n'importe quel concepteur d'EP.

8. REFERENCES

- [1] Z. Ouyang, M. A. E. Andersen, "Overview of Planar Magnetic Technology Fundamental Properties," in *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.29, no.9, pp.4888-4900, Sep 2014.
- [2] J. S. Ngoua Teu Magambo, R. Bakri, X. Margueron, P. LeMoigne, A. Mahe, S. Guguen, T. Bensalah, "Planar Magnetic Components in More

- Electric Aircraft: Review of Technology and Key Parameters for DC-DC Power Electronic Converter," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol.3, no.4, pp. 831-842, Dec.2017.
- [3] T. Redlich et al., "OpenLabs – Open Source Microfactories Enhancing the FabLab Idea," 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI, 2016, pp. 707-715.
- [4] J. Walter-Herrmann and C. Buching, Eds., *FabLab: Of Machines, Makers and Inventors*. Berlin, Germany: Transcript Verlag, 2014.
- [5] C. W. J. Lim, K. Q. Le, Q. Lu, and C. H. Wong, "An Overview of 3-D Printing in Manufacturing, Aerospace, and Automotive Industries," *IEEE Potentials*, vol. 35, no. 4, pp. 18–22, Jul. 2016.
- [6] W. Liang, L. Raymond, and J. Rivas, "3-D-Printed Air-Core Inductors for High-Frequency Power Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 52–64, Jan. 2016.
- [7] Y. Yan, C. Ding, K. D. T. Ngo, Y. Mei, and G. Q. Lu, "Additive manufacturing of planar inductor for Power Electronics applications," in 2016 International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM), 2016, pp. 1–16.
- [8] B. Betts, "Bringing the factory home [Manufacturing Personal]," in *Engineering & Technology*, vol. 5, no. 8, pp. 56-58, 05 June-08 June 5 2010.
- [9] L. Angrisani, P. Arpaia, F. Bonavolonta and R. S. Lo Moriello, "Academic FabLabs for industry 4.0: Experience at University of Naples Federico II," in *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 6-13, February 2018.
- [10] J. S. Ngoua Teu Magambo, *Modélisation et conception de transformateurs planar pour convertisseur de puissance DC/DC embarqué*, Thèse de doctorat, Centrale Lille, France, décembre 2017.
- [11] R. Bakri, J. S. Ngoua Teu Magambo, X. Margueron, P. Le Moigne, N. Idir "Modélisation thermique des composants magnétiques planar de puissance par réseau thermique structurel", *La revue 3EI*, No.88, pp.22-29, Avril 2017.
- [12] W. T. McLyman, *Transformer and inductor design handbook*, 2nd Edition. Marcel Dekker Inc., 1988.
- [13] "Ferroxcube." [Online]. Available: <http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/index.do?action=gotoPage&pageType=en>.
- [14] P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 113, no. 8, pp. 1387–1394, Aug. 1966.
- [15] J. A. Ferreira, "Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 9, no. 1, pp. 127–131, Jan. 1994.
- [16] S. Mulder, "Loss Formulas for Power Ferrites and their Use in Transformer Design," Philips, Eindhoven, The Netherlands, 1994.
- [17] "ANSYS - Simulation Driven Product Development." [Online]. Available: <http://www.ansys.comhttp://www.ansys.com/>.
- [18] Onshape, "Full-Cloud CAD | Onshape." [Online]. Available: <https://www.onshape.com>.
- [19] X. Margueron, J-P. Keradec, "Identifying the Magnetic Part of the Equivalent Circuit of n-Winding Transformer," *IEEE Trans. Instru. And Meas.*, vol.56, no.1, pp.146-152, Feb. 2007.
- [20] X. Margueron, A. Besri, P-O. Jeannin, J-P. Keradec and G. Parent, "Complete Analytical Calculation of Static Leakage Parameters: A step toward HF Transformer Optimization," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol.46, No. 3, May/June 2010, pp.1055-1063.