



Université Lille Nord de France  
Pôle de Recherche  
et d'Enseignement Supérieur

## Ecole doctorale régionale Sciences Pour l'Ingénieur Lille Nord-de-France - 072



**Titre : Transformateurs planar à inductance de fuite intégrée : Modélisation et caractérisation des pertes cuivre**

**Financement prévu :** Centrale Lille  
**Cofinancement éventuel :**

**Directeur de thèse : Philippe Le Moigne**  
**E-mail :** [philippe.lemoigne@centralelille.fr](mailto:philippe.lemoigne@centralelille.fr)  
**Co-directeur de thèse :** Xavier Margueron  
**E-mail :** [xavier.margueron@centralelille.fr](mailto:xavier.margueron@centralelille.fr)

**Laboratoire :** L2EP EA 2697  
**Equipe :** Electronique de Puissance

### Contexte:

L'Electronique de Puissance (EP) est devenue incontournable dans tous les systèmes électriques modernes (applications industrielles, énergies renouvelables, automobile, aéronautique, ...). Le rôle de l'électronique de puissance est de convertir l'énergie électrique avec des contraintes de plus en plus sévères : Obtenir un rendement énergétique quasi-unitaire, associé à des performances électriques et électromagnétiques toujours plus contraintes, le tout intégré dans un volume et un poids de plus en plus limité.

Ces convertisseurs sont composés par l'association de semi-conducteurs de puissance (transistors, diodes) et de composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs). Les performances de ces composants passifs sont des verrous technologiques pour l'accroissement des performances globales de ces dispositifs. Il devient donc nécessaire que les composants passifs suivent le rythme imposé par l'évolution des composants actifs, pour répondre aux contraintes accrues en termes de filtrage, de compacité et de rendement global de conversion.

Les composants magnétiques planar sont une solution pour l'intégration de puissance. Ces composants sont réalisés à l'aide de noyaux magnétique (ferrite) aplatis et d'enroulements réalisés en circuit imprimé (PCB) ou plaques de cuivre (Fig. 1). Ils présentent de nombreux avantages en comparaison avec des transformateurs bobinés classiques : Reproductibilité, plus forte densité de puissance, meilleur rendement, refroidissement plus aisé etc.

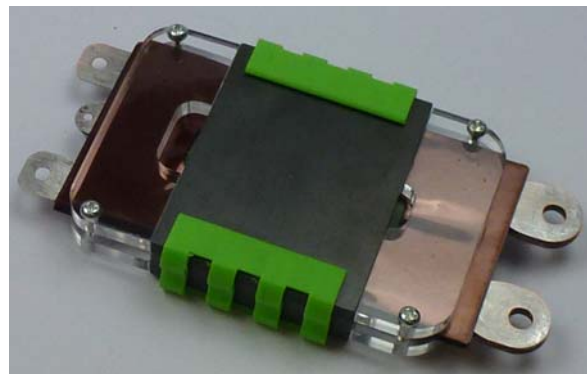


Fig.1 : Transformateur planar 2.5kW

### Sujet:

Pour augmenter les performances de ces composants, le design des enroulements est un point clé. De manière générale, les enroulements sont réalisés pour occuper le maximum de place dans une fenêtre de bobinage, en se basant sur un dimensionnement type « produit des aires ». Dans certaines applications, il semble intéressant de se donner plus de libertés au niveau de la conception des enroulements d'un transformateur. En effet, pour

gagner en efficacité dans le réglage de l'inductance de fuite et des capacités parasites, il est important de pouvoir jouer sur le positionnement et la taille des conducteurs dans la fenêtre de bobinage (Fig. 2). L'intégration dans le transformateur de cette inductance « utile » pour les convertisseurs associés, permet un gain notable en termes de volume global, tout en limitant l'effet négatif des capacités parasites. Les fenêtres des transformateurs deviennent alors non-conventionnelles.

Le principal critère de dimensionnement pour ces composants planar reste la maîtrise de la température des conducteurs. Ce critère thermique est en effet le point bloquant au vu de la densité de puissance de ces composants. Or, pour le dimensionnement thermique de ces fenêtres non-conventionnelles, les modèles analytiques de pertes cuivre, principalement basés sur l'hypothèse 1-D de Dowell s'avèrent inutilisables. Il convient donc de développer de nouveaux modèles de pertes fiables, permettant de prendre en compte les effets de peau et de proximité HF (Fig.3) dans les conducteurs rectangulaires, PCB ou feuille de cuivre.

Ce sujet de thèse porte donc sur la modélisation des pertes cuivres dans les enroulements de transformateur planar HF « forte puissance ». Des modèles analytiques basés sur des simulations numériques seront développés pour répondre à cette problématique de positionnement « non-régulier » au sein d'une fenêtre de transformateur planar. Ceci passe par une compréhension des phénomènes HF au sein des conducteurs afin de pouvoir évaluer leur impact.

Les modèles développés seront validés sur des composants réels, à l'intérieur de convertisseurs dédiés ou via d'autres protocoles de tests (onduleur HF, calorimètre...).

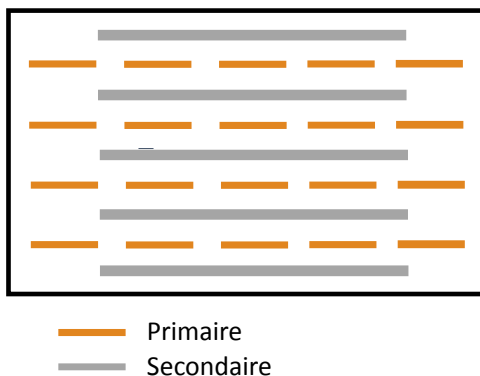


Fig.2 : Exemple de fenêtre de transformateur planar

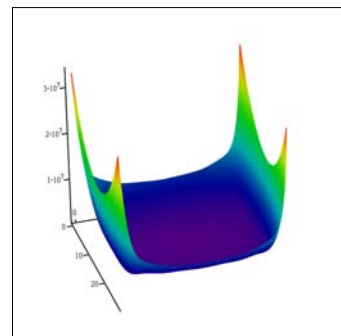


Fig.3 : Répartition courant dans un conducteur rectangulaire (effet de peau)

### Déroulement:

Cette thèse se déroulera au L2EP, au sein de l'équipe Electronique de Puissance.

L'équipe EP développe depuis un certain nombre d'année des modèles et des outils permettant de prédire le comportement des composants magnétiques planar lors de leur phase de conception (dimensionnement, thermique, inductance de fuite, etc.). L'enjeu de cette thèse est de travailler sur un point clé (pertes) permettant l'optimisation/réglage de paramètres en vue de la réalisation de composants performants vis-à-vis d'un cahier des charges.

En plus du développement de modèles analytiques et numériques, une part importante du travail sera liée à l'expérimentation et l'instrumentation des composants, afin de pouvoir valider les approches développées dans des conditions réelles de fonctionnement.



## References:

- [1] Z. Ouyang, M. A. E. Andersen, "Overview of Planar Magnetic Technology Fundamental Properties," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.29, no.9, pp.4888-4900, Sep 2014.
- [2] C.W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.
- [3] X. Margueron, A. Besri, Y. Lembeye, J-P. Keradec, "Current Sharing Between Parallel Turns of a Planar Transformer: Prediction and Improvement Using a Circuit Simulation Software", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.46, No.3, pp.1064-1071, May/June 2010.
- [4] P.L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings," *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol.113, no.8, pp.1387-1394, August 1966.
- [5] J. Aime, B. Cogitore, G. Meunier, E. Clavel, Y. Marechal, "Numerical Methods for Eddy Currents Modeling of Planar Transformers," *IEEE Trans. Mag.*, vol.47, no.5, pp.1014-1017, May 2011.
- [6] X. Margueron, "*Elaboration sans prototypage du circuit équivalent de transformateur de type planar*", Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, octobre 2006.
- [7] J. S. Ngoua Teu Magambo, R. Bakri, X. Margueron, P. Le Moigne, A. Mahe, T. Bensalah, "Impact of PCB Track Shape on HF Copper Losses of Planar Magnetic Components", *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Anacapri, 2016, pp. 973-978.
- [8] 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", *SGE16*.
- [9] I. Lope, C. Carretero, J. Acero, R. Alonso and J. M. Burdío, "AC Power Losses Model for Planar Windings With Rectangular Cross-Sectional Conductors," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 23-28, Jan. 2014.
- [10] Z. Belkaid, « Modèles et outils pour la conception de composant magnétiques HF dédiés à l'électronique de puissance », Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier, décembre 2016.