



**HAL**  
open science

## Analyse de la densité de puissance volumique des noyaux magnétiques planar pour l'aide à la conception de transformateurs HF

Reda Bakri, Jean Sylvio Ngoua Teu Magambo, Xavier Margueron, Philippe Le Moigne, Nadir Idir

### ► To cite this version:

Reda Bakri, Jean Sylvio Ngoua Teu Magambo, Xavier Margueron, Philippe Le Moigne, Nadir Idir. Analyse de la densité de puissance volumique des noyaux magnétiques planar pour l'aide à la conception de transformateurs HF. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981819

**HAL Id: hal-02981819**

**<https://hal.science/hal-02981819>**

Submitted on 28 Oct 2020

**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.

# Analyse de la densité de puissance volumique des noyaux magnétiques planar pour l'aide à la conception de transformateurs HF

Reda BAKRI, Jean Sylvio NGOUA TEU MAGAMBO, Xavier MARGUERON, Philippe LE MOIGNE, Nadir IDIR  
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** – Cet article présente une méthodologie permettant l'analyse des densités de puissance volumique qui peuvent être obtenues via l'utilisation de composants magnétiques planar au sein des convertisseurs d'électronique de puissance. En se basant sur une configuration optimale pour le transformateur, les densités de puissance volumique maximales atteignables pour différents noyaux magnétiques EE et E/PLT sont étudiées pour trois types de refroidissement : sans refroidisseur, refroidissement simple face et refroidissement double face. Ce type d'analyse peut être utile à un concepteur, lors d'une phase de dimensionnement, en le guidant vers des choix technologiques adaptés.

**Mots-clés**—*Transformateur planar, densité de puissance, conception.*

## 1. INTRODUCTION

Les composants magnétiques sont indispensables au bon fonctionnement des convertisseurs d'électronique de puissance (EP). Ils accomplissent un certain nombre de fonctions vitales comme le filtrage, le stockage, le transfert de l'énergie ou encore l'isolation galvanique. Cependant, ils occupent un volume important au sein des convertisseurs et sont, de plus, source de pertes importantes.

Dans les systèmes embarqués et dans les transports, des composants de plus en plus compacts et efficaces, permettant une augmentation des densités de puissance, sont requis [1]. Pour répondre à ce besoin, l'augmentation des fréquences de fonctionnement est indispensable. Malgré les avancées technologiques autour des composants actifs, qui permettent d'atteindre des fréquences de commutation de l'ordre du MHz, les composants passifs restent un obstacle à l'utilisation de ces fréquences et sont donc un frein à l'intégration de puissance.

Dans ce contexte, les composants magnétiques planar (CMP) sont une solution intéressante et présentent un certain nombre d'avantages en comparaison avec les composants bobinés traditionnels [2, 3] :

- Faible épaisseur
- Plus forte densité de puissance
- Moins de pertes en haute fréquence
- Faible inductance de fuite
- Bonne évacuation thermique
- Très bonne répétabilité

L'augmentation des fréquences permet de réduire le volume des composants magnétiques et donc, leur surface de refroidissement. Toutefois, cette hausse induit aussi une augmentation significative de leurs pertes, ce qui renforce les contraintes thermiques sur les composants. Ces derniers peuvent alors nécessiter des solutions de refroidissement qui ont une incidence non négligeable sur le critère de densité de puissance.

Afin de guider un concepteur dans le choix d'une solution technologique à base de composants magnétiques planar, cet article présente une méthodologie inverse permettant l'analyse des densités de puissance volumique atteignables en utilisant cette technologie. Les différents types de noyaux planar EE, E/PLT [4], combinés à trois modes de refroidissement (Fig.1) seront analysés pour servir de base de référence pour le choix d'une solution.

Après avoir présenté les hypothèses de l'étude, la méthodologie sera décrite brièvement. Par la suite, les différents modèles utilisés seront détaillés. Les résultats obtenus sur différents noyaux EE et E/PLT seront enfin présentés pour permettre l'analyse du critère de densité de puissance volumique des CMP.

## 2. HYPOTHESES DE L'ETUDE

L'objectif de cette étude est d'analyser les limites théoriques de la densité de puissance volumique des transformateurs planar sous une contrainte thermique. Il s'agit d'étudier trois cas de refroidissement en convection naturelle :

- Transformateur planar seul (Fig.1a)
- Transformateur planar associé à un radiateur (Fig.1b)
- Transformateur planar associé à deux radiateurs (Fig.1c)

Pour maximiser le niveau de chaleur extraite par convection naturelle, le transformateur et les radiateurs sont positionnés verticalement comme le montre la Fig.1.

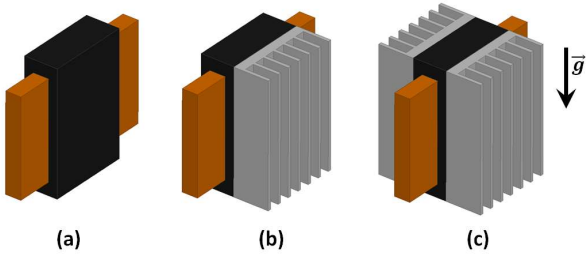


Fig. 1. Types de refroidissement étudiés : (a) Convection naturelle sans refroidisseur, (b) Refroidissement simple face et (c) Refroidissement double face.

Pour ce faire, un cas d'étude permettant de maximiser ces valeurs est nécessaire. Ce cas est basé sur l'étude d'un transformateur à deux enroulements répondant aux hypothèses suivantes :

- La fenêtre du transformateur est complètement remplie (Fig.2). Le primaire possède le même nombre de couches que le secondaire.
- Les couches conductrices (primaires et secondaires) ont toutes la même épaisseur, quel que soit le noyau étudié. Il en est de même pour les couches isolantes.
- L'entrelacement primaire/secondaire est maximal.
- Le transformateur est alimenté par une tension sinusoïdale.
- Les pertes cuivre sont égales aux pertes fer.
- L'ensemble des pertes au sein du composant est évacué à travers ses surfaces externes associées, ou non, à un ou deux radiateurs (Fig.1).
- La conduction thermique dans le transformateur est négligée. La température est homogène sur tout le composant.
- La température ambiante est fixée à 40°C tandis que la température maximale tolérée est de 100°C.

Avec ces différentes hypothèses, la limite haute de densité de puissance qui sera calculée ne pourra pas être atteinte en pratique mais cette méthodologie permettra de donner un ordre de grandeur de ce qui est réalisable et de comparer les différents noyaux et les différentes solutions de refroidissement.

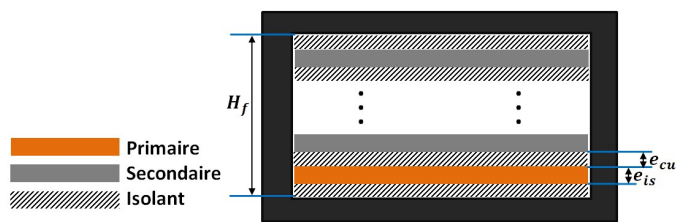


Fig. 2. Fenêtre du transformateur planar

### 3. METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DE LA DENSITE DE PUISSANCE

Pour permettre l'évaluation de la densité de puissance volumique d'un noyau combiné à un type de refroidissement donné, la démarche de calcul, présentée Fig.3, est suivie pas-à-pas.

Après avoir spécifié quelques grandeurs liées à la géométrie, au type de matériau magnétique et aux hypothèses de fonctionnement, les pertes maximales admissibles pour respecter un échauffement donné pour un type de refroidissement (Fig.1) sont calculées [5]. Sur la base de ce calcul, les grandeurs électriques admissibles pour un noyau donné sont déduites. La densité de puissance volumique est

enfin obtenue en tenant compte de la puissance et du volume du composant, associé ou non à un ou deux refroidisseurs.

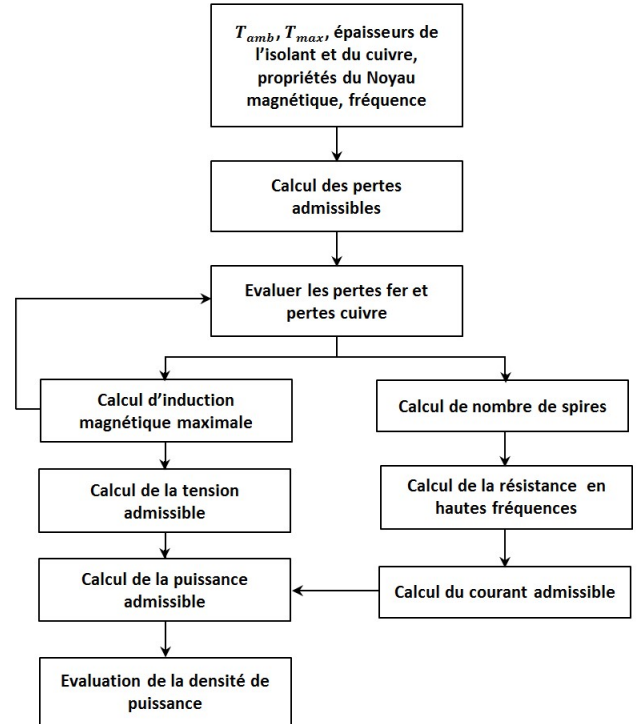


Fig. 3. Démarche de calcul de la densité de puissance pour un transformateur planar

#### 3.1. Calcul des pertes maximales admissibles

Les pertes admissibles pour respecter la température maximale du composant requise (100°C) sont calculées à l'aide d'un modèle thermique inverse. Ce dernier assume que la totalité des pertes sont évacuées à travers la surface externe du composant. Cela revient à négliger les effets de la conduction thermique dans le composant, ce qui peut être justifié par la bonne conductivité des matériaux et par le niveau de pertes mis en jeu, qui n'induit pas de forts flux thermiques.

Ces pertes correspondent alors à la somme des chaleurs qui peuvent être évacuées par convection et rayonnement comme l'exprime la relation (1) :

$$P_{adm} = \sum_{i=1}^6 S_i h_i (T - T_{amb}) + \sum_{i=1}^6 S_i \varepsilon_i \sigma (T^4 - T_{amb}^4) \quad (1)$$

Les coefficients  $h_i$  représentent l'échange par convection de la surface. Ces coefficients dépendent de l'orientation de la surface, de sa température et de la température ambiante, ils sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Expression du coefficient d'échange pour différentes configurations.

Configuration	Géométrie	$h$ [W.m <sup>2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Surface horizontale chauffante vers le haut		$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0.25}$
Surface verticale		$h = 0.66 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0.25}$
Surface horizontale chauffante vers le bas		$h = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0.25}$

### 3.2. Modèle du radiateur

Dans le cas où un radiateur est posé sur la surface du circuit magnétique, il peut être représenté par un coefficient d'échange calculé pour un radiateur optimisé. Le radiateur considéré dans le cadre de cette étude est représenté sur la Fig.4.

Sa base est de longueur  $L$  et de largeur  $W$ . Ces deux dimensions correspondent à celles du circuit magnétique planar sur lequel le radiateur est posé. La hauteur et l'épaisseur de ses ailettes sont notées, respectivement,  $H$  et  $t$ . L'espace entre ses ailettes est désigné par la longueur  $s$ .

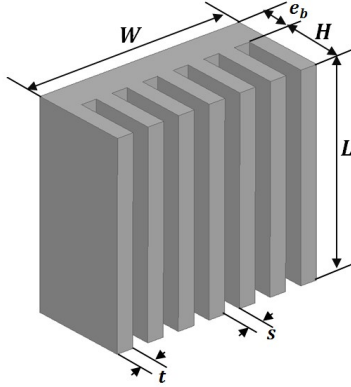


Fig. 4. Dimensions du radiateur

L'espacement optimal entre les ailettes (2) est donné en fonction du nombre de Rayleigh  $Ra$  (3) et de la longueur  $L$  du radiateur [6].

$$S_{opt} = 2.714 \frac{L}{Ra^{1/4}} \quad (2)$$

$$Ra = \frac{g \beta C_p}{\mu k} \Delta T L^3 \quad (3)$$

Avec :

$g$  : Accélération de la pesanteur [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$\beta$  : Coefficient de dilatation de l'air [ $K^{-1}$ ]

$C_p$  : Chaleur spécifique [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\mu$  : Viscosité dynamique [ $Pa \cdot s$ ]

$k$  : Conductivité thermique de l'air [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

Pour négliger l'effet de la conduction thermique due à la base du radiateur et aux ailettes il faut que leur épaisseur soit réduite au minimum. Compte tenu des contraintes de fabrication et afin d'obtenir des radiateurs réalistes et réalisables, l'épaisseur de la base est fixée à 5mm et celle des ailettes à 1mm.

Concernant la hauteur  $H$ , étant donné les hypothèses prises précédemment, cette grandeur n'a pas d'influence sur le coefficient d'échange. Néanmoins, cette hauteur doit être limitée pour négliger l'effet de la conduction thermique et pour avoir des composants avec des dimensions raisonnables. Dans le cadre de cette étude, nous fixons  $H=15mm$ .

Le coefficient d'échange doit être ramené à la surface de la base du circuit magnétique  $S_{bcm}$  où il est posé (4).

$$h_{eq} = h_{radiateur} \cdot \frac{S_{radiateur}}{S_{bcm}} \quad (4)$$

Où  $S_{radiateur}$  est la surface externe du radiateur et  $S_{bcm}$  est la surface du noyau magnétique sur laquelle le radiateur est posé.

C'est ce dernier coefficient (4) qui représente le radiateur dans l'équation (1). Les pertes calculées sur la base de cette équation vont alors servir pour évaluer la puissance admissible maximale qui peut être transférée par les différents noyaux magnétiques.

### 3.3. Calcul de la puissance maximale admissible et de la densité de puissance

Afin d'évaluer la puissance maximale admissible, il faut calculer la tension et le courant maximaux admissibles. Ceci nécessite la connaissance du nombre de spires primaire et secondaire  $N$  (5). Ce dernier est calculé à partir de la hauteur de la fenêtre  $H_f$  (6), de l'épaisseur des conducteurs  $e_{cu}$  et de celle de l'isolant  $e_{is}$ , de telle manière à assurer un remplissage maximal de la fenêtre du transformateur (Fig.2).

$$N = ENT \left[ \frac{H_f - e_{is}}{2(e_{cu} + e_{is})} \right] \quad (5)$$

$$H_f \approx 2N * e_{cu} + (2N + 1)e_{is} \quad (6)$$

Pour assurer une configuration optimale, Les pertes admissibles sont scindées en deux parts égales entre les pertes cuivre et les pertes fer (7).

$$P_{cu} = P_{fer} = \frac{P_{adm}}{2} \quad (7)$$

Ensuite, l'induction maximale dans le noyau magnétique est calculée à partir des pertes fer en utilisant la formulation de Steinmetz [7] :

$$P_{fer} = k_c f^\alpha B_{max}^\beta V_{fer} \quad (8)$$

Avec :  $P_{fer}$  : pertes  $f$  la fréquence,  $V_{fer}$  le volume de fer et  $k_c$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  les paramètres du modèle de Steinmetz.

Dans le cadre de cette étude nous utilisons le matériau 3F3 de Ferroxxcube ( $k_c=0.25e-3$ ,  $\alpha=1.63$  et  $\beta=2.45$ ) [8].

L'induction maximale dans le noyau magnétique est alors donnée par :

$$B_{max} = \left( \frac{P_{fer}}{k_c V_{fer} f^\alpha} \right)^\beta \quad (9)$$

La tension efficace admissible est donnée à partir de la loi de Faraday :

$$V_{adm} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N \cdot f \cdot S_c \cdot B_{max} \quad (10)$$

Si l'induction magnétique calculée par (9) est supérieure à l'induction magnétique de saturation du matériau, l'induction maximale  $B_{max}$  est alors remplacée par l'induction de saturation :

$$B_{max} = B_{sat} \quad (11)$$

Les pertes fer sont alors réévaluées à partir de la formule de Steinmetz (8). La partie restante des pertes admissibles sera alors affectée aux pertes cuivre :

$$P_{cu} = P_{adm} - P_{fer} \quad (12)$$

Le courant admissible dans le transformateur peut être déduit des pertes cuivre et de la résistance du bobinage calculée avec la formule de Dowell [9].

$$I_{adm} = \sqrt{\frac{P_{cu}}{R_{ac}}} \quad (13)$$

Avec  $R_{ac}$  est la résistance du bobinage donnée par (14) :

$$R_{ac} = R_{dc} \left[ \frac{\sinh(2X) + \sin(2X)}{\cosh(2X) - \cos(2X)} + 2X \left( \frac{m^2 - 1}{3} \frac{s \sinh(X) - \sin(X)}{\cosh(X) + \cos(X)} \right) \right] \quad (14)$$

Avec  $R_{dc}$  la résistance DC du bobinage (15) et  $X$  le rapport entre l'épaisseur des conducteurs et l'épaisseur de peau  $\delta$  (16).

$$R_{dc} = \frac{l_m \rho}{S} \quad (15)$$

Où  $S$  est la section du conducteur [ $m^2$ ] et  $\rho$  est la résistivité électrique [ $\Omega.m$ ].  $l_m$  correspond à la longueur moyenne des enroulements. Cette valeur (17) peut être déduite à partir des dimensions du circuit magnétique (Fig.5)

$$X = \frac{e_{cu}}{\delta} \quad (16)$$

$$l_m = 2G + 3B - C \quad (17)$$

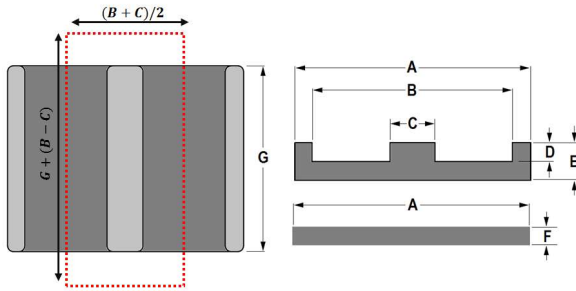


Fig. 5. Dimensions du circuit magnétique

La puissance maximale admissible est alors évaluée par le produit de la tension (10) et du courant admissible (13) :

$$P = V_{adm} \cdot I_{adm} \quad (18)$$

Finalement, la densité de puissance volumique (19) est déduite en divisant la puissance admissible par le volume, ce dernier comptant à la fois le volume du transformateur et ceux des refroidisseurs.

$$\rho_{puiss} = \frac{P}{V_{transfo} + V_{radiateurs}} \quad (19)$$

Le volume du transformateur (20) et ceux des radiateurs (21) peuvent être déduit partir des dimensions (Fig.5 et Fig.4).

$$V_{transfo} = (E + F) * A * G + l_{moy} * \frac{(B - C)}{2} \quad (20)$$

$$V_{radiateur} = L * W * (H + e_b) \quad (21)$$

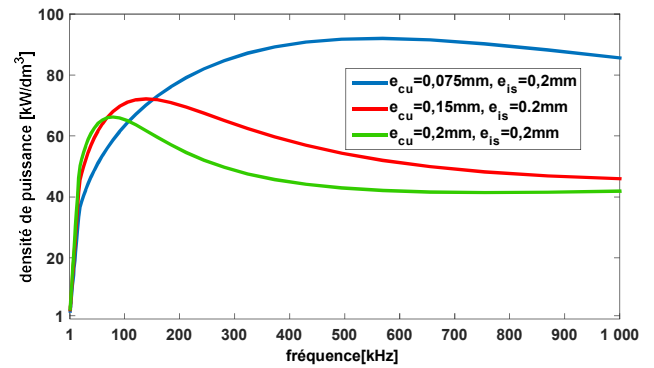
#### 4. RESULTATS ET ANALYSE

La méthodologie d'analyse est maintenant appliquée aux différentes tailles de noyaux magnétiques planar. L'influence

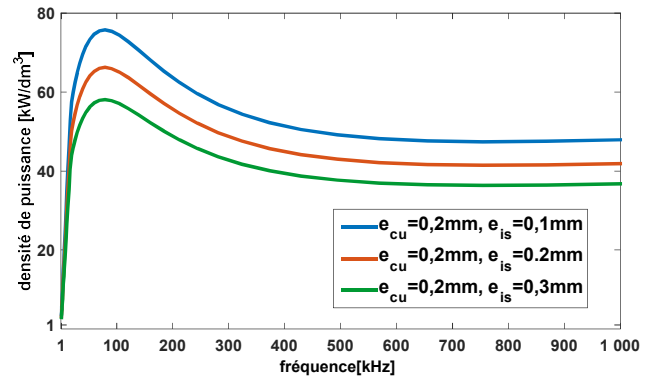
du type de refroidissement est ainsi testée, tout comme l'épaisseurs des couches conductrices et isolantes.

La Fig.6a représente l'évolution de la densité de puissance pour un noyau EE64, pour différentes épaisseurs de conducteurs (0.075, 0.15 et 0.2 mm). Pour cette analyse, l'épaisseur des isolants est constante et fixée à 0.2mm. La densité de puissance maximale est atteinte pour des fréquences différentes suivant l'épaisseur des conducteurs. Plus l'épaisseur des conducteurs est faible, plus élevée est cette fréquence, tout comme le niveau de densité de puissance volumique.

La Fig.6b, quant à elle, montre l'évolution de la densité de puissance pour différentes épaisseurs d'isolants (0.1, 0.2 et 0.3 mm) et une épaisseur de cuivre constante (0.2mm). Le maximum de densité de puissance est atteint pour la même fréquence dans les trois cas. Ceci est lié à l'épaisseur des couches de cuivre qui est identique pour les trois essais. Quant à la valeur en elle-même de la densité de puissance, cette dernière est plus forte pour une faible valeur de l'épaisseur d'isolant, correspondant à un plus grand facteur de remplissage de la fenêtre.



(a)



(b)

Fig. 6. Evolution de la densité de puissance pour un noyau EE64 : (a) pour différentes épaisseurs de cuivre et (b) pour différentes épaisseurs de d'isolant.

La Fig.7 compare les résultats obtenus pour les différentes tailles de noyaux magnétiques EE et E/PLT sans radiateur. Les formes de type EE permettent d'obtenir une densité de puissance volumique plus importante que les noyaux de type E/PLT. Ceci s'explique aisément en raison de l'augmentation significative de la fenêtre de bobinage en configuration EE (surface doublée) qui augmente significativement la puissance et qui n'impacte que modérément le volume.

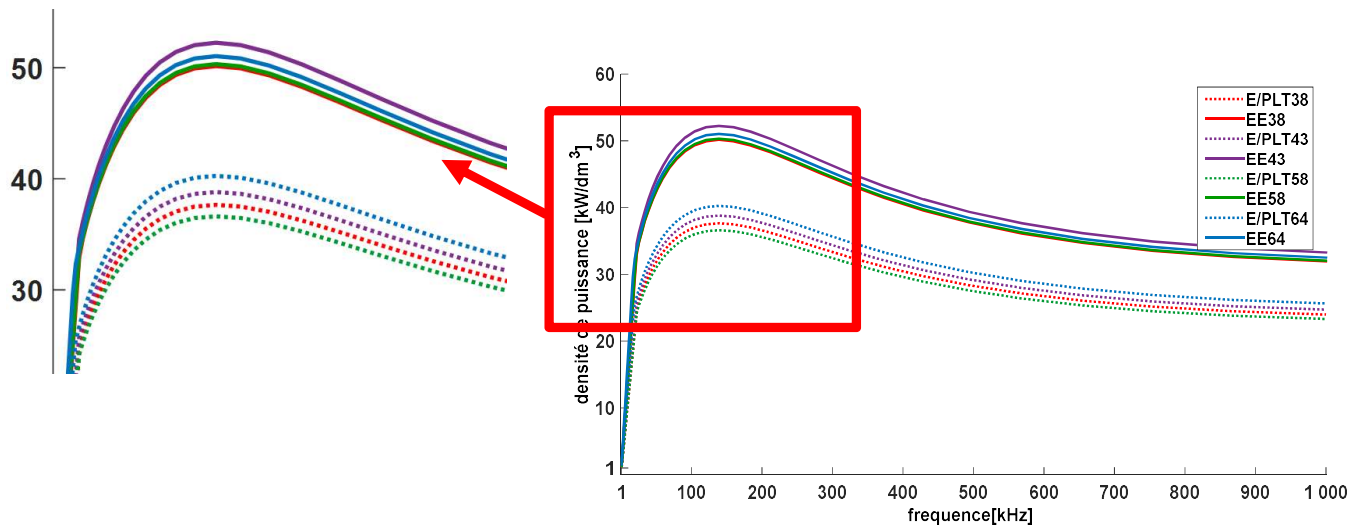


Fig. 7. Densité de puissance des noyaux planar EE et E/PLT en fonction de la fréquence. Cas sans radiateur,  $e_{cu}=0.2$ ,  $e_{is}=0.2$

Pour un concepteur, il peut donc être plus intéressant d'avoir recours à un noyau EE de taille inférieure plutôt qu'à un noyau de type E/PLT pour une puissance donnée.

L'effet du refroidissement sur les différentes tailles de noyaux EE et E/PLT (38, 43, 58 et 64) est évalué sur la Fig.8. Pour cette comparaison, les conducteurs ont une épaisseur de conducteurs de 0.2mm et les couches isolantes de 0.1mm.

Un refroidissement simple face permet d'obtenir une meilleure densité de puissance dans tous les cas de figure. Le refroidissement double face ne présente pas les mêmes avantages car bien que la puissance admissible soit plus élevée, le volume de l'ensemble est pénalisé par l'ajout de ce second refroidisseur. De plus, dans le cas de composant plus volumineux (E/PLT64 et EE64) ce double refroidissement ne permet pas d'atteindre une meilleure densité que le cas sans radiateur (fig.8g et h).

## 5. CONCLUSION

Cet article propose une méthodologie d'étude de la densité de puissance volumique des transformateurs planar sous contrainte thermique avec trois configurations de refroidissement : sans radiateur, avec radiateur simple face et radiateur double face. L'étude a permis de montrer l'intérêt d'utilisation des noyaux de type EE quand c'est possible à la place des noyaux E/PLT. Le refroidissement simple face induit une meilleure densité de puissance en comparaison avec le refroidissement sans radiateur ou avec un refroidissement double face.

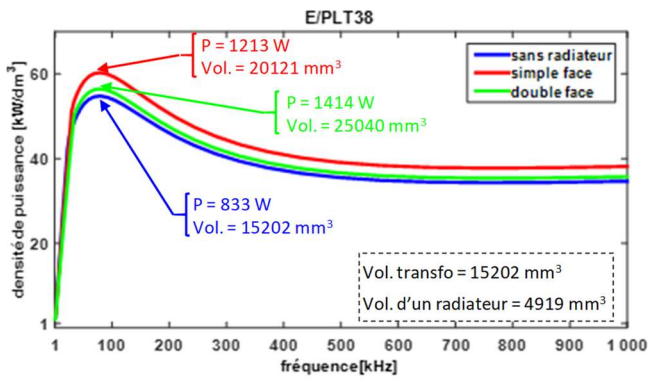
Ce type d'étude permet d'évaluer les densités de puissances atteignables par les différents noyaux planar, avec ou sans radiateur, et guider ainsi, un concepteur dans ses choix. Cette étude peut être complétée par une comparaison avec un cas similaire où la convection serait forcée.

## 6. REFERENCES

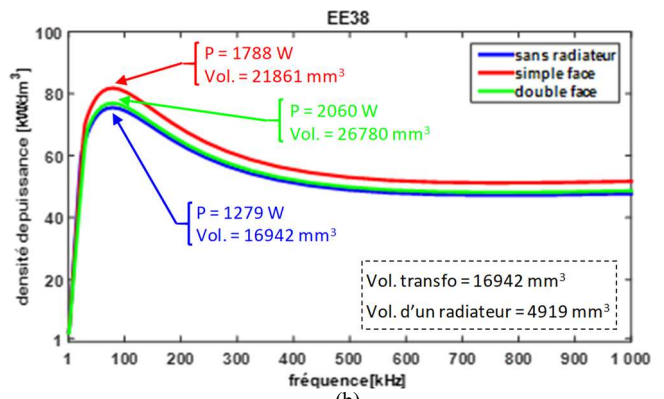
[1] J.W. Kolar, U. Drogenik, J. Biela, M.L Heldwein, H. Ertl, T. Friedli, S.D.Round, « PWM Converter Power Density Barriers », Power

Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07 , vol., no., pp.P-9,P-29, 2-5 April 2007.

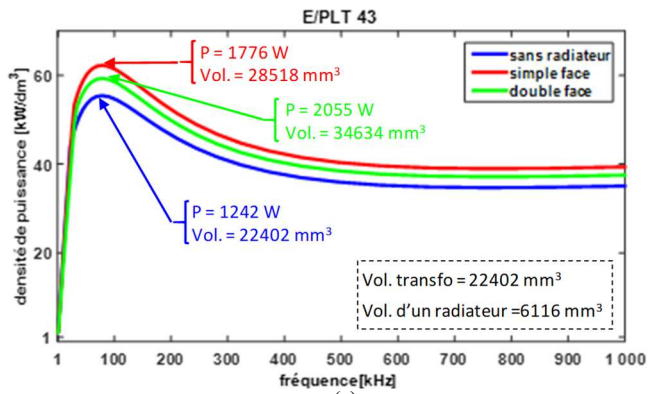
- [2] J. S. Ngoua Teu Magambo, R. Bakri, X. Margueron, P. Le Moigne, A. Mahe, S. Guguen and T. Bensalah, « Planar Magnetic Components in More Electric Aircraft: Review of Technology and Key Parameters for DC-DC Power Electronic Converter » IEEE Transactions on Transportation Electrification, Year: 2017, Volume: 3, Issue: 4, Pages: 831 - 842.
- [3] Z. Ouyang and M. A. E. Andersen, "Overview of planar magnetic technology fundamental properties," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4888–4900, Sep. 2014.
- [4] Ferroxcube catalogue. Available online on [www.ferroxcube.com](http://www.ferroxcube.com)
- [5] F. Incropera, « Fundamentals of Heat and Mass Transfer », New York: John Wiley and Sons, 1985.
- [6] A. D. Kraus and A. Bar-Cohen, *Design and analysis of heat sinks*. New York: Wiley, 1995.
- [7] J. E. Brittain, « A Steinmetz contribution to the AC power revolution », *Proc. IEEE*, vol. 72, n° 2, p. 196-197, févr. 1984.
- [8] Ferroxcube « Planar transformer design », Application note, 2000
- [9] P. L. Dowell, « Effects of eddy currents in transformer windings », *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 113, no 8, p. 1387-1394, août 1966



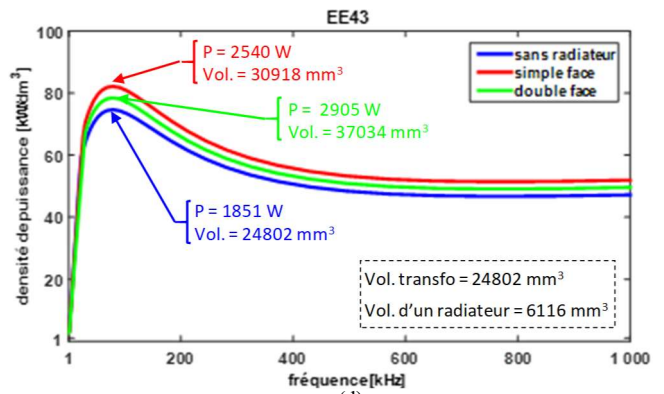
(a)



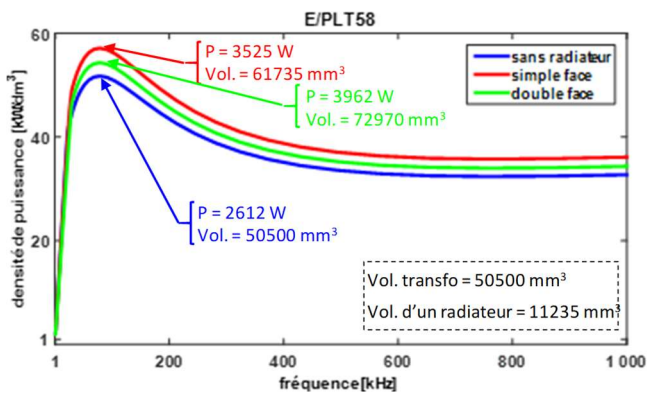
(b)



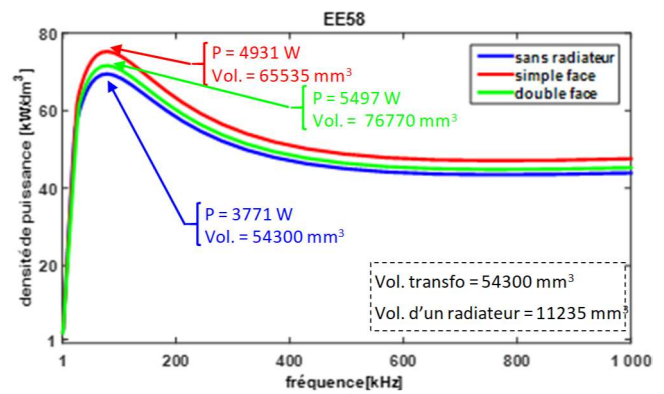
(c)



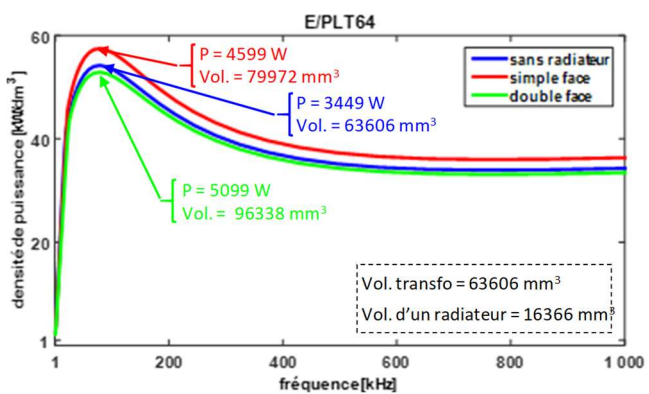
(d)



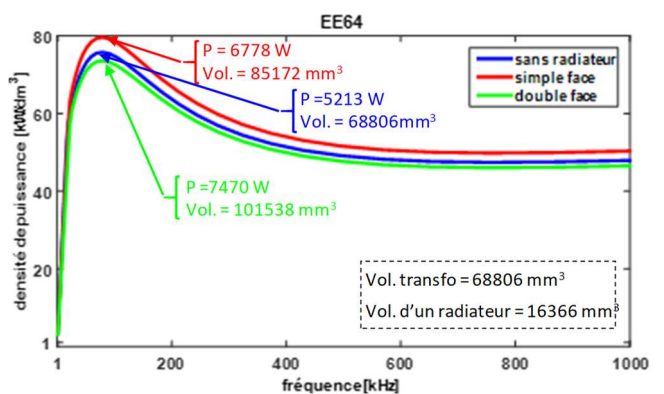
(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. 8. Densité de puissance des noyaux planar en fonction de la fréquence pour les trois types de refroidissement : (a) E/PLT38, (b) EE38, (c) E/PLT43, (d) EE43, (e) E/PLT58, (f) EE58, (g) E/PLT64 et (h) EE64