

Développement d'une méthode de caractérisation des pertes magnétiques par thermographie Infrarouge

Abderezak AOUALI ^{1,2}, Oualid MESSAL ², Abdelkader BENABOU ², Alain SOMMIER ¹, Jean-Christophe BATSALE ¹

¹ I2M, Département TREFLE, Bâtiment A11, 351, Cours de la libération, 33400 Talence.

² L2EP, Cité Scientifique, Bât. ESPRIT - 59655 Villeneuve d'Ascq.

RESUMÉ – Les pertes magnétiques (ou pertes fer) sont inévitables dans les circuits magnétiques des dispositifs électromagnétiques dédiés à la conversion d'énergie. L'efficacité énergétique de ces dispositifs repose sur la maîtrise des pertes qu'il faut prévoir dès la phase de conception. Pour cela, leur caractérisation expérimentale est incontournable. Or, les pertes fer sont difficilement mesurables que ce soit globalement ou localement. Ce travail présente une méthode basée sur des mesures thermographiques par caméra Infrarouge pour l'estimation quantitative des pertes magnétiques dans des tôles ferromagnétiques.

Mots-clés – Thermographie Infrarouge, pertes magnétiques.

1. INTRODUCTION

L'efficacité énergétique des dispositifs électromagnétiques repose sur la maîtrise des pertes qu'il faut prévoir dès la phase de conception. En particulier, les pertes magnétiques (ou pertes fer) sont à prendre en compte afin d'espérer une bonne évaluation des performances notamment le rendement et les échauffements. Cela est d'autant plus vrai à l'heure où les fabricants doivent accroître les rendements de leurs dispositifs et dans un avenir proche où ils devraient certifier leurs performances.

La prise en compte des pertes fer passe par une étape incontournable de caractérisation expérimentale. Or, les pertes fer sont difficilement mesurables que ce soit globalement mais surtout localement. Les études reportées dans la littérature concernant la mesure locale des pertes fer restent extrêmement limitées [1, 2, 3]. Dans ce contexte, l'objectif de cet article est d'explorer la possibilité de caractérisation locale des pertes fer dissipées dans les tôles ferromagnétiques par méthode thermique. Il s'agit de réaliser des mesures de champs de température sans contact par thermographie Infrarouge (IR) et de remonter, au moyen de la modélisation et de méthodes inverses thermiques [4] à la puissance dissipée dans une tôle ferromagnétique sollicitée de manière cyclique.

L'articulation qui permet de relier les modèles de pertes fer à des mesures locales quantitativement précises manque beaucoup dans la littérature. Disposer de mesures de pertes précises et in situ, sous contrainte mécanique ou non sera très important et permettra de remédier à ce manque et de consolider les modèles de pertes. D'autre part, monitorer les champs de température en temps réel permettrait de disposer de mesures locales précieuses pour prendre en compte finement des phénomènes physiques complexes tels que le vieillissement magnétique, dès la phase de conception.

2. DÉMONSTRATEUR EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental développé pour la mesure locale des pertes magnétiques dans des tôles ferromagnétiques est décrit dans la Figure 1. Il comporte : une alimentation électrique quatre quadrants (PBZ6067LAN) pilotée par Labview, un circuit magnétique d'excitation en forme de U avec sa bobine primaire, la tôle ferromagnétique à caractériser placée sur le circuit magnétique d'excitation de façon à assurer la fermeture du

flux magnétique, une bobine de mesure de tension secondaire qui permet d'accéder à l'induction moyenne dans la section de la tôle en fonction du champ appliqué. Il est à noter qu'un isolant thermique (liège) est mis sur la bobine d'excitation de façon à s'affranchir de son apport en rayonnement thermique lors des mesures. Enfin, un système de mesure et d'acquisition des champs de température composé d'une caméra IR de type MCT (FLIR SC7000, 320×256 pixels, taille du pitch $25 \mu\text{m}$, gamme spectrale entre 9 et $11 \mu\text{m}$) est utilisée. La caméra est équipée d'un objectif IR de longueur focale de 25 mm (permettant ainsi d'atteindre une résolution spatiale de 200μ per pixel).

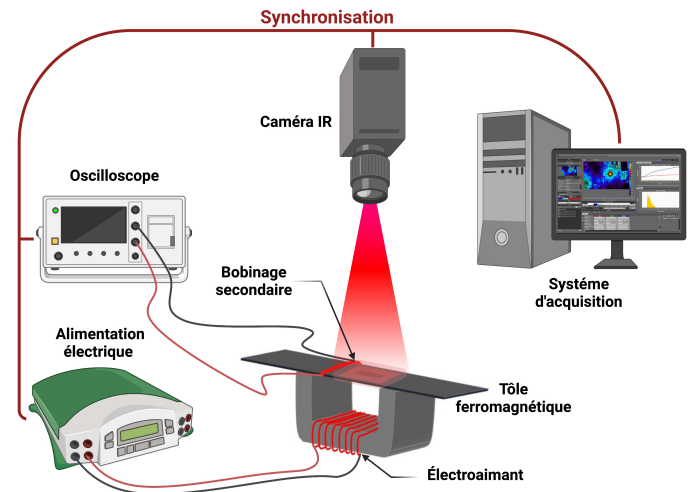


FIG. 1. Montage expérimental permettant de mesurer les champs 2D de température sur des tôles ferromagnétiques.

La figure 2 Montre les étapes réalisées pour le pilotage et la synchronisation du banc expérimental, le pilotage est effectué intégralement en utilisant le logiciel LabVIEW en synchronisation avec le logiciel Altair (logiciel de pilotage de la caméra IR) pour réaliser les mesures thermiques. En premier temps, l'utilisateur rentre les valeurs souhaitées en niveaux d'induction et en fréquences. Ensuite, une boucle de régulation permet de : (i) faire varier la tension primaire, (ii) mesurer la tension aux bornes de la bobine secondaire et de calculer l'induction correspondante, (iii) comparer l'induction calculée à celle de consigne. Enfin, lorsque la valeur d'induction de consigne est atteinte, la caméra IR est déclenchée automatiquement pour acquérir un film de 90 s (60 s en appliquant la tension primaire correspondante, et, 30 s de relaxation thermique).

3. MODÉLISATION DU TRANSFERT DE CHALEUR AU SEIN DES TÔLES FERROMAGNÉTIQUES

Dans cette étude, nous nous sommes focalisés sur l'étude de faisabilité de la mesure des pertes fer par thermographie IR.

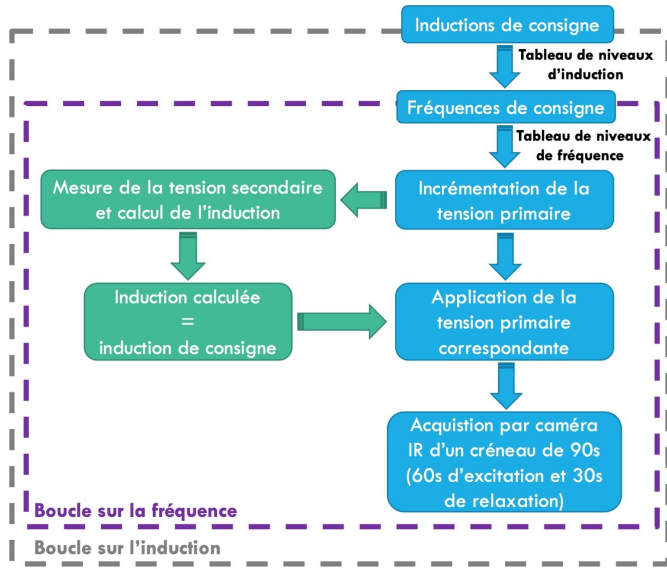


FIG. 2. Schéma explicatif des différentes étapes nécessaires pour le pilotage du banc expérimental.

Pour ce faire, nous avons procédé à une inversion de la moyenne spatiale du champ de température (1D) mesuré par la caméra pour accéder aux pertes fer globales.

Afin de remonter aux sources de chaleurs dissipées dans les tôles ferromagnétiques (pertes fer en d'autres termes), la modélisation analytique du transfert de chaleur au sein de ces tôles est nécessaire. En effet, cette modélisation analytique permettra d'identifier la réponse impulsionnelle thermique d'une tôle qui servira par la suite de modèle pour inverser le problème direct (champs de température mesurés) et remonter aux sources de chaleur (pertes fer). Pour cela, dans une première étape, les propriétés thermo-physiques des tôles étudiées ont été estimées : (i) la diffusivité thermique a été estimée en utilisant la technique du Flying spot [5] et vaut $a = 9.8 \pm 0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, (ii) la masse volumique a été mesurée par un pycnomètre à Helium et vaut $\rho = 7220 \pm 30 \text{ kg.m}^{-3}$, et, (iii) la chaleur spécifique a été estimée par une DSC (differential scanning calorimeter) Setaram 131 et vaut $C_p = 459.6 \pm 27 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

Par la suite, les tôles ferromagnétiques étudiées peuvent être considérées thermiquement comme des milieux homogènes minces (en raison de leur faible épaisseur, $e = 0.3 \text{ à } 0.65 \text{ mm}$) soumis à des pertes thermiques par convection et contenant une source de chaleur interne. En effet, le gradient de température dans l'épaisseur est négligé à cause du rapport très important entre les dimensions dans le plan ($300 \times 30 \text{ mm}$) et l'épaisseur e . En revanche, l'influence de l'environnement (l'air) qui entoure la tôle n'est pas négligeable et affecte considérablement sa température [6, 4]. Par conséquent, le modèle analytique qui décrit le transfert de chaleur dans la tôle doit inclure les couches environnantes comme le montre la figure 3.a : Air-Tôle-Air. Ainsi, L'évolution du champ de température au sein de la tôle est décrit par l'équation de conduction de la chaleur 1D suivante :

$$\begin{cases} \frac{1}{a_r} \frac{\partial T_r(z, t)}{\partial t} - \frac{1}{\lambda_{r=2}} \mathcal{Y}_{r=2}(z, t) - \nabla T_r(z, t) = 0, \\ -\lambda_r \frac{\partial T_r(z, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm \frac{L_x}{2}} = 0, -\lambda_r \frac{\partial T_r(z, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{L_y}{2}} = 0, \\ -\lambda_{r=2} \frac{\partial T_{r=2}(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=j} = -h T_{r=2}(z = j, t), \\ -\lambda_{r=2} \frac{\partial T_{r=2}(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=k} = h T_{r=2}(z = k, t), \\ T_r(z, t = 0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

Où r représente le numéro de la couche, c'est-à-dire "1" pour l'air, "2" pour la tôle et "3" pour l'air. \mathcal{Y} représente la source interne de chaleur et ∇ l'opérateur Laplacien. T (K) représente la température, a ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) la diffusivité thermique, λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) la conductivité thermique, et, h ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) le coefficient d'échange convectif lié aux pertes thermiques.

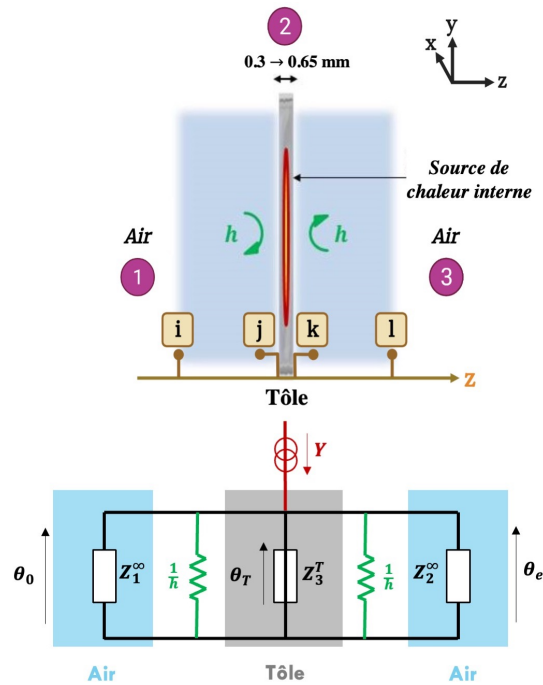


FIG. 3. Modélisation du transfert de chaleur dans la tôle ferromagnétique.

Le système d'équations peut se résoudre en utilisant la méthode des quadripôles thermiques [7] dans l'espace transformé de Laplace sur le temps. La solution obtenue est représentée dans la figure 3.b où seule l'impédance capacitive de la tôle est prise en compte (corps thermiquement mince), et, les couches d'air sont représentées par des impédances semi-infinies. Par analogie à l'électricité et sur la base de la loi des nœuds, l'expression de la température de la tôle (θ_T) dans l'espace de Laplace s'écrit comme suit :

$$\theta_T = \underbrace{\left(\frac{1}{Z_{eq}^1} + \frac{1}{Z_3^T} + \frac{1}{Z_{eq}^3} \right)^{-1}}_{\hat{H}} \times Y. \quad (2)$$

Où \hat{H} représente la réponse impulsionnelle thermique de la tôle.

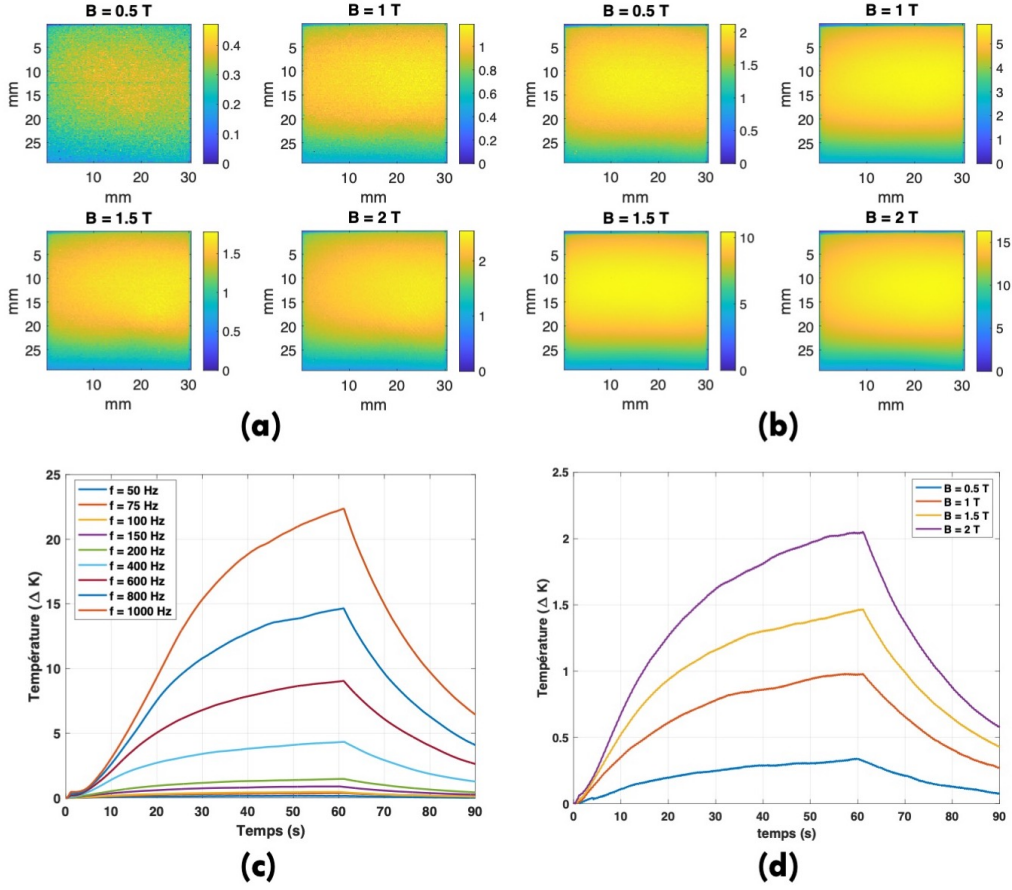


FIG. 4. Champs de température mesurés par la caméra IR : (a) champs de température mesurés à $f = 200$ Hz à $t = 50$ s, (b) champs de température mesurés à $f = 600$ Hz à $t = 50$ s, (c) Moyenne des champs de température mesurés tracés en fonction de la fréquence à $B_{max} = 1.5$ T, (d) Moyenne des champs de température mesurés tracés en fonction des niveaux d'induction à $f = 200$ Hz.

avec :

$$Z_{eq}^{1,3} = \left(h_c + \frac{1}{Z_{\infty}^{1,3}} \right)^{-1}, \text{ où } Z_{\infty}^{1,3} = (\lambda\gamma)^{-1}, \gamma = \sqrt{\frac{p}{a}}. \quad (3)$$

L'impédance capacitive de la tôle s'écrit :

$$Z_3^T = (\lambda\gamma \sinh(\gamma e))^{-1}, \quad \text{ où } \gamma = \sqrt{\frac{p}{a}}. \quad (4)$$

Où p représente la variable de Laplace. Y représente la source interne dans l'espace de Laplace et s'écrit :

$$Y(p) = \int_0^{+\infty} \mathcal{Y}(x, y, t) \exp(-pt) dt, \quad (5)$$

Pour remonter au champ de température spatial, une transformation de Laplace inverse sur le temps [8] est nécessaire. Le tableau 1 récapitule les propriétés thermophysiques de l'air et de la tôle.

	Air	Tôle
épaisseur (m)	∞	0.3×10^{-3}
λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.026	32.52 ± 0.057
ρC_p ($\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$)	1313	$3.32 \pm 0.043 \times 10^6$
a ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	1.98×10^{-5}	$9.8 \pm 0.1 \times 10^{-6}$

TABLEAU 1. Propriétés thermophysiques des différentes couches, données à partir de [9] pour l'air.

4. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE INVERSE POUR L'ESTIMATION DE LA SOURCE DE CHALEUR

Dans le but de remonter à l'amplitude moyenne des sources de chaleur produites par les tôles ferromagnétiques, une méthode inverse thermique basée sur les moindres carrés linéaires (MCL) associés à une régularisation de Tikhonov (norme L_2) [10] a été utilisée :

$$\mathcal{Y}(t) = (\mathcal{H}^t \mathcal{H} + \mu D^t D)^{-1} \mathcal{H} \times T(t) \quad (6)$$

Où :

\mathcal{H} : Matrice de Toeplitz [11] de la réponse impulsionnelle de dimension $(t \times t)$. La réponse impulsionnelle est obtenue en réalisant une transformée de Laplace inverse sur $\hat{\mathbf{H}}$.

D : Matrice de dérivation de dimension $(t \times t)$.

μ : Coefficient de régularisation [12].

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous montrons les résultats obtenus en partant de mesures réalisées par la caméra IR jusqu'à l'estimation des pertes fer globales dans une tôle ferromagnétique. Pour ce faire, l'étude de faisabilité est effectuée sur une tôle ferromagnétique à grains orientés (GO). La méthodologie adoptée pour la caractérisation des tôles consiste à mesurer les champs de température et à les inverser pour 4 amplitudes d'induction B_{max}

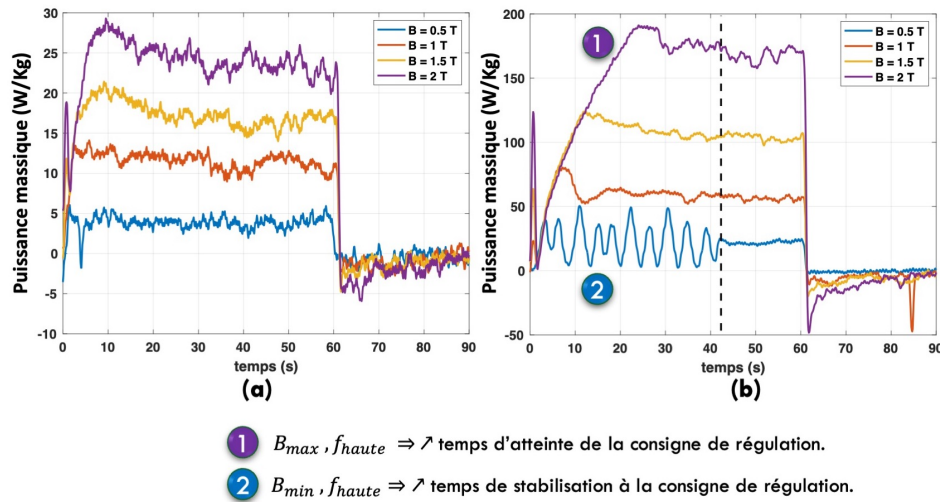


FIG. 5. Profil temporel de l'amplitude des sources de chaleur estimées : (a) cas des mesures obtenues à $f = 200$ Hz, et, (b) cas des mesures obtenues à $f = 600$ Hz.

(0.5, 1, 1.5, 2 T) ainsi que 9 fréquences d'excitation (50, 75, 100, 150, 200, 400, 600, 800, 1000 Hz). Cela représente un total de 36 acquisitions pour la caractérisation complète d'une tôle.

5.1. Mesures thermographiques obtenues

La figure 4 montre des exemples de champs de température mesurés par la caméra IR. Les figures 4.a et 4.b montrent respectivement les champs 2D de température mesurés à $t = 50$ s à différents niveaux d'induction et deux fréquences (200 et 600 Hz). Les figures 4.c et 4.d montrent quant à elles la moyenne spatiale des champs de température mesurés et tracés en fonction de la fréquence pour une amplitude d'induction $B_{max} = 1.5$ T (figures 4.c) et en fonction de l'induction (figures 4.d) pour une fréquence f de 200 Hz. On remarque de ce fait que le champ de température mesuré est uniforme sur la surface de la tôle et que son amplitude moyenne augmente avec l'évolution de la fréquence et du niveau d'induction. En effet, ceci est un résultat attendu vu que les pertes fer augmentent en fonction de l'induction et de la fréquence. Comme mentionné précédemment, 36 acquisitions ont été réalisées sur la tôle pour un temps d'acquisition d'environ une heure et demi, ainsi que, des données générées de l'ordre de 5 Go.

5.2. Amplitude moyenne des sources estimées

Les figures 5.a et 5.b montrent respectivement l'amplitude au cours du temps des pertes fer globales d'une tôle GO estimées à 200 Hz et 600 Hz. Ces pertes fer globales sont obtenues en appliquant la méthode inverse décrite précédemment (voir l'équation 6) sur la moyenne spatiale des champs de température mesurés. Les résultats de l'estimation obtenus sont en très bon accord avec les valeurs d'un acier électrique GO conventionnel annoncées par les constructeurs (de l'ordre du watt par kilogramme à 1.5 T, 50 Hz). Ce résultat valide la méthodologie présentée ici pour la mesure des pertes fer globales. Il est à noter que ces résultats ont été corroborés par d'autres validations sur d'autres tôles à grains non-orientés. L'avantage d'une telle méthode réside dans le fait qu'elle soit sans contact et nécessite peu de matériels. Néanmoins, elle présente quelques inconvénients qui sont : (i) peu de sensibilité aux fréquences basses

(petites variations de la température), (ii) durant les acquisitions à haute fréquence, le temps d'atteinte de la consigne en tension augmente à induction minimale et maximale, (iii) nécessité de changer de temps d'intégration de la caméra IR entre les acquisitions à basses et à hautes fréquences (utilisation du mode multi-TI).

La figure 6 montre l'amplitude des sources de chaleur (pertes fer) d'une tôle GO estimées en appliquant la méthode inverse sur l'ensemble des acquisitions réalisées par la caméra IR. Elle sont tracées en fonction des niveaux d'induction maximale à différentes fréquences (figures 6.a et 6.b), ainsi, qu'en fonction de la fréquence pour différents niveaux d'induction (figure 6.c). On peut observer sur ces figures l'augmentation classique des pertes fer avec la fréquence et l'induction. Cette augmentation nous fait penser au modèle de Pry et Bean [13] qui donne une représentation simple et analytique des pertes en fonction du carré de la fréquence et du carré d'induction (voir l'exemple donné dans la figure 7).

6. CONCLUSIONS

Un dispositif expérimental reposant sur l'intégration d'une caméra IR quantique permettant une caractérisation complète d'une tôle ferromagnétique a été développé. Ce montage permet après automatisation de mesurer des champs de températures sur des tôles ferromagnétiques sollicitées de manière cyclique. Ensuite, en moyennant spatialement ces champs de température et en s'appuyant sur des méthodes inverses thermiques, les pertes fer globales dissipées dans une tôle à grains orientés ont été estimées en fonction de l'induction maximale dans une large gamme de fréquence.

7. RÉFÉRENCES

- [1] C. Appino, F. Fiorillo, C. Ragusa, B. Xie, "Magnetic losses at very high flux densities in nonoriented Fe-Si alloys", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, pp. 2526–2529, Apr. 2008.
- [2] F. Fiorillo, *Measurement and Characterization of Magnetic Materials*, Elsevier-Academic Press, Amsterdam, 2004, p. 385.
- [3] P. Lagonotte, "Caractérisation du comportement magnétothermique d'aciers électriques", *RIGE* vol. 8 N° 2, pp.185-203, 2005.
- [4] Aouali, A., Chevalier, S., Sommier, A., Ayadi, M., Batsale, J. C., Balageas, D., Pradere, C. (2021). Ultra-broadband contactless imaging power meter.

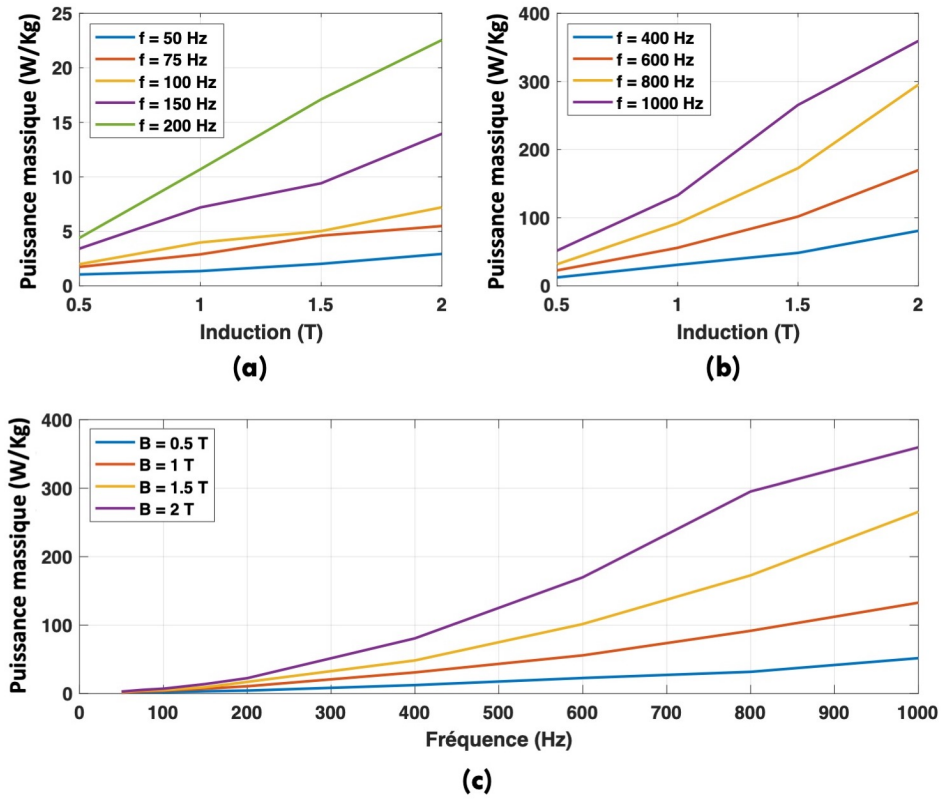


FIG. 6. Amplitude des sources de chaleur estimées : (a) et (b) en fonction des niveaux d'induction pour différentes fréquences, (c) en fonction de la fréquence pour différents niveaux d'induction.

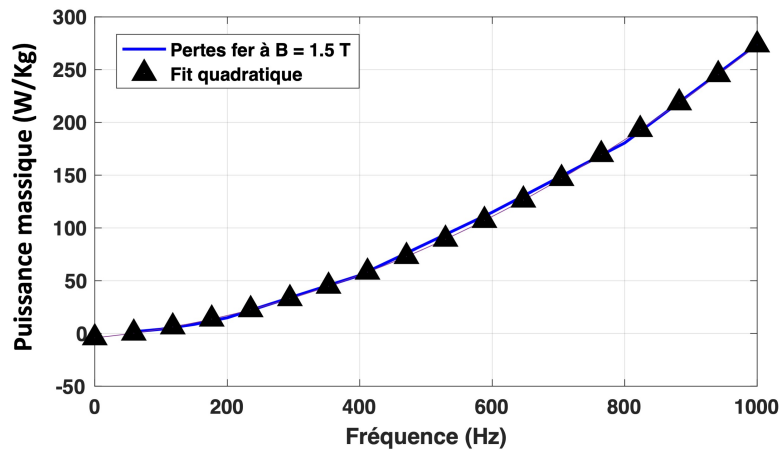


FIG. 7. Fonction quadratique estimée par minimisation au sens des MCL sur les pertes fer estimées à induction maximale $B_{max} = 1.5$ T.

- Applied optics, 60(26), 7995-8005.
- [5] Gaverina, L., et al. Pulsed flying spot with the logarithmic parabolas method for the estimation of in-plane thermal diffusivity fields on heterogeneous and anisotropic materials. *Journal of Applied Physics* 121, 115105 (2017).
 - [6] Badine, E., Bardoux, M., Abboud, N., Depriester, M., Longuemart, S., Herro, Z., Sahraoui, A. H. (2019). Thermoreflectance profile analysis and multiparameter 3D fitting model applied to the measurement of thermal parameters of thin film materials. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 52(20), 205303.
 - [7] Mailliet, D., Andre, S., Batsale, J. C., Degiovanni, A., Moyne, C. (2000). *Thermal quadrupoles : solving the heat equation through integral transforms*. John Wiley and Sons Incorporated.
 - [8] Toutain, J., Battaglia, J. L., Pradere, C., Pailhes, J., Kusiak, A., Aregba, W., Batsale, J. C. (2011). Numerical inversion of laplace transform for time resolved thermal characterization experiment. *Journal of Heat Transfer*, 133(4).
 - [9] White, F. M. (1988). *Heat and mass transfer*. Addison-Wesley.
 - [10] Tikhonov, A. N. (1963). On the solution of ill-posed problems and the method of regularization. In *Doklady akademii nauk* (Vol. 151, No. 3, pp. 501-504). Russian Academy of Sciences.
 - [11] Gray, R. M. (2006). Toeplitz and circulant matrices : A review. *Foundations and Trends® in Communications and Information Theory*, 2(3), 155-239.
 - [12] Hanke, M., Hansen, P. C. (1993). Regularization methods for large-scale problems. *Surv. Math. Ind.*, 3(4), 253-315.
 - [13] WAECKERLÉ, T. (2010). *Matériaux magnétiques doux cristallins-Magnétisme et métallurgie appliqués*.