

IDENTIFICATION DES PROPRIETES THERMO PHYSIQUES D'UN ACIER MAGNETIQUE PAR UNE TECHNIQUE INVERSE THERMIQUE

A.SAKLY*, A.JEMNI[■], P.LAGONOTTE[□], D.PETIT[□]

[■]Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Ibn El Jazzar, Monastir 5019, TUNISIE

[□]Laboratoire d'Etudes Thermiques, UMR-CNRS 6608, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, BP 109, 86960 Futuroscope, France

E-mail : ahlemsakly@yahoo.fr

RESUME

Afin d'assurer l'usage maîtrisé des machines électriques, la connaissance des propriétés thermo physiques des matériaux qui les constituent est primordiale. Parmi ces propriétés, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et le coefficient d'échange thermique avec l'environnement jouent un rôle important. On se propose dans ce travail de présenter une méthodologie de l'estimation des paramètres thermiques d'un échantillon d'acier magnétique. Cette étude porte sur le choix du modèle direct, l'étude de sensibilité et l'identification des propriétés thermiques inconnues.

NOMENCLATURE

e	Epaisseur de l'échantillon (m)	Indices	
h	Coefficient d'échange global ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	p	nombre de paramètres à estimer
J	Critère d'écart quadratique (K^2)	n	nombre de mesures temporelles
l	Largeur de l'échantillon (m)	r	nombre de mesures spatiales
L	Longueur de l'échantillon (m)	i	indice temporel
S	Puissance de chaleur volumique ($W.m^{-3}$)	j	indice spatial
T	Température (K)	k	indice des paramètres
X	Matrice de sensibilité	Lettres grecs	
Y	Température mesurée	β	Vecteur des paramètres
c_p	Chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	$\hat{\beta}$	Vecteur des paramètres estimés
		λ	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
		σ	Ecart-type d'une variable aléatoire x
		ρ	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)

1. INTRODUCTION

Afin d'étudier le phénomène de couplage magnéto thermique dans les matériaux, un système de caractérisation a été construit au LET. Ce dispositif a été conçu pour caractériser les aciers magnétiques. Il sera exploité pour valider les calculs d'échauffement et étudier les phénomènes de couplage thermomagnétique dans les aciers.

Cette étude porte sur la caractérisation thermique d'un échantillon de tôle d'acier magnétique. Une analyse numérique inverse a été réalisée dans le but de montrer la faisabilité de l'identification des propriétés thermiques de la tôle.

2. DESCRIPTION DU MONTAGE EXPERIMENTAL DE CARACTERISATION

La réalisation du montage expérimental impose que l'échantillon étudié soit facilement visible au premier plan pour être accessible à la caméra infrarouge. Un circuit magnétique, un circuit électrique et un circuit thermo hydraulique ont été installés de telle façon qu'ils ne gênent pas l'accessibilité à la tôle (figure 1).

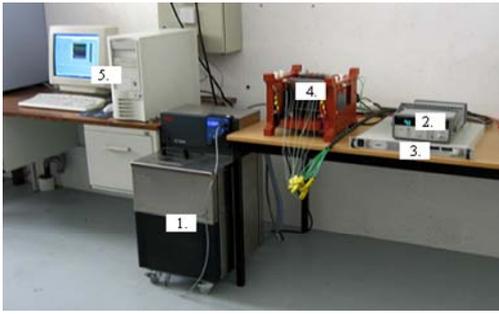


Figure 1. Dispositif expérimental

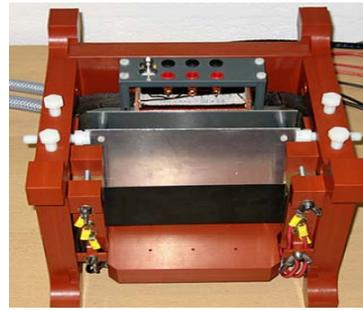


Figure 2. Banc d'essai

Pour cet usage, un support usiné en Nylon (Ertalon 4,6), qui peut supporter en continu des températures jusqu'à 150°C, a été réalisé. Ce système de caractérisation permettra d'imposer des contraintes magnétiques et thermiques contrôlées sur l'échantillon étudié. Ceci impose une structure de cadre, une bande avec une culasse de retour supportant l'enroulement d'excitation. Le rayonnement dû au système d'excitation est bloqué par deux plaques de dural refroidies par un effet de cheminée (figure 2).

Les conditions limites thermiques sont imposées aux deux extrémités de la tôle par deux pinces en cuivre, refroidies par un circuit fluide raccordé à un cryostat. Ces refroidisseurs permettent également l'injection d'un courant continu pour effectuer le chauffage par effet joule de l'échantillon. Cette opération est utilisée pour déterminer de façon précise la dissipation dans la tôle, en vue d'identifier les paramètres thermiques de l'échantillon.

3. ETUDE NUMERIQUE

3.1 Problème direct

Pour l'étude de dimensionnement, nous avons considéré un échantillon de tôle d'acier magnétique de section uniforme. Pour limiter la zone d'étude thermique à l'échantillon, on a choisi des conditions de type Dirichlet, avec des températures imposées sur les extrémités de la tôle (figure 3).

L'échantillon considéré échange de la chaleur avec le milieu ambiant moyennant un coefficient d'échange thermique global tenant compte à la fois de la convection et du rayonnement. Ce coefficient d'échange est supposé constant sur toutes les faces de l'échantillon. La plaque est le siège d'une source de chaleur volumique homogène. Cette puissance est produite par effet joule à l'aide du circuit électrique.

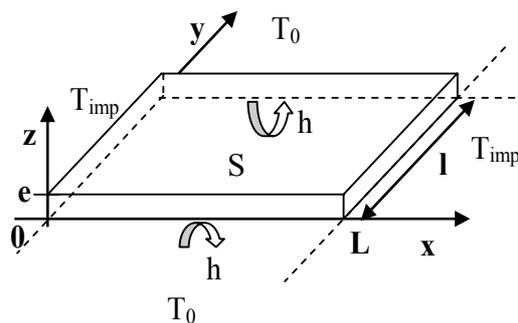


Figure 3. Description de l'échantillon

3.1.1 Equation de transfert de chaleur

L'équation générale de transfert de chaleur au sein du matériau se traduit par l'équation suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}) + S - \frac{2h}{e}(T - T_0) \quad (1)$$

On suppose que l'échantillon est homogène et isotrope, et que les caractéristiques thermiques ne dépendent pas de la température.

3.1.2 Condition initiale et conditions aux limites

Initialement, on suppose que l'échantillon est à une température constante qui n'est autre que la température extérieure T_0 :

$$T(0, x, y) = T_0 \quad (2)$$

Les conditions aux limites en $y = 0$ et $y = 1$ sont des conditions mixtes, la densité de flux s'écrit :

$$\varphi = h(T - T_0) \quad (3)$$

Le système d'équations présenté ci dessus (Eq.1, 2, 3) est résolu numériquement en utilisant la méthode des volumes finis à base d'éléments finis [1]. Le principe de base de la MVCEF consiste à discrétiser le domaine de calcul en volumes finis construits sur la trame d'un maillage en éléments finis triangulaires. Cette méthode possède ainsi plusieurs avantages. D'une part, elle utilise une formulation conservatrice, ce qui permet une interprétation facile des grandeurs sous forme de flux, sources, puits, etc. D'autre part, grâce à l'utilisation d'un maillage en éléments finis, elle permet une très grande flexibilité dans le type de géométrie considéré. Ceci permettra par la suite de traiter des géométries plus complexes que la plaque rectangulaire.

3.2 Problème inverse

Pour le problème inverse considéré dans cette étude, la conductivité thermique, la chaleur volumique et le coefficient global de transfert de chaleur sont supposés inconnus.

L'estimation se base sur la minimisation d'un critère d'écart quadratique J entre les mesures expérimentales et les résultats du modèle direct.

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r (T^j(t_i, \beta) - Y^j_i)^2 \quad (4)$$

T^j et Y^j sont respectivement les températures calculées et mesurées à l'instant t_i , à la position du nœud j .

Différents types d'algorithmes de minimisation ont été utilisés. Parmi ces méthodes, la méthode de Newton [2], la méthode du gradient conjugué [3], la méthode de Levenberg-Marquard [4],...etc.

Chacun de ces algorithmes a ses avantages et ses domaines d'application. L'algorithme de Levenberg-Marquard s'est avéré très efficace car il regroupe les avantages de la méthode de Gauss-Newton et celles du gradient et donc il présente un compromis entre ces deux dernières. D'où le choix de l'utilisation de cet algorithme de minimisation.

La méthode de Levenberg-Marquard [5] est basée sur l'expression itérative suivante :

$$\beta^{k+1} = \beta^k + \Delta\beta^k \quad (5)$$

Où $\Delta\beta^k$ est l'incrément du vecteur des paramètres inconnus pour l'itération k , il est donné par l'équation suivant :

$$\Delta\beta^k = \left[(X^k)^T X^k + \mu^k \Omega^k \right]^{-1} (X^k)^T [Y - T(\beta^k)] \quad (6)$$

X^k est la matrice de sensibilité, μ^k est un scalaire positif et Ω^k est une matrice diagonale, relatifs à l'itération k . Dans notre cas, on a considéré que les éléments de cette matrice sont égaux aux éléments diagonaux de $\left[(X^k)^T X^k \right]$.

3.3 Etude de sensibilité

L'étude de sensibilité est une étape importante dans la méthodologie. Elle permet de définir le

domaine dans lequel une variation de chacun des paramètres, indépendamment les uns des autres, génère une évolution sensible et mesurable de la réponse du système.

Suivant cet objectif, les coefficients de sensibilités réduits dont les unités sont identiques à celles de la température, sont calculés en utilisant les approximations usuelles pour les dérivées premières [7]. Le coefficient de sensibilité de mesure i pour le capteur j au paramètre β^k est calculé comme suit :

$$\bar{X}^j_{i,k} = \beta^k \frac{T^j_i(\beta^k + \partial\beta^k) - T^j_i(\beta^k)}{\partial\beta^k} \quad (7)$$

Où $\partial\beta^k = 10^{-3} \times \beta^k$ et $k = 1, \dots, p$.

Des paramètres peuvent être estimés simultanément, lorsqu'ils sont dé-corrélés, donc leurs coefficients de sensibilités ne sont pas proportionnels.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans notre étude, on a considéré un échantillon d'acier magnétique (alliage de Fe-Si) de section rectangulaire uniforme. On a considéré les propriétés thermiques de l'acier doux, relevés dans la littérature ($\lambda=45,0 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho C_p = 35,7374 \times 10^5 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$). La longueur, la largeur et l'épaisseur de la plaque sont respectivement 175 mm, 75 mm et 0,65 mm. Le coefficient d'échange global avec le milieu ambiant utilisé dans les simulations est $h = 8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. La température initiale du milieu est $T_0 = 296,3 \text{ K}$. Une puissance de chaleur homogène $S = 2,76923 \times 10^5 \text{ W.m}^{-3}$ est injectée au sein de la plaque.

4.1 Conception optimale

Pour l'étude de sensibilité et l'estimation du vecteur des paramètres inconnus, on a adopté la position du nœud r_1 donnée par $x = 85,25 \text{ mm}$ et $y = 36,28 \text{ mm}$.

La figure 4 montre l'évolution des sensibilités réduites de la température mesurées par rapport aux différentes composantes du vecteur β . Pour éviter le problème de la différence de l'ordre des grandeurs des paramètres, la chaleur volumique est multipliée par le coefficient 10^{-5} .

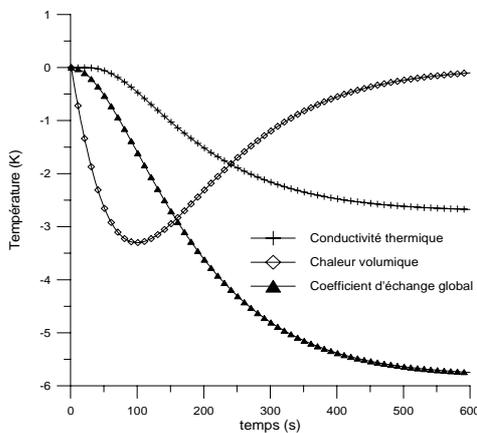


Figure 4. Sensibilités réduites

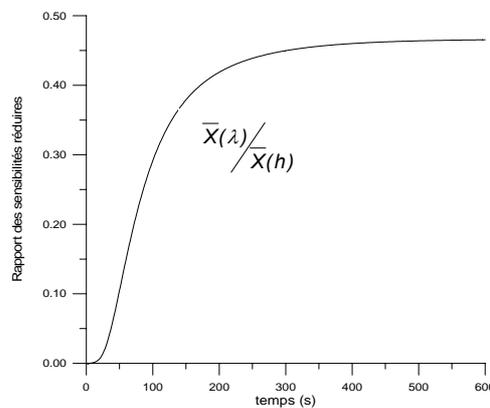


Figure 5. Rapport des Sensibilités réduites

Nous remarquons que la conductivité thermique et le coefficient d'échange convectif sont dé-corrélés au début du thermo gramme, mais deviennent corrélés à partir de $t=240 \text{ s}$. Cela est clairement confirmé par le rapport des sensibilités qui devient constant à partir de ce temps (Figure 5).

Donc, l'identification simultanée des trois paramètres (λ , ρC_p , h) est possible dans l'intervalle du temps considéré (entre 0 et 240s).

L'identification peut être, dans un premier temps, complètement simulée pour vérifier la faisabilité de l'estimation des paramètres. La température $Y_{\text{simulée}}$ est simulée en ajoutant un terme de bruit ($\omega\sigma$)

au modèle calculé :

$$Y_{\text{simulée}} = T_{\text{exacte}} + \omega\sigma \quad \text{où} \quad -2,576 \leq \omega \leq 2,576 \quad (8)$$

Pour quantifier la précision de la méthode d'estimation des paramètres, nous utilisons l'erreur RMS [6] qui représente l'écart moyen entre les paramètres estimés et les paramètres souhaités. Cette erreur est donnée par l'équation suivante :

$$e_{\text{RMS}} = \left[\frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left(\frac{\hat{\beta}_k - \beta_k}{\hat{\beta}_k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

Dans l'objectif de concevoir une expérience optimale et d'améliorer la qualité de l'identification en présence de bruit de mesure [5], on a étudié l'influence de nombre de mesures spatiales sur la matrice du pseudo-Hessien $X^T X$ (figure 6).

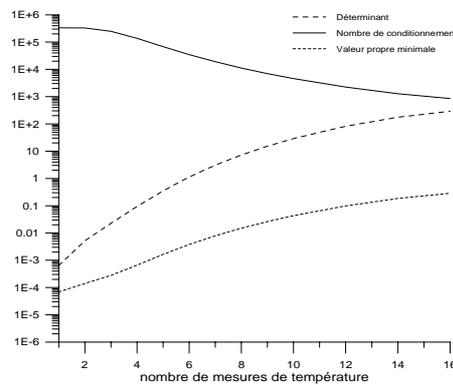


Figure 6. Influence du nombre de mesures sur la matrice $X^T X$

On constate que le déterminant et la valeur propre minimale croient en augmentant le nombre de mesures de températures. Le nombre de conditionnement devient faible pour un nombre de capteurs élevé. Donc la qualité de l'inversion et l'estimation de paramètres inconnus est améliorée en utilisant plusieurs mesures de températures.

Les tableaux 1 et 2 présentent les résultats de l'identification en utilisant respectivement une seule puis plusieurs mesures de température. L'identification est réalisée initialement sans bruit, ensuite en introduisant un bruit de mesure pour différentes valeurs d'écart-type.

Table 1. Résultats de l'identification en utilisant une mesure de température en r_1

	Valeurs initiales	$\sigma = 0$ K	$\sigma = 0,05$ K	$\sigma = 0,1$ K	Valeurs souhaitées
λ	65,0	44,999	46,471	50,731	45,00
$(\rho C_p) \times 10^{-5}$	20,0	35,7374	36,014	36,437	35,7374
h	12,0	8,000	7,810	7,402	8,0
Nombre d'itérations		3	2	3	
Ecart quadratique J		$8,7 \times 10^{-20}$	0,576	2,313	
e_{RMS} (%)		$1,2 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-2}$	

Table 2. Résultats de l'identification en utilisant 12 mesures de température

	Valeurs initiales	$\sigma = 0$ K	$\sigma = 0,05$ K	$\sigma = 0,1$ K	Valeurs souhaitées
λ	65,0	45,00	45,073	45,146	45,00
$(\rho C_p) \times 10^{-5}$	20,0	35,7374	35,906	36,077	35,7374
h	12,0	8,0001	7,958	7,917	8,0
Nombre d'itérations		6	5	4	
Ecart quadratique J		$4,7 \times 10^{-18}$	6,955	27,821	
e_{RMS} (%)		$7,2 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$8,1 \times 10^{-3}$	

Nous constatons, qu'en introduisant plusieurs mesures de température, les trois paramètres sont identifiés avec une bonne précision. En utilisant des températures bruitées, le critère d'écart J devient plus important mais reste "compatible" au bruit de mesure. En effet :

$$J \approx r \cdot n \cdot \sigma^2 \quad (10)$$

4.2 Identification expérimentale

Les paramètres thermiques effectifs de l'échantillon, estimés en utilisant les mesures expérimentales données par la caméra infrarouge sont regroupés dans le tableau 3. Ces valeurs sont conformes à l'ordre de grandeurs des paramètres thermo physiques de l'acier (Fe-Si) fournis par la littérature [8] ($\lambda = 42 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\rho = 7900 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 490 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Table 3. Résultats de l'identification en utilisant les thermo grammes infrarouge

	Valeurs initiales	Valeurs estimées	Nombre d'itérations	Critère d'écart J
λ	65,0	40,9	5	2,54
$(\rho C_p) \times 10^{-5}$	20,0	38,34		
h	7,0	10,2		

La figure 7 montre un bon accord entre les mesures de température relevées à la position r_1 et r_{12} par la caméra infrarouge et les températures calculées en utilisant les paramètres thermiques estimés de l'échantillon ($\lambda = 40,9 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\rho C_p = 38,34 \times 10^5 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ et $h = 10,2 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

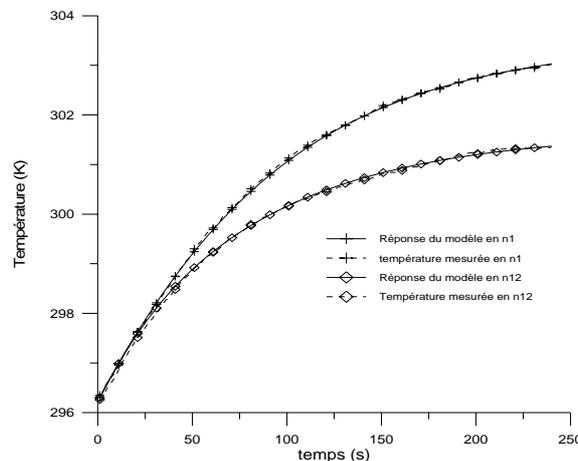


Figure 7. Températures mesurées et calculées aux positions r_1 et r_{12}

5. CONCLUSION

Dans le présent travail, nous avons mis au point une technique d'inversion permettant d'identifier simultanément les propriétés thermiques d'un acier magnétique. La finalité de cette étude est la caractérisation thermique des matériaux magnétiques à l'aide du dispositif expérimental conçu et réalisé.

Pour cela, un modèle numérique décrivant le fonctionnement de l'expérience a été développé et validé.

L'utilisation de plusieurs mesures de températures permet d'améliorer la précision des paramètres identifiés. Cela impose l'utilisation d'une caméra infrarouge, qui permettra d'avoir plusieurs mesures au sein de la tôle et permet de diminuer les erreurs dus aux bruits de mesure. Les résultats ainsi obtenus sont en bon accord avec les valeurs des paramètres thermiques relatives à l'acier doux rencontrées dans la littérature.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A. Boughammoura, 2003, Contribution à l'étude de l'écoulement et du transfert de chaleur induits par le déplacement d'un piston dans un cylindre présentant un changement brusque de section, *Thèse de doctorat*, université de Monastir.

2. E. Artioukhine, Méthodes d'optimisation et problèmes inverses, 1999, *Méetrologie thermique et techniques inverses*, Presses universitaires de Perpignan, Metti.
3. M.J. Colaço, H.R.B. Orlande, 1999, Comparison of different versions of the conjugate gradient method of function estimation, *Numerical of Heat Transfer, Part A*, 36:pp. 229-249.
4. D.W. Marquardt, 1963, An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters, *Journal of Social Industrial Applied Mathematic*, vol.n°11:pp. 431-441.
5. Znaidia S. et al, 2005, Inverse problem in a porous medium, estimation of the thermal properties, *Inverse problems in Science and Engineering*, vol.n°13:pp. 581-593.
6. F. Mzali, 2005, Contribution à la détermination des propriétés thermo-physiques des matériaux, *thèse de Doctorat*, Université de Monastir.
7. F. Mzali, L. Sassi, A. Jemni, S. Ben Nasrallah, D. Petit, 2004, Parameter estimation of orthotropic solids with uncertainty in the sensor position: use of Levenberg-Marquardt and conjugate gradient methods", *High Temperatures-High Pressures*, vol.n°:35/36. pp. 281-288.
8. J.Bavay, J.Verdun, "Alliages Fer-Silicium", *Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique, D2 110 (pages 1-44)*.