



HAL
open science

Modélisation d'un dispositif de chauffage par induction avec et sans prise en compte du couplage magnétothermique

Yazid Statra, Abdelhalim Zaoui, Hocine Menana, Bruno Douine

► **To cite this version:**

Yazid Statra, Abdelhalim Zaoui, Hocine Menana, Bruno Douine. Modélisation d'un dispositif de chauffage par induction avec et sans prise en compte du couplage magnétothermique. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02983329

HAL Id: hal-02983329

<https://hal.science/hal-02983329>

Submitted on 29 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.

Modélisation d'un dispositif de chauffage par induction avec et sans prise en compte du couplage magnétothermique

Yazid STATRA^{1,2}, Abdelhalim ZAOUÏ¹, Hocine MENANA², Bruno DOUINE²

¹Laboratoire de systèmes électromagnétiques, EMP, Alger, Algérie

²Université de Lorraine, Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy, France

RESUME - Le chauffage par induction fait intervenir les deux phénomènes électromagnétique et thermique. La modélisation de ce problème est basée sur un couplage des équations de Maxwell à l'équation de la chaleur. Dans ce travail, un modèle 2D axisymétrique est développé et implémenté dans le logiciel de modélisation numérique COMSOL afin d'illustrer l'effet de la variation des propriétés électromagnétiques du matériau sur l'évolution de la température au cours du processus de chauffage. Pour cela, les équations électromagnétique et thermique sont résolues avec et sans prise en compte des variations des propriétés physiques de la pièce à chauffer. Les résultats obtenus illustrent de manière quantitative l'influence de la variation des propriétés électromagnétiques sur les distributions de la température et des grandeurs électromagnétiques ainsi que leurs évolutions dans le temps.

Mots-clés— Chauffage par induction, Modélisation 2D axisymétrique, influence de la variation des propriétés physiques.

1. INTRODUCTION

Le chauffage par induction est basé sur le principe de l'induction électromagnétique qui permet de générer la chaleur directement à l'intérieur du matériau à chauffer. Cette particularité présente plusieurs avantages tels que la réduction des temps de chauffe et des rendements élevés, ou encore la possibilité de chauffer de façon très sélective [1-3]. Malgré ces avantages, la maîtrise de ce type de chauffage nécessite une parfaite connaissance de la répartition et de l'évolution des grandeurs électromagnétiques et thermiques au cours du processus, et, pour cela, l'étape de modélisation est incontournable.

La modélisation des systèmes de chauffage par induction est une étape complexe en raison de l'interdépendance entre les différents paramètres, ce qui rend le comportement global de ce processus difficile à saisir [4-5]. Dans ce contexte, un modèle 2D axisymétrique basé sur un couplage des équations électromagnétiques et thermiques a été développé et implémenté dans le logiciel COMSOL. Des simulations ont été conduites à travers un exemple de calcul afin d'illustrer l'effet du comportement non linéaire des propriétés électromagnétique sur la répartition des grandeurs électromagnétiques et de la température dans la pièce à chauffer.

La formulation du problème est présentée dans la section suivante, suivie d'un exemple numérique dans la dernière section.

2. FORMULATION DU PROBLEME

Le dispositif électromagnétique de notre étude étant pourvu d'une symétrie de révolution, l'étude a pu être conduite dans le plan r-z comme représenté sur la figure 1.

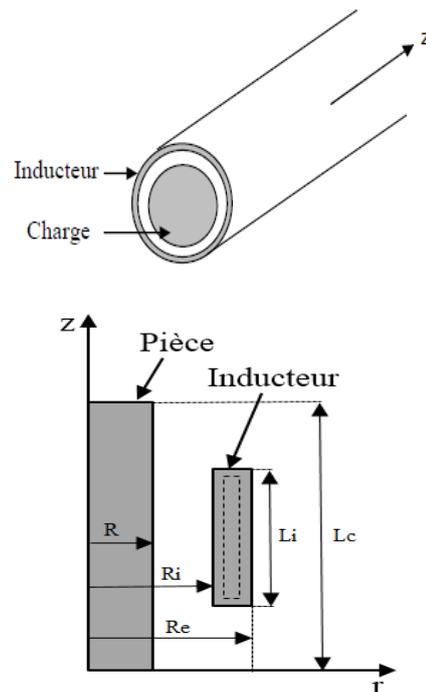


Fig. 1. Système modélisé et sa représentation 2D axisymétrique

Le problème électromagnétique est formulé dans le domaine magnétodynamique décrit par l'équation 1 en fonction du potentiel vecteur magnétique (A), impliquant les propriétés électromagnétiques du système (conductivité électrique σ et perméabilité magnétique μ). Le problème thermique est modélisé par l'équation de diffusion de la chaleur (Eq.2) impliquant la température T , la masse volumique ρ et les propriétés thermiques (conductivité thermique λ et chaleur spécifique C_p) du système, ainsi que la densité de puissance dissipée par effet Joule évaluée par la relation 3 où ω représente la fréquence des courants d'alimentation [6].

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\left(\frac{1}{\mu r} \right) \frac{\partial r A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{1}{\mu r} \right) \frac{\partial r A}{\partial z} \right) - \left(\frac{\sigma}{r} \right) \frac{\partial r A}{\partial t} = -J_s \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = P + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{2} \sigma \omega^2 A A^* \quad (3)$$

Les variations des propriétés physiques avec la température sont prises en compte selon les relations suivantes [6-7] :

$$\sigma(T) = \frac{1}{\rho_{T_{ref}} [1 + \delta(T - T_{ref})]} \quad (4)$$

$$\mu_r(T) = \mu_{r0} \left(1 - e^{-\frac{T - T_c}{c}} \right) \quad \text{Si } T < T_c \quad (5)$$

3. EXEMPLE NUMERIQUE

Les spécifications du système modélisé sont données dans le Tableau 1. Le conducteur de la bobine en cuivre est refroidi par un flux d'eau dans un canal de refroidissement interne à une température T_e (Fig.1 : région en pointillée).

Tableau 1. Spécifications et paramètres du système.

Système	Spécifications
Pièce (charge)	R=15 mm ; Lc=200 mm
Bobine (inducteur)	Ri=30 mm ; Re=40 mm ; Li=100 mm
Canal d'eau	$T_e=10^\circ\text{C}$; $R_{i\text{-canal}}=R_i + 2 \text{ mm}$; $R_{e\text{-canal}}=R_e - 2 \text{ mm}$; $L_{\text{canal}}=L_i - 4 \text{ mm}$
Alimentation	f=1000Hz; NI=2000A
Propriétés physiques de la charge	$\rho_{T_{ref}} = 1,754.10^{-8} \Omega\text{m}$; $\delta = 0.0065 \text{ K}^{-1}$ $\mu_0 = 4\pi.10^{-7} \text{ H/m}$; $\mu_{r0} = 4000$; $T_c = 770^\circ\text{C}$; $C = 150^\circ\text{C}^{-1}$; $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$
	$\lambda = 76.2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $C_p = 440 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ $\rho = 78.7 \text{ Kg.m}^{-3}$

Les résultats de simulation en couplant les équations (1), (2) et (3) sont présentés pour les deux cas suivants :

Cas linéaire (a) : les propriétés physiques de la pièce n'évoluent pas avec la température.

Cas non linéaire (b) : les variations de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique sont prises en compte selon les équations (4) et (5).

La figure 3 donne l'évolution de la température en fonction du temps à la surface de la pièce pour le cas linéaire (a) et non linéaire (b). On remarque que la température dans le cas non linéaire est supérieure à celle du cas linéaire dans l'intervalle de temps [0-t₀], jusqu'à une certaine température (T≈650K). La diminution de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique dans le cas non linéaire affecte à la fois la densité de puissance et la profondeur de pénétration des courants induits dans la pièce. Si la densité des courants induits est plus réduite, la vitesse de diffusion du champ électromagnétique est plus importante, ce qui conduit à une pénétration plus profonde du champ électromagnétique dans la pièce.

Avec l'augmentation de la température, la pièce devient amagnétique ($\mu \rightarrow \mu_0$) et la conductivité électrique chute de manière dramatique, ce qui se traduit par une forte diminution de la densité de puissance dissipée dans le cas non linéaire. La diminution de la densité de puissance provoque une saturation

rapide de la température dans la pièce à partir de t=300s. Pour augmenter la température de la pièce, il est nécessaire de modifier les caractéristiques de la source d'alimentation, notamment l'augmentation de la fréquence. Dans le cas linéaire, la température continue à augmenter. On remarque cependant une variation de la pente de l'évolution de la température qui est due à l'échange thermique avec l'environnement, qui dépend de la diffusivité thermique dans la pièce. Les figures 4 et 5 représentent les répartitions du potentiel vecteur magnétique et de la température dans la pièce conductrice à t=600s (régime établi pour le cas non linéaire).

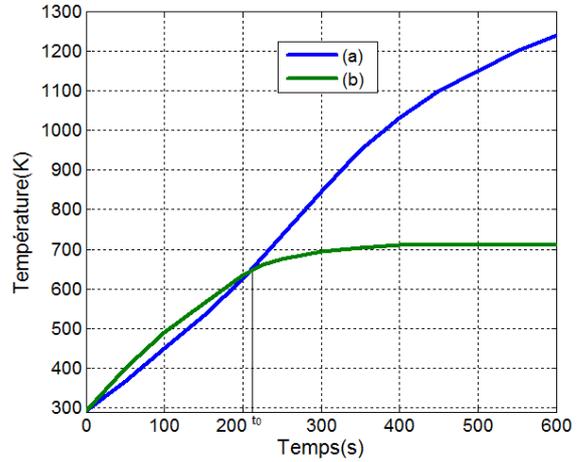


Fig.3. Evolution de la température en fonction du temps à la surface de la Pièce

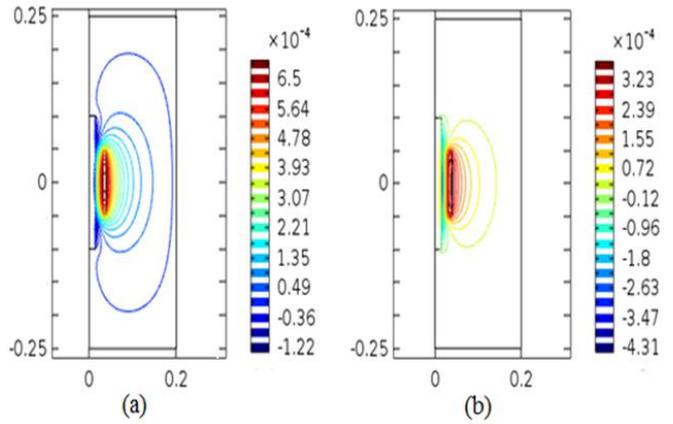


Fig.4. Contour du potentiel vecteur magnétique A(Wb/m) (à t=600s), pour (a) le cas linéaire et (b) le cas non linéaire

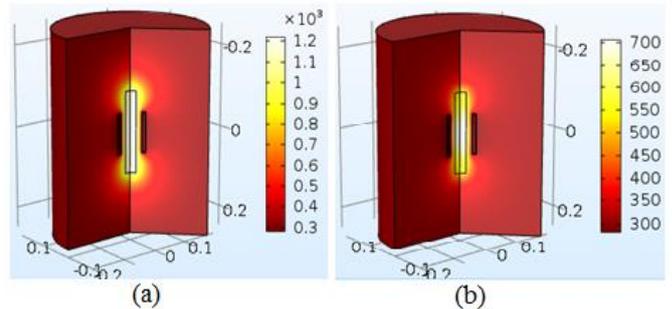


Fig.5. Répartition de la température en (K) dans la pièce à t=600s, pour (a) le cas linéaire et (b) le cas non linéaire

4. CONCLUSIONS

Ce travail constitue une contribution à l'évaluation numérique des grandeurs électromagnétiques et thermiques, ainsi qu'à l'interprétation des phénomènes physiques intervenants dans un processus de chauffage par induction. En effet, malgré ses nombreux avantages, la maîtrise de ce type de chauffage nécessite une parfaite connaissance de la répartition spatiale et de l'évolution temporelle des grandeurs électromagnétiques et thermiques au cours du processus.

5. REFERENCES

- [1] G.Develey, « Chauffage par induction électromagnétique: principes », Énergies|Réseaux électriques et applications, Techniques de l'ingénieur, réf.D5935 v1, 10 février 2000.
- [2] G.Develey, « Chauffage par induction électromagnétique: technologie », Énergies|Réseaux électriques et applications, Techniques de l'ingénieur, réf.D5936 v1, 10 août 2000.
- [3] O. Lucía, P. Maussion, E. J. Dede and J. M. Burdío, « Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2509-2520, May 2014.
- [4] I. Smolyanov, V. Frizen, K. Bolotin and B. Ulrych, « Research of the induction heating installation on based autoclave », 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Kutna Hora, pp. 1-4, 2017.
- [5] M.Féliachi, G.Develey, « Magneto-thermal behavior finite element analysis for ferromagnetic materials in induction heating devices », IEEE Transactions on Magnetics, vol.27, p.5235–5237, 1991.
- [6] A.Kanssab, A.Zaoui, M.Féliachi, « Modeling and optimization of induction cooking by the use of magneto-thermal finite element analysis and genetic algorithms », Frontiers of Electrical and Electronic Engineering, vol.7, p.312–317, September 2012.
- [7] F. Allaoui et al., « Modelling and Optimization of Induction Cooking by the Use of Magneto-Thermal Finite Element Analysis and Neural Network », Materials Science Forum, vol.792, p.251-259, 2014.