REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET

POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

MEMOIRE de fin d'étude de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : GENIE CLIMATIQUE

Thème

Etude Et Simulation D'un Dispositif De Chauffage Par Induction Avec Comsol Multiphysics

Proposé et dirigé par

Dr. KEHILECHE Brahim
Dr. CHIBA Younes

Présenté par

YOUS Azzeddine

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier « Dieu » le tout puissant.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon Co-Encadreur CHIBA Younes, Enseignant-Chercheur à Université de Médéa pour m'avoir fait l'honneur de diriger mon sujet de recherche et pour ses recommandations qui ont significativement contribué à l'avancement de mes travaux.

Je tiens aussi à remercier mon Encadreur Monsieur KEHILECHE Brahim, Enseignant-Chercheur à Académie militaire de Cherchell pour sa disponibilité, ses suggestions et l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

Que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation reçoivent ma gratitude et en particulier ceux du département génie climatique de l'université de Médéa.

J'aimerais à présent remercier mes proches et en premier lieu maman et mes sœurs Radia et Fathia de m'avoir soutenu et d'avoir cru en moi. Je remercie aussi mon frères Mohamed, et tous mes sœurs et mes frères.

Sans oublier d'exprimer mes remerciements à tous mes amis, et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

À l'esprit pure de mon père, à ma précieuse mère, à qui je souhaite sa longévité et sa bonne santé.

A toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers.

ETUDE ET SIMULATION D'UN DISPOSITIF DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION AVEC COMSOL MULTIPHYSICS

YOUS Azzeddine

ملخص

تهدف المعالجات الحرارية في الكتلة إلى تحسين الخصائص الميكانيكية للفولاذ ولكنها تؤدي أيضًا إلى تقليل صلابتها .في هذه الحالات، من الأفضل معالجة سطح القطعة فقط، بحيث يحتفظ قلبها، ذو القوة المتوسطة، بالمتانة الجيدة. يتكون العلاج بالحث الكهرومغناطيسي من تسخين مكون ميكانيكي محليًا، تحت تأثير جول الناجم عن التيارات المستحثة، والتي تم إنشاؤها بواسطة مجال مغناطيسي.

يشمل التسخين التعريفي كلاً من الظواهر الكهرومغناطيسية والحرارية. في هذا العمل، تم تطوير وتنفيذ نموذج رقمي ثنائي الأبعاد في برنامج كومسول متعدد الفيزياء لتوضيح تأثير تباين الخواص الكهرومغناطيسية للمادة على تطور درجة الحرارة أثناء عملية التسخين. نتائج محاكاة نموذج التسخين التعريفي للتيار المغناطيسي $\mathcal{B} = 2\mathcal{T}$ والتردد $f = 300\mathcal{H}z$ أعطت نتائج جيدة لوقت محاكاة تم ضبطه عند 350 ثانية. أقصى درجة حرارة تم الوصول إليها هي 340 درجة مئوية.

الكلمات المفتاحية: التسخين التعريفي، المجال الكهرومغناطيسي، المحاكاة، تعدد الفيزياء كومسول.

ETUDE ET SIMULATION D'UN DISPOSITIF DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION AVEC COMSOL MULTIPHYSICS

YOUS Azzeddine

RESUME

Les traitements thermiques dans la masse ont pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques des aciers mais ils entrainent aussi la diminution de leur ténacité. Dans ces cas, il est donc préférable de ne traiter que la surface de la pièce, afin que son cœur, de résistance moyenne, conserve une bonne ténacité. Le traitement par induction électromagnétique consiste à chauffer localement une composante mécanique, sous l'effet Joule provoqué par les courants induits, créés eux-mêmes par un champ magnétique.

Le chauffage par induction fait intervenir les deux phénomènes électromagnétique et thermique. Dans ce travail, un modèle numérique 2D est développé et implémenté dans le logiciel COMSOL multiphysics 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. Les résultats de la simulation du modèle de chauffage par induction pour le flux magnétique B=2T et la fréquence f=300Hz, donne de bons résultats pour un temps de simulation qui a été fixé à 350s. La température maximale atteinte est de 340 °C.

Mots clés : Chauffage par induction, champ électromagnétique, simulation, COMSOL multiphysics.

STUDY AND SIMULATION OF AN INDUCTION HEATING DEVICE WITH COMSOL MULTIPHYSICS

YOUS Azzeddine

ABSTRACT

Heat treatments in the mass aim to improve the mechanical properties of steels but they also lead to a reduction in their toughness. In these cases, it is therefore preferable to treat only the surface of the piece, so that its core, of medium strength, retains good toughness. Electromagnetic induction treatment consists of locally heating a mechanical component, under the Joule effect caused by induced currents, themselves created by a magnetic field.

Induction heating involves both electromagnetic and thermal phenomena. In this work, a 2D digital model is developed and implemented in the COMSOL multiphysics software to illustrate the effect of variation in the electromagnetic properties of the material on temperature evolution during the heating process. The results of the simulation of the induction heating model for the magnetic flux B=2T and the frequency f=300Hz gave good results for a simulation time which was set at 350s. The maximum temperature reached is 340°C.

Keywords: Induction heating, electromagnetic field, simulation, COMSOL multiphysics

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : PRINCIPE DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION 3

I.1 Introduction 3

I.2 Histoire de l'induction magnétique 4

I.3 Le principe du chauffage par induction 5

I.4 Les applications industrielles 6

I.5 Les caractéristiques électriques du chauffage par induction 8

I.5.1 L'effet de peau 8

I.5.2 Perméabilité magnétique 10

I.6 Description d'une installation de chauffage par induction 11

I.7 Conclusion 13

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE 14

II.1 Introduction 14

II.2 Les équations générales de la magnétodynamique 15

II.3 Transfert de chaleur 19

II.3.1 Transfert de la chaleur par conduction 19

II.3.2 Transfert de la chaleur par convection 20

II.3.3 Transfert de la chaleur par rayonnement 21

II.3.4 Capacité calorifique : 22

II.4 Couplage électromagnétique-thermique 22

II.5 Formulation du problème 23

II.6 Conclusion 24

CHAPITRE III : SIMULATION 14

III.1 Introduction 25

III.2 Présentation de COMSOL Multiphysics 26

III.2.1 Introduction à COMSOL Multiphysics 26

III.2.2 COMSOL Multiphysics est nécessaire pour exécuter l'un des produits add-on. 26

III.2.3 Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics 27

III.2.4 PRINCIPE D'UTILISATION 27

III.3 Propriétés électromagnétiques et thermiques du matériau de la pièce 28

III.4 Résultats Des Simulations 30

III.5 Conclusion 37

CONCLUSION GENERALE 38

Bibliographie 39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1 profondeurs de pénétration δ 11

Tableau 2 distinguer les plages de fréquences 12

Tableau 3 genres de chauffage 12

Tableau 4 Propriétés électromagnétiques et thermiques de l'acier en fonction de la température 29

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Schéma simplifié du dispositif expérimental utilisé par Faraday 4

Figure 2 Schéma de principe du procédé de chauffage par induction..... 6

Figure 3 Répartition de la densité de courant depuis la surface 10

Figure 4 Schéma général d'une installation de chauffage par induction [1]..... 11

Figure 5 Diagramme des étapes de conception avec COMSOL Multiphysics 28

Figure 6 Modèle chauffage par induction dans COMSOL Multiphysics 30

Figure 7 Équation de l'électromagnétisme utilisé dans COMSOL 30

Figure 8 Maillage 31

Figure 9 Variation de la température de la pièce après 350 s de chauffage pour B=2T et f=300 Hz 32

Figure 10 Distribution du vecteur de courant induit dans le matériau utilisé. 32

Figure 11 Température de surface de la pièce pendant le processus de chauffage pour B=2T et f=300 Hz..... 33

Figure 12 Contour du flux magnétique (Wb) à B=1T..... 34

Figure 13 Contour du flux magnétique (Wb) à B=2T..... 34

Figure 14 Résultat de l'analyse électromagnétique de la densité de courant induit (unité : $A.m^{-2}$) B=2T et a f=1 KHz 35

Figure 15 Résultat de l'analyse électromagnétique de la densité de courant induit (unité : A.m-2)..... 35

NOMENCLATURE

SYMBOLES	UNITÉS DE MESURE	NOMENCLATURE
$\nabla.$		Divergence
$\nabla\times$		Rotationnelle
$\oint$		L'intégrale curviligne sur un contour fermé
$\mu_0 = 4\ \pi\ 10^{-7}$	$(H.m^{-1})$	Perméabilité du vide
μ_r	(Sans dimension)	Perméabilité magnétique relative
A	(Wb/m)	Vecteur potentiel magnétique
B	$(Vs.m^{-2})$ ou (T)	Flux magnétique imposé [induction]
Cp	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$	Chaleur spécifique
Cs	$(W.m^{-2}.K^{-4})$	Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement
D	$(C.m^{-2})$	Champ de déplacement électrique
dl		L'élément infinitésimal de déplacement le long du contour fermé
E	$(V.m^{-1})$	Champ électrique
f	(Hz)	Fréquence du courant d'excitation
H	$(A.m^{-1})$	Champ magnétique
h	$(W.m^{-1}.K^{-1})$	Coefficient de transfert par convection
J_0	$(A\ m^{-2})$	Densité de courant en surface
J	$(A.m^{-2})$	Densité de courant
j		Unité imaginaire ($j^2=-1$)
$J_{Lorentz}$	$(A.m^{-2})$	Densité de courant induit par la force de Lorentz.
$J_{Maxwell}$	$(A.m^{-2})$	Densité de courant de déplacement de Maxwell.
q_{cond}	$(W.m^{-2})$	Flux de chaleur transmise par conduction
q_{conv}	$(W.m^{-2})$	Flux de chaleur transmise par convection
q_{rad}	$(W.m^{-2})$	Flux de chaleur transmise par rayonnement
T	(K)	Température
T_a	(K)	Température ambiante

T_s	(K)	Température de la surface
v	(m/s)	Vecteur vitesse de la particule
x	(m)	Distance de la surface
δ	(m)	Profondeur de pénétration
ε_{emi}	(Nombre sans dimension)	L'émissivité thermique de la paroi
λ	($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Conductivité thermique, spécifique d'un matériau donné
μ	($Vs\ A^{-1}m^{-1}$) ou ($H.m^{-1}$)	Perméabilité magnétique du matériau
ρ	(Ω.m)	Résistivité électrique
σ	($Ω^{-1}.m^{-1}$)	Conductivité électrique du matériau
$\Sigma I_{\ traversant}$		La somme algébrique des intensités des courants enlacés par le contour fermé
σ_s	($W.m^{-2}.K^{-4}$)	Constante de Stefan-Boltzmann=$5,67.10^{-8}$
φ		La phase
Ω		Domaine de solution
Ω1		Sous-domaine de la pièce
Ω2		Sous-domaine l'inducteur
Ω3		Sous-domaine air

INTRODUCTION GENERALE

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] [2]. 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 [3] [4]. 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.

Le présent travail est composé de trois chapitres, articulés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature, en détaillant l'origine et le principe du traitement thermique par induction, puis les applications industrielles, ainsi les caractéristiques électriques du chauffage par induction. Finalement la description d'une installation de chauffage par induction.

Le second chapitre, on aura mis le point sur l'électromagnétisme : Théorème et lois fondamentaux, les équations de Maxwell, ainsi que les modes de couplage électromagnétique-thermique existants.

Dans le troisième chapitre, on présentera le logiciel Comsol Multiphysics comme outil de simulation puis on traitera le problème de chauffage par induction, L'étude portera sur Le modèle de simulation en fournissant des informations essentielles sur les processus en cours dans le matériau chauffé. Afin de vérifier le modèle de simulation, des mesures expérimentales sont effectuées.

On finira ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus et par des recommandations sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

CHAPITRE I : PRINCIPE DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION

I.1 Introduction

Le chapitre suivant introduit le sujet du chauffage par induction. Il donne un aperçu de la structure du document et des idées principales.

Le chauffage par induction est un procédé qui consiste à exposer un matériau conducteur d'électricité à un champ magnétique variable ayant ainsi pour effet, la création de courants de Foucault dont la circulation élève la température du matériau par effet Joule. Même s'il n'est qu'à ses débuts, ce mode de chauffage est déjà implanté dans les fonderies et s'intègre bien dans les processus de traitement des matériaux [5] pour ses divers avantages, notamment, l'atteinte de densités de puissances très élevées [6] qui conduit à des échauffements rapides.

En général, la qualité des traitements d'un matériau de caractéristiques homogènes après chauffage est meilleure lorsque sa température est uniforme, mais il peut également n'être question que du chauffage d'une partie de la pièce.

Il convient donc de contrôler la puissance absorbée avec précision afin de maitriser les profils des températures souhaités dans les matériaux. Cela va de pair avec une forme adaptée de l'inducteur et avec la fréquence des courants injectés. La fréquence intervient dans la localisation du chauffage [7] si bien que ce dernier peut être pénétrant, superficiel ou pelliculaire. Il est donc nécessaire de disposer d'un convertisseur de fréquence associé à sa commande car la source primaire d'électricité est le réseau à 50 Hz. La commande du convertisseur est conçue pour une prise en compte de la complexité du système qu'implique l'association de la charge, l'inducteur et son alimentation.

Ce premier chapitre, présente les principes de base du chauffage par induction en premier lieu et souligne l'importance du choix de la fréquence suivant la puissance souhaitée et le type de chauffage. Il donne également un bref aperçu des applications industrielles

I.2 Histoire de l'induction magnétique

Les bases de l'induction électromagnétique ont été découvertes en 1831 par le physicien anglais Michael Faraday. Dans son laboratoire, il découvre, en utilisant le dispositif expérimental présenté dans la figure 1, que lorsque l'interrupteur liant la batterie à la première bobine était fermé, un courant momentané pouvait être mesuré par le galvanomètre placé en série avec la deuxième bobine. Si l'interrupteur restait fermé, aucun courant n'était détecté dans la deuxième bobine. Quand il ouvrait l'interrupteur, un courant momentané était à nouveau détecté mais dans la direction opposée à celle du courant mesuré quand l'interrupteur était fermé.

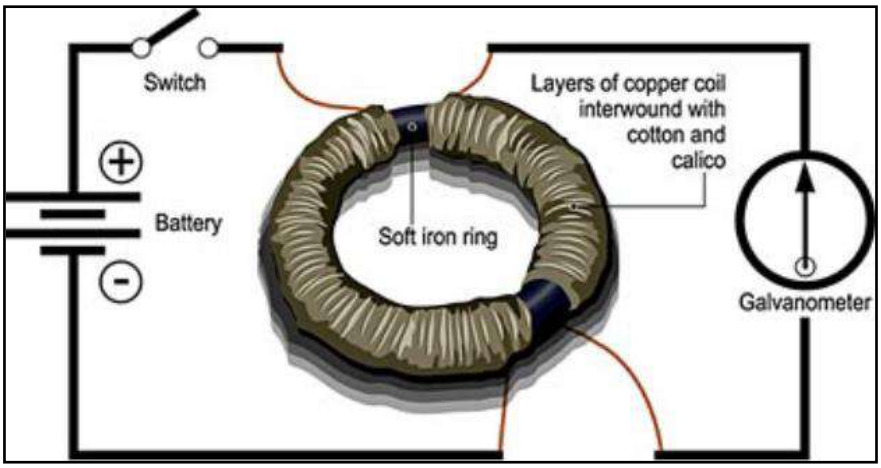


Figure 1 Schéma simplifié du dispositif expérimental utilisé par Faraday

Tirée de Gleason [19].

Faraday conclut à partir de cela qu'un courant électrique peut être produit par un champ magnétique qui varie dans le temps. Comme il n'y avait pas de connexion physique entre les deux bobines, le courant dans la deuxième bobine a été produit par une différence de potentiel qui a été « induite » à partir de la première bobine. La loi de Faraday dit que «la force électromotrice induite dans un bobinage fermé placé dans un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation au cours du temps du flux du champ magnétique qui entre dans le circuit ».

Quelques années plus tard, Le physicien allemand Heinrich Lenz formule la loi de Lenz qui dit que «la polarité de la tension induite est telle que si le courant peut circuler, il génère un flux magnétique qui tend à s'opposer à la variation du flux magnétique inducteur ».

Au cours des décennies qui ont suivi la découverte de l'induction électromagnétique, ses effets ont été utilisés pour développer des transformateurs dans le but de changer le niveau de tension d'un circuit à un autre pour assurer une transmission efficace de l'électricité. Le noyau de ces transformateurs était constitué de piles d'acier laminées afin de réduire le chauffage qui s'y produisait. Vers la fin du 19ème siècle, On commença à faire l'exact opposé en utilisant l'induction pour fondre des pièces en métal.

Au début du 20ème siècle, l'induction a commencé à être utilisée pour chauffer des fours, mais était limitée par la puissance des générateurs. Sa première utilisation pour le durcissement d'acier date des années 30. Ce n'est que plus tard, dans les années 60, avec l'avancée technique d'après-guerre et le grossissement des générateurs de puissance que ce procédé s'est très largement répandu dans l'industrie afin de braser, traiter thermiquement, ou simplement chauffer des métaux [8].

I.3 Le principe du chauffage par induction

Le chauffage par induction est une application directe de deux lois physiques, la loi de Lenz et l'effet Joule. Tout matériau conducteur de l'électricité plongé dans un champ magnétique variable (créé par une bobine inductrice ou inducteur) est le siège de courants électriques induits ou courant de Foucault. Ces courants dissipent de la chaleur par effet Joule dans le matériau où ils ont pris naissance.

En effet, un milieu conducteur, en l'occurrence un inducteur, parcouru par un courant continu ou alternatif, génère un champ électromagnétique dans l'espace environnant. Ce champ électromagnétique pénètre dans la pièce à partir de la surface sur une profondeur plus ou moins importante suivant la fréquence du champ électromagnétique et les propriétés du matériau considéré. Si maintenant un courant alternatif alimente notre inducteur, le champ électromagnétique va osciller exactement ou sensiblement à la même fréquence que le courant imposé suivant que le matériau constitutif de la pièce est magnétique, amagnétique ou diamagnétique. Ces oscillations rapides du champ électromagnétique induisent des courants de Foucault dans la pièce.

La direction et le sens de déplacement des courants obéissent à la loi de Lenz qui stipule que « les courants induits s'opposent à la cause qui leur a donné naissance ». Ainsi les courants induits dans la pièce vont circuler dans la même direction mais dans le sens opposé au courant imposé dans l'inducteur. La région parcourue par les courants est une zone de dissipation de chaleur par effet Joule.

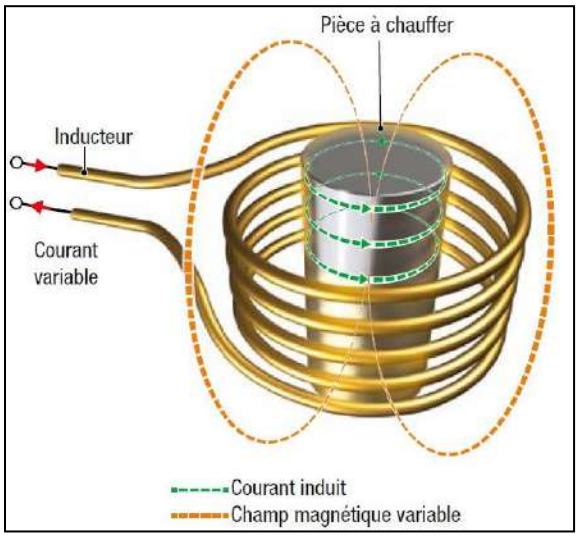


Figure 2 Schéma de principe du procédé de chauffage par induction

Enfin la chaleur se propage vers le centre de la pièce par diffusion thermique, Figure 2

La zone de production de la chaleur est concentrée dans une fine couche sous la surface de la pièce. En effet, la densité des courants induits décroît de manière exponentielle vers le centre de la pièce avec la distance à la surface : c'est l'effet de peau [9].

I.4 Les applications industrielles

Les procédés de chauffage par induction sont utilisés dans les milieux industriels pour la préchauffe de pièces avant mise en forme à chaud (forgeage, matriçage, laminage, brasage), pour les traitements thermiques (trempe) ou encore pour des opérations de soudure entre pièces métalliques [9]. Ce chauffage s'intègre également dans les traitements de surface qui recouvrent des opérations diverses tel que :

- Le dégraissage, le décapage et le séchage.
- La galvanisation et étamage.
- Cuisson de vernis et de peintures, la plastification.

Cette vaste utilisation s'explique par le transfert thermique s'opérant de l'intérieur de la matière vers l'extérieur qui constitue un atout favorable notamment aux opérations de séchage (évacuation des solvants et vapeurs). Cela permet d'obtenir :

- Une meilleure adhérence.
- Un meilleur aspect de surface.
- Une bonne reproductibilité, critère important pour le séchage des peintures colorées.
- Une grande souplesse d'utilisation par le choix des températures de traitement.
- Enfin, une ligne de production plus compacte et susceptible de fonctionner de façon discontinue, en l'absence de toute inertie thermique.

Les applications dans ce domaine sont très vastes. Par exemple, on peut citer :

- La polymérisation de vernis intérieur sur tubes aérosols.
- La cuisson de joints d'étanchéité.
- La polymérisation de vernis sur fils et méplats de cuivre.
- Le revêtement.
- La ligne de galvanisation.
- Le recuit.

Un autre type d'application qui tend à se développer récemment au sein des industries verrières, chimiques, céramiques, environnementales et chez les réfractoristes est la fusion de verre et d'oxydes par induction en auto-creuset. En effet, la résistivité électrique des oxydes (1 à 10 W.cm à 1500°C) due à une conduction ionique est compatible avec la fusion par induction. Leur faible conduction thermique aux basses températures et une résistivité décroissante avec la température permet d'utiliser la technique de l'induction directe en autocreuset avec une profondeur de peau égale au rayon de la charge. Cet autocreuset constitué du même matériau solide que l'on cherche à fondre, se forme grâce au refroidissement optimal de l'inducteur (mono-spire) et permet d'atteindre des températures supérieures à 2500°C sans contact du bain avec l'inducteur (pas de pollution du produit). Les applications sont les suivantes :

- Fusion de cristal.
- Fusion de verres spéciaux ou techniques.
- Fusion d'oxydes réfractaires.

- Elaboration de phosphates.
- Vitrification de déchets [9] .

I.5 Les caractéristiques électriques du chauffage par induction

Pour les applications industrielles, deux grandeurs caractérisent l'efficacité thermique et énergétique de l'induction :

- L'effet de peau, qui caractérise la répartition des courants induits dans la pièce. Le champ magnétique alternatif qui pénètre dans le' matériau décroît rapidement pour disparaître et avec lui les courants induits.
- La puissance dissipée dans la pièce qui caractérise le phénomène électrique.

De nombreux paramètres interviennent :

- La fréquence du courant.
- La nature magnétique et thermique du matériau.
- Le champ inducteur.
- Le couplage entre l'inducteur et la pièce à chauffer (entrefer, longueurs respectives).
- Le type d'inducteur et les caractéristiques géométriques.
- La nature des conducteurs de l'inducteur.

La répartition des courants et l'énergie dissipée dans la pièce peuvent être déterminées rigoureusement en utilisant les lois de Maxwell traduisant les lois fondamentales de l'électromagnétisme en régime quasi stationnaire [10].

I.5.1 L'effet de peau

L'effet de peau ou effet pelliculaire (ou plus rarement effet Kelvin) est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur. Il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur. Cela signifie que le courant ne circule pas uniformément dans toute la section du conducteur. Tout se passe comme si la section utile du

conducteur était plus petite. La résistance augmente, ce qui conduit alors à des pertes par effet Joule plus importantes [8].

Une caractéristique générale des courants alternatifs est de ne pas utiliser toute la section utile des conducteurs pour circuler, cela est communément appelé l'effet de peau. En effet, les courants alternatifs se concentrent sur la périphérie des conducteurs et il en est de même pour les courants induits dans le matériau à chauffer, les courants sont plus important à la périphérie qu'au cœur de l'objet. Il en résulte que la chaleur est principalement générée à la périphérie.

L'effet de peau dont la profondeur de pénétration δ est calculée par la relation (I-3) est l'épaisseur de la couche surfacique dans laquelle circulent les 67% des courants induits [1].

Elle correspond à 87% de la puissance dissipée (figure 3).

Pour un matériau idéal (variables physiques constantes en fonction de la température), La répartition de courant est donnée par [11]:

$$J(x) = J_0 . e^{\left(\frac{-x}{\delta}\right)} \quad \text{(I.1)}$$

Pour x = δ, on obtient :

$$J(\delta) = J_0 . e^{-1} = 0{,}368 . J_0 \quad \text{(I.2)}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad \text{(I.3)}$$

Avec :

J_0 : densité de courant en surface (A m^{-2}).

x : distance de la surface (m).

δ : profondeur de pénétration (m).

f : la fréquence du courant d'excitation (Hz).

σ : la conductivité électrique du matériau ($\Omega^{-1}.m^{-1}$). $\sigma = \frac{1}{\rho}$ Où ρ (Ω.m) est la résistivité électrique

μ : la perméabilité magnétique du matériau (Vs $A^{-1}m^{-1}$) ou ($H.m^{-1}$).

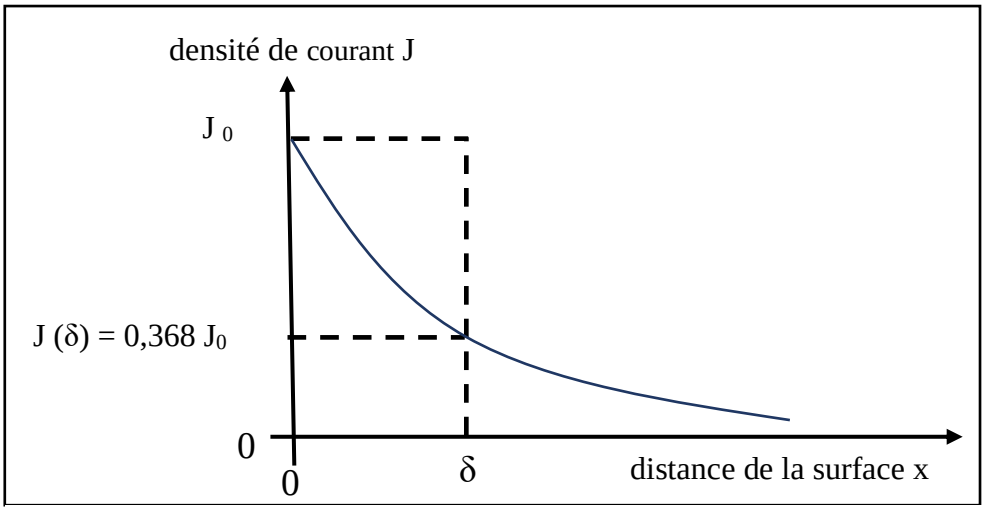


Figure 3 Répartition de la densité de courant depuis la surface

I.5.2 Perméabilité magnétique

Selon la définition, la perméabilité magnétique est une unité physique désignée par le symbole de la formule μ. Elle est similaire à la sensibilité et indique la perméabilité d'un matériau à la densité du flux magnétique. Un matériau à haute perméabilité est encore plus facile à magnétiser. La résistance de ces objets très perméables est donc très faible. Les matériaux à haute perméabilité magnétique sont, par exemple, le fer et d'autres matériaux ferromagnétiques. À l'aide de la perméabilité, la connexion entre un champ magnétique et la densité du flux magnétique est établie.

La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la perméabilité magnétique relative μ_r. Pour les matériaux magnétiques ($\mu_r > 1$), la profondeur de pénétration est réduite. Pour un matériau donné à chauffer, ce sont les grandeurs qui varient avec la température et avec le champ magnétique [10].

La perméabilité magnétique μ est la relation constitutive entre la densité de flux B et un champ magnétique magnétisant H tels que [9] :

$$B = \mu H \tag{I.4}$$

Il est courant de décomposer la perméabilité magnétique par :

$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{I.5}$$

Avec :

μ_r : la perméabilité magnétique relative (sans dimension).

μ_0 : la perméabilité du vide, égale à $4\ \pi\ 10^{-7}$(H.m^{-1}).

Le Tableau I-1 indique quelques valeurs en exemple de la profondeur de pénétration δ (mm) pour une perméabilité relative $\mu_r = 1$ sauf pour l'acier à 20 °C [1]. La valeur $\mu_r = 1$ correspond aux matériaux non magnétiques.

f(Hz)	Acier (μr=100) (20°C)	Acier (800° C)	Cuivre (20°C)	Cuivre (800°C)	Aluminium (20°C)	Aluminium (500°C)	Graphite (20-1300°C)
50	3,18	67,2	9,35	19,4	11,9	19,4	201
10^2	2,25	47,5	6,61	13,4	8,4	134	142
10^3	0,71	14,6	2,09	4,26	2,66	4,26	45
10^4	0,255	4,75	0,661	1,34	0,84	1,34	14,2
10^5	0,071	1,46	0,209	0,426	0,266	0,426	4,5
10^6	0,0225	0,475	0,066	0,134	0,084	0,134	1,42
10^7	0,007	0,146	0,021	0,043	0,0266	0,043	0,45

Tableau1 profondeurs de pénétration δ

I.6 Description d'une installation de chauffage par induction

Un système de chauffage par induction est principalement constitué de trois éléments : une source d'énergie, un étage de conversion de l'énergie (un ou plusieurs convertisseurs associés à leur commande) et les inducteurs couplés à la charge. Les différents éléments cités sont représentés sur la Figure 4 qui donne une vue générale d'un tel système.

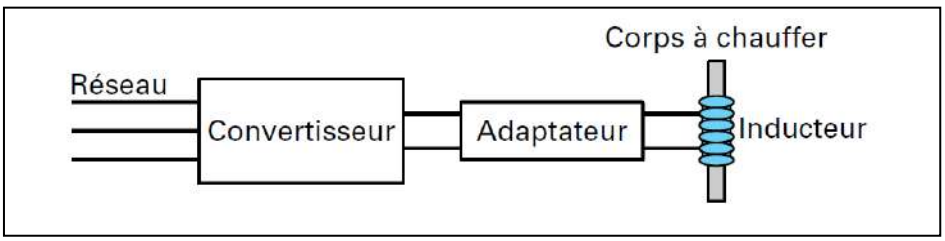


Figure 4 Schéma général d'une installation de chauffage par induction [1]

Ce genre d'équipement est généralement évalué en termes de fréquence et de puissance de sortie maximale, quelques ordres de grandeur sur le chauffage par induction permettent de mieux cerner ses spécificités [1].

Concernant les fréquences de fonctionnement, Il est habituel de distinguer les plages de fréquences suivantes :

Basse fréquence	Moyenne fréquence	Haut fréquence
50Hz à 1000Hz	1000Hz à 35kHz	35kHz à 5MHz

Tableau 2 distinguer les plages de fréquences

Ces systèmes sont également caractérisés par la puissance surfacique P_s qui est la puissance injectée rapportée à la surface du matériau. On distingue trois genres de chauffage listés ci-après.

Genre de chauffage	Plage de fréquence	Plage de puissance	Exemple d'application
Pénétrante	- De 1 à 50 kHz pour les métaux - De 0,1 à 4 MHz pour les semi-conducteurs	$10^2 < P_s < 10^3$ (kW/m^2)	Forge, fusion
Superficiel	- De 10 à 500 kHz pour les métaux	$5\ 10^3 < P_s < 5\ 10^4$ (kW/m^2)	Temps superficielle, brasage
Pelliculaire	- De 10 à 1000 kHz pour les métaux	$Ps < 10^5$ (kW/m2)	Soudages de tubes, thermo scellage

Tableau 3 genres de chauffage

L'utilisation d'une fréquence autre que 50 Hz impose de disposer de générateurs dont le fonctionnement et l'adaptation à la charge doivent être maîtrisés pour fournir la puissance demandée [1].

I.7 Conclusion

Après une brève introduction traitant le principe général du chauffage par induction et son avantage, ce premier chapitre débute par un aperçut historique sur la découverte de l'induction électromagnétique, les principaux fondateurs qui ont mis en point ce système et les lois physiques et mathématiques qui régissent l'opération du chauffage par induction.

A la suite, on a présenté les différentes applications industrielles utilisant ce procédé de chauffage, les paramètres et caractéristiques électriques et magnétiques de certains matériaux ont été données et résumées dans un tableau.

Le chapitre I est terminé par la présentation d'une installation typique de chauffage par induction donnant quelques exemples de fréquences de courant électrique et les genres de chauffage utilisés selon l'avancée technologique.

Les modèles mathématiques régissant les phénomènes physiques concernant le fonctionnement du procède de chauffage par induction seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction

Les procédés de chauffage par induction impliquent deux principaux phénomènes physiques différents, qui sont liés à :

- L'électromagnétisme.
- Transfert de chaleur.

Un modèle mathématique complet des procédés de chauffage par induction doit donc considérer et coupler étroitement les équations modélisant ces phénomènes. Nous présentons ici un modèle mathématique général qui couple :

- Les équations de Maxwell - afin d'accéder au champ électrique dans la pièce.
- L'équation de transfert de chaleur - la chaleur dissipée dans la pièce par les courants de Foucault étant la principale source d'évolution de température dans la pièce.

II.2 Les équations générales de la magnétodynamique

En 1819 le physicien danois Christian Orsted (1777-1851) a montré que les courants électriques sont entourés par des champs magnétiques. Le Lyonnais André Marie Ampère (1775-1836) explique ce phénomène et trouve la liaison entre les champs électriques et les champs magnétiques. Quelques années plus tard l'anglais Michael Faraday (1791 - 1867) propose l'expression des lignes du champs électrique. Le physicien anglais James Clerk Maxwell (1831 - 1879) publie en 1856 un système d'équations contenant toutes les connaissances en électromagnétisme qu'on avait à cette époque, le système d'équations de Maxwell permet de modéliser tous les phénomènes électromagnétiques [10]. Ce système est composé des quatre équations fondamentales suivantes [9] :

Équation du flux magnétique :

$$\nabla . B = 0 \tag{II.1}$$

Équation de Maxwell-Gauss :

$$\nabla . E = 0 \tag{II.2}$$

Équation de Maxwell-Faraday :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{II.3}$$

Équation de Maxwell-Ampère :

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{II.4}$$

Avec :

E : le champ électrique ($V.m^{-1}$).

B : le flux magnétique imposé [induction] ($Vs.m^{-2}$) ou (T).

H : le champ magnétique ($A.m^{-1}$).

J : la densité de courant ($A.m^{-2}$).

D : le champ de déplacement électrique ($C.m^{-2}$).

$\nabla\times$: Rotationnelle.

$\nabla.$: Divergence.

Pour pouvoir simuler le phénomène électromagnétique, il faut compléter les équations de Maxwell par des relations tenant compte des propriétés des matériaux (perméabilité magnétique μ ($H.m^{-1}$), conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$), constante diélectrique ε ($F.m^{-1}$)). Ces relations sont les trois suivantes :

$$D = \varepsilon E \tag{II.5}$$

$$B = \mu H \tag{II.6}$$

$$J = \sigma E \tag{II.7}$$

Le module de l'électromagnétisme est régi par l'équation suivante :

$$J = \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} B) - \sigma v \times B \tag{II.8}$$

Avec :

A : le vecteur potentiel magnétique (Wb/m).

v : le vecteur vitesse de la particule (m/s).

Cette équation est dérivée de la loi d'Ampère, également appelée loi circulaire d'Ampère, qui stipule que "la rotation, le long d'un circuit fermé, du champ magnétique due à la répartition du courant est égal à la somme algébrique des courants traversant la surface définie par le circuit dirigé, multiplié par la perméabilité magnétique" [12], soit :

$$\oint \mathrm{B}.dl = \mu \sum I_{traversant} \tag{II.9}$$

Avec :

$\oint$: l'intégrale curviligne sur un contour fermé

dl : l'élément infinitésimal de déplacement le long du contour fermé

$\Sigma I_{\text{traversant}}$: la somme algébrique des intensités des courants enlacés par le contour fermé

Sachant que :

$$\sum I_{traversant} = \iint J_{total}.ds \tag{II.10}$$

Et en utilisant le théorème de Stokes :

$$\oint B.dl = \iint rotB.ds \tag{II.11}$$

On obtient à partir des équations II.9, II.10 et II.11 :

$$rotB = \nabla \times B = \mu J_{total} \tag{II.12}$$

or

$$J_{total} = J + J_{Maxwell} + J_{Lorentz} \tag{II.13}$$

Avec :

J : La densité de courant électrique dans l'inducteur.

$J_{Maxwell}$: La densité de courant de déplacement de Maxwell.

$J_{Lorentz}$: La densité de courant induit par la force de Lorentz.

$$J_{Maxwell} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = -\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \tag{II.14}$$

$$J_{Lorentz} = \sigma(E + v \times B) = \sigma\left(-\frac{\partial A}{\partial t} + v \times B\right) \tag{II.15}$$

On déduit alors à partir des équations (II.12), (II.13), (II.14) et (II.15) que :

$$\nabla \times B = \mu\left(J - \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \sigma\left(-\frac{\partial A}{\partial t} + v \times B\right)\right) J_{total} \tag{II.16}$$

Finalement on trouve :

$$\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} B) - \sigma v \times B = J \tag{II.17}$$

En Utilisant la notation complexe $\mathrm{A} = \mathrm{A}_0 e^{j\omega t + \varphi}$

Avec :

φ : la phase.

j : unité imaginaire tel que $j^2 = -1$.

On obtient :

$$\varepsilon \frac{\partial^2 \mathrm{A}}{\partial t^2} = \varepsilon (j\omega)^2 \mathrm{A}_0 e^{j\omega t+\varphi} = -\varepsilon \omega^2 \mathrm{A} \qquad \text{(II.18)}$$

Et

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \sigma j\omega A_0 e^{j\omega t+\varphi} = \sigma j\omega A \qquad \text{(II.19)}$$

D'où :

$$\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) A \qquad \text{(II.20)}$$

On obtient finalement :

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon)\mathrm{A} + \nabla \times (\mu^{-1}\mathrm{B}) - \sigma v \times \mathrm{B} = J \qquad \text{(II.21)}$$

$$\mathrm{B} = \nabla \times \mathrm{A} \qquad \text{(II.22)}$$

II.3 Transfert de chaleur

Le champ thermique, généré dans le corps à chauffer, est déterminé par les sources thermiques crées par des courants de Foucault et la diffusion de la chaleur. Cette diffusion dépend de la transmission de la chaleur et des processus de stockage.

La loi de Fourier traduit les phénomènes thermiques, en chaque point d'un corps, entre le flux de chaleur et le gradient de température :

$$q_{cond} = -\lambda grad(T) \quad \text{(II.28)}$$

Avec :

q_{cond} : le flux de chaleur transmise par conduction ($W.m^{-2}$).
λ : la conductivité thermique, spécifique d'un matériau donné ($W.m^{-1}.K^{-1}$).
T : la température (K).

La direction de l'écoulement de la chaleur coïncide avec celle du gradient de température.

Le flux de chaleur par unité de surface est proportionnel à ce gradient de température. Le signe (-) caractérise le fait que l'écoulement de chaleur s'effectue dans le sens des températures décroissantes, donc dans le sens opposé au gradient, c'est-à-dire du plus chaud vers le plus froid.

Il existe trois modes de transfert de la chaleur :

La conduction.
Le rayonnement.
La convection.

II.3.1 Transfert de la chaleur par conduction

La conduction thermique est la propagation de la chaleur de molécule à molécule, dans un corps solide, sans intervention d'un mouvement. La conductivité thermique dépend non

seulement du matériau, mais aussi de la température. Sa valeur est déterminée souvent par les mesures. Il est décrit par la loi de Fourier (II.22).

II.3.2 Transfert de la chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection se fait à travers les surfaces et en présence de fluides (de la surface de la pièce traitée vers l'environnement ambiant). Ce mode de transfert, est décrit par la loi de Newton, qui énonce que le taux de chaleur transmise par convection est directement proportionnel à la différence de température entre la surface de la pièce et l'environnement ambiant.

$$q_{conv} = h(T_s - T_a) \tag{II.29}$$

Avec :

q_{conv} : le flux de chaleur transmise par convection ($W.m^{-2}$).
h : le coefficient de transfert par convection ($W.m^{-1}.K^{-1}$).
T_s : la température de la surface (K).
T_a : la température ambiante (K).

On distingue généralement deux types de convection : convection naturelle et convection forcée.

La convection naturelle apparaît spontanément dans un fluide. Les particules de fluide en contact avec un corps chaud deviennent plus légères et montent en cédant leur place à d'autre particules qui ne sont pas encore chaudes ou qui se sont refroidies. Ces dernières à leur tour s'échauffent, montent et ainsi de suite.

La convection forcée est crée par circulation forcée du milieu réfrigérant, par exemple parle soufflage d'air d'un ventilateur sur la surface à refroidir. Ainsi une pièce qui est traitée superficiellement et qui se déplace est touchée par un courant d'air à cause de sa vitesse de déplacement.

II.3.3 Transfert de la chaleur par rayonnement

Tout corps qu'il soit liquide, solide ou gazeux émet et reçoit un rayonnement électromagnétique source d'une modification de son agitation électronique entraînant une variation de son énergie interne. Il en découle une ´élévation ou une diminution de sa température interne. Le phénomène de transfert radiatif entre une surface et un milieu infini se traduit donc par un échange de chaleur par rayonnement, modélisable au moyen d'un coefficient d'échange h. Ainsi, le flux de chaleur macroscopique q reçu par la surface extérieure s'écrit suivant la loi de Stefan-Boltzmann de la façon suivante [13] :

$$q_{rad} = C_s\left(T_s{}^4 - T_a{}^4\right) \qquad \text{(II.30)}$$

Avec :

q_{rad} : le flux de chaleur transmise par rayonnement ($W.m^{-2}$).
Cs :le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement ($W.m^{-2}.K^{-4}$).
Ts : la température de la surface (K).
Ta : la température ambiante (K).

Le coefficient de perte de chaleur par rayonnement (Cs) dépend de l'émissivité du matériau (ε) qui dépend elle-même de la température, de l'état de surface et du facteur de forme du rayonnement thermique. L'équation de l'échange de chaleur par radiation peut être réécrite sous la forme suivante :

$$q_{rad} = \sigma_s \varepsilon_{emi}\left(T_s{}^4 - T_a{}^4\right) \qquad \text{(II.31)}$$

Avec :

σ_s: la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5{,}67.10^{-8}$ ($W.m^{-2}.K^{-4}$).
ε_{emi} : l'émissivité thermique de la paroi (nombre sans dimension).

L'émissivité du matériau ε_{emi} dépend essentiellement des propriétés des surfaces des corps en regard (pour un corps noir : ε_{emi} = l), en matière d'émission et d'absorption du rayonnement, mais aussi de leur forme et de leur position relative. Pour les corps qui ne sont pas parfaitement noirs, ε_{emi} est inférieur à 1 et dépend de la surface rayonnante et de la température [10].

Ce transport de chaleur se fait sans support matériel, donc même dans le vide. L'air transporte cette chaleur pratiquement sans s'échauffer. Il s'agit en fait des ondes électromagnétiques avec des fréquences de l'ordre de l'infrarouge. Dans le matériau qui les absorbe, ils sont à nouveau convertis en chaleur.

II.3.4 Capacité calorifique :

La chaleur massique Cp est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance. L'index p indique que la pression reste constante pendant cet échauffement. La capacité calorifique est le produit entre la chaleur massique Cp et la masse volumique ρ . La masse volumique dépend aussi de la température [10].

II.4 Couplage électromagnétique-thermique

Deux types de couplages existent entre les champs électromagnétiques et thermiques, le couplage faible et fort.

Le couplage faible stipule qu'à chaque pas de temps donné, les champs électromagnétiques sont résolus dans une première étape pour déterminer les densités du courant induit. Dans une seconde étape, la distribution de chaleur de Joule est utilisée pour résoudre le problème thermique et déterminer la distribution de la température dans la pièce.

De l'autre côté, le couplage fort traite simultanément toutes les équations à chaque pas de temps [11].

Pour simuler le procédé d'induction, il faut donc traiter les deux phénomènes physiques ensemble. Le couplage fort exige une formulation basée sur la combinaison de toutes les équations dans le même système de résolution. Ainsi, les paramètres inconnus du champ électromagnétique et les paramètres inconnus du problème thermique sont affectés à une matrice globale et ils sont résolus simultanément, et cela à chaque pas de temps. Il faut noter tout de même qu'une résolution des équations thermiques et électromagnétique en utilisant un couplage faible est possible, sauf qu'elle prend beaucoup plus de temps que la résolution avec un couplage fort.

II.5 Formulation du problème

Le problème électromagnétique est formulé dans le domaine magnétodynamique décrit par l'équation (II.22) 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 (II.22) impliquant la température T, la masse volumique ρ et les propriétés thermiques (conductivité thermique λ et chaleur spécifique Cp) du système, ainsi que la densité de puissance dissipée par effet Joule évaluée par la relation (II.24) où ω représente la fréquence des courants d'alimentation [14].

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\left(\frac{1}{\mu r}\right)\frac{\partial rA}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\left(\frac{1}{\mu r}\right)\frac{\partial rA}{\partial z}\right)-\left(\frac{\sigma}{r}\right)\frac{\partial rA}{\partial t}=-J_s \tag{II.26}$$

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=P+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\left(\frac{1}{r}\right)\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{II.27}$$

$$P=\frac{1}{2}\sigma\omega^2 AA^* \tag{II.28}$$

Les variations des propriétés physiques avec la température sont prises en compte selon les relations suivantes [14] [15] :

$$\sigma(T)=\frac{1}{\rho T_{ref}[1+\delta(T-T_{ref})]} \tag{II.29}$$

$$\mu_r(T)=\mu_{r0}\left(1-e^{\frac{T-Tc}{C}}\right) si\ T<Tc \tag{II.30}$$

II.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, les travaux se sont orientés et se sont basés sur la détermination des procédés de chauffage par induction et les différents modes de transfert de chaleur dans les milieux physiques (corps, air, ou du vide), pour ensuite élaborer un modèle mathématique mettant en évidence les types de couplage électromagnétique-thermique et ainsi déterminer la meilleure méthode de modélisation qui prend en compte tout les paramètres physiques et électriques en présence.

CHAPITRE III : SIMULATION

III.1 Introduction

Ce chapitre traite du modèle de simulation du problème de chauffage par induction. Le modèle de simulation du système de chauffage par induction dans COMSOL Multiphysics est créé.

Le modèle de simulation fournit des informations essentielles sur les processus en cours dans le matériau chauffé. Afin de vérifier le modèle de simulation, des mesures expérimentales sont effectuées.

Finalement ce chapitre se termine par une fiche d'observations les plus importantes et une conclusion.

III.2 Présentation de COMSOL Multiphysics

III.2.1 Introduction à COMSOL Multiphysics

Pour la conception de mon modèle thermique on a utilisé le logiciel COMSOL MuItiphysics. C'est un logiciel conçu par l'entreprise « Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisé et de conseil. Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Vous pouvez modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL®.

COMSOL Multiphysics® comprend l'interface COMSOL Desktop® utilisateur graphique (GUI) et un ensemble d'interfaces d'utilisateur prédéfinis avec des outils de modélisation associés, appelés interfaces de physique, pour la modélisation des applications courantes. Une suite de produits add-on élargit cette plate-forme de simulation multiphysique pour la modélisation des domaines d'application spécifiques ainsi que l'interface avec des logiciels tiers et de leurs capacités [16].

III.2.2 COMSOL Multiphysics est nécessaire pour exécuter l'un des produits add-on.

La notion de multi-physique est représentée dans la combinaison de plusieurs phénomènes physiques lors de la description d'un processus. On peut décrire mathématiquement des phénomènes physiques très différents par les mêmes équations générales. Alors que des géométries et des phénomènes complexes nécessitent la modélisation avec des équations complexes et des conditions aux limites, COMSOL Multiphysics offre un couplage des différentes formulations physiques (multiphysiques) simple. Le résultat de ses systèmes sont des équations qui peuvent être résolues de façon séquentielle ou dans une formulation entièrement couplée.

Multiphasiques étendus : Physique dans différentes géométries peuvent être facilement combinés. Ces variables de couplage peuvent également être utilisés pour lier des physiques ou des géométries différentes comme dans notre cas. Lors de la modélisation et les simulations, ces descriptions sont basées sur les lois de la physique [16].

III.2.3 Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics

Le principal but de la création de COMSOL Multiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie. Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée", par le système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multiphysiques. Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles. Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation [16].

III.2.4 PRINCIPE D'UTILISATION

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les étapes du processus de modélisation sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab. Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme di_érentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algébro-di_érentiels (EAD) sont également possibles.

La modélisation du processus avec COMSOL Multiphysics se résume en 6 étapes :

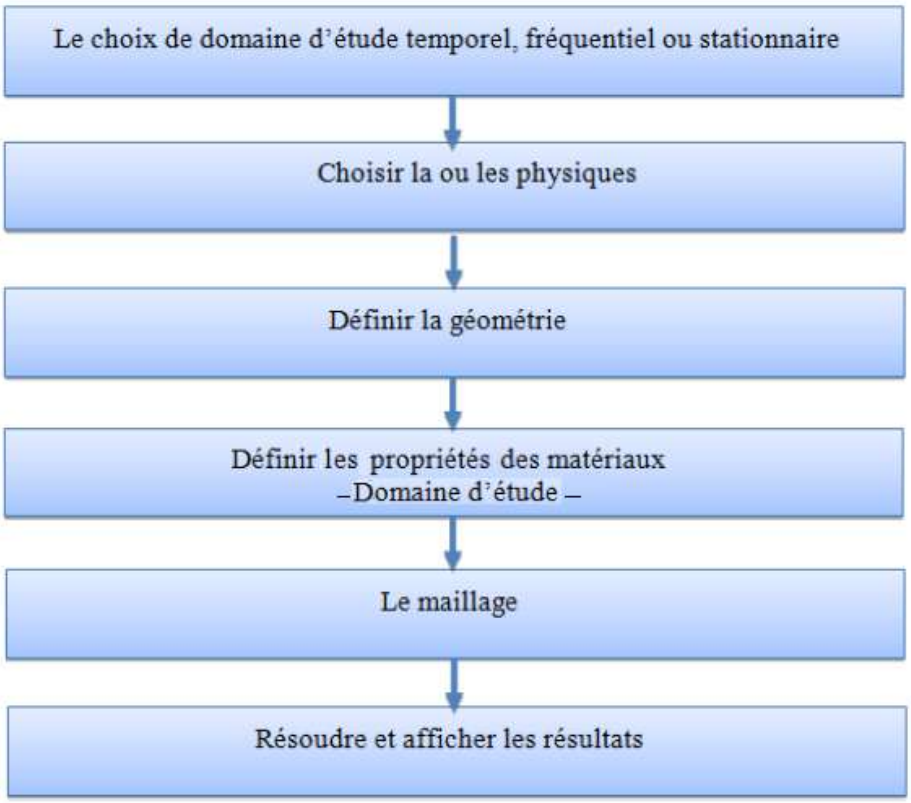


Figure 5 Diagramme des étapes de conception avec COMSOL Multiphysics

III.3 Propriétés électromagnétiques et thermiques du matériau de la pièce

Les phénomènes électromagnétiques et de transfert de chaleur sont étroitement liés en raison des propriétés physiques des métaux chauffés. Ces propriétés des métaux sont des fonctions non linéaires de l'intensité du champ magnétique, de la température, de la composition chimique et d'autres facteurs [17].

Ce modèle mathématique considère les principales propriétés qui ont le plus d'impact sur la technologie de chauffage par induction. Ces propriétés sont : la perméabilité relative μr, la résistivité électrique ρ, la conductivité thermique k et la capacité calorifique Cp. Les valeurs de ces propriétés utilisées dans la simulation pour l'acier en fonction de la température sont répertoriées dans le Tab1.

Il convient de noter que l'émissivité de surface ε et le coefficient de transfert de chaleur par convection h dépendent également de la température (les autres facteurs qui influencent ε et h sont : la viscosité, l'état de surface, etc.).

Le tableau suivant propose quelques propriétés électromagnétiques et thermiques de l'acier en fonction de la température.

T [K]	k [$W.m^{-1}K^{-1}$]	Cp [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	ρ [Ω.m]	μ [-]
293	52	450	$1,70.\ 10^{-7}$	218
373	51	490	$2,32.\ 10^{-7}$	-
473	-	-	$3,10.\ 10^{-7}$	-
573	46	570	$4,10.\ 10^{-7}$	202
673	-	-	$5,05.\ 10^{-7}$	-
773	38	680	-	-
873	-	-	$7,72.10^{-7}$	164
973	30	-	$9,35.10^{-7}$	81
1013	-	-	$1,03.\ 10^{-6}$	27
1073	-	-	$1,13.\ 10^{-6}$	1
1273	27	570	-	1
1473	27	570	$1,23.\ 10^{-6}$	1

Tableau 4 Propriétés électromagnétiques et thermiques de l'acier en fonction de la température

III.4 Résultats Des Simulations

Le modèle de simulation du chauffage par induction créé dans le domaine axisymétrique 2D est illustré à la (Figure 6). Le domaine de solution Ω est divisé en trois sous-domaines : air (Ω3), l'inducteur (Ω2) et domaine de la pièce (Ω1).

Pour la pièce à usiner, un cylindre plein en acier a été choisi.

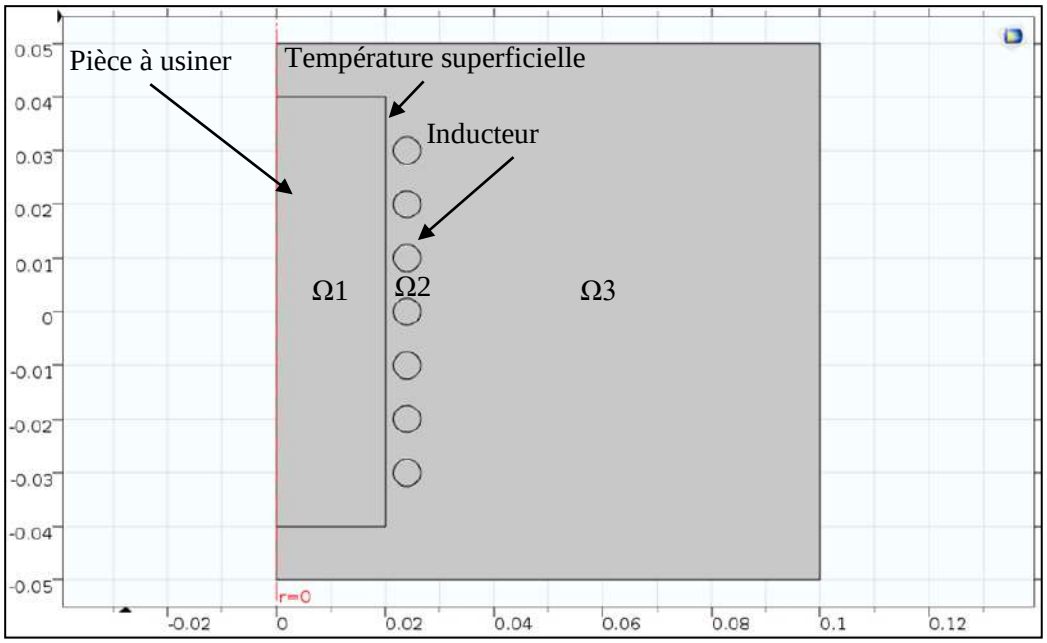


Figure 6 Modèle chauffage par induction dans COMSOL Multiphysics

Le matériau du sous-domaine Ω1 constitue le matériau à chauffer est de l'acier

La figure suivante montre l'équation générale de l'électromagnétisme (II.8) telle qu'elle apparait dans COMSOL.

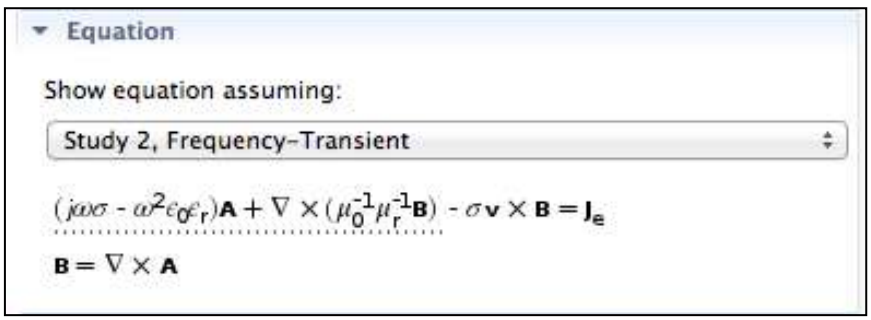


Figure 7 Équation de l'électromagnétisme utilisé dans COMSOL

Dans cette figure, nous avons spécifie l'équation de l'électromagnétisme utilisé dans COMSOL. Pour permettre la résolution de l'équation de conservation, le domaine doit être d'abord maillé, cette étape permet de localiser les nœuds ou l'équation va être discrétisé. A cet effet, un maillage non-structuré, il est fin près des zones à fort gradient de chaleur et plus large ailleurs, avec un rapport d'expansion progressif. Le maillage utilisé est représenté sur la figure8.

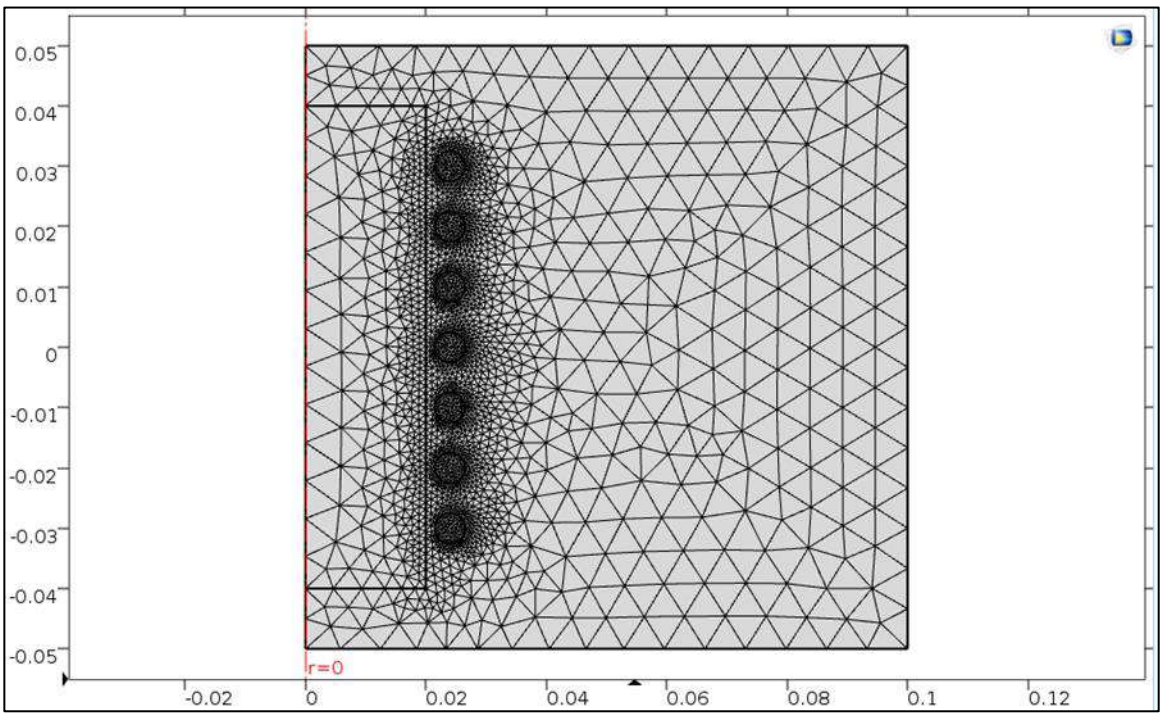


Figure 8 Maillage

L'étude de convergence du modèle 2D axisymétrique s'est faite en deux parties. Dans la première, le maillage a été raffiné jusqu'à convergence des résultats, ensuite le temps a été est judicieusement choisi pour assurer la convergence du modèle pour facilité les calculs. Tous les tests ont été faits avec les paramètres de simulation suivants :

Temps de chauffe égal à 350 s et une fréquence égale à 300 Hz.

Les résultats de la simulation du modèle de chauffage par induction pour le flux magnétique B=2T et la fréquence f=300Hz sont présentés à la Figure 9. Le temps de simulation a été fixé à 350s. La température maximale atteinte est de 340 °C.

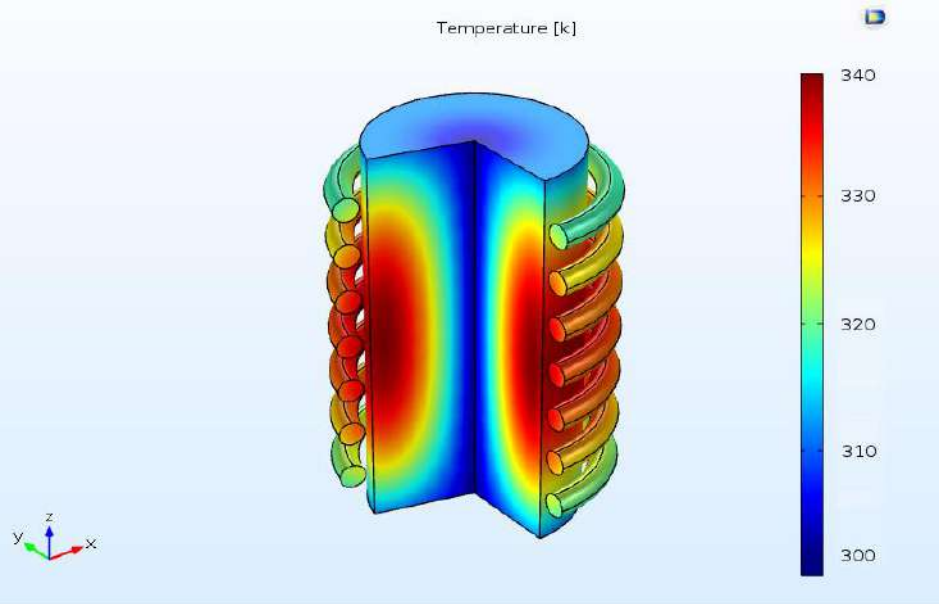


Figure 9 Variation de la température de la pièce après 350 s de chauffage pour B=2T et f=300 Hz

Le champ électromagnétique provoque le chauffage du matériau par induction, ensuite la chaleur sera transférée par convection au fluide qui l'entoure. La densité du fluide chaud décroit, ce qui entraine sa flottabilité sous l'effet de la poussée d'Archimède. Cet effet est visible par des vecteurs courants induit plus élevées dans la région située dans la proximité du cylindre. En s'éloignant de la surface du solide, la courant induit diminue pour converger vers des valeurs nulles au loin du matériau figure 10.

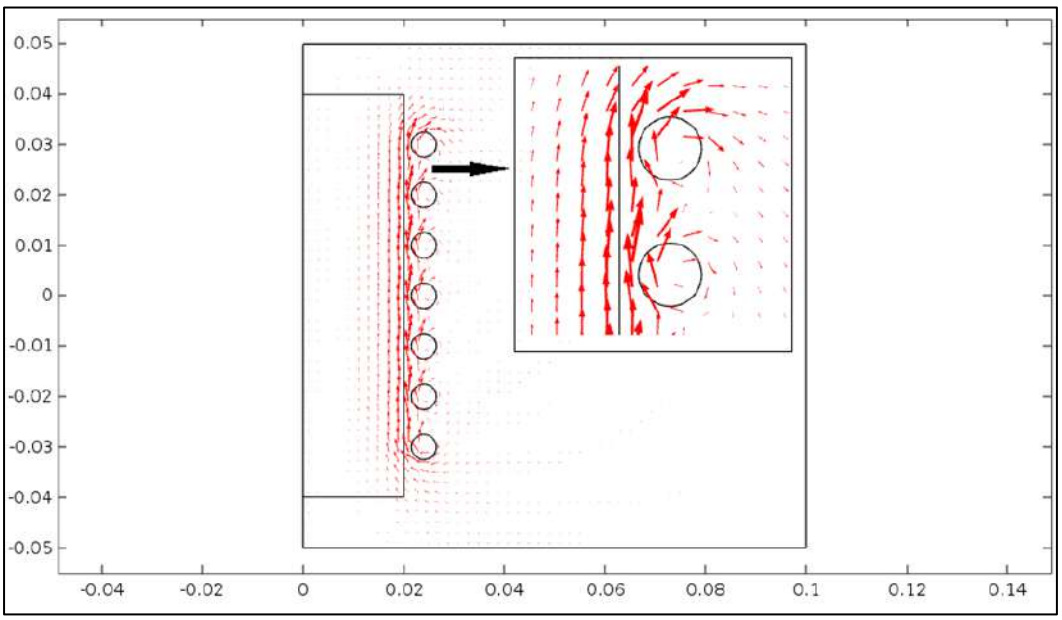


Figure 10 Distribution du vecteur de courant induit dans le matériau utilisé.

L'évolution de la température de la pièce en fonction du temps est illustrée sur la Figure.

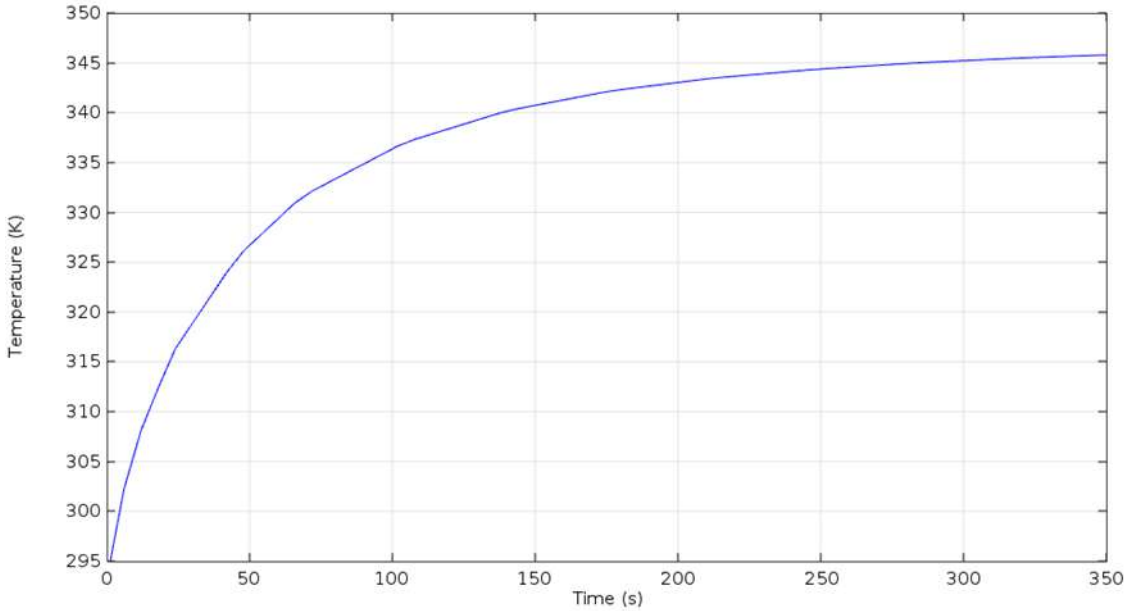


Figure 11 Température de surface de la pièce pendant le processus de chauffage pour B=2T et f=300 Hz

D'après la figure 11 qui représente l'évolution de la température de surface de la pièce pendant le processus de chauffage, on remarque une évolution temporelle de la température de 295 jusqu'au 346 K pour une période de 350s. L'élévation rapide a été observée pour un intervalle de 150s.

Ce résultat a été confirmé par les figures du contour du flux magnétique pour B=1T et 2T (figure 12 et 13) respectivement ou on remarque un contour très développé pour B=2T que pour B=1T.

Donc on peut conclure que l'évolution temporelle des grandeurs électromagnétiques et thermiques au cours du processus donne un bon chauffage de ce matériau.

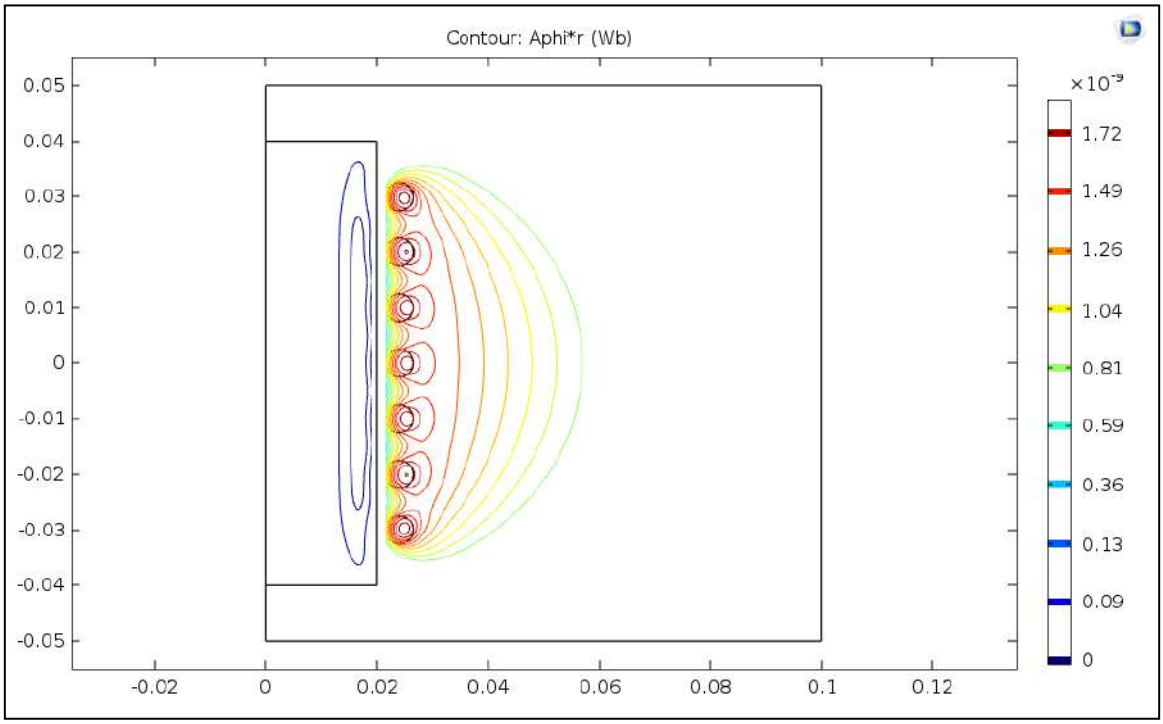


Figure 12 Contour du flux magnétique (Wb) à B=1T

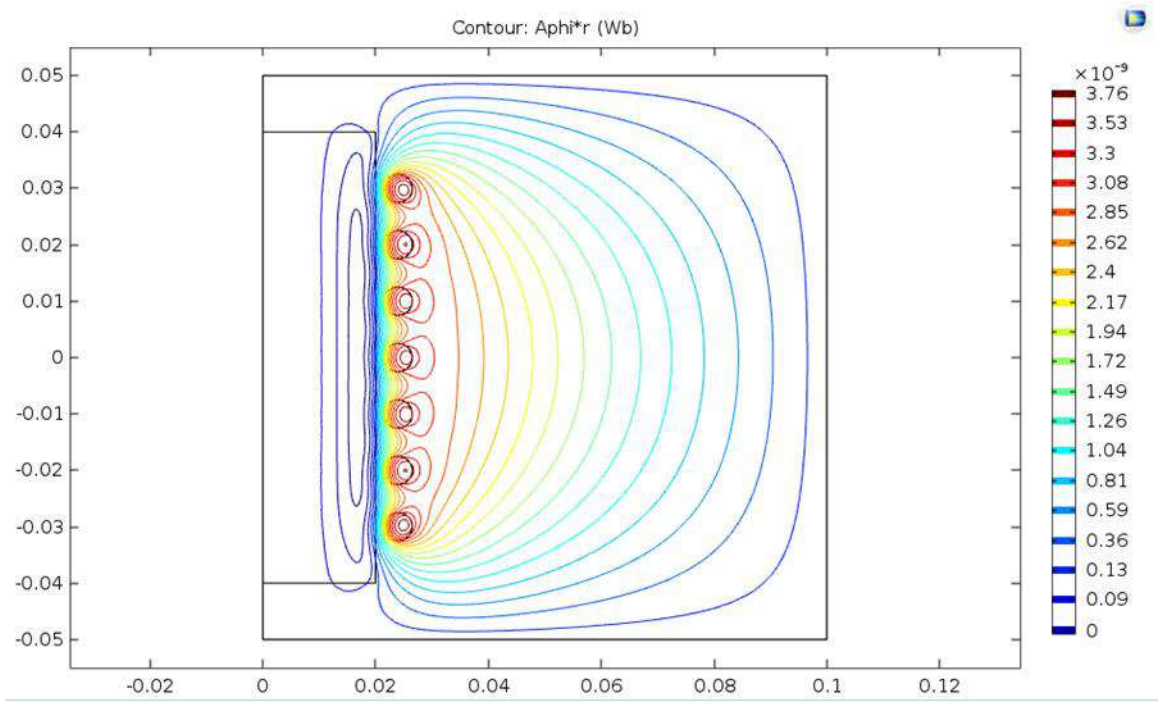


Figure 13 Contour du flux magnétique (Wb) à B=2T

L'analyse électromagnétique de la densité de courant induit pour f=1 KHz, et f=300 Hz s sont représentés sur les figures 14 et 15 respectivement.

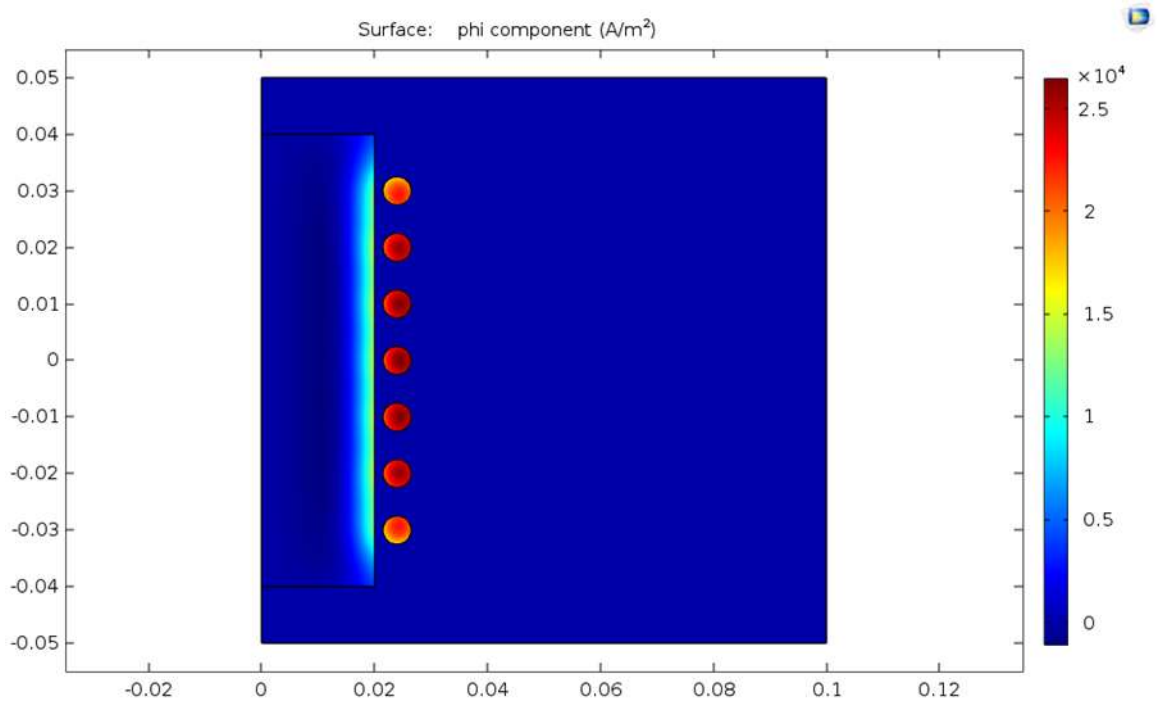


Figure 15 Résultat de l'analyse électromagnétique de la densité de courant induit (unité : $A.m^{-2}$) B=2T et a f=1 KHz

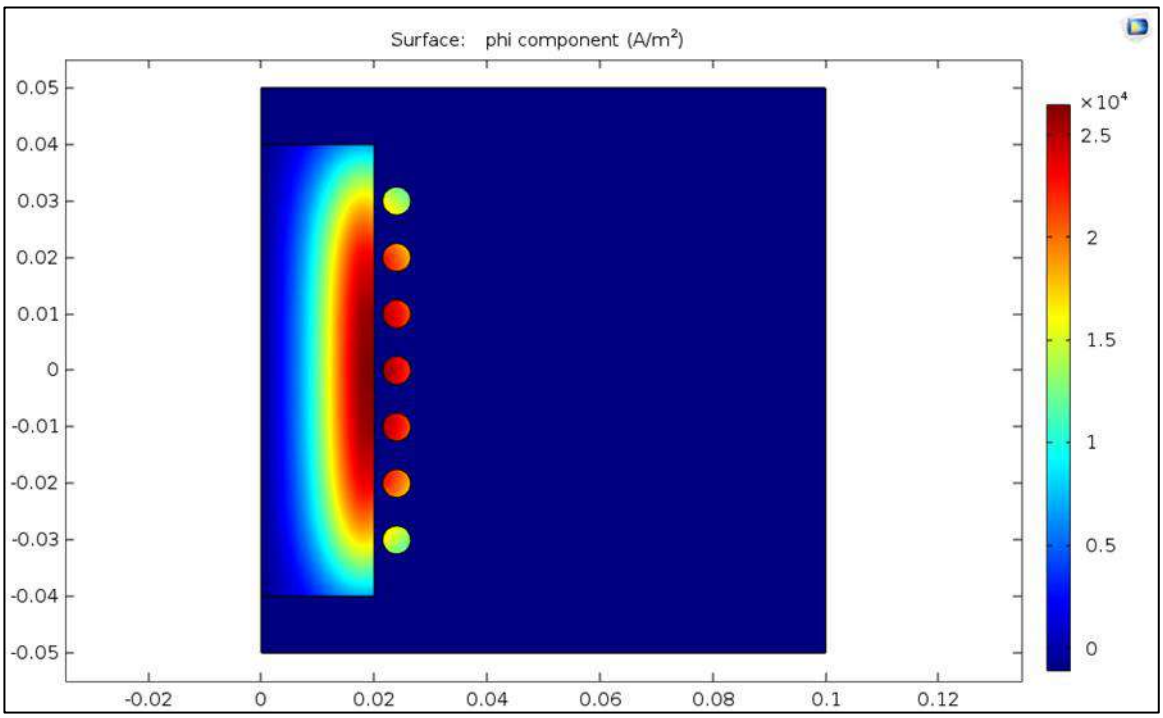


Figure 14 Résultat de l'analyse électromagnétique de la densité de courant induit (unité : $A.m^{-2}$) B=2T et a f=300 Hz

Le courant de Foucault effectif est situé à partir de la paroi latérale de la surface et aucun courant n'est trouvé dans la position centrale. Une valeur positive représente la densité de courant de la bobine, tandis qu'une valeur négative présente le courant induit dans la billette. Le courant de Foucault circule dans une peau mince et se concentre sur la surface extérieure. Le courant induit diminue dans la zone interne et est attribué à un effet de profondeur de peau. L'augmentation de la densité de courant à la surface augmente avec la température. L'intérieur de la billette est chauffé par conduction thermique depuis la surface. Les résultats précédents sont confirmés par l’analyse électromagnétique de la densité de courant induit.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé brièvement sur les méthodes numériques et ses développements avec l'outil informatique, en suite on cite quelques logiciels utilisant la méthode des éléments finis en particulier le Comsol Multiphysics.Nous avons fourni un bref résumé de ce programme.

On propose un système de chauffage par induction pour chauffe un cylindre plein en acier, C'est en utilisant la fréquence de 300 Hz puis la fréquence de 1 kHz sous flux magnétique estimée à 2 T et en les comparant en termes d'efficacité

On a élaboré un modèle bidimensionnel sous Comsol Multiphysics. D'après la simulation on remarque que cette technique permet de réduire le temps de chauffage de l'acier par rapport aux méthodes de chauffe plus standard.

CONCLUSION GENERALE

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.

L'équation de l'électromagnétisme utilisé dans COMSOL permet de localiser les nœuds qui l'équation va être discrétisé. A cet effet, un maillage non-structuré, a été utilisé.

La simulation du modèle de chauffage par induction pour le flux magnétique B=2T et la fréquence f=300Hz, pour un temps de simulation egale à 350s. La température maximale atteinte est de 340 °C, montre que le champ électromagnétique provoque le chauffage du matériau par induction, ensuite la chaleur sera transférée par convection au fluide qui l'entoure.

Une évolution temporelle de la température de 295 jusqu'au 346 K pour une période de 350s. L'élévation rapide a été observée pour un intervalle de 150s

Le contour du flux magnétique est très développé pour B=2T que pour B=1T. ce qui nous permet de conclure que l'évolution temporelle des grandeurs électromagnétiques et thermiques au cours du processus donne un bon chauffage de ce matériau.

Bibliographie

[1] G. Develey, « Chauffage par induction électromagnétique : principes », Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, no. 5935, 1999.

[2] 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.

[3] 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 .

[4] 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.

[5] L. Levacher, D. Clodic, et F. Marechal, « Efficacité énergétique pour l'industrie: des technologies existantes aux solutions innovantes », ECLEER, http://www.ecleer.com/.

[6] C. Oberlin, « Électrothermie industrielle: Introduction », Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, vol. 12, no. 5900, p. D5900, 1999.

[7] http://www.gpgyjr.com.cn/, « Theory of Heating by Induction ».

[8] https://www.techno-science.net/definition/3859.html

[9] Valérie Labbé. Modélisation numérique du chauffage par induction : approche éléments finis et calcul parallèle. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2002.

[10] Sven Wanser. Simulation des phénomènes de chauffage par induction. Application à la trempe superficielle. Thèse de doctorat. École Centrale de Lyon, Lyon, 1995.

[11] Lamb, H. 1883. On electrical motions in a spherical conductor. Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 174, 519-549 p.

[12] Ida, Nathan. 2000. Engineering electromagnetic. Springer. 396 p.

[13] Romain PASCAL. Modélisation du traitement thermique superficiel par induction. Thèse de doctorat. L'Ecole Centrale De Lyon, 2003.

[14] 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.

[15] 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.

[16] MARIEM BEN HAMOUDA. Étude, Conception Et Modélisation De La Diffusion De La Chaleur Dans Les Tissus Biologiques. Mémoire de la maitrise. Université du Québec à Trois-Rivières, 2015.

[17] RUDNEV, V. – LOVELESS, D. – COOK, R. –BLACK, M.: Handbook of Induction

[18] COMSOL Multiphysics User's Guide, Version 4.3a, Comsol AB, October, 2012

[19] Gleason, William. 2012. Fuel cell technicians guide. Cengage US. 7 p.

[20] http://cfao30.ulb.ac.be/beams/teaching/meca-h-501/Notes/tp01-introduction-Comsol.pdf.