

N° Ordre...../Faculté/UMBB/2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

BELFLITI Akram

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Electrique/Electricité industrielle

Thème

**Etude d'un chauffage à induction monophasé-
simulation/ SIMULINK-MATLAB et COMSOL**

Devant le jury :

BENJEGHABA	Omar	MAA	UMBB	Président
KHELIFI	Fateh	MCA	UMBB	Examineur
TADJER	Sid Ahmed	MCB	UMBB	Examineur
HAMADACHE	Med	MCB	UMBB	Encadreur

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Je tiens à remercier avant tout, mes parents qui m'ont soutenu et encouragé tout le long de ma formation et pour l'intérêt et l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté pour la concrétisation de ce projet de fin d'études.

Je tiens aussi à exprimer tous mes remerciements et mon respect à mon promoteur HAMADACHE MOHAMMED qui m'a transmis beaucoup de son savoir faire et de ses connaissances théoriques et pratiques.

Je remercie également les enseignants qui m'ont encouragé à continuer ce travail et surtout l'ensemble des membres de notre club scientifique « AEPI New Vision » avec lesquels j'ai passé de formidables années et appris énormément de choses notamment grâce à nos diverses activités et travaux au sein du laboratoire du club.

Je remercie mes amis(es) pour leurs soutient et encouragements ainsi que toute personne ayant contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce projet.

Belfliti Akram.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, fruit de mes années d'études à ceux qui ont consacré toute leur vie pour ma réussite, à mes chers parents.

A toute ma famille.

A tous mes amis(es).

A mes enseignants et à mon promoteur

M. HAMADACHE

A Tous mes camarades du département et de la faculté.

Aux membres de notre club scientifique « AEPI New Vision ».

Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Belfliti Akram.

Table des Matières

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I	Présentation générale des procédés de chauffage par induction	1
	Introduction	1
I.1.1	Présentation de l'électrothermie	2
I.1.2	Le principe du chauffage par induction	3
I.1.3	Les technologies de chauffage par induction	4
I.1.4	Intérêt et limitation du chauffage par induction	9
I.2	Applications industrielles du chauffage par induction	9
I.2.1	La fusion des métaux ou de leurs alliages	10
I.2.2	Le chauffage de masse	10
I.2.3	Traitements thermiques	13
I.2.4	Les procédés d'assemblage	14
I.3	Les avantages et les inconvénients du chauffage par induction	16
I.4	Installation de chauffage par induction	17
I.4.1	Equipement de chauffage par induction	17
I.4.2	Les paramètres de réglage	18
I.4.3	Ordres de grandeur des paramètres caractérisant les chauffages par induction	19
I.5	Travaux sur les systèmes d'alimentations du chauffage par induction	21
	Conclusion	24
Chapitre II	Théorie de chauffage par induction	
	Introduction	25
II.1	La résistance électrique	25
II.2	La perméabilité magnétique	26
II.3	Profondeur de pénétration	27
II.4	Modèles électromagnétique et thermique	29
II.5	Caractéristiques électriques du chauffage par induction	32
II.5.1	Puissance dissipée dans la pièce	32
II.5.2	Rendement (inducteur – charge)	32
II.5.3	Facteur de puissance	33
II.5.4	Résistivité électrique	33
II.5.5	Nature magnétique du matériau	34
II.6	Transmission de la chaleur et échauffement des corps	34
II.6.1	Loi de Fourier	34
II.6.2	Conduction	35
II.6.3	Rayonnement	36
II.6.4	Convection	36
II.6.5	Capacité calorifique	37
II.7	Influence de la température et point de Curie	37
II.7.1	Point de Curie	37
II.7.2	Différence entre au-dessous et au-dessus de la température de Curie	37
II.7.3	Différence entre un état ferromagnétique et un état paramagnétique	38
II.7.4	Matériaux ferromagnétiques	39

II.7.4	Analyse inverse pour l'identification des paramètres physiques	40
	Conclusion	41
Chapitre III	Modèles numériques et modes de couplage magnéto-thermique	
	Introduction	42
III.1	Type d'inducteur	42
III.2	Les règles simples de dimensionnement d'une installation	43
III.2.1	Configuration de base du chauffage avant formage	43
III.2.2	Calcul du besoin énergétique	43
III.2.3	Schéma électrique équivalent de l'inducteur	44
III.4.3	Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles	45
III.4.3.1	Méthode des différences finies	45
III.4.3.2	Méthode des volumes finis	45
III.4.3.3	Méthode des éléments finis	47
III.4.3.4	Analyse du couplage magnéto-thermique par les éléments finis	47
III.4.4	Les modes de couplage existants	49
IV.1	Les différentes structures des onduleurs à résonance	50
IV.1.1	Généralités	50
IV.1.2	Structures de base des onduleurs à résonance	50
IV.1.3	Onduleur à résonance série	51
IV.1.4	Onduleur à résonance parallèle	52
IV.1.5	Etude comparative entre onduleur à charge série et onduleur à charge parallèle	53
IV.1.6	Commande par modulation de largeur d'impulsions	54
IV.2.5	Modélisation de la charge	56
IV.2.6	Simulation d'onduleur a résonance pour le chauffage par induction	57
	Conclusion	59
ChapitreIV	Simulation du couplage magnéto-thermique par COMSOL	
	Introduction	60
V.1	Présentation de COMSOL Multiphysics	61
V.1.1	Méthodes numériques et l'outil informatique	61
V.1.2	Logiciels utilisant les éléments finis	61
V.1.3	COMSOL Multiphysics	61
V.2	Simulation numérique	63
V.2.1	Présentation du problème	64
V.2.2	Phénomènes physiques dans l'induction	64
V.2.2.1	L'électromagnétisme dans l'induction	64
V.2.2.2	Transfert de chaleur	66
V.2.2.3	Couplage électromagnétique-thermique	67
V.2.3	Construction de système sur COMSOL Multiphysics	69
V.2.4	Résultat de la simulation	73
V.2.5	Modes de fonctionnement de la machine à induction	79
IV.3	Réalisation de chauffage par induction	82
IV3.1	le matériels utilisés	82
IV3.2	Réalisation des cartes	83
IV4	Projet finale	84
	Conclusion	86

Conclusion générale

Annexe A	IGBT avec Diode en antiparallèle BUP307D.
Annexe B	Driver IR2113.
Annexe C	Research Article : « Induction Heating System Topology Review ».
Annexe D	MOSFET chauffage par induction.
Annexe E	Solution de simulation de COMSOL®
Annexe F	Metallurgical insights for induction heat treaters.
Annexe G	génération du signal carré par arduino.
Annexe H	programme arduino.
Références bibliographiques	

Liste des figure

Figure I-1-Techniques de production de la chaleur par l'électricité

Figure I-2-Principe du chauffage par induction

Figure I-3- Four à induction à creuset

Figure I-4- Four à induction à canal.

Figure I-5 Fusion par lévitation d'un matériau

Figure I-6 Types de construction de bobines pour fusion par lévitation

Figure I-8 Réchauffage avant formage

Figure I-9 Réchauffage avant forgeage

Figure I-10 Réchauffage des brames.

Figure I-12 Réchauffage des barres.

Figure I-13 Réchauffage des tubes.

Figure I-14 La trempe superficielle.

Figure I-15 Le revenu d'un traitement thermique

Figure I-16 Le brasage

Figure I-17 Le soudage

Figure I-19 Inducteurs pour durcissement

Figure I-20 Schéma général d'une installation de chauffage par induction

Figure I-21 le schéma de l'oscillateur de type Classe-E

Figure II-1- Allures de profondeur de pénétration.

Figure II-2 Flux longitudinal.

Figure II-3 Flux transverse.

Figure II-4- Evolution de la résistivité en fonction de la température pour l'or

Figure II-5- Volume élémentaire de Fourier

Figure II-6- Conductivité thermique pour le cuivre

Figure II-7 Transfert de chaleur par conduction

Figure II-8 Convection naturelle.

Figure II-9 Convection forcée

Figure II-10- Chaleur massique pour le cuivre

Liste des figure

- Figure III-1 chauffages par induction avec des inducteurs de formes différentes
- Figure III -2 Schéma de principe du chauffage avant formage de demi-produits
- Figure III -3 Schéma de principe du chauffage avant formage de demi-produits
- Figure III -4 Facteurs de transfert de puissance active et réactive dans les tubes
- Figure III-5 Régions constitutives d'un dispositif de chauffage par induction
- Figure III-6 Schéma d'interaction
- Figure III.8 Schéma de principe de la commande MLI sinus-triangle
- Figure III.9 Forme d'onde de la commande MLI triangle sinusoïdale
- Figure III.10 : Schéma équivalent (inducteur + pièce + condensateur en série)
- Figure III.11 SIMULATION du système
- Figure IV.1 Logiciel COMSOL Multiphysics .
- Figure IV.2 Le précède de chauffage par induction.
- Figure IV.3 Équation de l'électromagnétisme utilisé dans COMSOL
- Figure IV.4 Schéma du couplage fort utilisé dans COMSOL
- Figure IV.5 Choix des modules physiques
- Figure IV.6 Choix du type d'étude
- Figure IV.7 Géométrie du modèle 2D axisymétrique
- Figure IV.8 choix des matériaux
- Figure IV.9 propriétés d'Air
- Figure IV.10 propriétés de cuivre
- Figure IV.11 propriétés de l'acier
- Figure IV.12 propriétés de champ magnétique
- Figure IV.13 propriétés de la bobine
- Figure IV.14 Transfert de chaleur dans des solides
- Figure IV.15 Maillage retenu pour le modèle 2D axisymétrique
- Figure IV.16 Compilation des équations
- Figure IV.17 les distributions de la densité de flux magnétique
- Figure IV.18 Distribution de la température à la fin de la chauffe
- Figure IV.19 Processus de trempe
- Figure IV.21 diagramme de fraction de phase et température
- Figure IV.22 Fraction de phase

Liste des figure

Figure IV.23 Distribution de la température de la pièce

Figure IV.24 Allure de courant

Figure IV.25 diagramme block de power controller

Figure IV.26 variation de l'inductance a point de curie

Figure IV.27 la perméabilité magnétique en fonction de la température

Figure IV.28 Schéma du couplage COMSOL-MATLAB

Figure IV.29 Puissances simulées en mode «AC current» et «DC power»

Figure IV.30 Puissances mesurées en mode «AC current» et «DC power»

Figure IV.31 Distribution de la température sur la surface de la pièce pour les modes «AC current» et «DC power»

Figure IV.32 Condensateur

Figure IV.33 Générateur de pulses

Figure IV.34 transformateur

Figure IV.35 MOSFETs

Figure IV.36 Inducteur

Figure IV.37 Oscilloscope

Figure IV.38 Carte d'adaptation de signaux GBF

Figure IV.39 Carte Optocoupleur 4N35

Figure IV.40 Carte injection signaux gache (MOSFET)

Figure IV.41 projet finale

Figure IV.42 Visulation de la tension et le courant

Figure IV.43 Visulation de la tension et le courant inverse

Liste des figure



Liste des tableaux

Titre du tableau

Tableau I.1 Caractéristiques des fours à creuset.

Tableau II.1 Résistivités et coefficients de température

Tableau II.2 Profondeur de pénétration δ en fonction de ρ , μ_r et f .

Tableau II.3 matériaux ferromagnétiques associés à la température de curie

Tableau IV.1 Comparaison entre les deux types d'onduleurs.

Liste des symboles

- B** : Induction magnétique [Tesla]
- C** : Capacité de la charge [F]
- C_f** : Capacité du filtre [F]
- CALC** : circuits d'aide à la commutation
- E** : Tension à l'entrée de l'onduleur [v]
- e** : Erreur de puissance ($P_{ref} - P_{réelle}$) [W]
- Δe** : Vitesse de l'erreur
- E_h** : Tension d'entrée du hacheur [v]
- F** : Facteur de transmission de puissance
- f** : Fréquence [Hz]
- f_c** : Fréquence de commutation [Hz]
- f_r** : Fréquence de résonance [Hz]
- h** : Hauteur du cylindre [m]
- H** : Intensité du flux magnétique [A/m]
- I_f** : Le fondamentale du Courant de charge [A]
- I_c** : Courant traversant le condensateur Cf [A]
- I_e** : Courant à l'entrée du hacheur [A]
- I_L** : Courant dans l'inductance [A]
- I_{Lmax}** : Courant maximum dans l'inductance du filtre [A]
- I_{Lmin}** : Courant minimum dans l'inductance du filtre [A]
- ΔI_l** : Ondulation du courant dans l'inductance du filtre [A]
- Ke** : Le gain de normalisation de l'erreur
- Koc** : Le gain de la fonction de transfert en boucle ouverte
- Kp ,Ki** : Les gains du régulateur PI
- KΔe** : Le Gain de la variation d'erreur
- KΔu** : Le Gain de variation de la commande floue
- L** : L'inductance de la charge [H]
- L_f** : L'inductance du filtre [H]

Liste des symboles

- m_f : Coefficient d'amortissement du filtre
- MLI** : modélisation largeur d'impulsion
- P** : Opérateur de Laplace
- P_{abs} : Puissance absorbée par la charge [W]
- P_{ref} : Puissance de référence pour la régulation [W]
- $P_{réelle}$: Puissance réelle filtrée [W]
- P_c : pertes par commutation [W]
- Q** : Facteur de qualité
- R** : Résistance de la charge [Ω]
- T_c : Période de commutation[s]
- t_F temps de fermeture [s]
- t_o : temps d'ouverture [s]
- ΔU Variation de la loi de commande [V]
- V_{AB}, V_s Tensions aux bornes de la charge [V]
- ΔV_c : Ondulation de la tension du hacheur [V]
- V_f : Le fondamentale de la tension de charge [V]
- V_c : tension de commutation [V]
- ω : Pulsation propre de la charge [rd/s]
- ω_r : Pulsation de résonance [rd/s]
- ω_f : Pulsation propre du filtre [rd/s]
- x_r^* : Centre de gravité de la fonction d'appartenance
- Z** : Impédance de la charge [Ω]
- ZCS** : zero-current-switching
- nZCS** : no zero-current-switching
- ρ : Résistivité électrique [$\Omega.m$]
- μ : Perméabilité magnétique [H/m]($\mu=\mu_0 \cdot \mu_r$)
- μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [H/m]
- μ_r : Perméabilité relative

Introduction générale

Grâce aux recherches des dernières décennies, de nombreux procédés industriels nécessitant des opérations de chauffage, font appel à des dispositifs de chauffage par induction. Les applications sont très nombreuses, particulièrement dans le domaine de la métallurgie, les traitements des métaux, la sidérurgie et la fabrication mécanique. Les puissances mises en jeu vont de quelques watts à quelques centaines de kW . La fréquence de fonctionnement, qui est déterminée selon la forme du produit, le traitement désiré et la nature du matériau, peut atteindre des centaines de kHz . Les procédés de chauffage par induction intéressent toute la chaîne industrielle, de la transformation de matière première aux produits finis.

Avant le développement des convertisseurs statique à grande puissance et fréquence variable, il y a quelques dizaines d'années on utilisait, dans les applications du chauffage par induction, soit des convertisseurs rotatifs, ou groupes tournants. Ces convertisseurs peuvent fonctionner à des puissances élevées, ils sont robustes et fiables. Cependant, le chauffage est lent et la puissance volumique injectée est faible.

Les convertisseurs à résonance, de type onduleur, présentent une très bonne solution. Ce sont des circuits électroniques à circuit oscillant série ou parallèle dans lesquels la résonance est exploitée pour minimiser les contraintes électriques et thermiques sur les interrupteurs, réduire les harmoniques et diminuer les pertes de commutation. L'application du principe de la résonance a permis la réalisation des alimentations à hautes performances dans plusieurs domaines. Le fonctionnement à moyenne et à haute fréquence est devenu facile grâce à la commutation douce des interrupteurs. Pour ces raisons les convertisseurs à résonance ont pris une importance remarquable par rapport aux convertisseurs classiques à découpage dans plusieurs applications industrielles. Ces convertisseurs ont des structures complexes et leur mise en application nécessite une connaissance parfaite de la structure et du mécanisme de commutation des interrupteurs.

Notre contribution dans ce mémoire est de développer un modèle magnéto-thermique en tridimensionnelle d'un système de chauffage par induction. Ce modèle sera élaboré sous logiciel Comsol Multiphysics utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre les équations aux dérivées partielles.

Introduction générale

Ce travail est présenté en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons les travaux parmi les plus récents concernant les systèmes d'alimentation du chauffage par induction, ensuite l'étude des phénomènes accompagnant la phase de fonctionnement. Ces travaux sont en grande partie basés sur l'étude des systèmes avec convertisseur statique à résonance. Ainsi le principe de fonctionnement du chauffage par induction, ses propriétés, les différentes applications industrielles, les structures de puissance et les convertisseurs statiques utilisés pour l'alimentation de ces dernières sont présentés dans ce chapitre.
- Le deuxième chapitre est consacré à la théorie du chauffage par induction ou les différents phénomènes physiques entrant en jeu sont décrits. Les équations électromagnétiques et thermiques sont aussi présentées.
- Dans le troisième chapitre, on s'intéressera à la simulation détaillée de notre système : Source, convertisseur (*Onduleur à Résonance*) et notre charge qui est représentée par le Chauffage par Induction à l'aide du Logiciel *Matlab Simulink*.
- Dans le dernier chapitre on présentera le logiciel Comsol Multiphysics comme outil de simulation puis on traitera le problème de chauffage par induction; pour le couplage, on développera un modèle magnéto-thermique en tridimensionnelle.

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.

Introduction

Le phénomène de chauffage par induction fut découvert par le physicien anglais Mickael Faraday en 1831. C'est dans les années 1900 que l'on commence à utiliser l'induction comme procédé de chauffage de pièces en métal, mais il est très limité à cause des faibles puissances disponibles.

En 1922, l'avènement des générateurs dynamiques le rend plus efficace et des études scientifiques sur le chauffage par induction montrent que l'on peut chauffer différentes parties d'une pièce sans chauffer les autres en jouant sur la fréquence, la puissance ainsi que les paramètres matériaux tels que la résistivité électrique et la perméabilité magnétique relative.

L'induction électromagnétique a pour particularité de générer la chaleur directement à l'intérieur du matériau à chauffer. Cette particularité présente de nombreux atouts par rapport aux méthodes de chauffe plus standard, notamment la réduction des temps de chauffe et des rendements élevés, ou encore la possibilité de chauffer de façon très locale.

Les hautes densités de puissance mises en jeu permettent d'obtenir des vitesses de chauffe très rapides :

- Il permet des transferts de chaleur à grande puissance et cela à l'intérieur même des pièces à chauffer .
- L'effet thermique peut être concentré à l'endroit voulu sans chauffer les autres parties de la pièce traitée .
- Le temps de chauffage est très court par rapport aux autres procédés de chauffage.

I-1-Présentation générale des procédés de chauffage par induction

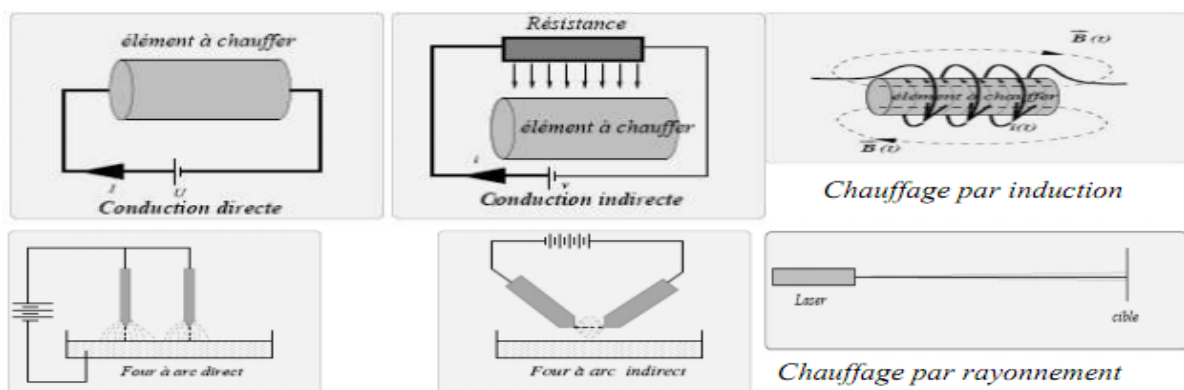
I -1-1- Présentation de l'électrothermie

L'électrothermie consiste à utiliser l'énergie électrique pour produire la chaleur, il existe plusieurs techniques utilisant l'électricité pour produire la chaleur, On distingue :

1-Des techniques basées sur l'effet Joule (par conduction, par induction, par arc électrique...) : le chauffage par conduction de la pièce peut se produire par conduction directe ou indirecte; dans un chauffage par induction, une pièce conductrice est soumise à un champ électromagnétique variable avec le temps. Cette pièce est le siège de courants induits qui chauffent celle-ci par effet Joule. Le chauffage par arc électrique trouve son origine dans le passage du courant entre deux électrodes plongées dans un milieu ionisé. Lorsque ce milieu ionisé est un gaz autre que l'air celui-ci est nommé plasma. On distingue les fours à arc direct et les fours à arc indirect.

2- Des techniques basées sur le rayonnement : une source (Laser) émet un rayonnement électromagnétique. Le faisceau émis présente deux propriétés importantes : une très faible ouverture et un rayonnement presque monochromatique; ces deux propriétés lui confèrent une densité de puissance très importante.

3-Des Techniques liées aux frottements : sous l'effet d'un champ électrique, les molécules d'un matériau sont polarisées et se déforment. Les changements de direction du champ électrique mettent en mouvement les molécules, qui en se frottant les unes contre les autres, s'échauffent. La figure I-1 présenté les différentes techniques utilisant l'électricité pour produire la chaleur.



FigureI-1-Techniques de production de la chaleur par l'électricité

I-1-2- 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 variable dans le temps, 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. Enfin la chaleur se propage vers le centre de la pièce par diffusion thermique, (voire figure I-2).[15]

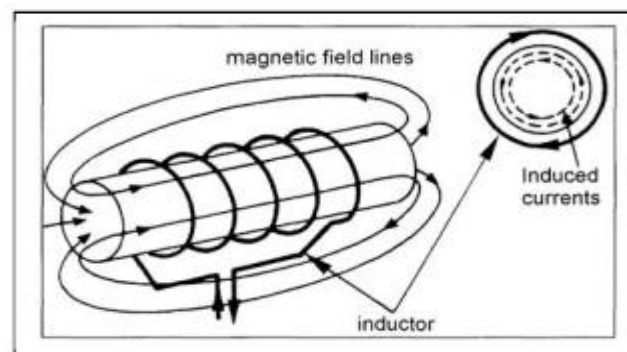


Figure I-2-Principe du chauffage par induction

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. On distingue deux types de chauffage par induction l'une direct lorsque les courants de Foucault se développent directement dans la pièce à chauffer, en provoquant son échauffement par effet joule, et l'autre indirect où les courants sont induits dans un élément en contact thermique avec la charge.[15]

I-1-3-Les technologies de chauffage par induction

Le procédé de chauffage par induction est de plus en plus utilisé et ceci de manière croissante 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. Les traitements de surface recouvrent des opérations très diverses:

- dégraissage, décapage, séchage.
- galvanisation et étamage.
- cuisson de vernis et peintures, plastification.

Dans le cas de l'utilisation du chauffage par induction, le transfert thermique du revêtement s'opère du support vers l'extérieur, ce qui est favorable aux opérations de séchage et de cuisson (évacuation des solvants et vapeurs). Ce mode de chauffage permet donc 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 autocreuset. En effet, la résistivité électrique des oxydes (1 à 10 Ω .cm à C o 1500) 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 C o 2500 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.[15]

En ce qui concerne la fusion, on distingue généralement trois types de fours de fusion par induction : les fours à creuset, les fours à canal et fusion par levitation .

Dans le cas d'un four à creuset la surface intérieure du creuset est constituée d'un revêtement réfractaire (brasque), qui contient le matériau à porter à la fusion et est entouré par la bobine inductrice (**figure I-3**).

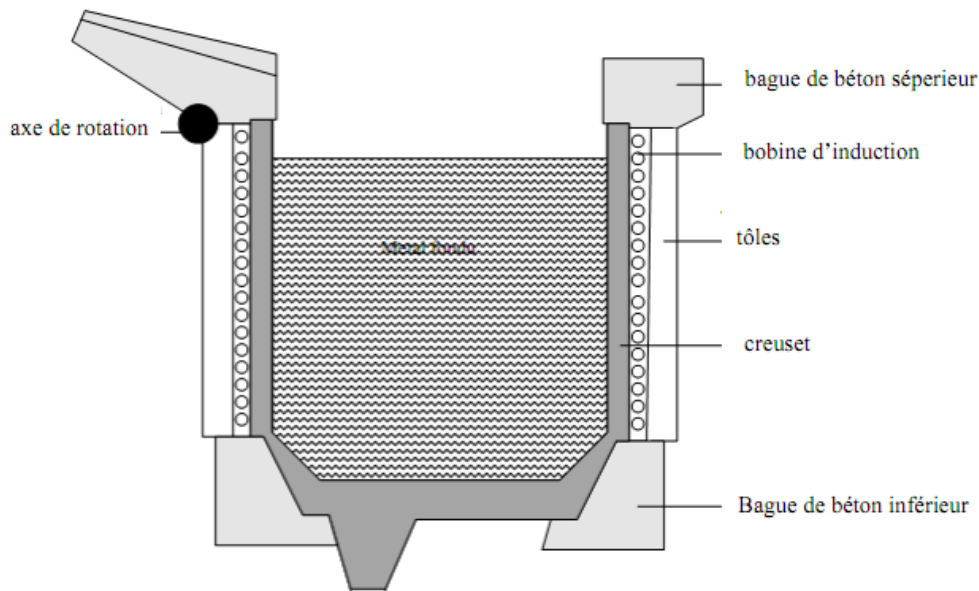


Figure I-3- Four à induction à creuset.

Les fours à creuset sont utilisés dans des applications à 50Hz mais aussi à moyennes fréquences. Les gammes de puissance, jusqu'à 10MW pour des applications standards, et jusqu'à 1200kW/ton pour des applications spécifiques, sont très élevées, et permettent réduire considérablement les temps de fusion (**Tableau 1.1**).

Les fours à creuset basse fréquence (50Hz) sont dédiés aux applications de taille importante (en termes de puissance et de capacité). Les applications à fréquences moyennes sont de taille plus modeste, mais offrent de plus grandes flexibilités de production et sont plus compactes.

<i>Capacité totale (t)</i>	1.5		2		3		4	
<i>Capacité utilisable (t)</i>	1		1.5		2.5		3.5	
<i>Puissance du four (kW)</i>	300	600	300	600	600	900	600	900
<i>Capacité de fusion (t/h)</i>	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	1.0	1.5
<i>Consommation en eau de refroidissement (m³/h)</i>	17	20	17	20	20	30	20	30

Tableau 1.1 Caractéristiques des fours à creuset.

Dans le cas d'un four à canal, le réservoir est en communication avec un canal dont les deux extrémités débouchent dans le réservoir. La bobine d'induction est entourée par le canal de communication. Du point de vue électrique, ceci est équivalent à un transformateur avec circuit magnétique fermé, dont le canal constituerait le secondaire (**figure II-4**).

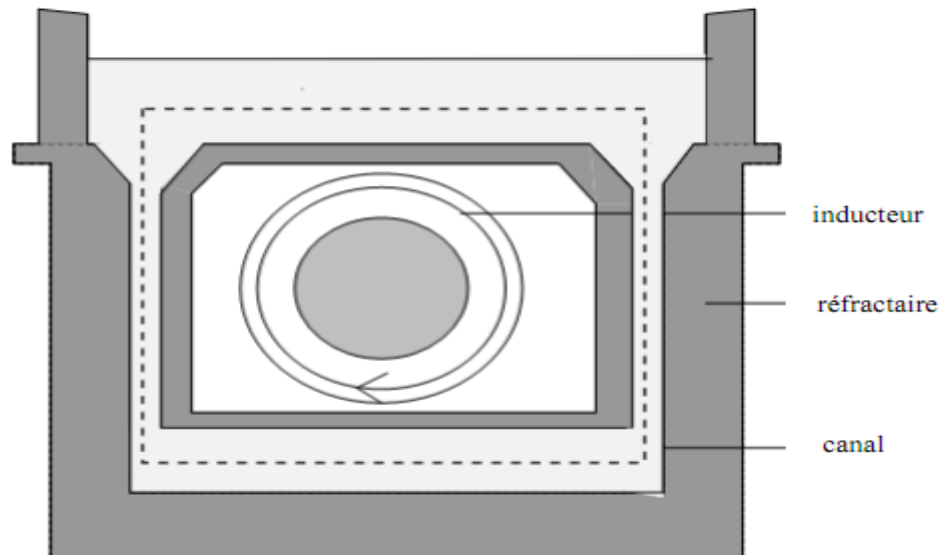


Figure I-4- Four à induction à canal.

Le métal s'échauffe dans le canal par effet Joule, sous l'action des courants induits. La circulation du métal dans le canal s'effectue par effet de thermosiphon et par effet électromagnétique. Cette migration du métal entre le canal et le creuset crée un léger brassage (beaucoup plus faible que dans le cas des fours à creuset). Pour mettre en fonctionnement le four à canal, on doit d'abord remplir le four avec du métal puis mettre les inducteurs sous tension.[1,14,16]

Dans le cas de La fusion par lévitation, l'induction de courants de Foucault dans un échantillon métallique par un champ électromagnétique variable (alternatif) [10]. Quelque soit sa nature le matériau se comporte comme un corps diamagnétique dans le champ. Il est repoussé vers l'espace où le champ est faible. Cela est dû à l'interaction entre le champ externe et les courants internes induits dans le matériau conducteur. Ces courants de Foucault chauffent l'échantillon par effet Joule et sont en même temps soumis à des forces de Lorentz. Lorsque le champ magnétique est généré par une bobine de forme appropriée, les forces peuvent atteindre une amplitude suffisante pour faire léviter l'échantillon. Simultanément, quand le métal est en fusion il se déforme à cause de la pression magnétique. La composante de rotation de la force de lévitation, conjointement avec les gradients thermiques dans le métal

liquide (provoquant flux de convection), produire un effet d'agitation dans la gouttelette. L'avantage principal de sustentation est que le métal est fondu sans contact. Les applications de cette technique sont basées sur cet avantage principal: mesure des propriétés thermophysiques des métaux liquides, l'élaboration de matériaux qui nécessitent un grand degré de pureté, etc.



Figure I-5 Fusion par lévitation d'un matériau

On peut trouver beaucoup de projets de construction de bobines pour la fusion par lévitation. En gros, ils peuvent être divisés en trois groupes principaux (Fig.3.5):

- Bobines à deux parties de forme cylindrique avec un axe vertical de symétrie (a).
- Bobines type "bateau" (b).
- Creuset froid de cuivre multisection CCLM (c).

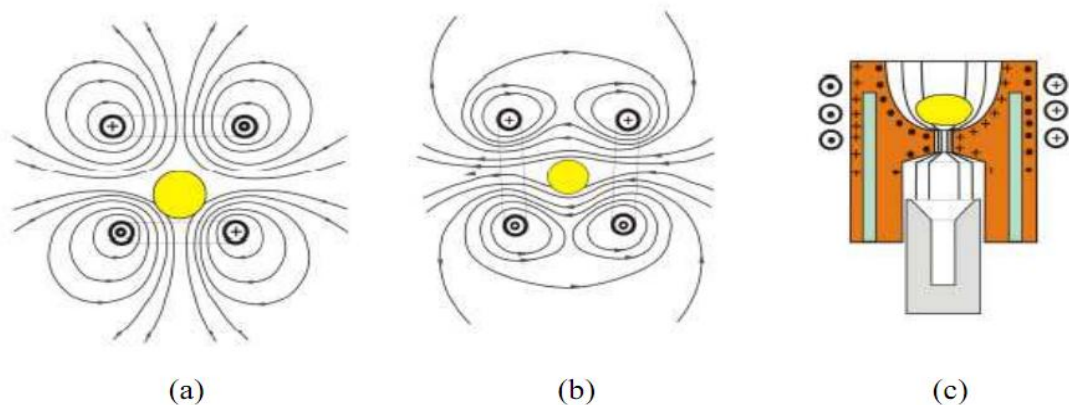


Figure I-6 Types de construction de bobines pour fusion par lévitation

I-1-4- Intérêt et limitation du chauffage par induction

Quelle que soit la nature des applications industrielles, le chauffage par induction présente un certain nombre d'avantages intrinsèques qui expliquent son développement croissant :

- rapidité de chauffage liée à la possibilité d'obtenir des densités de puissance très élevées,
- localisation précise de l'effet thermique grâce à une conception d'inducteur et une fréquence de fonctionnement adaptée à la pièce à chauffer,
- possibilité de chauffer à des températures très élevées avec un rendement pratiquement indépendant de la température.

Ce procédé répondant parfaitement aux exigences industrielles de la moyenne et grande série :

- facilité d'automatisation des équipements,
- absence d'inertie thermique (démarrage rapide),
- bonne reproductibilité des opérations effectuées,
- rendement de chauffage souvent très élevé,
- absence de pollution par la source de chaleur (source froide),
- bonnes conditions de travail.[16]

I-2- Applications industrielles du chauffage par induction

Le chauffage par induction s'applique aux matériaux ayant une faible résistivité électrique (entre $10^{-8} \Omega.m$ et $10^{-1} \Omega.m$). Les puissances mises en jeu peuvent varier de quelques centaines de watts pour de petits fours à induction à plusieurs mégawatts pour de grosses installations de fusion. Les installations de chauffage par induction se trouvent principalement dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique où elles sont utilisées

pour la fusion, pour le chauffage avant formage, pour le traitement thermique et des applications diverses. Cependant, il y a d'autres applications innovantes telles que par exemple la fusion directe de verres et d'oxydes dans le domaine de la chimie et les plaques chauffantes de cuisine dans le domaine grand public.

Dans l'élaboration de produits ou de demi-produits métallurgiques (métaux ou leurs alliages) on distingue cinq grandes opérations : la fusion, le réchauffage avant formage, les traitements thermiques de finition, les traitements de surface et les procédés d'assemblage.

I-2-1-La fusion des métaux ou de leurs alliages

La fusion par induction est un procédé dans lequel le métal ou l'alliage est fondu sous forme liquide dans un four à induction pour ensuite être versé dans un moule habituellement. Elle est très regardée en raison de son processus propre et respectueux de l'environnement, sans compter qu'elle peut aussi être utilisée dans le vide ou en atmosphère inerte. Les fours à induction de fusion se trouvent dans la plupart des fonderies modernes. Ils ont des tailles différentes et sont utilisés pour la fusion des métaux tels que le fer, l'acier, l'aluminium, le cuivre et les métaux précieux.



Figure I-7 Fusion par induction.

I-2-2-Le chauffage de masse

- **Réchauffage avant formage et forgeage**

La déformation à chaud est une opération fondamentale de la métallurgie. Le chauffage d'un métal à cœur facilite considérablement sa déformation plastique. La technique de l'induction s'adapte particulièrement bien au chauffage de demi-produits métalliques.

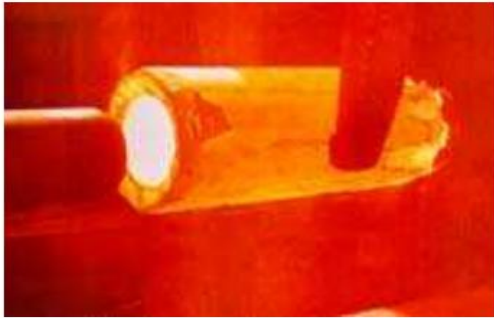


Figure I-8 Réchauffage avant formage.



Figure I-9 Réchauffage avant forgeage.

- **Réchauffage des brames avant laminage**

Le chauffage par induction s'applique bien aux brames avant laminage qui est un procédé de fabrication par déformation plastique concernant différents matériaux. La déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres contrarotatifs appelés laminoirs.



Figure I-10 Réchauffage des brames.

- **Réchauffage des billettes avant formage**

Les billettes ou blooms se réchauffent très bien au chauffage par induction. Elles se présentent sous forme de parallélépipèdes de section carrée ou de cylindres.

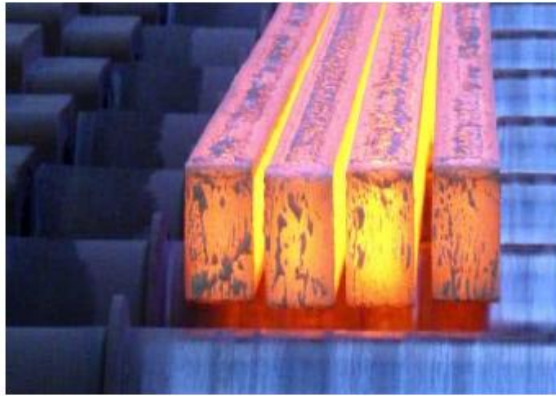


Figure I-11 Réchauffage des billettes

• **Réchauffage des barres et tubes**

Les chauffeuses de barres ont généralement des puissances importantes pouvant aller jusqu'à 10MW, les diamètres de barres étant compris entre 14 et 150mm. Le chauffage des tubes concerne deux grandes catégories d'application :

- Le chauffage total des tubes qui permet leur réduction après soudage longitudinal et leur revêtement; il s'effectue vers 900 à 950°C et est très vorace en énergie
- Le chauffage partiel de tubes pour les cintrer et déformer les embouts par exemple.



Figure I-12 Réchauffage des barres.



Figure I-13 Réchauffage des tubes.

I-2-3-Traitements thermiques

Les traitements thermiques sont destinés à modifier les caractéristiques des matériaux pour renforcer les pièces mécaniques. Ils agissent principalement sur la dureté, la résistance à la rupture, la résilience ou la ductilité.

- **La trempe superficielle**

C'est une opération localisée qui permet d'obtenir une couche durcie d'épaisseur limitée appelée couche superficielle. Le bon contrôle de la localisation du chauffage, spécificité du chauffage par induction, est obtenu grâce à une double optimisation de la fréquence et de la forme, des dimensions et de la disposition de l'inducteur.



Figure I-14 La trempe superficielle.

- **Le revenu et le revenu de détente**

Le revenu et le revenu de détente s'effectuent sur des pièces ayant préalablement subi une trempe. Par rapport aux traitements classiques en fours thermiques, le revenu par induction permet de traiter les composants individuellement, à des températures plus élevées et avec des temps plus courts. Les pièces traitées sont des arbres primaires et secondaires, des pignons d'attaque, des crémaillères de direction, des tiges d'amortisseurs, etc..

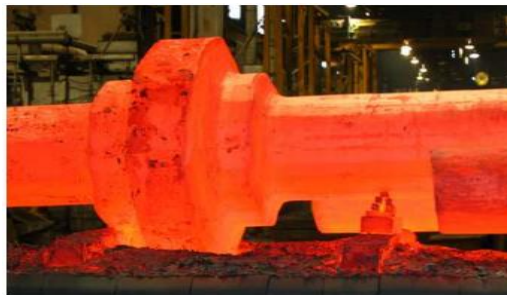


Figure I-15 Le revenu d'un traitement thermique.

I-2-4-Les procédés d'assemblage

- **Le brasage**

Le brasage regroupe les procédés d'assemblage qui lient les matériaux de base par l'intermédiaire d'une mince couche de métal d'apport, la brasure, plus fusible que les matériaux à lier. Le mécanisme de brasage fait essentiellement intervenir la capillarité du métal d'apport à l'état liquide, dans l'espace entre les constituants à assembler, avant sa diffusion en surface des matériaux.

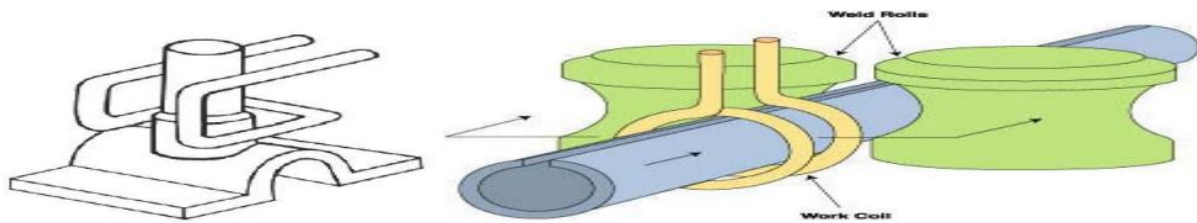


Figure I-16 Le brasage.

- **Le soudage**

Le soudage est une opération qui consiste à assembler par fusion les bords adjacents de deux pièces ou de deux constituants métalliques. Généralement de même nature, elles peuvent, dans certains cas, être de natures différentes.



Figure I-17 Le soudage.

- **Le collage**

Le collage consiste à assembler solidement et durablement deux matériaux au moyen d'un troisième: un adhésif thermoplastique ou thermodurcissable. Le collage par induction

s'applique à des assemblages de matériaux conducteurs de l'électricité, et particulièrement à des assemblages métalliques.



Figure I-18 Le collage.

• Le frettage

Le frettage est un procédé d'assemblage thermomécanique, qui consiste en un emmanchement en force et à chaud. Le procédé utilise les phénomènes de dilatation, puis de rétreint localisé pour assembler des pièces ou des composants mécaniques. Le frettage par induction présente également l'avantage d'être réversible, ce qui n'est pas le cas du soudage ou du collage.

• Durcissement de l'acier par induction

Les aciers dont le pourcentage de carbone est supérieur à 0,3% sont adaptés aux traitements de durcissement de surface. La pièce est d'abord portée à une température de 900°C puis brusquement refroidie. Cette technique est utilisée pour le durcissement des aciers des pignons de boîte de vitesse, des vilebrequins, des soupapes, des lames de scie, des bèches, des rails et bien d'autres applications. Grâce à la précision de chauffe, les consommations d'énergie sont moindres que pour d'autres techniques pour lesquelles le chauffage global du produit est nécessaire. Les densités de puissance mises en jeu pour les applications de durcissement par induction sont de l'ordre de 1,5 à 5kW/cm², et le temps de traitement de 2 secondes !!

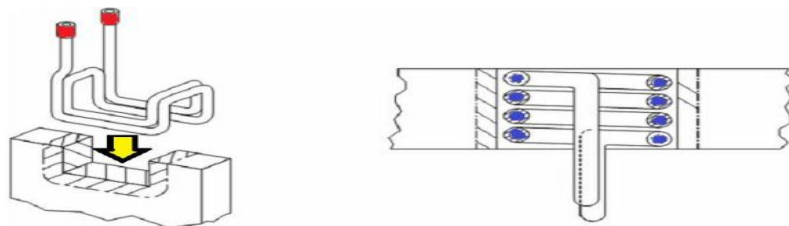


Figure I-19 Inducteurs pour durcissement.

I-3-Les avantages et les inconvénients du chauffage par induction:

- **Les avantages :**

Il est certain que le chauffage par induction présente des avantages qu'on ne trouverait pas ou peu dans les autres types classiques de chauffage. Ces avantages sont:

- la souplesse: les installations de chauffage par induction permettent l'utilisation d'un large éventail de matières premières économiquement et écologiquement intéressantes (ferrailles de récupération de toute nature), dans la production de nuances métallurgiques diverses. On peut également admettre des métaux différents dans la même installation. La régulation des temps de production et la programmation des débits de métal liquide sont rendues plus faciles par l'utilisation possible d'une chaîne d'automatisation, car les constantes de temps sont plus faibles, surtout quand il s'agit d'installations dotées de convertisseurs de fréquence à semi-conducteurs.

- La régularité. Elle caractérise essentiellement la reproductibilité des opérations de fusion ou de traitement de surface qui sont répétées fidèlement tant au point de vue métallurgique que du point de vue consommation d'énergie.

- La précision. Elle conduit à travers tous les contrôles possibles (puissance, courant, tension, fréquence), en cours de marche, à des analyses en temps réel et à des températures à la demande.

- La propreté. La fusion électrique et en particulier par le chauffage par induction est certainement la moins salissante et la moins polluante. Ceci est dû à l'absence de flammes, de cendres, de fumées caractéristiques des combustibles fossiles liquides, solides ou gazeux.

- Dans le chauffage par induction, l'énergie est créée directement à l'intérieur de la masse de la charge, d'où un meilleur rendement entre autres.

- Le chauffage par induction réalise dans les fours à induction un brassage électromagnétique des métaux fondus. Ce brassage est caractérisé par un soulèvement du métal fondu qui s'écoule du centre vers la périphérie, la dénivellation pouvant atteindre quelques centimètres [BM2]. Le brassage électromagnétique permet d'homogénéiser le métal ou les alliages fondus, et favorise ainsi leur affinage, en permettant le renouvellement rapide des surfaces de contact avec le laitier qui prend naissance au-dessus du bain. La hauteur de la dénivellation est proportionnelle à la puissance spécifique P_s qui est une grandeur fondamentale dans le calcul

des installations de chauffage par induction. Elle sera systématiquement calculée dans les chapitres VI et VII à travers le vecteur de Poynting. La puissance spécifique est la puissance par unité de surface de la charge que la source d'énergie peut fournir. Voici quelques puissances spécifiques pour fixer les idées [BM1]:

- chalumeau oxyacétylénique: 1kW/cm^2 et la température peut atteindre 3500°C .
- chauffage par induction: 20 kW/cm^2
- chauffage par bombardement électronique: 500 MW/cm^2 .
- Le diamètre du faisceau est inférieur au millimètre.
- chauffage par laser: 2.1013 kW/cm^2 ; le fonctionnement se faisant par impulsions.

- **Les inconvénients :**

Les inconvénients du chauffage par induction qui sont bons à savoir :

- Le plus gros inconvénient du traitement est le coût associé à fabriquer les inducteurs. Des coûts d'acquisition élevés pour les fortes puissances
- Des champs électriques peuvent apparaître ce qui peut alors perturber sa chaleur peut faire apparaître des champs électromagnétiques néfastes si les isolations sont environnement, lorsque les isolations sont mauvaises ou bien lorsqu'il y a une protection HF
- Lors de mauvaises manipulations, d'autres objets peuvent être involontairement chauffés. Pour y remédier, on utilise le procédé d'émulsion ou le refroidissement par eau.

I-4- Installation de chauffage par induction

I-4-1- Equipement de chauffage par induction

Une unité de chauffage par induction peut être représenté par le schéma ci-dessous :

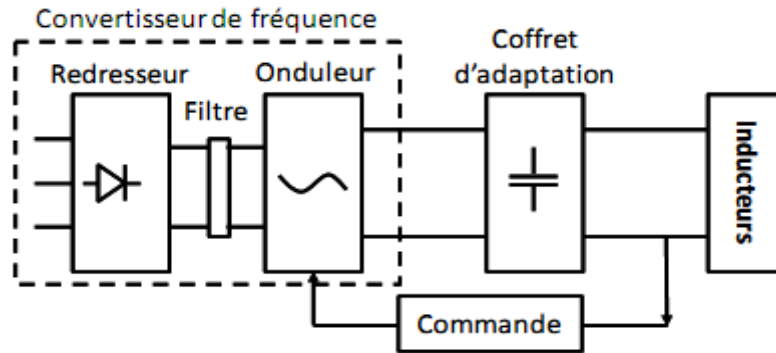


Figure I-20 Schéma général d'une installation de chauffage par induction

Un équipement de chauffage par induction comprend généralement:

- un ou plusieurs inducteurs de chauffage,
- une source à basse ou moyenne fréquence associant un convertisseur de fréquence (générateur ou onduleur) à un coffret d'adaptation d'impédance et de compensation par batterie de condensateurs,
- un système de refroidissement par eau de la source de puissance, du coffret d'adaptation et éventuellement de l'inducteur.
- un système de présentation ou de manutention des pièces à chauffer,
- un ensemble de commande-contrôle de l'installation.[11,17]

I-4-2- Les paramètres de réglage[16,17]

Selon l'application voulue, on dispose dans le procédé de chauffage par induction certains paramètres accessibles à l'utilisateur et qu'on appelle paramètres de réglage.

1-La fréquence :

La fréquence joue un rôle primordial d'autant plus que c'est un paramètre à la disposition de l'utilisateur. En effet, grâce à cette fréquence, on pourra agir sur l'épaisseur de peau qui dépend essentiellement du traitement que doit subir la pièce.

On peut ainsi, en choisissant bien la valeur de la fréquence entre 50Hz et 10MHz, faire varier la profondeur de pénétration, pour un matériau et une application données.

On comprend donc que le choix de la fréquence est essentiel avant toute opération de chauffage inductif.

2-Amplitudes des courants inducteurs:

Comme la puissance transmise dépend de la fréquence, elle dépend aussi du carré du champ magnétique c'est-à-dire du carré de l'intensité créant ce champ. Donc, suivant l'application thermique voulue on choisit l'intensité des courants inducteurs.

3- Temps d'exposition:

Le temps d'échauffement est un facteur très essentiel dans le chauffage par induction, on peut l'évaluer selon le type d'application, comme il peut dépendre du matériau considéré et de la fréquence utilisée.

I-4-3-Ordres de grandeur des paramètres caractérisant les chauffages par induction[16,17]

1-Ordres de fréquence :

Il est habituel de distinguer les plages de fréquences suivantes :

Basse fréquence : de 50Hz à 1000Hz

Moyenne fréquence : de 1000Hz à 35000Hz

Haute fréquence : de 35000Hz à 10MHz

2-Ordres de puissance :

Les puissances mises en jeu dépendent de types d'applications et de fréquences utilisées. On les caractérise par la puissance injectée dans la pièce à chauffer. Elles peuvent aller de 10^2 KW/m² à 10^5 KW/m².

3- Classification des applications :

On peut résumer ces valeurs selon la classification suivante:

-Chauffage pénétrant:

Fréquence : de 1 à 50KHz pour les métaux, et de 0.1 à 4 MHz pour les semi conducteurs.

Puissance : $10^2 < P_s < 10^3$ KW/m².

Exemple d'application : forgeage fusion.

-Chauffage superficiel :

Fréquence : de 10 à 50KHz pour les métaux

Puissance : $10^3 < P_s < 5 \cdot 10^5$ KW/m².

Exemple d'application : trempe superficielle, brasage.

-Chauffage pelliculaire :

Fréquence : de 10 à 100KHz pour les métaux.

Puissance : $P_s < 10^6$ KW/m².

Exemple d'application : soudages de tubes thermo-scillage.

I-4-4-Convertisseurs de fréquence[1]

L'alimentation électrique peut être de différente nature selon la fréquence d'alimentation de l'installation.

1-Pour les installations à 50Hz:

La charge est directement connectée au transformateur. Le transformateur peut être réglé pour ajuster le courant à l'impédance de la charge.

2-Convertisseur de fréquence à thyristors :

-Rendement : 90-97%

- Plage de fréquence : 100Hz-10kHz

- Plage de puissance : jusqu'à 10MW

3-Convertisseur de fréquence à transistors :

- Rendement : 75-90%

- Plage de fréquence : jusqu'à 500kHz

- Plage de puissance : jusqu'à 500kW

4-Convertisseur de fréquence à lampe à vide :

- Rendement : 55-70%
- Plage de fréquence : jusqu'à 3000kHz
- Plage de puissance : jusqu'à 1200kW

I-5 Travaux sur les systèmes d'alimentations du chauffage par induction :

Dans cette partie, nous présentons l'historique des interrupteurs de puissance ainsi que les travaux parmi les plus récents concernant les systèmes d'alimentation du chauffage par induction, ensuite l'étude des phénomènes accompagnant la phase de fonctionnement. Ces recherches sont pour la plupart basées sur l'étude des systèmes avec convertisseur statique à résonance. L'étude de ces systèmes est effectuée avec plusieurs méthodes de commande, notamment la **MLI**.

Dans le domaine du chauffage par induction, les onduleurs à résonance de puissance à base des semi-conducteurs.

- Les premières **diodes** de puissance au **silicium** apparaissent en 1956 et les **thyristors** en 1961. Dans les années 1970, thyristors et diodes sont utilisés dans des dispositifs auto-commutés comme les hacheurs et les onduleurs, les années qui suivent voient le développement de transistors bipolaires de puissance qui favorise le développement d'une électronique de conversion de faible et moyenne puissance.
- Au début des années 1980, les dispositifs à transistors poussent les dispositifs à thyristors vers des puissances accrues : vers 1990, les **GTO** ne sont plus utilisés qu'en très fortes puissances (> 1 MW) ou pour des tensions supérieures à 2 kV.
- **L'IGBT** apparaît en 1985, d'abord dans le domaine des moyennes puissances (quelques dizaines de kilowatts), il supprime les **transistors Darlington**. Il devient dans les 10 ans qui suivent un composant utilisable en forte puissance.
- L'avènement du thyristor **IGCT** (Integrated Gate Commutated Thyristor) vers 1997 dans le domaine des tensions supérieures à 6 kV risque d'entraîner à moyen terme la disparition du thyristor **GTO**.

- Dans le domaine des faibles puissances, du fait de sa rapidité et de la simplicité de sa commande, le transistor **MOSFET** de puissance supplante le transistor bipolaire. Grâce aux techniques d'intégration planar et l'essor du marché du portable (téléphone, ordinateur, lecteur CD, etc.) nécessitant une électronique de conversion efficace et miniaturisée, il supplante même les diodes dans des applications comme le redressement (redresseur synchrone).
- Les composants à base de carbure de silicium (**SiC**) apparaissent en 2002. Ceux à base de **diamant** sont encore à l'étude en 2004. Leurs fortes énergies d'ionisation permettent un blocage de tension plus élevée et/ou des fonctionnements à haute température [10].
- Les Thyristors sont utilisés généralement jusqu'à 10 kHz avec IGBT et MOSFET utilisés à des fréquences plus élevées [11].
- Les recherches réalisées par **A.SURESH** et **S.RAMA REDDY** [12] présentent les résultats de comparaison entre les onduleurs à résonance parallèle et les onduleurs à résonance Série.
- **S. RAMA REDDY** et **A.SURESH** [12] ont travaillé pour développer un système d'alimentation de chauffage par induction avec le minimum du matériel.
- **H.SARNAGO** et **A.MEDIANO** [13] ont trouvé une nouvelle technique pour développer un oscillateur de type Classe-E, utilisé pour une application du chauffage par induction 'table à cuisine'. L'utilisation de ce oscillateur en raison qu'il supporte des tensions élevées, qu'il atteint jusqu'à 1200V, tels que les IGBT et les MOSFET. Le système final proposé est représenté sur la figure.27

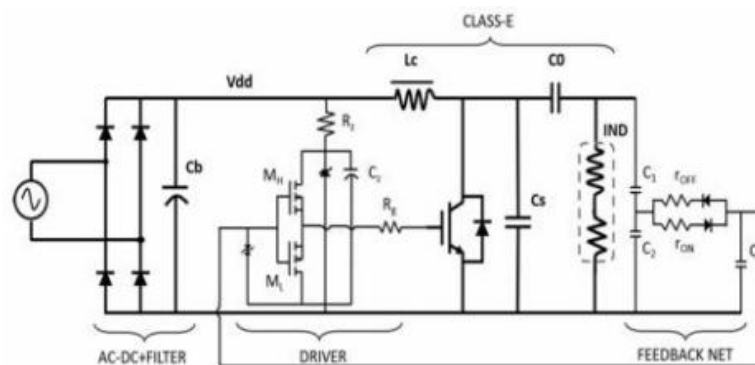


Figure I-21 le schéma de l'oscillateur de type **Classe-E**

L'oscillateur de type **Classe-E**, offre plusieurs avantages tels que le coût, le bruit réduit, et l'absence de la commande du système d'alimentation par logique floue. Le courant de la charge est quasi sinusoïdal. Toutes les approximations de conception faites sont vérifiées et confirmées. La conception proposée convient aux applications de la puissance de sortie constantes, telles que des cuiseurs de riz ou les machines à café.

- Les recherches réalisées par **M.TÜMAY**, et **K.Çağatay BAYINDIR [14]** présentent une conception d'un onduleur monophasé, sur un panneau DSP contrôlé par un régulateur à MLI.
- **S.ARUMUGAM**, et **S.RAMAREDDY [15]** ont développé un onduleur en demi-pont de type **Classe-D**, pour alimenter un système de chauffage par induction, Ce système présente des avantages, comme le volume et les pertes par commutation qui sont réduites. Les modèles du circuit sur Simulink/MATLAB en boucle ouverte '**BO**' et fermée '**BF**'
- **V.RAMESH**, et **J.SRI RANGANAYAKU LU [16]** ont travaillé sur les onduleurs à résonance en pont complet à haute efficacité **LLC** pour les applications du chauffage par induction, en utilisant une commande asymétrique du système d'alimentation, le circuit est mis en œuvre en utilisant le contrôleur **PIC**.

En conséquence, les onduleurs à résonance en pont complet à haute efficacité **LLC**, ont des avantages, tels que les harmoniques ont été éliminés et la commande du système peut se faire en deux modes de contrôle, symétrique et asymétrique.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a consacré une partie dont laquelle on a cité plusieurs types de chauffage mais notre choix final était imposé sur le chauffage par induction grâce à plusieurs avantages (critères de choix) tels que : rendement élevé, échauffement localisé, pas de flamme, son contact On a fait une description technique concernant ce type de chauffage, son principe de fonctionnement, on a cité leurs propriétés ainsi que leurs caractéristiques, les structures des générateurs et quelques applications.

Des problèmes de pollution et de salubrité peuvent être engendré par la présence de chaudières en usine; le chauffage à induction permet une régulation facile et précise de la température de traitement. En quelques pays, le potentiel d'économie d'énergie grâce à l'induction sur ses marchés actuels est de l'ordre d'une dizaine de T [Wh], évitant ainsi l'émission de plusieurs millions de tonnes de gaz de charbon (CO₂).

Introduction

Le chauffage par induction est une combinaison de processus électromagnétique avec les phénomènes de transfert de chaleur. La relation entre eux est forte car la source de chaleur est d'origine électromagnétique et les propriétés électromagnétiques des matériaux sont fortement dépendantes de la température. La source de génération de chaleur est principalement due à la résistance électrique de la matière conformément à la loi de Joule. La puissance qui est transférée à la pièce change avec la tension et le courant appliqué au système et la résistance électrique du matériau soumis. À la fois la quantité de courant induit et la résistance électrique sont liées aux propriétés du matériau.[3,5]

II-1-La résistance électrique

La résistance électrique (R) est la propriété liée à la fois à la résistivité électrique caractéristique et à la géométrie du matériau. Elle est directement proportionnelle à la résistivité électrique (ρ) et à la longueur du matériau (l); cependant, elle est inversement proportionnelle à la section transversale (S).

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.1.1)$$

La résistivité d'un matériau représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. En général, elle augmente avec l'augmentation de la température. Le tableau 2.1 montre les valeurs des résistivités électriques et des coefficients de température pour certains matériaux couramment utilisés aux températures ambiantes.

La résistivité des métaux purs peut souvent être représentée en fonction de la température sous la forme linéaire :

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.1.2)$$

Où ρ_0 est la résistivité à la température ambiante T_0 , $\rho(T)$ est la résistivité à la température T et α est le coefficient de température. La résistivité d'un petit nombre de matériaux diminue

avec la température et les valeurs de α peuvent être négatives. Pour d'autres matériaux α est une fonction non linéaire de la température.

Matériau	Résistivité électrique ($\Omega \cdot m$)	coefficient de température ($1 / ^\circ C$)
Argent	1.59×10^{-8}	0.0061
Cuivre	1.68×10^{-8}	0.0068
Or	2.44×10^{-8}	0.0034
Aluminium	2.65×10^{-8}	0.0043
Tungstène	5.60×10^{-8}	0.0045
Zinc	5.91×10^{-8}	0.0042
Nickel	6.80×10^{-8}	0.0069
Cobalt	9.00×10^{-8}	0.0053
Acier doux	15.9×10^{-8}	0.0061
Acier inoxydable	70.0×10^{-8}	0.0061
Plomb	1.59×10^{-8}	0.0061

Tableau 2.1 Résistivités et coefficients de température

II-2 La perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique d'un matériau caractérise sa faculté à se laisser traverser par un champ magnétique et à le modifier. Elle est définie comme :

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (2.2.1)$$

Où μ est la perméabilité magnétique en Henry par mètre, \vec{B} est l'induction magnétique en Tesla (T) et \vec{H} est l'intensité du champ magnétique en ampères par mètre. On définit la perméabilité magnétique relative μ_r par le rapport de la valeur de la perméabilité magnétique du matériau sur la perméabilité de l'espace libre μ_0 qui est égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.2.2)$$

Les matériaux sont divisés en trois groupes fondamentaux en fonction de leur aimantation: ferromagnétique, diamagnétique et paramagnétique. Les matériaux ferromagnétiques ont des valeurs de perméabilité plus grande que le vide (c'est à dire $\mu_r \gg 1$) et montrent une grande susceptibilité positive aux champs magnétiques externes. Les matériaux diamagnétiques ont une perméabilité relative légèrement supérieure à 1 alors que les matériaux paramagnétiques ont une perméabilité relative légèrement inférieure à 1. Les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques sont appelés matériaux amagnétiques.

La valeur de la perméabilité magnétique change avec l'intensité du champ magnétique et la température. Les matériaux ferromagnétiques deviennent amagnétique à la température dite température de Curie. A cette température, ces matériaux deviennent paramagnétiques.

II.3 Profondeur de pénétration

La fréquence est un facteur important dans le chauffage par induction. En haute fréquence, le courant alternatif induit n'est pas uniforme dans toute la section transversale de la pièce à traiter. Il est concentré à la surface. Cet effet est appelé effet de peau. La distribution du courant dans le matériau conducteur diminue de façon exponentielle depuis la surface jusqu'au cœur. Environ 9/10 de la puissance est concentrée sur la surface du conducteur. L'épaisseur de cette couche est appelée épaisseur de peau ou profondeur de pénétration (**Figure. II.1**). La valeur de la profondeur de pénétration dépend à la fois de la fréquence du courant, de la résistivité électrique du matériau et de sa perméabilité magnétique. La densité de courant le long de l'épaisseur de la pièce à traiter (rayon par exemple) peut être calculée par l'équation suivante:

$$I = I_0 e^{-y/\delta} \quad (2.3.1)$$

Où I est la densité de courant à la distance y de la surface (en A/m^2), I_0 est la densité de courant à la surface de la pièce, y est la distance à partir de la surface en direction du noyau et δ est la profondeur de pénétration (en m). Cette dernière est donnée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (2.3.2)$$

La profondeur de pénétration n'est donc pas seulement liée aux propriétés du matériau telles que la résistivité électrique et la perméabilité magnétique relative, mais aussi du paramètre du processus qui est la fréquence. Puisque les propriétés du matériau changent avec la température pendant le chauffage, la profondeur de pénétration varie de façon significative.

Pour les matériaux ferromagnétiques par exemple, à la température de Curie perméabilité relative devient égale à l'unité et on aura une augmentation de la profondeur de pénétration. En plus de l'effet de peau, un autre effet électromagnétique peut être mentionné pour les matériaux minces. Dans ces matériaux, il est possible que les domaines magnétiques se chevauchent ou soient inégalement réparties et peuvent s'annuler entre eux ou bien renforcer le champ magnétique. Cet effet est nommé l'effet de proximité électromagnétique.

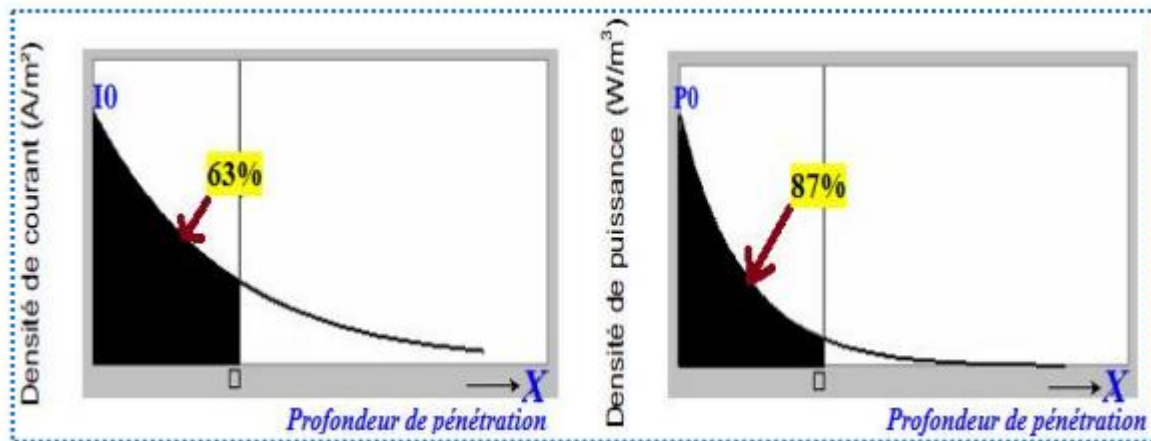


Figure II-1- Allures de profondeur de pénétration.

Il apparaît que la profondeur de pénétration dépend à la fois des caractéristiques du matériau à chauffer (ρ , μ), et de la fréquence du courant alternatif le parcourant.

La fréquence est donc un levier de contrôle de la profondeur de pénétration. Le tableau suivant regroupe des ordres de grandeur de δ en fonction de plusieurs matériaux pour différentes fréquences.

δ en [mm]	Acier 20°C	Acier 20°C	Cuivre 20°C	Cuivre 900°C	Graphite 20°C
ρ [$\mu \Omega \cdot m$] →	0.16	0.16	0.017	0.086	10
μr [-] →	40	100	1	1	1
fréquence ↓					
50 Hz	4.50	2.85	9.31	20.87	225.08
100 Hz	3.18	2.01	6.58	14.76	159.15
1 kHz	1.01	0.64	2.08	4.67	50.33
10 kHz	0.32	0.20	0.66	1.48	15.92
100 kHz	0.10	0.06	0.21	0.47	5.03
1 MHz	0.03	0.02	0.07	0.15	1.59

Tableau 2.2 Profondeur de pénétration δ en fonction de ρ , μr et f .

la formule (2.3.2), il apparaît que la profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carré de la perméabilité magnétique μr . Pour des matériaux non magnétiques tels que le cuivre ou l'aluminium, le coefficient de perméabilité magnétique $\mu r = 1$, alors que les

matériaux ferromagnétiques (tels que le fer et de nombreux types d'acier) ont, au contraire, un coefficient de perméabilité beaucoup plus élevé. Ces matériaux offrent donc des profondeurs de pénétration beaucoup moins importantes. La perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques dépend fortement de la nature du matériau et des conditions imposées (température, intensité du champ magnétique, saturation). Au-delà de la température de Curie ($760\text{C}^\circ=1400\text{F}^\circ$), la perméabilité chute brutalement à $\mu_r = 1$, ce qui engendre une hausse rapide de la profondeur de pénétration.

Les photos ci-dessous montrent deux principes de chauffe d'une pièce défilant.

-Soit la pièce défile dans l'inducteur et le courant se répartit à sa surface. Le champ magnétique est parallèle au défilement ; c'est le flux longitudinal, (voir figure II-2).

-Soit la pièce circule à côté de la bobine. Le champ magnétique est perpendiculaire à la pièce ; c'est le flux transverse, (voir figure II-3).



Figure II-2 Flux longitudinal.



Figure II-3 Flux transverse.

II.4 Modèles électromagnétique et thermique

La variation de champ électrique génère un champ magnétique et vice versa ce qui résulte en une onde électromagnétique qui transporte de l'énergie à la pièce. Pour un milieu linéaire isotrope la relation entre l'intensité du champ et la densité de flux électriques est donnée par :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.4.1)$$

Où ε est la permittivité électrique absolue du milieu mesurée en Farad par mètre (F/m). La relation entre la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique est

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.4.2)$$

Où μ est la perméabilité magnétique absolue du milieu mesurée en Henry par mètre (H/m). A l'intérieur d'un matériau conducteur les courants de conduction sont le résultat du mouvement des charges mobiles du au champ électrique. Ce phénomène est formulé par la loi d'Ohm,

$$\text{donnée par :} \quad \vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (2.4.3)$$

Où J représente la densité de courant volumique, \vec{E} est le champ électrique et ρ est la résistivité électrique.

Les grandeurs \vec{E} et \vec{D} représentant le champ électrique et les grandeurs

\vec{B} et \vec{H} représentant le champ magnétique sont liées par les équations connues sous le nom d'équation de Maxwell. Soient :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.4.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4.5)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho_V \quad (2.4.6)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.4.7)$$

L'équation (2.4.4) est la loi de Faraday, l'équation (2.4.5) est le théorème d'Ampère généralisé, l'équation (2.4.6) est le théorème de Gauss et l'équation (2.4.7) définit la conservation du flux magnétique ou bien la non présence de la charge magnétique.

En substituant l'équation (2.4.2) dans les équations (2.4.4) et (2.4.7) on obtient les relations :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \quad (2.4.8)$$

$$\text{div}(\mu \vec{H}) = 0 \quad (2.4.9)$$

De la même manière en substituant les équations (2.4.1) et (2.4.3) dans les équations (2.4.5) et (2.4.6) on obtient les relations :

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\rho} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \quad (2.4.10)$$

$$\text{div}(\epsilon \vec{E}) = \rho_l \quad (2.4.11)$$

La densité de flux magnétique \vec{B} , peut être exprimée en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} comme suit $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$. En introduisant le potentiel scalaire électrique V , qui satisfait $\nabla \times \nabla V = 0$. Donc :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla_V \quad (2.4.12)$$

En substituant $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ dans l'équation (2.4.10), on peut obtenir :

$$\frac{1}{\mu} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla_V \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (2.4.13)$$

Après substituant l'équation (2.4.12) dans l'équation (2.4.13), l'équation de champ électromagnétique en termes de \vec{A} est donnée ci-dessous

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \frac{\varepsilon \partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial \nabla_V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla_V \quad (2.4.14)$$

Où $\frac{\varepsilon \partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial \nabla_V}{\partial t}$ est la densité de courant de déplacement, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est la densité de courant de Foucault, $\frac{1}{\rho} \nabla_V$ ou (-J), est la densité de courant de conduction. Pour les applications les plus pratiques, le courant de déplacement peut être négligé et l'équation (2.4.14) peut être simplifiée comme suit:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \vec{J} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (2.4.15)$$

En régime harmonique, si la fréquence d'oscillation est , \vec{A} peut être exprimé :

$$\vec{A}(x, y, z, t) = A(x, y, z) e^{j\omega t} \text{ ou } j = \sqrt{-1} \text{ et } \omega = 2\pi f \text{ est la fréquence angulaire.}$$

La substitution de celui-ci dans l'équation (2.4.15) donne :

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \vec{J} - \frac{1}{\rho} j \omega \vec{A} = 0 \quad (2.4.16)$$

Le processus de transfert de chaleur dépendant du temps peut être décrit par l'équation de Fourier :

$$k(\nabla^2 T) + q = dCp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4.17)$$

Où T est la température, k est la conductivité thermique, d est la densité, [C] est la capacité calorifique et q est la densité de source de chaleur induite par les courants de Foucault par unité de temps dans une unité de volume. La densité de la source de chaleur est liée à la densité de courant par la loi de Joule, comme indiqué ci-dessous :

$$q = \vec{J}^2 \rho = \frac{1}{\rho} \frac{(\partial \vec{A})^2}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\partial \frac{\vec{A} e^{j\omega t}}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho} (j\omega \vec{A} e^{j\omega t})^2 \quad (2.4.18)$$

II-5 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.
- la puissance dissipée dans la pièce qui caractérise le phénomène électrique. De nombreux paramètres interviennent:
 - la fréquence du courant et le champ inducteur;
 - la nature magnétique et thermique du matériau;
 - le couplage entre l'inducteur et la pièce à chauffer (entrefer, longueurs respectives...);
 - le type d'inducteur et les caractéristiques géométriques ainsi que nature des conducteurs

II-5-1- Puissance dissipée dans la pièce:

En parallèle à la profondeur de pénétration, il est bon de s'intéresser à la puissance injectée dans la pièce. En utilisant la loi d'Ohm

$$J_i = \sigma \cdot E \quad (2.5.1)$$

Cette dissipation volumique par courant de Foucault s'écrit :

$$P = J_i \cdot E = \frac{J_i^2}{\sigma} \quad (2.5.2)$$

Avec :

$\rho = \frac{1}{\sigma}$: est la résistivité électrique.

J_i : Densité des courants induits.

Ces formules montrent que la puissance augmente avec l'augmentation de la résistivité. Elle dépend du carré du courant induit, donc de l'intensité créant ce courant. [11,17,20]

II-5-2- Rendement (inducteur - charge) :

Le rendement électrique est défini comme suit:

$$\eta_e = \frac{P_c}{P_c + P_i} \quad (2.5.3)$$

P_c : Puissance transmise à la charge.

P_i : Puissance dissipée dans l'inducteur.

Le rendement dépend fortement du ratio diamètre/profondeur de pénétration (dans le cas de charge cylindrique) et de la conception de l'inducteur.

Les règles de base à respecter pour un meilleur rendement sont :

- Pour l'inducteur, utiliser un matériau de faible résistance, en règle général du cuivre électrolytique.
- Minimiser la distance entre les enroulements.
- Etablir une bonne connexion entre l'inducteur et la charge (limitation de l'entrefer, et la taille de l'inducteur suffisamment longue).[01]

II-5-3-Facteur de puissance :

L'ensemble constitué de l'inducteur et de la charge est assimilable à une charge globalement inductive gourmande en énergie réactive. Ce caractère inductif est dû, d'une part à l'entrefer (entre l'inducteur et la charge) et d'autre part, au comportement inductif de la charge elle-même (dans le cas d'un cylindre). Le facteur de puissance de l'inducteur et de la charge se situe entre 0,05 et 0,6. Dans tous les cas, un relèvement du facteur de puissance par condensateurs est requis.[1]

II-5-4- Résistivité électrique :

La profondeur de pénétration est proportionnelle à la racine carrée de la résistivité de l'induit. Celle-ci, pour les métaux, croît généralement avec la température.[20]

La figure II-4 représente l'évolution de la résistivité en fonction de la température pour l'or [57]

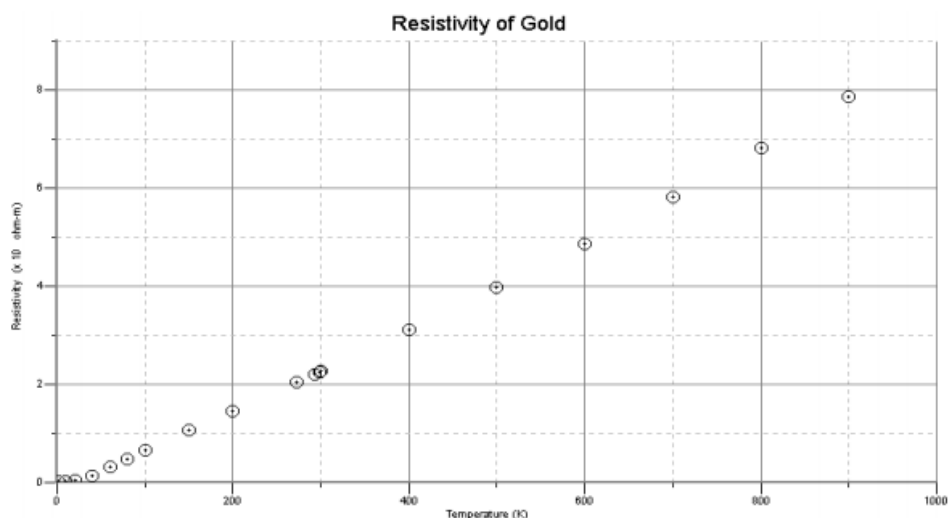


Figure II-4- Evolution de la résistivité en fonction de la température pour l'or

II-5-5- Nature magnétique du matériau :

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, ce sont les grandeurs qui varient avec la température et avec le champ magnétique.[20]

II-6- Transmission de la chaleur et échauffement des corps

II-6-1- Loi de Fourier :

Le champ thermique, généré dans le corps à chauffer, est déterminé par les sources thermiques créées 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.

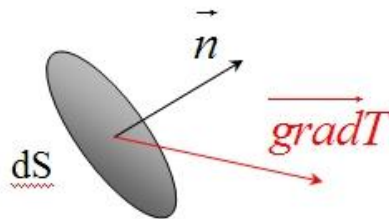


Figure II-5- Volume élémentaire de Fourier

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

$$\vec{q}(x, t) = -k(x, t) \times \text{grad} T(x, t) \quad (2.6.1)$$

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. L'application de la loi de Fourier à un élément de matière d'élément de volume $d\tau$ détermine les qualités de chaleur transmises par conduction à travers les corps.[16,17]

Il existe trois modes de transfert de la chaleur: la conduction, le rayonnement; et la convection.

II-6-2- 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.[16,17]

On présente sur **la figure II-6** l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour le cuivre[56] :

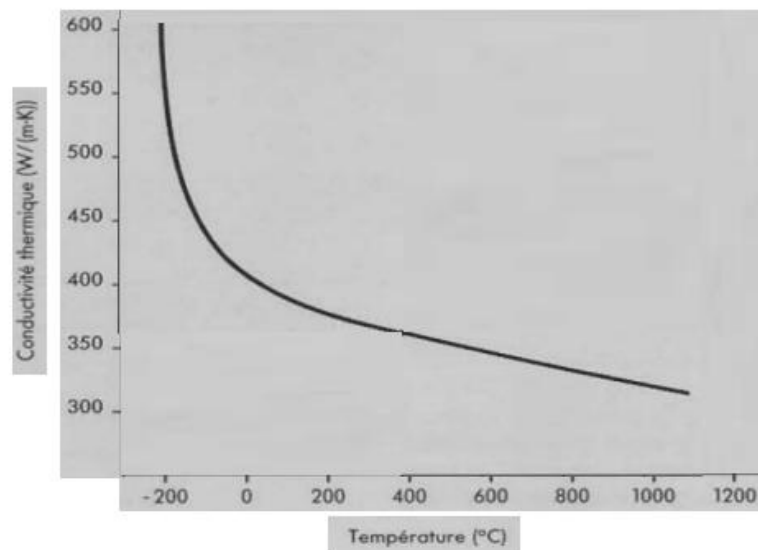


Figure II-6- Conductivité thermique pour le cuivre

Le modèle mathématique du transfert de chaleur par conduction est l'équation de la chaleur:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2.6.2)$$

$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2.6.3)$$

La figure suivante montre un exemple du transfert de chaleur par conduction :

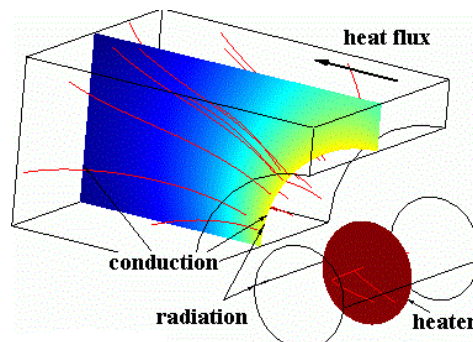


Figure II-7 Transfert de chaleur par conduction.

II-6-3- Rayonnement:

Le rayonnement correspond à une absorption ou à une émission de radiations électromagnétiques.

Dans la transmission de la chaleur par rayonnement, le transfert thermique de l'énergie s'effectue par des vibrations électromagnétiques qui se propagent sans support de matière.[16,17,20]

II-6-4- Convection :

La convection thermique caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide, donc gaz ou liquide, dont les molécules sont en mouvement. On distingue généralement deux types de convection: convection naturelle (voir figure II-8), et convection forcée (voir figure II-9).

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'autres 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 créée par circulation forcée du milieu réfrigérant, par exemple par le 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.[16,17,20]

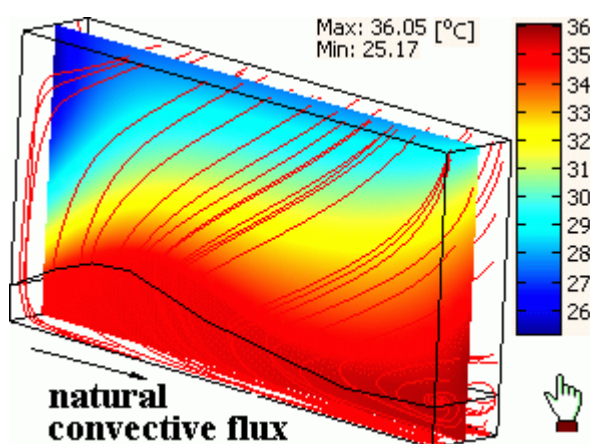


Figure II-8 Convection naturelle.

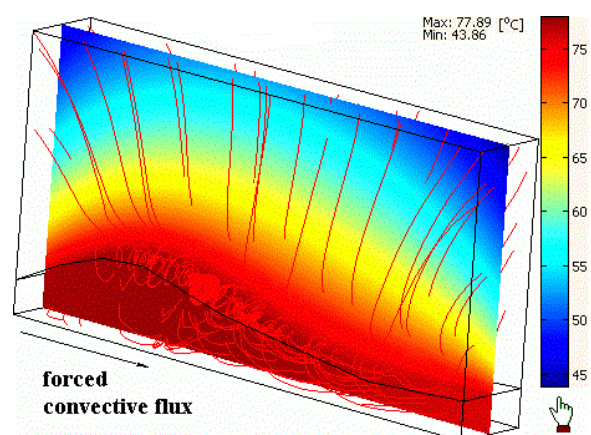


Figure II-9 Convection forcée.

II-6-5- Capacité calorifique :

La chaleur massique C_p 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 C_p et la masse volumique ρ . La masse volumique dépend aussi de la température.[20]

On présente dans la figure ci-dessous l'évolution de la chaleur massique en fonction de la température pour le cuivre.[56]

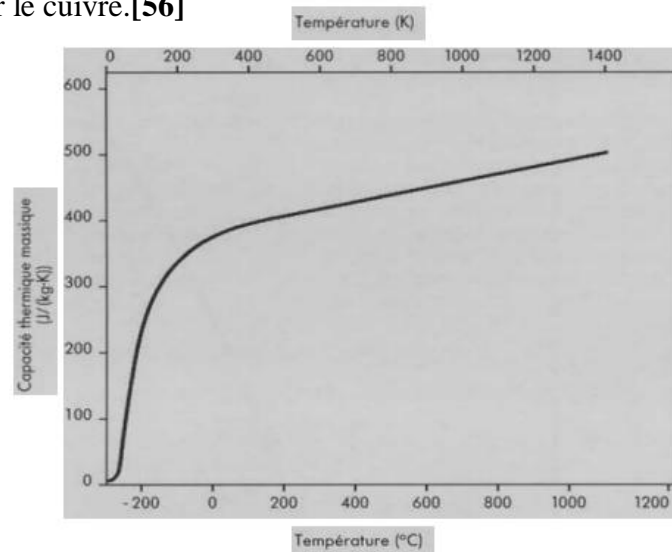


Figure II-10- Chaleur massique pour le cuivre

II-7- Influence de la température et point de Curie

II-7-1-Point de Curie

La notion de point de Curie dans le chauffage par induction des métaux est très importante dans les applications industrielles. Le point de Curie d'un métal est la température qui une fois atteinte, occasionne un changement « d'état » de ce métal et seulement lorsque ce métal atteint ou dépasse la température dite de son point Curie.

II-7-2-Différence entre au-dessous et au-dessus de la température de Curie

A 20° Celsius, le fer est ferromagnétique, soit en terme simple, cela signifie qu'il peut être attiré par un aimant ou sinon on dira familièrement qu'il s'aimante. La température de Curie du fer est de 770° Celsius. Une fois au-dessus de cette température du point de Curie, le fer dans notre cas perd sa qualité dite ferromagnétique pour devenir paramagnétique.

Au-delà de cette température de point de Curie, le fer n'est plus attiré par un aimant ou sinon on dira familièrement qu'il ne s'aimante plus ou presque plus, il est devenu paramagnétique. Lorsque la température d'un matériau ferromagnétique augmente, sa magnétisation diminue. L'agitation thermique plus élevée des atomes tend à désorienter les moments magnétiques qui, à basse température, étaient tous alignés dans la direction du champ exciteur \mathbf{H} . Plus la température est élevée, plus la désorientation des moments magnétiques est importante et plus la magnétisation \mathbf{M} diminue. Lorsque la température atteint une température critique T_C , soit la température de Curie, l'agitation thermique des atomes est telle que les moments magnétiques s'orientent aléatoirement. Le matériau devient alors paramagnétique. La Figure II-11 illustre un exemple typique de la variation de la magnétisation en fonction de la température.

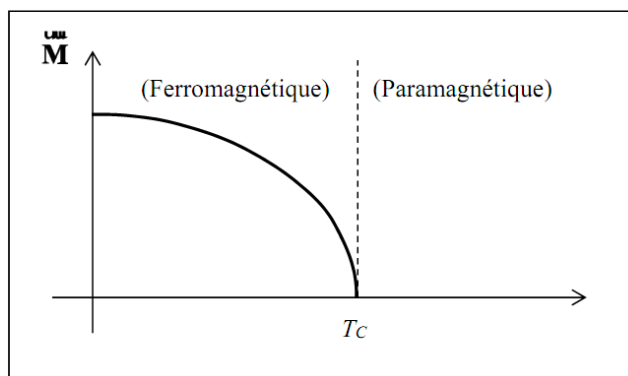


Figure II-11 Influence de la température sur la magnétisation d'un matériau ferromagnétique

II-7-3-Différence entre un état ferromagnétique et un état paramagnétique

- **Etat ferromagnétique en dessous de la température du point de Curie soit pour le fer $T < 770^{\circ}\text{C}$:**

Cet état de ferromagnétisme signifie tout simplement qu'en dessous de la température du point de Curie, le courant induit fabriqué par un générateur à induction, ne pénètre que peu le métal. P_1 représente la profondeur de pénétration du courant induit entre les deux flèches. On dit que ce métal a une épaisseur de peau très faible lorsqu'il est chauffé par induction

- **Etat paramagnétique au-dessus de la température du point de Curie soit pour le fer $T > 770^{\circ}\text{C}$:**

Au-dessus de la température du point de Curie, le courant induit fabriqué par un générateur à induction, pénètre beaucoup plus le métal. P_2 représente la profondeur de pénétration du

courant induit entre les deux flèches. On dit que ce métal a une épaisseur de pénétration beaucoup plus importante lorsqu'il est chauffé par induction.

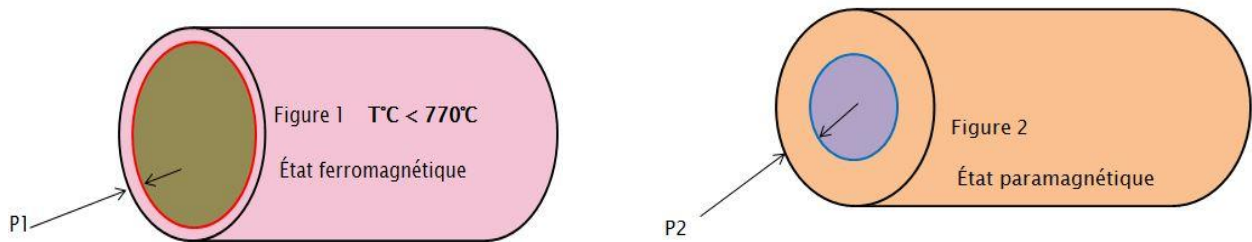


Figure II-12 Différence entre un état ferromagnétique et un état paramagnétique

La dépendance de la perméabilité magnétique pour un ferromagnétique par rapport à la température est importante, notamment lors de la transition de Curie : le matériau devient amagnétique avec une perméabilité relative constante et proche de un. Les profils électromagnétiques dans la pièce vont être considérablement modifiés, voir la Figure II-13

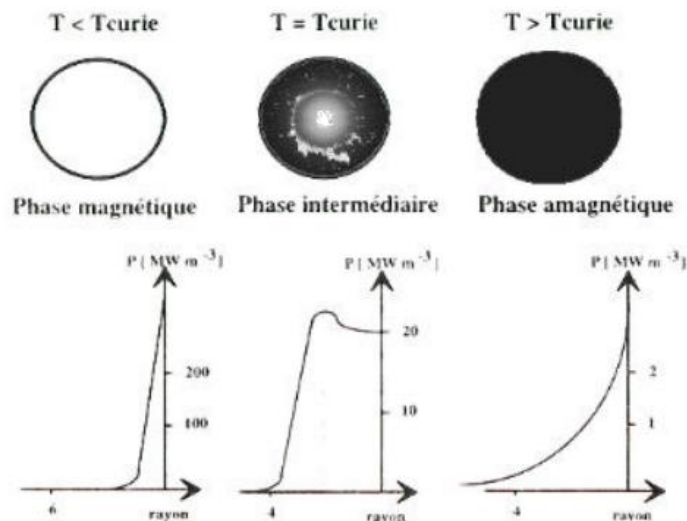


Figure II-13 Evolution de la distribution de puissance électromagnétique avec la température au passage de la température de curie

II-7-4-Matériaux ferromagnétiques

Le tableau ci-dessous rassemble une sélection de matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température au-delà de laquelle ils cessent d'exhiber des propriétés d'aimantation spontanée.

Matériaux	T° de Curie		Susceptibilité magnétique χ_m
	K	°C	
<u>Co</u>	1 388	1 115	70
<u>Fe</u> , aciers ferritiques et martensitiques	1 043	770	200
<u>MnBi</u>	630	357	
<u>Ni</u>	627	354	110
<u>MnSb</u>	587	314	
<u>CrO₂</u>	386	113	
<u>MnAs</u>	318	45	
<u>Gd</u>	292	19	
<u>Dy</u>	88	-185	
<u>EuO</u>	69	-204	

Tableau 2.3 matériaux ferromagnétiques associés à la température de curie

Par analogie avec les matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques, le terme température de Curie est aussi utilisé pour désigner la température à laquelle un matériau ferroélectrique devient paraélectrique. T_C est la température à laquelle les matériaux ferroélectriques perdent leur polarisation spontanée en subissant un changement de phase de premier ou second ordre, c'est-à-dire que la structure interne ou la symétrie interne du matériau change.

II-7-4-Analyse inverse pour l'identification des paramètres physiques

La modélisation numérique de tels couplages multiphysiques présente un intérêt non négligeable pour l'optimisation et le contrôle des procédés. Cependant, il faut d'abord s'assurer que toutes les propriétés et tous les paramètres physiques soient connus finement afin que les résultats issus de la simulation soient aussi proches que possible de la réalité. Aussi, nous avons développé une méthode de type analyse inverse qui permet d'évaluer avec précision certaines des propriétés thermiques, électriques et magnétiques à partir de mesure de température.

Nous donnons quelques éléments ici dans le cadre de l'identification de la perméabilité magnétique $\mu(T, H)$ grandeur extrêmement importante à connaître précisément jusqu'aux forts champs électromagnétiques et jusqu'à la température critique de Curie ($T_C \sim 780^\circ\text{C}$).

Rappelons tout d'abord une formule analytique décrivant assez précisément son évolution :

$$\mu_r(|\vec{H}|, T) = 1 + \left(\frac{\alpha}{\mu_0(\beta + |\vec{H}|)} - \frac{\alpha|\vec{H}|}{\mu_0(\beta + |\vec{H}|)^2} \right) \times \left(1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^\gamma \right) \quad (2.7)$$

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous sommes concentrés sur la description technique concernant le chauffage par induction, on a bien expliqué la profondeur de pénétration et son importance pour l'échauffement, on a cité leurs propriétés ainsi que leurs caractéristiques électriques, la transmission de la chaleur et l'échauffement des corps avec les trois modes de transfert. la fin de ce chapitre résume la notion de point de Curie dans le chauffage par induction des métaux et son fonctionnement.

Introduction

Les procédés métallurgiques industriels comme la fusion des alliages dans les fours à induction sont devenus un sujet de la modélisation numérique depuis de nombreuses années. Une large gamme de différentes approches de modélisation pour la simulation de la chaleur, de l'écoulement turbulent de la masse fondue et les procédés de transfert de masse ont été développés. Mais jusqu'à présent, la question d'une approche de modélisation universelle et toujours fiable, qui peut être utilisée pour le développement et la conception d'applications métallurgiques industriels, reste ouverte. La fusion de matériaux dans les fours à induction peut être mentionnée comme un exemple de modélisation numérique de large propagation, parce que ce processus peut être approché avec des modèles axisymétriques à deux dimensions

III-1-Type d'inducteur

Pour la plupart des applications, l'inducteur est un tube en cuivre creux se présentant comme un enroulement venant couvrir l'objet à chauffer. Toutefois, l'inducteur peut être placé de différentes façons selon l'application. L'inducteur est le plus souvent en cuivre, afin de limiter les pertes électriques, il est refroidi par eau, dans la plupart des cas [21].

Les géométries d'inducteurs peuvent être très variées, allant de la simple spire à des inducteurs multi-spires de formes complexes (voir figure II-11-) [15]



Figure III-1 chauffages par induction avec des inducteurs de formes différentes

III-2 Les règles simples de dimensionnement d'une installation

III-2-1 Configuration de base du chauffage avant formage

La configuration traditionnelle du chauffage par induction de demi-produits de section circulaire ou carrée (en jaune sur la Figure III-2) est celle d'un inducteur solénoïde entourant la pièce à chauffer et protégé du rayonnement thermique et des chocs mécaniques par une couche de réfractaire (en beige sur la Figure III -2). L'inducteur (en rouge) est généralement constitué d'un tube de cuivre de section rectangulaire ou circulaire à l'intérieur duquel circule de l'eau servant à son refroidissement.

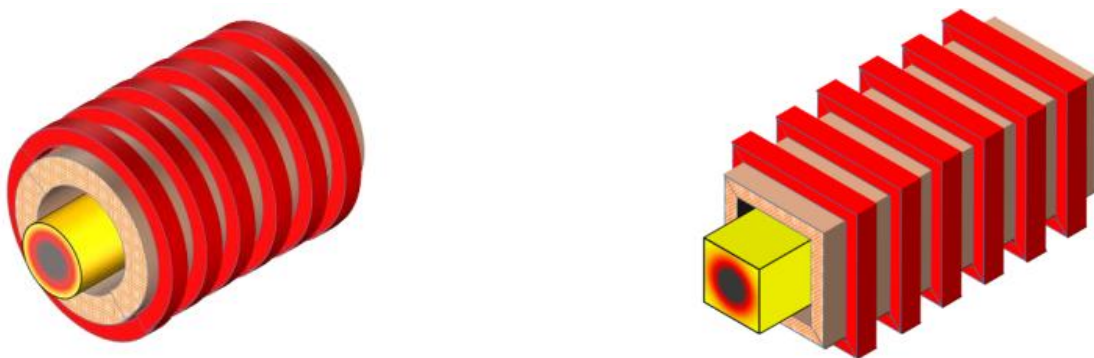


Figure III -2 Schéma de principe du chauffage avant formage de demi-produits

La longueur du solénoïde est généralement grande devant les dimensions de la section ce qui autorise de considérer le dispositif invariant dans le sens de l'axe du solénoïde. Les spires sont régulièrement réparties le long de l'axe de la ligne. Par application du théorème d'Ampère, on peut montrer que le champ magnétique est alors uniforme dans le solénoïde et vaut :

$$H = \alpha \frac{N \cdot I}{L} \quad (3.1)$$

Le coefficient d'atténuation du champ α a été introduit pour décrire le comportement des inducteurs de longueur finie. Dans le cas d'un inducteur infiniment long, ce coefficient est égal à 1. Le chapitre B – III.3.e décrit la méthode que nous avons employée pour en évaluer sa valeur.

III-2-2 Calcul du besoin énergétique

La première étape de dimensionnement d'une installation consiste à déterminer le besoin énergétique de la pièce à chauffer. Ce besoin P_{th} se compose de deux termes :

- La puissance utile P_u pour chauffer la charge,
- La puissance P_{ray} perdue par rayonnement de la charge vers le réfractaire

$$P_{th} = P_u + P_{ray} \quad (3.2)$$

La puissance utile P_u correspond à l'enthalpie nécessaire pour élever la charge d'une température T_0 à une température T_c pendant la durée Δt . On peut évaluer cette puissance grâce à l'équation :

$$P_u = m C_p \cdot \frac{T_c - T_0}{\Delta t} \quad (3.3)$$

La puissance perdue par la charge peut s'évaluer de deux manières différentes : soit à partir de la formule des pertes rayonnées P_{ray} de la charge vers le réfractaire, soit à partir de celle des pertes conduites P_{cond} à travers le réfractaire jusqu'à l'inducteur dont la température T_i est supposée constante et égale à celle de l'eau de refroidissement.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ray} = \sigma \cdot \epsilon_{eq} (T_c^4 - T_r^4) \cdot S_{moy} \\ \frac{1}{\epsilon_{eq}} = \frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_r} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$P_{cond} = \lambda_r \cdot \frac{T_r - T_i}{e_r} \cdot S_r \quad (3.5)$$

À l'équilibre thermique, les deux expressions sont identiques ; leur égalisation permet de déterminer la température de la face interne du réfractaire.

III-2-3 Schéma électrique équivalent de l'inducteur

Le mode de représentation électrique de l'ensemble inducteur – charge le mieux adapté est celui de la mise en série d'inductances et de résistances (Figure III-3) ; le courant qui traverse les différents composants est alors le courant I qui alimente l'inducteur. Par ailleurs, le champ magnétique H directement lié au courant permet une évaluation simple des puissances actives (c'est-à-dire la moyenne temporelle des dissipations Joule) et des puissances réactives (c'est-à-dire la moyenne des variations d'énergie magnétique) associées à ces différents composants.

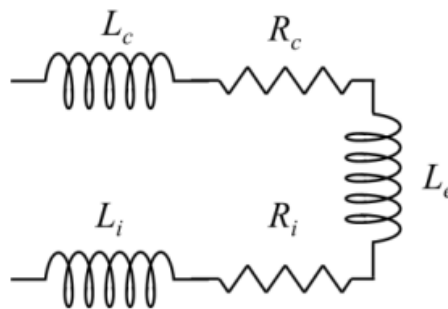


Figure III -3 Schéma de principe du chauffage avant formage de demi-produits

On distingue trois catégories de composants, chacune associée à une partie de l'ensemble inducteur – charge.

Les composants L_c et R_c correspondent à l'inductance et la résistance propre de la charge chauffée, ramenée au primaire du transformateur équivalent. Les puissances active P_c et réactive Q_c se calculent à partir du champ magnétique H selon les formules :

$$P_c = \rho \cdot \frac{H^2}{p} \cdot F \cdot S \quad (3.6)$$

$$Q_c = \rho \cdot \frac{H^2}{p} \cdot G \cdot S \quad (3.7)$$

La résolution des équations de Maxwell dans un milieu homogène permet de déterminer les facteurs de transfert de puissance active F et réactive G selon la géométrie de la charge et le rapport de sa dimension caractéristique sur la profondeur de peau. On peut alors, par exemple, tracer des abaques comme celles Figure III -4 correspondant à des tubes de matériaux non magnétiques.

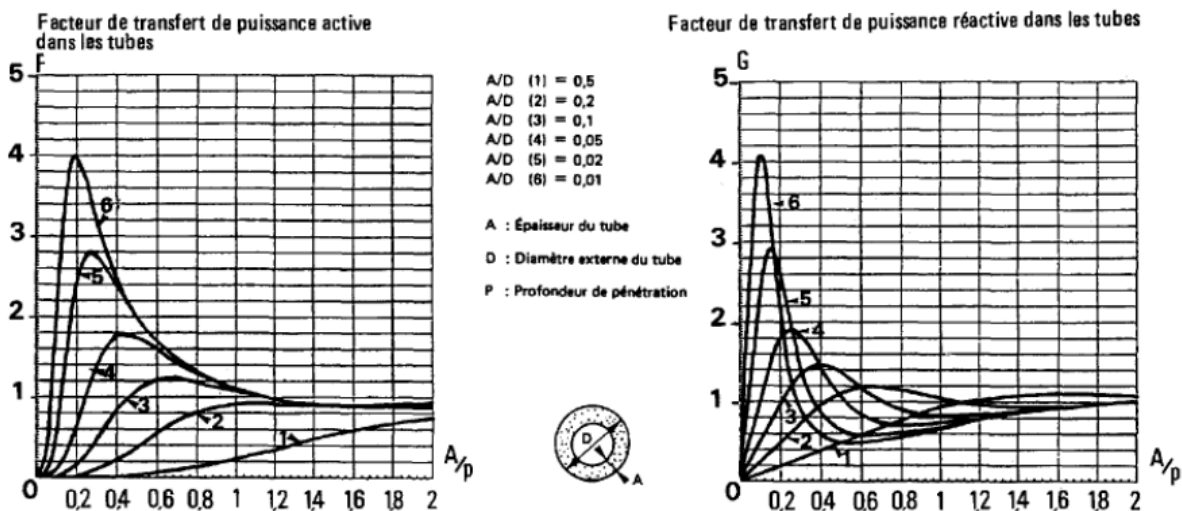


Figure III -4 Facteurs de transfert de puissance active et réactive dans les tubes

Les composants L_i et R_i correspondent à l'inductance et la résistance propre de l'inducteur. Les puissances active P_i et réactive Q_i se calculent à partir du champ magnétique H selon des formules similaires à celles utilisées pour la charge :

$$P_i = \rho_i \cdot \frac{H^2}{p_i} \cdot F_i \cdot S_i \quad (3.8)$$

$$Q_i = \rho_i \cdot \frac{H^2}{p_i} \cdot G_i \cdot S_i \quad (3.9)$$

Les facteurs de transfert de puissance active F_i et réactive G_i de l'inducteur dépendent de la section du tube de cuivre de l'inducteur et de l'espace entre deux spires consécutives.

Le volume V_e compris entre la charge et l'inducteur doit être rempli d'une énergie magnétique variable. Le composant L_e correspond à l'inductance résultant de cet entrefer électromagnétique qui comprend à la fois la zone occupée par l'air et celle occupée par le réfractaire. La puissance réactive Q_e correspondante se calcule à partir du champ magnétique H selon la formule :

$$Q_e = 2 \pi f \mu_0 H^2 V_e \quad (3.10)$$

III-3 Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

Les principales méthodes de résolution des EDP dans les milieux non linéaires les plus généralement utilisées sont la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des volumes finis (MVF), la méthode analytique (MA) et la méthode intégrale au frontière (MI) dans les régions linéaires (inducteur,...).

III-3-1- Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies (MDF), est basée sur la discrétisation du domaine d'étude et sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences, en utilisant un développement en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique en chacun des nœuds [16, 17,18].

III-3-2- Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis se déduit de la méthode des différences finies pour le fait que le domaine d'étude ou de calcul est subdivisé en nombre d'éléments finis. Chaque élément contient quatre nœuds.

Cette méthode est utilisée, en particulier en mécanique des fluides (l'équation d'écoulement.), où elle est apparue depuis une trentaine d'années; sa procédure donne une solution plus précise que celle fournie par la méthode des différences finies [16, 17,18].

III-3-3- Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis a pris un essor considérable avec le développement des moyens informatiques des années 60. Elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité [24,25], la méthode la plus fréquemment utilisée.

1- Principe [16, 17,18]:

La méthode des éléments finis consiste à ramener la résolution de l'équation aux dérivées partielles (compte tenu des conditions aux limites) au calcul de la fonction inconnue en un ensemble de points considérés dans le domaine d'étude.

III-3-3-1 Analyse du couplage magnéto-thermique par les éléments finis

Un dispositif de chauffage par induction peut être schématiquement représenté par un ensemble de trois principales régions (inducteur – Charge - Espace environnant).

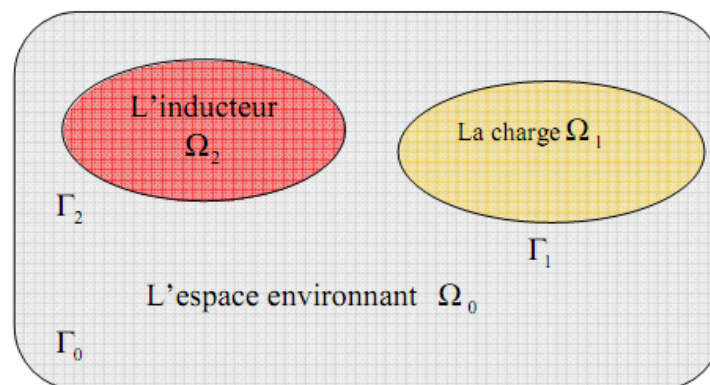


Figure III-5 Régions constitutives d'un dispositif de chauffage par induction

L'étude d'un tel système nécessite l'utilisation d'un modèle de représentation ou modélisation (analytique, numérique); cette dernière constitue l'ensemble de base pour la conception et l'optimisation du dispositif avant sa réalisation ou son amélioration après la simulation par le calcul de la distribution des champs magnétique et thermique. Pour ramener la résolution de l'équation aux dérivées partielles (compte tenu des conditions aux limites) au calcul de la fonction inconnue en un ensemble de points considérés dans le domaine d'étude, on utilise l'une des deux approches suivantes :

- La méthode variationnelle.
- La méthode des résidus pondérés ou méthode projective.

L'inconnue devra vérifier globalement les conditions de continuité à l'interface et au passage d'un milieu physique à un autre [11,17].

L'inconnue I est exprimée par :

$$I(x, y, z) = \sum_j^{Nn} \alpha_j(x, y, z) \cdot I_j \quad (3.45)$$

Nn : Le nombre de noeuds du domaine subdivisé.

α_i : Fonctions polynomiales d'interpolation ($i = 1, \dots, Nn$)

I_j : Valeur de l'inconnue au nœud j .

Si (x_j, y_j, z_j) sont les coordonnées du nœud sur lequel l'inconnue I prend la valeur I_j , les fonctions α_i vérifient les relations :

$$\alpha_j = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (3.46)$$

[08,11,20]

On dispose alors d'un système d'équations aux dérivées partielles de la forme :

$$\iiint W_i F\left(I, \frac{\partial I}{\partial x}, \dots, \frac{\partial I}{\partial t}, \dots\right) d\Omega = 0 \quad (3.47)$$

Avec :

$$F\left(I, \frac{\partial I}{\partial x}, \dots, \frac{\partial I}{\partial t}, \dots\right) = 0 \quad \text{: est l'équation à résoudre.}$$

Ω : Domaine d'étude.

W_i : Fonction de projection pouvant être scalaire ou vectorielle [11,17].

Dans le cas particulier où les fonctions de pondération W_i sont identiques aux fonctions d'interpolation de l'inconnue α_j , cette méthode est appelée méthode de Galerkin [11].

III-4 Les modes de couplage existants :

Dans un chauffage par induction la bobine génère un champ magnétique dans l'espace. Ce champ agit sur la charge. Il se crée dans le métal un courant électrique induit dont l'effet tend à s'opposer au champ magnétique qui lui a donné naissance. Ce courant induit, par la loi d'Ohm, crée une dissipation thermique. Celle-ci est responsable de l'élévation de température de la pièce.

Les propriétés physiques des matériaux dépendent de l'état thermique de celui-ci. Par conséquent, cette variation de température entraîne une modification du champ magnétique. Le processus de chauffage par induction se caractérise donc par une interaction entre le champ magnétique et la température [22].

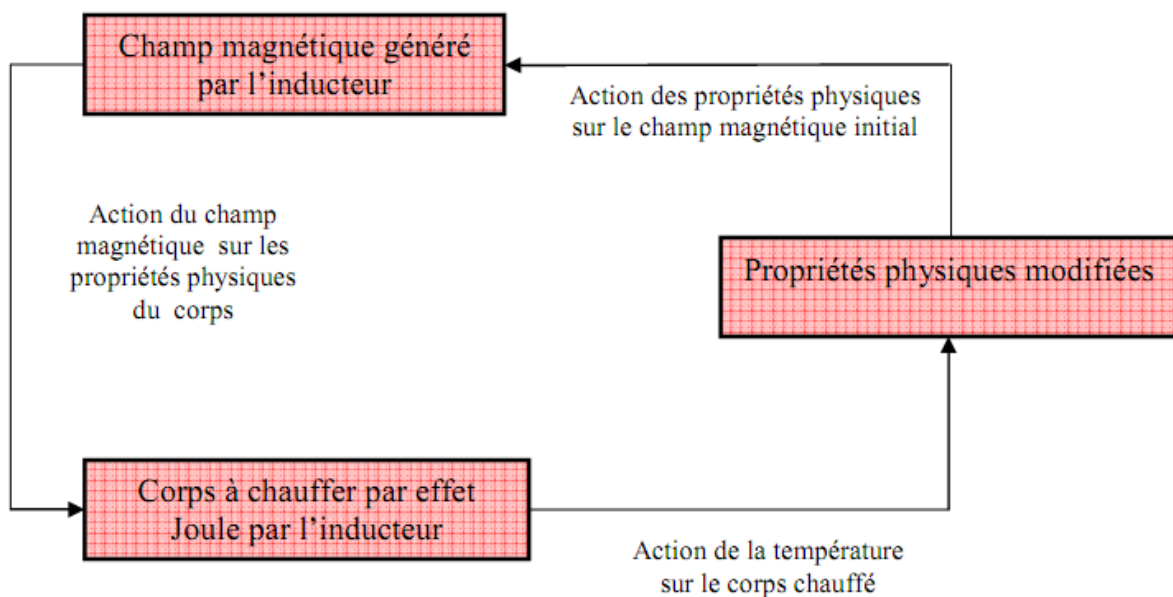


Figure III-6 Schéma d'interaction

Les trois principaux modes de résolution des problèmes couplés sont :

- 1- couplage alterné (MCA) qui est réalisé par le transfert des données d'un problème à l'autre.
- 2- couplage direct (MCD) qui est consiste à résoudre les deux problèmes simultanément.
- 3- couplage paramétré (MCP) qui est consiste à paramétrer le terme de couplage Q par la méthode des élément finis pour une gamme de température et pour un courant d'excitation donné, pour servir de source au problème thermique [16,17]

III-5-Les différentes structures des onduleurs à résonance

III-5-1-Généralités

A l'intérieur de la grande famille des onduleurs autonomes, c'est-à-dire débitant sur charge passive, on fait généralement la distinction entre les onduleurs à commutation forcée et les onduleurs pilotés par la charge, ou à résonance. Dans le premier cas, les transistors principaux sont éteints par la commutation de l'énergie d'un circuit annexe, dans le second cas l'énergie d'extinction est prélevée sur la charge qui est un circuit oscillant. En général, les premiers sont utilisés à fréquence relativement basse, de 0 à 400 Hz, et les seconds à fréquence plus élevée, de 400 à 40 000 Hz. En réalité, la distinction est plus délicate pour certains onduleurs. Notre sujet sera de traiter les onduleurs alimentant une charge monophasée constituée par un circuit oscillant, à une fréquence variable voisine de la résonance de ce circuit, et appelés onduleur à résonance. On ne considérera que les schémas de base les plus usuels [3].

III-5-2- Structures de base des onduleurs à résonance

Les onduleurs de tension ou de courant que nous venons de présenter se comportent comme des vraies sources de tension ou de courant vis-à-vis de la charge alternative. Ils imposent à celle-ci :

– La tension ou le courant E_t , la fréquence. Dans le cas particulier où la charge est constituée par un circuit oscillant peu amorti, en asservissant le pilotage des interrupteurs, on peut obtenir un fonctionnement tel que :

– Les commutations soient toujours de même nature, donc que la réalisation des "interrupteurs" soit facilitée ;

– La grandeur de sortie, courant ou tension, non imposée par la source ait une forme d'onde très voisine de la sinusoïde.

– La source continue fournit l'énergie nécessaire à l'entretien des oscillations.

– Le circuit de résonance d'un convertisseur résonant comprend un condensateur, une inductance et une résistance. Deux types de convertisseurs résonnants sont généralement utilisées: un circuit de résonance série et un circuit résonnant parallèle.

III-5-3- Onduleur à résonance série

L'onduleur série est un onduleur de tension, dont la charge est constituée par une inductance, une résistance et une capacité en série, formant un circuit oscillant.

Un tel circuit résonne à la fréquence :
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Pour laquelle l'impédance :
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} \quad (4.2)$$

Se réduit à R.

Le courant est en phase avec la tension du générateur V_s et égal à V_s/R .

La tension aux bornes de l'inducteur est égale à QV_s ($Q = L\omega_0$) Q : étant le facteur de qualité, (donc très supérieur à V_s). Un tel montage s'applique naturellement aux cas de faibles puissances et en haute fréquence, car l'impédance de l'inducteur est alors élevée $L\omega$, ce qui nécessite une forte tension.

L'onduleur, mettant en œuvre deux cellules de commutation identiques, dans lesquelles les interrupteurs à trois segments restent à définir plus précisément, appliqué au circuit résonant RLC série une tension rectangulaire symétrique de valeur $\pm E$. Du fait de la forte sélectivité du circuit série, le courant I qui circule est quasi-sinusoïdale pour des fréquences proches de la fréquence de résonance. La puissance est réglée à partir de la tension continue. Le fondamentale de la tension est parfaitement synchrone avec la tension réel même le passage par zéro. On retrouve alors les deux cas suivants :

- Si $f < f_r$, le courant est en avance sur la tension, on a affaire à une commutation spontanée de blocage et amorçage commande.
- Si $f > f_r$, le courant est en retard sur la tension, on a affaire à une commutation spontanée d'amorçage et un blocage commandé. Le contrôle du convertisseur ne peut être effectué que par l'intermédiaire de la fréquence de commande [19] [5].

III-5-4 -Onduleur à résonance parallèle

L'inducteur est ici en parallèle avec le condensateur. La source continue réglable est une source de courant obtenue comme précédemment mais avec une forte inductance de lissage. Ce courant circule de façon alternative dans le circuit par ouverture des interrupteurs, selon le même processus que précédemment. Du fait de la forte sélectivité du circuit parallèle, la tension qui apparaît aux bornes du circuit est quasi-sinusoidale.

L'impédance complexe de l'ensemble inducteur-capacité est :

$$|Z| = \sqrt{\frac{R^2 + (L\omega)^2}{(1 - LC\omega)^2 + (RC\omega)^2}} \quad (4.3)$$

A la résonance, Z est maximale en module.

Un cas simple fréquent en chauffage par induction, est celui où la résistance **R** de l'inducteur est faible devant sa réactance **L ω** . Dans ces conditions, on peut dire que si la condition de résonance **LC $\omega^2=1$** est vérifiée, on a :

$$|Z| = \frac{L}{RC} = R_e \quad (4.4)$$

L'impédance du circuit est alors réelle **R_e**. Le courant fourni par le générateur (**I_s**) est minimal, en phase avec la tension et égal à **V_s/R_e**. Le courant dans l'inducteur **I** a pour valeur **QI_s**. Il est très important par rapport au courant du générateur [18,19]. L'analyse du fonctionnement montre que l'influence de la fréquence est tout à fait contraire à celle observée dans les onduleurs de tension.

- Pour $f < f_r$, les signes de la commutation et du courant, dans chaque cellule, sont opposés, ce qui correspond un blocage commandé des interrupteurs.

- Pour $f > f_r$, les signes de la commutation et du courant sont identiques, ce qui correspond à un amorçage commandé des interrupteurs. On plus de ces deux types on trouve un autre type d'onduleurs à résonance dit à injection de courant.

III-5-5 -Etude comparative entre onduleur à charge série et onduleur à charge parallèle

<i>Onduleur Série :</i>	<i>Onduleur Parallèle :</i>
SCHEMAS :	
ALIMENTATION :	
<i>A impédance faible, alimentation par source de tension</i>	<i>A impédance forte, alimentation par une source de courant.</i>
TENSION AUX BORNES DU CIRCUIT OSCILLANT :	
<i>Forme : en créneau ;</i> <i>Valeur : $U_M = U$</i>	<i>Forme : sinusoïdale. Pulsation : $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$</i> <i>Valeur : $U_{eff} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{E}{\cos\delta}$</i>
COURANT FOURNI AU CIRCUIT OSCILLANT :	
<i>Forme : sinusoïdale,</i> <i>Valeur : $I = \frac{4U}{\pi\sqrt{2}R} \cos\delta$</i> <i>Pulsation : $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$</i>	<i>Forme : en créneau</i> <i>Valeur : $I = \frac{R^2}{8} \frac{\cos^2\varphi}{\cos^2\delta} \frac{U}{R}$</i>
PUISSANCE CONVERTIE :	
<i>Valeur : $P_{Conv} = \frac{8}{\pi^2} \frac{U^2}{R} \cos^2\delta$</i> <i>Ou $P = \frac{4\cos\delta}{1+\cos\delta} U_M I_M$</i>	<i>Valeur : $P_{Conv} = \frac{\pi^2}{8} \frac{U^2}{R} \frac{\cos^2\varphi}{\cos^2\delta}$</i> <i>Ou $P = \frac{4}{\pi} U_M I_M \cos\delta$</i>
DEPHASAGE :	
<i>L'augmentation du déphasage :</i> <i>-Diminue la fréquence. -Fait participer d'avantage les diodes de récupération et la capacité de filtrage.</i>	<i>L'augmentation du déphasage :</i> <i>-Augmente la fréquence. -Sollicite davantage en tension et en courant l'inductance de lissage.</i>

Tableau III-7 Comparaison entre les deux types d'onduleurs.

III-5-6 -Commande par modulation de largeur d'impulsions

Les tensions effectuées par les deux types de commande précédentes (symétrique et décalée) présentent plusieurs harmoniques. Il est donc nécessaire de chercher à éliminer ou diminuer le taux d'harmoniques afin de se rapprocher plus d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour cela on fait appel à la technique de la modulation de largeur d'impulsions (MLI) ; cette stratégie de commande consiste à envoyer plusieurs impulsions par demi-période aux interrupteurs de l'onduleur. Ces impulsions sont contrôlées en largeur. Cette stratégie de commande permet, la diminution du taux d'harmoniques THD [17].

La MLI est basée sur la comparaison de deux signaux analogiques pour la détermination d'ouverture et fermeture des interrupteurs, dans notre cas nous nous intéressons à la commande triangle sinusoïdale. On compare deux signaux prenant :

- Un signal de référence sinusoïdal d'amplitude et de fréquence réglable variable.
- Un signal triangulaire de fréquence très élevée (environ 100 kHz) et d'amplitude fixe appelé porteuse.

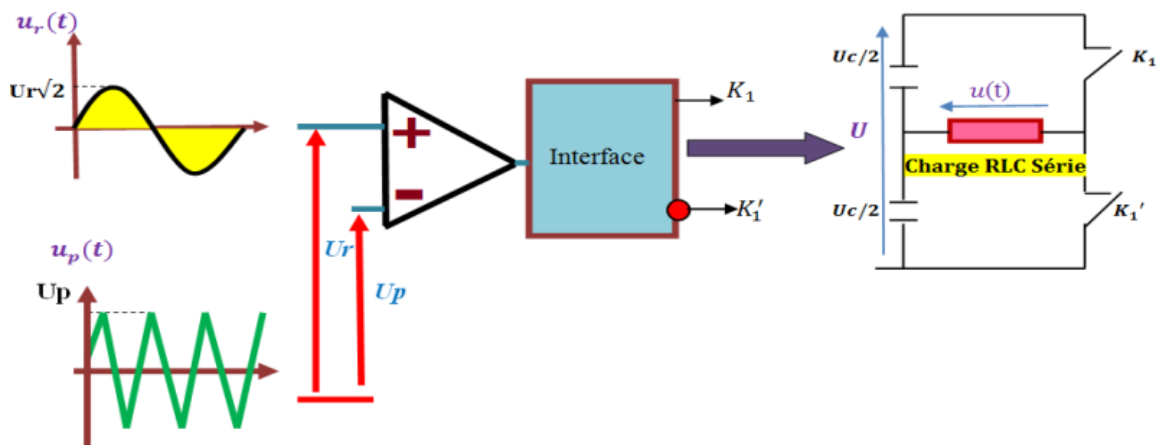


Figure III-8 Schéma de principe de la commande MLI sinus-triangle.

Le signal de sortie de comparateur délivre un niveau de tension correspondant à '1' dans l'intervalle du temps où le signal de référence est supérieur au signal de porteuse et une tension nulle correspondant à '0' dans l'intervalle du temps où le signal de référence est inférieur au signal de porteuse.

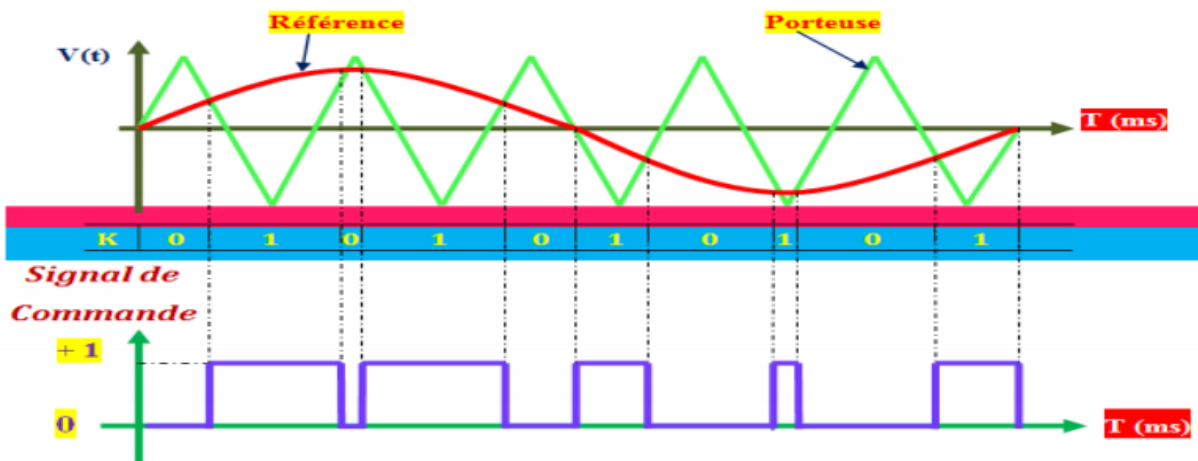


Figure III-9 Forme d'onde de la commande MLI triangle sinusoïdale.

- **Pertes par commutation**

Généralement, les convertisseurs statiques à semi-conducteur fonctionnent en commutation dure et cela, pour divers types de convertisseurs CC-CC et CC-CA contrôlés par modulation de largeur d'impulsions **MLI**. Dans cette situation, un courant spécifique est arrêté ou fourni avec un seuil de tension déterminé lorsque la commutation arrive. Cette procédure entraîne des pertes par commutation importantes et cela devient pire lorsque la fréquence de commutation augmente. Cet effet est la cause de la limitation en fréquence des convertisseurs de puissance classiques. En plus, cela produit aussi une quantité importante de bruit électromagnétique, dû aux grandes variations de tension et de courant générées dans des temps très courts. Une relation simplifiée qui permet de calculer les pertes par commutation est la suivante [36] :

$$P_c = \frac{1}{2} V_c I_c f_c (t_F + t_o) \quad (4.5)$$

Avec:

P_c = pertes par commutation; [W]

V_c = tension de commutation; [V]

I_c = courant de commutation; [A]

f_c = fréquence de commutation; [Hz]

t_F = temps de fermeture; [S]

t_o = temps d'ouverture. [S]

III-6- Modélisation du système de chauffage par induction.

La charge considérée est constituée de la pièce à chauffer et de l'inducteur de N spires parcourues par le courant de l'onduleur. L'ensemble inducteur et charge forment un circuit électrique présenté sur la figure 4.18. L'inducteur et la pièce à chauffer est équivalent à une inductance et une résistance en série.

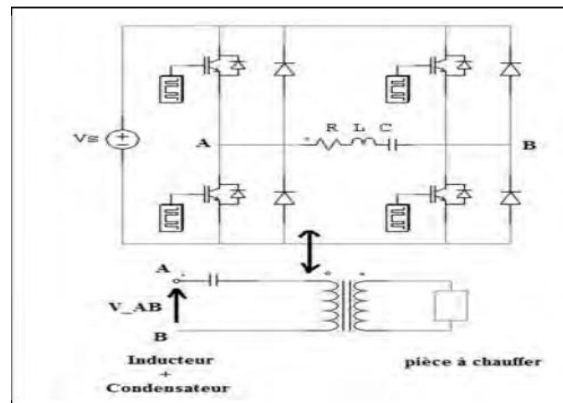


Figure III-10 : Schéma équivalent (inducteur + pièce + condensateur en série)

Un transformateur peut être utilisé pour adapter l'impédance. Les difficultés techniques apparaissent lorsqu'alors les fréquences utilisées deviennent importantes. Les culasses magnétiques en tôles d'acier magnétiques ne fonctionnent que jusqu'à 10 kHz. Au-delà, il faut employer des ferrites dont la mise en œuvre est plus délicate.

Actuellement, à ce niveau de fréquences maximales permettant d'utiliser un transformateur de puissance sont de l'ordre de 100 kHz. Les pertes qui s'y développent commencent à être prohibitives, ce qui nécessite un refroidissement énergique du circuit magnétique [27].

III-6-1- Simulation d'onduleur a résonance pour le chauffage par induction

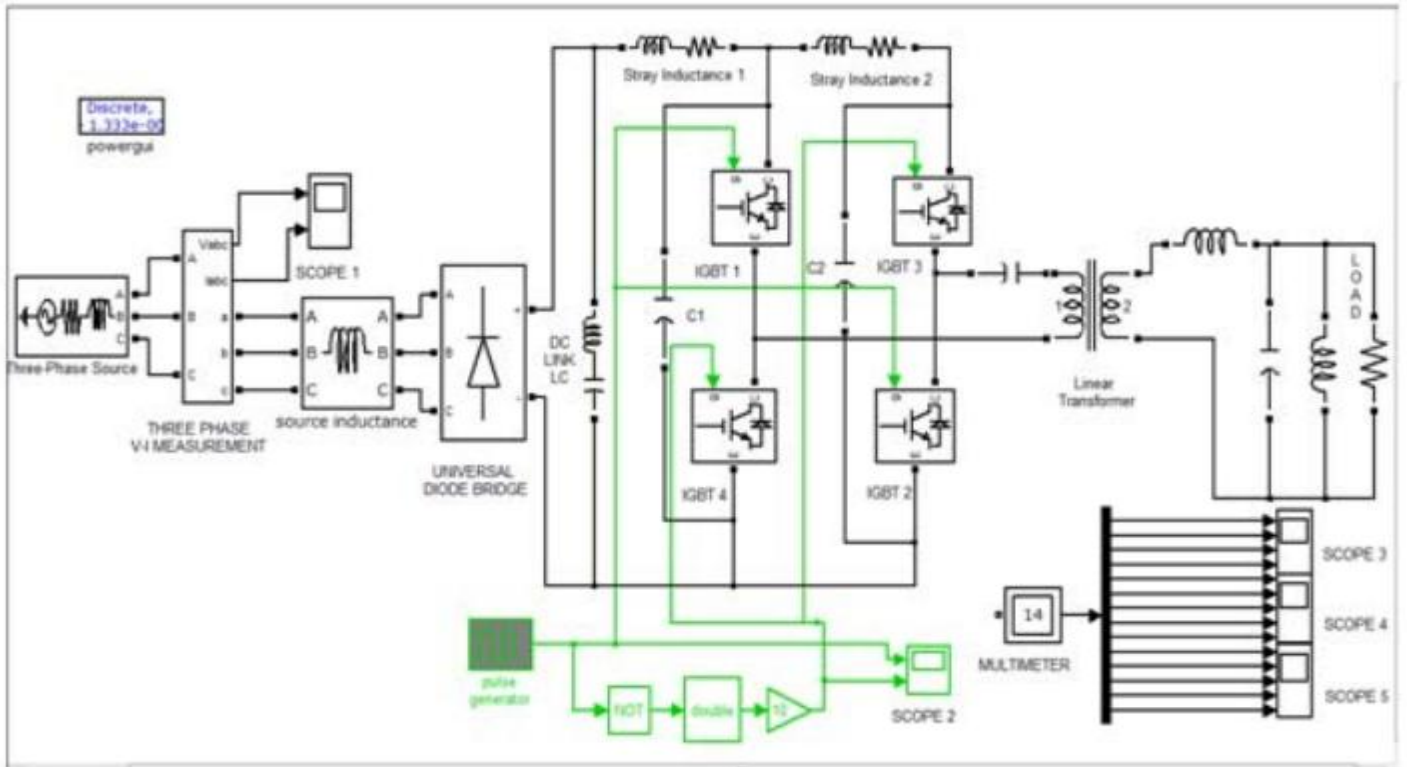


Figure III.11 Simulation du système

➤ Les résultats de simulation prises à l'aide de logiciel Matlab/Simulink

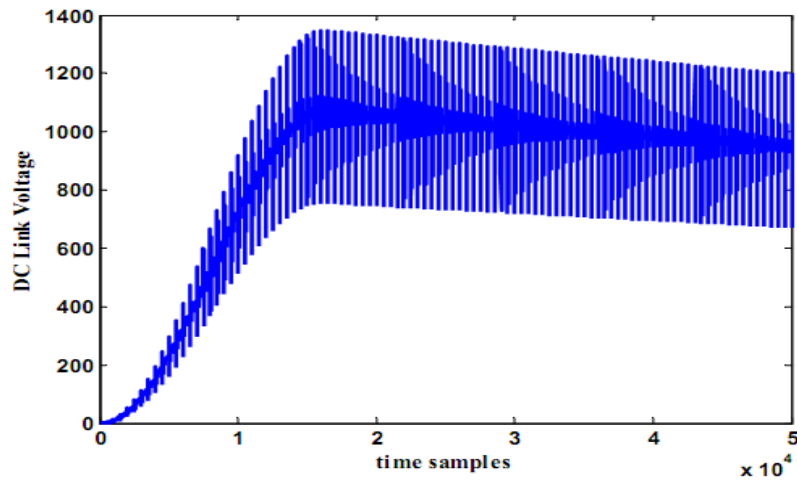


Figure III-12 : DC link voltage

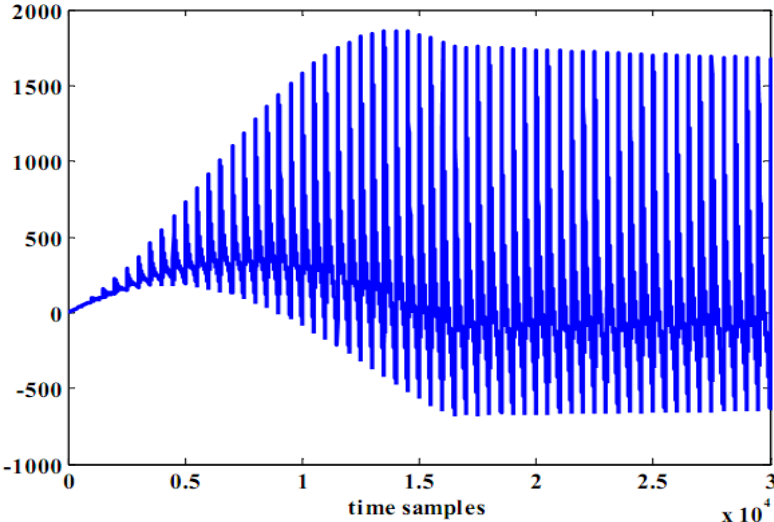


Figure III-13 : courant de DC LINK

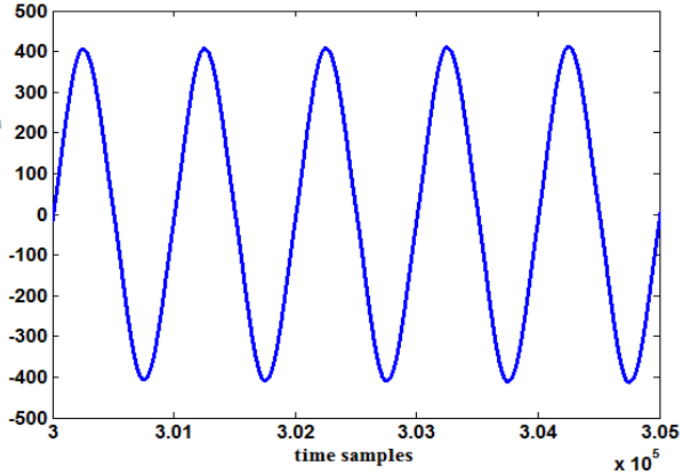


Figure III-14 : intensité de resistance de charge

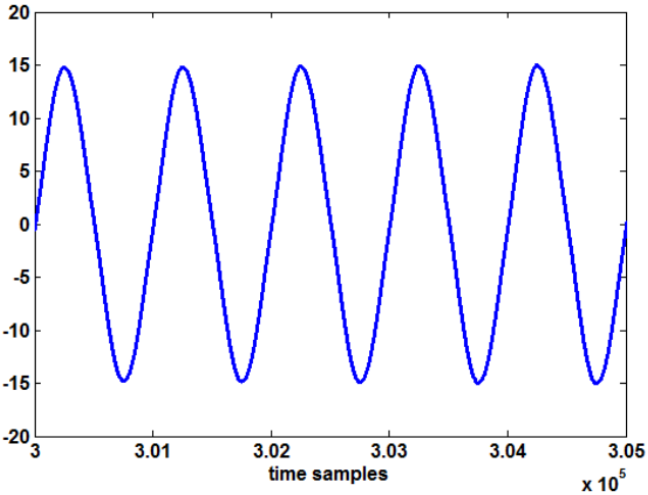


Figure III-15 : courant de resistance de charge

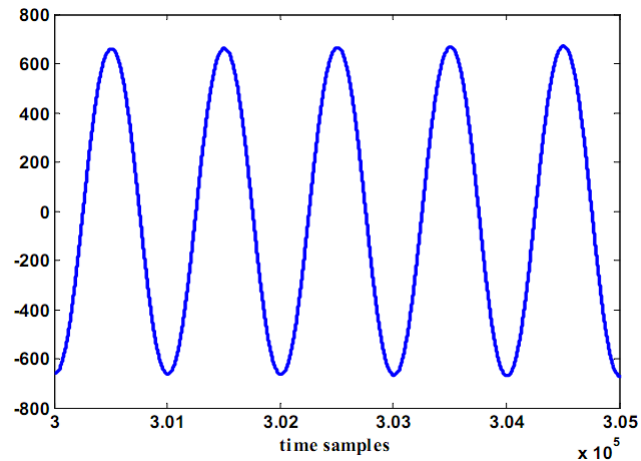


Figure III-16 courant d'inductance de charge

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles mathématiques régissant les phénomènes physiques concernant le fonctionnement du procédé de chauffage par induction et en particulier le cas des structures axisymétriques.

Les principales méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles sont ensuite passées en revue et nous avons mis l'accent sur le guide méthodologique pour la formulation magnétothermique par la méthode des éléments finis.

Finalement nous avons présenté les différentes topologies des convertisseurs résonants utilisés dans différents domaines. Nous avons vu aussi les propriétés et les applications des onduleurs à résonance afin de choisir la topologie qui convient à notre étude. Et nous avons notamment montré l'avantage de l'utilisation d'un onduleur à commande **MLI** monté sur une charge résonante

Introduction

Le procédé de traitement par induction est régi par plusieurs phénomènes physiques à savoir, l'électromagnétisme, le transfert de chaleur et la mécanique du solide. Les industriels utilisant ce procédé, s'approchent du résultat escompté de manière empirique, en utilisant leur expérience et le passage obligatoire par de nombreux essais réels. Néanmoins, cette méthode d'opérer est coûteuse en temps, en moyens humains et matériels. Souvent les essais nécessitent même l'arrêt de la chaîne de production et engendrent donc des pertes importantes pour l'entreprise. D'autre part, même si les bases physiques du procédé sont relativement connues, il est difficile de déterminer leurs effets pour des géométries de pièces ou d'inducteurs complexes.

La modélisation du procédé est un outil indispensable aujourd'hui pour atteindre des objectifs précis en termes de répartitions de température et de courants, tant spatiales que temporelles. Elle apporte également une bonne compréhension des phénomènes physiques et de leurs interactions ; le but étant de déterminer la fréquence, la puissance électrique ou la géométrie de l'inducteur optimales pour avoir la meilleure performance finale de la pièce possible. La modélisation de ces procédés de chauffage et de traitements de surface est complexe à mettre en œuvre, de par la nature multi-physique du procédé. Les études portées sur le sujet d'un point de vue numérique sont nombreuses.

Des logiciels commerciaux de simulation du procédé existent. Le logiciel **multiphysique COMSOL** propose, à travers son module **AC/DC**, un couplage électromagnétique afin de modéliser les traitements de surface par induction.

IV-1-Présentation de COMSOL Multiphysics

IV-1-1- Méthodes numériques et l'outil informatique

Le développement des méthodes numériques (différences finies, volumes finis, éléments finis, intégrales de frontière, etc.) est heureusement accompagné par les avancées du matériel informatique. Des programmes qui nécessitaient autrefois des calculateurs complexes et onéreux tournent à présent sur les PC d'un coût modeste. Cela a contribué à faciliter la mise au point de logiciels [26].

Nous avons présenté dans la section précédente les différentes formulations des équations de Maxwell et élaborons dans ce chapitre la présentation du logiciel utilisé dans ce travail.

IV-1-2- Logiciels utilisant les éléments finis [26]

Parmi les Logiciels utilisant éléments finis on peut citer :

- 1- ABAQUS
- 2- ANSYS
- 3- CAST3M
- 4- ASTER
- 5- COMSOL MULTIPHYSICS
- 6- CosmosWorks
- 7- Dytran
- 8- EuroPlexus
- 9- Flux2D/ 3D.

Tous ces logiciels sont performants et adaptables aux différents problèmes rencontrés en physique. Pour le chauffage par induction, on a choisi "Comsol Multiphysics" à cause de sa souplesse et sa rapidité d'exécution.

IV-1-3- COMSOL Multiphysics [27]

Pour réaliser le modèle magnétodynamique, on a utilisé le code de calcul Comsol, c'est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en sciences physiques et en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques 2D et 3D .

COMSOL multi-physique autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP).

La méthode de 2D est basée sur la composition de structures de base rectangulaire ou circulaire.

L'application de ce logiciel pour résoudre de tel problème est basée sur les étapes suivantes

- 1) Choix du mode de résolution 2D.
- 2) Choix du type de problème lié à l'application (AC/DC dans notre cas).
- 3) Construction du domaine d'étude.
- 4) Introduction des propriétés physiques liées à chaque milieu et à chaque problème.
- 5) Introduction des conditions aux limites pour tous les problèmes considérés.
- 6) Maillage du domaine d'étude et contrôle de sa qualité.
- 7) Choix du régime de résolution stationnaire ou temporel et la méthode utilisée.
- 8) Résolution et exploitation des résultats.

L'AC/DC Module permet de simuler des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques dans des applications statiques et à basses fréquences. Les applications type concernées sont les condensateurs, les inducteurs, les isolateurs, les bobines, les moteurs, les actionneurs et les capteurs. Le module comporte des outils spécialisés pour extraire automatiquement des simulations les valeurs de paramètres tels que la résistance, la capacitance, l'inductance, l'impédance, la force et le couple (Figure 5.1).

Pour l'étude théorique, il s'agit de la résolution numérique du problème magnétothermique. On a calculé et présenté avec des courbes les grandeurs magnétiques notamment les densités des courants induits et de la puissance dissipée par effet Joule et thermique représentées par la distribution et les variations de la température dans la pièce à chauffer (Figure 5.2).

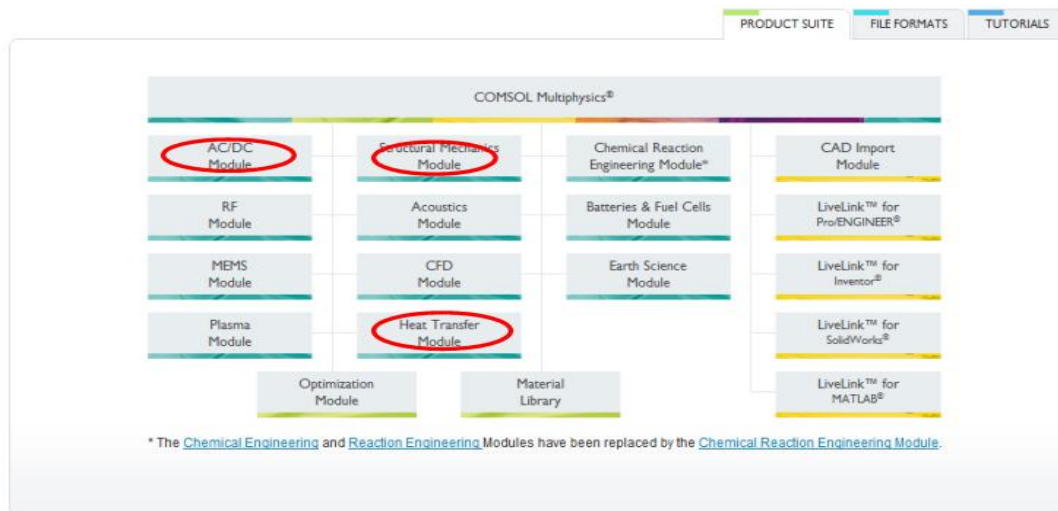


Figure IV.1 Logiciel COMSOL Multiphysics .

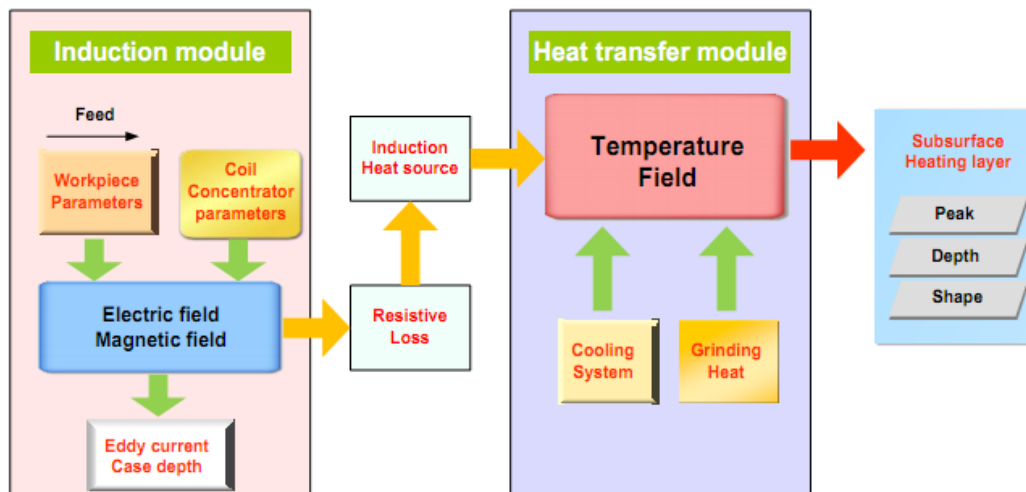


Figure IV.2 Le procédé de chauffage par induction.

IV-2- Simulation numérique

IV-2-1-Présentation du problème

Comme on l'a cité précédemment, l'induction électromagnétique est un procédé très complexe faisant intervenir plusieurs domaines de la physique (électromagnétisme, transfert de chaleur, mécanique, etc.). Cette nature multiphysique combinée à des vitesses de chauffe très grandes (supérieure à 2000°C/s pour cette étude) rendent très difficile l'obtention de pièce avec les propriétés mécaniques désirées. Maîtriser et prédire la distribution de température au

sein d'une pièce traitée par induction est donc crucial si on veut optimiser ce procédé. L'objectif principal de la présente étude est de développer un modèle numérique de la chauffe par induction à l'aide du logiciel COMSOL. Ce modèle a pour but de simuler la chauffe par induction d'un tube en acier et de prédire l'évolution de la température au cours de la chauffe. Le modèle doit aussi prendre en compte la nature multiphysique du procédé, ainsi que le comportement non linéaire des propriétés matériau en fonction de la température et du champ magnétique. La chauffe étant très rapide, temps de chauffe = 3 s, Les données matériau présentes dans la littérature ne peuvent représenter le comportement de l'acier durant une chauffe aussi rapide. C'est pour cela qu'il faut étudier l'effet de la variation des propriétés matériau sur la distribution de température et dégager ainsi celles qui doivent être calibrées. Finalement, en se basant sur des mesures de températures faites sur un tube chauffé par induction, des propriétés matériau vont être ajustées afin de reproduire l'historique thermique mesuré.

IV-2-2- Phénomènes physiques dans l'induction

Plusieurs phénomènes physiques entrent en jeu lors d'un traitement par induction électromagnétique ; Il s'agit de la mécanique, l'électromagnétisme et le transfert de chaleur. Le comportement mécanique n'étant pas considéré dans cette étude, l'outil de simulation adopté et développé ne considère que l'électromagnétisme et le transfert de chaleur.

IV-2-2-1- L'électromagnétisme dans l'induction

Le système d'équations de Maxwell permet de modéliser tous les phénomènes électromagnétiques :

$$\text{➤ Équation du flux magnétique : } \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5.1)$$

$$\text{➤ Équation de Maxwell-Gauss : } \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (5.2)$$

$$\text{➤ Équation de Maxwell-Faraday : } \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5.3)$$

$$\text{➤ Équation de Maxwell-Ampère : } \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5.4)$$

Où \mathbf{B} est le flux magnétique imposé (T), \mathbf{E} est le champ électrique (V.m-1), \mathbf{H} est le champ magnétique résultant (A.m-1), \mathbf{J} est la densité de courant (A.m-2) et \mathbf{D} est le champ de déplacement électrique (C.m-2) .

Les paramètres en caractères gras représentent des vecteurs avec deux dimensions puisque le modèle numérique développé est un modèle 2D axisymétrique.

L'équation (5.1), appelée aussi la première loi de Gauss (magnétique), stipule que la divergence de la densité du flux magnétique est nulle. Autrement dit, les lignes du champ (\mathbf{B}) forment des boucles continues. L'équation (5.2) est appelée aussi la deuxième loi de Gauss (électrique), elle montre que les lignes du champ de déplacement électrique (\mathbf{D}) forment aussi des boucles continues. L'équation (5.3) décrit comment la variation d'un champ magnétique peut créer (induire) un champ électrique et des courants induits dans la région au voisinage du conducteur dont le sens est contraire à celui du champ magnétique. L'équation (5.4) énonce que les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par les courants électriques (théorème d'Ampère) et par la variation d'un champ électrique. (Nemkov, 2004).

Pour pouvoir simuler le phénomène électromagnétique, il faut compléter les équations de Maxwell par les paramètres matériaux qui relient les différentes valeurs scalaires entre elles :
La permittivité diélectrique ε (F.m-1)

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (5.5)$$

La perméabilité magnétique μ (H.m-1)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5.6)$$

La conductivité électrique σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5.7)$$

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

$$\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \mathbf{B}) - \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{J} \quad (5.8)$$

où \mathbf{A} est le vecteur potentiel magnétique (Wb/m) et \mathbf{v} est le vecteur vitesse de la particule (m/s).

La figure suivante montre l'équation générale de l'électromagnétisme (5.8) telle qu'elle apparaît dans **COMSOL**.

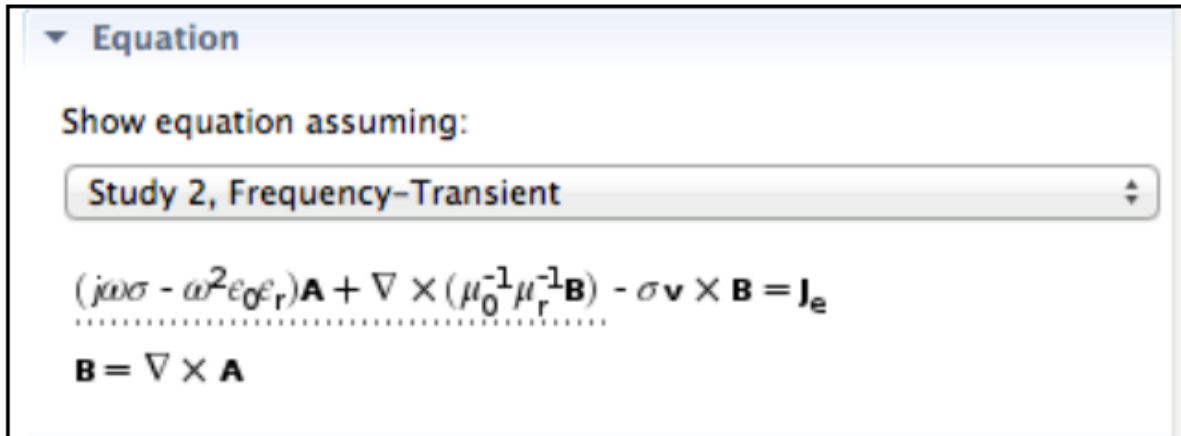


Figure IV.3 Équation de l'électromagnétisme utilisé dans COMSOL

Bien que des approximations puissent être faites en fonction des fréquences utilisées et du mode axisymétrique, COMSOL utilise les équations sous leur forme la plus complète, c'est-à-dire sans approximations afin de garder l'aspect multiphysique.

IV-2-2-2- Transfert de chaleur

Dans le procédé de traitement par induction, les trois modes de transfert de chaleur, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement sont présents.

➤ Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction consiste à transmettre la chaleur des parties chaudes de la pièce vers les parties froides par transfert de l'agitation thermique au sein d'une pièce. Il est décrit par la loi de Fourier:

$$q_{cond} = -kgrad(T) \quad (5.9)$$

Où q_{cond} est le flux de chaleur transmise par conduction ($W.m^{-2}$), k est la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) et T est la température (K).

D'après cette loi, le taux de chaleur transmise par conduction est proportionnel au gradient de température (différence de température) ainsi qu'à la conductivité thermique du matériau qui dépend de la température. Autrement dit, une grande différence de température entre la surface et le cœur de la pièce (ce qui le cas lors d'un traitement thermique superficiel par induction), et une grande valeur de la conductivité thermique du matériau entraînent un transfert important de chaleur des régions chaudes vers les régions froides ce qui réduirait le gradient de température.

➤ Transfert de chaleur par convection

Contrairement à la conduction, 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.

$$q_{conv} = h(T_s - T_a) \quad (5.10)$$

où q_{conv} est le flux de chaleur transmise par convection (W.m⁻²), h est le coefficient de transfert par convection (W.m⁻².K⁻¹), T_s est la température de la surface (K) et T_a est la température ambiante (K).

Le coefficient de transfert par convection h dépend des propriétés thermiques de la pièce traitée, de la température, de la vitesse du fluide à la surface ainsi que des propriétés thermiques du fluide environnant. Ce coefficient peut être calculé en utilisant une des nombreuses corrélations présentes dans la littérature.

➤ Transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement est introduit comme un phénomène de propagation d'énergie électromagnétique causée par la différence de température. Ce phénomène est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann de la radiation thermique qui stipule que les pertes par rayonnement sont contrôlées par la différence des températures (à la puissance 4) ainsi que l'émissivité du corps :

$$q_{rad} = C_s(T)(T_s^4 - T_a^4) \quad (5.11)$$

où q_{rad} est le flux de chaleur transmise par rayonnement (W.m⁻²), C_s est le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement (W.m⁻².K⁻⁴), T_s est la température de la surface (K) et T_a est la température ambiante (K).

V-2-2-3- Couplage électromagnétique-thermique

Dans les paragraphes précédents, on a pu traiter séparément les phénomènes physiques en électromagnétique et en thermique. Dans le procédé de traitement thermique par induction, ces deux phénomènes physiques sont liés. Les phénomènes thermiques dépendent des

phénomènes électromagnétiques parce que les sources de chaleur sont les pertes par effets Joule provoquées par les courants de Foucault. En plus de cela, les propriétés matériau dépendent toutes de la température. Pour simuler le procédé d'induction, il faut donc traiter les deux phénomènes physiques ensemble. La figure 5.4 présente la procédure de couplage entre les champs magnétique et thermique. Le logiciel sur lequel s'est faite la simulation, à savoir COMSOL, couple les deux phénomènes à l'aide de la méthode de couplage dite forte (fully coupled). 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.

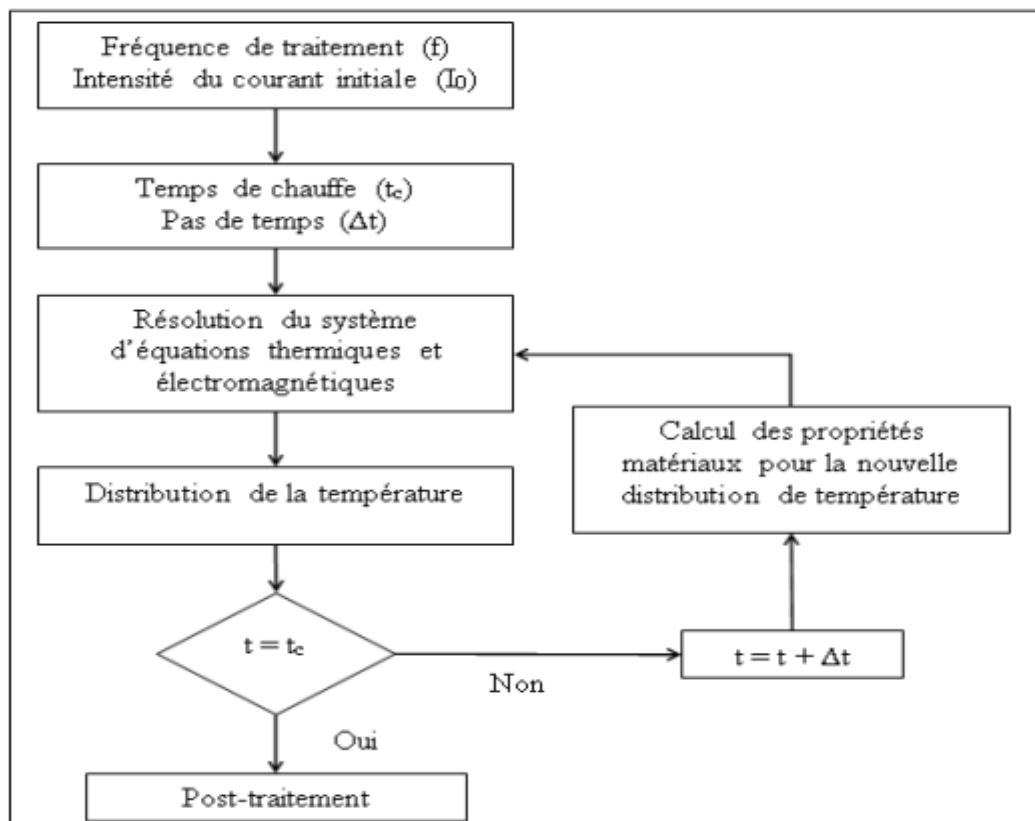


Figure IV.4 Schéma du couplage fort utilisé dans COMSOL

IV-2-3- Construction de système sur COMSOL Multiphysiques

1- Choix des modules physiques :

Nous avons choisi: chauffage par induction .

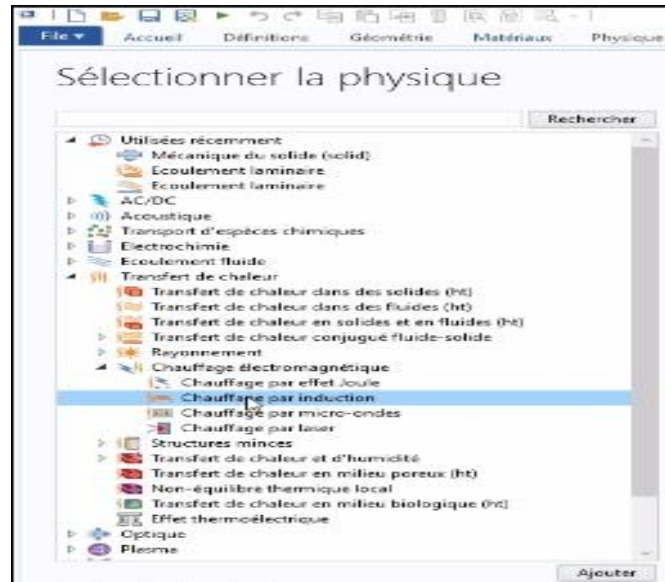


Figure IV.5 Choix des modules physiques

2- Choix du type d'étude: (Temporelle, Fréquentielle, Stationnaire)

Nous faisons notre travail sur le régime temporel.

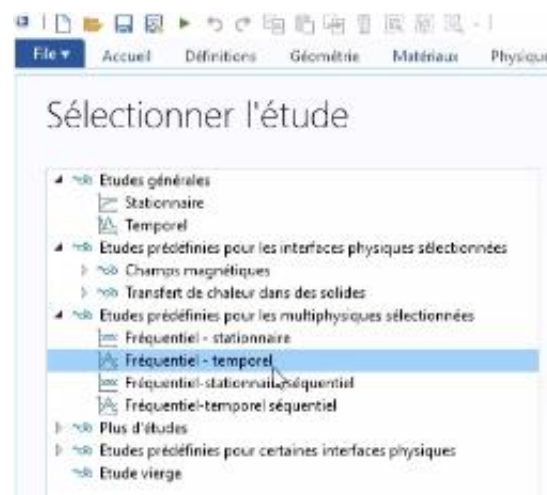


Figure IV.6 Choix du type d'étude

3- Construction de la géométrie :

La figure (5.7) représente la géométrie de modèle .

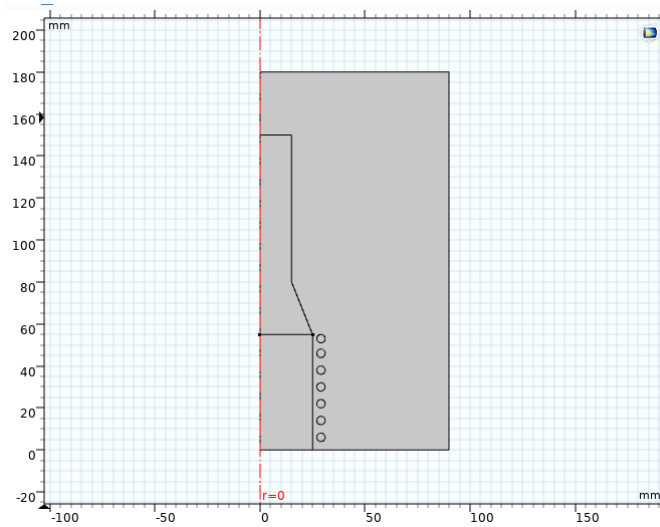


Figure IV.7 Géométrie du modèle 2D axisymétrique

4- Choix des matériaux :



Figure IV.8 choix des matériaux

➤ Matériau 1: Air

Propriété	Variable	Valeur	Unité	Groupe de propriétés
<input checked="" type="checkbox"/> Perméabilité relative	mur_iso ; m...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Capacité thermique à pression constante	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Conductivité thermique	k_iso ; kii = k...	44.5[W/(m*K)]	W/(m·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Conductivité électrique	sigma_iso ; s...	4.032e6[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Permittivité relative	epsilon_iso ; ...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique	rho	7850[kg/m^3]	kg/m³	Basic
Coefficient de dilatation thermique	alpha_iso ; al...	12.3e-6[1/K]	1/K	Basic
Module d'Young	E	200e9[Pa]	Pa	Module d'Young et coefficient de Poisson
Coefficient de Poisson	nu	0.30	1	Module d'Young et coefficient de Poisson
Module élastique du 3ème ordre de Murnaghan	l	-3.0e11[Pa]	N/m²	Murnaghan
Module élastique du 3ème ordre de Murnaghan	m	-6.2e11[Pa]	N/m²	Murnaghan
Module élastique du 3ème ordre de Murnaghan	n	-7.2e11[Pa]	N/m²	Murnaghan

Figure IV.9 propriétés d'Air

➤ **Matériau 2 : Les bobines en cuivre**

Contenus matériau				
Propriété	Variable	Valeur	Unité	Groupe de propriétés
<input checked="" type="checkbox"/> Perméabilité relative	mur_iso ; mu...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Conductivité électrique	sigma_iso ; si...	5.998e7[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Permittivité relative	epsilon_r_iso ; ...	1	1	Basic
Coefficient de dilatation thermique	alpha_iso ; al...	17e-6[1/K]	1/K	Basic
Capacité thermique à pression constante	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg-K)	Basic
Masse volumique	rho	8960[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
Conductivité thermique	k_iso ; kii = k...	400[W/(m*K)]	W/(m-K)	Basic
Module d'Young	E	110e9[Pa]	Pa	Module d'Young et coefficient de Poisson
Coefficient de Poisson	nu	0.35	1	Module d'Young et coefficient de Poisson
Résistivité de référence	rho0	1.72e-8[ohm*m]	Ω.m	Résistivité linéarisée
Coefficient de résistivité dépendant de la température	alpha	0.0039[1/K]	1/K	Résistivité linéarisée
Température de référence	Tref	298[K]	K	Résistivité linéarisée

Figure IV.10 propriétés de cuivre

➤ **Matériau 3 : Diélectrique**

Contenus matériau				
Propriété	Variable	Valeur	Unité	Groupe de propriétés
Coefficient de dilatation thermique	alpha_p_iso ; al...	alpha_p(pA,T)	1/K	Basic
Masse molaire moyenne	Mn	0.02897	kg/mol	Basic
Viscosité de volume	muB	muB(T)	Pa-s	Basic
Perméabilité relative	mur_iso ; m...	1	1	Basic
Permittivité relative	epsilon_r_iso ; ...	1	1	Basic
Viscosité dynamique	mu	eta(T)	Pa-s	Basic
Rapport des chaleurs spécifiques	gamma	1.4	1	Basic
Conductivité électrique	sigma_iso ; s...	0[S/m]	S/m	Basic
Capacité thermique à pression constante	Cp	Cp(T)	J/(kg-K)	Basic
Masse volumique	rho	rho(pA,T)	kg/m^3	Basic
Conductivité thermique	k_iso ; kii = k...	k(T)	W/(m-K)	Basic
Vitesse du son	c	cs(T)	m/s	Basic

Figure IV.11 propriétés de l'acier

5- Champs magnétiques

➤ **Loi d'ampère**

▼ **Champ magnétique**

Relation constitutive:

Perméabilité relative

B = μ₀μ_rH

Perméabilité relative:

μ_r A partir du matériau

▼ **Courant de conduction**

Conductivité électrique:

σ A partir du matériau

▼ **Champ électrique**

D = ε₀ε_rE

Permittivité relative:

ε_r A partir du matériau

Figure IV.12 propriétés de champ magnétique

➤ La bobine

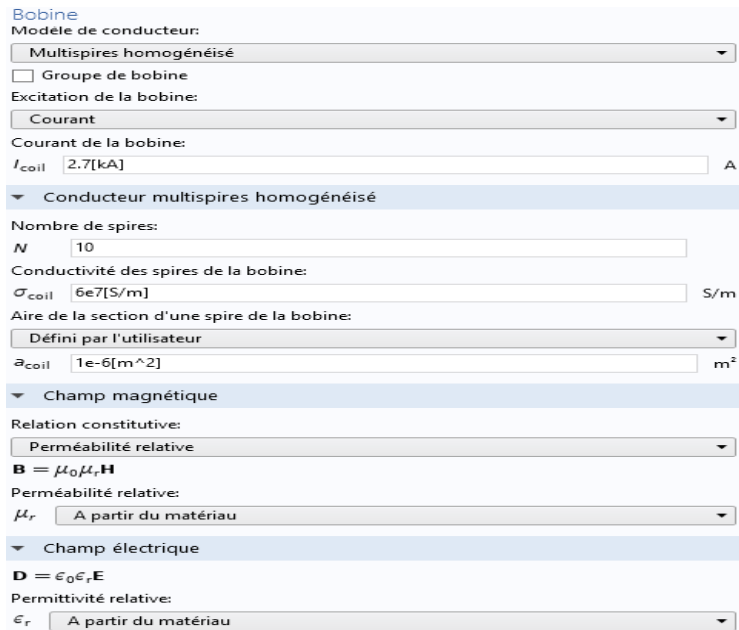


Figure IV.13 propriétés de la bobine

6- Chauffage électromagnétique

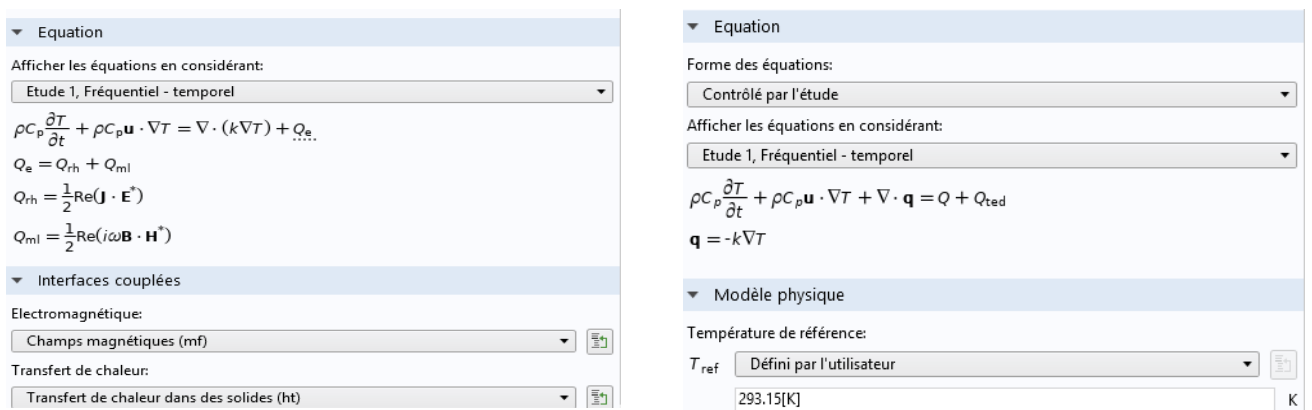


Figure IV.14 Transfert de chaleur dans des solides

7- Choix du maillage :

Cette étape sert à définir les volumes élémentaires pour permettre la discrétisation du système continu. La dimension de la maille peut être modifiée afin de diminuer le nombre d'éléments, de réduire l'utilisation de la mémoire et d'augmenter la vitesse de calcul. (Figure 5.12)

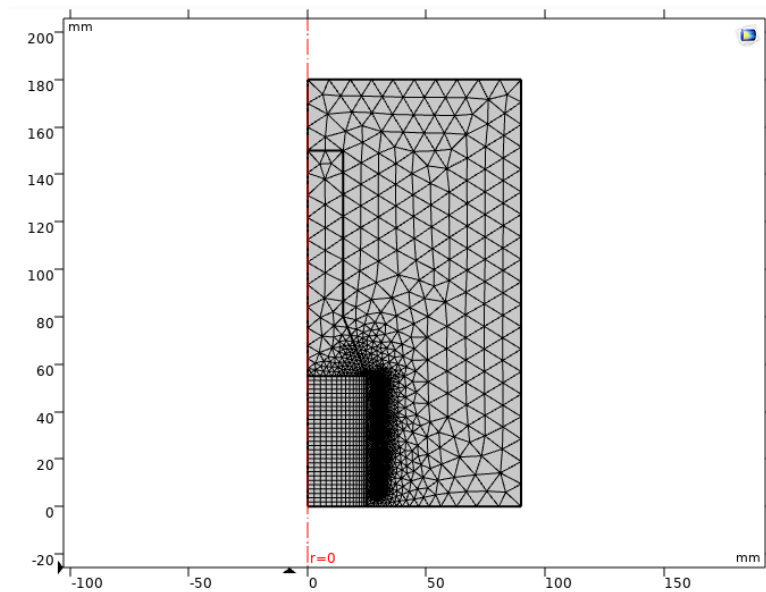


Figure IV.15 Maillage retenu pour le modèle 2D axisymétrique

IV-2-4- Résultat de la simulation

Après avoir défini les différents paramètres de la simulation, des matériaux, de la géométrie et du maillage, et après avoir bien défini les conditions aux limites, il ne restait plus qu'à lancer la simulation pour une chauffe de 3s.

Compilation des équations
Calculer jusqu'à la sélection Calculer

Label:

▼ Etude et étape

Utiliser l'étude:

Utiliser l'étape de l'étude:

Décomposition des variables complexes en parties réelle et imaginaire

▼ Log

Conserver les avertissements dans l'enregistrement du log

```
<---- Compilation des équations: Fréquentiel - temporel dans Etude 1/Solution 1
(sol1) -----
Départ le 17 mai 2019 04:00:38.
Ordre des fonctions de forme géométrique: Quadratique
Exécution en cours sur Intel(R) Core(TM) i7 CPU Q 740 at 1.73 GHz.
Utilisation de 1 socket avec 4 coeurs sur sony.
Mémoire disponible: 4.08 GB.
Temps: 3 s.
Mémoire physique: 1.24 GB
Mémoire virtuelle: 1.33 GB
Fin le 17 mai 2019 04:00:41.
----> Compilation des équations: Fréquentiel - temporel dans Etude 1/Solution 1
(sol1) ----->
```

Figure IV.16 Compilation des équations

➤ **Densité de flux magnétique**

la figure IV.17 représente les distributions de la densité de flux magnétique en 2D .

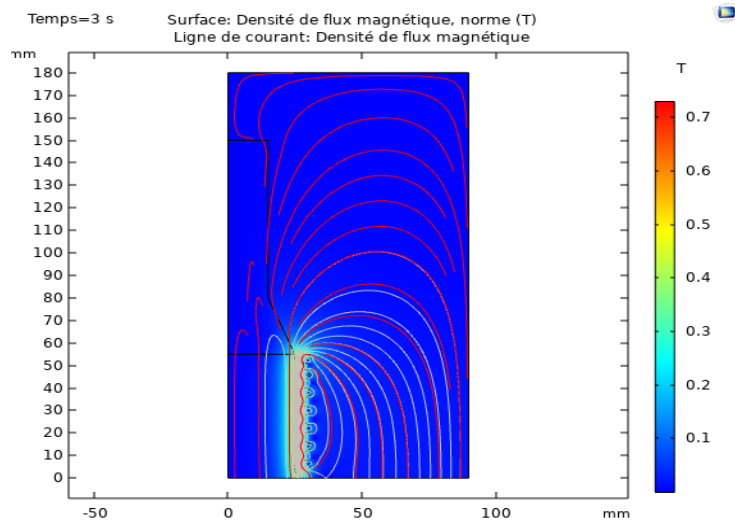


Figure IV.17 les distributions de la densité de flux magnétique

➤ **Distribution de température**

La figure 5.18 représente la distribution de température à la fin de la chauffe de 3 s. Ce que l'on remarque en premier c'est que la chaleur est concentrée sur une couche mince à la surface de la pièce, c'est une conséquence directe de l'effet de peau magnétique. On remarque aussi que les bords de la pièce sont plus chauds que le plan médian ce qui peut être expliqué par l'effet de bord. On voit alors que les deux effets électromagnétiques, à savoir l'effet de peau et l'effet de bord sont présents pour cette géométrie. le profil de température à la surface supérieure de la pièce à différents instants de la chauffe. On remarque que les températures maximales sont enregistrées en surface. On constate aussi une diminution rapide de la température en fonction de la profondeur.

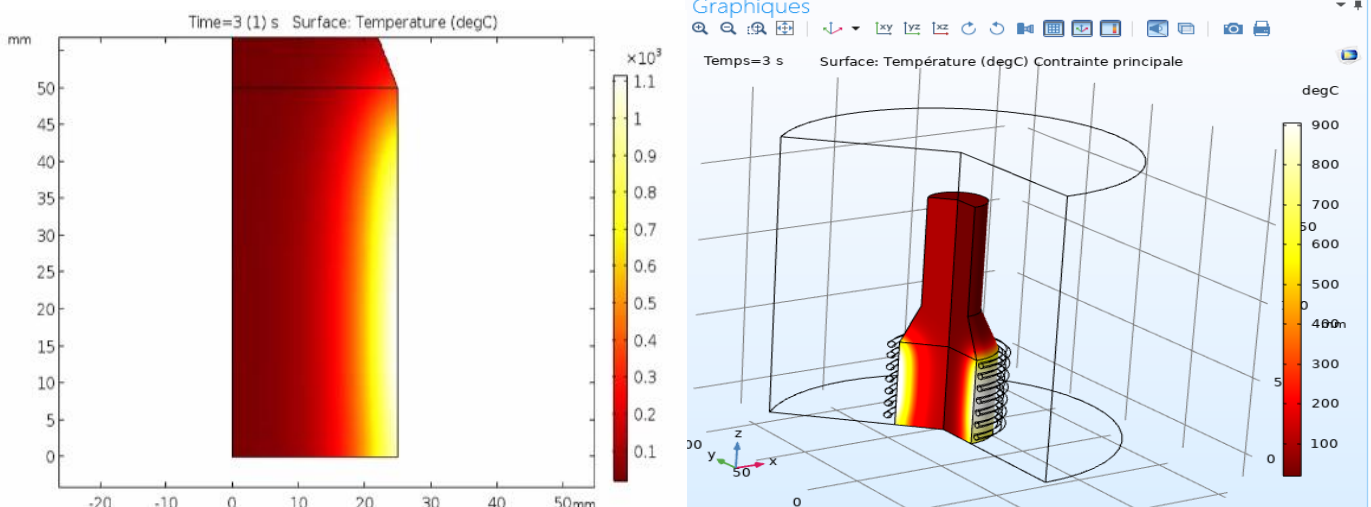


Figure IV.18 Distribution de la température à la fin de la chauffe

➤ **Processus de trempe**

- Chauffage en 3s par induction ; Electromagnétisme, thermique et changement de phase. (*ferrite -> austénite*)
- Refroidissement rapide :trempe ; thermique et transformation de phase. (*austénite ->martensite + bainite*)
- Mécanique (dilatation thermique et déformation plastique)

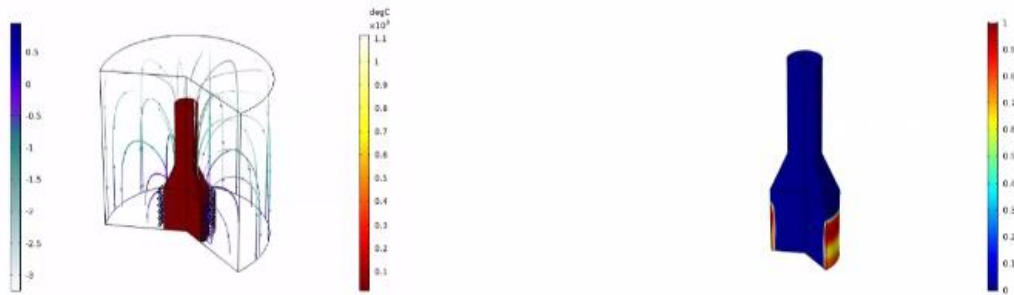


Figure IV.19 Processus de trempe

➤ **Transformation de phase**

Formation d'austenite décrite par le modèle de Leblond et Devaux :

$$a_t = \frac{1}{\tau(T)} \max\{[a_{eq}(T(t) - a(t)), 0]H[T(t) - A_s] - \sum_{j=1}^4 z_{jt}(t)\} \quad (5.12)$$

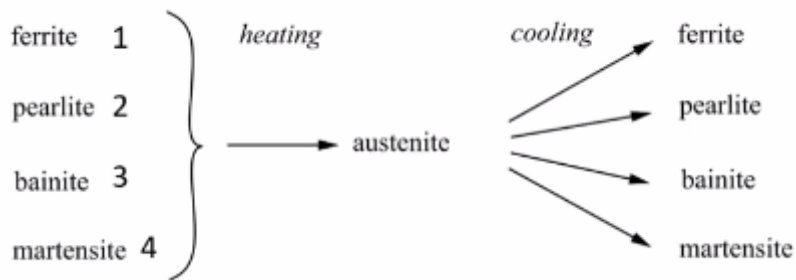


Figure IV.20 Processus de transformation de phase

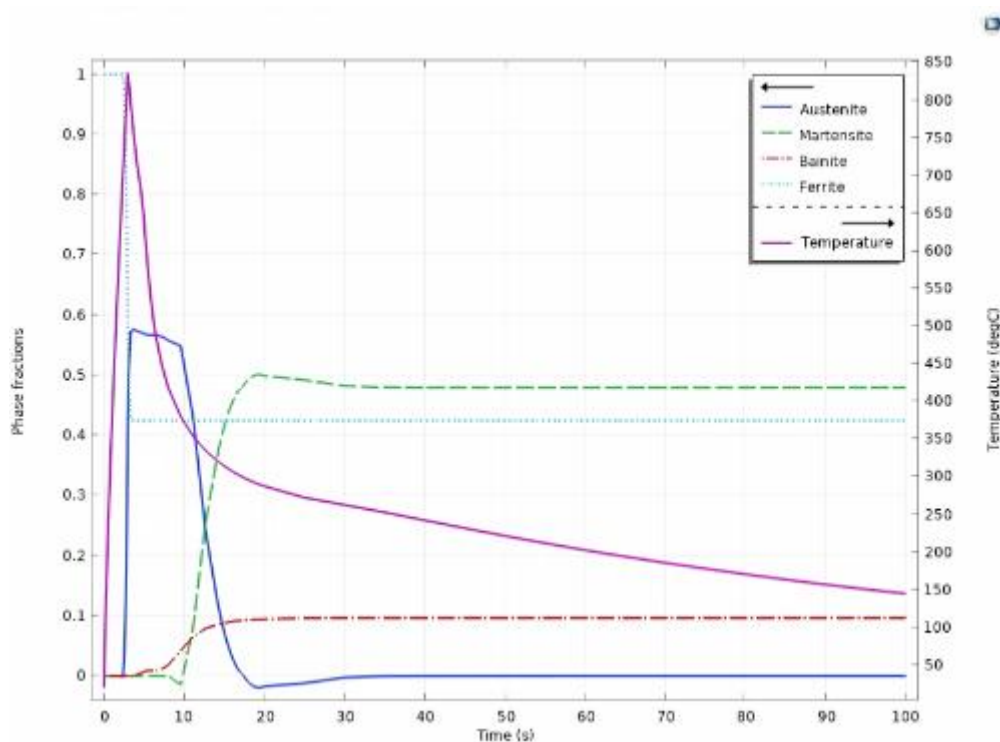


Figure IV.21 diagramme de fraction de phase et température

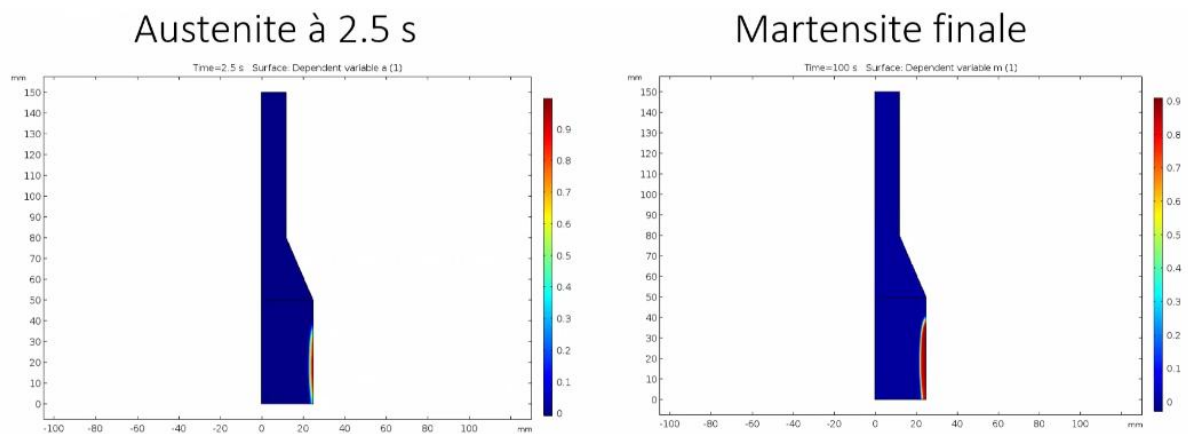


Figure IV.22 Fraction de phase

➤ Le point de curie

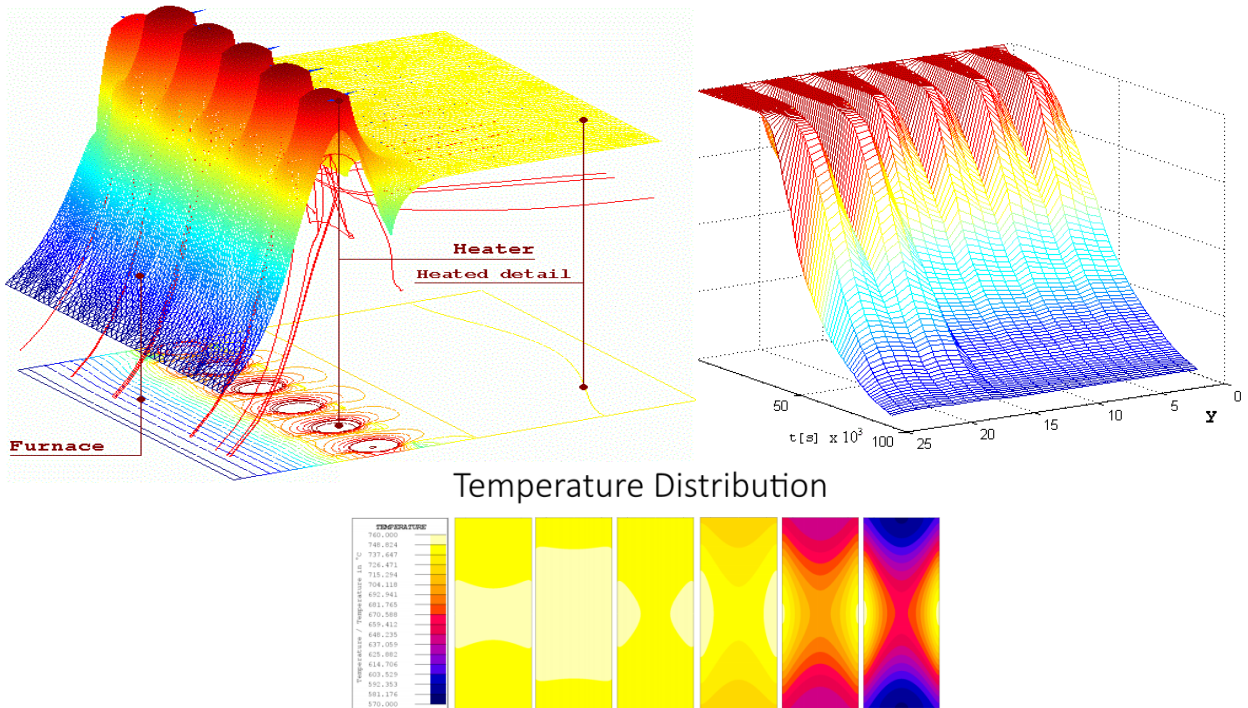


Figure IV.23 Distribution de la température de la pièce

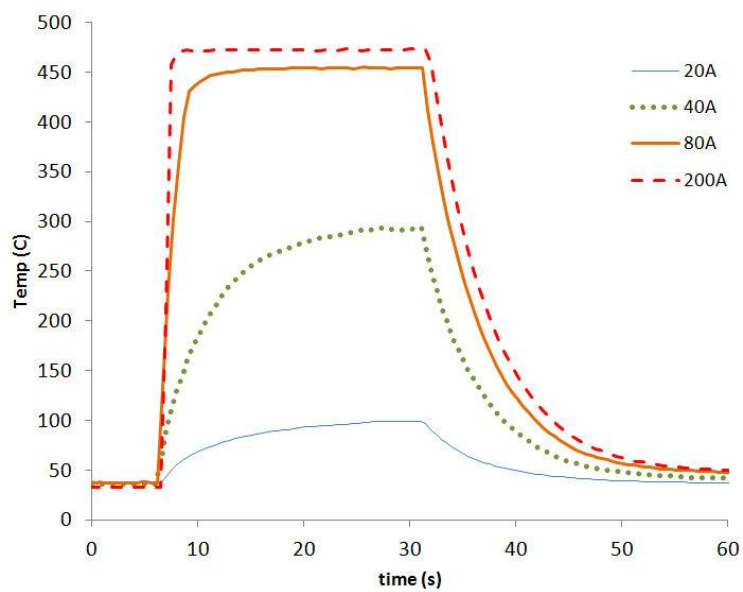


Figure IV.24 Allure de courant

- Pour assurer la continuation du système au delà de point de curie de chauffage par induction on ajoute un Fuzzy power pour contrôler l'énergie active et réactive de système .

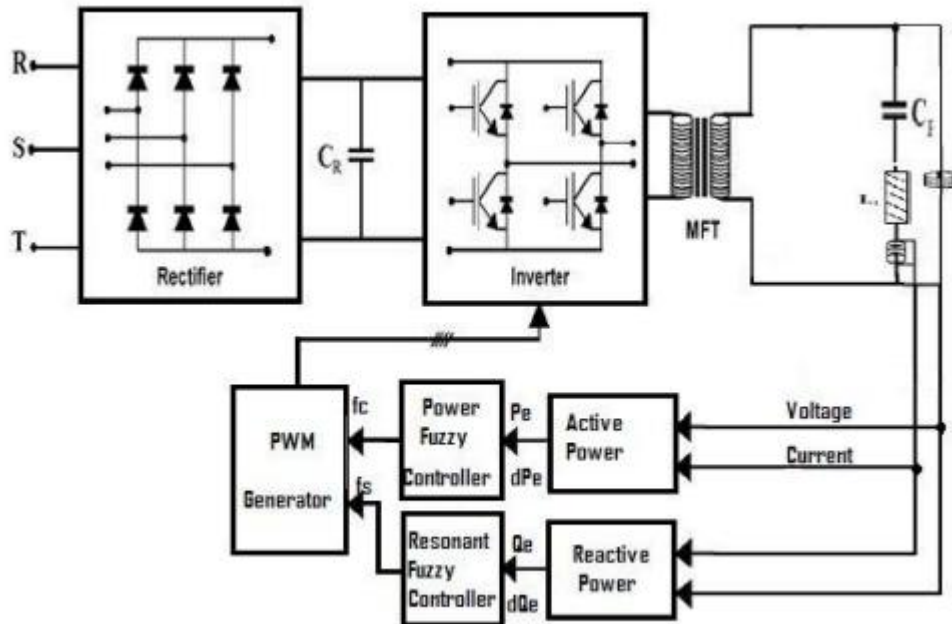


Figure IV.25 diagramme block de power controller

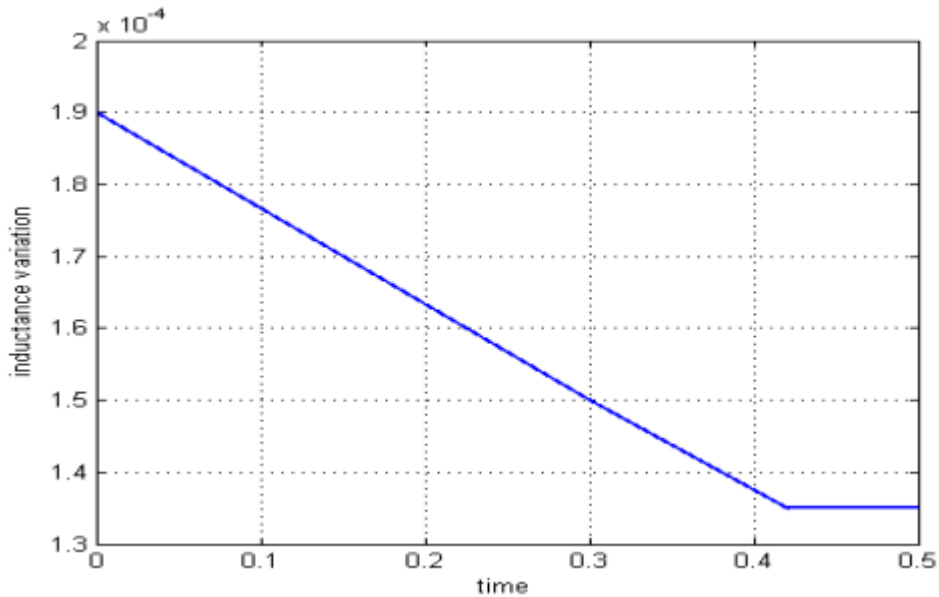


Figure IV.26 variation de l'inductance a point de curie

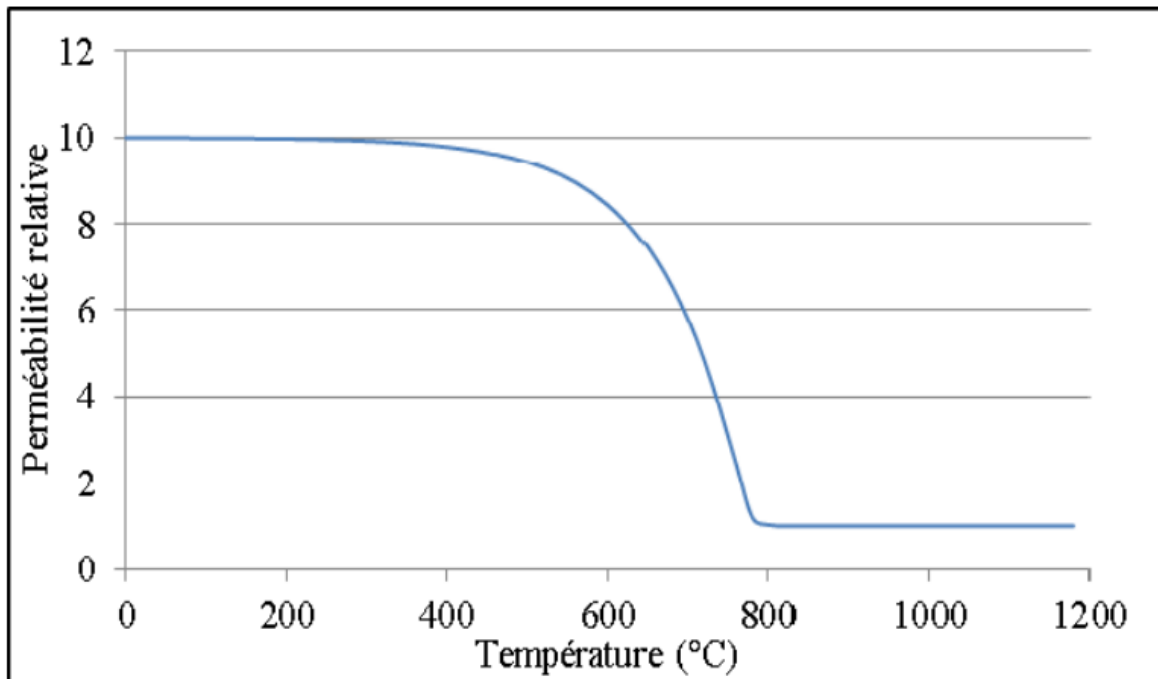


Figure IV.27 la perméabilité magnétique en fonction de la température

IV-2-5 Modes de fonctionnement de la machine à induction

La machine à induction EFD peut être utilisée selon deux modes de fonctionnement. Un premier mode appelé «DC power», il contrôle un générateur qui fournit une puissance constante durant la chauffe. Un second mode appelé «AC current», qui génère un courant constant dans l'inducteur. Chacun de ces modes est utilisé pour des applications différentes, le premier est adapté pour des charges constantes et pour des applications industrielles, alors que le deuxième est convenable pour des applications correspondant à des géométries variables. (EFD Induction 2006).

Avant de commencer la comparaison des deux modes, il faut noter que sur le logiciel de simulation multiphysique COMSOL, seul le courant dans l'inducteur peut être contrôlé durant la chauffe par induction, ce qui rend la simulation du mode de chauffe à puissance constante impossible. Pour remédier à ce problème, un programme MATLAB a été mis en place dans le but de piloter le modèle de simulation développé sur COMSOL, ce programme a pour objectif de calculer la puissance fournie par l'inducteur et d'ajuster la valeur de l'intensité du courant toutes les 0.005 secondes afin de garder une puissance constante durant la chauffe. Le couplage COMSOL-MATLAB est possible avec le logiciel COMSOL WITH MATLAB. La figure 5.28 représente le schéma de ce couplage utilisé pour simuler la chauffe à puissance constante.

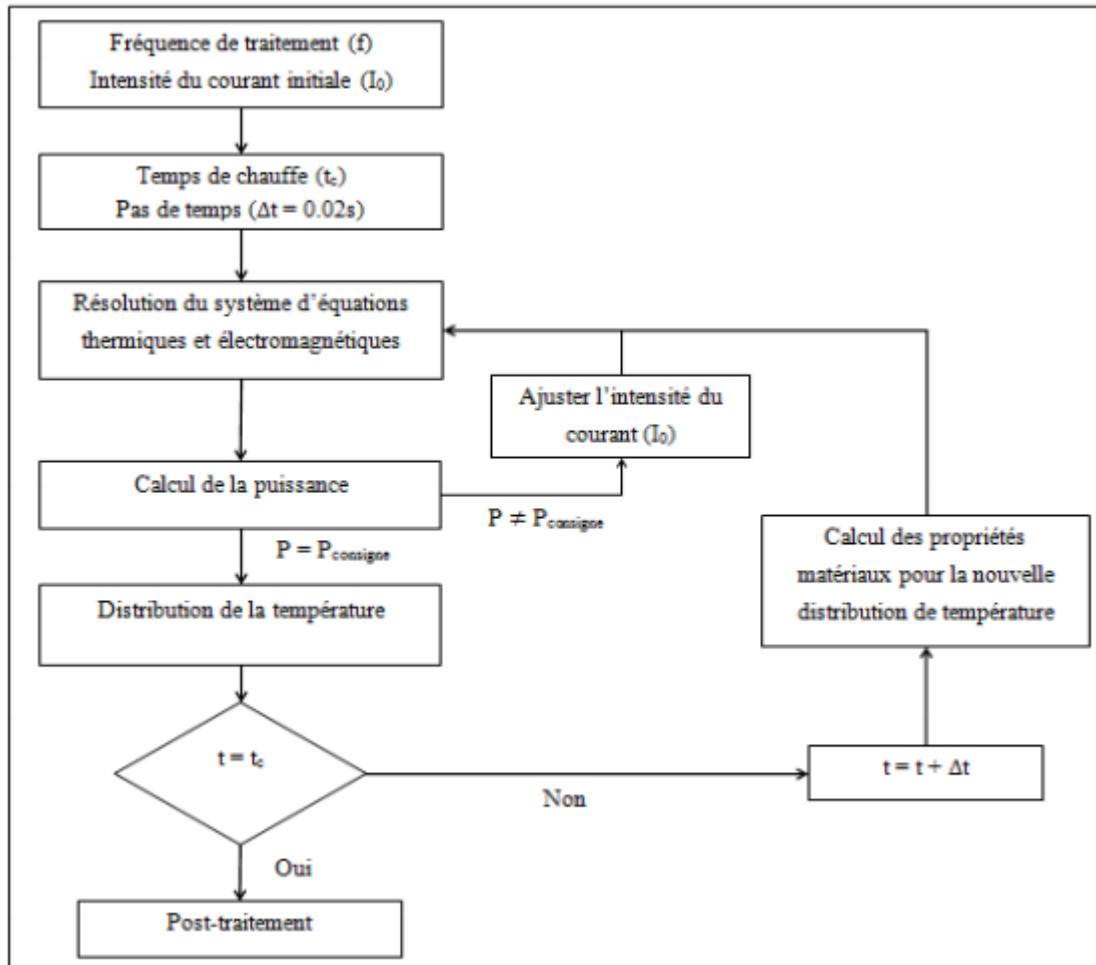


Figure IV.28 Schéma du couplage COMSOL-MATLAB

La figure 5.29 montre l'évolution de la puissance mesurée pour les deux modes «AC current» et «DC power». On remarque que la puissance en mode puissance constante suit la même évolution qu'on vient de décrire précédemment et qui est obtenue par simulation

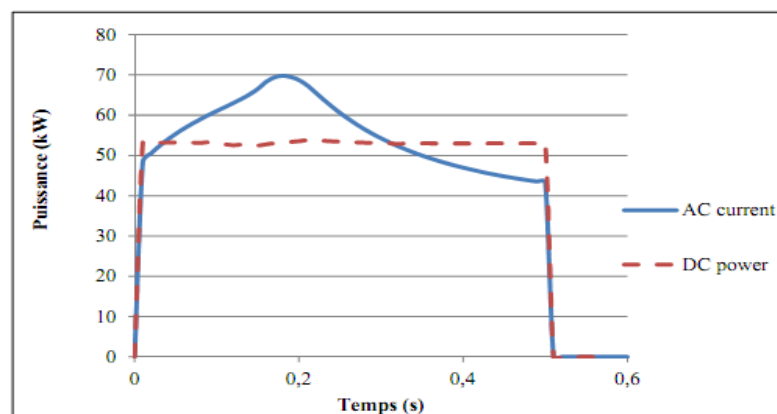


Figure IV.29 Puissances simulées en mode «AC current» et «DC power»

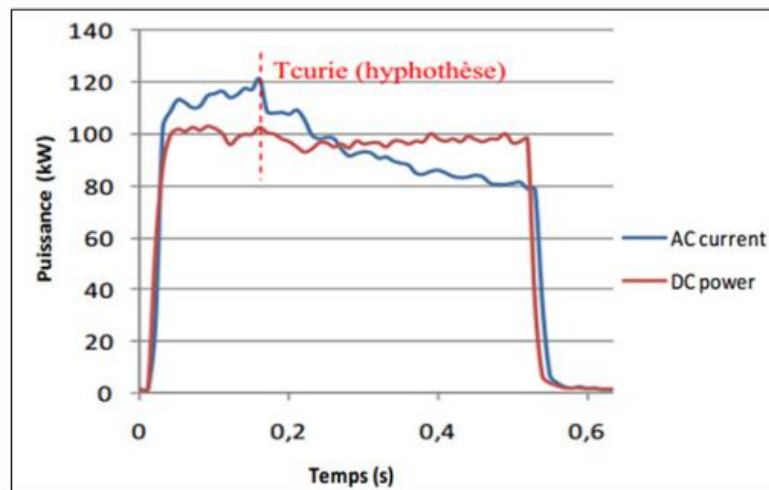


Figure IV.30 Puissances mesurées en mode «AC current» et «DC power»

À la fin de la chauffe, les profils de température s'inversent, et la pièce traitée en mode «DC power» devient plus chaude en surface que celle traitée en mode «AC current».

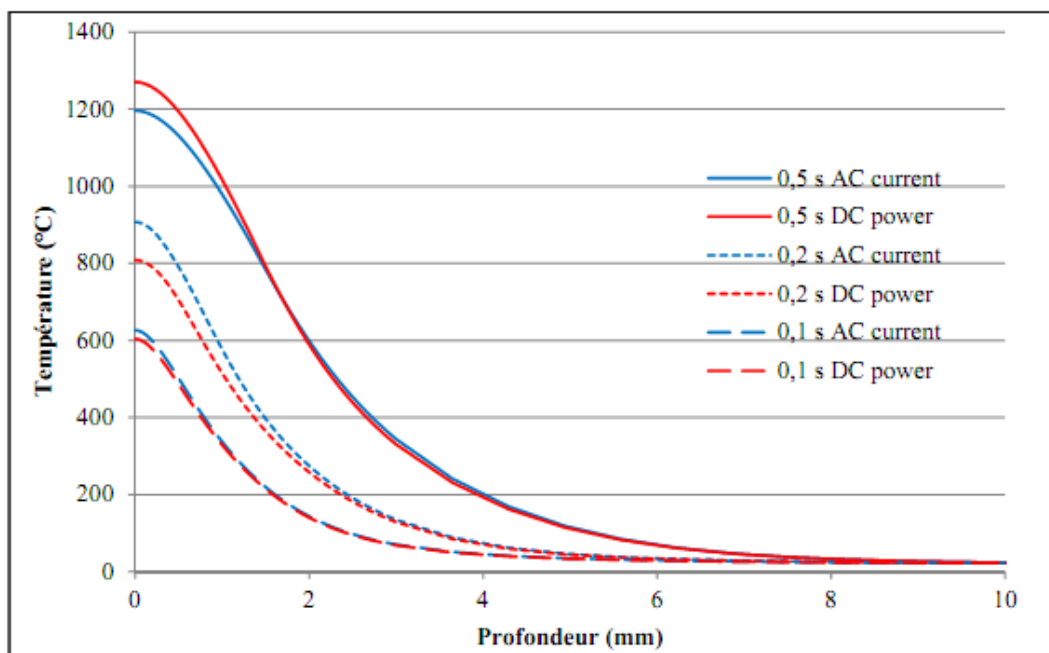


Figure IV.31 Distribution de la température sur la surface de la pièce pour les modes «AC current» et «DC power»

Ce qu'il faut aussi retenir, c'est que pour chauffer une pièce à des températures supérieures à 1200°C, il faut fournir légèrement plus de puissance en mode de chauffe «AC current» qu'en mode de chauffe «DC power».

IV-3 Réalisation de chauffage par induction

IV-3-1 le matériels utilisés



Figure IV.32 Condensateur



Figure IV.33 Générateur de pulses



Figure IV.34 transformateur

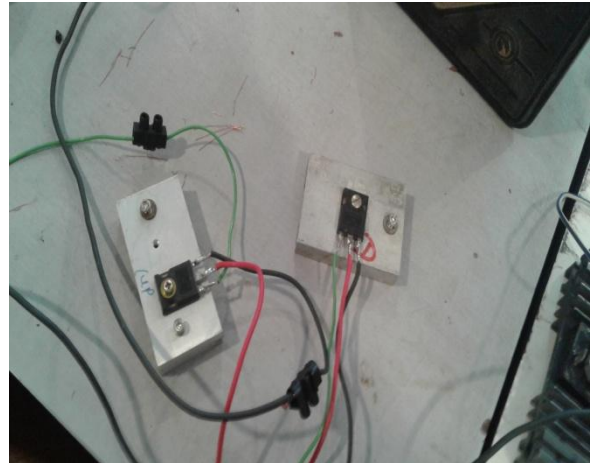


Figure IV.35 MOSFETs

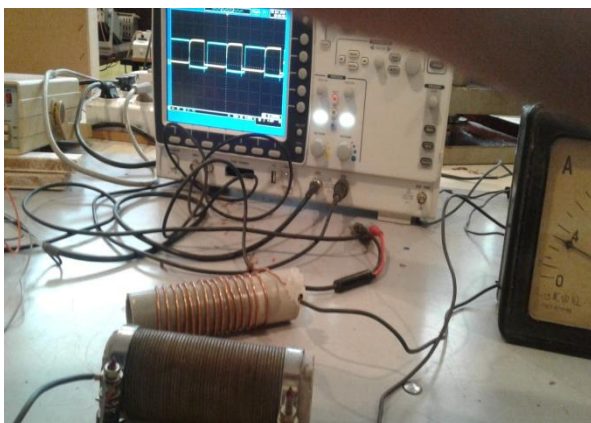


Figure IV.36 Inducteur

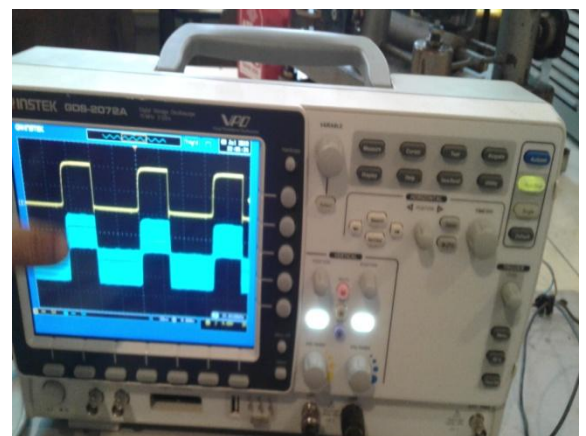


Figure IV.37 Oscilloscope

IV-3-2 Réalisation des cartes

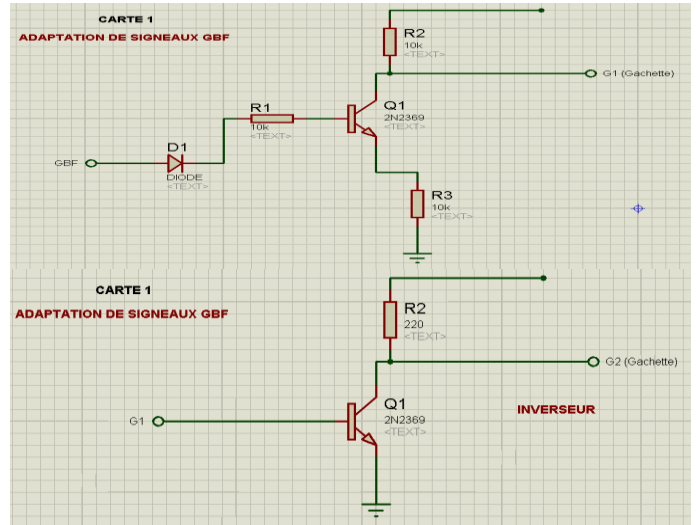


Figure IV.38 Carte d'adaptation de signaux GBF

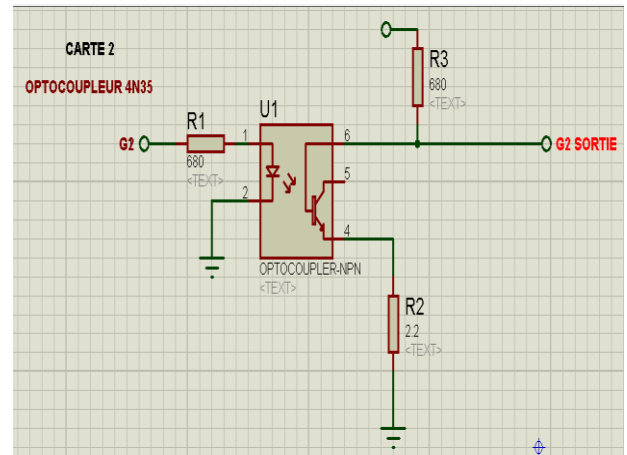
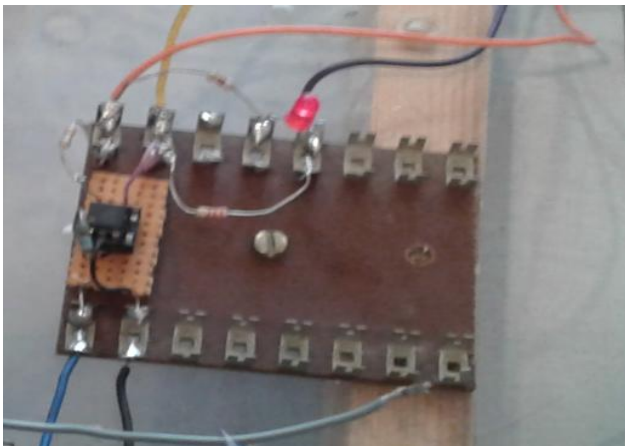


Figure IV.39 Carte Optocoupleur 4N35

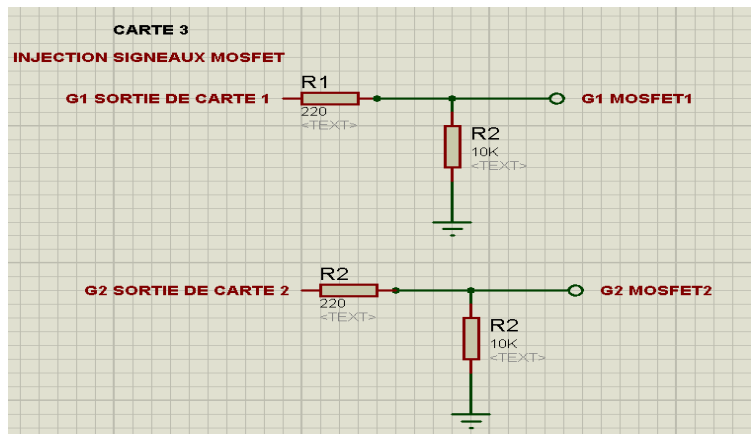


Figure IV.40 Carte injection signaux gache (MOSFET)

IV-4 projet finale

Le câblage fait au niveau de laboratoire d'électrotech

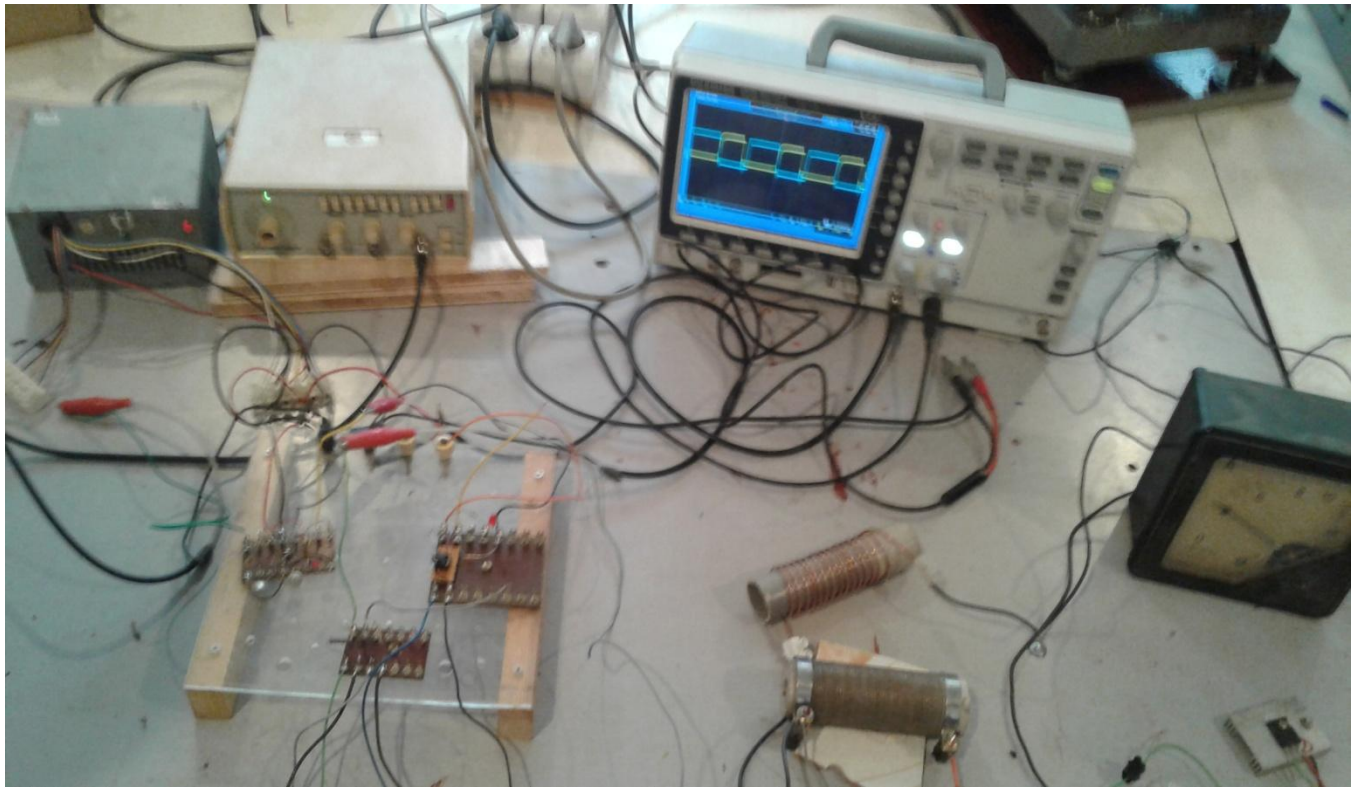


Figure IV.41 projet finale

➤ **résultats de l'oscilloscope**

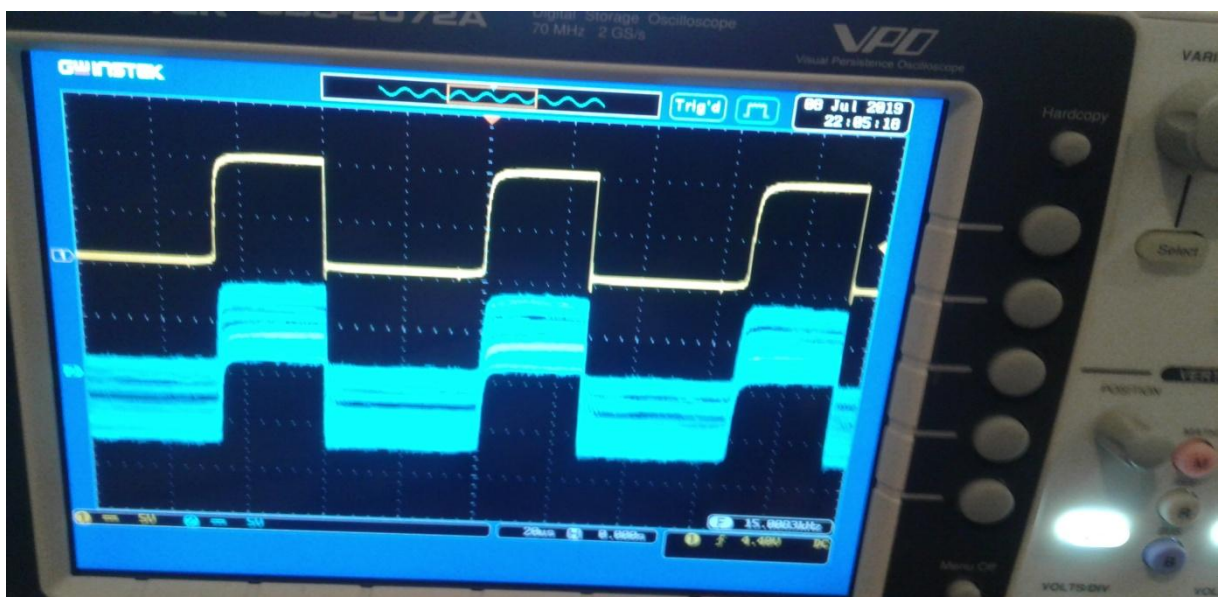


Figure IV.42 Visulation de la tension et le courant

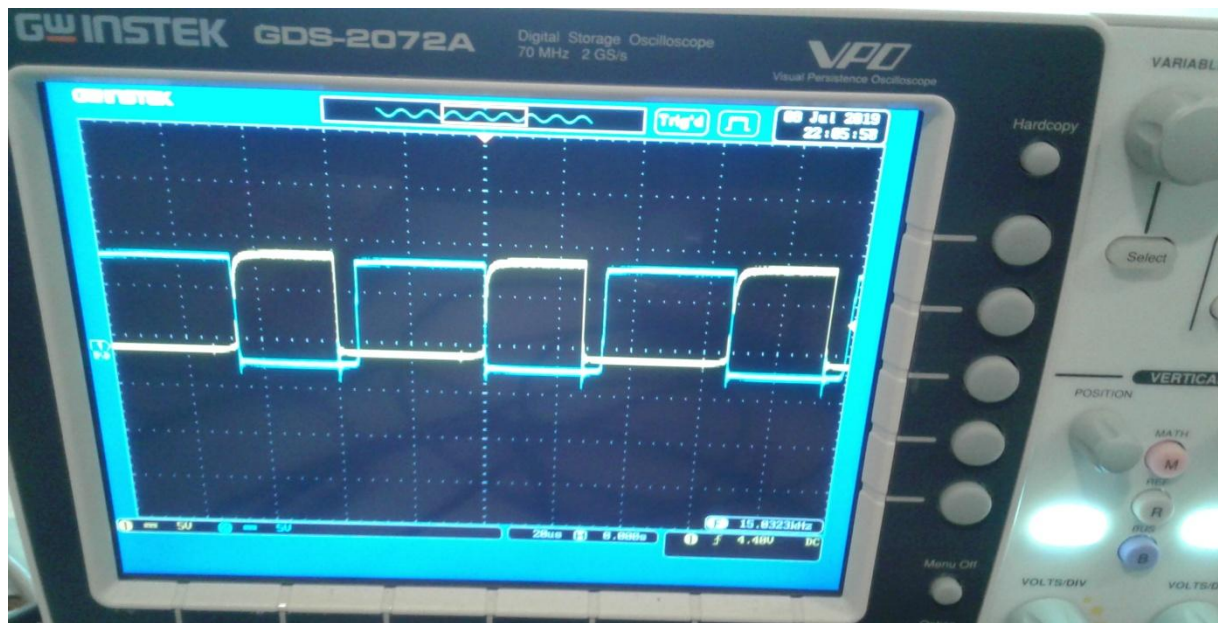


Figure IV.43 Visulation de la tension et le courant inverse

En ce qui concerne la réalisation , nous avons commencé par préparer et tester le matériels nécessaire CàD les cartes de commandes et les MOSFETs de puissance Nous avons réalisé 3 cartes :

- 1/ La carte d'adaptation de signaux **GBF**
- 2/ La carte Optocoupleur **4N35**
- 3/ La Carte injection signaux gache (**MOSFET**)

Un schema de puissance à 1 MOSFET nous a permit de tester les 3 cartes qu'elle Ont fonctionnée correctement Quant on test avec l'onduleur (nous avons choisi l'onduleur à 2 transistors Le test n'a pas été concluant car il manque les Drivers **IR2113**

On a utiliser un GBF pour tester les cartes électronique et les MOSFETs Mais c'est prévu de faire fonctionner les cartes avec des signaux électronique qu'on génère avec ARDUINO .

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé brièvement sur les méthodes numériques et ses développement avec l'outil informatique, en suite on cite quelque logiciels utilisant la méthode des éléments finis en particulier le Comsol Multiphysics.

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

Une fois le modèle numérique mis en place, une étude de convergence a été faite afin de réduire le temps de calcul sans pour autant perdre en termes de précision. Cette étude de convergence, qui a porté sur le maillage et le pas de temps de calcul, a permis la mise en place d'un modèle numérique robuste et précis.

Nous avons effectuée des simulations avec COMSOL et MATLAB-SIMULINK afin de choisir les paramètres du chauffage à induction (freq et temp) J'espère que dans l'avenir il y aura des projets afin de finaliser la maquette.

Introduction

Le procédé de traitement par induction est régi par plusieurs phénomènes physiques à savoir, l'électromagnétisme, le transfert de chaleur et la mécanique du solide. Les industriels utilisant ce procédé, s'approchent du résultat escompté de manière empirique, en utilisant leur expérience et le passage obligatoire par de nombreux essais réels. Néanmoins, cette méthode d'opérer est coûteuse en temps, en moyens humains et matériels. Souvent les essais nécessitent même l'arrêt de la chaîne de production et engendrent donc des pertes importantes pour l'entreprise. D'autre part, même si les bases physiques du procédé sont relativement connues, il est difficile de déterminer leurs effets pour des géométries de pièces ou d'inducteurs complexes.

La modélisation du procédé est un outil indispensable aujourd'hui pour atteindre des objectifs précis en termes de répartitions de température et de courants, tant spatiales que temporelles. Elle apporte également une bonne compréhension des phénomènes physiques et de leurs interactions ; le but étant de déterminer la fréquence, la puissance électrique ou la géométrie de l'inducteur optimales pour avoir la meilleure performance finale de la pièce possible. La modélisation de ces procédés de chauffage et de traitements de surface est complexe à mettre en œuvre, de par la nature multi-physique du procédé. Les études portées sur le sujet d'un point de vue numérique sont nombreuses.

Des logiciels commerciaux de simulation du procédé existent. Le logiciel **multiphysique COMSOL** propose, à travers son module **AC/DC**, un couplage électromagnétique afin de modéliser les traitements de surface par induction.

IV-1-Présentation de COMSOL Multiphysics

IV-1-1- Méthodes numériques et l'outil informatique

Le développement des méthodes numériques (différences finies, volumes finis, éléments finis, intégrales de frontière, etc.) est heureusement accompagné par les avancées du matériel informatique. Des programmes qui nécessitaient autrefois des calculateurs complexes et onéreux tournent à présent sur les PC d'un coût modeste. Cela a contribué à faciliter la mise au point de logiciels [26].

Nous avons présenté dans la section précédente les différentes formulations des équations de Maxwell et élaborons dans ce chapitre la présentation du logiciel utilisé dans ce travail.

IV-1-2- Logiciels utilisant les éléments finis [26]

Parmi les Logiciels utilisant éléments finis on peut citer :

- 1- ABAQUS
- 2- ANSYS
- 3- CAST3M
- 4- ASTER
- 5- COMSOL MULTIPHYSICS
- 6- CosmosWorks
- 7- Dytran
- 8- EuroPlexus
- 9- Flux2D/ 3D.

Tous ces logiciels sont performants et adaptables aux différents problèmes rencontrés en physique. Pour le chauffage par induction, on a choisi "Comsol Multiphysics" à cause de sa souplesse et sa rapidité d'exécution.

IV-1-3- COMSOL Multiphysics [27]

Pour réaliser le modèle magnétodynamique, on a utilisé le code de calcul Comsol, c'est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en sciences physiques et en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques 2D et 3D .

COMSOL multi-physique autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP).

La méthode de 2D est basée sur la composition de structures de base rectangulaire ou circulaire.

L'application de ce logiciel pour résoudre de tel problème est basée sur les étapes suivantes

- 1) Choix du mode de résolution 2D.
- 2) Choix du type de problème lié à l'application (AC/DC dans notre cas).
- 3) Construction du domaine d'étude.
- 4) Introduction des propriétés physiques liées à chaque milieu et à chaque problème.
- 5) Introduction des conditions aux limites pour tous les problèmes considérés.
- 6) Maillage du domaine d'étude et contrôle de sa qualité.
- 7) Choix du régime de résolution stationnaire ou temporel et la méthode utilisée.
- 8) Résolution et exploitation des résultats.

L'AC/DC Module permet de simuler des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques dans des applications statiques et à basses fréquences. Les applications type concernées sont les condensateurs, les inducteurs, les isolateurs, les bobines, les moteurs, les actionneurs et les capteurs. Le module comporte des outils spécialisés pour extraire automatiquement des simulations les valeurs de paramètres tels que la résistance, la capacitance, l'inductance, l'impédance, la force et le couple (Figure 5.1).

Pour l'étude théorique, il s'agit de la résolution numérique du problème magnétothermique. On a calculé et présenté avec des courbes les grandeurs magnétiques notamment les densités des courants induits et de la puissance dissipée par effet Joule et thermique représentées par la distribution et les variations de la température dans la pièce à chauffer (Figure 5.2).

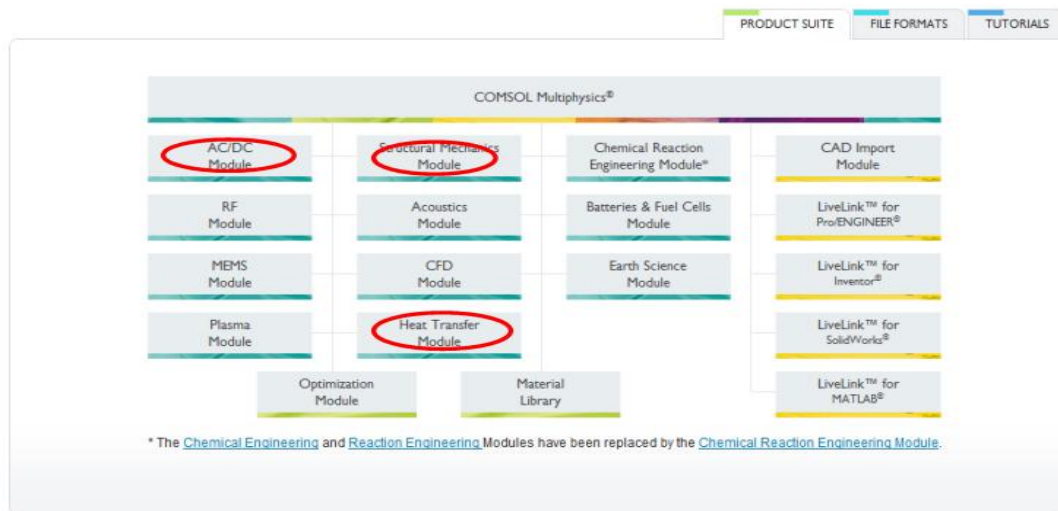


Figure IV.1 Logiciel COMSOL Multiphysics .

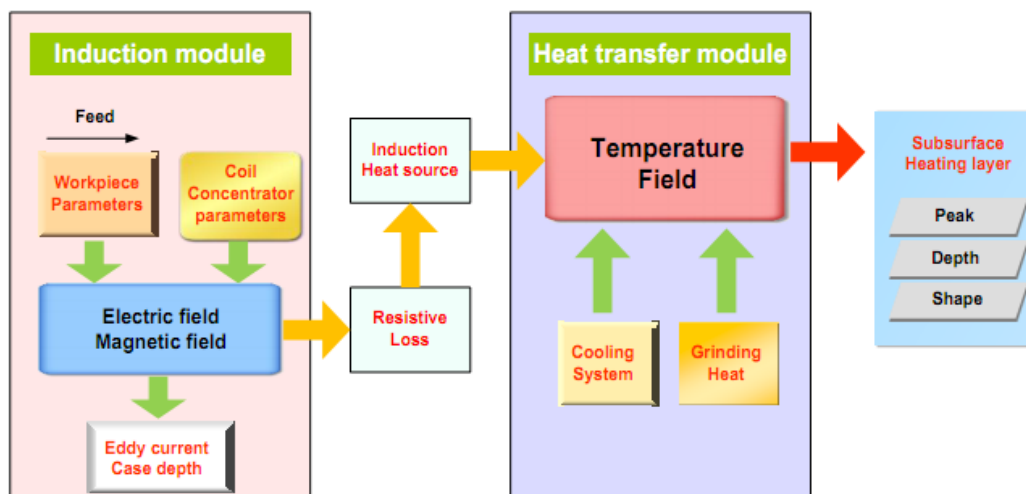


Figure IV.2 Le procédé de chauffage par induction.

IV-2- Simulation numérique

IV-2-1-Présentation du problème

Comme on l'a cité précédemment, l'induction électromagnétique est un procédé très complexe faisant intervenir plusieurs domaines de la physique (électromagnétisme, transfert de chaleur, mécanique, etc.). Cette nature multiphysique combinée à des vitesses de chauffe très grandes (supérieure à 2000°C/s pour cette étude) rendent très difficile l'obtention de pièce avec les propriétés mécaniques désirées. Maîtriser et prédire la distribution de température au

sein d'une pièce traitée par induction est donc crucial si on veut optimiser ce procédé. L'objectif principal de la présente étude est de développer un modèle numérique de la chauffe par induction à l'aide du logiciel COMSOL. Ce modèle a pour but de simuler la chauffe par induction d'un tube en acier et de prédire l'évolution de la température au cours de la chauffe. Le modèle doit aussi prendre en compte la nature multiphysique du procédé, ainsi que le comportement non linéaire des propriétés matériau en fonction de la température et du champ magnétique. La chauffe étant très rapide, temps de chauffe = 3 s, Les données matériau présentes dans la littérature ne peuvent représenter le comportement de l'acier durant une chauffe aussi rapide. C'est pour cela qu'il faut étudier l'effet de la variation des propriétés matériau sur la distribution de température et dégager ainsi celles qui doivent être calibrées. Finalement, en se basant sur des mesures de températures faites sur un tube chauffé par induction, des propriétés matériau vont être ajustées afin de reproduire l'historique thermique mesuré.

IV-2-2- Phénomènes physiques dans l'induction

Plusieurs phénomènes physiques entrent en jeu lors d'un traitement par induction électromagnétique ; Il s'agit de la mécanique, l'électromagnétisme et le transfert de chaleur. Le comportement mécanique n'étant pas considéré dans cette étude, l'outil de simulation adopté et développé ne considère que l'électromagnétisme et le transfert de chaleur.

IV-2-2-1- L'électromagnétisme dans l'induction

Le système d'équations de Maxwell permet de modéliser tous les phénomènes électromagnétiques :

$$\text{➤ Équation du flux magnétique : } \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5.1)$$

$$\text{➤ Équation de Maxwell-Gauss : } \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (5.2)$$

$$\text{➤ Équation de Maxwell-Faraday : } \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5.3)$$

$$\text{➤ Équation de Maxwell-Ampère : } \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5.4)$$

Où \mathbf{B} est le flux magnétique imposé (T), \mathbf{E} est le champ électrique (V.m-1), \mathbf{H} est le champ magnétique résultant (A.m-1), \mathbf{J} est la densité de courant (A.m-2) et \mathbf{D} est le champ de déplacement électrique (C.m-2) .

Les paramètres en caractères gras représentent des vecteurs avec deux dimensions puisque le modèle numérique développé est un modèle 2D axisymétrique.

L'équation (5.1), appelée aussi la première loi de Gauss (magnétique), stipule que la divergence de la densité du flux magnétique est nulle. Autrement dit, les lignes du champ (\mathbf{B}) forment des boucles continues. L'équation (5.2) est appelée aussi la deuxième loi de Gauss (électrique), elle montre que les lignes du champ de déplacement électrique (\mathbf{D}) forment aussi des boucles continues. L'équation (5.3) décrit comment la variation d'un champ magnétique peut créer (induire) un champ électrique et des courants induits dans la région au voisinage du conducteur dont le sens est contraire à celui du champ magnétique. L'équation (5.4) énonce que les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par les courants électriques (théorème d'Ampère) et par la variation d'un champ électrique. (Nemkov, 2004).

Pour pouvoir simuler le phénomène électromagnétique, il faut compléter les équations de Maxwell par les paramètres matériaux qui relient les différentes valeurs scalaires entre elles :
La permittivité diélectrique ε (F.m-1)

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (5.5)$$

La perméabilité magnétique μ (H.m-1)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5.6)$$

La conductivité électrique σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5.7)$$

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

$$\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \mathbf{B}) - \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{J} \quad (5.8)$$

où \mathbf{A} est le vecteur potentiel magnétique (Wb/m) et \mathbf{v} est le vecteur vitesse de la particule (m/s).

La figure suivante montre l'équation générale de l'électromagnétisme (5.8) telle qu'elle apparaît dans **COMSOL**.

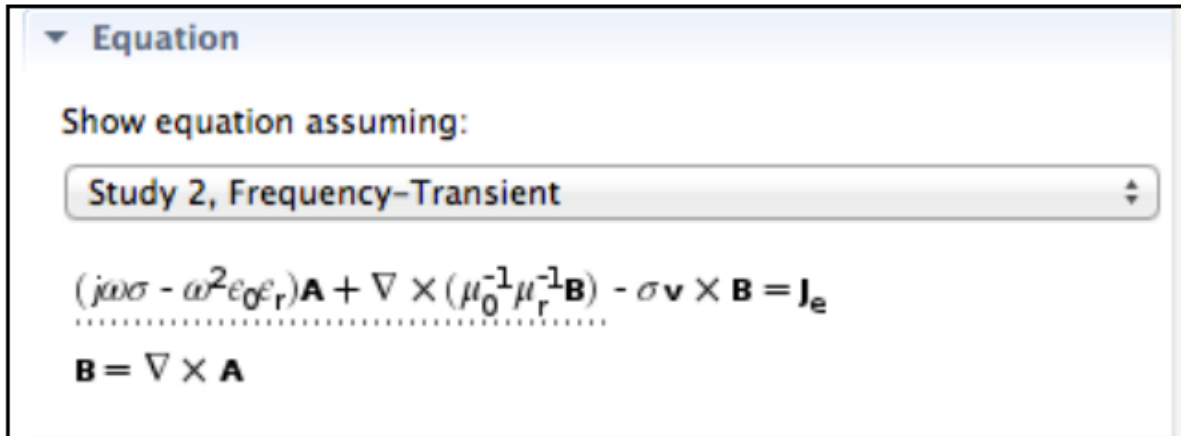


Figure IV.3 Équation de l'électromagnétisme utilisé dans COMSOL

Bien que des approximations puissent être faites en fonction des fréquences utilisées et du mode axisymétrique, COMSOL utilise les équations sous leur forme la plus complète, c'est-à-dire sans approximations afin de garder l'aspect multiphysique.

IV-2-2-2- Transfert de chaleur

Dans le procédé de traitement par induction, les trois modes de transfert de chaleur, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement sont présents.

➤ Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction consiste à transmettre la chaleur des parties chaudes de la pièce vers les parties froides par transfert de l'agitation thermique au sein d'une pièce. Il est décrit par la loi de Fourier:

$$q_{cond} = -kgrad(T) \quad (5.9)$$

Où q_{cond} est le flux de chaleur transmise par conduction ($W.m^{-2}$), k est la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) et T est la température (K).

D'après cette loi, le taux de chaleur transmise par conduction est proportionnel au gradient de température (différence de température) ainsi qu'à la conductivité thermique du matériau qui dépend de la température. Autrement dit, une grande différence de température entre la surface et le cœur de la pièce (ce qui le cas lors d'un traitement thermique superficiel par induction), et une grande valeur de la conductivité thermique du matériau entraînent un transfert important de chaleur des régions chaudes vers les régions froides ce qui réduirait le gradient de température.

➤ Transfert de chaleur par convection

Contrairement à la conduction, 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.

$$q_{conv} = h(T_s - T_a) \quad (5.10)$$

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

Le coefficient de transfert par convection h dépend des propriétés thermiques de la pièce traitée, de la température, de la vitesse du fluide à la surface ainsi que des propriétés thermiques du fluide environnant. Ce coefficient peut être calculé en utilisant une des nombreuses corrélations présentes dans la littérature.

➤ Transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement est introduit comme un phénomène de propagation d'énergie électromagnétique causée par la différence de température. Ce phénomène est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann de la radiation thermique qui stipule que les pertes par rayonnement sont contrôlées par la différence des températures (à la puissance 4) ainsi que l'émissivité du corps :

$$q_{rad} = C_s(T)(T_s^4 - T_a^4) \quad (5.11)$$

où q_{rad} est le flux de chaleur transmise par rayonnement ($W.m^{-2}$), C_s est le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement ($W.m^{-2}.K^{-4}$), T_s est la température de la surface (K) et T_a est la température ambiante (K).

V-2-2-3- Couplage électromagnétique-thermique

Dans les paragraphes précédents, on a pu traiter séparément les phénomènes physiques en électromagnétique et en thermique. Dans le procédé de traitement thermique par induction, ces deux phénomènes physiques sont liés. Les phénomènes thermiques dépendent des

phénomènes électromagnétiques parce que les sources de chaleur sont les pertes par effets Joule provoquées par les courants de Foucault. En plus de cela, les propriétés matériau dépendent toutes de la température. Pour simuler le procédé d'induction, il faut donc traiter les deux phénomènes physiques ensemble. La figure 5.4 présente la procédure de couplage entre les champs magnétique et thermique. Le logiciel sur lequel s'est faite la simulation, à savoir COMSOL, couple les deux phénomènes à l'aide de la méthode de couplage dite forte (fully coupled). 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.

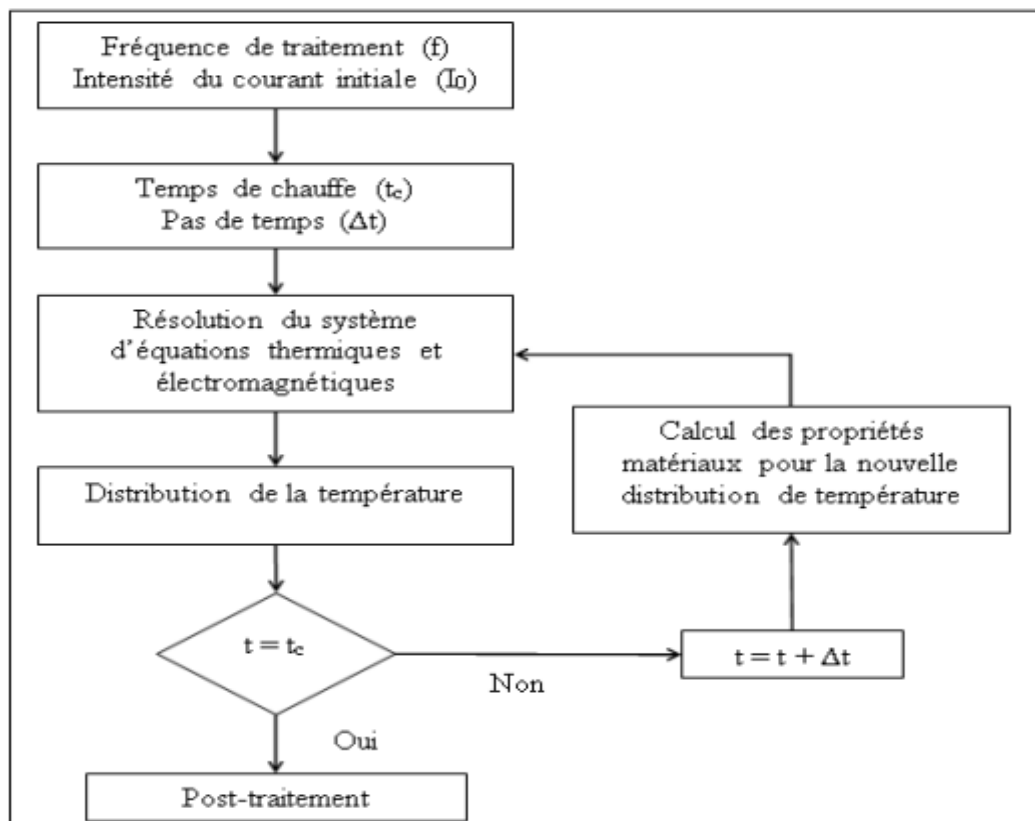


Figure IV.4 Schéma du couplage fort utilisé dans COMSOL

IV-2-3- Construction de système sur COMSOL Multiphysiques

1- Choix des modules physiques :

Nous avons choisi: chauffage par induction .

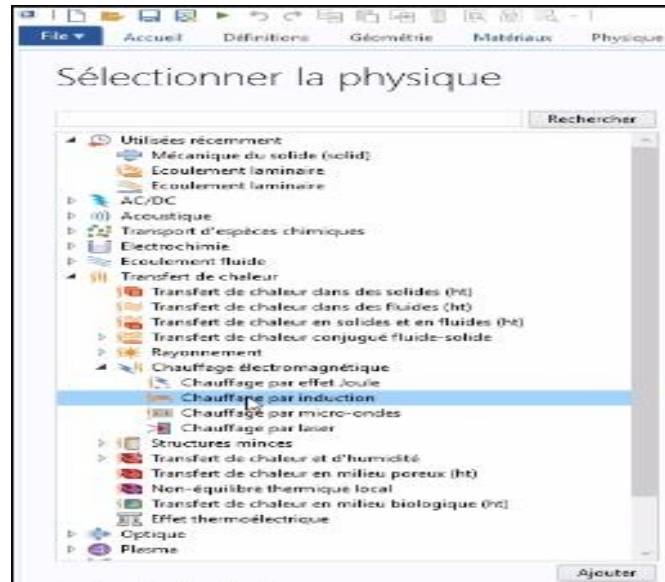


Figure IV.5 Choix des modules physiques

2- Choix du type d'étude: (Temporelle, Fréquentielle, Stationnaire)

Nous faisons notre travail sur le régime temporel.

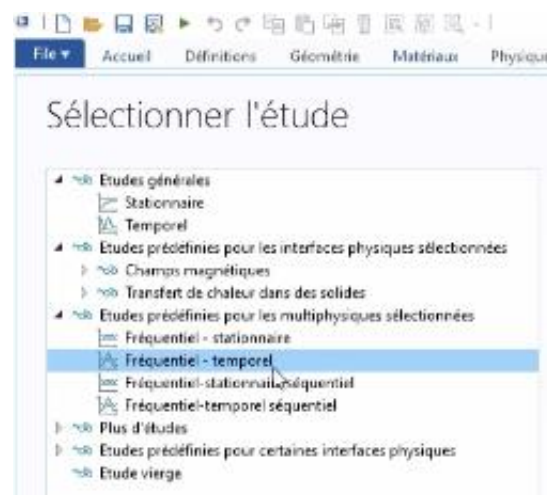


Figure IV.6 Choix du type d'étude

3- Construction de la géométrie :

La figure (5.7) représente la géométrie de modèle .

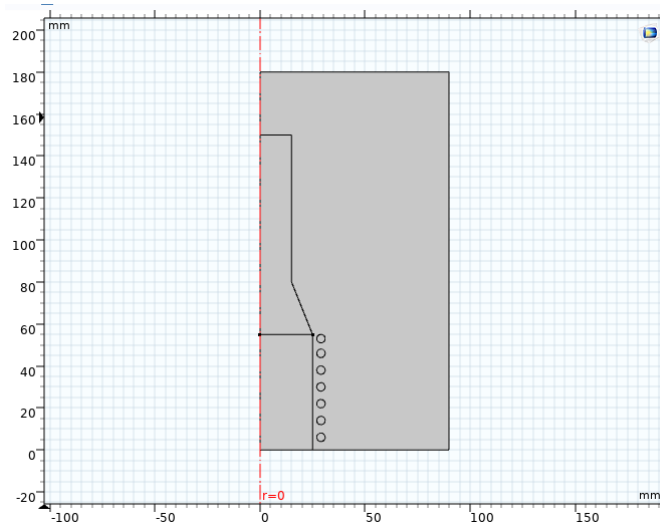


Figure IV.7 Géométrie du modèle 2D axisymétrique

4- Choix des matériaux :



Figure IV.8 choix des matériaux

➤ Matériau 1: Air

Contenus matériau					
Propriété	Variable	Valeur	Unité	Groupe de propriétés	
<input checked="" type="checkbox"/> Perméabilité relative	mur_iso ; m...	1	1	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Capacité thermique à pression constante	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Conductivité thermique	k_iso ; kii = k...	44.5[W/(m*K)]	W/(m·K)	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Conductivité électrique	sigma_iso ; s...	4.032e6[S/m]	S/m	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Permittivité relative	epsilon_iso ; ...	1	1	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique	rho	7850[kg/m^3]	kg/m³	Basic	
Coefficient de dilatation thermique	alpha_iso ; al...	12.3e-6[1/K]	1/K	Basic	
Module d'Young	E	200e9[Pa]	Pa	Module d'Young et coefficient de Poisson	
Coefficient de Poisson	nu	0.30	1	Module d'Young et coefficient de Poisson	
Module élastique du 3ème ordre de Murnaghan	l	-3.0e11[Pa]	N/m²	Murnaghan	
Module élastique du 3ème ordre de Murnaghan	m	-6.2e11[Pa]	N/m²	Murnaghan	
Module élastique du 3ème ordre de Murnaghan	n	-7.2e11[Pa]	N/m²	Murnaghan	

Figure IV.9 propriétés d'Air

➤ **Matériau 2 : Les bobines en cuivre**

Contenus matériau				
Propriété	Variable	Valeur	Unité	Groupe de propriétés
<input checked="" type="checkbox"/> Perméabilité relative	mur_iso ; mu...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Conductivité électrique	sigma_iso ; si...	5.998e7[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Permittivité relative	epsilon_r_iso ; ...	1	1	Basic
Coefficient de dilatation thermique	alpha_iso ; al...	17e-6[1/K]	1/K	Basic
Capacité thermique à pression constante	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg-K)	Basic
Masse volumique	rho	8960[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
Conductivité thermique	k_iso ; kii = k...	400[W/(m*K)]	W/(m-K)	Basic
Module d'Young	E	110e9[Pa]	Pa	Module d'Young et coefficient de Poisson
Coefficient de Poisson	nu	0.35	1	Module d'Young et coefficient de Poisson
Résistivité de référence	rho0	1.72e-8[ohm*m]	Ω.m	Résistivité linéarisée
Coefficient de résistivité dépendant de la température	alpha	0.0039[1/K]	1/K	Résistivité linéarisée
Température de référence	Tref	298[K]	K	Résistivité linéarisée

Figure IV.10 propriétés de cuivre

➤ **Matériau 3 : Diélectrique**

Contenus matériau				
Propriété	Variable	Valeur	Unité	Groupe de propriétés
Coefficient de dilatation thermique	alpha_p_iso ; al...	alpha_p(pA,T)	1/K	Basic
Masse molaire moyenne	Mn	0.02897	kg/mol	Basic
Viscosité de volume	muB	muB(T)	Pa-s	Basic
Perméabilité relative	mur_iso ; m...	1	1	Basic
Permittivité relative	epsilon_r_iso ; ...	1	1	Basic
Viscosité dynamique	mu	eta(T)	Pa-s	Basic
Rapport des chaleurs spécifiques	gamma	1.4	1	Basic
Conductivité électrique	sigma_iso ; s...	0[S/m]	S/m	Basic
Capacité thermique à pression constante	Cp	Cp(T)	J/(kg-K)	Basic
Masse volumique	rho	rho(pA,T)	kg/m^3	Basic
Conductivité thermique	k_iso ; kii = k...	k(T)	W/(m-K)	Basic
Vitesse du son	c	cs(T)	m/s	Basic

Figure IV.11 propriétés de l'acier

5- Champs magnétiques

➤ **Loi d'ampère**

▼ **Champ magnétique**

Relation constitutive:

Perméabilité relative

B = μ₀μ_rH

Perméabilité relative:

μ_r A partir du matériau

▼ **Courant de conduction**

Conductivité électrique:

σ A partir du matériau

▼ **Champ électrique**

D = ε₀ε_rE

Permittivité relative:

ε_r A partir du matériau

Figure IV.12 propriétés de champ magnétique

➤ La bobine

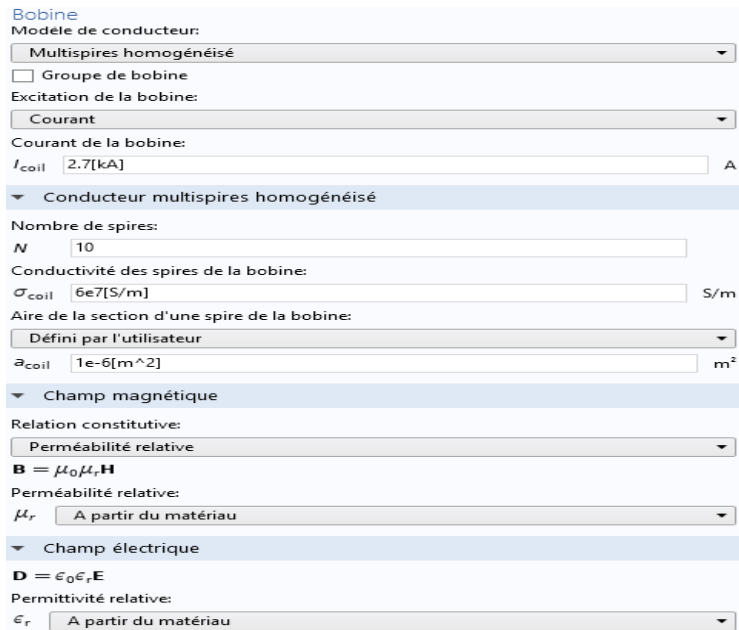


Figure IV.13 propriétés de la bobine

6- Chauffage électromagnétique

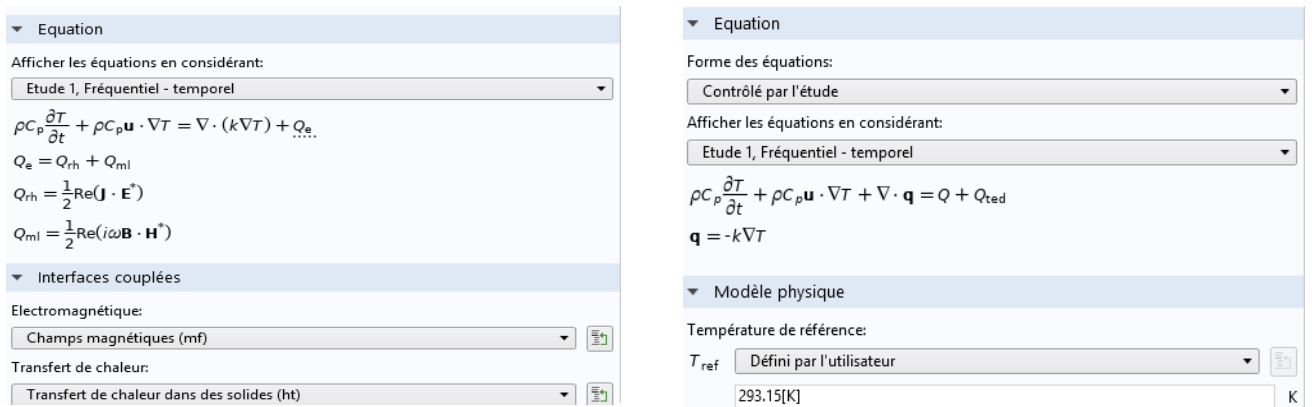


Figure IV.14 Transfert de chaleur dans des solides

7- Choix du maillage :

Cette étape sert à définir les volumes élémentaires pour permettre la discrétisation du système continu. La dimension de la maille peut être modifiée afin de diminuer le nombre d'éléments, de réduire l'utilisation de la mémoire et d'augmenter la vitesse de calcul. (Figure 5.12)

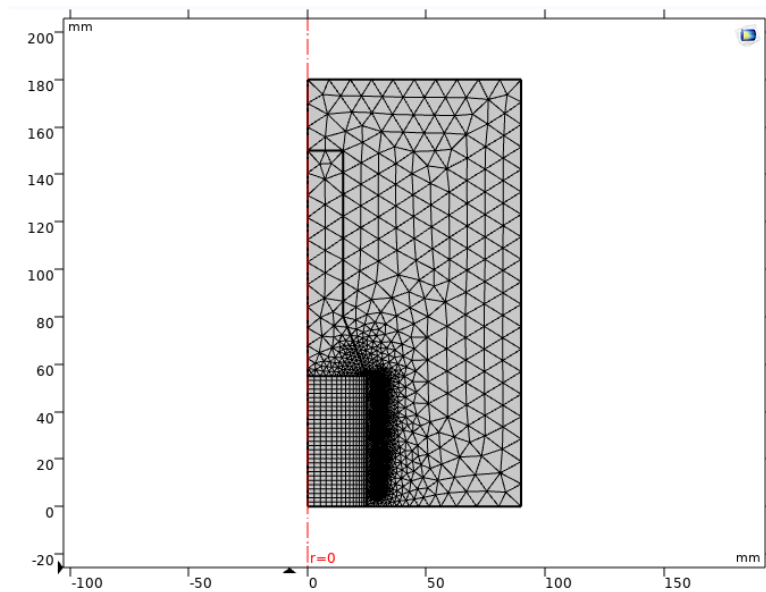


Figure IV.15 Maillage retenu pour le modèle 2D axisymétrique

IV-2-4- Résultat de la simulation

Après avoir défini les différents paramètres de la simulation, des matériaux, de la géométrie et du maillage, et après avoir bien défini les conditions aux limites, il ne restait plus qu'à lancer la simulation pour une chauffe de 3s.

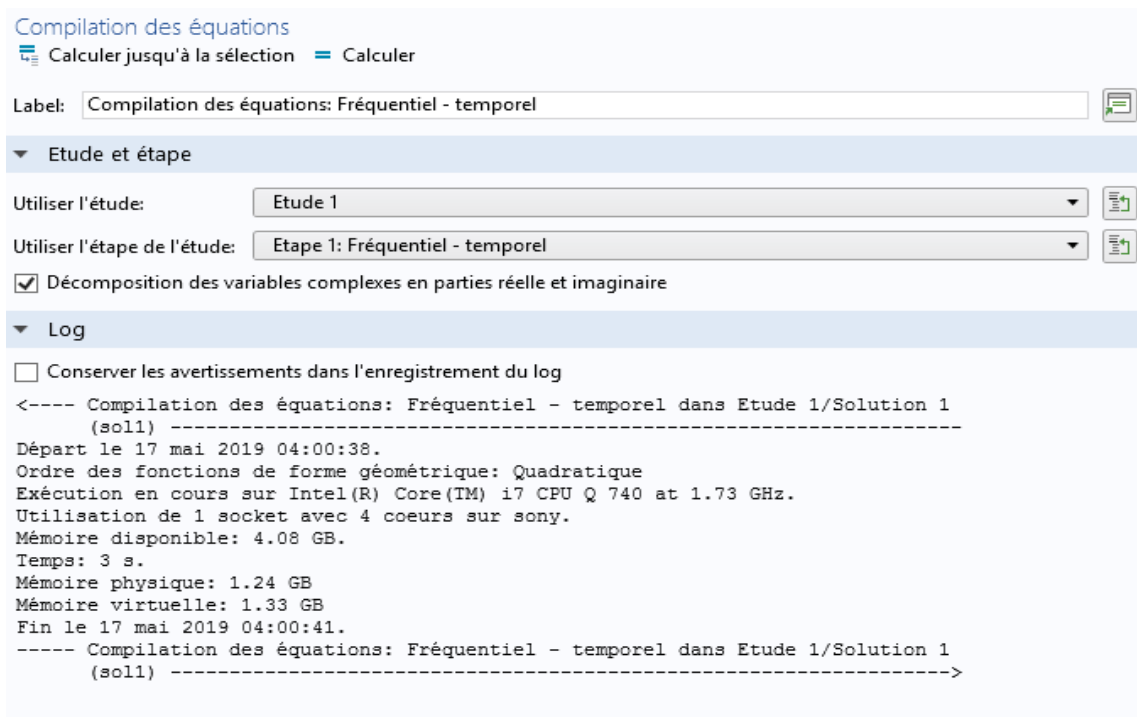


Figure IV.16 Compilation des équations

➤ **Densité de flux magnétique**

la figure IV.17 représente les distributions de la densité de flux magnétique en 2D .

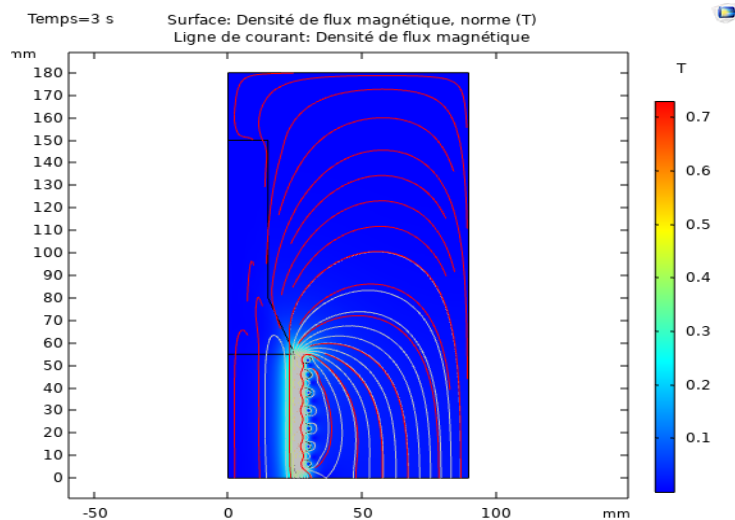


Figure IV.17 les distributions de la densité de flux magnétique

➤ **Distribution de température**

La figure 5.18 représente la distribution de température à la fin de la chauffe de 3 s. Ce que l'on remarque en premier c'est que la chaleur est concentrée sur une couche mince à la surface de la pièce, c'est une conséquence directe de l'effet de peau magnétique. On remarque aussi que les bords de la pièce sont plus chauds que le plan médian ce qui peut être expliqué par l'effet de bord. On voit alors que les deux effets électromagnétiques, à savoir l'effet de peau et l'effet de bord sont présents pour cette géométrie. le profil de température à la surface supérieure de la pièce à différents instants de la chauffe. On remarque que les températures maximales sont enregistrées en surface. On constate aussi une diminution rapide de la température en fonction de la profondeur.

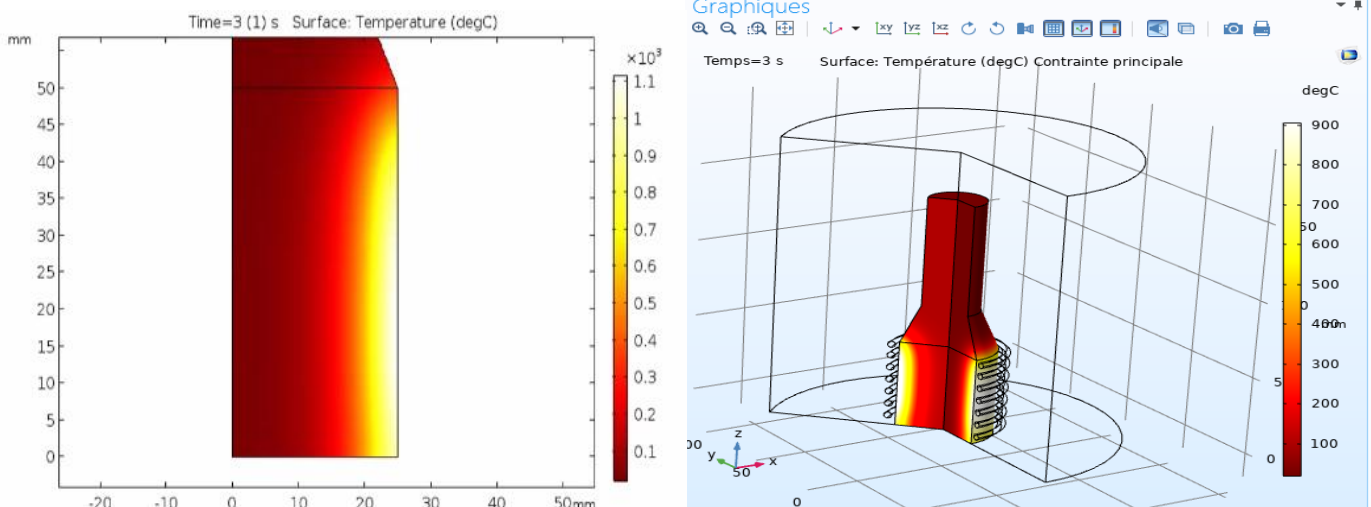


Figure IV.18 Distribution de la température à la fin de la chauffe

➤ **Processus de trempe**

- Chauffage en 3s par induction ; Electromagnétisme, thermique et changement de phase. (*ferrite -> austénite*)
- Refroidissement rapide :trempe ; thermique et transformation de phase. (*austénite ->martensite + bainite*)
- Mécanique (dilatation thermique et déformation plastique)

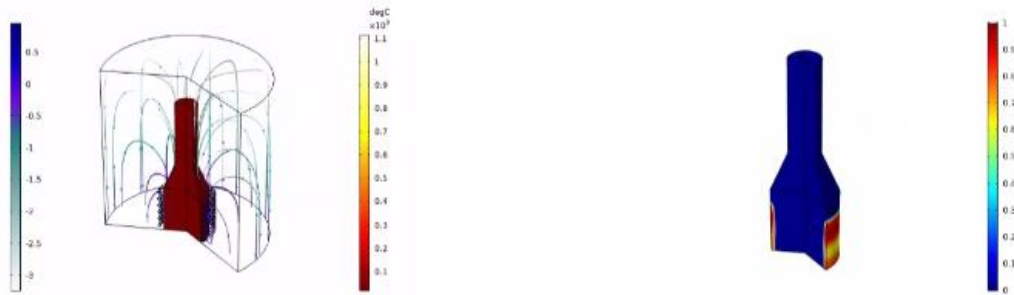


Figure IV.19 Processus de trempe

➤ **Transformation de phase**

Formation d'austenite décrite par le modèle de Leblond et Devaux :

$$a_t = \frac{1}{\tau(T)} \max\{[a_{eq}(T(t) - a(t)), 0]H[T(t) - A_s] - \sum_{j=1}^4 z_{jt}(t)\} \quad (5.12)$$

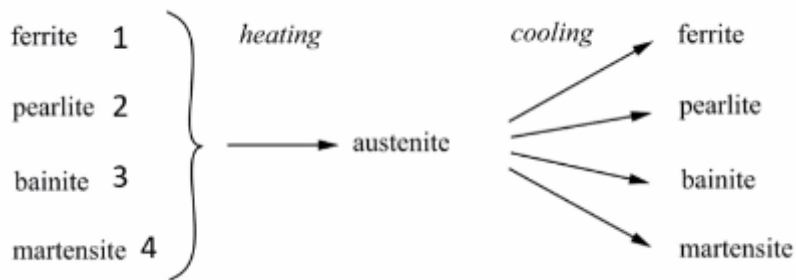


Figure IV.20 Processus de transformation de phase

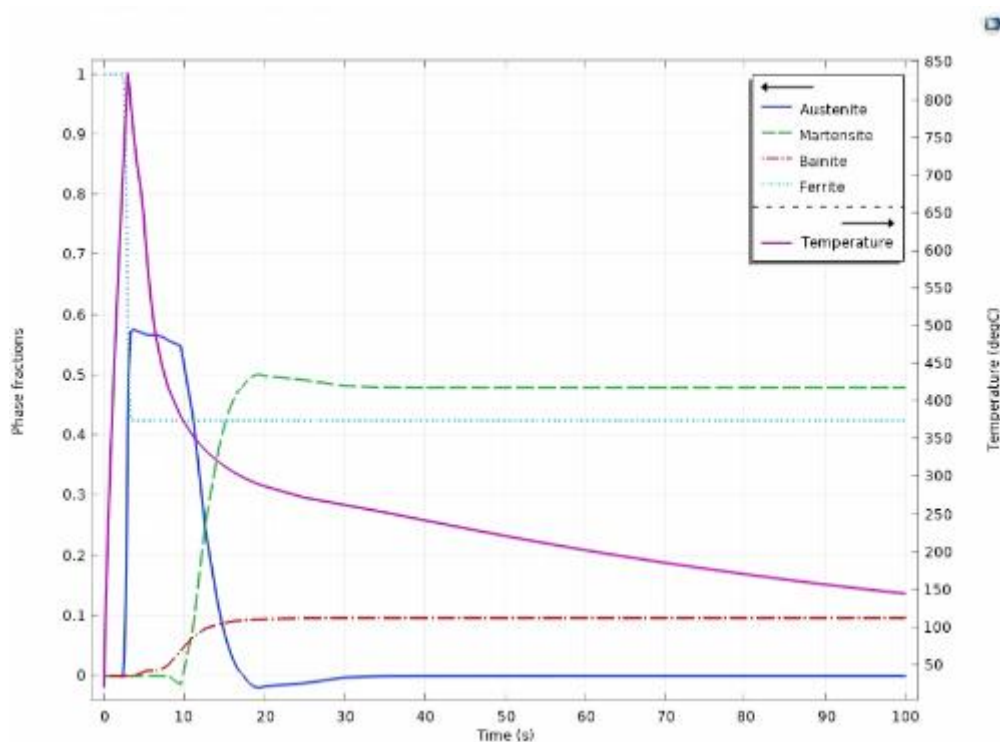


Figure IV.21 diagramme de fraction de phase et température

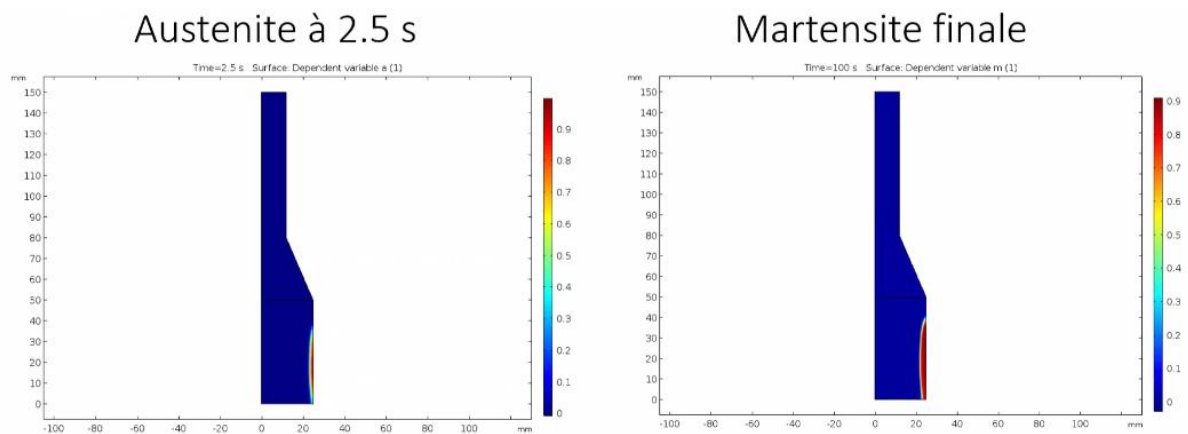


Figure IV.22 Fraction de phase

➤ Le point de curie

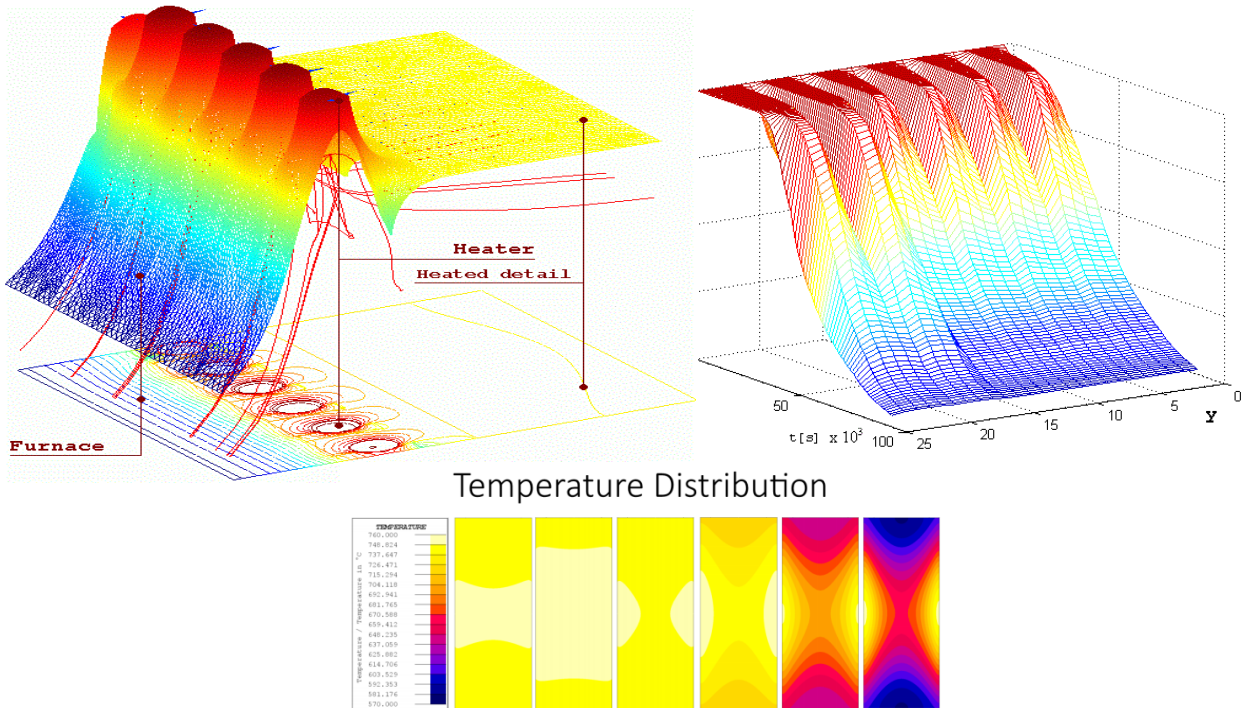


Figure IV.23 Distribution de la température de la pièce

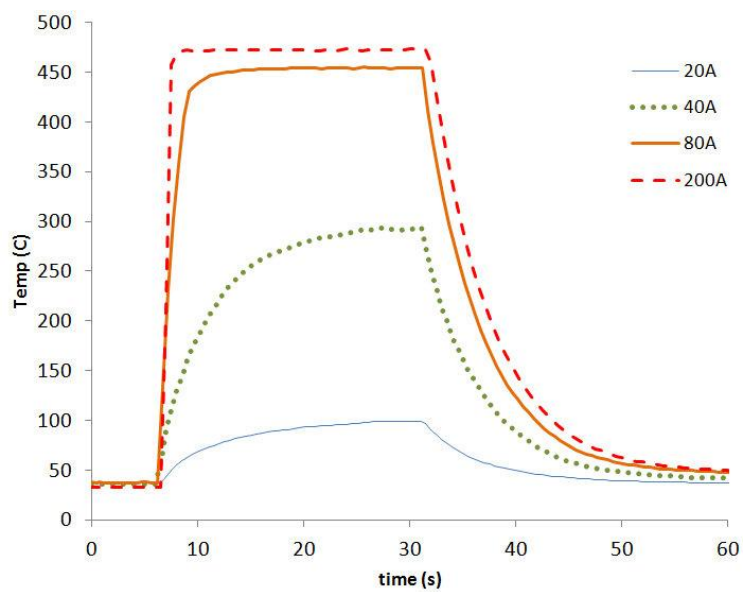


Figure IV.24 Allure de courant

- Pour assurer la continuation du système au delà de point de curie de chauffage par induction on ajoute un Fuzzy power pour contrôler l'énergie active et réactive de système .

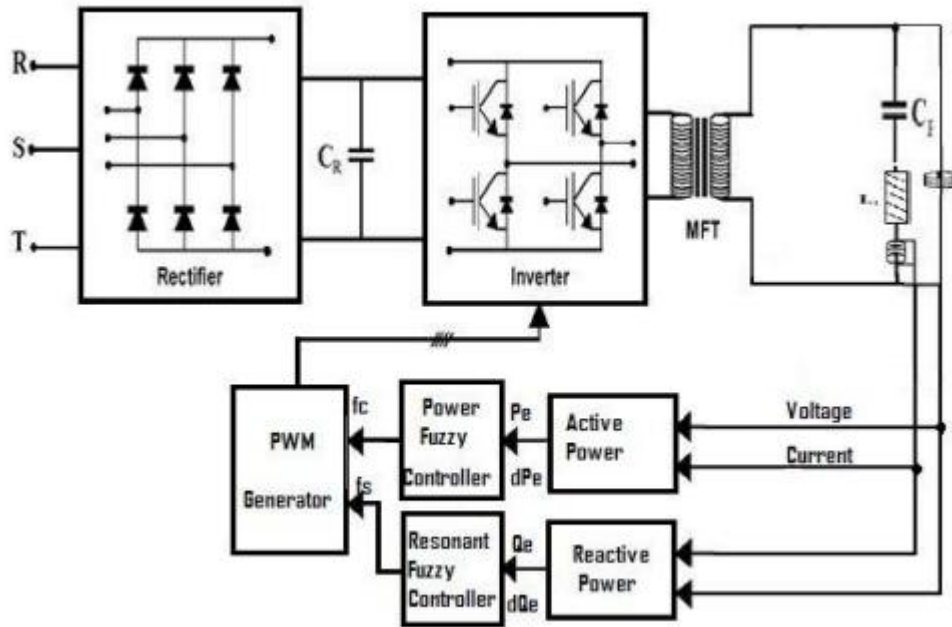


Figure IV.25 diagramme block de power controller

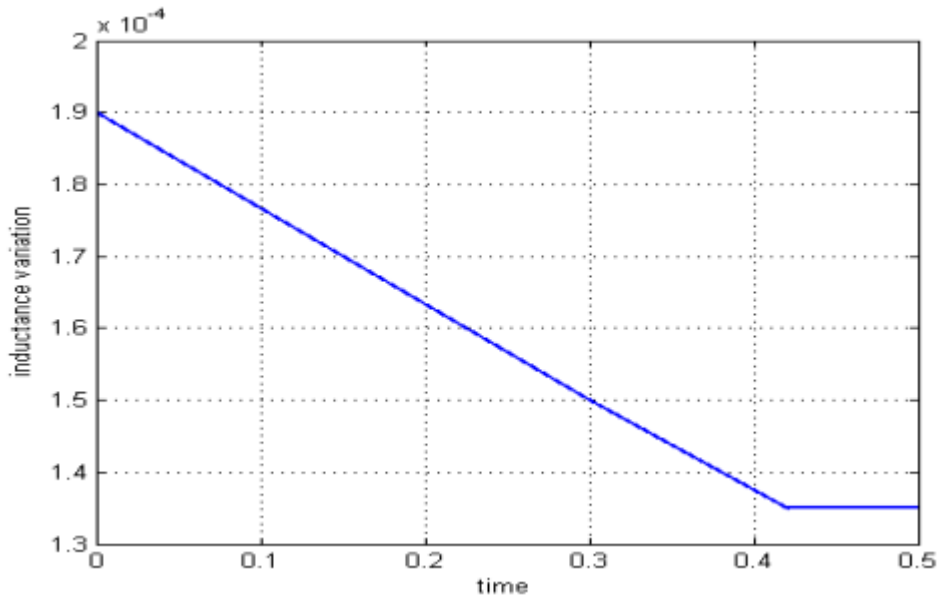


Figure IV.26 variation de l'inductance a point de curie

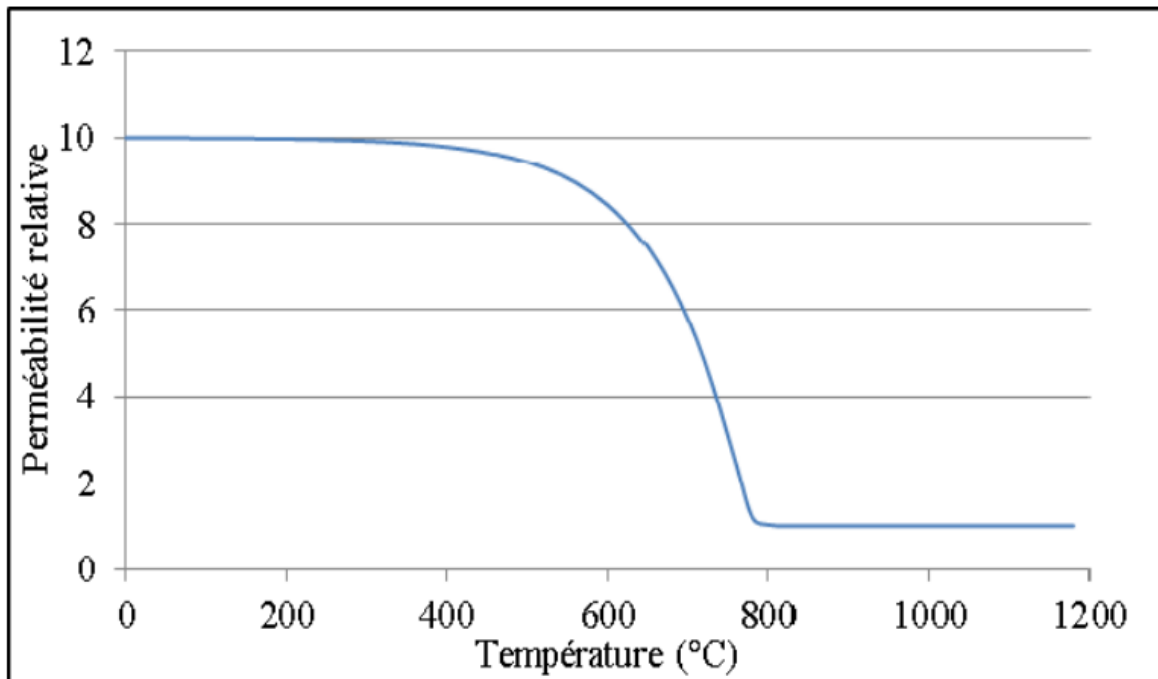


Figure IV.27 la perméabilité magnétique en fonction de la température

IV-2-5 Modes de fonctionnement de la machine à induction

La machine à induction EFD peut être utilisée selon deux modes de fonctionnement. Un premier mode appelé «DC power», il contrôle un générateur qui fournit une puissance constante durant la chauffe. Un second mode appelé «AC current», qui génère un courant constant dans l'inducteur. Chacun de ces modes est utilisé pour des applications différentes, le premier est adapté pour des charges constantes et pour des applications industrielles, alors que le deuxième est convenable pour des applications correspondant à des géométries variables. (EFD Induction 2006).

Avant de commencer la comparaison des deux modes, il faut noter que sur le logiciel de simulation multiphysique COMSOL, seul le courant dans l'inducteur peut être contrôlé durant la chauffe par induction, ce qui rend la simulation du mode de chauffe à puissance constante impossible. Pour remédier à ce problème, un programme MATLAB a été mis en place dans le but de piloter le modèle de simulation développé sur COMSOL, ce programme a pour objectif de calculer la puissance fournie par l'inducteur et d'ajuster la valeur de l'intensité du courant toutes les 0.005 secondes afin de garder une puissance constante durant la chauffe. Le couplage COMSOL-MATLAB est possible avec le logiciel COMSOL WITH MATLAB. La figure 5.28 représente le schéma de ce couplage utilisé pour simuler la chauffe à puissance constante.

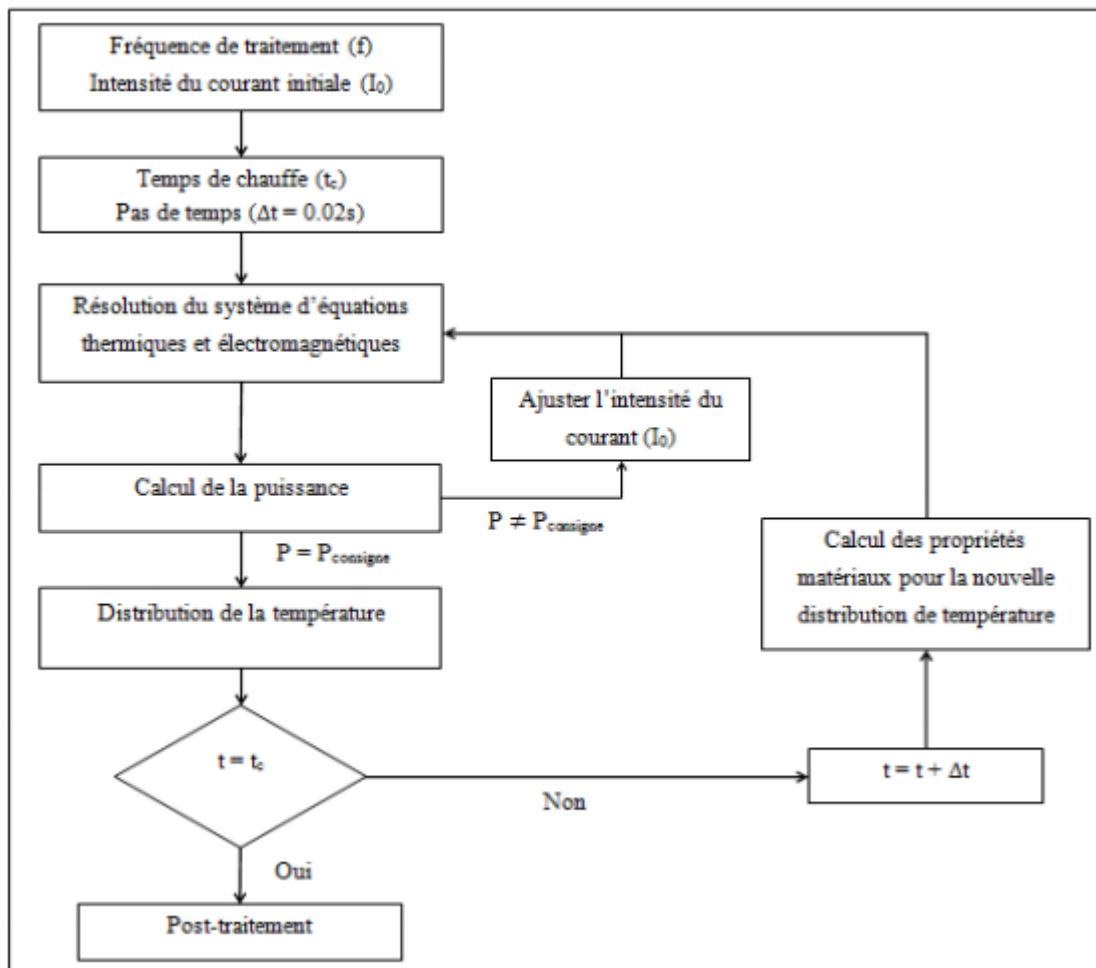


Figure IV.28 Schéma du couplage COMSOL-MATLAB

La figure 5.29 montre l'évolution de la puissance mesurée pour les deux modes «AC current» et «DC power». On remarque que la puissance en mode puissance constante suit la même évolution qu'on vient de décrire précédemment et qui est obtenue par simulation

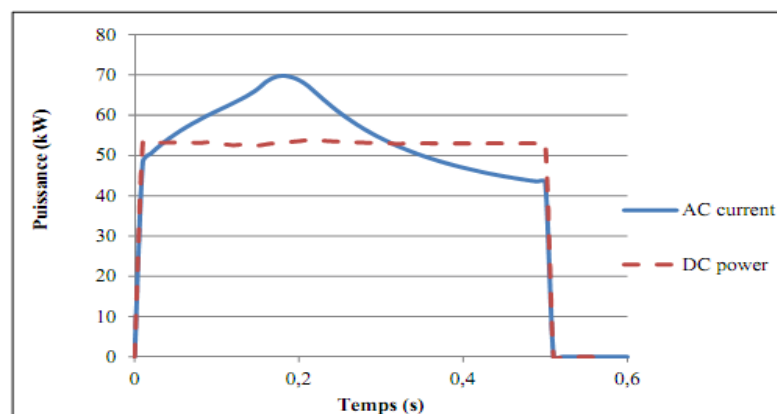


Figure IV.29 Puissances simulées en mode «AC current» et «DC power»

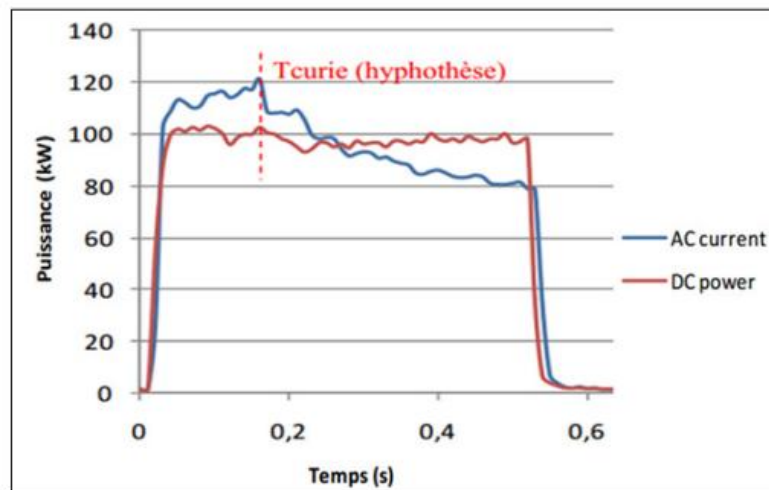


Figure IV.30 Puissances mesurées en mode «AC current» et «DC power»

À la fin de la chauffe, les profils de température s'inversent, et la pièce traitée en mode «DC power» devient plus chaude en surface que celle traitée en mode «AC current».

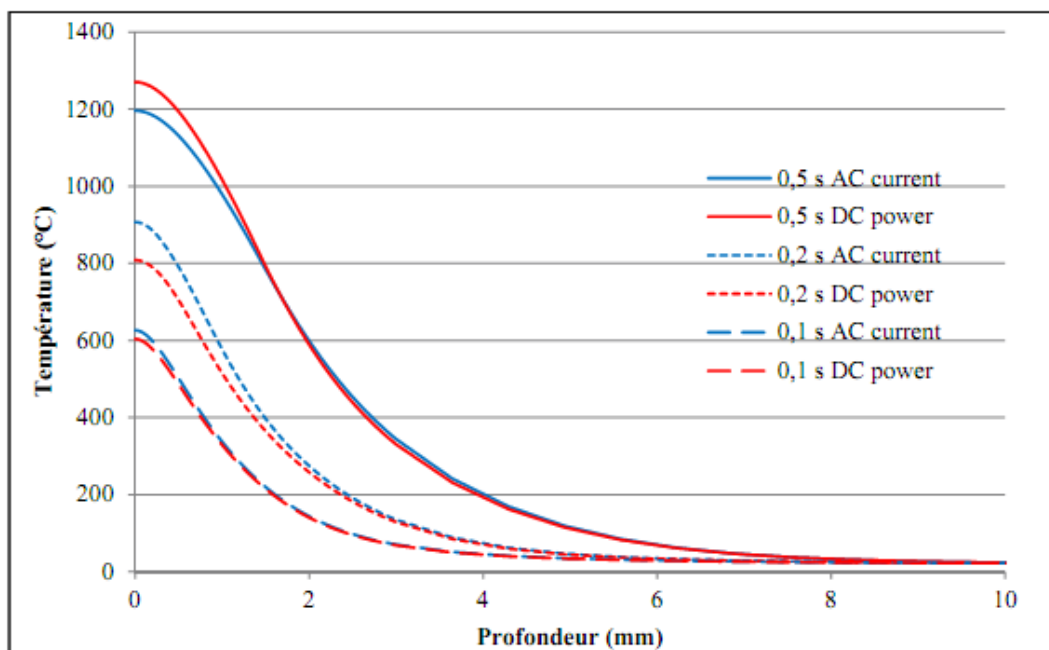


Figure IV.31 Distribution de la température sur la surface de la pièce pour les modes «AC current» et «DC power»

Ce qu'il faut aussi retenir, c'est que pour chauffer une pièce à des températures supérieures à 1200°C, il faut fournir légèrement plus de puissance en mode de chauffe «AC current» qu'en mode de chauffe «DC power».

IV-3 Réalisation de chauffage par induction

IV-3-1 le matériels utilisés



Figure IV.32 Condensateur



Figure IV.33 Générateur de pulses



Figure IV.34 transformateur

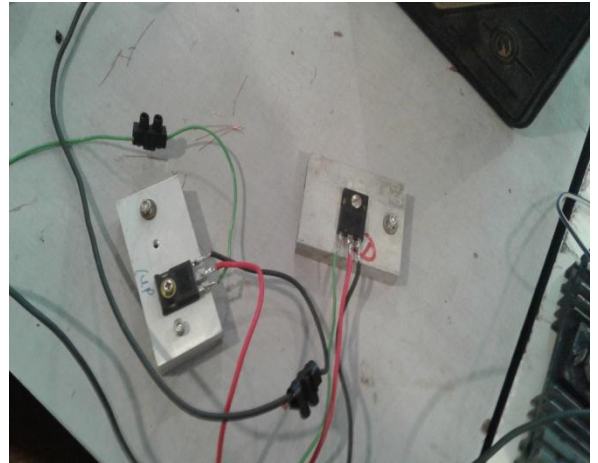


Figure IV.35 MOSFETs

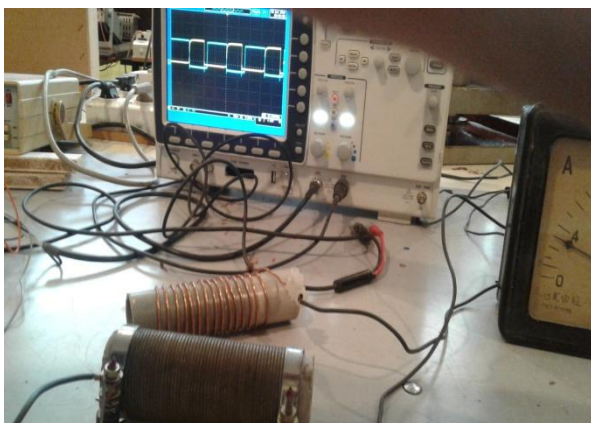


Figure IV.36 Inducteur

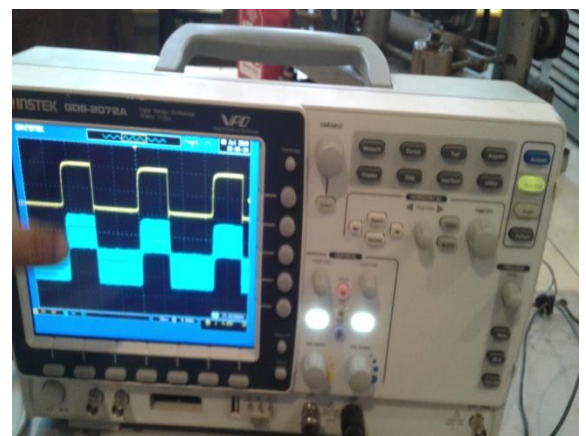


Figure IV.37 Oscilloscope

IV-3-2 Réalisation des cartes

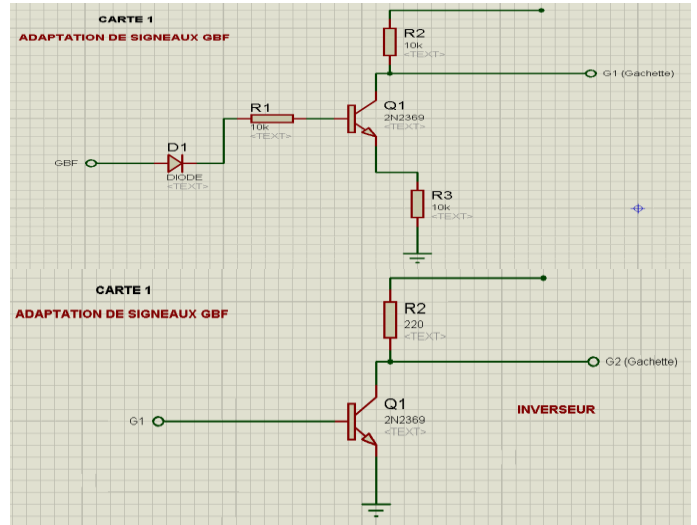


Figure IV.38 Carte d'adaptation de signaux GBF

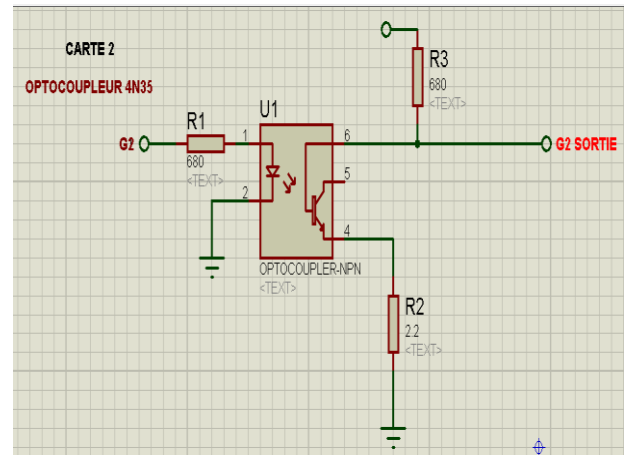
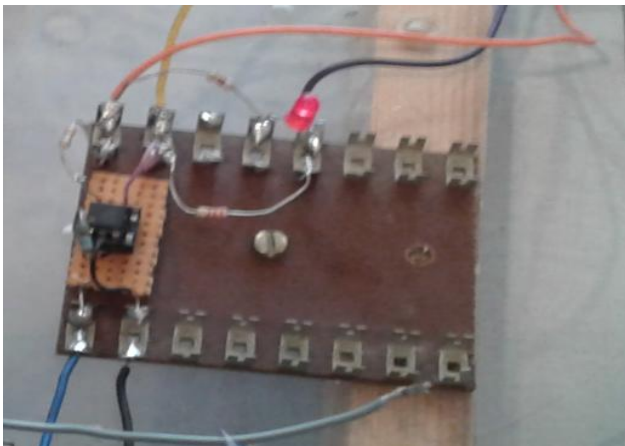


Figure IV.39 Carte Optocoupleur 4N35

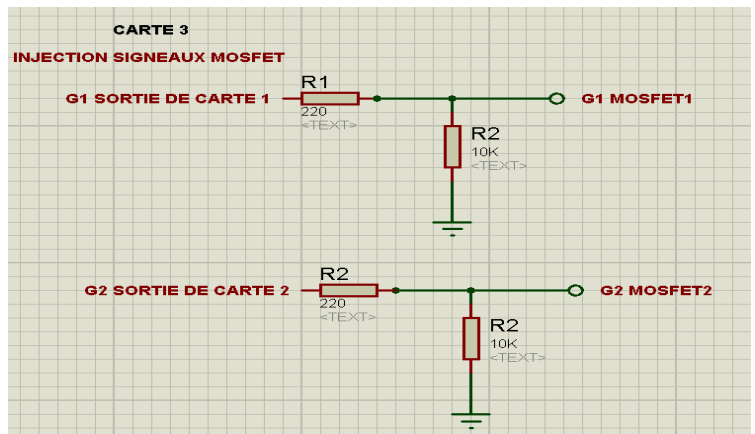


Figure IV.40 Carte injection signaux gache (MOSFET)

IV-4 projet finale

Le câblage fait au niveau de laboratoire d'électrotech

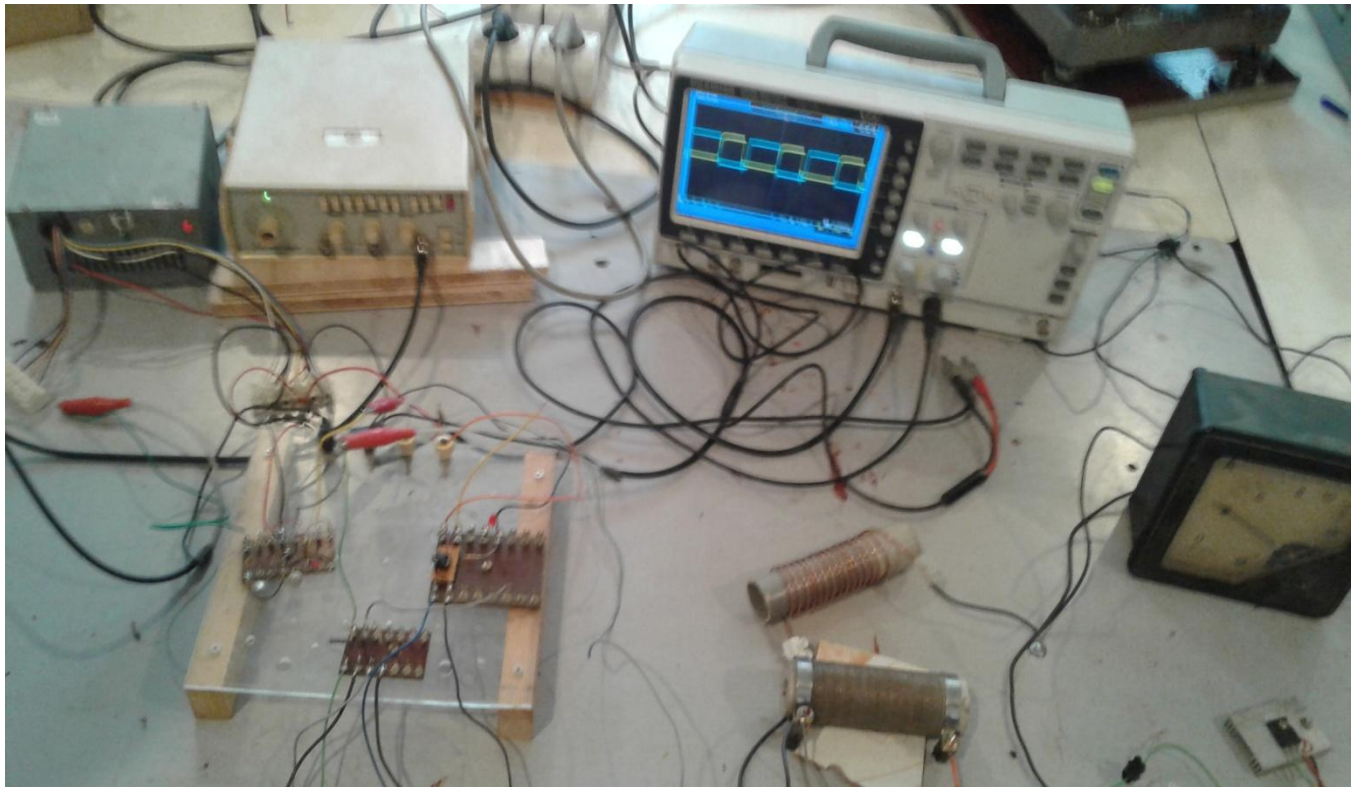


Figure IV.41 projet finale

➤ résultats de l'oscilloscope

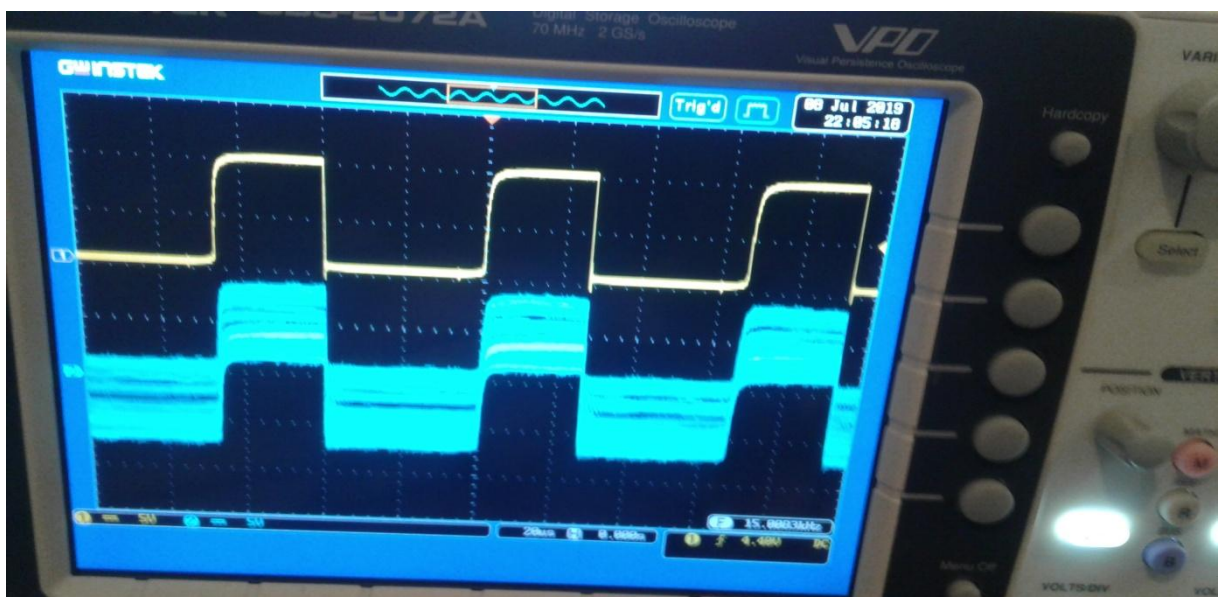


Figure IV.42 Visulation de la tension et le courant

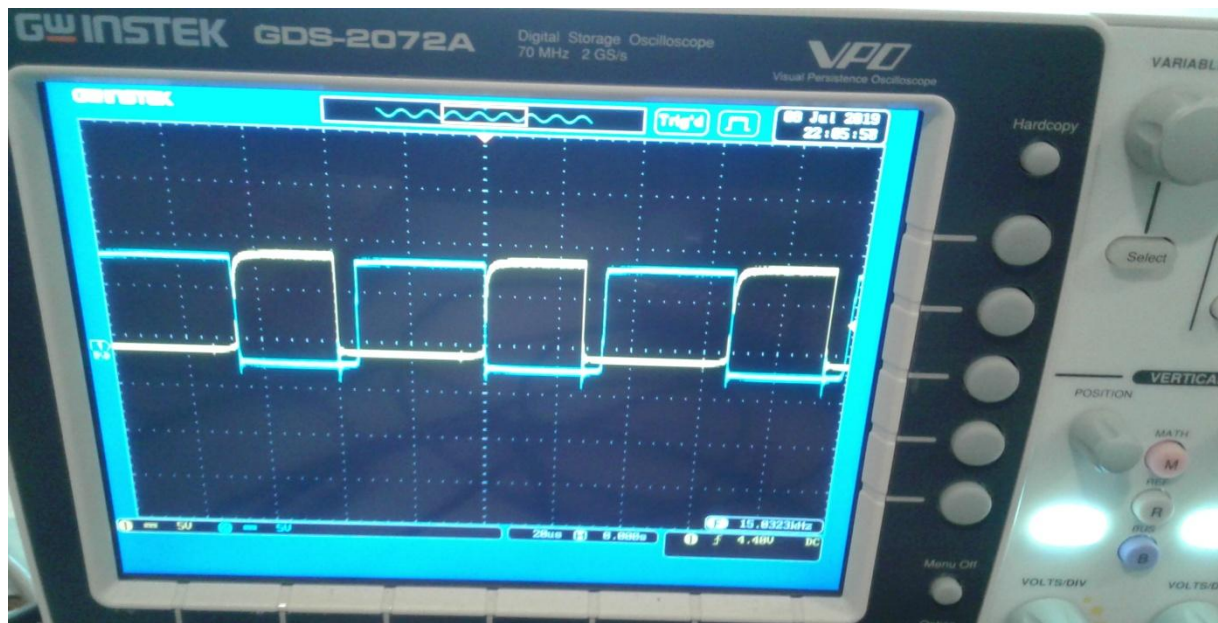


Figure IV.43 Visulation de la tension et le courant inverse

En ce qui concerne la réalisation , nous avons commencé par préparer et tester le matériels nécessaire CàD les cartes de commandes et les MOSFETs de puissance Nous avons réalisé 3 cartes :

- 1/ La carte d'adaptation de signaux **GBF**
- 2/ La carte Optocoupleur **4N35**
- 3/ La Carte injection signaux gache (**MOSFET**)

Un schema de puissance à 1 MOSFET nous a permit de tester les 3 cartes qu'elle Ont fonctionnée correctement Quant on test avec l'onduleur (nous avons choisi l'onduleur à 2 transistors Le test n'a pas été concluant car il manque les Drivers **IR2113**

On a utiliser un GBF pour tester les cartes électronique et les MOSFETs Mais c'est prévu de faire fonctionner les cartes avec des signaux électronique qu'on génère avec ARDUINO .

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé brièvement sur les méthodes numériques et ses développement avec l'outil informatique, en suite on cite quelque logiciels utilisant la méthode des éléments finis en particulier le Comsol Multiphysics.

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

Une fois le modèle numérique mis en place, une étude de convergence a été faite afin de réduire le temps de calcul sans pour autant perdre en termes de précision. Cette étude de convergence, qui a porté sur le maillage et le pas de temps de calcul, a permis la mise en place d'un modèle numérique robuste et précis.

Nous avons effectuée des simulations avec COMSOL et MATLAB-SIMULINK afin de choisir les paramètres du chauffage à induction (freq et temp) J'espère que dans l'avenir il y aura des projets afin de finaliser la maquette.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'induction électromagnétique a pour particularité de générer la chaleur directement à l'intérieur du matériau à chauffer. Cette particularité présente de nombreux atouts par rapport aux méthodes de chauffe plus standard, notamment la réduction des temps de chauffe et des rendements élevés, ou encore la possibilité de chauffer de façon très sélective.

Les lois constitutives du matériau, qui sont caractéristiques de chaque milieu doivent être ajoutées aux équations de Maxwell pour traiter le problème électromagnétique. Ainsi les propriétés thermiques des matériaux doivent être ajoutées aux lois de la thermodynamique pour traiter le problème thermique.

Pour la résolution des problèmes électromagnétiques et thermiques, il existe plusieurs méthodes. Parmi ces méthodes, on cite la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis... La modélisation numérique traitée dans ce travail sera axée sur la méthode des éléments finis.

Nous avons au cours de ce travail élaboré un modèle tridimensionnel sous Comsol Multiphysics. La visualisation de l'évolution de la température dans la charge où la réduction du temps de fusion a été considéré comme l'objectif principal permettant de déterminer les conditions optimales de performance du système.

D'après la simulation on peut noter que cette technique permet de réduire le temps de chauffe par rapport aux méthodes de chauffe plus standards (réduction du temps de fusion jusqu'à quelques secondes). Le choix de la zone de chauffage, la position, la forme d'inducteur et la fréquence ainsi que la forme et les dimensions du creuset sont des paramètres qui permettent d'adapter la source de chaleur à l'application désirée.

On a besoin d'adopter des couplages séries (couplages plus petits) et des épaisseurs du creuset faibles pour obtenir une température transmise vers la charge maximale, puis de choisir une position verticale d'inducteur d'une façon permettant de répartir les courants induits vers les deux pôles de la charge par des valeurs comparables. L'inhomogénéité est un des plus grands dilemmes qu'on doit relever dans les systèmes de chauffage par induction ; elle est influencée par la densité de courant d'alimentation ainsi que sa fréquence.

Conclusion générale

Dans cette étude, on adopte certaines hypothèses simplificatrices et par conséquent on considère que la résistivité électrique de fer répond uniquement à une variation linéaire de la température et toutes les autres propriétés électromagnétiques et thermiques sont constantes prenant leurs valeurs à la température ambiante. On néglige également le phénomène de polarisation de l'alumine, ainsi que le phénomène hydrodynamique qui apparaît dans le domaine liquide du matériau élaboré. Dans les travaux futurs, la prise en compte de la variation de ces paramètres rendra les résultats de simulation très proches des résultats expérimentaux.

Malheureusement, la capacité du modèle numérique développé à prédire l'évolution de la température dans la pièce traitée pour d'autres paramètres de chauffe par induction n'a pas pu être vérifiée car les mesures expérimentales disponibles ne correspondaient qu'à une seule recette de chauffe. Cependant, cette étude a montré qu'avec les bons paramètres matériau, le modèle numérique développé peut prédire l'historique thermique. Cet historique thermique peut être utilisé ensuite pour calculer les profils de dureté, de contraintes résiduelles ou de tailles de grains ce qui pourrait être le sujet d'autres études à l'avenir.

Référence bibliographique

- [1] **JEANT CALLBAUT**, « Guide Power Quality Section 7: Efficacité Energétique », www.leonardo-energy.org/France Edition Août 2007.
- [2] **J.M.DEDULLE, V.POULBOT, J.MORANDINI** « modélisation 3d de problèmes couples magnétothermiques par la méthode des éléments finis application au traitement thermique par induction » thèse doctorat, l'université du Meylan–France 2010.
- [3] **P.LORRAIN et D.R.CORSON**, « Champs et ondes électromagnétiques », Armand colin, Paris,1979
- [4] **E.J DEDE, J. JORDAN, V. ESTEVE**, « State-of-the art and future trends in transis- torised inverter for induction heating applications », *IEEE*, NOV 3-5 (2004).
- [5] **D.PIMENTEL** « implantation d'un contrôle de puissance pour onduleur à modulation de densité d'impulsions et optimisation des séquences de modulation à l'aide d'algorithmes génétiques » thèse doctorat, l'université du Québec à trois-rivières, juillet 2006.
- [6] **Y. Hernandez Mier, A. Vera Hernandez, L. Leija Salas** « Magnetic Induction Heating System for Local Hyperthermia Research » *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.* (2002).
- [7] **B. ADNANI** « Modélisation et Contrôle des Convertisseurs à Résonance : Application au Chauffage par Induction » Thèse de Magister de l'université de Batna. (2010).
- [8] **ERIC CHAUVEAU**, « Contribution au calcul électromagnétique et thermique des machines électrique : Application à l'étude de l'influence des harmoniques sur l'échauffement des moteurs asynchrones », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2001.
- [9] **Gregory BLUT** « Effet De La Géométrie Sur Les Paramètres Du Générateur Et Le Profil De Dureté Lors D'une Chauffe Par Induction : Expérience Et Simulation » Mémoire Présente Ecole De Technologie Supérieure Du Québec, LE 10 AOUT (2010).
- [10] **FATIMA ZOHRA LOUAI**, « Modèles magnétodynamiques d'éléments finis pour structures tridimensionnelles de chauffage par induction », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 1995.
- [11] **H. Fujita et H. Akagi**, « Pulse-Density-Modulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage- Source Inverter for Induction Melting Applications, » *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 2, p. 279-286, mars / avril 1996.
- [12] **A.Suresh et S. Rama Reddy** « Series and Parallel Resonant Inverter Fed Ferromagnetic Load-A Comparative Analysis » International Conference on Emerging Trends in Computer and Image Processing (ICETCIP'2011) Bangkok Décembre., (2011).

Référence bibliographique

- [13] **H.SARNAGO ET A.MEDIANO** « 1A novel class E RF self-oscillating topology for induction heating applications », Aragon Institute for Engineering Research (I3A), University of Zaragoza (2010).
- [14] **M.TÜMAY, et K.Çağatay BAYINDIR** « EXPERIMENTAL SETUP FOR A DSP BASED SINGLE-PHASE PWM INVERTER » Cukurova University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical & Electronics Engineering, 01330,Balcali, Adana, Turkey (2012).
- [15] **S.ARUMUGAM, et S.RAMAREDDY** « computer simulation of class d inverter fed induction heated jar », Journal of Theoretical and Applied Information Technology, INDIA, (2009).
- [16] **V.RAMESH, J.SRI RANGANAYAKULU** « Full Bridge Resonant Inverter For InductionHeating Applications » International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol.3, Issue 1, January-February, pp.066-073 (2013).
- [17] **C.CHUNWATTANAPRANITI, et al** «Half bridge current fed inverter power supply for Forging Applications, » 25th electrical Engineering Conference, Thailand, pp.97-101, (2002).
- [18] **GERARD DEVELEY** « technique de l'ingénieur », D 5 935.
- [19] **H. AKAGI, T. SAWAE et A. NABAE** « 130 kHz, 7.5 kW current source inverter using static induction transistors for induction heating application », IEEE Trans power electronics, vol 3, july (1988).
- [20] **M. SVEN WANSER**, « Simulation des phénomènes de chauffage par induction : Application à la trempe superficielle » thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale de Lyon, 1995.
- [22] **STEPHANE CLAIN**, « Analyse mathématique et numérique d'un modèle de chauffage par induction », thèse de doctorat de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, 1994.
- [23] **M.CHRISTOPHE MARCHAND**, « Les effets d'extrémité en chauffage par induction », thèse de doctorat de l'école centrale de Lyon 1984.
- [24] **MICHEL KERN**, « Introduction à la méthode des éléments finis », École nationale supérieur des mines de Paris, 2004-2005.
- [25] **TAHANOUT CHERIFA**, « Etude, simulation électrothermique d'un micro capteur de gaz à base d'oxyde semi-conducteur », mémoire de magister M'hamed Bougara - Boumerdes, 2010.

- [26] **E.J.DAVIES, J. et SIMPSON**, « Induction Heating Handbook, McGraw-Hill, UK » P.(1979).
- [27] **A.BANDYOPADHYAYET P.KUMARSADHU** « Hybrid Resonant Inverter Fed Induction Heating Using Fuzzy Logic Based PWM » International Journal of Computer Applications in Engineering Sciences, VOL I, ISSUE III, SEPTEMBER (2011).
- [28] **MICHEL STOLIDI**, « Matériaux électrotechniques », IUFM AIX-MARSEILLE, CAPET et PLP2 Electrotechnique.
- [29] **RAO, D.H. AND SARAF**, « Study of fuzzification methods of fuzzy logic controller for speed control of a DC motor », Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Vol. 2, pp. 782-7, S.S. (1996).
- [30] **J. BALIGA** «The Future of Power Semiconductor Device Technology » *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 6, p. 822-832, juin (2001).
- [31] **FREDRIC DOUMUNC**, « Elément de thermodynamique et thermique », document université Pierre et Marie Curie Année 2009/2010.
- [32] **J.BRAU**, « Rayonnement », INSA de layon ; 2006.
- [33] **N.BELHAOUCHET** « Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application .
- [34] « Emissivité », <http://docinsa.insa-lyon.fr/polycop/download.php?id=160504&id2=2>
- [35] **Roland ERNST**, «3D electromagnetic modelling of a cold crucible for induction electro- processing of materials»,EPM-MADYLAM laboratory, CNRS, Saint Martin d'Hères, France, 2005.
- [36] **R. Ernst, C. Garnier, P. Petitpas, C. Trassy**, «Numerical Modeling of a Levitated Liquid in a Cold Crucible», SIMAP-EPM Laboratory (CNRS) – France, 2007.
- [37] « COMSOL muliphysics : AC/DC module », Version 3.5, 2008.
- [38] « COMSOL muliphysics : Heat Transfer module », Version 3.5, 2008.
- [39] **GREGORY BLUT**, « Effet de la géométrie sur les paramètres du générateur et le profil de dureté lors d'une chauffe par induction ; expérience et simulation », mémoire présenté comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie mécanique à l'école de technologie supérieure université du Québec, 2010.
- [40] **HANNACHI MOHAMED TAHAR**, « Etude du Comportement Mécanique des Joints Soudés lors du Soudage des tubes par Induction à Haute Fréquence (HF) », thèse de doctorat de l'université de Batna, 2011.

Référence bibliographique

- [41] « Les Céramiques Industrielles : Applications industrielles et développements potentiels dans les Alpes-Maritimes », centre d'animation régional en matériaux avancés, octobre 1999.
- [42] **G. MAJUMDAR**, « Future of Power Semiconductors » *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, p. 10-15, Aachen, Germany, (2004).
- [43] **JACQUES POIRIER**, « Les céramiques réfractaires de l'élaboration aux propriétés d'emploi », *Verres Céramiques & Composites*, Vol. 1, N°2 (2011) 28-42
- [44] **MEBARKI SAID, BARKA RABAH**, « Etude théorique et simulation du chauffage par induction », mémoire d'ingénieur de l'université de Batna, 2011.
- [45] **OUAGUENI ABDELMADJID**, « Etude et simulation du chauffage par induction dans une charge cylindrique », mémoire d'ingénieur de l'université de Batna, 2011.
- [46] **FREDRIC DOUMUNC**, « Élément de thermodynamique et thermique », document université Pierre et Marie Curie Année 2009/2010.
- [47] **FREDRIC THUMMEN**, « Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires », thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.
- [48] **Pierre PIALY**, « Étude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun): minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité », thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2009.
- [49] **HELLAL RADIA**, « Etude et caractérisation d'un réfractaire à base de K.T. (KAOLIN DE TAMAZERT) », mémoire de magistère de l'université de Mentouri-Constantine, 2006.
- [50] <http://www.goodfellowceramics.com/fr/produits/ceramiques/alumine/?gclid=CMuJ7YfL3rYCFdHLtAod1GUA8A>.
- [51] **KOURAT DJEDJIGA**, « Modélisation de la rupture diélectrique dans les céramiques à haute teneur en alumine soumises à des contraintes électriques », mémoire de magistère de l'université de Tizi-ouzou, 2012.
- [52] <http://french.alibaba.com/product-gs/alumina-cupel-alumina-rectangular-boat-547492556.html>.
- [53] **CHRISTOPHE GUERIN**, « Détermination des pertes par courant de Foucault dans les cuves des transformateurs : modélisation de régions minces et prise en compte de la saturation des matériaux magnétiques en régime harmonique », thèse de doctorat, Grenoble, France, 1994.

Référence bibliographique

[54] **SASKA ZANCHETTI**, «Caractérisation de différents types de brûleurs à jet supersonique pour la fragmentation thermique de rocs», mémoire présenté comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie mécanique à l'école de technologie supérieure université du Québec, 2009.

[55] **G. DEVELY**, «Chauffage par induction électromagnétique: principes», Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 5 935, pp. 1-22.

[56] http://www.cuivre.org/contenu/docs/doc/pdf/metallurgie/10_proprietes.pdf

[57] <http://hypertextbook.com/facts/2004/JennelleBaptiste.shtml>