

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par

**Ramdane Amine BAHA
Abdellah HAMNACHE**

Mémoire dirigée par M^{me} MOHELLEBI Eps. OUDNI

Thème

Calcul de la température de soudage des couronnes des cages d'écureuil du moteur asynchrone par le procédé de chauffage par induction.

Mémoire soutenu le 28 / 12 / 2020 devant le jury composé de :

M Chafik BIROUCHE
MAA, UMMTO, Président

Mme Zehor MOHELLEBI Eps. OUDNI
MCA, UMMTO, Encadreur

M Azzouz MIOUAT
MAA, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre promotrice M^{me} MOHELLEBI eps OUDNI qui nous a orienté et soutenu et qui par sa collaboration effective et par ses judicieux conseils a rendu possible l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements les plus distingués vont également à tous ceux et toute celles qui nous ont apporté leurs aides de près ou de loin.

Notre reconnaissance va également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Que monsieur le président et les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et de notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à:

A mes parents.

A mes sœurs et mes frères.

A mes amis et mes proches.

Mes très chères proches qui m'ont beaucoup soutenu pendant toute ma formation, ils trouveront ici ma profonde gratitude.

BAHA RAMDANE AMINE

HAMNACHE ABDELLAH

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage par induction et les fours à induction

Figure 1.1 : Principe de l'induction magnétique	5
Figure 1.2 : Répartition de la densité de courant depuis la surface	8
Figure 1.3 : Schéma général d'une installation de chauffage par induction	9
Figure I.4 : Plage de puissance et de fréquence pour les différents types de générateur pour le chauffage à induction.....	10
Figure I.5 : Principe d'inducteur avec un concentrateur de champ.....	11
Figure I.6 : Fusion par induction.....	16
Figure I.7 : Revêtement métallique à chaud.....	17
Figure I.8 : Revêtement de peinture et vernis	17
Figure I.9 : Le brassage.....	18
Figure I.10 : Le soudage.....	18
Figure I.11 : Principe d'une plaque de cuisson en vitrocéramique	19
Figure I.12 : Les appareils de chauffage à induction (a) vue éclatée, (b) détail du système d'inductance	20
Figure I.13 : Circuit de base du four à induction	22
Figure I.14 : Une coupe longitudinale d'un four à creuset	23
Figure I.15 : Une coupe longitudinale d'un four à canal	23

Chapitre II : Modélisation numérique et formulation des phénomènes magnétiques et thermiques

Figure II.1 : Maillage type différence finie.....	25
--	-----------

Chapitre III : Présentation du logiciel PDETOOL.

Figure III.1 : Interface d'accueil pdetool.....	43
--	-----------

Figure III.2 : Les valeurs d'axes.....	44
---	-----------

Figure III.3: Exemple d'affichage (Boundary mode).....	44
---	-----------

Figure III.4 : Boite de dialogue (Specify Boundary conditions).....	45
--	-----------

Figure III.5 : Exemple d'une structure.....	45
--	-----------

Figure III.6 : Boite de dialogue pour les dimensions et de la position d'un bloc.....	46
--	-----------

Figure III.7: Génération d'un maillage.....	46
--	-----------

Figure III.8 : Boite de dialogue PDE Specification.....	47
--	-----------

Figure III.9: Boite de dialogue plot sélection.....	48
--	-----------

Chapitre IV : Application et résultats.

Figure IV.1: Représentation du modèle (inducteur-couronne).....	49
--	-----------

Figure IV.2: Modèle d'étude.....	50
---	-----------

Figure IV.3: Maillage.....	51
-----------------------------------	-----------

Figure IV.4: Répartition du potentiel vecteur magnétique pour $f=500(\text{Hz})$.....	52
---	-----------

Figure IV.5: Répartition du potentiel vecteur magnétique pour $f=500(\text{Hz})$.....	52
---	-----------

Figure IV.6: Répartition de la température pour le cuivre ($f=1000 \text{ Hz}$).....	53
--	-----------

Figure IV.7: Répartition de la température pour l'Aluminium ($f=1000 \text{ Hz}$).....	53
--	-----------

Figure IV.8 : Variation de la température en fonction du temps.....	54
--	-----------

Figure IV.9 : Variation de la température en fonction de la fréquence.....	55
---	-----------

Liste des Tableaux

Chapitre I : Etat de l'art sur le chauffage par induction et les fours à induction

Tableau I.1 : Résistivités et coefficients de température 6

Tableau I.2 : Profondeur de pénétration 8

Chapitre IV : Application et résultats.

Tableau IV.1: Dimension des blocs 51

Tableau IV.2: Valeurs du potentiel vecteur magnétique et de la chaleur pour une fréquence constante 53

Tableau IV.3: Valeurs du potentiel vecteur magnétique, de la chaleur et de la température dans le cas de cuivre 54

Tableau IV. 4: Valeurs du potentiel vecteur magnétique, de la chaleur et de la température dans le cas d'aluminium 54

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : Etat de l'art sur le chauffage par induction et les fours à induction

I.1	Introduction	3
I.2	Historique	3
I.3	Principe physique du chauffage par induction	4
I.3.1.	La résistance électrique	5
I.3.2	La perméabilité magnétique	6
I.3.3	Profondeur de pénétration	7
I.4	Installations de chauffage par induction.....	9
I.4.1	Schéma général	9
I.4.2	Source d'alimentation	9
I.4.3	Inducteur	11
I.5	Propriétés du chauffage par induction.....	12
I.5.1	Rendement électrique.....	12
I.5.2.	Facteur de puissance	13
I.5.3.	Caractéristiques du chauffage par induction	13
I.5.3.1	Avantages et intérêts techniques	13
I.5.3.2	Consommation énergétique.....	14
I.5.4.	Conditions et limites de la technique	14
I.5.5.	Les défis à venir	14
I.6	Applications de chauffage par induction.....	15
I.6.1	Applications industrielles.....	15
I.6.1.1	Sidérurgie et métallurgie	15
I.6.1.2	Les procédés d'assemblage	17
I.6.2	Application domestique	18

I.6.3 Applications médicales	20
I.7 Les fours à induction	21
I.7.1 Principe de four à induction	21
I.7.2 Les technologies des fours à induction	22
I.7.2.1 Les fours à induction à creuset.....	22
I.7.2.2 Fours à canal	23
I.7 Conclusion.....	24

Chapitre II : Modélisation numérique et formulation des phénomènes magnétiques et thermiques

II.1. Introduction.....	25
II.2. Méthodes des différences finis	25
II.2.1. Méthode d'intégrale de frontières	26
II.2.2. Méthodes des éléments finis	26
II.3. Principes de la méthode	27
II.3.1. Discrétisation du domaine d'étude	27
II.3.2. Formulation variationnelle	29
II.3.3. Formulation résidus pondérés	30
II.3.4. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	31
II.4. Les méthodes mixtes.....	32
II.4.1. Eléments finis / éléments frontières.....	32
II.4.2. Eléments finis / Equations intégrales.....	33
II.5. Formulations éléments finis des modèles d'équations électromagnétiques et thermiques	33
II.5.1. Les étapes de déroulement de la méthode des éléments finis	33
II.5.1.1. L'équation aux dérivées partielles	33
II.5.1.2. Equation aux dérivées partielles à une intégrale.....	34
II.5.1.3. Discrétisation du domaine	34
II.5.1.4. Ecriture matricielle	34
II.5.1.5. Résolution du système matriciel	35
II.5.1.6. Utilisation du vecteur solution [A]	35
II.5.2. Implémentation informatique de la méthode des éléments finis	35
II.5.3. Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique en terme de potentiel vecteur A	

en coordonnées cartésiennes 2D.....	35
II.5.4. Formulation éléments finis de l'équation de conduction de chaleur en coordonnées cartésiennes 2D.....	37
II.5.5. Formulation éléments finis de l'équation du couplage magnétothermique.....	38
II.5.6. Méthode de résolution des systèmes matriciels.....	40
II.6. Conclusion	41

CHAPITRE III : Présentation du logiciel PDETOOL

III.1. Introduction	42
III.2. Présentation de logiciel pdetool	42
III.3 Les étapes de la simulation sous pdetool.....	43
III.3.1 Dimensionnement de l'espace de travail	43
III.3.2 Dessin du domaine	44
III.3.3 Dessin de la structure	45
III.3.4 Spécification des dimensions	46
III.3.5. Génération du maillage.....	46
III.3.6 Spécification des paramètres des équations	47
III.3.7. La résolution de PDE.....	47
III.8. Conclusion.....	48

Chapitre IV : Application et résultats

IV.1. Introduction	49
IV.2. Description de la géométrie a étudié.....	49
IV.3. Les caractéristiques électromagnétique et thermique.....	49
IV.4. Introduction de la géométrie	50
IV.5. Les résultats obtenus	52
IV.6. Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56

Références bibliographiques

Introduction générale

Tout corps conducteur électrique soumis à l'influence d'un champ magnétique variable est le siège de courants induits. C'est le principe du chauffage par induction.

Les dispositifs électromagnétiques engendrent toujours des échauffements. Ceux-ci peuvent être bénéfiques comme dans le cas du chauffage par induction. Dans ce procédé on cherche toujours à obtenir des températures élevées, localisées ou à cœur et avec des rendements élevés.

Ces dernières années, les systèmes électromagnétiques deviennent à la fois plus complexe et plus performants. Cela est dû à une analyse thermique et électromagnétique de plus en plus précise. On doit ces progrès à divers facteurs, les plus en vue sont la puissance de calcul des ordinateurs mais aussi au développement des codes de calculs dont la méthode des éléments finis est la plus connue.[3]

La méthode de chauffage par induction est largement utilisée dans de nombreux procédés technologiques comme la fusion, le formage à chaud, le durcissement de surface et le soudage. Elle est extrêmement efficace en raison de son transfert d'énergie sans contact, ces densités de puissances considérable et son champ de température contrôlé dans la pièce. Cependant un potentiel élevé de chauffage par induction peut être entièrement réalisé sur la base de simulation numérique seulement. Tout procédé technologique utilisant la méthode de chauffage par induction est multi physique. Ce procédé intègre l'effet électromagnétique et thermique combinés à cause de propriétés dépendantes de la température de la pièce à traité. [17]

Pour de nombreux procédés de fabrication modernes, le chauffage par induction électromagnétique offre une combinaison attrayante de la vitesse, de la cohérence et de contrôle. De nombreuses industries ont bénéficié de cette nouvelle percée en mettant en œuvre le chauffage par induction pour un bon nombre d'applications.

Les principes de base du chauffage par induction ont été compris et appliqués depuis les années 1920 et sa technologie s'est développée rapidement pour répondre aux différents besoins. Actuellement, parmi les nouvelles recherches concernant le chauffage, l'accent est mis sur la fabrication des inducteurs qui sont un facteur clé dans ce processus. En effet le chauffage par induction est dépendant de plusieurs paramètres indépendants tels que l'énergie fournie, le temps de chauffage, la géométrie de la pièce et la propriété des matériaux, le positionnement de la pièce dans l'inducteur et la géométrie de la structure de l'inducteur et le nombre de tours de la bobine d'inducteur et également la fréquence d'alimentation électrique.

L'analyse magnétothermique est réalisée à partir de la résolution des équations aux dérivés partielles qui régissent le phénomène magnétothermique. Il s'agit de l'équation de la chaleur pour le champ de la température et les équations de Maxwell pour le champ électromagnétique. Les équations du champ magnétothermique sont fortement couplées. Les caractéristiques physiques, perméabilité magnétique, conductivité électrique et conductivité thermique dépendent de la température. Le niveau de température atteint dépend du courant injecté et du champ magnétique appliqué. [8]

Il existe aujourd'hui des outils de calculs par la méthode des éléments finis qui peuvent résoudre les équations électro magnétothermique couplées. C'est le cas du logiciel (PDETOOL) utilisé dans ce travail.

Pour atteindre l'objectif fixé nous organisons cette étude en quatre chapitres:

- Le premier chapitre comporte une étude bibliographique sur le chauffage par induction et les fours à induction électromagnétique.
- Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation numérique et la résolution des phénomènes magnétique et thermique.
- Le troisième chapitre constitue la présentation du logiciel pdetool et les différentes étapes de simulation.
- Le quatrième chapitre comporte la partie application et validation des résultats.

On termine notre travail par une conclusion générale sur notre étude.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur le chauffage par induction et les fours à induction

I.1 Introduction

Le chauffage par induction a connu ces dernières années un développement important, essentiellement lié aux avantages de ce mode de chauffage. Le chauffage par induction électromagnétique est une technique de chauffage pour les matériaux conducteurs fréquemment utilisée par de nombreux procédés thermiques tels que la fusion ou les traitements thermiques des métaux. [6]

Le chauffage par induction est un phénomène physique basé sur l'effet Joule et l'induction électromagnétique, cette dernière 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 standards. [3],[5]

I.2 Historique

Le phénomène d'induction magnétique fut découvert par le physicien anglais Michael 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 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 des matériaux tels que la résistivité électrique et la perméabilité magnétique relative. Ainsi a pris naissance le traitement superficiel par induction plus tard dans les années 1960. L'arrivée de la crise pétrolière 1973, les pays occidentaux, voulant diminuer les énergies fossiles classiques et développer l'énergie nucléaire à titre d'exemple qui a donné un nouvel essor pour le chauffage par induction.[8]

I.3 Principe physique du chauffage par induction

La technique de chauffage par induction est une application très directe à la fois de la loi de l'induction – loi de Lenz – et de l'effet Joule : via un inducteur qui donne naissance à un champ magnétique variable. Ces variations créent (le flux d'induction magnétique instantané φ), une force électromotrice d'induction, donc des courants induits : [3], [4]

$$e = \frac{-d\varphi}{dt} \quad (I.1)$$

A leur tour, ces courants induits appelés courants de Foucault, dissipent la chaleur par effet Joule dans la substance même où ils ont pris naissance. La puissance développée est de la forme :

$$P = RI^2 = \frac{E^2}{R} \quad (I.2)$$

Où la résistance R dépend de la résistivité du matériau et de la concentration des courants près de la surface sur une épaisseur δ (en mm) du fond du récipient.

Le champ magnétique crée pénètre plus ou moins profondément dans le matériau placé à proximité de l'inducteur selon la fréquence et les propriétés magnétique du matériau. D'après la loi de Lenz, les courants de Foucault dus aux variations du champ magnétique à l'intérieur de la pièce ont une direction et un sens qui s'opposent au courant dans l'inducteur. La zone du matériau parcouru par les courants de Foucault chauffe par effet Joule. La chauffe est dépend des propriétés électriques et les propriétés magnétiques du matériau, ainsi l'intensité du champ magnétique en jeu. Les zones adjacentes à celles chauffées par les courants sont chauffées par la conduction thermique selon les propriétés thermiques du matériau. [2], [3]

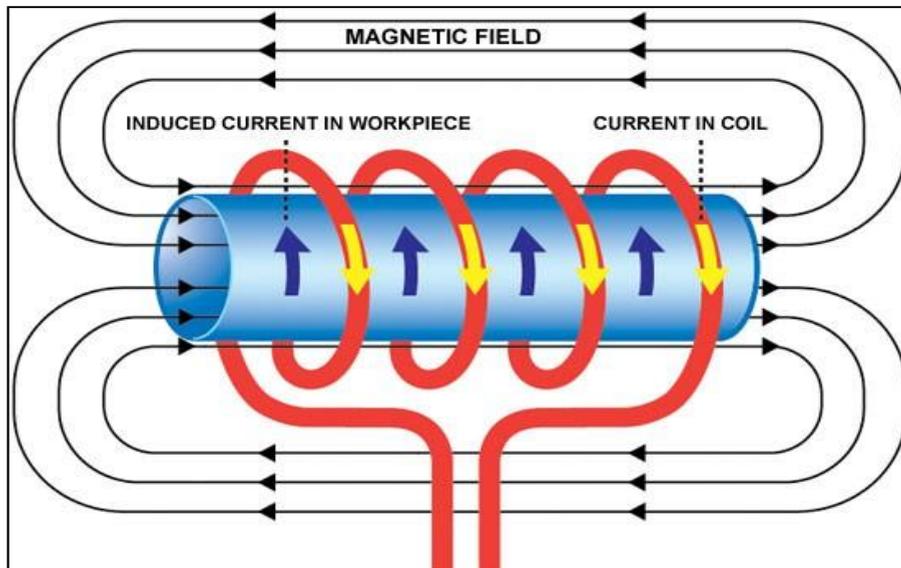


Figure 1.1 : Principe de l'induction magnétique.

I.3.1. 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).

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (I.3)$$

La résistivité du matériau représente sa capacité à s'opposer à la circulation de courant électrique. En général elle augmente avec l'augmentation de la température. Le tableau 1 montre les valeurs des résistivités électriques et des coefficients de température pour certains matériaux utilisés aux températures ambiantes. La résistivité des métaux purs peut souvent être représentée en fonction de la température sous la forme linéaire :

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (I.4)$$

Où ρ_0 est la résistivité à la température ambiante, $\rho(T)$ 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. [10]

Matériau	Résistivité électrique ($\Omega \cdot m$)	Coefficient de température ($1/^\circ C$)
Argent	1.95×10^{-8}	0.0061
Cuivre	1.68×10^{-8}	0.0068
Or	2.44×10^{-8}	0.0034
Aluminium	2.65×10^{-8}	0.0034
Tungstène	5.80×10^{-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	70×10^{-8}	0.0061
Plomb	1.59×10^{-8}	0.0061

Tableau 1.1 : Résistivités et coefficients de température.

I.3.2 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 :

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (I.5)$$

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 égale à $4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (I.6)$$

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 grandes que le vide (c'est-à-dire $\mu_r > 1$) et montrent une grande susceptibilité positive aux champs magnétiques externes. Les matériaux diamagnétiques ont des valeurs de perméabilité relative légèrement supérieure à 1 alors que les matériaux paramagnétiques ont une valeur de 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 amagnétiques à la température dite température de Curie.[4],[10]

I.3.3 Profondeur de pénétration

C'est la notion fondamentale qui régit le phénomène de l'induction. En haute fréquence le courant alternatif n'est pas uniforme dans toute la section transversale de la Pièce à traiter. Il est concentré sur la surface, cet effet est appelé effet de peau (en anglais : skin-effect). Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur. Cela signifie que le courant ne circule pas uniformément dans toute la section du conducteur. Tout se passe comme si la section utile du conducteur était plus petite. Donc la résistance augmente, ce qui conduit à des pertes par effet Joule très importantes. [3]

L'effet de peau est caractérisé par la profondeur de pénétration (δ), appelée profondeur de peau. Cette grandeur caractéristique est définie comme : [4]

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \sigma}} \quad (I.7)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [\text{ }^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$$

avec f fréquence du convertisseur, [Hz]

ρ : résistivité du matériau du récepteur, [$\Omega \cdot \text{m}$]

μ_r : perméabilité relative du matériau.

La répartition exacte de la densité de courant dans la pièce ne dépend pas seulement des caractéristiques physiques du matériau chauffé et la position et la forme de l'inducteur, mais aussi du paramètre du processus qui est la fréquence. La figure I.2 montre sur un (cylindre de rayon infini), que cette densité de courant diminue d'une façon exponentielle depuis la surface jusqu'au centre. [7]

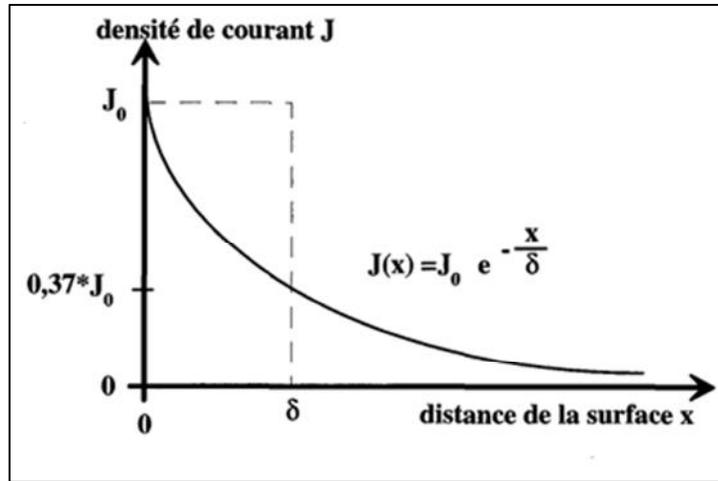


Figure 1.2: Répartition de la densité de courant depuis la surface.

La répartition de la densité de courant est donnée par :

$$J(X) = J_0 e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)} \quad (I.8)$$

$$J(\delta) = 0.37J_0 \quad (I.9)$$

Où x est la distance de la surface en mètre et J_0 et la valeur maximale de la densité de courant [A/m].

Le tableau suivant regroupe des ordres de grandeur de δ en fonction de plusieurs matériaux pour différentes fréquences. [5]

δ en [mm]	Acier 20°C	Acier 20°C	Cuivre 20°C	Cuivre 900°C	Graphite 20°C
ρ [$\mu\Omega.m$] →	0,16	0,16	0,017	0,086	10
μr →	40	100	1	1	1
Fréquence ↓					
50 Hz	4,5	2,85	9,31	20,87	225,08
100Hz	3,18	2,01	6,58	14,76	159,15
1 KHz	1,01	0,64	2,08	4,67	50,33
10KHz	0,32	0,2	0,66	1,48	15,92
100KHz	0,1	0,06	0,21	0,47	5,03
1 MHz	0,03	0,02	0,07	0,15	1,59

Tableau I.2 : Profondeur de pénétration.

I.4 Installations de chauffage par induction

I.4.1 Schéma général

Le chauffage par induction est une technique bien connue à produire de très hautes températures pour des applications telles que la fusion d'acier, la soudure et le durcissement extérieur. Dans chaque application la fréquence appropriée doit être employée selon le morceau de travail et la condition de la géométrie et de profondeur de peau [6]. La figure. I.3 montre le schéma de principe d'une installation de chauffage par induction. On trouve à partir du réseau électrique (50 Hz), un convertisseur permettant de créer les courants électriques à la fréquence souhaitée, un adaptateur nécessaire à l'ajustement des tensions, un inducteur générant le champ électromagnétique dans lequel est placée la charge à chauffer [5].

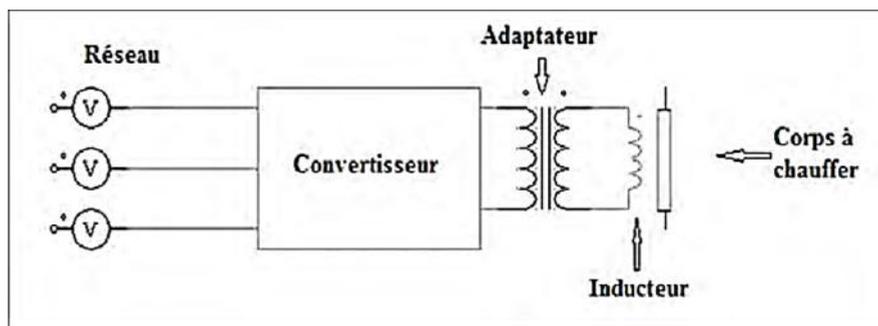


Figure 1.3 : Schéma général d'une installation de chauffage par induction.

Les installations de chauffage inductif peuvent inclure un système de refroidissement pour le convertisseur de fréquence et pour l'inducteur, ainsi qu'un système de transport de l'énergie et un système de commande et de mesure adapté.

I.4.2 Source d'alimentation

L'alimentation électrique peut être de différentes natures selon la fréquence d'alimentation de l'installation désirée, on cite : [7]

- **Pour les installations à basse fréquence 50Hz :**

La charge est directement connectée au transformateur, le transformateur peut être réglé pour ajuster le courant à l'impédance de la charge. Cette installation est adaptée aux puissances supérieures à 10MW.

- Pour les installations de moyenne fréquence 100Hz à 10KHz :

On utilise des convertisseurs de fréquence à thyristors pour les grandes puissances de 10MW avec un rendement qui varie de 90% à 97%.

- Pour les installations de haute fréquence autour de 500KHz :

Les convertisseurs de fréquence préférés sont des convertisseurs à transistors avec une puissance qui peut atteindre les 500KW avec un rendement de 75% à 90%.

- Pour les installations d'hyper fréquence jusqu'à 3000KHz :

Pour les hautes fréquences et pour des faibles puissances inférieures à 1200KW, il est préférable de choisir le convertisseur à lampe à vide qui a un faible rendement de 55% à 70%.

La figure 1.5 résume le type de générateur à utiliser en fonction de la puissance et la fréquence pour réaliser un processus de chauffage à induction électromagnétique [1]

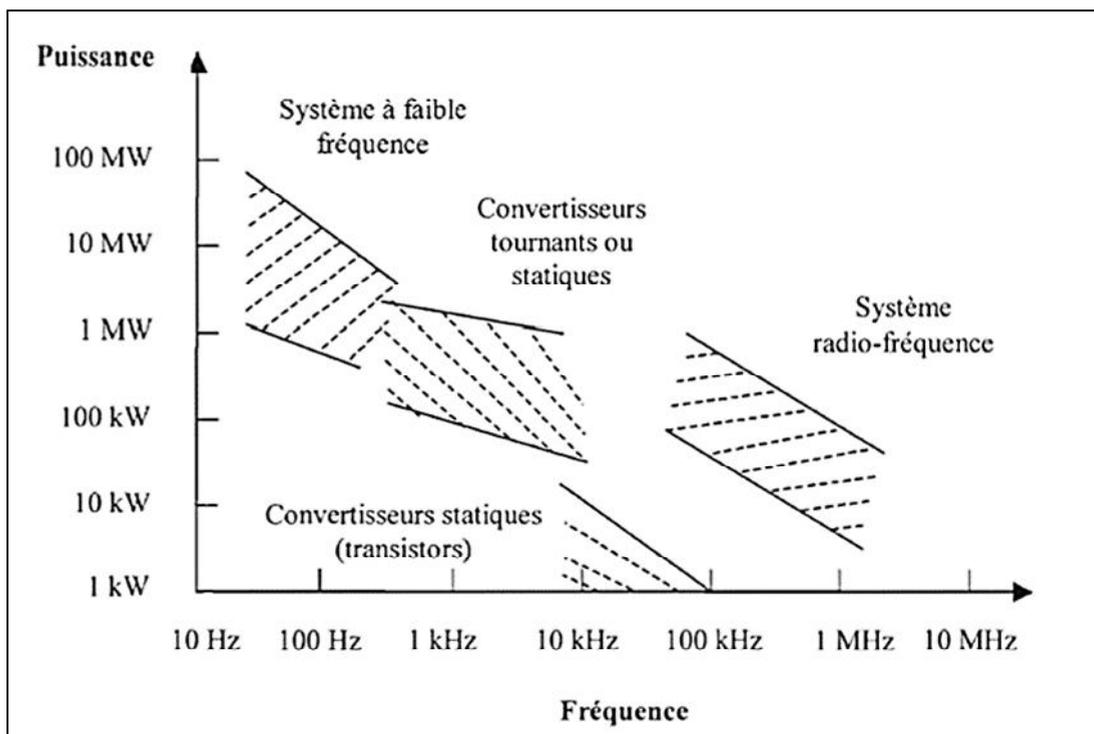


Figure I.4 : Plage de puissance et de fréquence pour les différents types de générateur pour le chauffage à induction.

I.4.3 Inducteur

Pour la plupart des applications, l'inducteur est un tube en cuivre creux se présentant comme un enroulement adapté à la géométrie de l'objet à chauffer. L'inducteur est le plus souvent en cuivre, afin de limiter les pertes électriques, et refroidi par eau, dans la plupart des cas.[5]

Remarque : l'avantage de l'inducteur en forme solénoïde c'est que le champ magnétique créé par chaque spire s'ajoute à celui créé par d'autres spires, donc un champ total important, ce qui engendre une induction électromagnétique intense à l'intérieur de la bobine. Dans les autres cas pour avoir un champ magnétique élevé, on utilise des dispositifs particuliers et renforceurs de champ à cavaliers magnétiques (fig. I.5). [3]

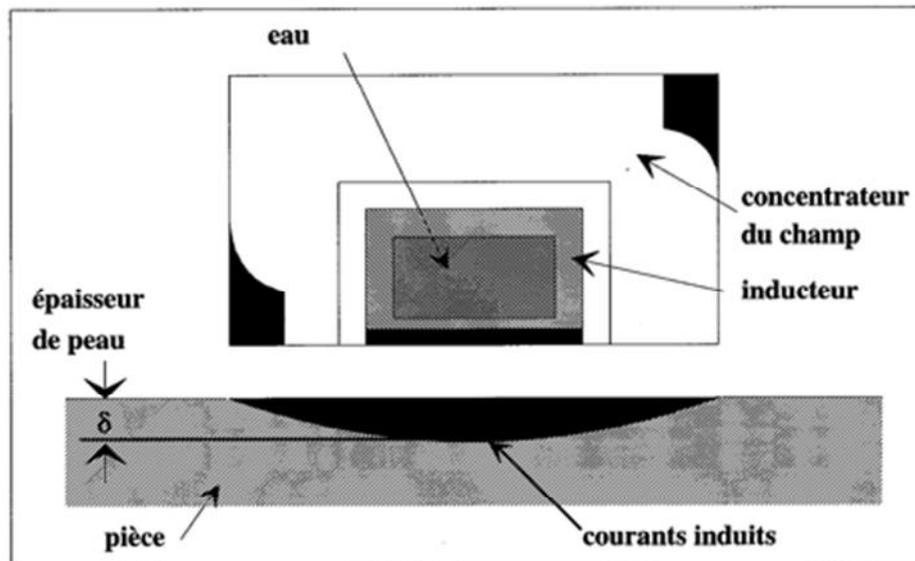


Figure I.5 : Principe d'inducteur avec un concentrateur de champ.

I.5 Propriétés du chauffage par induction

I.5.1 Rendement électrique

Le rendement électrique du chauffage par induction est défini par le rapport de l'énergie utile recueillie dans la pièce à chauffer et l'énergie totale mise en jeu :

$$\eta = \frac{P_{ch}}{P_i + P_{ch}} \quad (I.10)$$

P_{ch} : Puissance recueillie dans la pièce à chauffer.

P_i : Puissance dissipée par effet Joule dans l'inducteur, avec $P_i = R_i I^2$.

R_i : Résistance de l'inducteur.

I : Intensité du courant parcourant par l'inducteur.

Le rendement dépend fortement du ratio-diamètre de la profondeur de pénétration (dans le cas d'une charge cylindrique) et de la conception de l'inducteur. Les règles de base à respecter pour un meilleur rendement sont [7] :

- Pour l'inducteur, utiliser un matériau de faible résistance, en règle générale 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).

Donc généralement on remarque que l'obtention d'un meilleur rendement de chauffage dans une pièce dépend des paramètres suivants [9] :

- Le champ magnétique de l'inducteur.
- Les caractéristiques géométriques de la pièce à chauffer.
- La nature des conducteurs.
- La fréquence du courant d'induit.

I.5.2. 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 0,5 et 0,6. Dans tous les cas, un relèvement du facteur de déplacement par condensateurs est requis. [5]

I.5.3. Caractéristiques du chauffage par induction

I.5.3.1 Avantages et intérêts techniques :

- Grâce à la haute densité de puissance, une installation à induction peut être compacte et réaliser un chauffage rapide.
- L'inertie thermique (temps de réponse à l'échauffement) est très faible et la densité de puissance élevée (jusqu'à 4 MW/m²), ce qui permet d'atteindre de très hautes températures.
- Localisation précise de l'effet thermique grâce à une conception d'inducteur et une fréquence de fonctionnement adaptée à la pièce à chauffer.
- Les installations à induction sont compatibles avec les automatismes.
- La modulation de la puissance, la reproductibilité des cycles de traitement et l'automatisation sont aisées et apportent une grande flexibilité.
- L'induction peut être appliquée de façon très locale.
- La gamme de puissance est très étendue, de 3 kW à 40 MW, ce qui permet notamment de traiter de forts débits horaires.
- Procédé répondant parfaitement aux exigences industrielles de la moyenne et grande série.
- La souplesse : les installations de chauffage par induction permettent l'utilisation d'un large éventail de matières économiquement et écologiquement intéressantes.
- Bonnes conditions de travail pour les opérateurs. [4], [8]

I.5.3.2 Consommation énergétique :

- Les installations de chauffage par induction ont en règle générale, un bon rendement. Toutefois, le rendement dépend aussi de la nature du matériau à chauffer.
- Une part importante des pertes calorifiques peut être récupérée. [6]

I.5.4. Conditions et limites de la technique:

- L'induction ne présente pas d'avantage économique en traitement thermique, si un maintien en température est indispensable.
- Des coûts d'acquisition élevés pour les fortes puissances. Le chauffage par résistances présente un avantage économique par rapport au chauffage par induction tant que techniquement est possible (températures inférieures à 900 °C).
- Il faut veiller à la conformité des installations de chauffage par induction à la directive européenne sur les rayonnements électromagnétiques et la santé des travailleurs.
- Pour les très hautes températures (à partir de 1500°C), le chauffage par arc électrique peut être plus performant que le chauffage par induction (limite de température des réfractaires). L'induction est alors intéressante dans les cas où la qualité du produit (grande pureté) est un critère déterminant (structures en auto creuset).
- Il faut assurer des bonnes manipulations car lors de mauvaises manipulations, d'autres objets peuvent être involontairement chauffés. [4]

I.5.5. Les défis à venir

Bien que les systèmes de chauffage à induction ont atteint une certaine maturité, il y a encore quelques problèmes à régler pour augmenter encore ses performances. Parmi les nombreux sujets d'intérêt, des efforts importants sont attendus dans ces systèmes dans les années à venir [7].

- **Systemes à haute efficacité :**

L'amélioration de la technologie des semi-conducteurs et le développement de dispositifs de commutation, avec les topologies avancées des convertisseurs de puissance, permettent à la conception des systèmes à haute efficacité. De tels systèmes non seulement présente une plus grande efficacité, mais aussi une amélioration des performances et de fiabilité.

- **Systèmes de multi-bobine :**

Les systèmes multi-bobine offrent une plus grande flexibilité, et une distribution de chaleur performantes, et ils sont essentiels pour certaines applications industrielles et domestiques de haute précision. Ces systèmes représentent une percée majeure dans la technologie des chauffages à induction, ils nécessitent un développement de convertisseurs de puissance à sorties multiples, et les techniques de contrôle de pointe, et une spéciale conception d'inductance.

- **Systèmes de contrôle avancé :**

Les systèmes de chauffage à induction nécessitent des algorithmes de contrôle robustes pour adapter au fonctionnement de convertisseur de puissance à différentes charges et points de fonctionnement. Les lignes de recherche actuelles poursuivent l'utilisation d'algorithmes adaptatifs en temps réel des systèmes d'identification visant à améliorer la performance du système.

- **Applications spéciales :**

Bien que les paramètres du processus dans de nombreuses applications industrielles et domestiques sont déjà bien connus, il y a encore quelques applications qui nécessitent davantage de recherche et d'optimisation pour trouver des solutions fiables.

I.6 Applications de chauffage par induction

Parmi les nombreuses applications de chauffage à induction : industriel, domestique et médicale sont les plus importants en termes de puissance et de l'importance économique. Les sous-sections suivantes détaillent les principales caractéristiques de ces applications.

I.6.1 Applications industrielles

I.6.1.1 Sidérurgie et métallurgie

- **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. [10]



Figure I.6 : Fusion par induction.

- **Traitement thermique :**

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.

Ils existent plusieurs formes de traitement thermique par induction comme : la trempe superficielle, la trempe à cœur, le recuit en continu des bandes d'acier et durcissement de l'acier.

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 à vitesse, des vilebrequins, des soupapes, des lames de scie, des bèches, des rails et pour d'autres applications.

- **Traitements de surface :**

Les revêtements de surface s'appliquent essentiellement à des pièces ou à des bandes d'acier, les métaux ferreux étant les plus concernés par les problèmes de corrosion. Comme : l'étamage, la galvanisation, les revêtements métalliques à chaud et le revêtement de peintures et vernis.



Figure I.7 : Revêtement métallique à chaud.



Figure I.8: Revêtement de peinture et vernis.

I.6.1.2 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. [10]

L'induction est souvent utilisée pour chauffer les pièces localement. De plus, l'augmentation rapide de la température permet de mieux contrôler les éventuels problèmes d'oxydation et de changement de structure ou de composition du matériau. De plus, le chauffage à induction correspond bien à des vitesses de production élevées sur des lignes de production automatisées. [7]

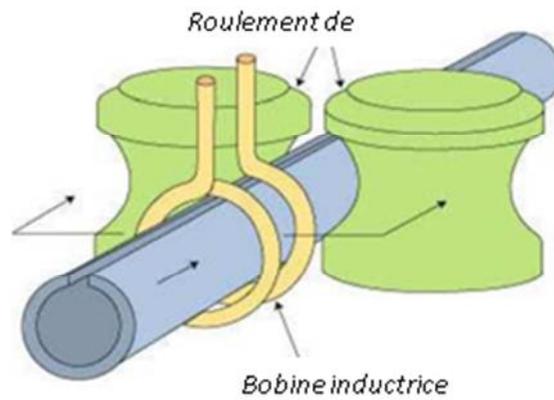


Figure I.9 : Le brassage.

- **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. [6], [10]



Figure I.10 : Le soudage.

I.6.2 Application domestique

Les principales applications domestiques du chauffage par induction sont les appareils Cuisers, qui profitent non seulement de l'amélioration des temps d'échauffement et de l'efficacité, mais aussi des températures de surface inférieure, ce qui implique une meilleure sécurité et propreté, aussi la nourriture qui ne brûle pas [4], [7]

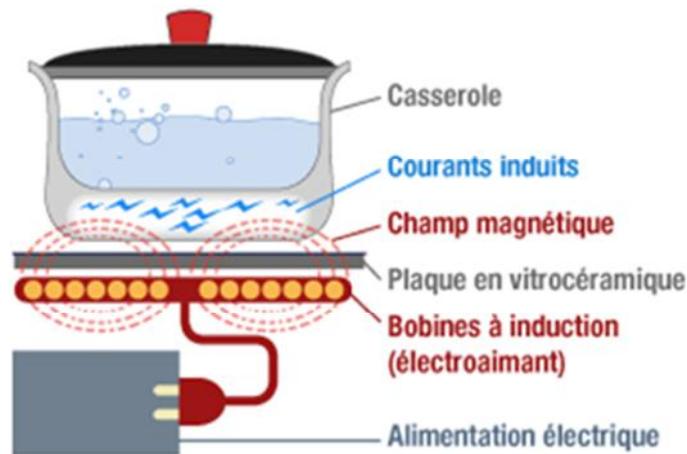


Figure I.11: Principe d'une plaque de cuisson en vitrocéramique.

Les tables de cuisson utilisent toutes comme support la vitrocéramique. Encastrées dans un plan de travail, des entrées d'air doivent être prévues pour assurer le refroidissement des circuits électroniques de puissance ; une grille de sortie d'air est généralement installée à l'arrière de la table.

Grâce aux avantages qu'elle présente, cette innovation est très utilisée ces dernières années dans la cuisine professionnelle et collective. Les principales caractéristiques de ces applications est la conception compacte à profil bas, de plus l'échauffement très variable de la cible peut changer très facilement la forme des matériaux et de leurs positions.

L'efficacité est également une conception clé en raison des capacités limitées de refroidissement. Pour cette raison, de gros efforts ont été payés pour améliorer le convertisseur de puissance et l'efficacité de l'inducteur. Aujourd'hui, deux tendances technologiques sont présentes dans ces appareils. Deux d'entre eux suivent la conversion de puissance (redresseur, filtre, onduleur) mais ils diffèrent dans la topologie de l'onduleur.

Ces appareils disposent également des techniques de contrôle avancées, y compris la reconnaissance intelligente de pot et les stratégies de contrôle adaptatif pour contrôler non seulement la puissance de sortie mais aussi la température du pot.

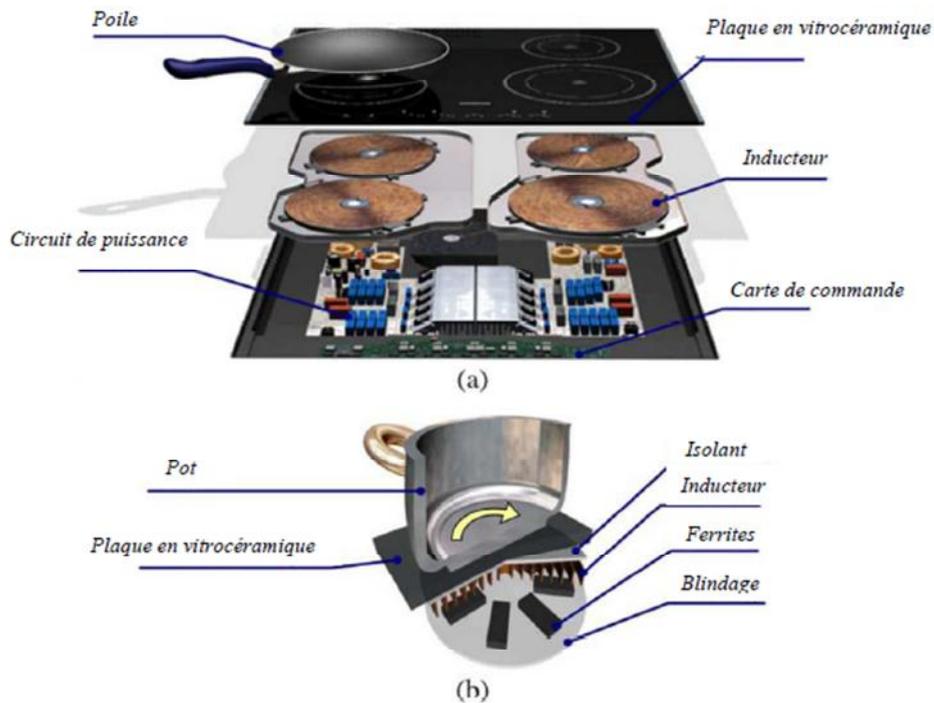


Figure I.12: Les appareils de chauffage à induction (a) vue éclatée, (b) détail du système d'inductance.

I.6.3 Applications médicales

Aujourd'hui, le troisième grand domaine d'application de la technologie est lié à ses applications médicales. Initialement, le chauffage par induction a été appliqué dans la fabrication et la stérilisation de plusieurs instruments chirurgicaux, puisque c'est une source de chaleur propre, rapide, et facile à transporter.

Cependant, au cours des dernières années, a également été introduit dans certaines thérapies. Par exemple L'hyperthermie qui est une thérapie de traitement du cancer basé sur l'échauffement des cibles de tumeur à des températures importantes plus de 50 . Ce traitement local enlève le tissu du cancer tout en minimisant les dommages aux cellules saines voisines. C'est donc une bonne alternative pour le traitement de l'hyperthermie, car il s'agit d'un échauffement sans contact technique, et il offre un contrôle précis de la puissance.

Pour fournir précisément la puissance à la tumeur, généralement un matériau ferromagnétique est placé dans la zone de traitement. Les tendances de la recherche modernes enquêtent sur l'utilisation de fluides avec des nanoparticules ferromagnétiques pour obtenir des distributions de chaleur précises. Ces techniques nécessitent une conception de convertisseurs de puissance et un contrôle précis, et des modèles spécifiques d'induction.

En raison de la faible résistivité de la nature typique de la charge pour les applications médicales, les onduleurs résonnants parallèles sont appliqués à minimiser le courant à travers l'onduleur. De plus, les fréquences de fonctionnement sont configurées pour être supérieure à 300 kHz et/ou plusieurs MHz pour obtenir des paramètres électriques équivalents appropriés, le transistor est le dispositif de puissance couramment mis en œuvre. Les futures recherches comprennent plus de précision et un échauffement homogène, et une surveillance de la température dans les tissus cancéreux et voisins, ainsi que la combinaison de cette technique avec d'autres thérapies pour améliorer les résultats. [7]

I.7 Les fours à induction:

I.7.1 Principe de four à induction

Un four à induction fonctionne sur un principe similaire à un transformateur, c'est-à-dire que la bobine d'induction agit en tant que bobine primaire, ayant plusieurs tours, et la charge agit en tant que bobine secondaire, avec un seul tour. Quand un courant alternatif est appliqué à la bobine d'induction d'un four, un courant beaucoup plus important est induit dans la matière de la charge. La résistance au passage du courant induit au sein de la charge du four entraîne la charge à chauffer jusqu'à ce qu'elle fonde. Une fois que le métal est fondu, le champ magnétique généré crée une action d'agitation dans le bain, produisant à la fois l'homogénéisation de la composition chimique et de l'assimilation de tout ajout au bain [1], [10].

Le flux de courant à travers la bobine d'induction engendre de la chaleur dans la bobine elle-même. De la chaleur est également diffusée à travers le matériau réfractaire du four à partir du métal fondu contenu dans le creuset. Un refroidissement par eau efficace est crucial pour prévenir la surchauffe de la bobine et l'échec potentiel. Des systèmes de refroidissement sont donc conçus pour offrir une fiabilité, avec plusieurs circuits de refroidissement distincts installés à la bobine, toutes équipées de thermostats et un moyen de vérifier le débit du liquide de refroidissement. Parce que la sécurité de fonctionnement du four est de la plus haute importance, les fabricants ont mis au point divers systèmes de détection qui permettent d'avertir si le métal liquide pénètre le creuset réfractaire à un niveau critique.

Le développement des dispositifs multiplicateurs de fréquence permet une sortie de fréquence dans la gamme de fréquences moyennes. Un convertisseur de fréquence se compose de :

- Un redresseur pour convertir le courant alternatif du secteur en courant continu.
- Un onduleur pour convertir le courant continu à une fréquence moyenne de courant alternatif.

- Une batterie de condensateur.

La fréquence de sortie et la tension sont commandées automatiquement pour correspondre à la fréquence de résonance du circuit du four.

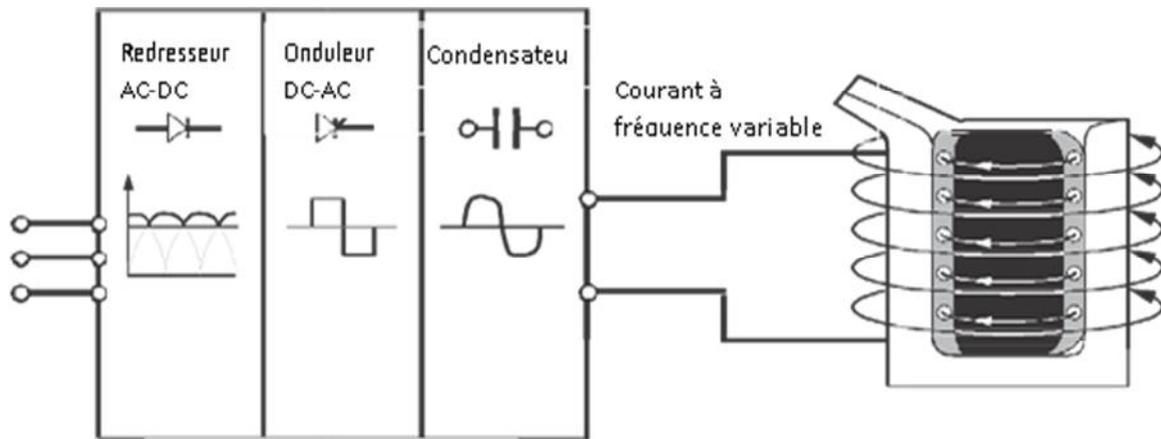


Figure I.13 : Circuit de base du four à induction.

I.7.2 Les technologies des fours à induction

I.7.2.1 Les fours à induction à creuset

La surface intérieure du creuset est constituée d'un revêtement réfractaire (brasque), qui contient le matériau à porter à la fusion, il est entouré par une bobine inductrice. L'inducteur est refroidi par eau et entouré d'un noyau de fer pour améliorer le couplage magnétique. [1], [10]

Il existe des applications à moyennes fréquences. Les gammes de puissance atteignent 10MW pour des applications standards, et jusqu'à 1200kW/ton pour des applications spécifiques, elles sont très élevées, car elles permettent de réduire considérablement les temps de fusion. [7]

Les fours à creuset à 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 elles offrent une plus grande flexibilité de production, et pour cela on observe un remplacement progressif des applications à basses fréquences par des applications moyennes fréquences dans ce système.

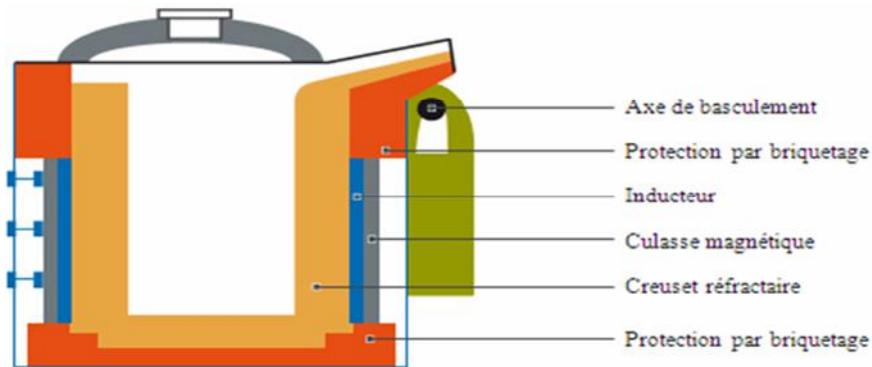


Figure I.14 : Une coupe longitudinale d'un four à creuset.

I.7.2.2 Fours à canal :

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, le four à canal est équivalent à un transformateur avec circuit magnétique fermée, dont le canal constituerait le secondaire.

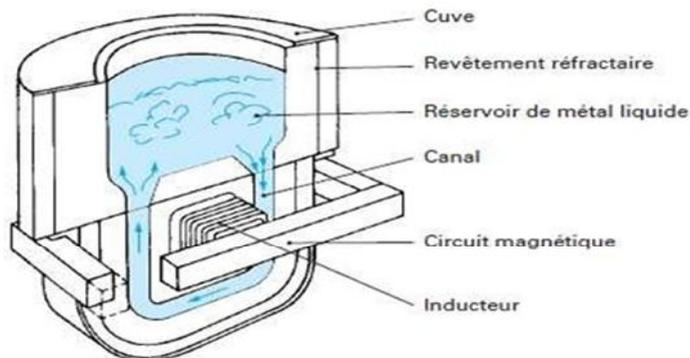


Figure I.15 : Une coupe longitudinale d'un four à canal.

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 liquide puis mettre les inducteurs sous tension.

Intérêt :

Les fours à canal permettent la production d'un métal de haute qualité, et l'élaboration d'alliages de bonne homogénéité, grâce à la température uniforme dans le four et au léger brassage.

Les fours de type canal ont un rendement électrique beaucoup plus élevé que les fours sans noyau, mais quand il s'agit de fusion de fer et d'acier (Haute densité de puissance nécessaire) et le fréquent changement d'alliage, ou le besoin de vider le four régulièrement, le four sans noyau est le choix préféré [7], [9].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude bibliographique globale sur les systèmes de chauffage par induction et leur état de l'art, en illustrant les différentes technologies et les principales applications qui utilisent cette technique de chauffage. On a constaté que le chauffage par induction est basé sur le principe d'induction magnétique. Le chauffage par induction est lié à la fois à la géométrie de la pièce à chauffer et ces caractéristiques physiques et magnétiques (résistivité, perméabilité) ainsi que les propriétés thermiques. Le choix de fréquence de fonctionnement de générateur a un grand rôle dans ce mode de chauffage.

Ces dernières années des recherches approfondies qui ont été menées, qui ont aboutis à une amélioration des systèmes de chauffage par induction et permis l'élargissement de son usage à de nombreuses applications (industrielles, domestiques et médicales). L'avenir des systèmes de chauffage par induction est fortement lié aux nouvelles technologies et la recherche dans l'électronique de puissance (convertisseurs statiques de puissance).

Chapitre II

Modélisation numérique et formulation des phénomènes magnétiques et thermiques

II.1. Introduction

L'objectif de la modélisation numérique est de simuler le comportement des systèmes physiques avec un outil informatique.

Les méthodes numériques nous permettent de ramener la résolution d'une équation aux dérivées partielles avec des conditions limites à un système d'équations algébriques. Avec la méthode suivante:

- La discrétisation du système physique à étudier et son modèle.
- La conversion du problème étudié à un modèle mathématique.
- L'utilisation d'un logiciel qui simule le comportement du système physique (modèle informatique).
- La construction d'un modèle algébrique qui peut être résolu sur ordinateur en utilisant les méthodes de discrétisation tel que la méthode des volumes finis, la méthode des différences finis ou la méthode des éléments finis.

Dans ce chapitre nous allons expliquer les différentes méthodes de résolutions et l'outil informatique avec lequel on va procéder à la résolution du notre modèle à étudier (pdetool).

II.2. Méthodes des différences finis

Cette méthode est basé sur la transformation de l'opérateur différentiel à un opérateur au différence, où chaque dérivée est approcher par une différence de valeurs de l'inconnu déterminée en un certain nombre de points du domaine de résolution.

Soit le réseau carré suivant:

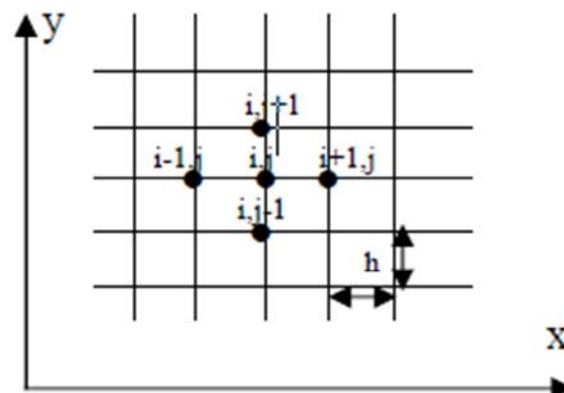


Figure II.1 : Maillage type différence finie.

La méthode des différences finis a été rendue très populaire par l'événement de l'ordinateur et consiste à discrétiser le problème posé et à le résoudre au calculateur numérique. La discrétisation d'une fonction $U(x,y)$ défini en tous points (x,y) du domaine (Ω) , avec les conditions aux limites données sur le contour r délimitant ce domaine, cette méthode consiste à:

- Remplacer le domaine Ω des variables (x,y) par un ensemble fini S de N éléments.
- Remplacer une fonction $U(x,y)$ par une fonction $U(P)$ définie sur S , l'équation aux dérivées partielles déterminant $U(x,y)$ donc remplacer par un système fini d'équations simultanées déterminant $U(P)$ [11].

II.2.1. Méthode d'intégrale de frontières

La méthode d'intégrale de frontières permet la représentation du domaine tout en limitant la discrétisation à la frontière, elle est souvent utilisée dans l'étude des structures de grandes dimensions, et elle s'adapte aux problèmes à frontières ouvertes. En revanche elle a comme inconvénients la difficulté de prendre en considération la structure, et elle nécessite un espace mémoire considérable et un temps de calcul long, car le système algébrique issue de cette méthode est à matrice pleine. Cette méthode est mise en œuvre par la méthode directe qui est basé sur la lois de Biot et Savart, ou bien sur la méthode d'identité du Green.[12], [13].

II.2.2. Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles et de leurs conditions aux limites. Cette méthode a été utilisé initialement pour la résolution des problèmes dans le domaine de la mécanique de la rupture et calcul de structures.

La méthode a été utilisée dans le domaine du calcul du champ électromagnétique pour la première fois vers 1970 par: P.PSILVESTER ET M.V.K CHARI. Dans la plupart des cas, elle s'intègre a des logiciels C.A.O cette partie constitue un avantage de taille pour les concepteurs des systèmes physiques. Son principe consiste à remplacer le problème continue par un problème discret équivalent on utilisant une approximation simple de l'inconnue sur des sous domaines pour transformer les systèmes d'équations aux dérivées partielles ou un système d'équation algébrique dont la résolution fournit une solution approchée du problème. La MEF ne s'applique pas directement aux EDP, mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre [14].

II.3. Principes de la méthode

La résolution d'un problème par la méthode des éléments finis suit le procédé suivant:

- Traduire le problème physique sous forme d'un problème mathématique (EDP) avec des conditions aux limites aux bords du domaine d'études (Ω), nécessaires et suffisante pour l'unicité de la solution.
- Construire une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ces conditions aux limites.
- Diviser (Ω) en sous domaines (maillage), les sous domaines sont appelé éléments.
- Choisir la famille des champs locaux, c'est à dire à la fois la position des nœuds dans les sous domaines et les polynômes qui définissent le champ locale en fonction des valeurs aux nœuds, la maille complétée par ces informations est alors appelée élément.
- Ramener le problème à un problème discret, c'est la discrétisation.
- On résout le problème discret.
- Construire la solution approchée à partir des valeurs trouvées aux nœuds et en déduire d'autres grandeurs.
- Visualiser et exploiter la solution pour juger sa qualité numérique et de la satisfaction des critères de cahier des charges.

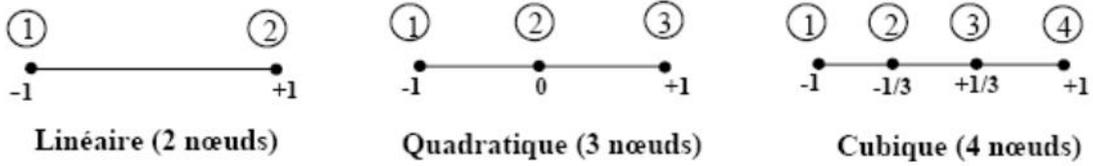
II.3.1. Discrétisation du domaine d'étude

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en nombre finis de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément des fonctions d'interpolation. La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatif aux valeurs de l'inconnue.

a) Eléments de références :

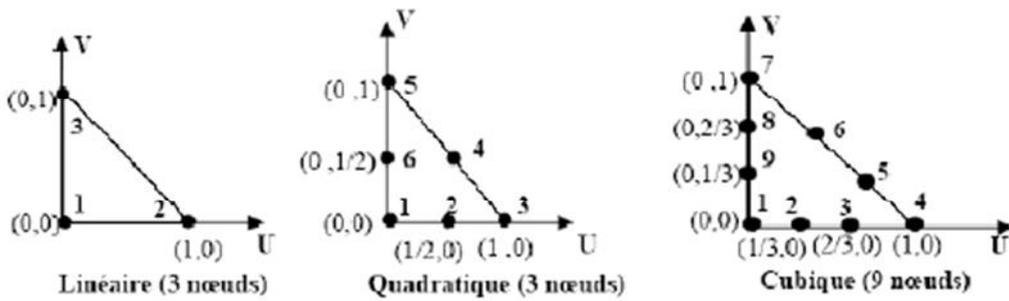
Pour des domaines d'études à une, deux ou trois dimensions, on utilise des éléments de références simples tels que: le triangle, le rectangle, le tétraèdre, parallélépipède, auxquels on associe un système de coordonnées normés. Cela permet de définir une fois, pour chaque types d'éléments les fonctions d'interpolation. Ces dernières, une fois construites, on obtient les fonctions associées au système réel à l'aide des transformations géométriques.

• **Eléments à une seule dimension**

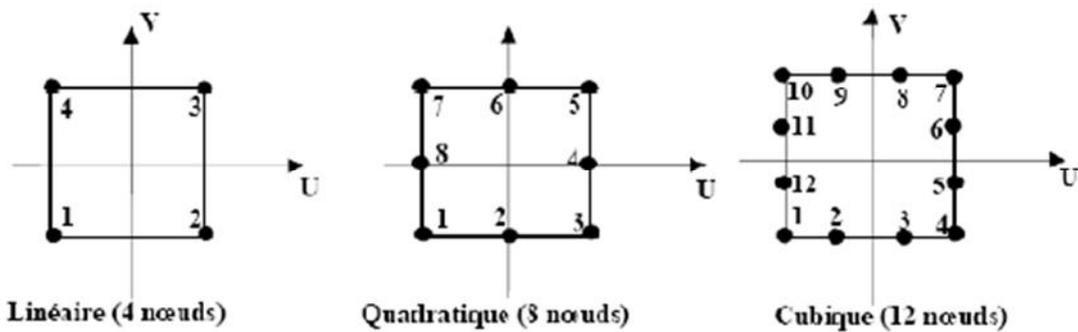


• **Eléments à deux dimensions**

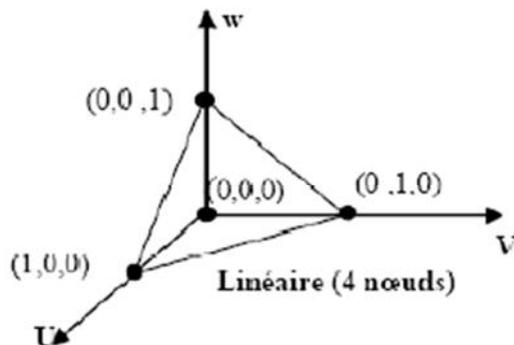
➤ **Eléments triangulaires**



➤ **Eléments carrés**



• **Eléments à trois dimensions**



$$F(u) = \int_{\Omega} L(u) d\Omega \quad (\text{II.4})$$

Sachant que:

$$L(u) = W_c - W_p \quad (\text{II.5})$$

Avec:

Ω : Domaine d'étude.

$L(u)$: Fonction de Lagrange.

W_C : Energie cinétique du système.

W_P : Energie potentielle du système.

II.3.3. Formulation résidus pondérés

La formulation résidus pondérés appelée aussi la méthode projective est la plus utilisée car elle ne nécessite pas la connaissance préalable d'une expression énergétique du système.

Le principe de cette méthode est basé sur le théorème d'Hilbert qui stipule que seul le vecteur nul est orthogonal à tous les vecteurs de l'espace [13]. Cette méthode consiste à rechercher des fonctions projectives Ψ_i de façon à minimiser l'intégrale du résidu dont l'équation est la suivante :

$$R(A)\Psi_i d\Omega = 0 \quad (\text{II.6})$$

Sachant que :

$$R(A) = L(A) - F \quad (\text{II.7})$$

Avec :

A : L'inconnu du problème.

$L(A)$: Opérateur différentiel.

Ψ_i : Fonction de projection ou de pondération.

F : Fonction définit sur le domaine Ω .

R : Représente le résidu de l'approximation.

Les valeurs de A permettent d'annuler l'intégrale et donc représentent la solution du système algébrique obtenu.

La méthode des résidus pondérés fournis, selon le choix des fonctions de pondération, tout un ensemble de formulations intégrales :

- Formulation de type collocation par points ou par sous-domaines, cette formulation utilise les fonctions de Dirac comme fonction de pondération, projective.
- Formulation de types moindres carrés, cette méthode de moindre carre utilise la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites.
- La méthode de Galerkin, ou de Ritz si l'on utilise la notion fonctionnelle, celle-ci est la plus utilisée. La méthode de Galerkin permet d'approcher la solution de problèmes modèle dont la formulation abstraite est la suivante:

$$\begin{cases} \text{Chercher } u \in V \text{ tel que} \\ a(u, w) = f(w), \quad w \in W \end{cases}$$

- où V et W sont des espaces fonctionnels (des espaces vectoriels dont les éléments sont des fonctions) ;
- a est une forme bilinéaire définie sur $V * W$ et f est une forme linéaire définie sur W ;
- On dit que V est l'espace solution et que W est l'espace test. Les éléments de W sont appelés des fonctions tests. (éléments finis PDF dans le dossier thermique).

Pour la méthode des résidus pondérés, le choix des fonctions ψ_i induit une erreur de méthode mais elle présente un avantage par rapport à la formulation variationnelle car elle peut s'appliquer a toutes les équations indépendamment de la connaissance et de l'existence de l'expression énergétique du système.

II.3.4. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

a- Les avantages

- Adaptation aux géométries complexes ;
- Prise en compte des non linéarités ;
- Temps de calcul relativement avantageux.

b- Les inconvénients

- La non-prise en considération des domaines infinis.
- Impuissante en présence de singularités dans le domaine d'étude dont certains points présentent des dérivées infinies.

Et pour résoudre ce problème, on utilise les méthodes mixtes.

II.4. Les méthodes mixtes

II.4.1. Eléments finis / éléments frontières

Cette formulation regroupe une formulation variationnelle sur les domaines fermés, représentant les matériaux métalliques, alliée à une formulation intégrale du champ électromagnétique dans l'air. La méthode des éléments de frontière permet de coupler les inducteurs et la pièce étudiée par le calcul des valeurs imposées du potentiel magnétique sur le contour des inducteurs et pièces. La répartition des champs électromagnétiques à l'intérieur d'un domaine est ensuite calculée par une formulation variationnelle. Ce couplage dépend :

- des conditions de continuité aux interfaces qui doivent être respectées par le champ interne issu d'un calcul éléments finis et par le champ externe issu de la méthode des équations intégrales de frontière ;
- de l'ordre de discrétisation de chaque méthode.

Cette méthode mixte possède l'avantage :

- de bien prendre en compte le domaine ouvert ;
- de réduire considérablement le nombre d'éléments du maillage (étant donné que l'air n'est pas maillé et donc le nombre d'inconnues) ;
- de permettre le déplacement de l'inducteur sans remaillage ;
- de bien prendre en compte les effets non linéaires des pièces magnétiques.

L'inconvénient majeur provient du fait que la matrice du système est pleine ce qui entraîne des besoins en mémoire importants et la résolution du système linéaire peut être coûteuse en temps.[16]

II.4.2. Eléments finis / Equations intégrales

La méthode des éléments finis est employée dans les milieux conducteurs et nécessite la connaissance du potentiel magnétique sur les contours des pièces et inducteurs. La loi de Biot et Savart peut être utilisée à cette fin.

Néanmoins, étant donné que la répartition de densité de courant dans les conducteurs dépend du champ électromagnétique environnant et donc de ses valeurs sur les contours, une résolution itérative est nécessaire pour réactualiser les conditions aux limites sur les contours après qu'une nouvelle répartition de densité de courant ait été obtenue. Cette méthode est peu performante en termes de rapidité de calcul car elle nécessite de nombreuses itérations pour converger.

II.5. Formulations éléments finis des modèles d'équations électromagnétiques et thermiques

II.5.1. Les étapes de déroulement de la méthode des éléments finis

II.5.1.1. L'équation aux dérivées partielles

En utilisant les équations de Maxwell, les relations du milieu et la loi d'Ohm on arrive à décrire le comportement d'un phénomène électromagnétique par une équation aux dérivées partielles dans l'espace et/ou dans le temps, et d'après le principe de la conservation de l'énergie interne d'un système on arrive à établir l'équation aux dérivées partielles qui régit la répartition de la température et du potentiel vecteur, on associe à ces équations les conditions aux limites conformément à la nature du problème, elles sont de type Dirichlet, Neumann ou mixtes (Dirichlet-Neumann).[17]

- a- Condition de Dirichlet:** Cette condition nous renseigne sur la valeur exacte de l'inconnu sur la frontière extérieure du domaine de résolution.

$$U = g$$

avec :

g : Constante

U : L'inconnu du problème.

- b- Condition de Newman:** Cette condition nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnu sur la limite du domaine étudié et elle s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial U}{\partial n} = g$$

- c- **Condition mixte Dirichlet-Newman**: appelée aussi condition de Cauchy ou Robin, elle s'exprime comme suit :

$$aU + b \frac{\partial U}{\partial n} = g$$

Avec :

g : Valeur de l'inconnu sur la frontière.

a, b : Coefficients.

U : Inconnu du problème.

- Il existe trois types d'équations aux dérivées partielles sont :
 - Equations elliptiques : elles traduisent le comportement stationnaire des phénomènes physiques ;
 - Equations paraboliques : elles traduisent le comportement en régime transitoire ;
 - Equations hyperboliques : elles traduisent le phénomène de propagation d'ondes.

II.5.1.2. Equation aux dérivées partielles a une intégrale

La formulation intégrale de l'équation aux dérivées partielles utilise une de ces méthodes :

- Méthode des résidus pondérés ;
- Méthode de formulation variationnelle.

II.5.1.3. Discrétisation du domaine

La méthode des éléments finis est basée sur une discrétisation du domaine en un nombre finis de petits sous domaines appelés éléments, dont on aura i au préalable choisis la géométrie selon les dimensions du domaine d'étude, en s'appuyant sur les éléments de références, auxquelles on associe un système de coordonnées normées. Les points caractéristiques de ces éléments sont appelés nœuds. [16][18].

II.5.1.4. Ecriture matricielle

La formulation intégrale suivie de la discrétisation du domaine, nous permet de faire la somme des valeurs obtenues ; la formulation intégrale de l'E.D.P sur chaque élément du domaine, et la discrétisation du domaine suivit d'une approximation de l'inconnu sur chaque

Chapitre II : Modélisation numérique et formulation des phénomènes magnétiques et thermiques

élément de celui -ci nous donnent un ensemble de valeurs ; on peut dire alors qu'on est passé d'un intégrale a une somme numérique qui ne peut être qu'une écriture matricielle.

II.5.1.5. Résolution du système matriciel

Nous avons un système matriciel de la forme suivante :

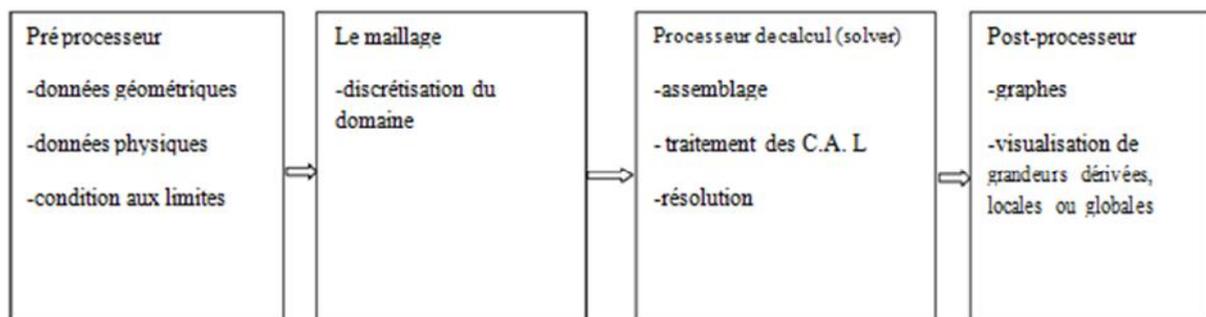
$$[M] [A] = [K]$$

La résolution d'un tel système se fait par des méthodes directes ou itératives, selon la nature de la relation entre la matrice $[M]$ et le vecteur inconnu $[A]$.

II.5.1.6. Utilisation du vecteur solution $[A]$

La solution du système matriciel, nous fournis des valeurs aux nœuds par le vecteur solution $[A]$, la fonction d'interpolation nous permet d'avoir la solution de chaque élément du domaine, il est donc possible de calculer les grandeurs physiques de système étudié.

II.5.2. Implémentation informatique de la méthode des éléments finis



II.5.3. Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique en terme de potentiel vecteur A en coordonnées cartésiennes 2D

- **Cas linéaire**

On considère que les propriétés électromagnétiques, la perméabilité magnétique μ et la conductivité électrique σ indépendantes du champ magnétique, de l'induction magnétique et de la température [4],[19].

➤ Régime transitoire

L'équation magnétodynamique en terme de A au régime transitoire est :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) - \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\mu \vec{J}_s \quad (\text{II.8})$$

En coordonnées cartésiennes:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial A}{\partial y} \right] - \sigma \mu \frac{\partial A}{\partial t} = -\mu J_s \quad (\text{II.9})$$

La formulation intégrale de l'équation (III.6) par la méthode des résidus pondérés, donnée par :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma \mu \frac{\partial A}{\partial t} \right) \Psi_i dx dy = - \int_{\Omega} \mu J_s \Psi_i dx dy \quad (\text{II.10})$$

En appliquant le théorème de Green, qui nous permet d'écrire :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) \right) \Psi_i dx dy = - \int_{\Omega} \vec{\nabla} A \cdot \vec{\nabla} Q_i dx dy + \frac{\partial A}{\partial n} \int_{\Gamma} \Psi_i d\Gamma \quad (\text{II.11})$$

Avec :

μ : perméabilité magnétique du milieu [H/m].

A : Potentiel vecteur magnétique [T.m].

J_s : Vecteur de densité de courant de source [A/m²].

Pour simplifier la résolution du problème, on suppose que les conditions aux limites de type Dirichlet ou Newman homogène et on aura à la fin un système matriciel à résoudre qui s'écrit comme suit :

$$[M] \cdot [A] + [C] \frac{\partial}{\partial t} [A] = [K]$$

[M] : matrice de rigidité

[A] : inconnu aux nœuds

[C] : matrice qui représente les constantes physiques

[K] : matrice qui représente le terme source

➤ **Régime harmonique**

L'équation magnétodynamique en régime harmonique s'écrit sous la forme :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) - j\omega\sigma\mu\vec{A} = -\mu\vec{J}_s \quad (\text{II.12})$$

La formulation intégrale de l'équation (II.12) par la méthode des résidus pondérés, donnée par :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma\mu A \right) \Psi_i dx dy = - \int_{\Omega} \mu J_s \Psi_i dx dy \quad (\text{II.13})$$

Après transformation et considération des conditions aux limites devient :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right) \Psi_i dx dy - j\omega \int_{\Omega} \sigma\mu \bar{A} dx dy = - \int_{\Omega} \mu J_s \Psi_i dx dy \quad (\text{II.14})$$

Les grandeurs A et J_s sont dans ce cas complexes, Le système algébrique à résoudre est de la forme :

$$[\mathbf{M} + j\omega\mathbf{L}] [\mathbf{A}] = [\mathbf{K}]$$

- **Cas non linéaire**

Dans le cas où la réductivité magnétique \mathfrak{g} dépend de l'induction magnétique B, et la conductivité σ dépend de la température alors l'équation magnétodynamique (II.15) est non linéaire et l'équation à résoudre sera [].

$$\vec{\nabla} \wedge (\mathfrak{g} \vec{\nabla} \wedge \vec{A}) - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{J}_s \quad (\text{II.15})$$

Pour résoudre numériquement cette équation non linéaire, il est nécessaire d'utiliser une discrétisation temporelle par la méthode d'Euler implicite

II.5.4. Formulation éléments finis de l'équation de conduction de chaleur en coordonnées cartésiennes 2D

- **Cas linéaire**

On considère que les propriétés thermiques ; la capacité calorifique ($\rho.C_p$), la conductivité thermique λ et la densité de puissance dissipée par effet joule ; indépendantes de

la température et des coordonnées de plan d'étude [16].

➤ **Régime transitoire**

L'équation thermique au régime transitoire est:

$$\vec{\nabla} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q \quad (\text{II.16})$$

En coordonnées cartésiennes l'équation de conduction est :

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{y^2} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -p \quad (\text{II.17})$$

La formulation intégrale de l'équation (11) par la méthode des résidus pondérés, donnée par :

$$\Psi_1 \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{y^2} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + p \right] dd = 0 \quad (\text{II.18})$$

En utilisant les conditions aux limites de type Dirichlet et Newman homogène on aura :

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial d} \right) \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial d} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial d} \right) \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial d} \right) d + \rho \frac{\partial}{\partial t} \Psi_1 d = \Psi_1 p d \quad (\text{II.19})$$

on aura à la fin un système matriciel a résoudre qui s'écrit comme suit :

$$[M] [T] + [C] \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] = [K]$$

• **Cas non linéaire**

On considère que les propriétés thermiques ; la capacité calorifique ; la conductivité thermique dépendent de la température.

➤ **Régime transitoire**

On suit les mêmes étapes que pour le cas linéaire, on aura à la fin la forme matricielle suivante :

$$[M][T]^{t+1} + [C]\left[\frac{T}{t}\right]^{t+1} = [K] + [C]\left[\frac{T}{t}\right]^t$$

II.5.5. Formulation éléments finis de l'équation du couplage magnétothermique

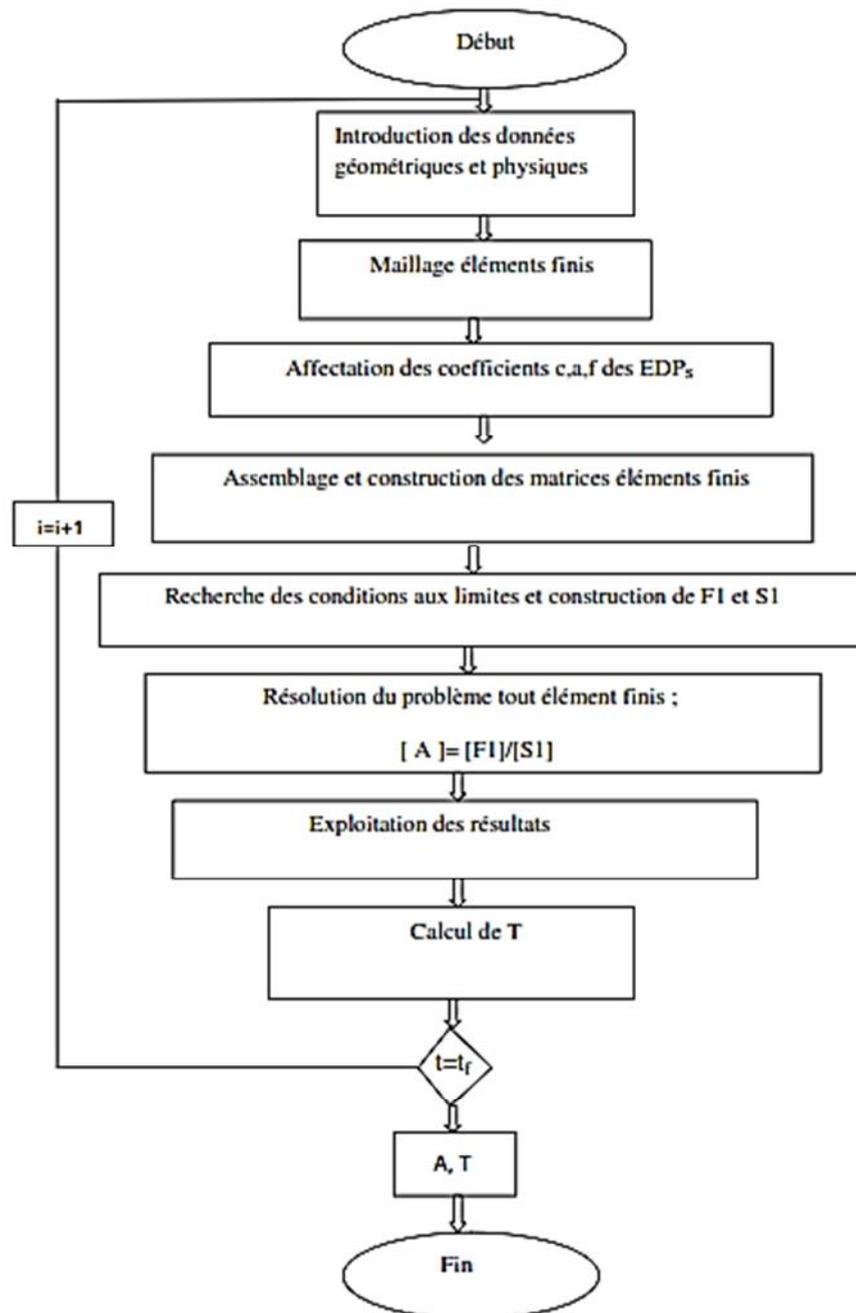
On associe aux équations des conditions aux limites de type Dirichlet ($A=A_0, T=T_0$) et Newman homogène ($\frac{\partial t}{\partial n}$). Les systèmes algébriques relatifs à ces deux phénomènes

Chapitre II : Modélisation numérique et formulation des phénomènes magnétiques et thermiques

conduisent à deux systèmes algébriques couplés à résoudre [19].

$$\begin{cases} [M + j\omega L][A] = [K] \\ [M][T]^{t+1} + [C][\frac{\tau}{\Delta t}]^{t+1} = [K] + [C][\frac{\tau}{t}]^t \end{cases}$$

Le model couplé magnétothermique linéaire est représenté par l'organigramme suivant :



Organigramme de la solution couplée magnétothermique.

II.5.6. Méthode de résolution des systèmes matriciels

La recherche de la solution des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis, nous a conduits après formulation intégrale, vers une écriture matricielle qui est sous la forme suivante :

$$[M] [A] = [K]$$

Si le problème est linéaire ; $[M]$ ne dépend pas de l'inconnu $[A]$, les méthodes de résolution sont de deux type :

- Les méthodes directes : elle consiste en une solution donnée par un nombre fini d'étapes, c'est une méthode très précise mais très coûteuse en temps de calcul (méthodes de Gauss, Cholesky et Jordan).
- Les méthodes itératives : c'est une succession d'amélioration de l'approximation de la solution atteinte après un certain nombre d'itérations. Le nombre d'itérations est imprévu, il est dépendant de la structure de la matrice $[M]$.

La résolution de tel système se fait par ordinateur, en implémentant un programme de résolution, qui déroule l'une de ces méthodes.

- Discrétisation temporelles : dans le régime transitoire on remarque que les systèmes matricielles obtenues possèdent un vecteur dont sa composante varie par rapport au temps, la discrétisation de ce terme est de type différence finis implicite. Par exemple dans le cas du système matriciel obtenu suite à la formulation éléments finis de l'équation de transfert de chaleur dans le plan cartésien 2D [11].

Le système peut être décrit comme suite :

$$[M] [T] + [C] \left[\frac{\partial}{\partial t} \right] = [K]$$

Dans ce cas l'opérateur différentiel est transformé en un opérateur aux différences finis comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{T}{t} = \frac{T^{t+1} - T^t}{t}$$

Où ΔT la différence entre les valeurs T^{t+1} à l'instant $t+1$ et T^t à l'instant t par rapport à un pas de temps Δt , et la valeur de la température T^t sera utilisée pour calculer la valeur de

la température T^{t+1} , la résolution à chaque pas de temps nécessite un calcul itératif et on aura le système suivant:

$$[\mathbf{M}]+[\mathbf{C}] [\mathbf{T}]_{t+1} = [\mathbf{C}][\mathbf{T}]_t +[\mathbf{S}]$$

On pose:

$$[[\mathbf{M}]+[\mathbf{C}]] =[\mathbf{E}] ; [\mathbf{C}][\mathbf{T}]_t +[\mathbf{S}] =[\mathbf{H}]$$

On aura:

$$[\mathbf{E}] [\mathbf{T}]_{t+1} = [\mathbf{H}]$$

On peut dire que la méthode des éléments finis est la mieux adapter a la résolution de ce genre de matrices.

II.6. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons présenter le modèle numérique du phénomène couplé magnétothermique traduisant le comportement de soudage par induction, nous avons d'abord commencé par de généralités sur les différentes méthodes numérique usuelle et avec une présentation plus détaillé de la méthode des éléments finis que nous avons utilisés pour la modélisation numérique du phénomène qui sera exploité dans le dernier chapitre on utilisant le logiciel pdetool.

CHAPITRE III

Présentation du logiciel PDETOOL.

III.1. Introduction

La modélisation est une étape importante dans toute simulation numérique. En particulier elle permet de définir et d'étudier les caractéristiques géométriques et physiques du problème étudié, de proposer un modèle simplifier qui soit plus proche de la réalité.

Dans ce chapitre on se propose de présenter le logiciel pdetool et les différentes étapes de la simulation.

III.2. Présentation de logiciel pdetool

Le pdetool sous MATLAB est un logiciel permettant le traitement des équations aux de dérivées partielles en deux dimensions (2D) en utilisant la méthode des éléments finis.

Nous présentons quelques éléments simples permettant l'utilisation efficace de cette interface graphique.

pdetool contient plusieurs modes différents :

1. En draw mode (mode dessin) : Nous pouvons dessiner des objets solides. Ils existent quatre formes : Cercle, Polygone, Rectangle, Ellipse.

A chaque objet est attribué automatiquement un nom unique qui s'affiche dans l'interface graphique sur l'objet lui-même.

2. En boundary mode (mode frontière) : Dans ce mode, l'origine des formes de la construction des objets solides constitue les frontières entre les sous domaines du modèle. Ces frontières ne peuvent pas être éliminées dans ce mode. Les limites extérieures sont codées par couleur pour indiquer le type de conditions aux limites. Le rouge correspond à la limite extérieure de Dirichlet, le bleu généralise les conditions de Newman et le vert aux limites mixtes.

3. En PDE mode : Nous pouvons spécifier le type de problème EDP et les coefficients a , c , f , et d . Nous pouvons également spécifier les coefficients pour chaque sous domaine de façon indépendante.

4. En solve mode (mode de résolution) : Nous pouvons spécifier les paramètres de résolution et résoudre les problèmes EDP. Pour les EDP hyperboliques et paraboliques, nous pouvons également spécifier les conditions initiales et le moment où la production doit être générée.

5. **En mesh mode (mode maillage) :** Nous pouvons contrôler la génération de maillage automatiquement et tracer le maillage.
6. **En plot mode :** Nous pouvons choisir une grande variété de méthodes telles que la résolution de la surface, maillage, contour des parcelles.

III.3 Les étapes de la simulation sous pdetool

Pour pouvoir réaliser l'étude d'un modèle sous pdetool on procède comme suit :

Après avoir ouvert l'environnement MATLAB on tape le mot «pdetool» dans matlab commande, une interface graphique s'affiche sur laquelle on trouve toutes les fonctionnalités disponibles et les différents onglets correspondant aux modes cités précédemment. (Figure III.1).

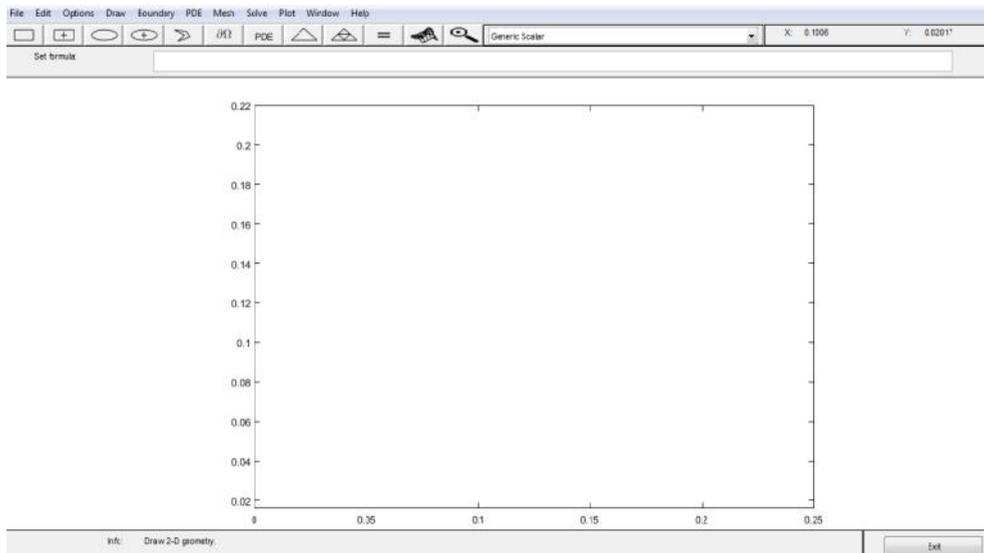


Figure III.1 : Interface d'accueil pdetool.

III.3.1 Dimensionnement de l'espace de travail

Pour définir la dimension de notre espace de travail nous allons dans «options» puis «axes limits», et on va introduire les valeurs sur les axes (X) et (Y). (Figure III.2).

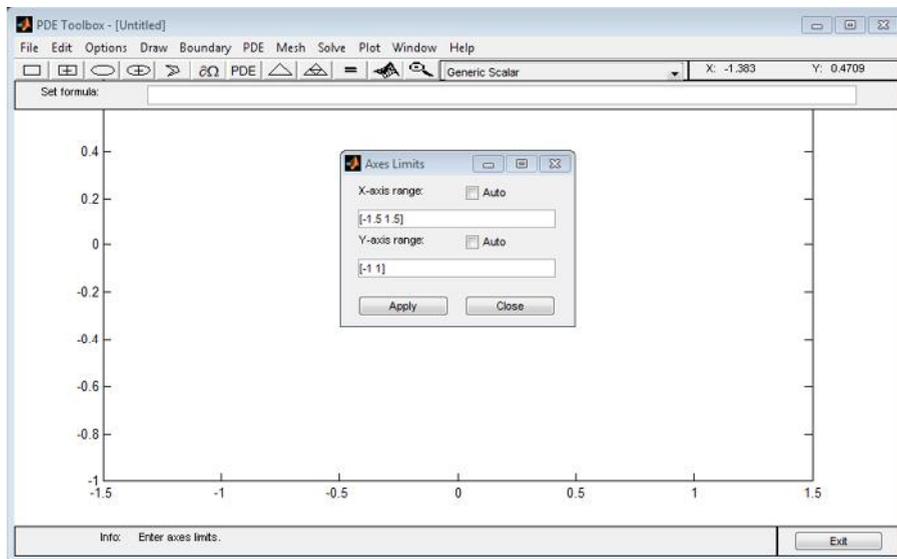


Figure III.2 : Les valeurs d'axes.

III.3.2 Dessin du domaine

Par la suite on détermine un domaine dans lequel nous générons notre modèle à simulé. Dans l'onglet «Boundary conditions». (Figure II.3). Puis «specify Boundary conditions», on va choisir les conditions aux limites de type Dirichlet ou bien Newman. (Figure III.3).

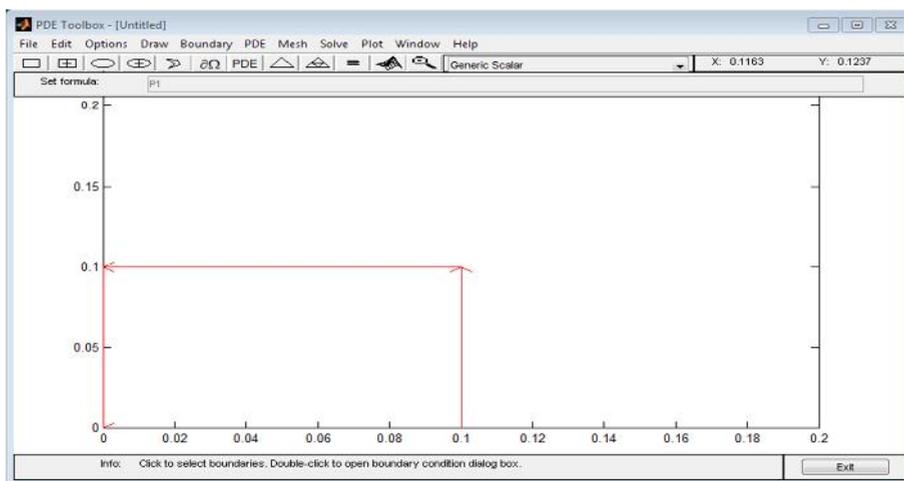


Figure III.3: Exemple d'affichage (Boundary mode).

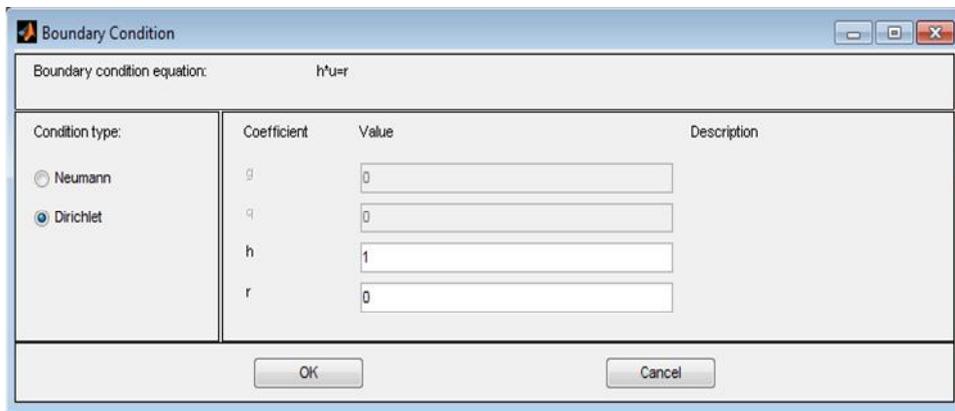


Figure III.4 : Boite de dialogue (Specify Boundary conditions).

III.3.3 Dessin de la structure :

Ensuite, pour réaliser la structure de notre modèle nous allons dans l'onglet «draw» puis «draw mode» de là nous traçons les blocs qui formeront notre modèle. On prend l'exemple de deux rectangles.

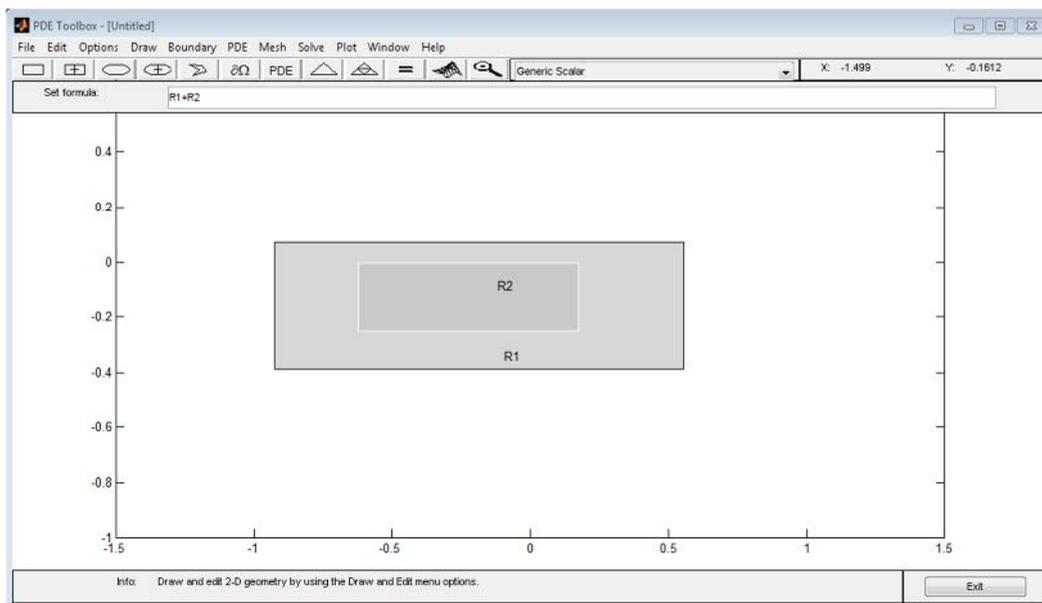


Figure III.5 : Exemple d'une structure.

III.3.4 Spécification des dimensions :

Nous déterminons les dimensions et la position d'un bloc en cliquant dessus. La boîte de dialogue (figure III.6) nous demande d'introduire les quatre valeurs suivantes; «left», «bottom», «width» et «high» qui représentent respectivement, la limite à gauche, la limite inférieure, la largeur et hauteur de chaque bloc.

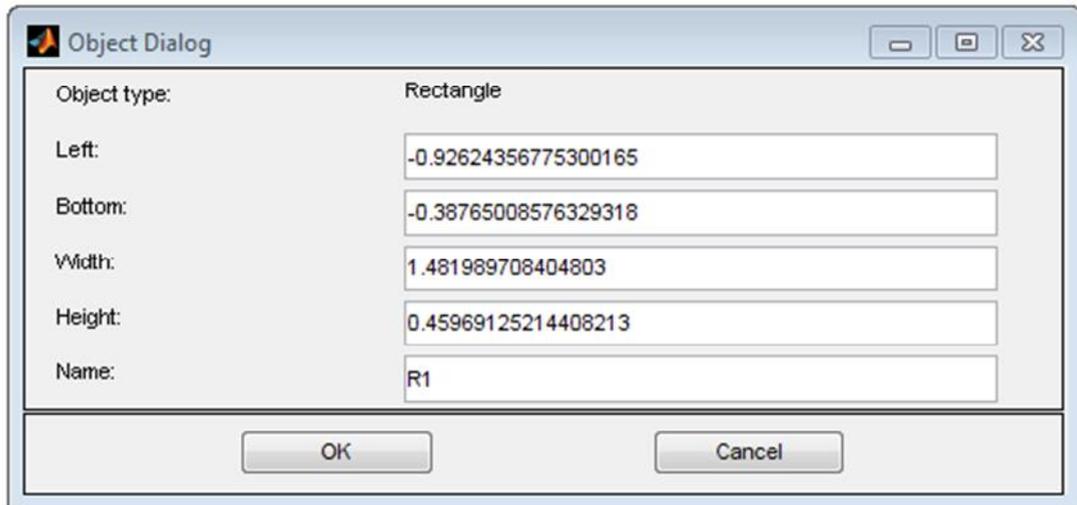


Figure III.6 : Boîte de dialogue pour les dimensions et de la position d'un bloc.

III.3.5. Génération du maillage

Le maillage consiste à subdiviser notre domaine en petites parcelles, et pour la génération automatique de notre maillage en clique sur l'onglet «mesh» puis, «initialize mesh».

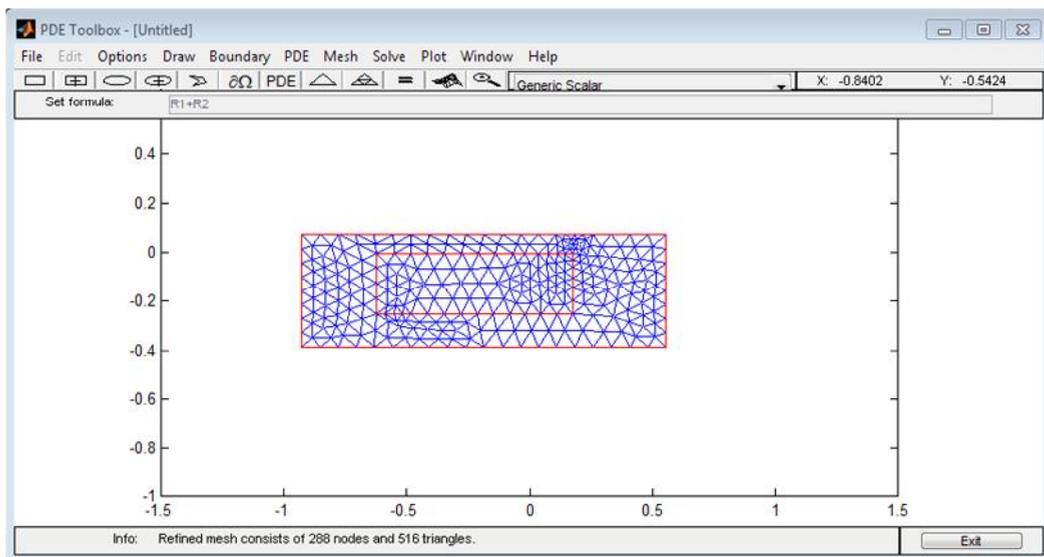


Figure III.7: Génération d'un maillage.

III.3.6 Spécification des paramètres des équations

L'étape suivante est de la spécification des paramètres des équations PDE, pour cela, on choisit dans le menu «PDE» la fonction «PDE Specification...» une boîte de dialogue s'affiche nous permettre :

- Choisir le type d'équation compatible a notre model étudié (Eleptic, parabolic, Hyperbolic ou bien Eingenmodes).
- Introduire les valeurs des coefficients identifiés ; **c**, **a**, **f** et **d**.

Remarque : Cette manipulation sera effectuer pour chaque bloc de la géométrie.

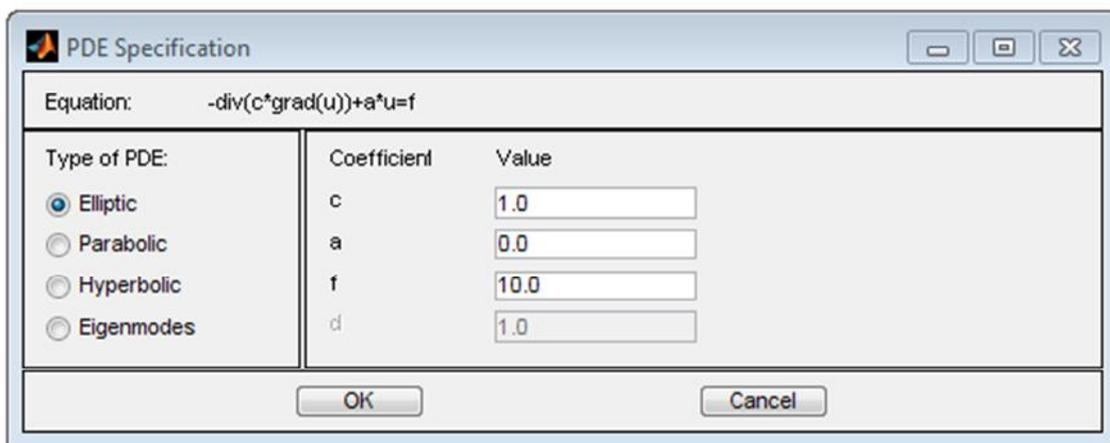


Figure III.8 : Boite de dialogue PDE Specification.

III.3.7. La résolution de PDE

Pour la résolution de l'équation aux dérivées partielles de notre model il faut aller dans l'onglet «Solve PDE», on peut donc lire chaque solution correspondante aux cordonnées (x, y) du domaine.

On peut choisir la méthode de la résolution en cliquant sur «plot » puis «paramètres...» et choisir, une boîte de dialogue s'affichera «Figure III.8». Le maillage peut être caché dans tous les types de parcelles. Pour les équations hyperboliques on peut animer la solution qui change avec le temps. Cette solution peut s'afficher en 2D, en 3D.

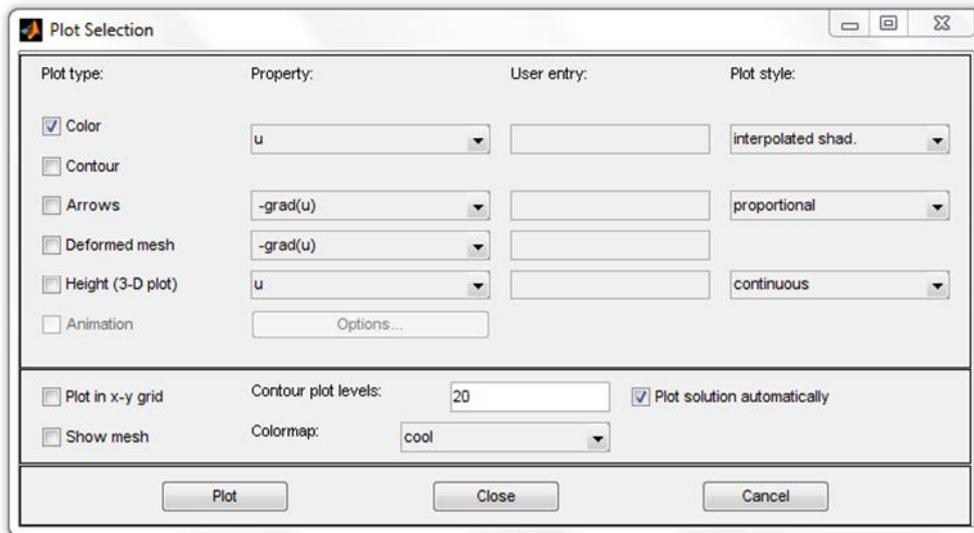


Figure III.9: Boite de dialogue plot sélection.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le logiciel pde-tool et nous avons expliqué la démarche à suivre pour la simulation d'un modèle donné. Le prochain chapitre sera consacré pour l'application et la validation des résultats.

Chapitre IV

Application et résultats

IV.1. Introduction

Le présent chapitre sera consacré à l'introduction de la géométrie et la résolution des équations aux dérivées partielles du modèle, par la méthode des éléments finis mis en œuvre sous le logiciel pdeTool dans le but de calculer la température de soudage des couronnes des cages d'écureuil du moteur asynchrone.

La modélisation de ce modèle nécessite la résolution des équations magnétiques et thermique, avec des conditions de type Dirichlet imposé sur le vecteur magnétique \vec{A} ($A=0$), et de type Newman pour la température T ($T=20$).

IV.2. Description de la géométrie à étudié:

Notre dispositif se compose d'un:

- Inducteur ;
- Induit (couronne de cage d'écureuil).

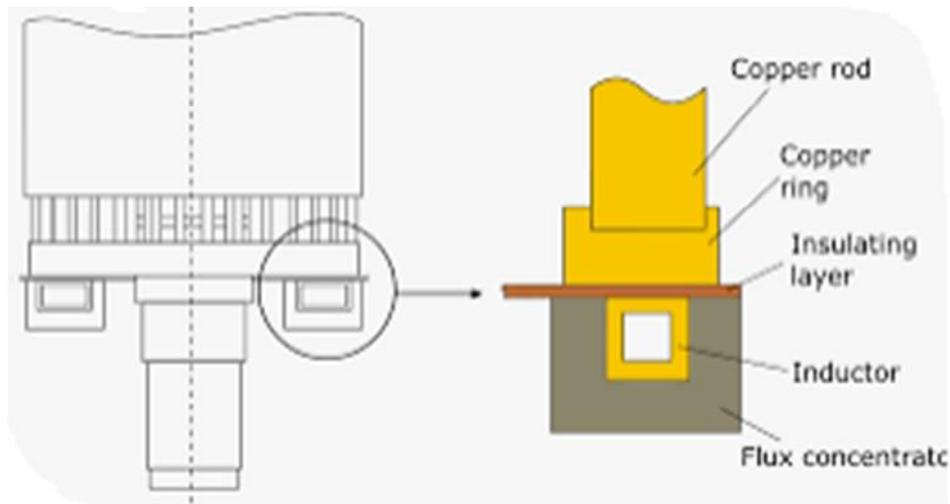


Figure IV.1: Représentation du modèle (inducteur-couronne).

IV.3. Les caractéristiques électromagnétique et thermique

- **Inducteur**

L'inducteur est en cuivre caractérisé par les équations magnétiques et thermique suivante:

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = \mu \vec{J} \quad (\text{IV.1})$$

$$\vec{\nabla} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) = 0 \quad (\text{IV.2})$$

- $\mu_0=4.\pi.10^{-7}$ [H/m].
- Perméabilité magnétique du cuivre: $\mu_r=1$
- Conductivité thermique du cuivre: $\lambda = 389$ [w/m°C]
- Densité de masse volumique du cuivre: $\rho=8900$ [Kg/m³]
- Chaleur spécifique du cuivre: $C_p=385$ [J/Kg°C]
- Densité de courant d'excitation: $J=2..35*10^{+6}$ [A/m²]
- **Induit**

$$\vec{\nabla} \wedge (\partial \vec{\nabla} \wedge \vec{A}) + j \sigma \omega \vec{A} = 0 \tag{IV.3}$$

$$\vec{\nabla} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q \tag{IV.4}$$

- Perméabilité magnétique du cuivre: $\mu_r=1$
- Conductivité électrique du cuivre: $\sigma = 5.9*10^{+7}$ [.m]⁻¹
- Chaleur spécifique du cuivre: $C_p=385$ [J/Kg°C]
- Densité de masse volumique du cuivre: $\rho=8900$ [Kg/m³]
- Conductivité thermique du cuivre: $\lambda=398$ [w/m°]
- **L'air:**

$$\vec{\nabla} \wedge (\partial \vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = 0 \tag{IV.5}$$

$$\vec{\nabla} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) = 0 \tag{IV.6}$$

- Perméabilité magnétique: $\mu_r=1$
- Conductivité thermique: $\lambda = 0.023$ [w/m°C]
- Densité de masse volumique: $\rho = 1.28$ [Kg/m³]
- Chaleur spécifique: $C_p = 1000$ [J/Kg°C]

IV.4. Introduction de la géométrie

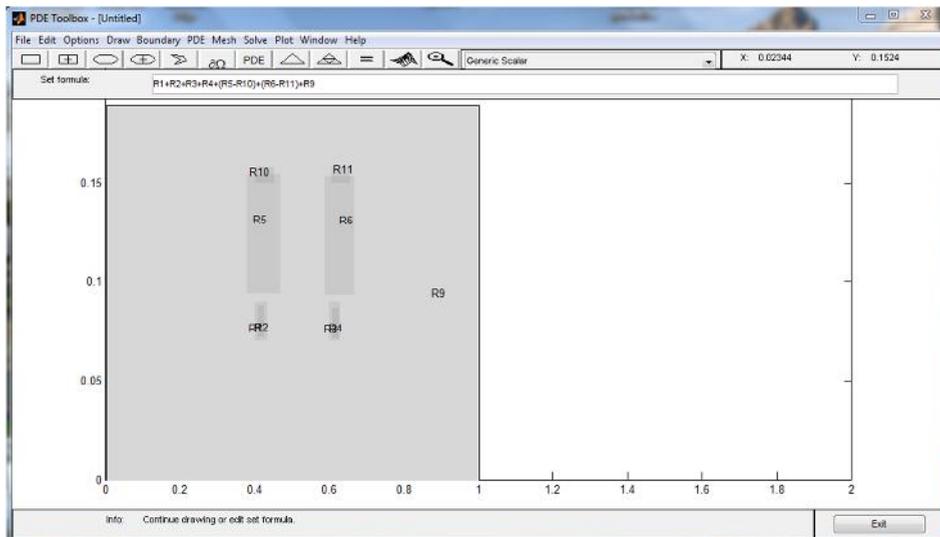


Figure IV.2: Modèle d'étude.

	Left	Width	Height	Bottom
R1	0.400	0.435	0.090	0.070
R2	0.409	0.426	0.0879	0.071
R3	0.599	0.630	0.090	0.070
R4	0.609	0.627	0.0869	0.0709
R5	0.38	0.469	0.154	0.094
R6	0.589	0.669	0.153	0.0934
R7	0.380	0.450	0.970	0.920
R8	0.589	0.659	0.970	0.920
R9	0.003	1.003	0.189	0.000
R10	0.403	0.453	0.158	0.149
R11	0.606	0.656	0.158	0.149

Tableau IV.1: Dimension des blocs

- **R1**:Inducteur
- **R2**:Air
- **R3**:Inducteur
- **R4**:Air
- **R5**:Induit (couronne)
- **R6**: Induit (couronne)
- **(R5-R10)**:Air
- **(R6-R11)**:Air
- **R9**: Air

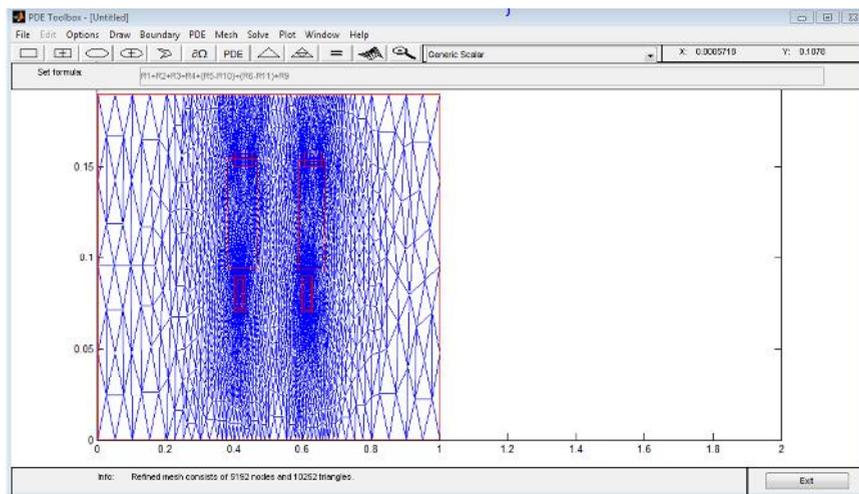


Figure IV.3: Maillage

IV.5. Les résultats obtenus

➤ **Test 1:** L'objectif de ce premier test est de relever la valeur du potentiel vecteur magnétique (A) pour une densité de courant $J=2.35 \cdot 10^6$ [A/m²], pour différentes fréquences (500, 1000, 1500, 2000).

a) La charge est en cuivre d'une conductivité électrique $\sigma=5.9 \cdot 10^7$ [S.m]⁻¹.

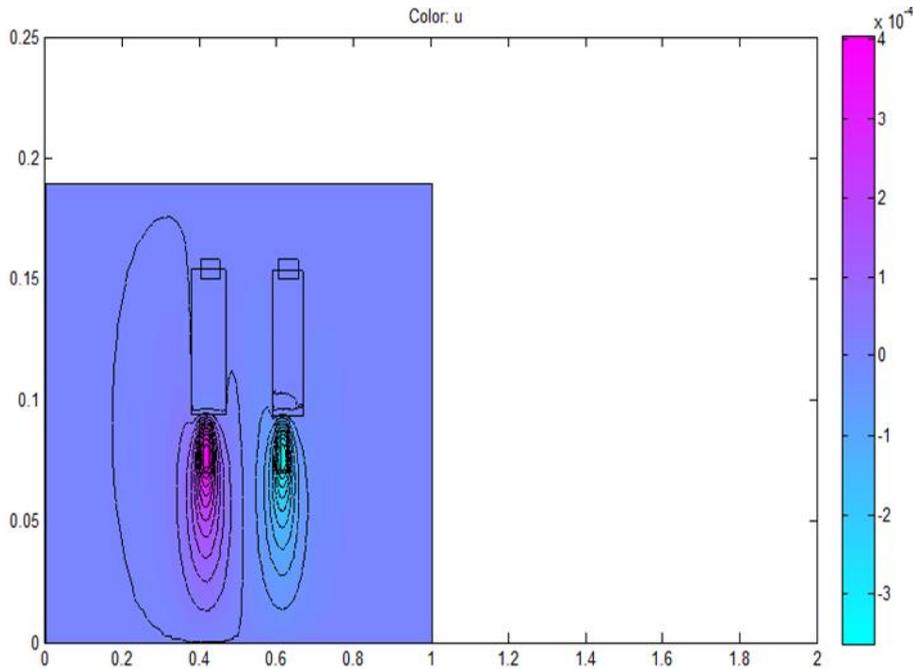


Figure IV.4: Répartition du potentiel vecteur magnétique pour $F=500$ (Hz).

b) La charge est en Aluminium d'une conductivité électrique $\sigma=3.4 \cdot 10^7$:

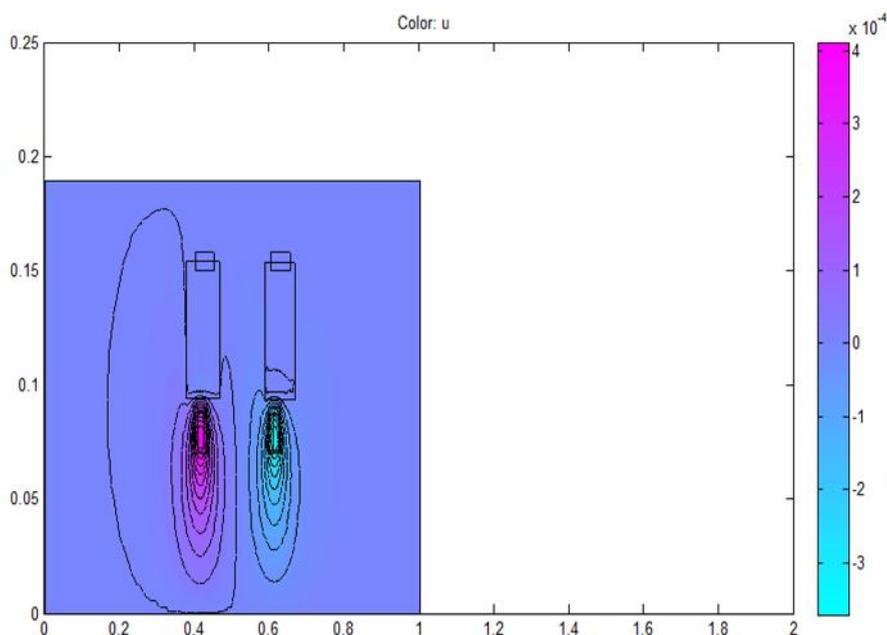


Figure IV.5: Répartition du potentiel vecteur magnétique pour $F=500$ (Hz).

➤ **Test 2: Variation de la température en fonction de temps:**

$f= 1000$ Hz, $t=$ variable

$\text{Sigma} [\text{.m}]^{-1}$	$A(\text{T/m})$	$Q(\text{J})$
$5.9 \cdot 10^7$ (Cuivre)	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$9.39 \cdot 10^7$
$3.4 \cdot 10^7$ (Aluminium)	$9.92 \cdot 10^{-4}$	$5.72 \cdot 10^7$

Tableau IV.2: Valeurs du potentiel vecteur magnétique et de la chaleur pour une fréquence constante.

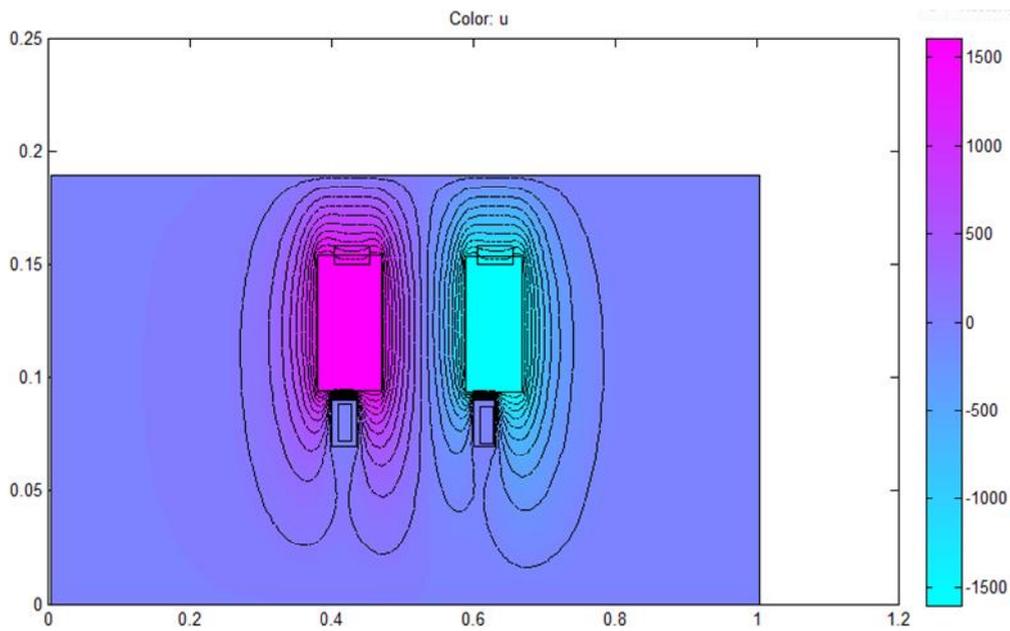


Figure IV.6: Répartition de la température pour le cuivre ($f=1000$ Hz).

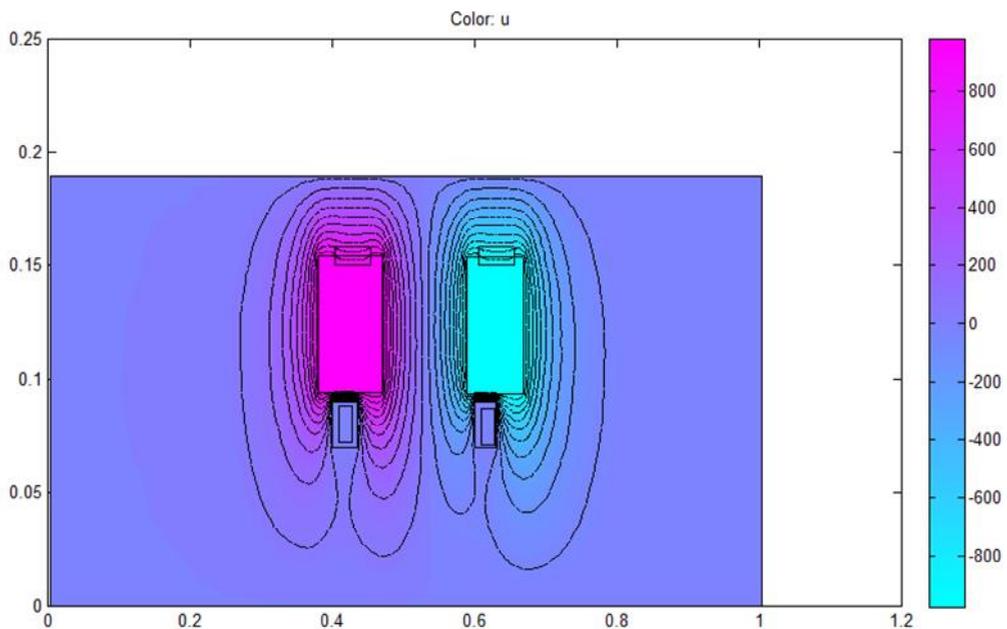


Figure IV.7: Répartition de la température pour l'Aluminium ($f=1000$ Hz).

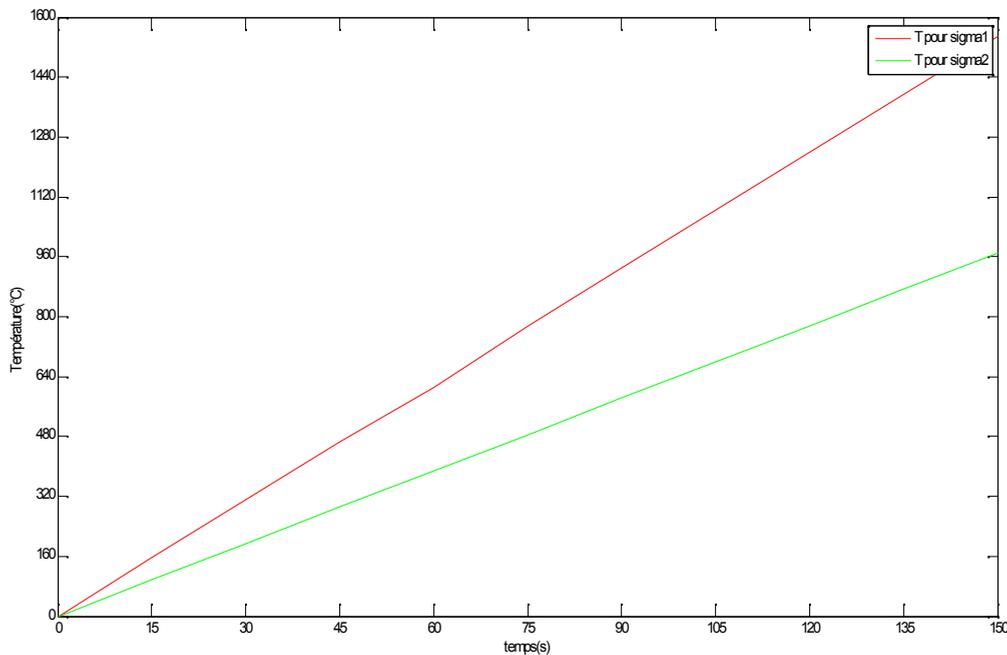


Figure IV.8 : Variation de la température en fonction du temps.

Interprétation :

La figure (IV.7) : représente l'évolution de la température en fonction du temps dans un point de la charge, (cuivre et aluminium) pour une fréquence constante. On remarque qu'on atteint la plage de soudage de l'aluminium avant la plage de soudage du cuivre, ce qui signifie que plus la conductivité électrique diminue la résistivité augmente, donc des courants induits plus importants, ce qui engendre un échauffement plus rapide.

➤ **Test 3: Variation de la température en fonction de la fréquence:**

t = Constant, **A**= Variable, **f**= Variable, **Q**=Variable

Pour **sigma**= $5.9 \cdot 10^7$ [$\Omega \cdot m$]⁻¹ (Cuivre)

f(Hz)	500	1000	1500	2000
A(T/m)	$2.92 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.79 \cdot 10^{-4}$	$2.76 \cdot 10^{-4}$
Q(J)	$5.72 \cdot 10^7$	$9.39 \cdot 10^7$	$2.03 \cdot 10^8$	$3.54 \cdot 10^8$
T(°C)	199.55	316.51	684.27	1193.26

Tableau IV. 3: Valeurs du potentiel vecteur magnétique, de la chaleur et de la température dans le cas de cuivre.

Pour **sigma** = $3.4 \cdot 10^7$ [$\Omega \cdot m$]⁻¹ (ALUMINIUM).

f(Hz)	500	1000	1500	2000
A(T/m)	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$2.92 \cdot 10^{-4}$	$2.86 \cdot 10^{-4}$	$2.81 \cdot 10^{-4}$
Q(J)	$1.93 \cdot 10^7$	$5.72 \cdot 10^7$	$1.23 \cdot 10^8$	$2.11 \cdot 10^8$
T(°C)	65.05	192.8	414.60	711.23

Tableau IV. 4: Valeurs du potentiel vecteur magnétique, de la chaleur et de la température dans le cas d'aluminium.

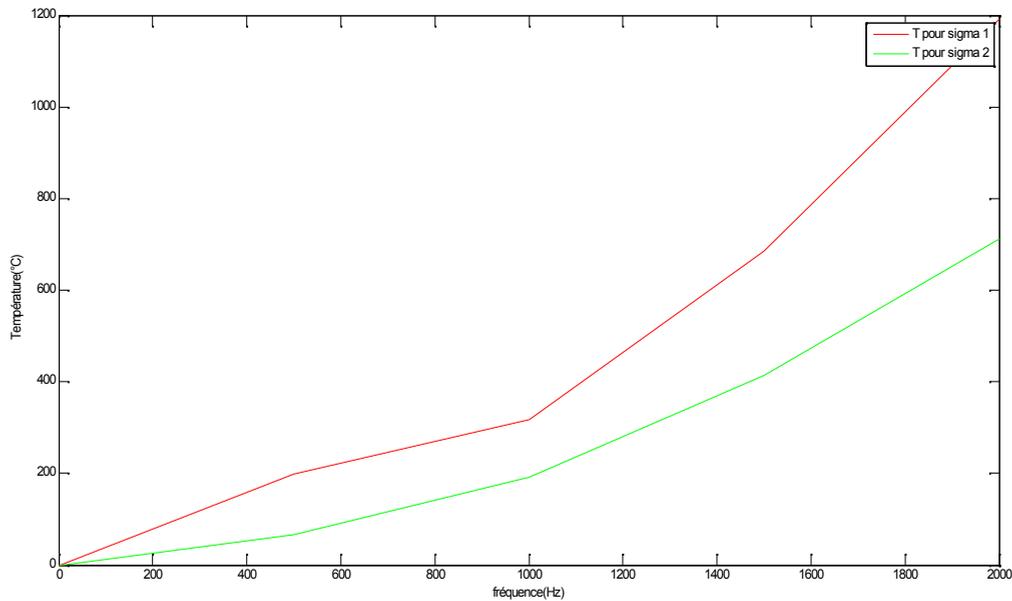


Figure IV.9 : Variation de la température en fonction de la fréquence.

Interprétation

La figure (IV.8): Représente la variation de la température en fonction de la fréquence, on constate que la température de soudage est proportionnelle à la fréquence dans les deux cas (cuivre et aluminium) et que la plage des températures souhaitée est atteintes dans les moyennes fréquences.

IV.6. Conclusion

Dans cette application on a réalisé trois tests pour voir l'impact de la conductivité électrique et la fréquence sur la température de soudage, on conclut que le temps de soudage est atteint en utilisant un matériau dont la conductivité est moins importante car cette dernière est inversement proportionnelle à la résistivité qui est directement liée à l'échauffement provoqué par les courants induits au niveau de la charge (effet joule).

On remarque la température de soudage pour les deux matériaux choisis augmente avec l'augmentation de la fréquence, cette augmentation est due essentiellement à l'effet de peau qui dépend étroitement à la fréquence, ce qui nous amène à dire que le choix de la fréquence dans ce procédé doit être bien choisit.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le but de développer et de valider un modèle performant pour la modélisation des différents procédés de chauffage par induction, que ce soit les traitements superficiel ou bien les traitements thermique, ce procédé complexe par sa nature multi-physique nécessite le couplage entre un modèle électromagnétique et un autre modèle thermique. Malgré le couplage des deux modèles cités, il est possible de les traiter séparément.

Pour mener cette étude, il faut d'abord donner des modèles d'équations qui décrivent le comportement des phénomènes électromagnétiques et thermiques qui régissent le dispositif. Le procédé de chauffage par induction électromagnétique est décrit par l'équation magnétodynamique qui traduit la circulation des courants dans la charge, et le phénomène thermique qui régit par l'équation générale de la conduction qui traduit la chaleur et la répartition de la température dans la charge.

La méthode numérique employer pour la résolution des deux équations différentielles est de type éléments finis, cette dernière nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques et électromagnétique adaptés au procédé. Pour modéliser un espace ouvert par cette méthode, il faudra une discrétisation du domaine et l'imposition des conditions aux limites.

La simulation des comportements magnétiques et thermiques a été effectuée en procédant à une introduction d'une géométrie sous pdeTool sous environnement MATLAB qui est un logiciel de calcul numérique et de simulation, permettant la résolution des équations aux dérivées partielles.

Pour avoir la température de soudage voisine à celle de l'industrie, nous avons joué sur la conductivité électrique et la fréquence pour voir leurs impacts sur la température de soudage.

Plus la fréquence augmente, plus les courants induits se concentrent en surface. Cette notion fondamentale est déterminée par la profondeur de pénétration encore appelé épaisseur de peau. La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence.

Alors que la résistivité et la perméabilité magnétique sont des caractéristiques du corps à chauffer, la fréquence est une grandeur qui peut être choisie par l'opérateur. Celui-ci possède ainsi un moyen de contrôler la dissipation à l'intérieur du corps à chauffer et de choisir le chauffage le mieux adapté (choix des inducteurs).

Conclusion générale

La technique de soudage par induction représente des avantages, principalement c'est que la chaleur est directement générée dans le matériau devant être soudé. Cela permet de réduire fortement les temps de réponse et obtenir de très bons rendements et des possibilités de chauffe localisé.

Références bibliographiques

- [1] G.DEVELEY, «Chauffage par induction électromagnétique», Technique d'ingénieur, D 5935.
- [2] M. ORFEUIL, «Electrothermie industrielle», Dunod, Paris, 1981.
- [3] S. WANSER, « Simulation des phénomènes de chauffage par induction. Application à la trempe superficielle », Thèse doctorat, Edition de l'école doctorale de Lyon des sciences pour l'ingénieur, 1995.
- [4] Z. OUDNI, « Régulation par la température de Curie de chauffage par induction d'une plaque ferromagnétique», Thèse magistère, UMMTO, 2007.
- [5] J .CALLEBAUT, «Guide power quality», section 7 : efficacité énergétique,
www.Leonardo-energy.org/France.Edition,Août,2007
- [6] M. YACINE, « Alimentation des systèmes de chauffage par induction par un convertisseur à résonance», Magistère en Electrotechnique, Université Constantine I, Juin 2014.
- [7] K. MOUSLI, Y. MAMERI, «Etude par simulation d'un onduleur à haute fréquence, application au chauffage par induction», Master en Electrotechnique, option machines électriques, UMMTO, Juin 2015.
- [8] M. BOUDJEMAA, «Distribution des champs électromagnétiques et thermiques dans une billette placée dans un four à induction», Thèse de doctorat et sciences, USTO.
- [9] T. MOUHAMED, «Application des onduleurs multi niveau dans les systèmes de chauffage par induction : Analyse, Modélisation et commande », Magistère en commande électrique, Université Laghouat, Juin, 2012.
- [10] S. ASMA, « Conception et modélisation d'inducteurs pour la fusion par induction», Master en Electrotechnique, Université Constantine I, Juin 2014.
- [11] A. NAIT SAID, «modélisation d'une torche à plasma d'induction», Master en Entraînement électrique, UMMTO, Septembre 2014.
- [12] D. GOURI, G .TAZOUT, E. Le FRANCOIS, «Méthodes des éléments finis», LAVOISIER, Rue Lavoisier, 75008, Pari, 2005.
- [13] PH.ROBERT, «Matériaux de l'électrotechnique», Dunod, 1979.

Références bibliographiques

- [14] T. MERZOUKI, «Modélisation couplée Electrique-Magnétique-Mécanique des machines asynchrones a cage en régime transitoire par la méthode des éléments finis», Thèse d'ingénieur en Electrotechnique, UMMTO, 2009.
- [15] F. DYAR, «The inverse problem methodology for measurement of permeability of the ferromagnetic materiel», IEEE transaction on magnetic, vol 33, N02, March 1997.
- [16] S. KASSI, D. SALAH «Calcul de la température de soudage des couronnes de court-circuit», Master académique en Entraînement électrique, UMMTO, Juillet 2014.
- [17] L. TRGUA, «Modélisation par élément finis des phénomènes couples magnétothermiques en vue de l'étude des dispositifs de chauffage par induction de pièce au défilée et fixe», Thèse d'ingénieure en Electrotechnique, 2005.
- [18] E. ALEXENDRE, «Aide mémoire, Eléments finis», Dunod, Paris, 2005.
- [19] G. MENIE, «Champ et équations en électromagnétiques», Lavoisier, 2003.