

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

BOUKAZZOULA Alaeddine

TADRIST Lydia

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Etude et simulation numérique des systèmes de chauffage par induction

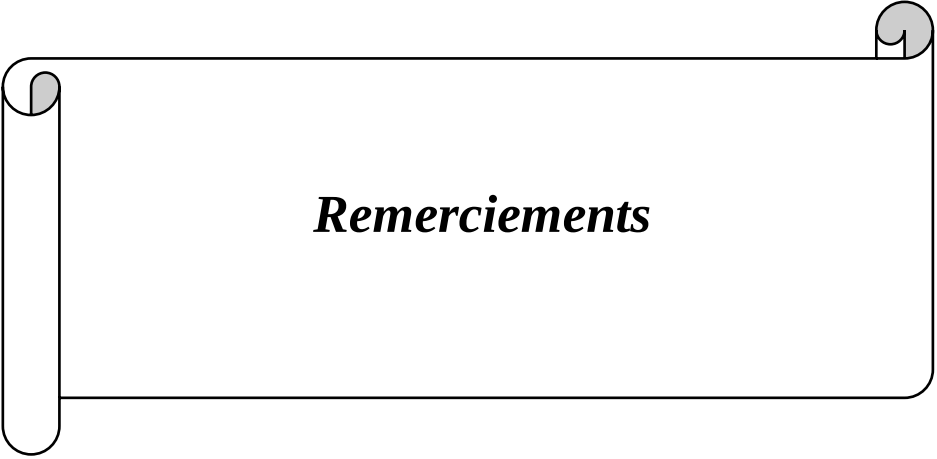
Soutenu le 15 /07/2021 devant le jury composé de:

BOUDOUDA	Aimad	MCA	UMBB	Président
ABDESLAME	Djamila	MCB	UMBB	Examineur
AOUZELLAG	Haroune	MCB	UMBB	Examineur
HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Encadreur
HADJAZ	Sadia	Ingénieur	Electro-Industries	Co-encadreur

Année Universitaire : 2020/2021

Electro-Industries





Remerciements

Remerciements

Au terme de ce travail, nous devons nos remerciements tout d'abord à Dieu qui nous a donné la force et le courage de suivre nos études et d'arriver à ce stade et à nos parents qui nous ont beaucoup soutenus pendant tout au long de notre parcours.

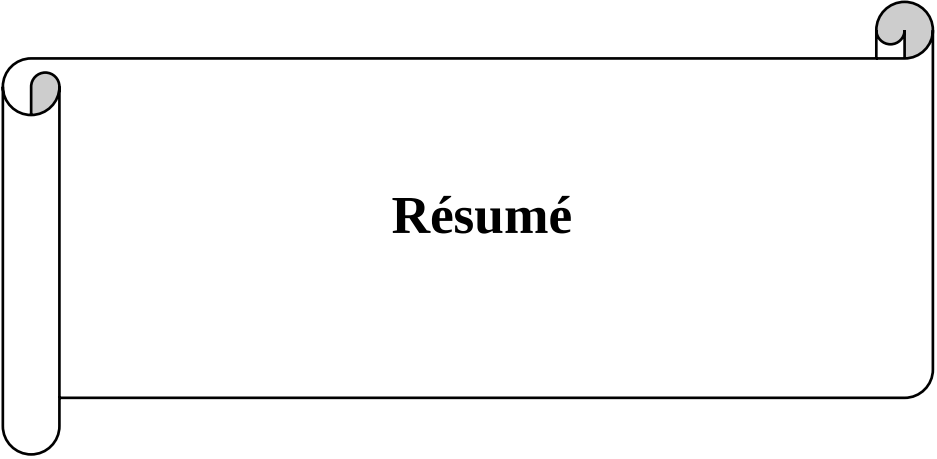
Nous ne trouvons pas les mots pour exprimer notre gratitude envers notre encadreur Monsieur HAMEL Meziane, MCB à l'UMBB, qui nous a éclairés tout au long de notre travail avec ses excellents conseils et ses encouragements qui ont permis à ce travail d'aboutir. Ses capacités scientifiques, Son soutien, sa clairvoyance et ses compétences dans le domaine étaient notre grand support. Faire notre projet sous sa direction était pour nous un grand honneur et un immense bonheur.

Merci à Madame HADJAZ Sadia, Ingénieur à Électro-Industries, de nous avoir encadré au sein de l'entreprise, Nous tenons à la remercier pour son soutien continu et sa grande disponibilité pour nous diriger. On se souvient de ses conseils et de ses orientations pour bien suivre toutes les étapes de fabrication des moteurs asynchrones.

Nous tenons à remercier, Monsieur BOUDAOUA Aimad, de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Nous remercions vivement, Madame ABDESLAME Djamila et Monsieur AOUZELLAG Haoune, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

C'est par un grand plaisir qu'un devoir, d'exprimer notre gratitude et reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Résumé

Résumé

Tout corps électriquement conducteur est le siège de courants induits, dits aussi courants de Foucault, lorsqu'il est plongé dans un champ électromagnétique variable dans le temps. C'est la conséquence de la loi de Lenz : "le système tend à s'opposer aux variations qu'on lui impose". La circulation des courants induits dans le matériau résistif entraîne par effet Joule une élévation de température dans la pièce. En pratique, dans une installation de chauffage par induction, le composant chauffé, appelé aussi charge, est plongé dans un champ électromagnétique créé par un courant excitateur circulant dans un inducteur.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la modélisation numérique des systèmes de chauffage par induction. La méthode des éléments finis a été utilisée pour résoudre le problème électromagnétique ainsi que le problème thermique. Le présent travail, traite la simulation numérique du couplage magnétothermique dans deux systèmes de chauffage par induction. Le Premier est un dispositif de soudage par induction des anneaux de court-circuit des moteurs asynchrones, et le deuxième est un dispositif axisymétrique de chauffage par induction. Les résultats obtenus par simulation ont été comparés aux données issues de l'expérimentation ce qui a permis de vérifier la qualité des résultats fournis par la méthode des éléments finis.

Mots-clés : Chauffage par induction, soudage par induction, courants de Foucault, méthode des éléments finis, simulation numérique.

ملخص

كل جسم ناقل للكهرباء موجود داخل كهرومغناطيسي متذبذب عبر الزمن فهو مقر لتكون تيارات كهربائية. هذه التيارات تعرف بتيارات فوكو. وهذا حسب قانون لانز الذي يقتضي التالي: >>النظام ينتج ردة فعل ضد كل تغير في الحقل الكهربائي المطبق عليه>>. لما ينتقل التيار الكهربائي داخل جسم ذو مقاومة كهربائية ينتج عن ذلك زيادة في حرارة هذا الجسم.

عمليا، وفي مجال التسخين الكهرومغناطيسي، القطعة المراد تسخينها تتواجد داخل الحقل الكهرومغناطيسي الناتج عن التيار المولد من طرف الوشيعية الأساسية.

العمل المقدم في هذه المذكرة يندرج في مجال البرمجة الرقمية لأنظمة التسخين الكهرومغناطيسي. تم الاعتماد على تقنية العناصر المنتهية لحل كل من الإشكالية الكهرومغناطيسية والإشكالية الحرارية. وهذا العمل يتناول البرمجة الرقمية لتكامل الكهروحراري في نظاميين لتسخين الكهرومغناطيسي، الأول هو نظام لتلحيم الكهرومغناطيسي لحقات القصر الكهربائي في المحركات اللاآتزامية. والثاني هو نظام أسطوانتي لتسخين الكهرومغناطيسي النتائج المنبثقة عن البرمجة قورنة مع البيانات المستخلصة من التجارب العملية وهذا ما سمح لنا بتقييم جودة نتائج البرمجة بطريقة العناصر المنتهية

كلمات البحث: التسخين الكهرومغناطيسي، التلحيم الكهرومغناطيسي، التيارات فوكو، طريقة العناصر المنتهية، البرمجة الرقمية.



Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce projet ;

En signe de respect et de reconnaissance aux

Personnes les plus chères dans ma vie

Mon père et Ma mère.

A toute la famille BOUKAZZOULA.

A tous mes amis.

A tous mes collègues étudiants

BOUKAZZOULA ALAEDDINE

Dédicaces

A mon cher père Omar

***l'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon
estime et de mon respect***

***Aucun dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu te préserve et te
procure santé et longue vie***

A ma chère mère Abdeslam Sadia

tu m'as donné la vie la tendresse et le courage pour réussir.

***Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que
je te porte.***

***En témoignage , je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes
sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée***

A mes sœur Kahina et Amira

A mon frère Abderhman

A ma tante Zohra

A toute la famille TADRIST.

A tous mes amis

TADRIST LYDIA



Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur le chauffage par induction

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique	3
I.3 Présentation de l'électrothermie	4
I.4 Principe de fonctionnement du chauffage par induction	4
I.5 Paramètres influant sur la profondeur de pénétration	6
I.5.1 Influence de la résistivité.....	6
I.5.2 Influence de la perméabilité magnétique relative	7
I.5.3 Influence de la fréquence	7
I.6 Inducteur	8
I.7 Caractéristiques du chauffage par induction	10
I.8 Installation de chauffage par induction	10
I.8.1 Equipement de chauffage par induction	10
I.8.2 Les paramètres de réglage	11
I.8.2.1 La fréquence.....	11
I.8.2.2 Amplitudes des courants inducteurs	11
I.8.2.3 Temps d'exposition	11
I.8.3 Ordres de grandeur des paramètres caractérisant les chauffages par induction	12
I.8.3.1 Ordres de fréquence	12
Il est habituel de distinguer les plages de fréquences suivantes	12
I.8.3.2 Ordres de puissance.....	12
I.9 Applications industrielles	12
I.9.1 Fusion	12
I.9.1.a Four à creuset	12
I.9.1.b Four à canal	13
I.9.2 Soudage.....	14
I.9.3 Collage	14
I.9.4 Séchage et chauffage de corps non conducteurs d'électricité	15
I.9.5 Plasma inductif.....	15
I.9.7 Cuisson	16

I.9.9 Autres applications	16
I.10 Avantages	17
I.11 Inconvénients	17
I.12 Conclusion	18

Chapitre II : Modélisation numérique des systèmes de chauffage par induction

II.1 Introduction	19
II .2 Environnement électromagnétique.....	19
II.2.1Equations de Maxwell	19
II.2.2Equation de conservation de l'énergie électromagnétique	20
II.2.3 Formulation $\mathbf{T} - \Phi$	22
II .3 L'environnement thermique.....	23
II .3.1 Différents modes de transfert de chaleur.....	23
II .3.1. a Conduction	23
II .3.1.b Convection	23
II .3.1.c-Rayonnement	23
II .4 Lois fondamentales de la transmutation de la chaleur	23
II .4 .1. Loi de Fourier (Transfert de chaleur par conduction).....	23
II .4.2. Loi de Newton (Transfert de chaleur par convection)	25
II .4 .3. Loi de Stefan-Boltzmann (Transfert de chaleur par rayonnement)	26
II .5 L'équation de la chaleur	27
II .6 Propriétés magneto-thermique	28
II .6 1. Propriétés électromagnétiques	28
II .6. 1. a. Conductivité électrique	28
II .6.1. b. Perméabilité magnétique relative	29
II .6. 1. c. Permittivité diélectrique relative	29
II .6 .2. Propriétés thermiques.....	29
II .6 .2. a. Conductivité thermique	29
II .6.2. b. Chaleur spécifique	29
II .6 .2. c. Émissivité.....	29
II .7. Couplage magnétothermique	29
II .7.1 Ordre de grandeurs des deux phénomènes	30
II .7. 2 Termes de couplage	30
II .7. 2. a Influence de l'équation électromagnétique sur l'équation thermique.....	30

II .7. 2. b Influence de l'équation thermique sur l'équation électromagnétique	30
II .8. Problèmes de non linéarités	30
II .8.1 Variation de la conductivité électrique avec la température	30
II .8.2 Variation de la conductivité thermique avec la température.....	31
II .8.3 Variation de la chaleur massique avec la température	32
II.9 Méthodes de résolution	33
II.9.1. Méthodes analytiques	33
II.9.2. Méthodes numériques	33
II.9.1.1 Méthode des différences finis (MDF)	34
II.9.1.2 Méthode des éléments finis (MEF)	34
II.9.1.2.a . La discrétisation	34
II.10. Conclusion	36

Chapitre III : Applications et résultats

III.1. Introduction	37
III.2. Application I : Soudage par induction des anneaux de court-circuit des moteurs asynchrones à cage	37
III.2.1. Présentation de l'entreprise Electro-Industries	37
III.2.2. Présentation de l'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique	38
III.2.3. Soudage par induction des anneaux de court-circuit	39
III.2.4. Processus de soudage	39
III.2.5. Présentation du dispositif d'étude	40
III.2.6.1. Présentation de logiciel Ansys-Maxwell	41
III.2.6.2 Le matériau du concentrateur	42
III.2.6.3 Résultats électromagnétiques	43
III.2.7 Simulation du couplage magnétothermique	46
III.2.7.1 Présentation d'Ansys Workbench	46
III.2.7.2 Ansys Mechanical	47
III.2.7.3 : Résultats thermiques	48
III.3 Application II : Simulation et réalisation d'un système axisymétrique de chauffage par induction	52
III.3.1 Simulation des phénomènes électromagnétiques	53
III.3.2 Maillage	54
III.3.4 Simulation du couplage magnétothermique	55
III.3.4.1 Maillage	55

III.3.4.2 Distribution de la température	56
III.4 Dispositif expérimental	56
Conclusion générale	66
Bibliographie.....	61



Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : -Techniques de production de la chaleur par l'électricité	4
Figure I.2 : Principe de chauffage par induction.....	5
Figure I. 3 : Représentation de la profondeur de peau	6
Figure I. 4 : Différente forme d'inducteur	9
Figure I. 5: Un équipement de chauffage par induction comprend généralement	11
Figure I. 6: Schéma représentatif d'un four à creuset	13
Figure I. 7. Schéma représentatif d'un four à canal	14
Figure I. 8 : Torche à plasma inductif à cage froide métallique	16
figure II. 1: principe de conduction thermique	24
figure II. 2 : Variation de la conductivité thermique en fonctionne d température.....	25
figure II. 3: Principe de convection de chaleur	26
figure II. 4: Principe de rayonnement thermique	27
figure II. 5: schéma équivalent et bilan thermique.....	27
figure II. 6 : Variation de la conductivité électrique avec la température.....	31
figure II. 7 : Variation de la conductivité thermique avec la température pour divers métaux purs	32
figure II. 8 : Variation de la chaleur massique avec la température.....	32
figure II. 9 : Elément à une dimension.....	35
figure II. 10 : Elément triangulaire à deux dimensions.....	35
figure II. 11 : Elément carré à deux dimensions	35
figure II. 12: Eléments à trois dimensions	36
Figure III. 1: Logo de l'entreprise Electro-Inductrice.....	37
Figure III. 2: Vue satellitaire du site de l'entreprise.....	38
Figure III. 3 : schéma représente l'inducteur avec le rotor.....	39
Figure III. 4 : schéma représente les dimensions du rotor avec l'inducteur	40
Figure III.5 : système simulé sous l'environnement Ansys Maxwell	41
Figure III. 6: l'interface de logiciel ANSYS Maxwell	42
Figure III. 7: le maillage de l'anneau avec concentrateur	43
Figure III. 8: le maillage de l'anneau sans concentrateur	44
Figure III. 9: la distribution de la densité des courants induits dans les anneaux avec concentrateur	44

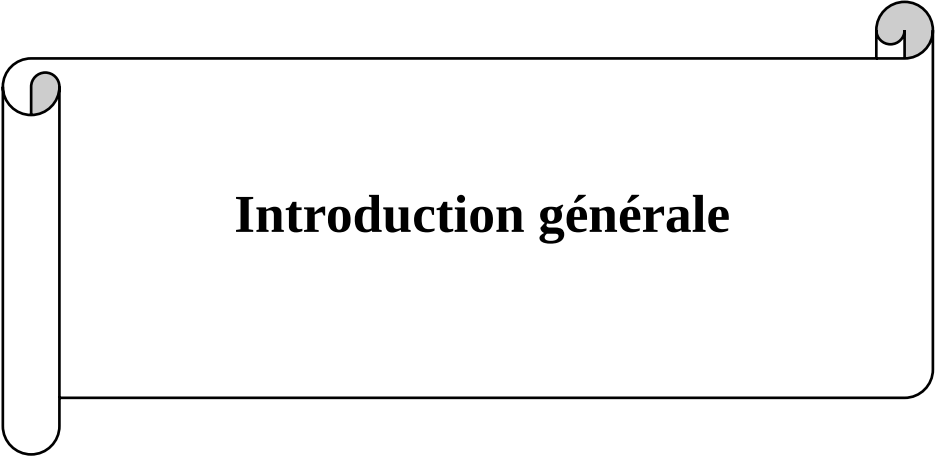
Figure III. 10: la distribution de la densité des courants induits dans les anneaux avec concentrateur	45
Figure III. 11: La distribution de la densité de puissance dans les anneaux avec concentrateur	45
Figure III. 12: La distribution de la densité de puissance dans les anneaux sans concentrateur	46
Figure III. 13: l'interface de logiciel ANSYS Workbench.....	46
Figure III. 14: l'interface de logiciel ANSYS Mechanical.....	47
Figure III. 15: Maillage non raffiné.....	48
Figure III. 16: Maillage raffiné.....	48
Figure III. 17: Distribution de la température dans l'anneau E-1 avec concentrateur après 300s de chauffe	49
Figure III. 18: Distribution de la température dans l'anneau E-1 sans concentrateur après 300s de chauffe	49
Figure I. 19: Distribution de la température dans l'anneau ADT-3 sans concentrateur après 205s de chauffe.....	50
Figure III. 20: Distribution de la température dans l'anneau ADT-3 sans concentrateur après 205s de chauffe.....	50
Figure III. 21: L'évolution de la température en fonction du temps de l'anneau ADT-3	51
Figure III. 22: L'évolution de la température en fonction du temps de l'anneau E-1	51
Figure III. 23 : Comparaison entre les résultats de l'article [27] et les résultats de la simulation	52
Figure III. 24: Schémas général de l'inducteur et la charge	53
Figure III. 25: Inducteur et la charge sous Maxwell 3d.....	53
Figure III. 26 : maillage de la charge sous Maxwell 3D	54
Figure III. 27: Distribution de la densité de la densité du courant [A/m^2] et puissance active [W/m^3]	54
Figure III. 28 : <i>maillage de la charge a chauffer</i>	55
Figure III. 29 : Distribution de la température dans la charge après 250s de chauffe	56
Figure III. 30: Schéma bloc du système étudié sous Isis proteus.....	57
Figure III. 31: dispositif du générateur à induction	57
Figure III. 32 : Résultats obtenu lors de l'expérimentation.....	58
Figure III. 33 : Comparaison entre les résultats de la pratique et les résultats de la simulation	58



Liste de tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I. 1: Résistivité à 0°C de quelque matériau conducteurs de l'électricité.	7
Tableau I. 2: Valeur de δ pour divers matériaux à différents températures.	8
Tableau III. 1 : Les dimensions des anneaux, des noyaux et de l'inducteur	41
Tableau III. 2: les Propriétés de matériaux utilisé dans le concentrateur	43
Tableau III. 3: Paramètres géométrique de l'inducteur.....	53



Introduction générale

Introduction générale

La fusion des métaux est une activité industrielle très ancienne. Parmi toutes les méthodes de chauffe qui furent développées, il en est une particulièrement répandue qui suscite toujours intérêts et travaux, il s'agit du chauffage par induction. La preuve en est les travaux de recherche industrielle et universitaire sur les effets électromagnétiques d'un champ inducteur sur les métaux.

Le principe du chauffage par induction consiste à chauffer des objets métalliques au moyen de l'effet Joule, résultant des courants induits créés par un champ magnétique variable établi par un inducteur. La mise au point de ces procédés de chauffage nécessite l'apport de la modélisation, qui fait intervenir plusieurs phénomènes physiques. L'efficacité de ce genre de procédés est liée à la puissance transférée de l'inducteur à l'objet à chauffer et à la résistivité et à la perméabilité magnétique du matériau traité. Pour les matériaux à base de l'acier magnétique, le rendement peut atteindre 80 à 90 % au-dessous de la température de curie et reste relativement important (environ 65 à 70%) au-dessus de cette température [2]. Contrairement, au chauffage des pièces non magnétiques à base de matériaux conducteurs comme l'aluminium et le cuivre, le rendement n'est que de 50% [3]. En effet, il est difficile de chauffer des matériaux bons conducteurs avec les dispositifs classiques de chauffage (alimentation à fréquence variable).

La modélisation du phénomène de chauffage par induction est faite à travers les équations aux dérivées partielles (EDP) qui décrivent les phénomènes électromagnétiques et thermiques. Pour le cas de l'électromagnétisme, ce sont les équations de Maxwell et les caractéristiques électriques (conductivité électrique) et magnétiques (perméabilité magnétique) des matériaux. Et pour le cas de la thermique, ce sont les lois de la thermodynamique et les propriétés thermiques (conductivité thermique, capacité calorifique) de ces matériaux.

Pour la résolution des EDP ; on a recours aux méthodes numériques de discrétisation qui consistent à ramener la résolution des équations au domaine d'étude, tenant compte des conditions aux limites. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis ...etc.

Dans ce travail, on s'intéresse à la modélisation numérique par éléments finis des systèmes de chauffage par induction, en modélisant le phénomène électromagnétique puis le couplage magnéto-thermique. Pour la validation, nous avons considéré deux systèmes, le premier concerne le soudage par induction des anneaux des cage rotoriques des moteurs

asynchrones , tandis que le deuxième traite un système axisymétrique de chauffage par induction d'un point de vue modélisation et réalisation expérimentale.

Notre mémoire est organisé come suite :

Le premier chapitre fait le point sur la généralité sur de Phénomène de Chauffage par Induction, en commençant de parler sur historique et de Principe de fonctionnement de chauffage par induction. Ce chapitre présente aussi les constitutions ; les Type et les Caractéristiques de chauffage par induction ; ainsi que les Types et Géométries des inducteurs. On détaille aussi les avantages et Inconvénients du chauffage par induction et son domaine d'utilisation.

Un deuxième chapitre sera consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques et thermiques, Aussi les différentes méthodes de résolutions des équations aux dérivées partielles décrivant l'évolution spatiale et temporelle des phénomènes physiques présents dans les dispositifs de chauffage par induction sont présentées.

Le troisième et dernier chapitre est dédié aux applications et résultats. Deux dispositifs sont présentés, le premier est un système de soudage par induction des anneaux des cages rotoriques des machine asynchrone. Le second est un système de chauffage par induction pour les pièces axisymétriques.

Et nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralités sur le Chauffage par
Induction

I.1 Introduction

Les principes de base du chauffage par induction ont été compris et appliqués dans les processus industriels depuis les années 1920. Il existe plusieurs applications du chauffage telles que : Le soudage, la fusion minérale, le collage des métaux, la cuisson dans l'industrie agro-alimentaire, le chauffage des liquides (les chaudières nucléaires) et les applications domestiques et ménagères en utilisant les plaques de la cuisson [1].

Dans ce qui suit nous allons présenter des généralités sur ce type de technologie :

Le chauffage direct : Dans ce type de chauffage, le corps à traiter (conducteur de l'électricité et de la chaleur) est placé dans un champ magnétique variable dont les variations induisent, d'après la loi de Lenz, une force électromotrice donnant naissance à des courants de Foucault. Le corps s'échauffe sans contact par l'effet Joule dû aux courants induits [2].

Le chauffage indirect : Dans ce type de chauffage, la pièce à chauffer est peu conductrice de l'électricité ou de la chaleur. Elle est placée en contact avec un élément sensible à l'induction qui s'échauffe et lui transmet sa chaleur [2].

I.2 Historique

En 1831, Faraday découvre le phénomène d'induction dont les lois sont précisées par Foucault en 1851. Vers 1860, Maxwell propose une théorie générale de l'électromagnétisme classique qui pose les fondements de la théorie moderne.

En 1885, les premières recherches sur les effets thermiques commencèrent, mais les principes de base du chauffage par induction ont été compris et appliqués dans les processus industriels qu'à partir des années 1920.

A partir de 1925, l'effet de peau due à une concentration périphérique des courants de Foucault dans les masses métalliques élargit considérablement les applications du chauffage par induction.

En 1957, les américains ont développé un dispositif d'électronique de puissance à base de thyristor, marquant le début de la révolution technologique du chauffage par induction.

A partir de 1980 et grâce à l'évolution de la technologie, les systèmes de chauffage par induction sont devenus très complexes et très courants. Aujourd'hui, le recours aux techniques de simulations numériques a permis de substituer les essais expérimentaux au calcul numérique qui a permis la conception de meilleurs systèmes de chauffage par induction [2].

I.3 Présentation de l'électrothermie

L'électrothermie consiste à utiliser l'énergie électrique pour produire de la chaleur, il existe plusieurs techniques utilisant l'électricité pour produire la chaleur, On distingue [4],[10] :

-Les techniques basées sur l'effet Joule (par conduction, par induction et par arc électrique...) :

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

- Les techniques basées sur le rayonnement :

Une source (Laser) émet un rayonnement électromagnétique. Le faisceau émis présente deux propriétés importantes : une très faible ouverture et un rayonnement presque monochromatique ; ces deux propriétés lui confèrent une densité de puissance très importante. La figure I-1 présente les différentes techniques utilisant l'électricité pour produire la chaleur.

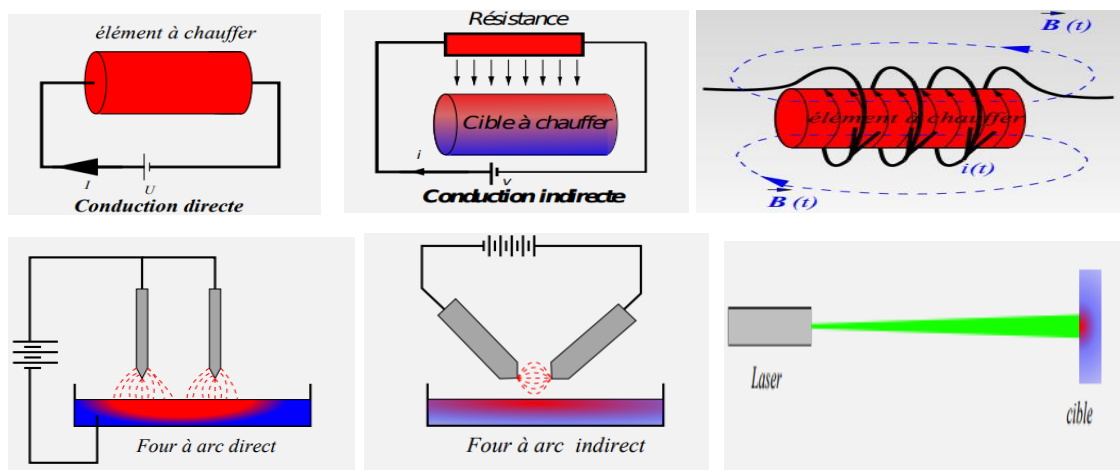


Figure I.1 : -Techniques de production de la chaleur par l'électricité

I.4 Principe de fonctionnement du chauffage par induction

Le chauffage par induction électromagnétique est une technique permettant de chauffer des matériaux conducteurs d'électricité, sans contact matériel avec une source électrique. il est basé sur trois phénomènes physiques :

1. L'induction électromagnétique
2. L'effet joule
3. L'effet de peau [5]

Une tension alternative appliquée à une bobine d'induction entraînera un courant alternatif dans la bobine. Ce courant alternatif produira un champ magnétique variable dans son environnement qui a la même fréquence que le courant de la bobine. L'intensité du champ magnétique dépend du courant circulant dans la bobine d'induction, de la géométrie de la bobine et de la distance de la charge par rapport à la bobine. D'après la loi de Lenz ; Le champ magnétique variable crée des courants de Foucault dans la pièce située à l'intérieur de la bobine. Ces courants ont la même fréquence que le courant de la bobine d'induction. Ainsi, et comme illustré dans (la figure 1.2), les courants de Foucault ont la même direction que le courant de l'inducteur, mais de sens opposé. Les courants de Foucault alternatifs produisent la chaleur dans la pièce chauffée par effet Joule [1].

L'ensemble de la bobine d'induction et la pièce chauffer peut-être considérée comme un transformateur électrique. La bobine d'induction comme le primaire où la source électrique injecte l'énergie, et la pièce est comme un secondaire [1].

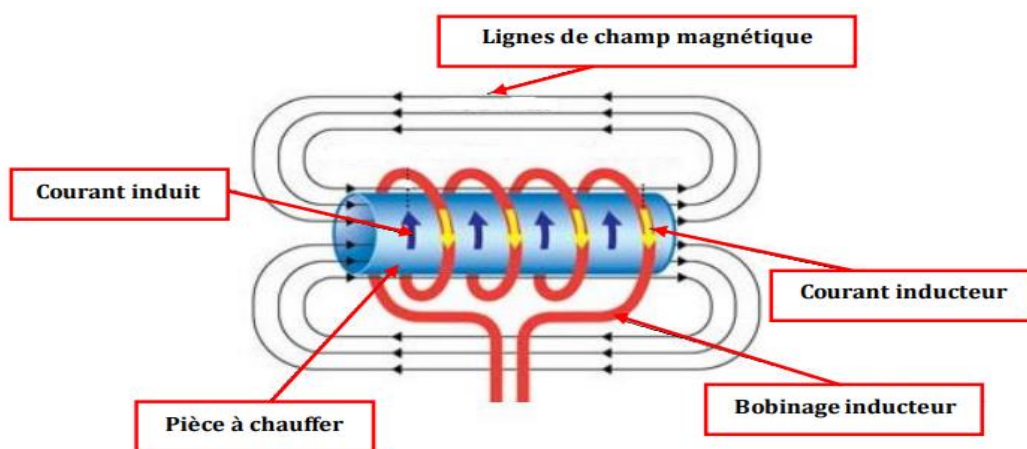


Figure I.2 : Principe de chauffage par induction

La chaleur qui se situe dans la pièce est plus ou moins forte et dépend des propriétés électriques et magnétiques du matériau, ainsi que de l'intensité des champs magnétiques en jeu. Les zones adjacentes à celle chauffée par les courants sont chauffées par conduction thermique selon les propriétés thermiques du matériau.

La zone soumise à l'effet Joule est concentrée sur une fine couche superficielle, car la densité des courants induits décroît de manière quasi-exponentielle vers le centre de la pièce. Ce phénomène est appelé « effet de peau » et est caractérisé par la profondeur de pénétration δ

(Figure.1.3) [11], qui est définie comme étant la profondeur où 86% de la puissance transmise est concentrée ou encore 63% de la densité des courants induits. La profondeur de pénétration est exprimée sous la forme suivante [11].

$$I(x) = I_{\text{surface}} \cdot e^{\left(\frac{-x}{\delta}\right)}$$

Avec

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot \mu \cdot f}}$$

Où :

f : est la fréquence du courant (Hz)

σ : est la conductivité électrique du matériau (S /m)

μ : Est la perméabilité magnétique du matériau (H/m)

Pour $x = \delta$; on obtient

$$I(x) = I_{\text{surface}} \cdot e^{-1} = 0.368 I_{\text{surface}}$$

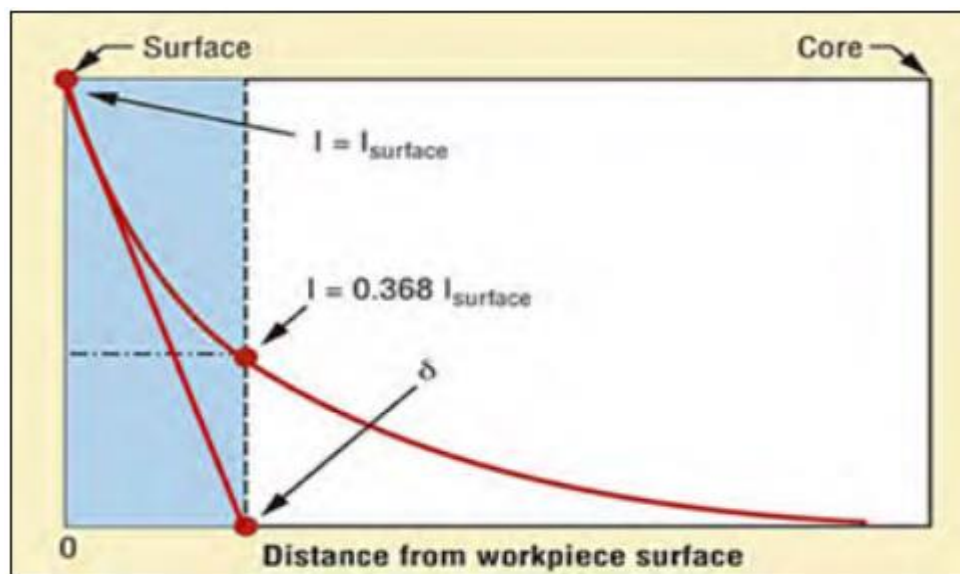


Figure I. 3 : Représentation de la profondeur de peau

I.5 Paramètres influant sur la profondeur de pénétration

I.5.1 Influence de la résistivité

La profondeur de pénétration est proportionnelle à la racine carrée de la résistivité del'induit. Celle-ci, pour les métaux, croit généralement avec la température [7] :

$$\rho_{\theta} = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta]$$

Avec

ρ_{θ} : Résistivité du matériau [$\Omega \cdot m$] à la température $\theta^{\circ}C$.

ρ_0 : Résistivité du matériau à la température de 0°C .

θ : Variation de la température en degrés Celsius .

α : Facteur qui dépend de la nature du matériau.

Les valeurs de la résistivité de quelques métaux sont présentées dans le (Tableau I.1)

Tableau I. 1: Résistivité à 0°C de quelque matériau conducteurs de l'électricité.

Corps à chauffer	Résistivité ($10^{-8} \Omega \cdot m$)
Cuivre	1.60
Zinc	5.75
Aciers spéciaux	40.80
Laitons	5.10
Bronze	10.20

I.5.2 Influence de la perméabilité magnétique relative

La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la perméabilité relative. Pour les matériaux non magnétiques, μ_r est égale à l'unité, mais elle atteint une valeur très élevée pour certains corps ferromagnétiques.

La perméabilité magnétique est une fonction très complexe de la composition de matériaux de sa température et de la valeur du champ magnétique [7].

I.5.3 Influence de la fréquence

La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence. Alors que la résistivité et la perméabilité magnétiques sont des caractéristiques du corps à chauffer, la fréquence est une grandeur qui peut être choisie par l'utilisateur ; celui-ci possède ainsi un moyen de contrôle de la dissipation de la puissance à l'intérieur du corps à chauffer et de choisir le mieux adapté [7].

Le tableau (I.2) présente les valeurs δ pour différents matériaux à plusieurs températures

Tableau I. 2: Valeur de δ pour divers matériaux à différentes températures.

Matériau	Acier 20°C	Acier 40°C	Acier 800°C	Cuivre 20°C	Aluminium 20°C	Aluminium 500°C	Graphite 20 et 1300°C
f (Hz)	δ exprimé en millimètres						
50	5.03	3.18	76.2	9.35	11.9	19.4	201
10^3	1.124	0.71	14.6	2.09	2.66	4.26	45
10^5	0.112	0.071	1.46	0.209	0.266	0.426	4.5
10^7	0.011	0.007	0.146	0.021	0.0266	0.043	0.45

I.6 Inducteur

L'inducteur ou la bobine d'induction est un élément essentiel dans le système de chauffage par induction qui détermine l'efficacité et le rendement du chauffage de la pièce. La complexité des bobines est très variable, d'un simple enroulement hélicoïdal (solénoïde), formé d'un certain nombre de spires de tube de cuivre enroulées sur un mandrin, aux bobines de précision usinées en cuivre massif et brasées. Le rôle de la bobine est de transférer l'énergie de l'alimentation en puissance à la pièce en créant un champ électromagnétique alternatif. Ce champ produit à son tour un courant qui passe dans la pièce « en miroir » par rapport au courant circulant dans la bobine. En surmontant la résistance de la pièce, le courant génère de la chaleur dans celle-ci due aux pertes joules [12].

La forme et la position de la bobine par rapport à la pièce dépendent dans une certaine mesure, du critère choisi [12] :

• Régularité de la répartition de la chaleur ou, la localisation de la chaleur dans une partie seulement de la pièce

- Pénétration plus ou moins grande de la chaleur dans le corps de la pièce
- Transfert maximum d'énergie
- Durée de l'opération

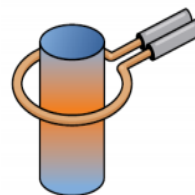
Chaque application du chauffage par induction nécessite une bobine de chauffe particulier, les inducteurs peuvent être de formes et de dimensions très différentes.

La géométrie de l'inducteur n'est pas seulement déterminée par les profils de chauffe requis, mais également par le type de générateur utilisé.

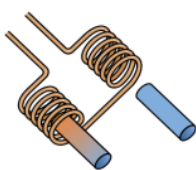
Les bobines d'induction sont des conducteurs conçus en tubes de cuivre refroidis à l'eau. Les inducteurs peuvent prendre plusieurs formes, telles que :



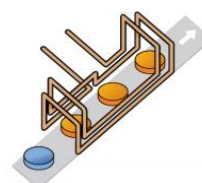
Inducteur hélicoïdal multi-spires



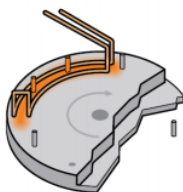
Inducteur à une spire)



Inducteur hélicoïdale multipositions



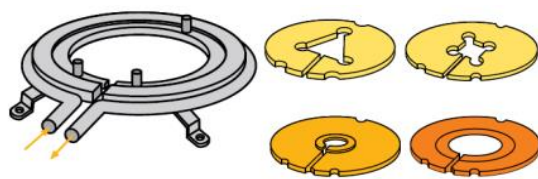
Inducteur Tunnel (Bobine canal)



Inducteur canal incurvée



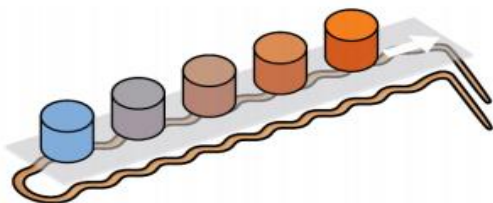
Inducteur Pancakes (Bobine en galette)



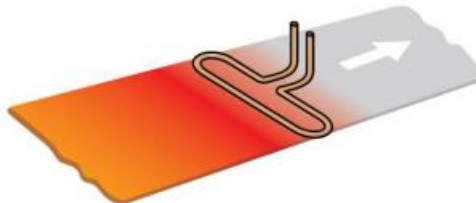
Inducteur à plaque de concentration



Inducteur hélicoïdale partagée



Bobines et convoyeurs



Inducteur en épingle à cheveux.

Figure I. 4 : Différente forme d'inducteur

I.7 Caractéristiques du chauffage par induction

Parmi les caractéristiques du chauffage par induction, deux retiennent particulièrement l'attention pour les applications industrielles :

- La répartition des courants induits dans la pièce à chauffer ;
- La puissance dissipée dans cette pièce.

Afin de transmettre la plus grande énergie à la pièce à traiter, plusieurs paramètres sont à prendre en considération [7] :

- 1- D'un côté, le flux magnétique traversant le corps à chauffer, on cite en particulier :
 - La nature du matériau (perméabilité magnétique relative) et de son état (corps magnétique ou non, influence de la température) ;
 - Des fuites magnétiques (dimensions respectives de l'inducteur et de la pièce à chauffer, couplage, caractéristiques du circuit magnétique) ;
 - La fréquence du courant.
 - 2- D'autre côté, les caractéristiques électriques de l'inducteur et de l'induit :
 - Résistivité de l'induit et de l'inducteur aux températures considérées ;
 - Caractéristiques géométriques de l'inducteur et de l'induit ;
 - Section de l'induit affectée par le passage du courant, distribution de la densité de courant dans cette section, longueur du circuit parcouru par le courant induit.
- Tous ces paramètres ont une grande importance car la profondeur de pénétration des courants induits dans le corps à chauffer, la quantité de chaleur dégagée, sa répartition dans l'induit et le rendement de ce mode de chauffage en dépendent étroitement. Plus la fréquence du courant dans l'inducteur augmente, plus le courant alternatif parcourant la pièce à chauffer a tendance à se concentrer à sa surface [7].

I.8 Installation de chauffage par induction

I.8.1 Equipement de chauffage par induction

Un équipement de chauffage par induction comprend généralement :

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

- un ensemble de commande-contrôle de l'installation [10].

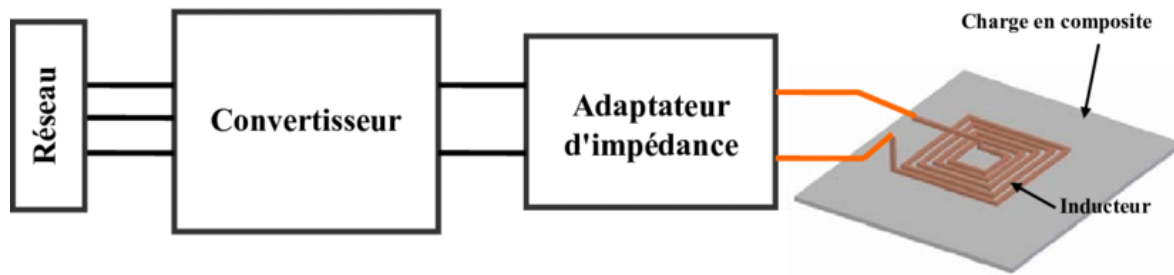


Figure I. 5 : Un équipement de chauffage par induction comprend généralement

I.8.2 Les paramètres de réglage

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

I.8.2.1 La fréquence

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

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

On comprend donc que le choix de la fréquence est essentiel avant toute opération de chauffage inductif [6], [10].

I.8.2.2 Amplitudes des courants inducteurs

Comme la puissance transmise dépend de la fréquence, elle dépend aussi du carré du champ magnétique c'est-à-dire du carré de l'intensité créant ce champ. Donc, suivant l'application thermique voulue on choisit l'intensité des courant inducteurs [10].

I.8.2.3 Temps d'exposition

Le temps d'échauffement est un facteur très essentiel dans le chauffage par induction, on peut l'évaluer selon le type d'application, comme il peut dépendre du matériau considéré et de la fréquence utilisée [6].

I.8.3 Ordres de grandeur des paramètres caractérisant les chauffages par induction

I.8.3.1 Ordres de fréquence

Il est habituel de distinguer les plages de fréquences suivantes [10] :

Basse fréquence : de 50Hz à 1000Hz

Moyenne fréquence : de 1000Hz à 35000Hz

Haute fréquence : de 35000Hz à 10MHz

I.8.3.2 Ordres de puissance

Les puissances mises en jeu dépendent de types d'applications et de fréquences utilisées. On les caractérise par la puissance injectée dans la pièce à chauffer. Elles peuvent aller de 10^2 KW/m^3 à $5 \cdot 10^2$ KW/m^3 [10].

I.9 Applications industrielles

La technologie de chauffage par induction permet de chauffer des zones sélectionnées dans une partie, ou un élément ciblé, ou bien toute la pièce. Nous citons dans ce paragraphe les différentes applications industrielles du chauffage par induction.

I.9.1 Fusion

La fusion est le passage d'un corps solide à l'état liquide sous l'action de la chaleur.

A ce stade, un point d'actualité que les progrès de l'électronique de puissance permettent l'usage de fours à différentes valeurs de la fréquence, dont les plus répandus sont :

I.9.1.a Four à creuset

Il est constitué essentiellement d'une bobine inductrice refroidie par circulation d'eau entourant un garnissage en matériau réfractaire qui forme un creuset, dans lequel se trouve la masse métallique à fondre (figure I.5).

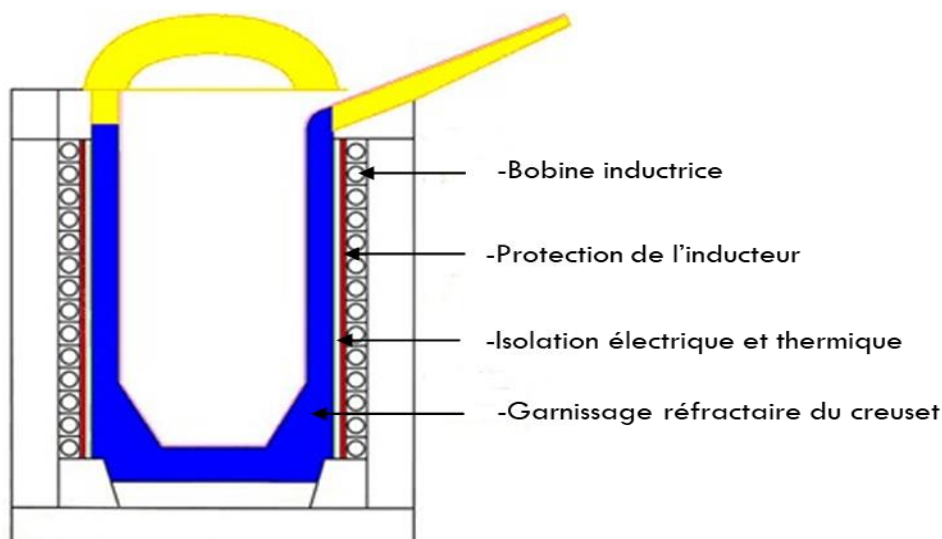


Figure I.6 : Schéma représentatif d'un four à creuset

Le four doit présenter des caractéristiques prenant en compte les exigences de rentabilité inhérentes au type de fonctionnement choisi. En effet, les fours à bobine longue (80 % de la hauteur) sont utilisés plus particulièrement pour la fusion d'aciers spéciaux ou d'alliages de cuivre ou d'aluminium, tandis que les fours à bobine courte sont réservés au maintien en température du métal liquide. Ainsi, la puissance de ce four va de quelques kW (fusion des métaux précieux) jusqu'à une dizaine de MW, comme il peut atteindre des capacités de plusieurs dizaines de tonnes.

Nous signalons encore que le creuset et la bobine inductrice peuvent être placés dans une enceinte sous vide ou sous atmosphère contrôlée, pour la réalisation de coulées spéciales [6].

I.9.1.b Four à canal

Ce type de four utilise un transformateur possédant un noyau de fer qui entoure un canal rempli du métal fondu, comme l'indique la figure I.6. Dans ce four, le canal est constitué d'un tuyau en céramique monté en dessous du bac de métal fondu. Le primaire du transformateur est excité par une source d'alimentation et le courant secondaire I_2 circule dans le canal et dans le bain, qui agissent comme une spire en court-circuit. Il est particulièrement utilisé pour le maintien de la température de l'acier et de la fonte et pour la fusion des alliages cuivreux ou d'aluminium [6].

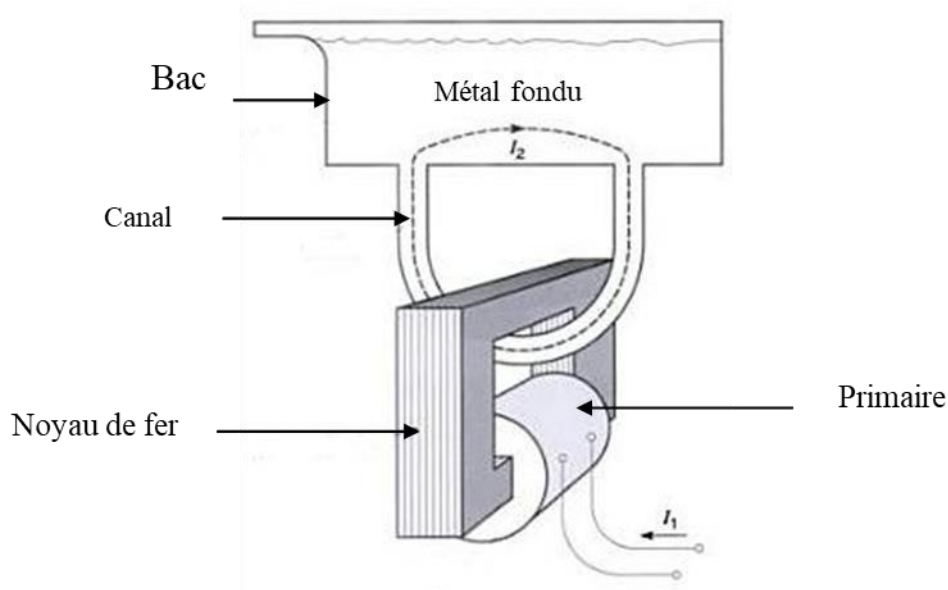


Figure I. 7. Schéma représentatif d'un four à canal

I.9.2 Soudage

Le soudage consiste à ramollir suffisamment par chauffage la couche de surface des deux pièces à réunir pour favoriser leur interpénétration et leur assemblage lors du refroidissement [6]. A ce stade, le phénomène d'induction est utilisé principalement pour le soudage des tubes.

Le procédé du soudage par induction consiste, en effet, à intercaler entre les deux parties à assembler deux rivets. Seuls ces deux rivets subissent l'action de chauffage par induction. En fusionnant les deux pièces chauffées à la surface intérieure en contact avec les deux rivets l'assemblage ainsi obtenu après refroidissement est similaire à celui résultant d'une soudure par points.

En effet, la moyenne et la haute fréquence sont utilisées dans cette technique. Cependant, l'utilisation de la haute fréquence permet d'obtenir une localisation du chauffage en surface des rivets à souder, ce qui donne des vitesses de soudure élevées et des cordons de soudure très réduits avec des puissances surfaciques comprises entre 100 et 1000 MW/m² [6].

I.9.3 Collage

Le collage par induction devient une méthode d'assemblage de plus en plus courante. Le principe consiste à accélérer la polymérisation de la colle en chauffant par induction les parties à coller. Les températures à atteindre sont généralement faibles (150 à 300°C). La température et la durée de maintien déterminent la solidité du lien créé. Ce procédé est aujourd'hui très largement utilisé dans la fabrication des pièces de carrosserie automobile

(portes, capots, hayons...). Des liaisons métal-polyester peuvent être également traitées par induction [6].

I.9.4 Séchage et chauffage de corps non conducteurs d'électricité

Le séchage repose sur deux mécanismes : le transfert d'eau et le transfert thermique. Pour les corps non conducteurs d'électricité, il est possible de les chauffer indirectement en utilisant un suscepteur conducteur d'électricité. Le matériau le plus utilisé comme suscepteur est le graphite, mais des métaux peuvent également être employés. Comme exemple d'application, des cylindres chauffés par induction sont utilisés pour le séchage de papier de très haute qualité ou de textiles spéciaux.

I.9.5 Plasma inductif

Le plasma est un gaz ionisé qui est considéré comme le quatrième état de la matière suivant les états solides, liquides et gazeux. L'ionisation d'un gaz enveloppant un arc électrique, produit entre deux électrodes, est l'un des procédés industriels utilisé pour générer un plasma, on parle du plasma d'arc.

Le plasma inductif est caractérisé par une absence totale d'électrodes, le transfert d'énergie de la source au plasma étant effectué par couplage inductif. Le principe de fonctionnement est tout à fait similaire à celui du chauffage des métaux par induction. Cependant, la charge, c'est-à-dire le gaz plasmagène, a une conductivité électrique nettement plus basse que celle de la majorité des métaux [6]. L'absence de contact entre le plasma et les parois solides de l'enceinte fait du plasma inductif un outil idéal pour le travail de produits de haute pureté.

La figure (I.7) représente un exemple d'une torche à plasma. Elle est constituée de doigts de cuivre creux dans lesquels circulent de l'eau pour assurer le refroidissement.

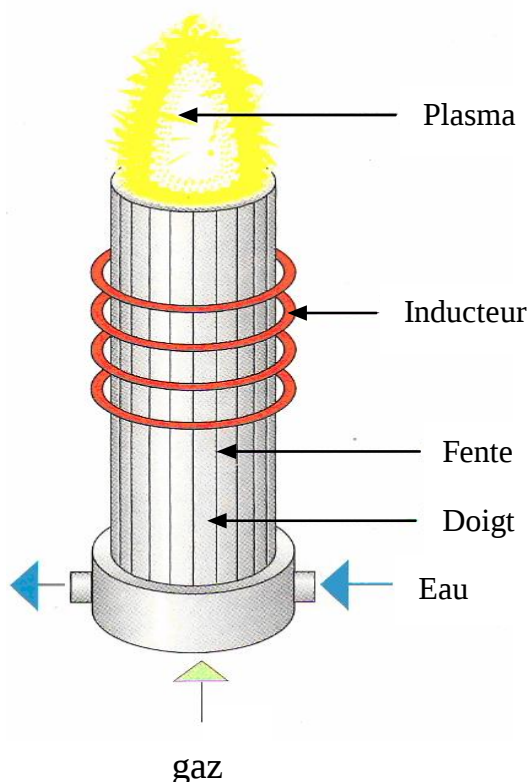


Figure I. 8 : Torche à plasma inductif à cage froide métallique

Cette technique s'applique dans des cas très particuliers : par exemple aux surfaces convexes telles que les points, les dents, les aiguilles, ... etc.

I.9.6 Cuisson

La cuisson à induction est utilisée largement au cours des dix dernières années. Elle fonctionne, par définition, grâce à un inducteur placé sous forme de bobines de cuivre, en dessous d'une plaque en vitrocéramique. L'inducteur est alimenté par une source de puissance à moyenne fréquence (20 kHz) produisant un champ électromagnétique, ce qui induit des courants dans le métal du récipient posé sur la plaque. Ce récipient se trouve donc chauffé par effet Joule.

Même si elle nécessite un investissement initial relativement coûteux, cette technique de cuisson présente des avantages nombreux, elle allie en plus de la sécurité : la rapidité, la précision, la souplesse, l'économie, le confort de travail et un nettoyage facile et rapide [6].

I.9.7 Autres applications

Les principales applications du chauffage par induction sont décrites précédemment. Néanmoins, il reste plusieurs d'autres, on cite par exemple :

- Traitement des déchets nucléaires

- Fabrication de semi-conducteurs et de fibres optiques
- Thermoformage des plastiques
- Graphitisation (balais de machines électriques)

I.10 Avantages

- L'induction permet d'obtenir des températures de chauffe très élevées.
- L'induction peut être appliquée de façon très locale.
- Les installations à induction sont compatibles avec les automatismes.
- Les installations à chauffage par induction ont en règle générale un bon rendement. Toutefois, le rendement dépend aussi de la nature du matériau à chauffer. Une partie importante des pertes calorifiques peut être récupérée.
- Possibilité de chauffer à des températures très élevées avec un rendement pratiquement indépendant de la température.
- Une pureté extrême peut être obtenue en travaillant sous vide ou dans des atmosphères inertes.
- Rapidité de chauffage liée à la possibilité d'obtenir des densités de puissance très élevées.
- Localisation précise de l'effet thermique grâce à une conception d'inducteur et une fréquence de fonctionnement adaptée à la pièce à chauffer.
- Le chauffage peut être régulé précisément.
- Pas de production de fumée (absence de pollution par source de chaleur).
- Bonnes conditions de travail.
- Le chauffage par induction est utilisé principalement pour le chauffage de formes simples [1] [19].

I.11 Inconvénients

- Coûts d'acquisition élevés pour les fortes puissances.
- Des champs électromagnétiques peuvent apparaître ce qui peut alors perturber l'environnement, lorsque les isolations sont mauvaises ou bien lorsqu'il y a une protection HF (haute fréquence) [19].

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités relatives au chauffage par induction, en passant par les principes physiques le différent type de dispositifs utilisés et les différents domaines d'utilisation.

Dans ce qui suit nous allons exposer la modélisation numérique de ce type de technologie.

A decorative frame shaped like a horizontal scroll. It has a vertical strip on the left side and rounded ends on the right. The text is centered within the scroll.

Chapitre II :
Modélisation numérique des
systèmes de chauffage par
induction

II.1 Introduction

Comme tout système physique, l'étude de dispositifs de chauffage par induction. Nécessite généralement l'utilisation d'un modèle mathématique. Cette structure mathématique est basée sur deux phénomènes électromagnétiques et thermiques à la fois ; qui régissent l'évolution spatio-temporelle d'un tel phénomène. La solution à ce problème dépend de deux types d'environnement.

- L'environnement magnétique est basée sur les équations de J. C. Maxwell.
- L'environnement thermique est basée sur l'équation de diffusion de la chaleur.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons, d'abord aux équations de Maxwell et puis sur la base de ces équations, nous définissons le modèle électromagnétique utilisé ensuite nous présentons l'équation de diffusion de la chaleur.

II .2 Environnement électromagnétique

II.2.1 Equations de Maxwell

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell [20-21]. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques. Ces équations sont les suivantes :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II .2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

$\vec{E}$ [V/m] et $\vec{H}$ [A/m] : Champ électrique et magnétique.

$\vec{D}$ [C/m²] et $\vec{B}$ [T] : Induction électrique et magnétique.

$\vec{J}$ [A/m²] et ρ [C/m³] : Densité de courants de conduction et de charge électrique.

L'équation (4) est une généralisation de la loi d'Ampère, i.e. $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}$. Elle constitue avec (II .2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (II.1) et (II.3) constituent des équations dites de conservation.

Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (II-4) serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes :

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

$$\vec{D} = \varepsilon . \vec{E} \quad (II.6)$$

$$\vec{J} = \sigma . \vec{E} \quad (II.7)$$

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

ε : Permittivité électrique [F/m].

σ : Conductivité électrique $[(\Omega.m)^{-1}]$.

Dans la plupart des problèmes d'électrotechnique, aux fréquences mises en œuvre, les courants de déplacement introduits par le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ sont négligés, le système est alors quasi-stationnaire. Dans ces conditions, on obtient la forme locale du théorème d'Ampère :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (II.8)$$

Ce qui induit l'équation la conservation de la densité de courant suivante :

$$\vec{\nabla} . \vec{J} = 0 \quad (II.9)$$

II.2.2 Equation de conservation de l'énergie électromagnétique

L'énergie électromagnétique est l'énergie du champ électromagnétique contenue dans un volume donné de l'espace, à un instant donné. C'est une grandeur extensive qui s'exprime en joules (J). Elle dépend a priori du temps et du volume considéré.

Localement, on considère la densité volumique d'énergie électromagnétique, souvent notée u_{em} , qui se calcule comme la somme des densités volumiques d'énergies des champs électrique et magnétique. Elle s'exprime en $J m^{-3}$ et dépend a priori du temps et du point de l'espace considéré. Elle correspond à la généralisation, en régime quelconque, des concepts d'énergie électrostatique, associée à un champ électrique, et d'énergie magnétique associée à un champ magnétique.

Soient les deux équations de Maxwell (II .2) et (II .4),

en multipliant la première égalité par $\vec{H}$ et la deuxième par $\vec{E}$ on aura :

$$\vec{H} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II .10})$$

Et :

$$\vec{E} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{E} \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (\text{II .11})$$

En soustrayant les deux équations membre à membre, on obtient :

$$\vec{H} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} - \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = -\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{E} \cdot \vec{J} - \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II .12})$$

Or :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) = \vec{H} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} - \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} \quad (\text{II .13})$$

D'où :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) = -\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{E} \cdot \vec{J} - \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II .14})$$

En intégrant sur le volume :

$$\iiint_v \vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) dV = \iiint_v -\left(\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dV \quad (\text{II .15})$$

Comme :

$$\iiint_v \vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) dV = \iint_s (\vec{E} \wedge \vec{H}) dS \quad (\text{II .16})$$

On aura, donc :

$$\iint_s (\vec{E} \wedge \vec{H}) dS + \iiint_v \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} dV + \iiint_v \vec{E} \cdot \vec{J} dV + \iiint_v \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} dV = 0 \quad (\text{II .17})$$

C'est l'équation de la conservation de l'énergie électromagnétique.

Avec :

$$\iint_s (\vec{E} \wedge \vec{H}) dS : \text{Vecteur de Poynting} \quad (\text{II .18})$$

$$\iiint_v \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} dV : \text{Énergie magnétique} \quad (\text{II .19})$$

$$\iiint_v \vec{E} \cdot \vec{J} dV : \text{Énergie joule} \quad (\text{II .20})$$

$$\iiint_v \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} dV : \text{Énergie diélectrique} \quad (\text{II .21})$$

Dans les systèmes de chauffage par induction, on s'intéresse au calcul des pertes joules dans le volume à chauffer. L'expression de ces pertes est donnée par :

$$P = \iiint_v \vec{E} \cdot \vec{J} dV \quad (\text{II .22})$$

II.2.3 Formulation $\vec{T} - \Phi$

La formule $\vec{T} - \Phi$, décrit la distribution du champ électromagnétique par l'utilisation du potentiel vecteur électrique $\vec{T}$ et du potentiel scalaire magnétique Φ . Cette formulation a l'avantage de permettre une réduction du coût de calcul en diminuant les degrés de liberté de trois à un dans toutes les zones non conductrices [22].

Pour la solution du problème nous considérons une autre fois la condition de la continuité

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (II.23)$$

A partir de l'équation (II.23), l'expression de la densité de courant en termes de potentiel vecteur électrique est donnée par l'équation :

$$\vec{J} = \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \quad (II.24)$$

On peut noter des équations (II.4) et (II.24) que $\vec{T}$ et $\vec{H}$ diffère par le gradient scalaire Φ :

$$\vec{H} = \vec{T} - \vec{\nabla} \Phi \quad (II.25)$$

La combinaison des équations (II.2), (II.5) et (II.7) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \Phi) = 0 \quad (II.26)$$

A partir de l'équation (II.3) on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \Phi)) = 0 \quad (II.27)$$

Dans l'air l'expression du champ magnétique est réduite à :

$$\vec{H} = -\vec{\nabla} \Phi \quad (II.28)$$

En remplaçant (II.28) dans (II.3) :

$$-\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{\nabla} \Phi = 0 \quad (II.29)$$

La divergence de $\vec{T}$ n'est pas encore défini et par conséquent $\vec{T}$ et Φ restent ambigu. Pour y remédier on utilise l'une des jauges communément utilisées en électromagnétisme en l'occurrence la jauge de Coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (II.30)$$

Cette condition nous autorise à rajouter à l'équation (II.26) le terme :

$$\vec{\nabla} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) \quad (II.31)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \vec{\nabla} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \Phi) = 0 \quad (II.32)$$

C'est ce modèle que nous avons adopté pour nos simulations en 3D.

II .3 L'environnement thermique

Les équations électromagnétiques précédentes permettent de calculer la densité de puissance issue des courants induits. Cette puissance dans le cas du chauffage par induction est le point de départ de la résolution du problème thermique [7].

II .3.1 Différents modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur reconnaît trois modes de transmission de la chaleur. Il s'agit de la transmission par conduction, convection et rayonnement. Ces modes de transfert de la chaleur peuvent être présents, dans un procédé, d'une manière séparée, combinée deux à deux ou ensemble à la fois [15]

II .3.1. a Conduction

La conduction est un phénomène au moyen duquel la chaleur s'écoule à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) d'une région à haute température vers une autre à basse température ; ou entre différents milieux mis en contact.

II .3.1. b Convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. En effet, la convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz, donc un fluide dans le cas le plus général.

II .3.1.c-Rayonnement

Le rayonnement est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse température, lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide les sépare.

II .4 Lois fondamentales de la transmutation de la chaleur

II .4 .1. Loi de Fourier (Transfert de chaleur par conduction)

Le transfert de chaleur par conduction consiste à transmettre la chaleur des parties chaudes de la pièce vers les parties froides par transfert de l'agitation thermique au sein d'une pièce [16].

Il est décrit par la loi de Fourier

$$q_{\text{conv}} = - \lambda \text{ grad}(T) \quad (\text{II.33})$$

- D'après cette loi, le taux de chaleur transmise par conduction est proportionnel au gradient de température (différence de température) ainsi qu'à la conductivité thermique du matériau qui dépend de la température.

- Autrement dit, une grande différence de température entre la surface et le cœur de la pièce (ce qui le cas lors d'un traitement thermique superficiel par induction), et une grande valeur de la conductivité thermique du matériau entraînent un transfert important de chaleur des régions chaudes vers les régions froides ce qui réduirait le gradient de température [13].

Dans cette barre métallique chauffée en son extrémité A, on observe un gradient longitudinal de température $T(x)$: $T_A > T_B$

Cette différence de température $T_A - T_B$

Provoque un flux de chaleur ϕ

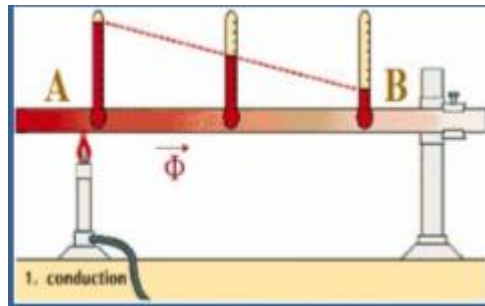


Figure II. 1: principe de conduction thermique

Lorsque l'énergie diffuse dans un système, les différences de température décroissent et l'entropie croît. Elle dépend de :

- La nature physico-chimique du matériau
- La nature de la phase considérée (solide, liquide, gaz)
- La température
- L'orientation dans les matériaux anisotropes

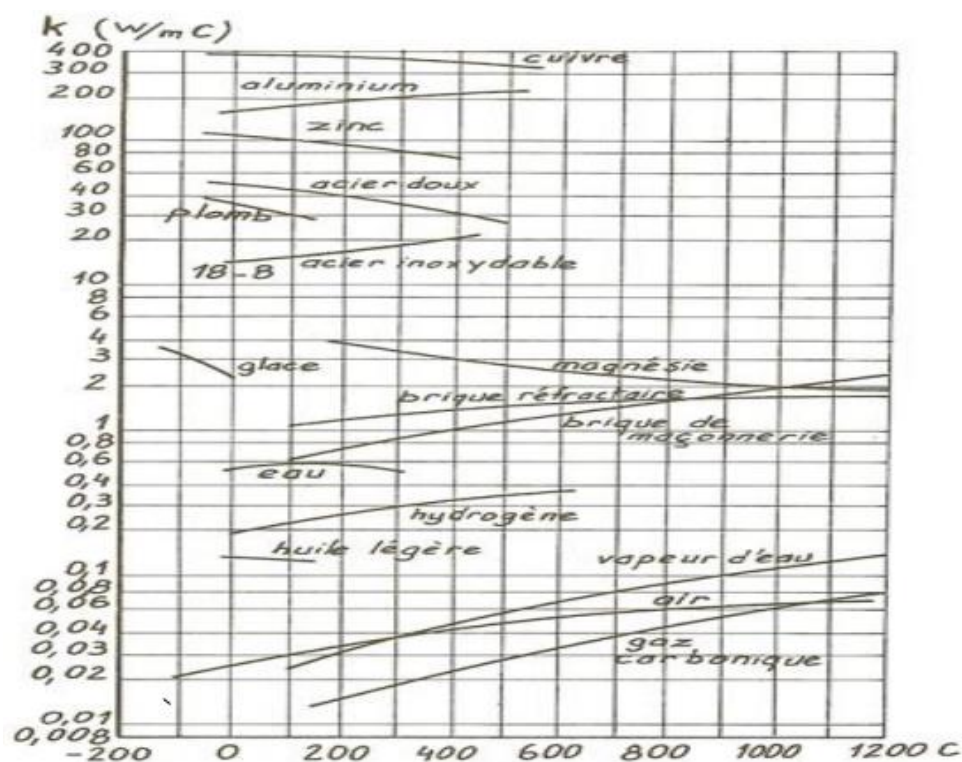


Figure II. 2 : Variation de la conductivité thermique en fonction de température

II .4.2. Loi de Newton (Transfert de chaleur par convection)

La convection thermique caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide. Donc gaz ou liquide, dont les molécules sont en mouvement. On distingue généralement deux types de convection : convection naturelle et convection forcée [15].

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

La convection forcée est créée par circulation forcée du milieu réfrigérant, par exemple par le soufflage d'air d'un ventilateur sur la surface à refroidir. Ainsi une pièce qui est traitée superficiellement et qui se déplace est touchée par un courant d'air à cause de sa vitesse de déplacement [13] [28].

La quantité de chaleur évacuée à partir d'une surface d'un solide vers un fluide peut être exprimée par la loi de Newton [28].

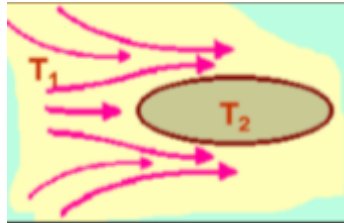
$$q_{\text{cond}} = h (T_1 - T_2) \quad (\text{II.34})$$

- h : le coefficient d'échange convectif ($\text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- T_1 : la température de la surface considérée

• T_2 : la température du fluide « au large » (suffisamment loin de la surface)

Le coefficient de transfert par convection h dépend des propriétés thermiques de la pièce traitée, de la température, de la vitesse du fluide à la surface ainsi que des propriétés thermiques du fluide environnant.

Le phénomène de la convection intervient quand un fluide circule autour d'un corps solide, les deux corps étant à des température T_1 et T_2 différentes.



Ce phénomène peut se développer naturellement dans un fluide où existe un champ de température non uniforme : c'est la convection naturelle.

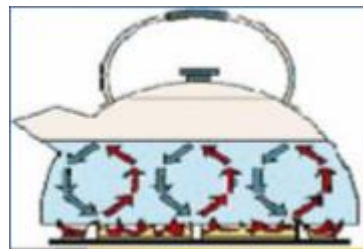


Figure II.3 : Principe de convection de chaleur

II .4 .3. Loi de Stefan-Boltzmann (Transfert de chaleur par rayonnement)

Le transfert de chaleur par rayonnement ou radiation est introduit comme un phénomène de propagation d'énergie électromagnétique causée par la différence de température. Ce phénomène est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann de la radiation thermique qui stipule que les pertes par rayonnement sont contrôlées par la différence des températures (à la puissance 4) ainsi que l'émissivité du corps [17].

$$q_{\text{rad}} = C_s(T) (T_1^4 - T_2^4)$$

Le coefficient de perte de chaleur par radiation ($C_s(T)$) dépend de l'émissivité du matériau (ϵ) qui dépend elle-même de la température, défini de surface et du facteur de forme de la radiation thermique. L'équation de l'échange de chaleur par radiation peut être réécrite sous la forme suivantes [13] [28]:

$$q_{\text{rad}} = \sigma_S \epsilon_{\text{emi}} C_s(T) (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.35})$$

avec

- σ_s : constante de Stefan-Boltzmann ($5,670\,3 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)
- ε_{em} : émissivité, indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau (sans dimension)
- T_1 et T_2 : température du corps (K)

Ce transfert d'énergie n'a besoin d'aucun support pour se faire, il a également lieu dans le vide. Les température T_1 et T_2 des deux corps sont différentes

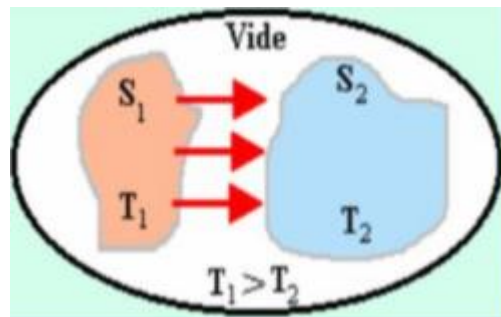


Figure II. 4 : Principe de rayonnement thermique

II .5 L'équation de la chaleur

Considérant un matériau de masse volumique ρ , de volume v limité par un surface S et de chaleur massique p , comportant une source interne de chaleur qui libère une puissance q par unité de volume

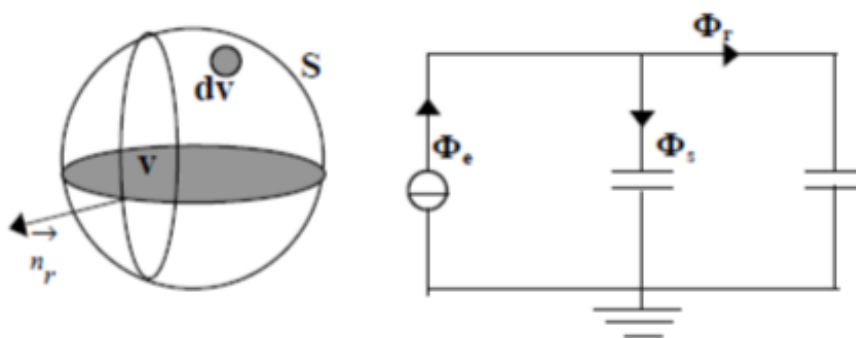


Figure II. 5: schéma équivalent et bilan thermique.

Le flux e émis par la source de chaleur est égal au flux ϕ_s stocké par le matériau, augmenté de flux sortant ϕ_r , exprimé en orientant la normale $\vec{n}_r$ vers l'extérieur le flux généré par la source et donné par l'intégrale.

$$\phi_{\text{généré}} = \int \int_v \int q \cdot dv \quad (\text{II.36})$$

Le flux $d\phi_s$ emmagasiné par un volume élémentaire dv , de masse dm égale à ρdv et de capacité $c_p \cdot dm = \rho c_p dv$, s'écrit :

$$d\phi_s = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (\text{II.37})$$

Ainsi, le flux total stocké dans le volume v est :

$$\phi_{\text{stocké}} = \int \int \int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (\text{II.38})$$

Les pertes correspondent à :

$$\phi_{\text{perte}} = \int \int_s \vec{\varphi} \cdot \vec{n_r} dS \quad (\text{II.39})$$

Le système peut être représenté par le schéma équivalent en surimpression sur la Figure (II.7) et le bilan thermique, $\phi_{\text{perte}} = \phi_{\text{généré}} - \phi_{\text{stocké}}$, peut être formulé de la façon Suivante :

$$\begin{aligned} \int \int \vec{\varphi} \cdot \vec{n_r} dS &= \int \int \int_v q \cdot dv - \int \int \int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad \text{la formule de Green} \\ \int \int \vec{\varphi} \cdot \vec{n_r} dS &= \int \int \int \text{div } \vec{\varphi} dv = \int \int \int_v q \cdot dv - \int \int \int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (\text{II.40}) \end{aligned}$$

Il en résulte que :

$$\text{div } \vec{\varphi} = q - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.41})$$

D'après la loi de Fourier donner précédemment :

$$\text{div } (-\lambda \text{ grad } T) = q - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.42})$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div } (-\lambda \text{ grad } T) = q \quad (\text{II.43})$$

II .6 Propriétés magnéto-thermique

II .6 1. Propriétés électromagnétiques

Les trois propriétés électromagnétiques du matériau mises en jeu dans le procédé de traitement par induction sont : La conductivité électrique (σ), la perméabilité relative (μ_r) et la permittivité diélectrique relative (ϵ_r) [13].

II .6. 1. a. Conductivité électrique

La conductivité électrique (σ) d'un matériau caractérise l'aptitude de ce dernier à laisser les charges électriques se déplacent librement et donc permettre le passage d'un courant électrique. Elle dépend de la température, de la composition chimique, de la microstructure et de la taille de grains [13].

II .6.1. b. Perméabilité magnétique relative

La perméabilité magnétique relative (μ_r) est un paramètre adimensionnel qui indique combien un matériau est plus apte à conduire un flux magnétique que le vide. Elle affecte l'intensité des effets électromagnétiques générés par induction, la conception des inducteurs et le calcul de la distribution du champ magnétique [13].

II .6. 1. c. Permittivité diélectrique relative

Dans cette étude, la permittivité diélectrique relative (ϵ_r) est considérée constante égale à 1. Cette hypothèse n'a aucune incidence sur les résultats puisque les courants de déplacement sont négligeables devant les courants induits dans la pièce [13].

II .6 .2. Propriétés thermiques

Les trois paramètres thermiques nécessaires pour simuler la chauffe par induction sont : La conductivité thermique (k), la chaleur spécifique (C_p) et l'émissivité (ϵ_{emi})

II .6 .2. a. Conductivité thermique

La conductivité thermique (k) représente la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Cette propriété est une fonction complexe de la structure du matériau (du traitement initial appliqué au matériau), de la taille des grains, de la température et de la vitesse de chauffe [16],[13].

II .6.2. b. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique (C_p) représente la quantité d'énergie thermique qu'il est nécessaire de fournir à un corps de 1kg de masse pour élever sa température de 1°C. Elle dépend de la structure du matériau, de la température et de la vitesse de chauffe [16],[13].

II .6 .2. c. Émissivité

L'émissivité (ϵ_{emi}) décrit la capacité d'un matériau à émettre et à absorber l'énergie thermique radiative. Un « corps noir » désigne un corps idéal dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température [16] ,[13].

II .7. Couplage magnétothermique

La simulation du processus du chauffage par induction s'intéresse au couplage des phénomènes électromagnétique et thermique.

II .7.1 Ordre de grandeurs des deux phénomènes

Le temps d'une période du phénomène électromagnétique peut varier de 10^{-2} s pour une fréquence de 100Hz à 10^{-6} s pour une fréquence de 1MHz. En comparant à l'ordre de grandeur d'un pas de temps du phénomène thermique (de l'ordre de la seconde), nous pouvons dire que le temps caractéristique du phénomène électromagnétique est très petit devant le temps caractéristique du phénomène thermique. Donc, le couplage des phénomènes électromagnétique et thermique peut être représenté par un modèle de couplage dit faible. Ce dernier est basé sur une résolution séparée des deux équations régissant ces deux phénomènes.

II .7. 2 Termes de couplage

Etant donné que l'étude du problème magnétothermique dans un chauffage par induction se traduit mathématiquement par la résolution des deux équations de diffusion électromagnétique et thermique. Chacune de ces deux dernières équations influent sur l'autre. Ces deux influences représentent les termes de couplage :

II .7. 2. a Influence de l'équation électromagnétique sur l'équation thermique

La résolution de l'équation électromagnétique permet de déduire la densité de puissance dissipée par effet Joule, cette dernière représente le terme source de l'équation thermique.

II .7. 2. b Influence de l'équation thermique sur l'équation électromagnétique

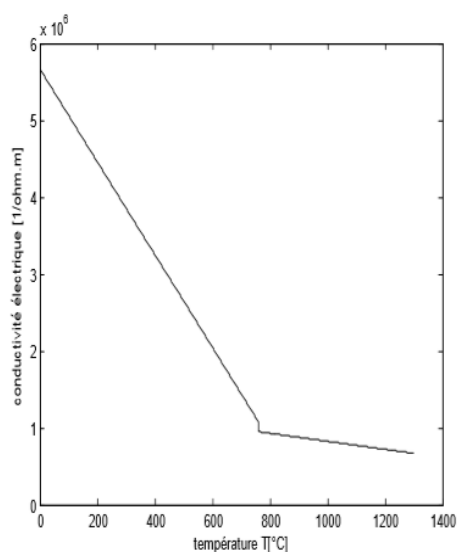
Cette influence est définie par la variation de la conductivité électrique de la charge avec la température. Autrement dit, la résolution de l'équation thermique donne de nouvelles valeurs de la température, à la base de ces dernières, la conductivité électrique est calculée donnant donc une nouvelle équation électromagnétique à résoudre.

II .8. Problèmes de non linéarités

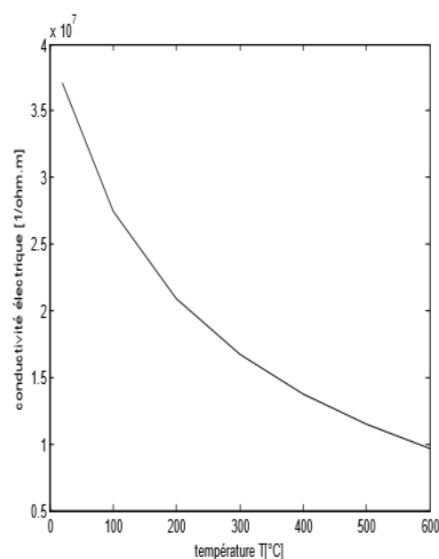
II .8.1 Variation de la conductivité électrique avec la température

La conductivité électrique est en fait la propriété caractéristique de chaque corps. Elle représente la facilité du passage des électrons à travers ces corps. Une caractéristique plus importante des métaux est la variation de la conductivité en fonction de la température.

Lorsque la température d'un métal augmente, l'agitation de ses atomes s'accroît. L'opposition au déplacement des électrons (courant) augmente parce que les collisions entre les électrons et les atomes se multiplient. C'est ce qui explique la diminution de la conductivité des métaux avec la température.



a- pour l'aluminium



(b) pour l'acier ST 44-3

Figure II. 6 : Variation de la conductivité électrique avec la température

A ce stade, différentes expressions pour l'évolution de la conductivité électrique en fonction de la température peuvent être trouvées dans la littérature. Par exemple, dans figure II.6 les auteurs proposent deux expressions différentes suivant qu'il s'agisse du cuivre ou de l'acier ST44-3. Le cuivre est approximé par une fonction polynomiale du 3^{eme} degré alors que l'acier est approximé par une fonction affine dont les paramètres changent au passage de la température de Curie. La référence [26] propose également une fonction affine pour un acier mais sans changement de paramètres. Ainsi on peut trouver différentes caractéristiques de la conductivité en fonction de la température selon la nature du matériau étudié.

II .8.2 Variation de la conductivité thermique avec la température

Le comportement des corps face à la propagation de chaleur par conduction est caractérisé par la conductivité thermique k . Elle représente une grandeur thermo physique importante caractéristique pour chaque substance. Elle joue un rôle extrêmement important pour le transfert thermique par conduction. Cette grandeur dépend d'une multitude de facteurs ; la température, la pression, l'humidité, etc.

Dans le cas des solides, le facteur qui influence de plus sur la conductivité thermique est la température. En général, pour les corps solides homogènes, cette dépendance peut être exprimée par une relation linéaire :

$$k = k_0(1 + \beta T)$$

k_0 : Conductivité thermique du corps à la température 0°C

β : Coefficient caractéristique de chaque matériau

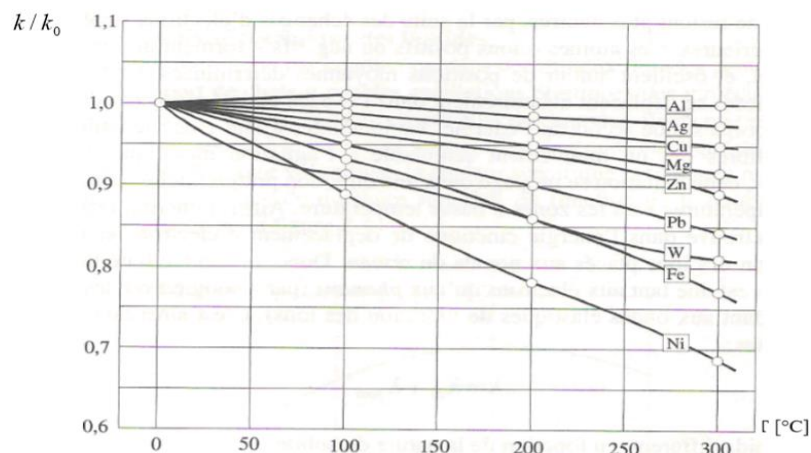
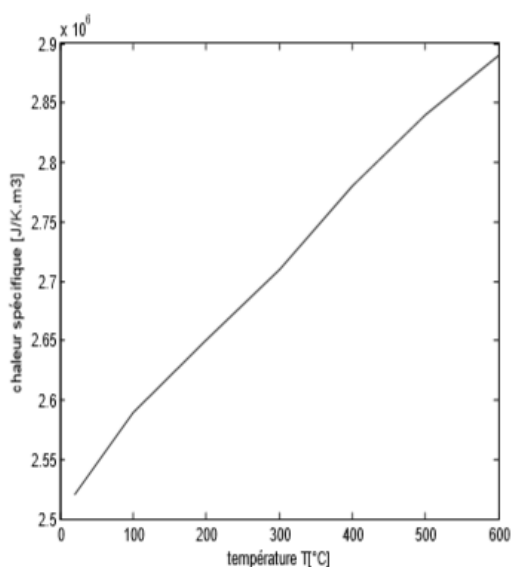


Figure II. 7 : Variation de la conductivité thermique avec la température pour divers métaux purs

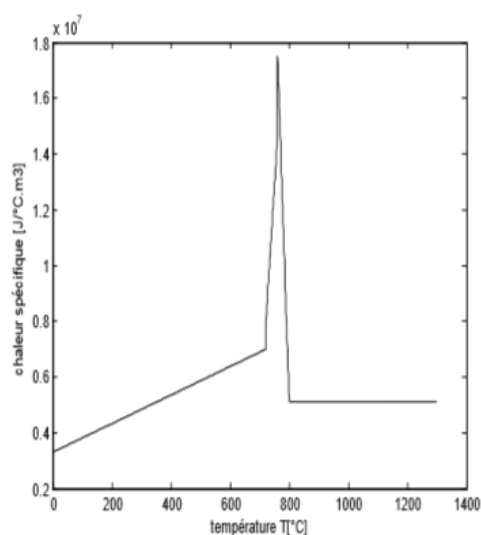
II .8.3 Variation de la chaleur massique avec la température

Si l'on chauffe un corps, on lui fournit de la chaleur et sa température s'élève ; il restitue cette chaleur si l'on abaisse sa température. Le corps a donc une certaine capacité thermique

Cette capacité thermique est le produit de la masse du corps par sa chaleur spécifique. La chaleur spécifique reflète l'aptitude d'un corps à s'échauffer lorsqu'on lui fournit de l'énergie



a- pour l'aluminium



pour l'acier ST 44-3

Figure II. 8 : Variation de la chaleur massique avec la température

Elle dépend en effet de la température (figure II. 9). Cette dépendance varie d'un matériau à un autre.

D'autres types de non linéarité peuvent lors de :

- La variation de la perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques avec le champ magnétique.
- La transition du comportement des aciers au passage de la température de Curie, c'est à dire lorsqu'il passe d'un état ferromagnétique à un état paramagnétique.
- La variation des conditions aux limites thermiques avec la température.

II.9 Méthodes de résolution

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles, obtenues des modèles électromagnétiques et thermiques.

II.9.1. Méthodes analytiques

La résolution analytique permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples. À titre d'exemple on peut citer les travaux qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles par la méthode de séparation des variables.

II.9.2. Méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations de chauffage par induction pour des géométrie plus variées. L'essor de l'informatique, dans les années 50, a permis de mettre au point plusieurs méthodes numériques dans le domaine de l'électromagnétisme. Celles-ci sont d'autant plus utilisées que les configurations à traiter sont complexes que ce soit du côté géométrie ou phénoménologiquement hétérogène et non linéaire [22].

Les méthodes numériques les plus connues sont :

- Méthode des intégrales de frontières (MIF).
- Méthode des volumes finis (MVF).
- Méthode des différences finis (MDF).
- Méthode des éléments finis (MEF).

II.9.1.1 Méthode des différences finis (MDF)

C'est la méthode la plus ancienne, connue depuis Gauss. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse, permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égales au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées [23].

II.9.1.2 Méthode des éléments finis (MEF)

Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation. Les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue.

La méthode conduit à des systèmes algébriques de grande taille, et par conséquent nécessite une mémoire importante des calculateurs. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important, [25] [24].

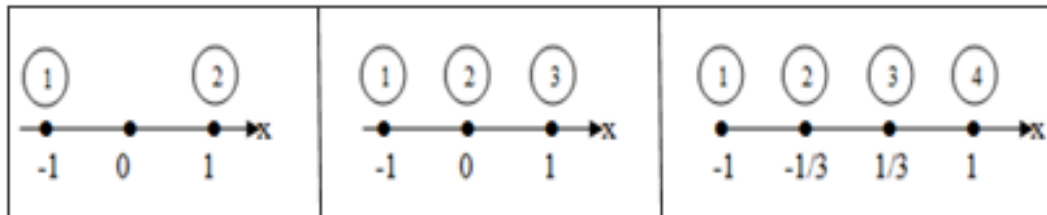
II.9.1.2. a. La discrétisation

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre fini de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément à l'aide 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 relatifs aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodale.

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définis selon le degré de la courbe d'interpolation qui lui est associée. On rencontre généralement, des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

- **Eléments à une dimension**

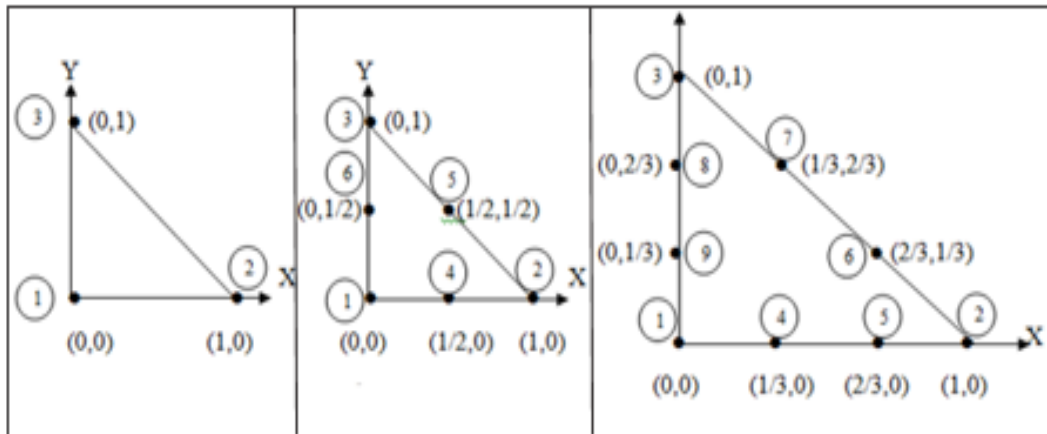


- Linéaire (2 nœuds) - Quadratique (3 nœuds) - Cubique (4 nœuds)

Figure II.9 : Élément à une dimension

- **Eléments à deux dimensions**

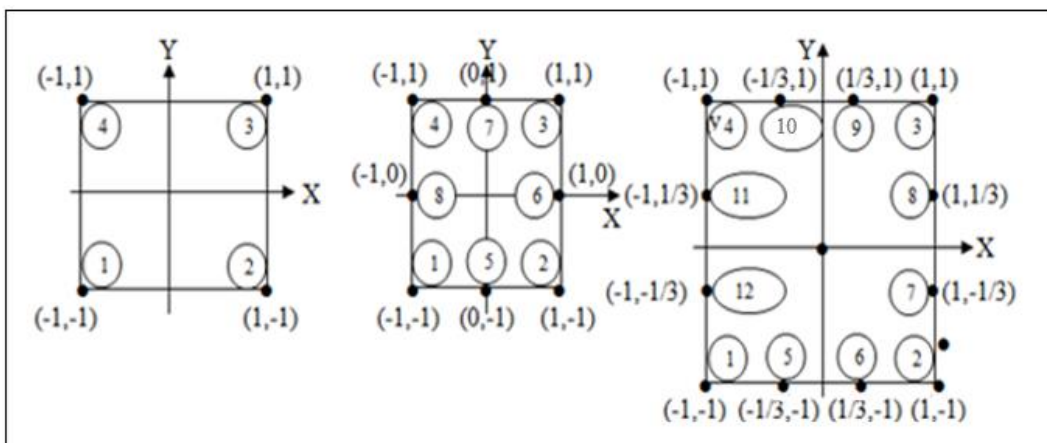
- **Eléments triangulaires**



- Linéaire (3 nœuds) - Quadratique (6 nœuds) - Cubique (9 nœuds)

Figure II.10 : Élément triangulaire à deux dimensions

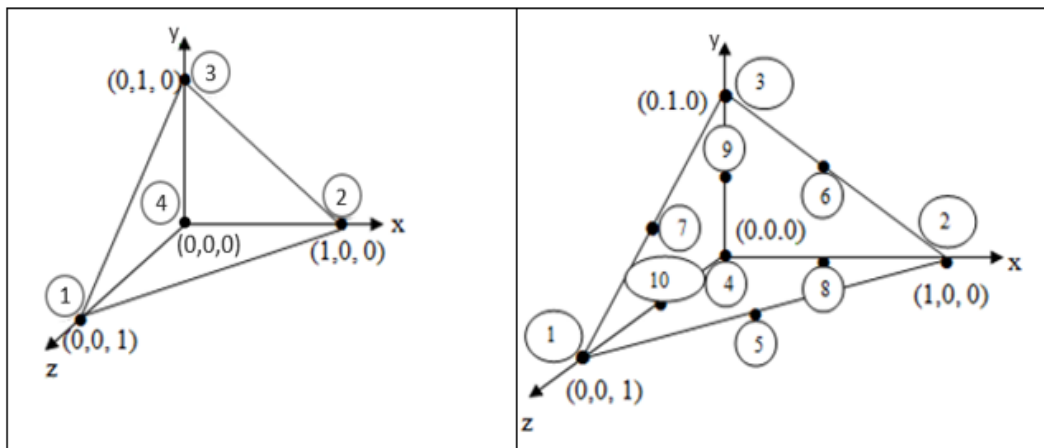
- **Eléments carrés**



- Linéaire (4 nœuds) - Quadratique (8 nœuds) - Cubique (12 nœuds)

Figure II.11 : Élément carré à deux dimensions

- **Eléments à trois dimensions**



- Linéaire (4 nœuds)

- Quadratique (10 nœuds)

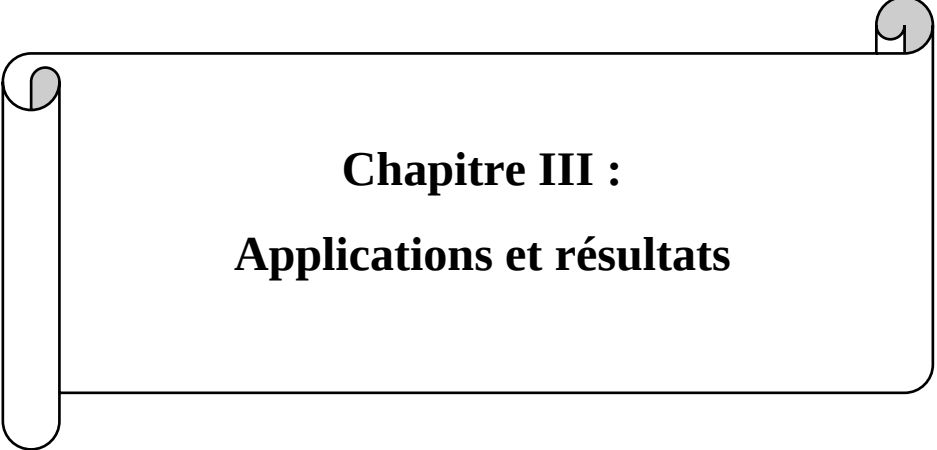
Figure II.12: Eléments à trois dimensions

II.10. Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques et thermiques présent dans les dispositifs de chauffage par induction.

Les modèles électromagnétique et thermique ont été établis dans leur forme générale.

A la fin, nous avons présenté un aperçu sur les méthodes numériques de résolution des phénomènes magnéto-thermique.



Chapitre III :

Applications et résultats

III.1. Introduction

Le chauffage par induction se pose sur le principe de l'induction électromagnétique de Faraday. Les courants de Foucault créés dans la pièce concernée font chauffer cette dernière. Les pertes générées par les courants de Foucault sont en fonction des matériaux et des dimensions de la pièce à chauffer. Le développement des logiciels de calcul numérique contribue considérablement dans la simulation des pertes par courant de Foucault et les simulations du couplage magnéto-thermique pour les déterminations de la température associée. Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation numérique de deux dispositifs de chauffage par induction ainsi que les résultats associés.

III.2. Application I : Soudage par induction des anneaux de court-circuit des moteurs asynchrones à cage

III.2.1. Présentation de l'entreprise Electro-Industries

L'entreprise Electro-Industrie est d'une superficie de 45 Ha est située sur la route nationale N°12, distante de 30 Km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou, et à 8 km de la commune d'Azazga.



Figure III. 1: Logo de l'entreprise Electro-Inductrice

Electro-Industries est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des moteurs électriques, alternateurs, transformateurs de distributions et groupes électrogènes.

En matière de qualité, Electro-Industrie dispose de ses propres laboratoires d'essais et de mesures, de ses produits ainsi pour le contrôle de principaux matériaux utilisés dans sa fabrication. Les différentes valeurs d'essais et de mesures sont consignées sur des procès-verbaux et des cartes de contrôles.



Figure III. 2: Vue satellitaire du site de l'entreprise

Les produits Electro-Industries sont réalisés et contrôlés suivant les normes DIN (Degrés de protection des moteurs électriques), VDE (règlement relatif aux machines électriques) et sont conformes aux recommandations européennes CE et aux normes internes sévères préconisées par le donneur de licence Siemens. Le niveau de leur qualité a été approuvé par la clientèle locale (Sonelgaz, Enmtp, Eniem, Kahrif...etc) et étrangères (Russie, Pays Africains, Le Sénégal, Le Mali... etc).

La capacité de production des transformateurs de cette entreprise couvre les besoins du marché national à 70% environ. Les ventes de moteurs représentent 30% environ de sa capacité de production. Il est à signaler qu'Electro-Industries est le seul fabricant de ces produits en Algérie. L'entreprise a procédé à la mise en place de son système qualité en 2002 et a été certifiée par QMI canada le 24.7.2004, ISO 9001 versions 2000 [3].

III.2.2. Présentation de l'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique

L'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique (UMAGE) s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes ainsi que les générateurs électriques. L'UMAGE se compose de différents ateliers :

- Ateliers de découpage.
- Ateliers de moulage sous pression.
- Ateliers d'usinage.
- Ateliers de bobinage.
- Ateliers de montage.

Nous avons effectué notre stage de fin d'études dans l'unité moteurs électriques sous la direction d'un ingénieur d'état en électrotechnique avec qui nous avons pu assister aux différentes étapes de fabrication des moteurs asynchrones. Puis nous nous sommes focalisés sur le processus de soudage par induction des anneaux des moteurs asynchrones à cage.

III.2.3. Soudage par induction des anneaux de court-circuit

Le soudage par induction est la méthode la plus utilisée pour le brasage des cages d'écureuil dans les moteurs asynchrones. Les fréquences de 3 à 10 kHz sont généralement utilisées dans le soudage de rotors relativement grands (diamètre supérieur à 200 mm).

Si la largeur de l'anneau dépasse son épaisseur, des inducteurs plats à un ou deux tours avec concentrateur sont utilisés à la place des inducteurs encerclant. Pendant l'opération de soudage, le rotor est mis debout au-dessus de la l'inducteur. L'entrefer entre l'inducteur et l'anneau doit être minimal et constant.

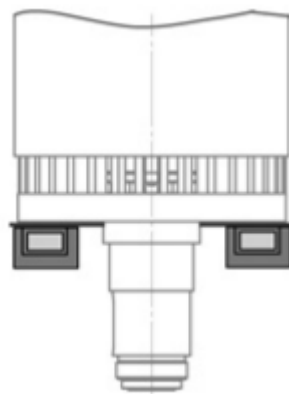


Figure III. 3 : schéma représente l'inducteur avec le rotor

III.2.4. Processus de soudage

Le soudage par induction des anneaux de court-circuit suit généralement les étapes listées ci-dessous :

1. L'anneau de court-circuit est placé sur l'inducteur entre lesquels existe un isolant thermique.
2. Le rotor est placé verticalement avec les extrémités des barres positionnées dans la rainure de l'anneau.
3. Une matière de soudage est placée dans la rainure entre les extrémités de la barre.
4. L'anneau est chauffé à 850°C pour les anneaux en cuivre.
5. La soudure fond, s'étend sur toute la rainure et mouille les extrémités des barres.
6. Après refroidissement, une connexion de soudure fiable est formée.

7. Ensuite, le rotor est retourné et le processus se répète de la même manière pour le deuxième anneau.

III.2.5. Présentation du dispositif d'étude

Cette étude décrit la simulation du phénomène magnétothermique d'un dispositif de soudage par induction d'anneaux de court-circuit. Deux configurations ont été considérées. La première est tirée d'un article scientifique pour servir de référence tandis que la deuxième concerne la simulation du dispositif utilisé pour le soudage dans l'entreprise Electro-Industries. La Simulation des phénomènes électromagnétique et thermique a été réalisée avec les modules du logiciel Ansys permettant de la distribution de la température à 3 kHz pour la première configuration et 10 kHz pour la deuxième.

Les dimensions géométriques des deux configurations sont données dans la figure et le tableau ci-dessous :

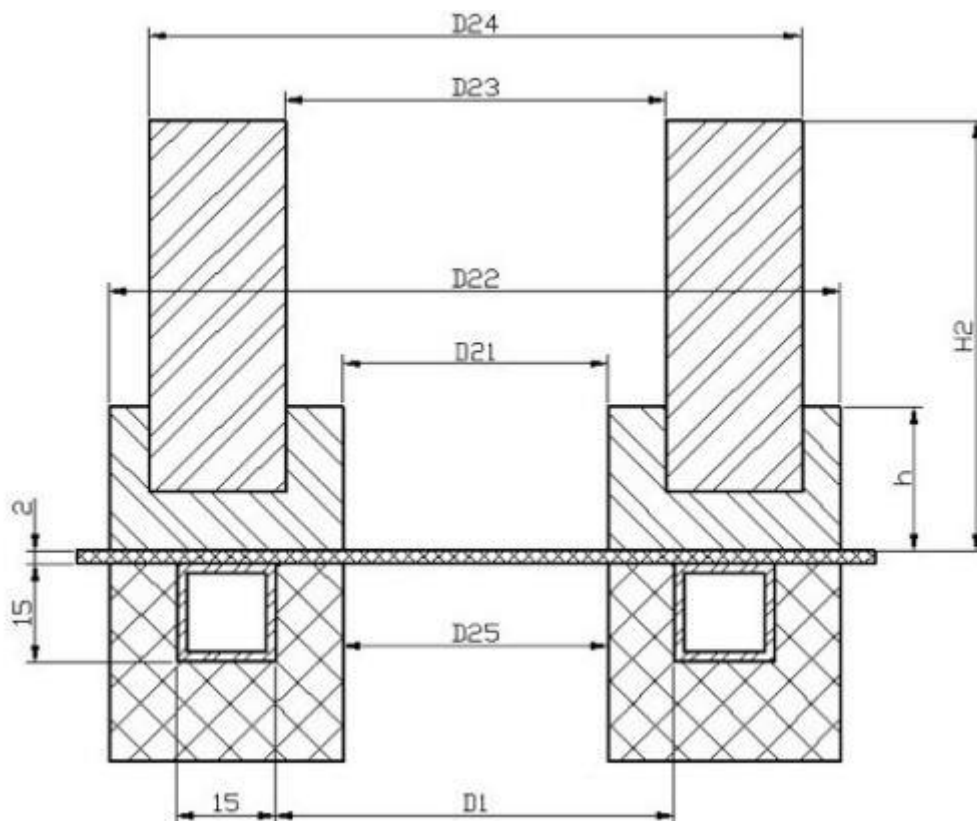


Figure III. 4 : schéma représente les dimensions du rotor avec l'inducteur

La figure (III.5) montre le dispositif de soudage par induction sous l'environnement Ansys Maxwell

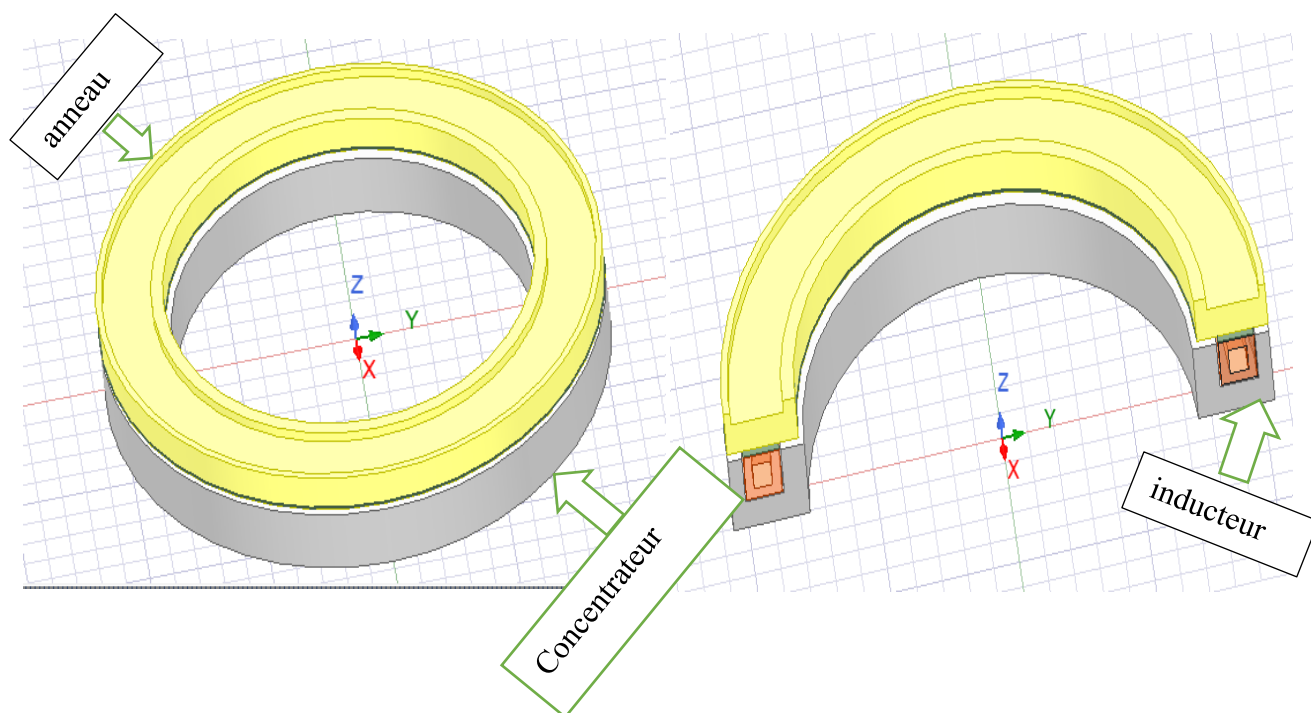


Figure III.5 : système simulé sous l'environnement Ansys Maxwell

Tableau III. 1 : Les dimensions des anneaux, des noyaux et de l'inducteur

N°	Config	D1, mm	D25, mm	D21, mm	D22, mm	D23, mm	D24, mm	h, mm	H2, mm
1	E-1	184.3	169.5	145	215	186.5	219.5	20	348
2	ADT-3 [27]	170	151	155	211	165	206	14	348

III.2.6 :Simulation des phénomènes électromagnétiques

III.2.6.1.Présentation de logiciel Ansys-Maxwell

Ansys-Maxwell est un logiciel qui calcule le champ électromagnétique dans le domaine fréquentiel et temporel, et permet l'analyser le comportement électromagnétique d'une structure. Pour analyser ce comportement en détail, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue des calculs électromagnétiques par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette dernière est basée sur la description géométrique de la structure sous forme d'un maillage. Un projet Maxwell est un

dossier qui contient un ou plusieurs modèles appelés design, chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et les matériaux utilisés, ainsi que les solutions du champ électromagnétique et les interprétations post traitement. Tous ces composants peuvent être atteints par la fenêtre Project Manager dans l'environnement maxwell [9].

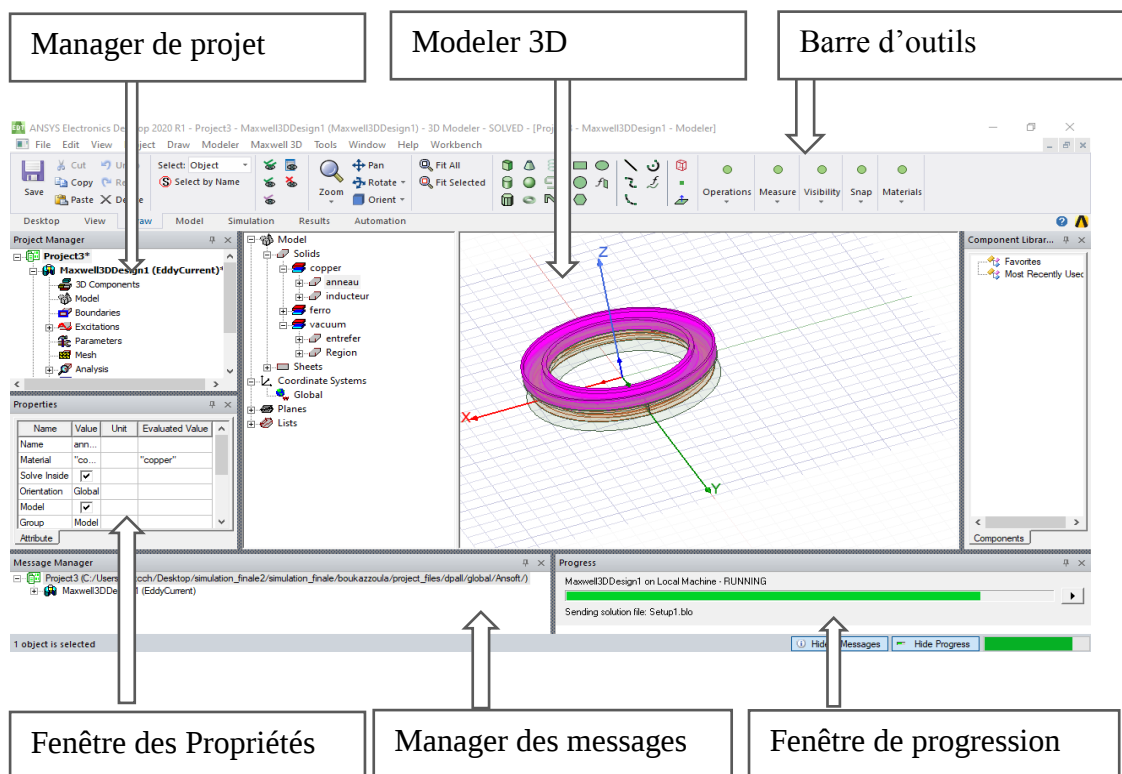


Figure III. 6: l'interface de logiciel ANSYS Maxwell

La fenêtre ANSYS-Maxwell a plusieurs panneaux interactifs :

- ♣ **Le Project Manager:** contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- ♣ **Le Message Manager:** permet l'affichage des messages concernant les simulations
- ♣ **La fenêtre de Propriétés :** permet de changer les paramètres de l'objet ou l'opération sélectionnée.
- ♣ **La fenêtre de Progress:** affiche les progressions de la simulation.
- ♣ **La fenêtre de 3D Modeler:** contient la géométrie du dispositif simulé et son arbre pour la conception active.

III.2.6.2 Le matériau du concentrateur

Le matériau utiliser dans le circuit magnétique du dispositif a une conductivité thermique, une densité de flux de saturation et une résistance à la flexion des plus élevées. Le

Fluxtrol 100 a une perméabilité magnétique anisotrope ce qui lui donne la capacité de favoriser l'induction magnétique dans une direction choisie.

Tableau III. 2: les Propriétés de matériaux utilisé dans le concentrateur

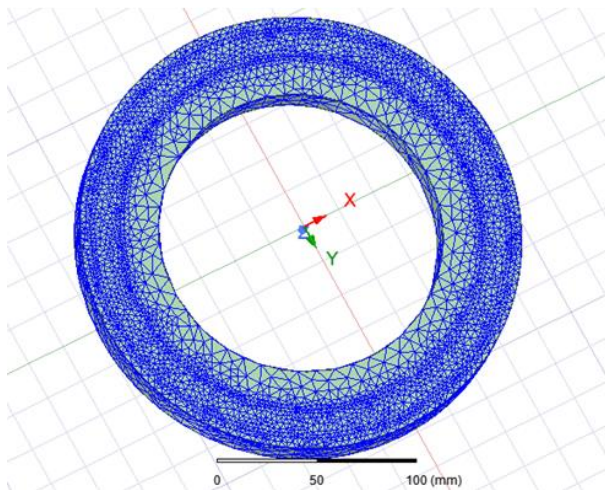
$\mu_r \perp$	None	132
$\mu_r \parallel$	None	55
ρ	$\Omega \cdot m$	2
k	W/m-K	28
C_p	J/g-°C	0.45

III.2.6.3 Résultats électromagnétiques

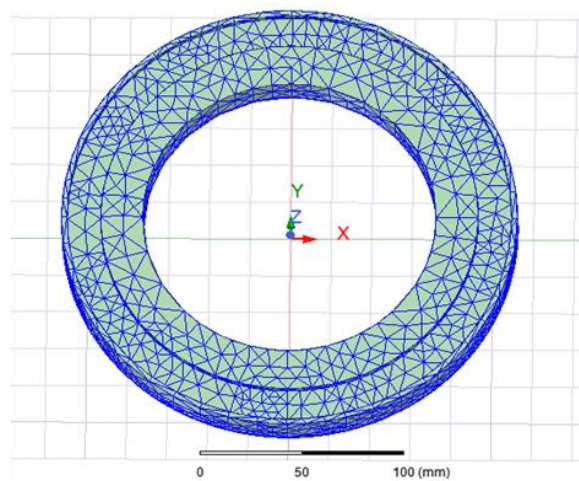
III.2.6.3.1 Maillage

Les figures III.7 et III.8 montrent le maillage des deux faces de l'anneau de court-circuit pour deux cas : avec et sans concentrateur.

- Avec concentrateur



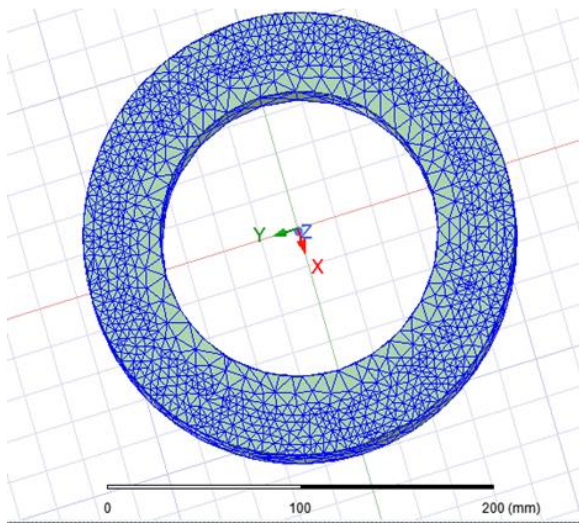
(a) face d'en bas



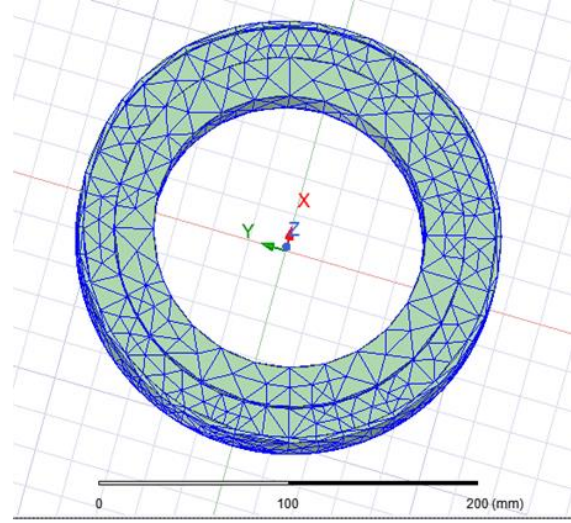
(b) face d'en haut

Figure III. 7:le maillage de l'anneau avec concentrateur

- Sans concentrateur



(a) face d'en bas



(b) face d'en haut

Figure III. 8:le maillage de l'anneau sans concentrateur

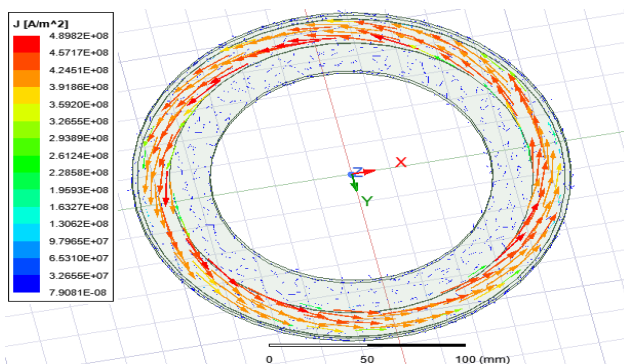
Nous remarquons que le maillage est plus dense sur la surface qui est en face de l'inducteur car c'est par cette dernière que le champ pénètre la pièce et que les courants de Foucault sont plus intenses.

Aussi, le maillage est plus important dans les structures avec concentrateur et ce sur le chemin de canalisation des lignes de champ.

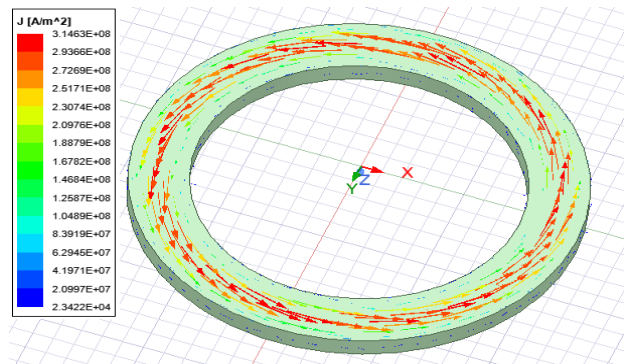
III.2.6.3.2 Distribution des courants induits

Sur les figures III.9, III.10 nous avons la distribution de la densité des courants induits dans les structures d'anneau :

- Avec concentrateur



(a) E-1



(b) ADT-3

Figure III. 9: la distribution de la densité des courants induits dans les anneaux avec concentrateur

- Sans concentrateur

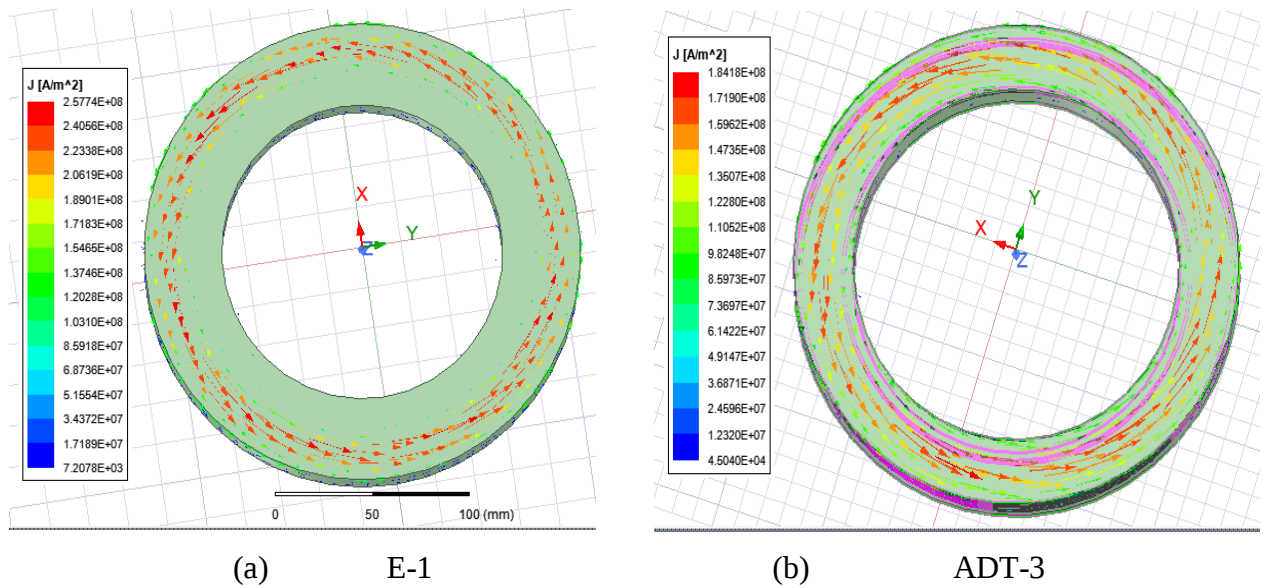


Figure III. 10: la distribution de la densité des courants induits dans les anneaux avec concentrateur

Nous constatons que la distribution des courants de Foucault est uniforme dans la pièce et qu'elle vérifie bien le principe de Lenz. L'intensité des courants induits est plus importante dans les inducteurs avec concentrateur car ce dernier véhicule plus de champ magnétique à l'intérieur de l'anneau.

III.2.6.3.3 Distribution de la densité de puissance

La distribution de la densité de puissance dans les anneaux de court-circuit pour des inducteurs avec ou sans concentrateur est donnée par les figures III.11 et III.12 :

- Avec concentrateur

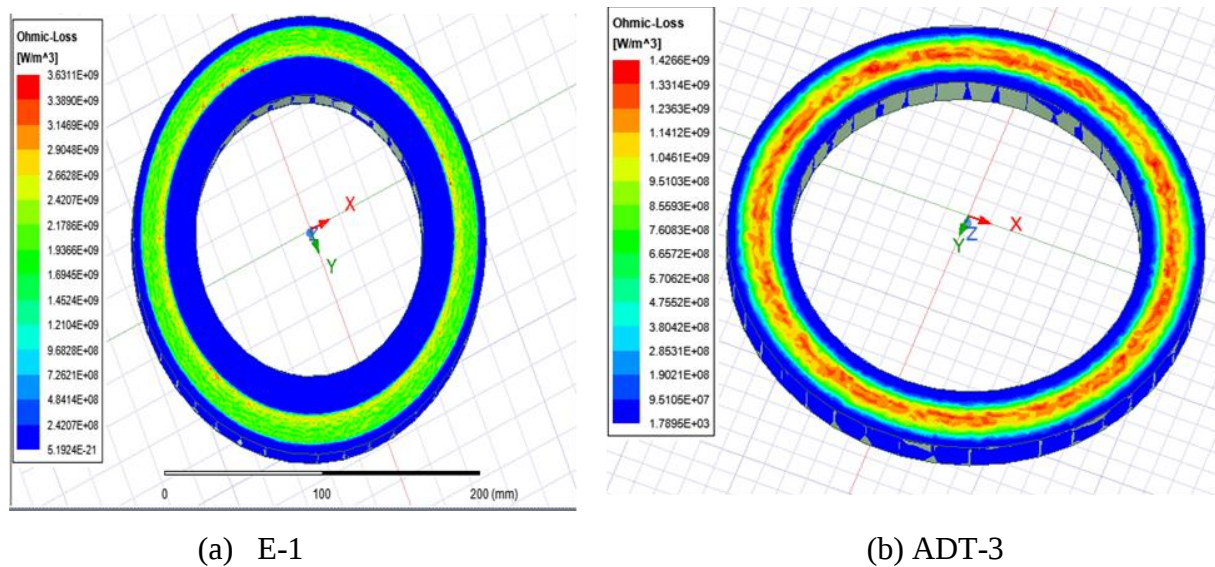


Figure III. 11: La distribution de la densité de puissance dans les anneaux avec concentrateur

- Sans concentrateur

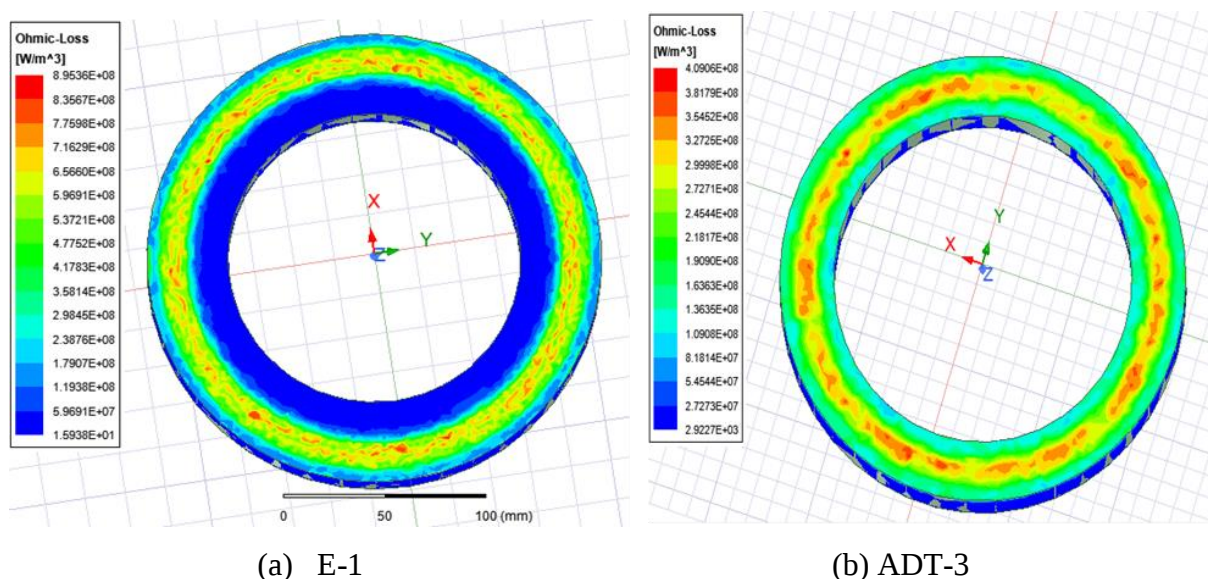


Figure III. 12: La distribution de la densité de puissance dans les anneaux sans concentrateur

III.2.6.3.4 Interprétation de résultat

Nous remarquons que les structures étudiées offrent une très bonne distribution des pertes par courants de Foucault et que les pertes sont plus importantes dans les structures avec concentrateurs car les courants de Foucault sont plus denses dans ces dernières.

III.2.7 Simulation du couplage magnétothermique

Pour simuler le phénomène de couplage magnétothermique nous allons utiliser deux modules du logiciel Ansys. Le premier est Ansys Workbench, une plateforme qui va assurer le transfert des données électromagnétiques vers le deuxième qui s'appelle Ansys Mechanical qui quant à lui va résoudre le problème thermique.

III.2.7.1Présentation d'Ansys Workbench

Le Workbench permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique. C'est à partir de la fenêtre principale du Workbench que vont être créés les fichiers, lancés les logiciels et gérés les interactions entre les différents logiciels utilisés pour la géométrie, le maillage, la simulation proprement dite et le post-traitement.

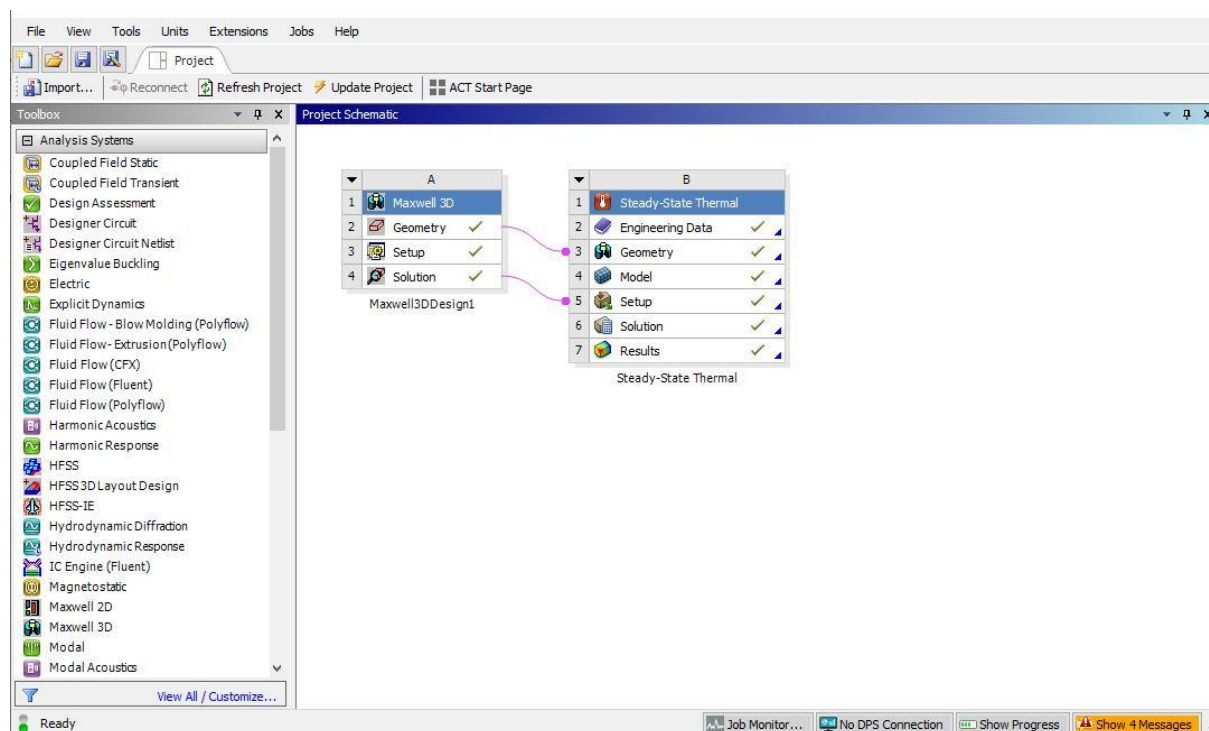


Figure III. 13: l'interface de logiciel ANSYS Workbench

III.2.7.2 Ansys Mechanical

Ansys Mechanical est un outil dynamique qui dispose d'une gamme complète d'outils d'analyse thermique et mécanique. Ce module dispose d'une technologie de résolution numérique performante, fiable et précise et de solveurs pour les problèmes linéaires et non linéaires qui sont très puissants. Dans notre cas nous allons utiliser ce module pour simuler la distribution de la température dans les anneaux de court-circuit.

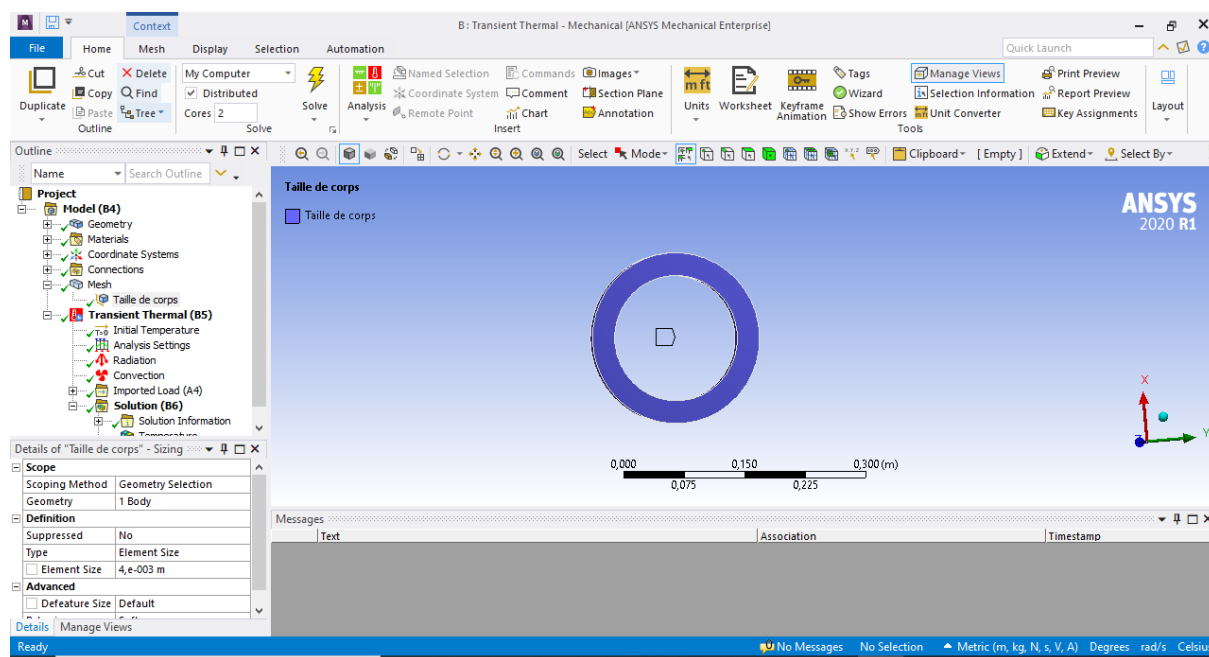


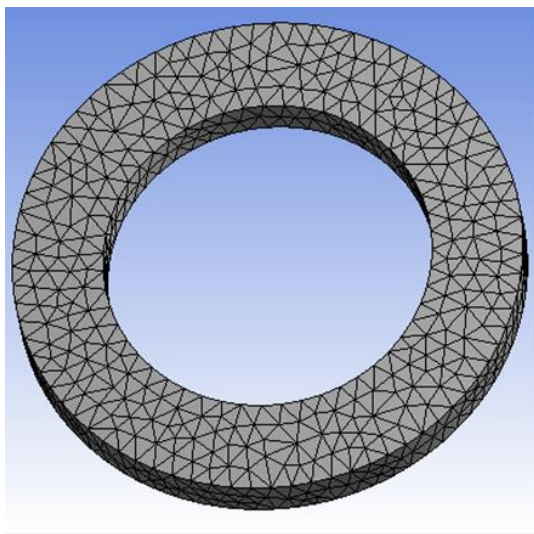
Figure III. 14: l'interface de logiciel ANSYS Mechanical

III.2.7.3 :Résultats thermiques

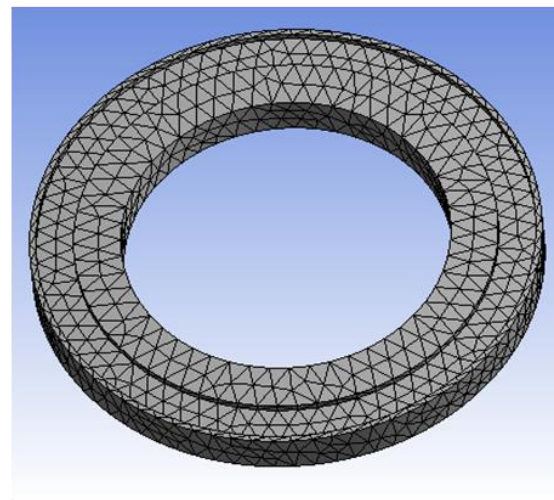
III.2.7.3.1 Maillage

La notion de maillage est la première tâche à accomplir dans une modélisation numérique sous Ansys Mechanical. Il faut œuvrer à obtenir un maillage suffisamment fin pour avoir des résultats précis, tout en gardant un temps de calcul raisonnable.

La génération du maillage se fait en s'appuyant sur la géométrie précédente. Nous définissons d'abord le volume ou les surfaces à mailler puis nous fixons les dimensions des éléments. le module permet de générer un maillage et hexaédrique ou tétraédrique en 3D.

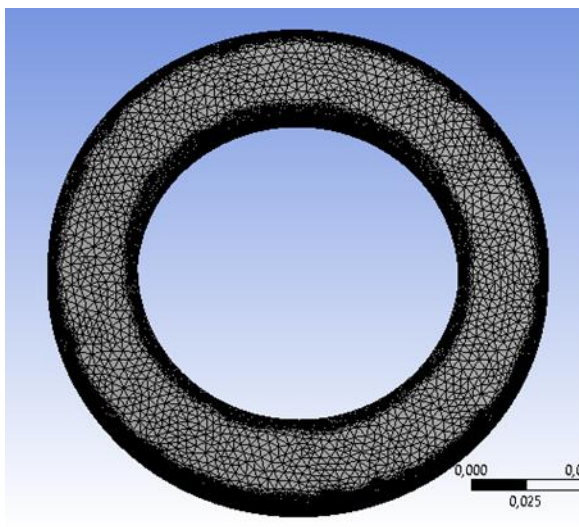


(a) face d'en bas

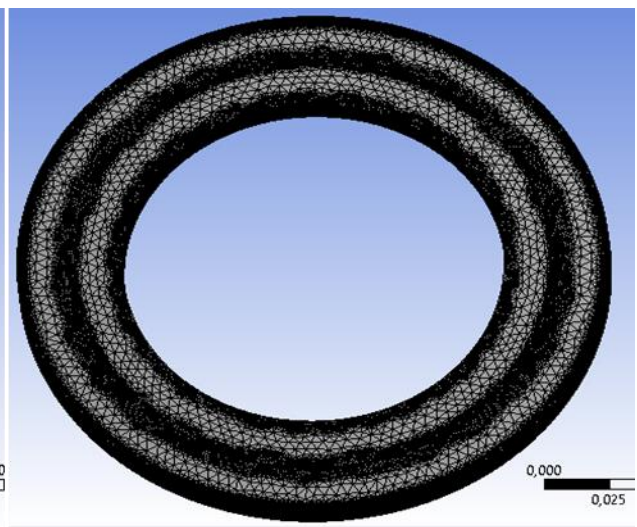


(b) face d'en haut

Figure III. 15: Maillage non raffiné



(a) face d'en bas



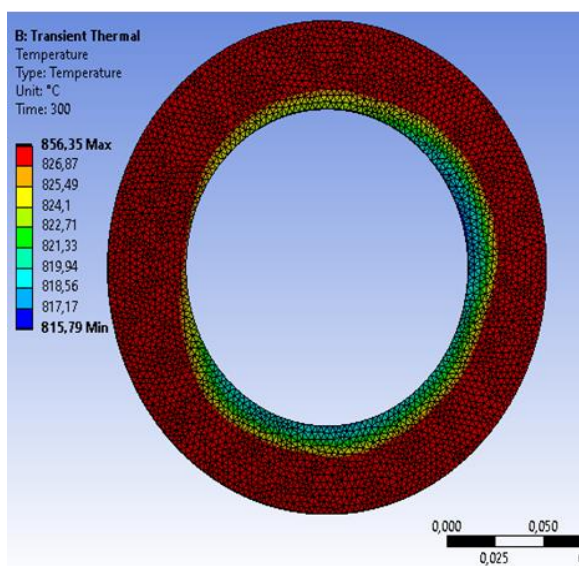
(b) face d'en haut

Figure III. 16:Maillage raffiné

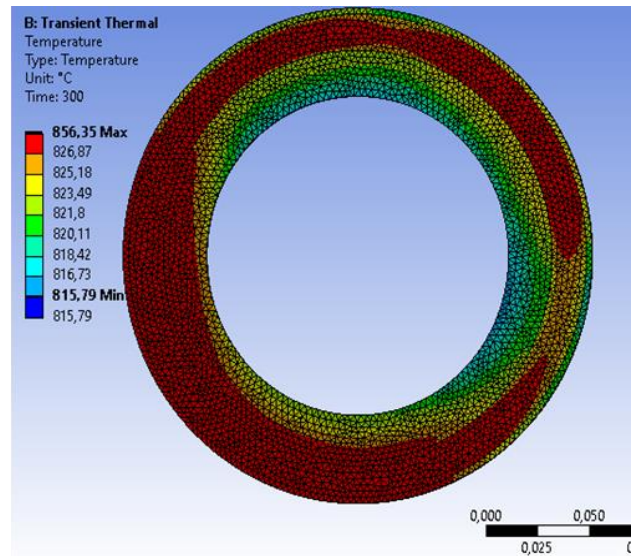
III.2.7.3.2 Distribution de la température

Les figures III.17 , III.18 , III.19 , III.20 montrent la distribution de la température pour les deux types de structures (avec et sans concentrateur).

- Avec concentrateur



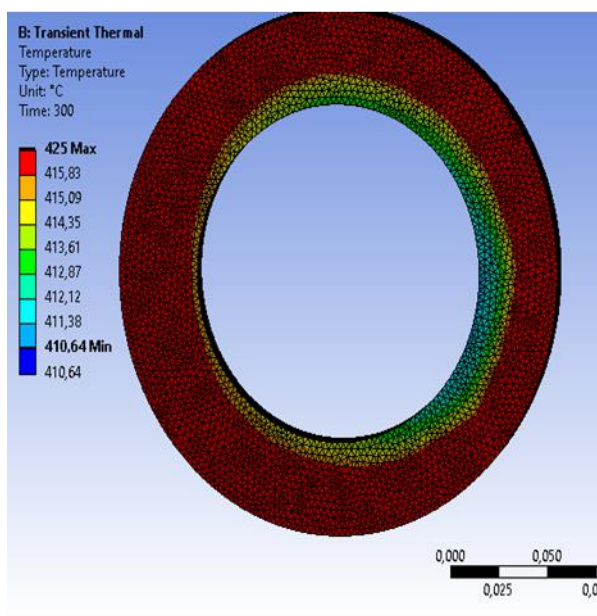
(a) face d'en bas



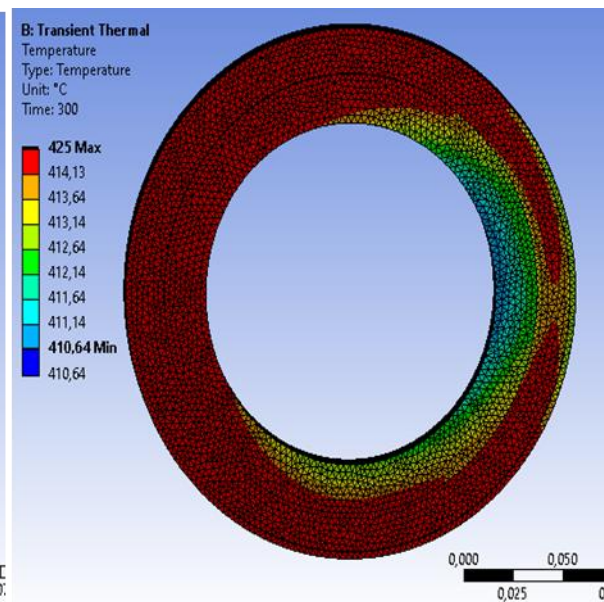
(b) face d'en haut

Figure III. 17:Distribution de la température dans l'anneau E-1 avec concentrateur après 300s de chauffe

- Sans concentrateur



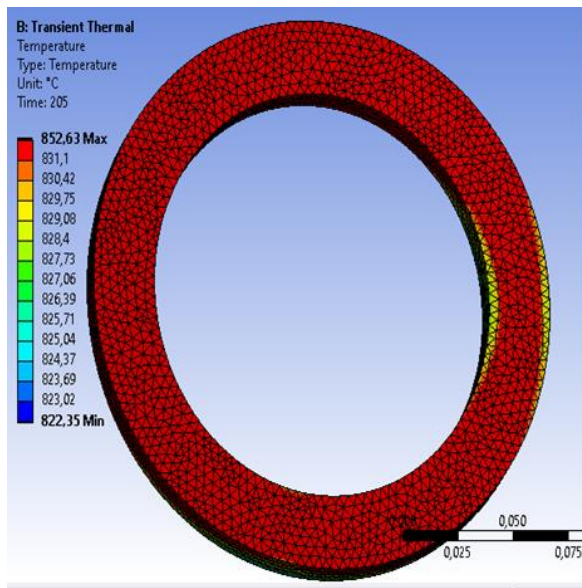
(a) face d'en bas



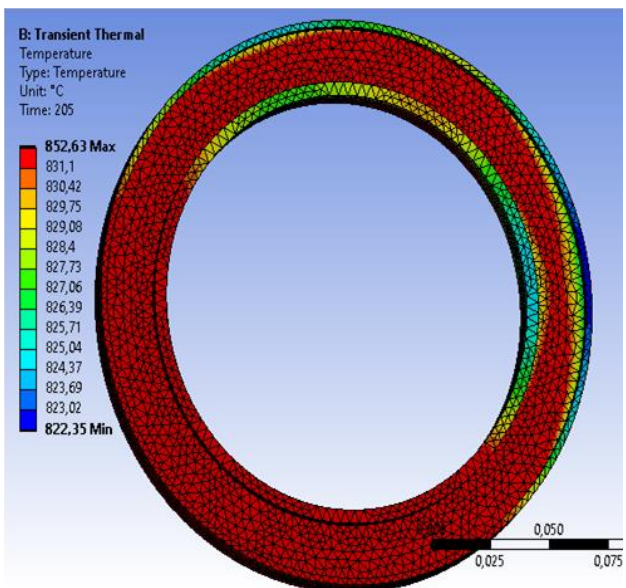
(b) face d'en haut

Figure III. 18: Distribution de la température dans l'anneau E-1 sans concentrateur après 300s de chauffe

- avec concentrateur



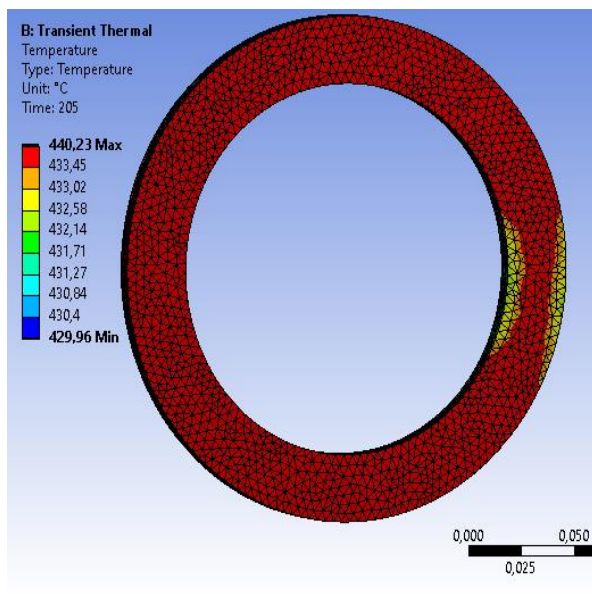
(a) face d'en bas



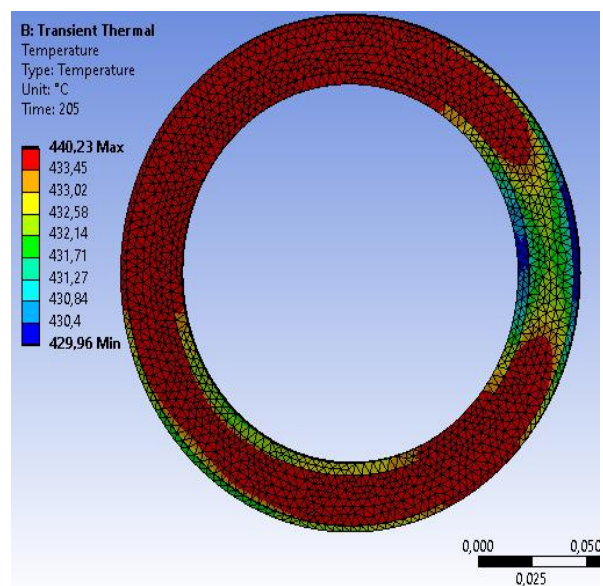
(b) face d'en haut

Figure I. 19: Distribution de la température dans l'anneau ADT-3 sans concentrateur après 205s de chauffe

- Sans concentrateur



(a) face d'en bas



(b) face d'en haut

Figure III. 20: Distribution de la température dans l'anneau ADT-3 sans concentrateur après 205s de chauffe

Nous remarquons que la distribution de la température est uniforme sur les deux surfaces des anneaux et que cette dernière est plus importante dans les structures avec concentrateurs.

III.2.7.3.3 Evolution de la température en fonction du temps

L'évolution de la température en fonction du temps pour la structure étudiée dans l'article [27] et le système de soudage au niveau d'Electro-Industries est représenté dans les figures III.21 et III.22.

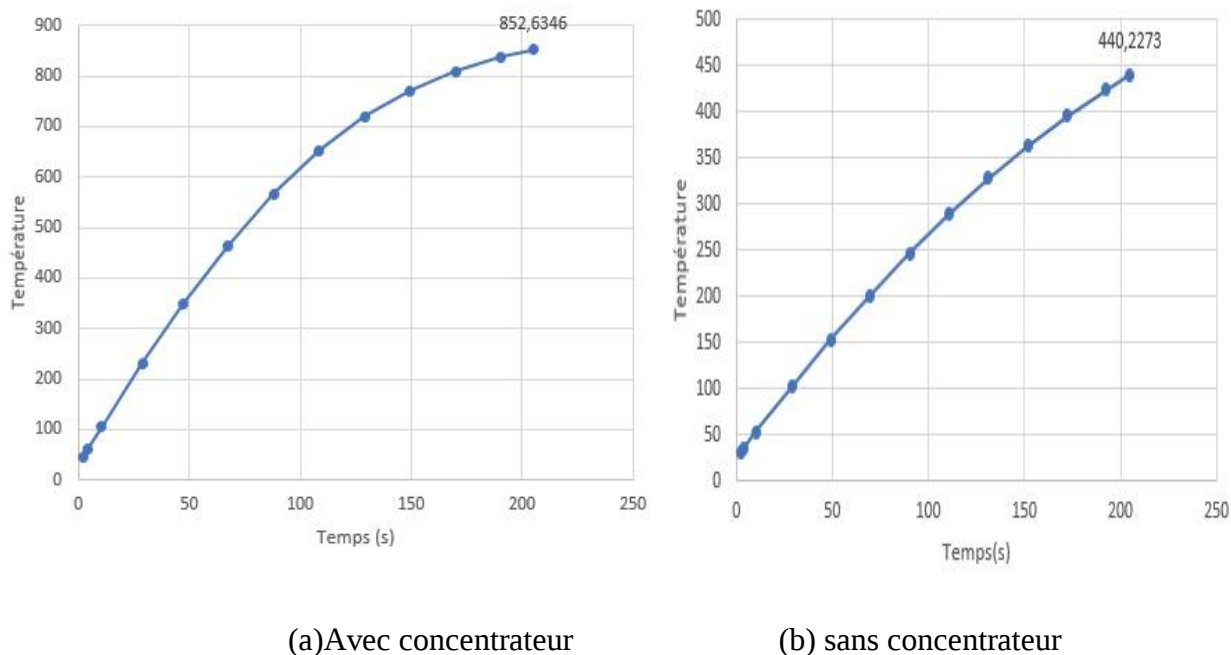


Figure III. 21: L'évolution de la température en fonction du temps de l'anneau ADT-3

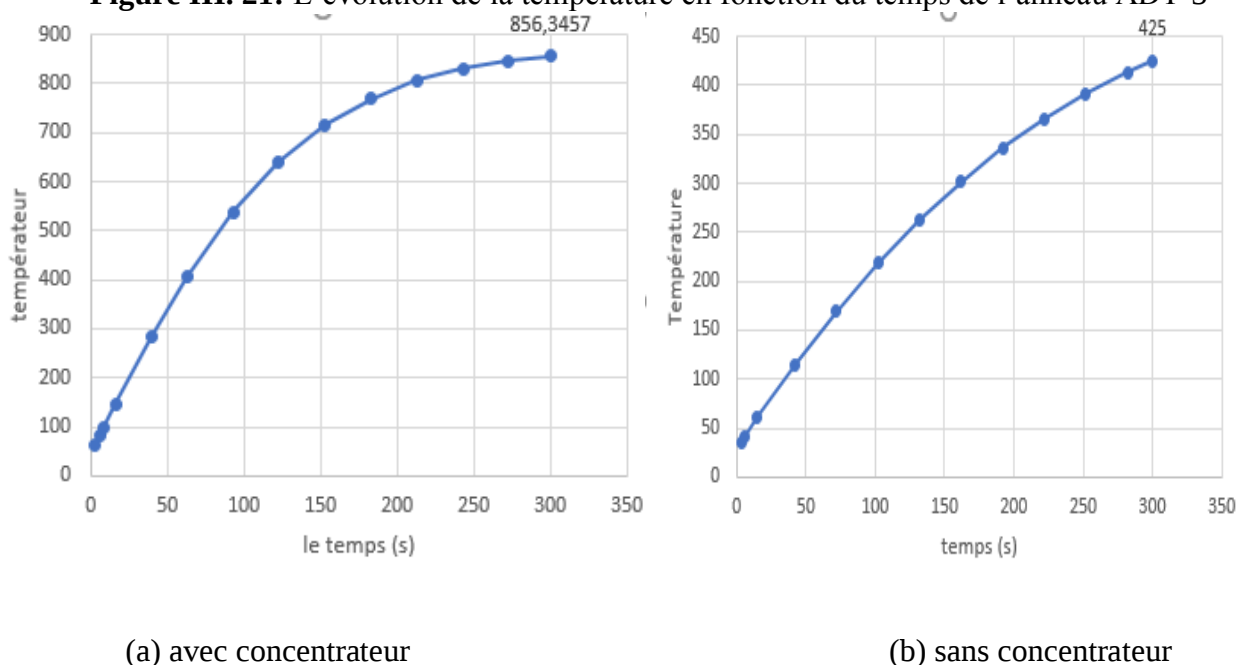


Figure III. 22: L'évolution de la température en fonction du temps de l'anneau E-1

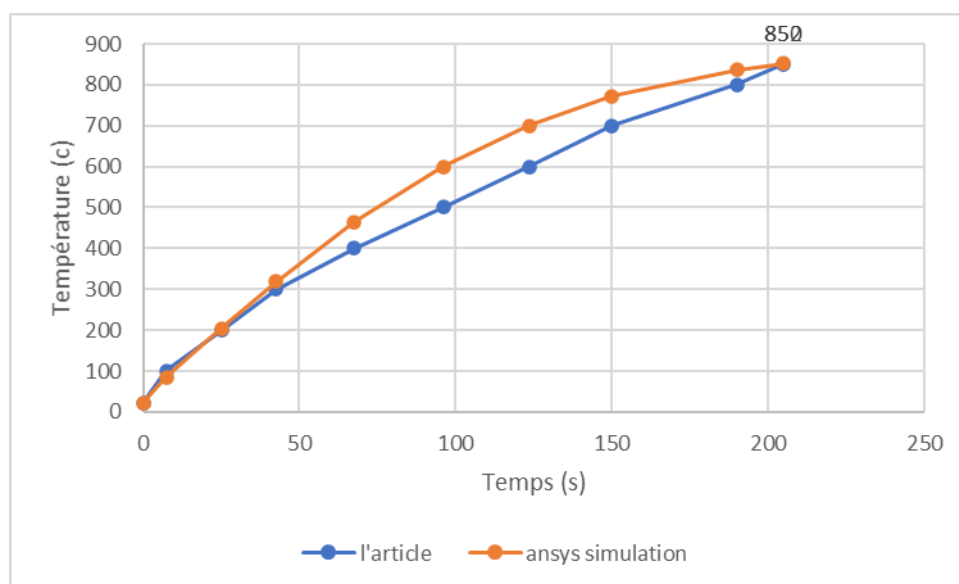


Figure III. 23 : Comparaison entre les résultats de l'article [27] et de ceux de simulation

Nous remarquons que pour les deux structures la température atteint les 850°C qui est la température de brassage du cuivre. Aussi les temps pour atteindre cette température sont en concordance avec ceux qui sont fournies dans l'article (205 s) et au niveau de l'entreprise (300s).

III.3 Application II : Simulation et réalisation d'un système axisymétrique de chauffage par induction

Dans cette application, une modélisation magnétothermique, et une réalisation expérimentale d'un système axisymétrique de chauffage par induction vont être présentées. Pour la simulation des différents paramètres magnétothermiques, nous allons suivre la même procédure que l'application précédente.

Les paramètres géométriques du système sont schématisés sur la figure III.24 et leurs valeurs listées dans le tableau III.3 :

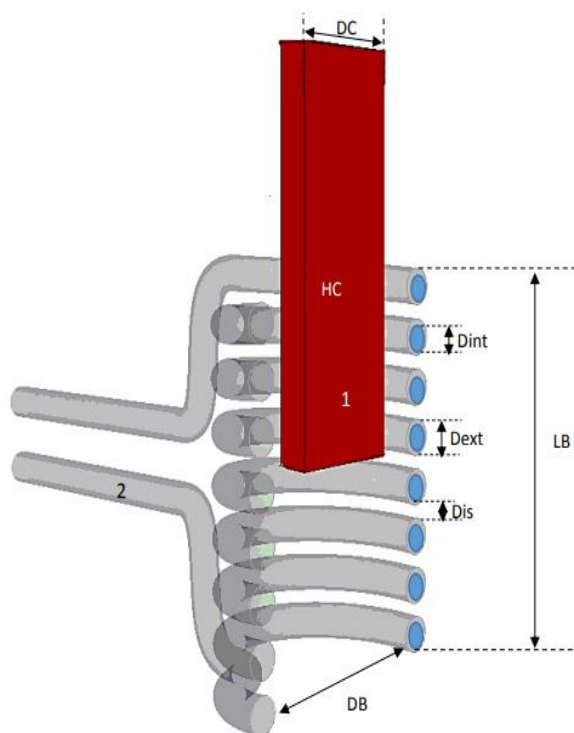


Figure III. 24: Schémas général de l'inducteur et la charge

Tableau III. 3: Paramètres géométrique de l'inducteur

DB	LB	DC	HC	Dis	Ns	Enf
35.25	30.1	6	90	0.87	8	3

III.3.1 Simulation des phénomènes électromagnétiques

La figure III.25 montre la conception du dispositif sous l'environnement Ansys-Maxwell :

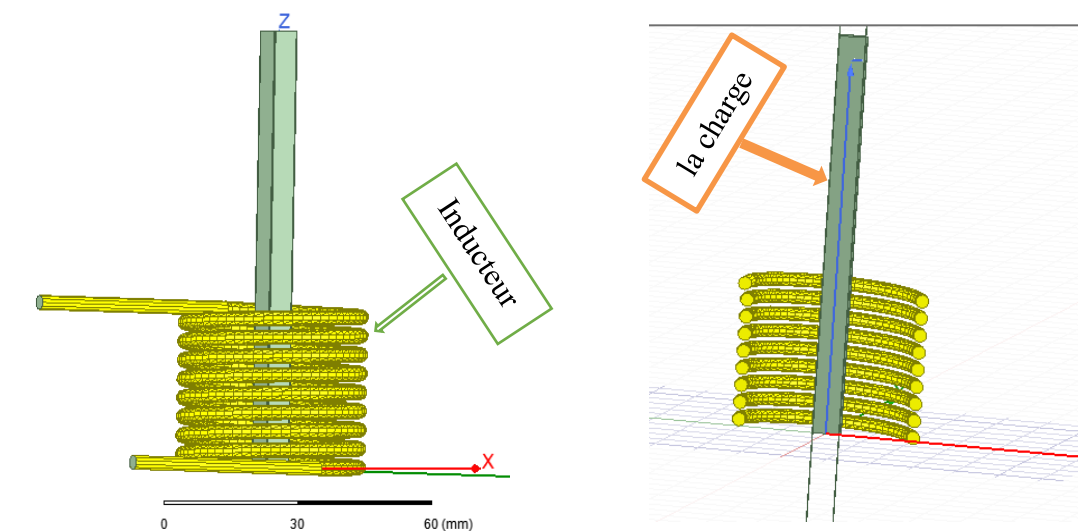


Figure III. 25: Inducteur et la charge sous Maxwell 3D

III.3.2 Maillage

La figure III.26 montre le maillage de la charge à chauffer. Nous remarquons que la densité du maillage est plus intense dans la partie du barreau qui est à l'intérieur de l'inducteur. Cette partie correspond à la partie active où seront créés les courants induits :

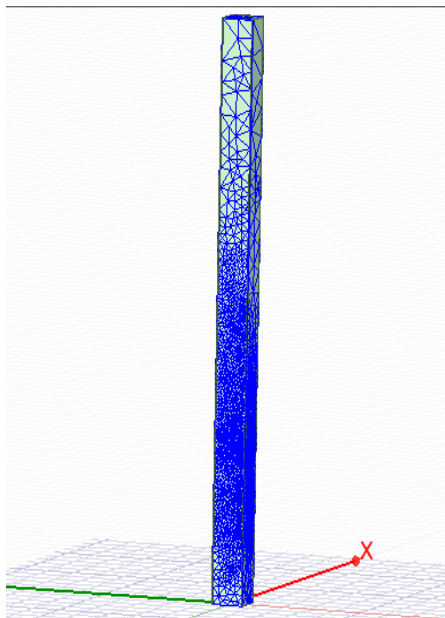


Figure III. 26 : maillage de la charge sous Maxwell 3D

III.3.3 Distribution des courants induits et des pertes joules

Sur la figure III.27, elle est montrée la densité des courants induits dans le barreau à chauffer :

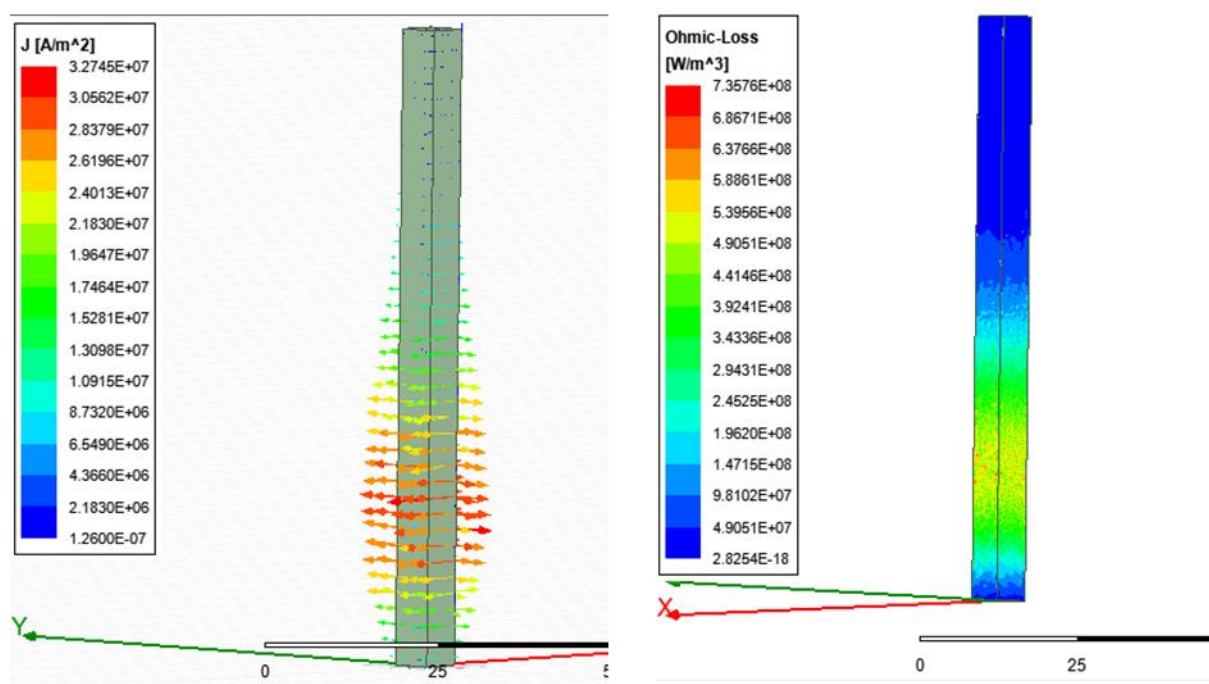


Figure III. 27: Distribution de la densité du courant [A/m²] et puissance active [W/m³]

Nous constatons que la distribution des courants de Foucault est concentrée au niveau de la zone qui se retrouve à l'intérieur de la bobine et qu'elle vérifie bien le principe de Lenz. Cette distribution implique des pertes joules plus importantes dans la zone suscitée comme le montre la figure III.26.

III.3.4 Simulation du couplage magnétothermique

La structure étudiée est transférée vers Ansys-Mechanical pour simuler le couplage magnétothermique et déterminer la température au niveau du barreau.

III.3.4.1 Maillage

La figure III.28 montre le maillage du barreau à chauffer.

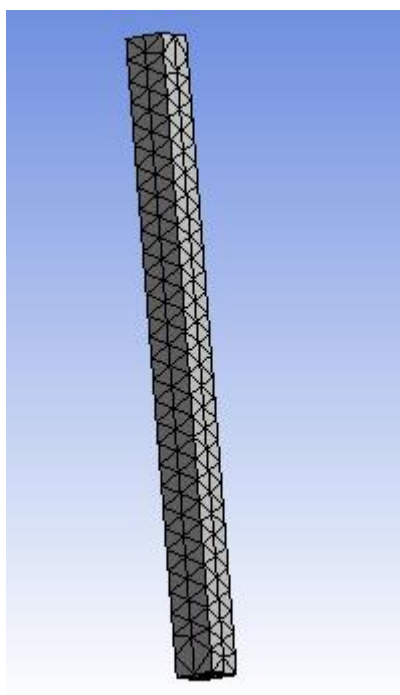


Figure III. 28 : maillage de la charge a chauffer

III.3.4.2 Distribution de la température

Les figures III.29 montrent la distribution spatio-temporelle de la température du barreau.

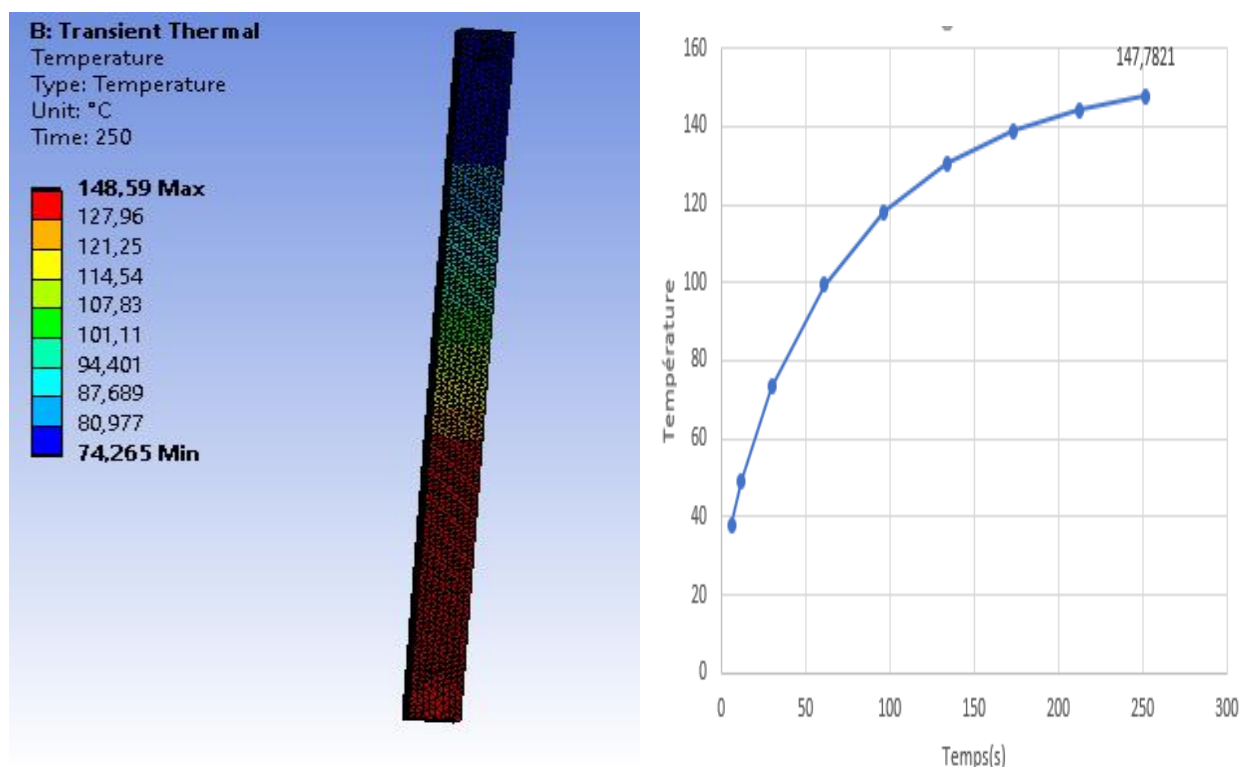


Figure III. 29 : Distribution de la température dans la charge après 250s de chauffe

Nous remarquons que la température est plus importante dans la zone active qui est à l'intérieur de l'inducteur et qu'elle diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de celle-là.

III.4 Dispositif expérimental

Un système d'alimentation est réalisé pour alimenter le dispositif de chauffage par induction décrit dans la section précédente. Le système réalisé comporte une source à courant continu et un onduleur pour la génération d'un signal sinusoïdale à haute fréquence.

III.4.1 Détermination de la fréquence de l'alimentation

L'ensemble alimentation/inducteur est simulé sous l'environnement Isis Protes qui est un logiciel de simulation des circuits électriques.

Dans le circuit considéré, une alimentation continue capable de fournir une puissance de 400 watts alimente l'inducteur à travers un onduleur. Avec une fréquence élevée de 59 kHz et une impédance très faible d'une bobine un courant de court-circuit très important va circuler dans cette dernière ce qui va permettre de générer des pertes par effet Joule considérables dans le barreau.

Le circuit un est un ZVS (zero volt switching). Il présente l'avantage d'osciller automatiquement à partir d'un circuit LC (bobine, condensateur). Les transistors viennent chacun à son tour pour refouler l'énergie perdue par le circuit LC à chaque demi-période. Lorsqu'un transistor est passant, l'autre est forcé de ne pas l'être. Les inductances permettent d'avoir un courant sans interruption durant la commutation, leur valeur exacte n'est pas très importante, pourvu qu'elle soit supérieure à quelques μH et inférieure à quelques mH .

La figure III.30 montre le circuit électrique sous l'environnement Isis Proteus :

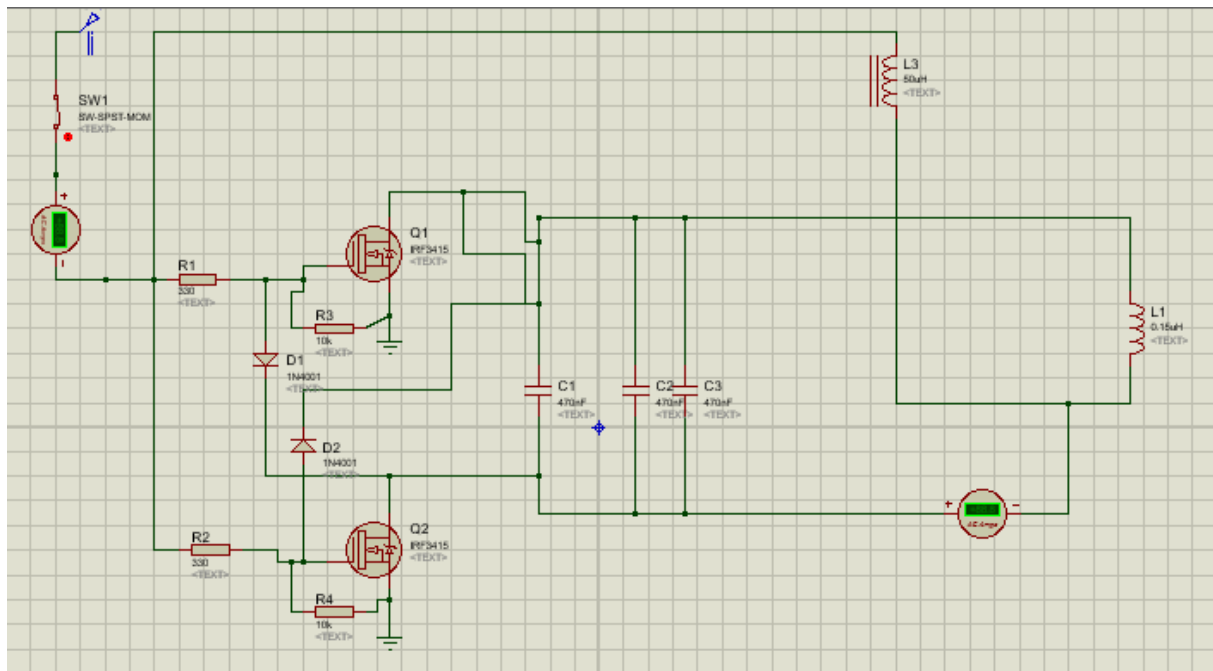


Figure III. 30: Schéma bloc du système étudié sous Isis proteus.

Le dispositif d'étude est montré dans photographie ci-dessous :

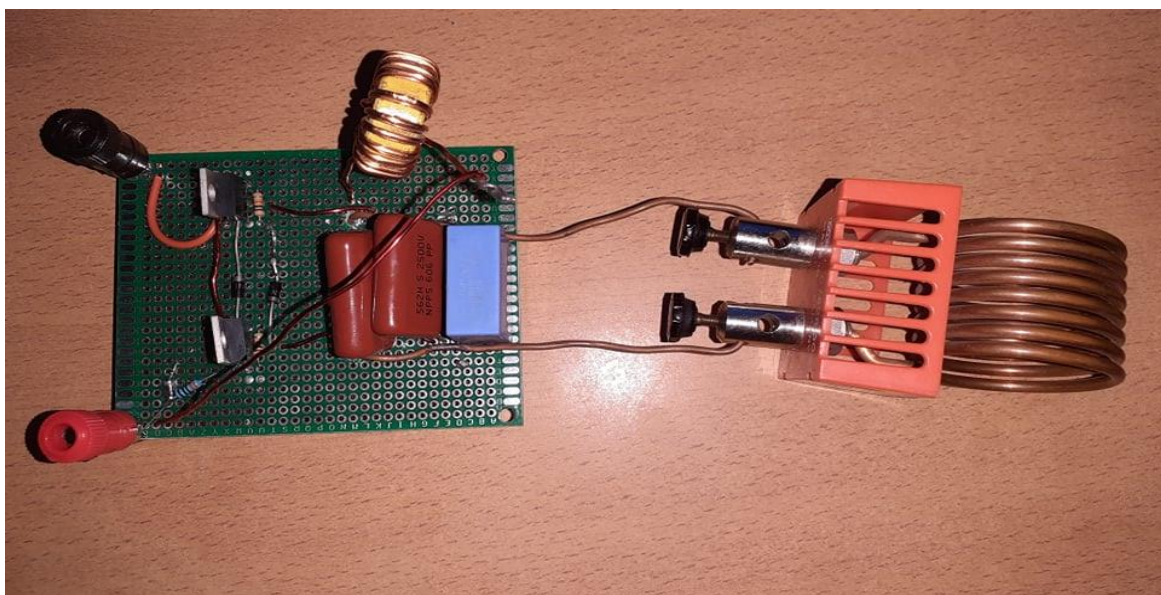


Figure III.31: dispositif du générateur à induction

La mesure de la température a été réalisée par un thermomètre infrarouge industriel. Pour une durée de chauffage équivalente à la durée considérée dans la simulation nous avons obtenu le résultat suivant :

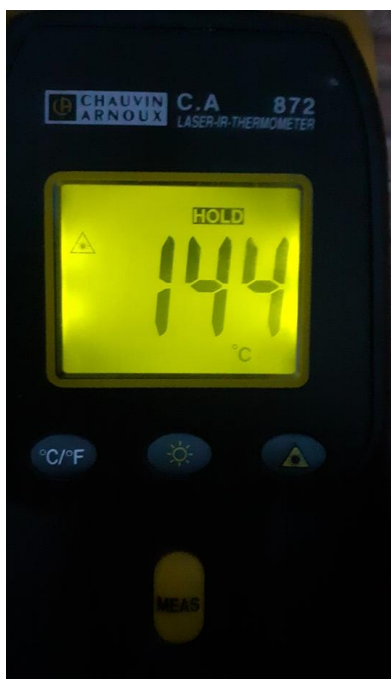


Figure III. 32 : Résultats obtenu lors de l'expérimentation.

La figure III.33 montre l'évolution de température en fonction Temps de la charge deux courbe une représente la variation de température du dispositif expérimental et la deuxième courbe représente la variation de température de simulation sur Ansys.

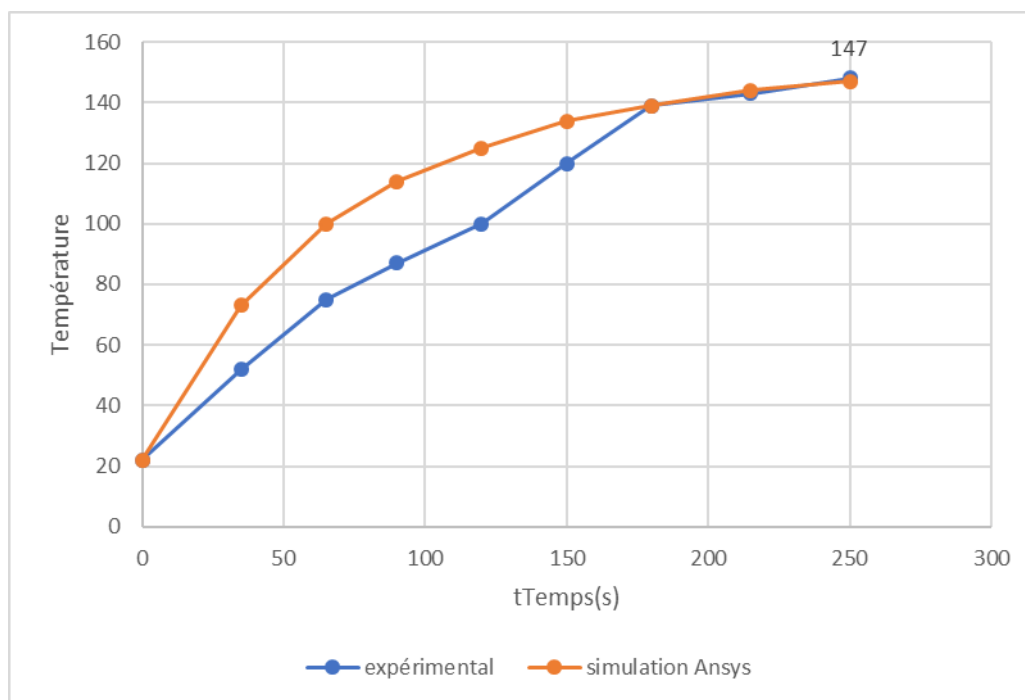


Figure III. 33 : Comparaison entre les résultats de la pratique et les résultats de la simulation

III.4.2 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le comportement de deux dispositifs de chauffage par induction. Dans un premier temps nous avons procédé à la simulation électromagnétique des deux systèmes différents puis nous avons transféré les données dans le logiciel Ansys Mechanical pour simuler avec la technique des éléments finis la distribution de la température dans les différentes pièces chauffées. A la fin une réalisation expérimentale a été effectuée pour le deuxième système afin de servir de validation. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Conclusion générale

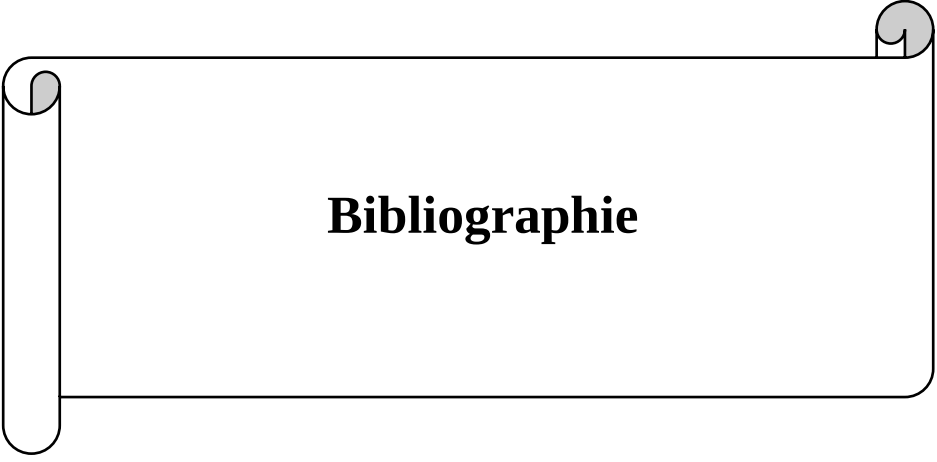
Le chauffage par induction est l'une des technologies d'avenir qui peut contribuer aux développements des procédés industriels. Elle se caractérise par sa capacité d'injecter directement et sans contact physique, de l'énergie thermique dans le matériau à chauffer, conducteur de l'électricité. Elle ouvre un champ d'application très important, exploité dans le domaine du chauffage par induction.

Nous avons au cours de ce travail, étudié les phénomènes électromagnétiques et thermiques dans les dispositifs de chauffage par induction. Nous avons abordé la modélisation électromagnétique de ces systèmes à travers les équations de maxwell, puis nous avons présenté la modélisation des différents phénomènes thermiques associés.

Concernant la simulation, deux applications ont été choisies pour être étudiées. Nous avons réalisé la simulation de ces systèmes de chauffage par induction sous l'environnement Ansys qui adopte la méthode des éléments finis pour la modélisation numérique des systèmes physiques.

La première application traitait la simulation de deux anneaux de court-circuit des rotors de moteurs asynchrones. Le premier de l'entreprise électro-industries et le deuxième de l'article tiré d'un article scientifique pour voir la distribution de température et le temps nécessaire pour que l'anneau atteigne la température de fusion. Ensuite, nous avons considéré un système réel de géométrie axisymétrique. Pour ce dernier, des résultats de simulation et ceux obtenus par un dispositif expérimental ont été comparés. Les tests expérimentaux conduits sur le dispositif conçu ont donné des résultats satisfaisants.

Comme perspective, nous suggérons l'étude d'un système de chauffage par induction alimenté par une source non sinusoïdale.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] M. CHERIF, « étude conception et régulation optimale d'un four par induction », mémoire master, el oued ,2017
- [2] M. HELAIMI, « contribution à la commande d'un onduleur contribution à la commande d'un onduleur a résonance destine au chauffage par induction », mémoire doctorat , oran , 2014
- [3] https://www.ambrell.com/hubfs/ambrell_pdfs/411-0169-13.pdf ambrell, induction heating sollution
- [4] « cours d'_électrothermie » 1re année olivier Perrot 2010-2011 i.u.t. de Saint-Omer Dunkerque département génie thermique et énergie
- [5] IRSHAD KHAN, « analyse and desing of high frequency induction heating system » memory master, university of cape town,2003
- [6] A. ABDI, « modélisation d'un dispositif de chauffage par induction », mémoire magister, usthb, le 02/11/2011
- [7] F. ALLAOUI, « contribution à la modélisation et optimisation par les méthodes heuristiques des paramètres du systèmes de cuisson par induction », mémoire doctorat oran,2020
- [8] Y. MAANANI, « alimentation des systèmes de chauffage par induction par Convertisseurs à résonance », mémoire magister, Constantine 1 ,2014
- [9] D. Khdrouche, « Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire, mémoire master, m'sila, 2016
- [10] N. BEN SEDIRA, « contribution à l'étude du couplage électromagnétique-thermique dans une charge à symétrie axiale (étude + simulation) », mémoire magister, Batna, 2012-1013
- [11] A. ALLAG, M. AOUIMEUR, « étude conception et régulation par pi d'un four à induction», mémoire master , el oued , 2018

- [12] Mr. Rahal Saïd, Mr. Alili Aimad , «étude, simulation et conception d'un système de chauffage par induction » mémoire master , Bouira ,2016
- [13] F. AROUA, « Modélisation et Simulation d'un cuisson Par induction électromagnétique sous MATLAB », mémoire master, Biskra, 2019
- [14] I. DEBACHE, « Etude et Modélisation des Inducteurs dans les Systèmes de Chauffage par Induction, mémoire master, Biskra, 2019
- [15] H. Bahamma, « Etude géométrique des inducteurs utilisés dans une cuisson par induction », mémoire master, Biskra, 2014
- [16] A. SENHAJI, « simulation numérique de la chauffe par induction électromagnétique d'un disque en aisi 4340», mémoire école de technologie supérieure université du Québec, 2017
- [17] B. KHARBOUCH, « cours transfert de chaleur par convection », université Abdel Malek essaadi faculté des sciences Tétouan 2019
- [18] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-anisotropie-1404/> .
- [19] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Chauffage_par_induction
- [20] C. Sabonnadière, L. Coulomb, « Calcul des champs électromagnétiques », Technique de l'ingénieur, D 3020
- [21] B. Boualem, F. Piriou, « Numerical Models for Rotor Cage Induction Machines Using Finite Element Method », IEEE Transactions on Magnetism, 1998
- [22] M. Hamel, « Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques », mémoire magister, Tizi-Ouzou, 2012
- [23] M. Hamel, « étude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive », thèse de doctorat, Tizi-Ouzou, 2018
- [24] B. HALIFA, « Simulation par éléments finis de la mesure par courants de Foucault des fissures débouchantes dans les matériaux conducteurs », thèse doctorat, Alger, 2012
- [25] Y. Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », thèse doctorat, paris, 2009

[26] K. S.Yee, „,Numériqueal solution of Initial Boundary Value Problems involving Maxwell’s Equations in Isotropic Media”,IEEE Trans. Antennas propag; Vol. 14, mai 1996.

[27] <https://fluxtrol.com/simulation-of-induction-system-for-brazing-of-squirrel-cage-rotor>

[28] https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique [on line], consulter juin 2021