

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Electromécanique et Génie Mécanique



N° Ref :

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Electromécanique

Etude et conception d'un dispositif de chauffage par
Induction

Réalisé par :
- Yasser Ledra
- Iskander Boulkroune

Soutenu devant le jury :

Mme. Meriem Benenia
Mr. Nouredin Guerfi
Mr. Billel Smaani

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2022/2023



Dédicace

J'ai toujours voulu offrir quelque chose à mes parents et mes grands-parents en guise de reconnaissance pour avoir faits de moi l'homme que je suis aujourd'hui, Et voilà, l'occasion est venue ; A mes parents qui m'ont donné la vie, symbole de fierté, de sagesse et de patience, A mes parents qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, A qui je dois de l'amour et la reconnaissance.



Remerciements

Au terme de ce travail, nous devons nos remerciements tout d'abord à Allah 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 le **Mr Smaani bilhel** notre encadreur, Ses excellents conseils et ses encouragements 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.*

Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de l'électromécanique pour les facilités qu'ils m'ont accordé pour parfaire ce travail

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury qui nous ont fait honneur d'examiner ce travail.

Enfin, on remercie toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin,

Directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, on les remercie tous.

Sommaire

Sommaire	I
Liste des abréviations et des paramètres	IV
Liste des tableaux	V
Liste des figures	VIII
Introduction générale.....	VIII

Chapitre I : Le chauffage par induction et ces applications.

I.1. Introduction	1
I.2. Historique du chauffage par induction	1
I.3. Principe de fonctionnement.....	1
I.4. Constitutions	2
I.4.1. Les composants d'électronique de puissance	2
I.4.2. Les composants électromagnétiques	3
I.4.2.1. Inducteur	3
I.4.2.1.1. Géométries et types d'inducteur.....	4
I.4.2.2. Corps à chauffer	8
I.4.2.2.1. Propriétés magnétiques	8
I.4.2.2.2. Propriétés électriques	9
I.4.2.2.3. Propriétés thermiques	10
I.5. Les caractéristiques électriques du chauffage par induction.....	10
I.5.1. La profondeur de pénétration.....	11
I.5.2. La puissance dissipée dans la pièce	12
I.5.3. Rendement électrique.....	12
I.5.4. Facteur de puissance	13
I.6. Paramètres de réglage.....	13
I.7. Les différentes applications.....	13
I.7.1. Les Applications industrielle	14
I.7.1.1. Fusion de métal par induction dans les fours à creuset.....	14
I.7.1.2. Le brasage	14
I.7.1.3. Durcissement de l'acier par induction	15
I.7.2. Application domestique	16
I.7.3. Applications médicales	18

I.8. Les avantages et les inconvénients de chauffage par induction	18
I.8.1. Les avantages du chauffage à induction	18
I.8.2. Les inconvénients du chauffage par induction.....	19
I.9. Conclusion.....	19

Chapitre II : Convertisseurs Statiques à Résonances

II.1. Introduction.....	21
II.2. Les convertisseurs de fréquence	21
II.2.1. Systèmes d'alimentation classique.....	21
II.2.2. Convertisseurs à groupe rotatif.....	22
II.2.3. Convertisseurs statiques	23
II.2.4. Convertisseurs statiques à résonance.....	24
II.2.4.1. Circuits oscillants	24
II.2.4.2. Types de convertisseurs statiques à résonance	26
II.2.4.2.1. Convertisseurs à résonance coté alimentation	26
II.2.4.2.2. Convertisseurs à interrupteurs résonants	27
II.2.4.2.3. Convertisseurs à résonances coté charge	27
II.3. Onduleurs à résonance	28
II.3.1. Onduleur à résonance série.....	29
II.3.2. Onduleur à résonance parallèle.....	30
II.3.3. Onduleur à injection de courant.....	30
II.4. Convertisseurs à résonance classe E.....	31
II.5. Les différents interrupteurs d'électroniques de puissance.....	31
II.5.1. Interrupteur parfait.....	31
II.5.2. Interrupteur à semi-conducteur.....	31
II.5.2.1. Classification des semi-conducteurs.....	32
II.5.3. Gamme de fréquences des interrupteurs.....	36
II.5.4. Les modes de commande des interrupteurs	36
II.6. Principe et critères de choix de la topologie et des convertisseurs de fréquence pour le chauffage par induction	37
II.7. Conclusion	39

Chapitre III : Conception de l'inducteur et simulation du circuit de puissance de commande

III.1. Introduction	41
III.2. Description mathématique des phénomènes liés au chauffage par induction	41
III.2.1. Phénomènes physiques dans l'induction.....	41

III.2.1.1. L'électromagnétisme dans l'induction	41
III.2.1.2. Transfert de chaleur	44
III.2.1.2.1. Transfert de chaleur par conduction	44
III.2.1.2.2. Transfert de chaleur par convection	45
III.2.1.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement	45
III.3. Conception et simulation de l'inducteur	46
III.3.1. Conception et simulation de l'inducteur (multispire) sous COMSOL Multiphysics	46
III.3.1.1. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.....	46
III.3.1.2. Conception et simulation de l'inducteur multi spires et la charge	47
III.4. Etude et Simulation du circuit de puissance	51
III.4.1. Représentation et étude du schéma sous Matlab Simulink	52
III.5. Conclusion	56
Conclusion générale	58
Références bibliographiques	60
Annexes	66
Résumé	73

Type equation here.

Type equation here.

Liste des abréviations et des paramètres

Liste des abréviations et des paramètres

\vec{B}	Induction Magnétique [T]
CALC	Circuits D'aide A La Commutation
CPI	Chauffage Par Induction
\vec{D}	Induction Electrique [C/M ²]
\vec{E}	Champ Electrique [V/M]
EDP	Equations Aux Dérivées Partielles
F	Fréquence [Hz]
\vec{H}	Champ Magnétique [A/M]
I	Courant Electrique [A]
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
J	Densité Du Courant [A/M ²]
MLI	Modulation Larges Impulsion
MOSFET	Metal Oxyde Semi-Conductor
T	Température [K Ou °C]
V	Tension Electrique [V]
ZVS	Zéro-Voltage-Switching
ZCS	Zero-Current-Switching
μ	Perméabilité Magnétique [H/M]
μ_0	Perméabilité Magnétique A Vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$) [H/M],
μ_r	Perméabilité Magnétique Relative
χ	Susceptibilité Magnétique Du Matériau
ρ	Résistivité [$\Omega \cdot M$],
σ	Conductivité Electrique [S/M]
λ	Conductivité Thermique [$W \cdot M^{-1} \cdot K^{-1}$]
ρ	Masse Volumique [$Kg \cdot M^{-3}$].
Cp	Capacité Calorifique [$J \cdot K^{-1}$]
σ_b	Constante De Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$).
δ	Profondeur De Pénétration

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Gamme de fréquences des interrupteurs	36
Tableau III.1 : Paramètres géométrique de l'inducteur	48
Tableau III.2 : Les résultats de simulation sous COMSOL Multiphysics en charge	50
Tableau III.3 : Les résultats de simulation sous Matlab avec trois capacités de 0.47 μF (micro farad)	53
Tableau III.4 : Les résultats de simulation sous Matlab avec trois capacités de 0.44 μF (micro farad)	54
Tableau III.5 : Les résultats de simulation sous Matlab avec trois capacités de 0.50 μF (micro farad)	56

Liste des figures

Figure I.1. Principe du chauffage par induction	2
Figure I.2. Constitution générale d'un système de chauffage par induction.....	3
Figure I.3. Inducteur hélicoïdal multi spires.	4
Figure I.4. Inducteur interne.....	4
Figure I.5. Inducteur à une spire.	5
Figure I.6. Inducteur hélicoïdale multipostions.	5
Figure I.7. Inducteur Tunnel.	5
Figure I.8. Inducteur canal incurvée.	6
Figure I.9. Inducteur Pancakes.....	6
Figure I.10. Inducteur hélicoïdale partagée.....	7
Figure I.11. Inducteur à plaque de concentration.....	7
Figure I.12. Bobines et convoyeurs.....	7
Figure I.13. Inducteur en épingle à cheveux.	8
Figure I.14. Répartition de la densité de courant depuis la surface	11
Figure I.15. Une coupe longitudinale d'un four à creuset.....	14
Figure I.16. Le brasage.....	15
Figure I.17. Inducteurs pour le durcissement.	16
Figure I.18. Le concept de surface active totale.....	16
Figure I.19. Les appareils de chauffage à induction : (a) vue éclatée, (b) détail du système D'inductance.	17
Figure II.1. Système d'alimentation classique avec gradateur.	222
Figure II.2. Photo réelle d'un convertisseur à groupe rotatif.....	22
Figure II.3. Les différentes associations d'un condensateur de compensation avec une charge.	25
Figure II.4. Graphe illustrant la fréquence de résonance en fonction de la réactance.	26
Figure II.5. Convertisseur à résonance coté alimentation.....	27
Figure II.6. Interrupteurs résonnants.....	27
Figure II.7. Le principe de l'onduleur.....	28
Figure II.8. Constitution de l'onduleur à résonance.	29
Figure II.9. Onduleur à résonance série (onduleur de tension).....	29
Figure II.10. Onduleur à résonance parallèle (onduleur de courant).	30
Figure II.11. Onduleur à injection de courant.....	31
Figure II.12. Schéma du convertisseur à résonance Classe-E.	31

Figure II.13. Diode.....	33
Figure II.14. Représentation schématique d'un thyristor.	33
Figure II.15. MOSFET canal N.	35
Figure II.16. MOSFET canal P.	35
Figure II.17. Structure d'un IGBT.	36
Figure II.18. Onduleur en demi-pont.	38
Figure II.19. Onduleur en pont-complet.	38
Figure III.1. Logos et interface du logiciel COMSOL Multiphysics.	47
Figure III.2. Schémas général de l'inducteur multi spires et la charge.	47
Figure III.3. Inducteur multi spires et la charge sous COMSOL Multiphysics , structure maillée	48
Figure III.4. Distribution de la densité du courant [A/m^2] dans l'inducteur et la charge.	49
Figure III.5. Distribution de la densité de flux magnétique[T] dans l'inducteur multi spires et la charge.	49
Figure III.6. Distribution de la température[K] et [degré C°] dans la charge après quarante et un seconde de chauffe.	50
Figure III.7. Schéma général du système étudié.	51
Figure III.8. Schéma bloc du système étudié sous Matlab/Simulink.	52
Figure III.9. Courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur.	52
Figure III.10. Courbe d'évolution temporelle de la tension aux bornes de l'inducteur.....	53
Figure III.11. Courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur.	54
Figure III.12. Courbe d'évolution temporelle de la tension aux bornes de l'inducteur.....	54
Figure III.13. Courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur.	55
Figure III.14. Courbe d'évolution temporelle de la tension aux bornes de l'inducteur.....	55

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes électromagnétiques sont des dispositifs qui sont souvent régis par le phénomène d'induction. En 1820, Hans Christian Oersted, un scientifique danois, a remarqué qu'un courant électrique passant à proximité d'une boussole pouvait dévier l'aiguille de la boussole, ce qui a permis la découverte de la création d'un champ magnétique à partir d'un courant continu. À la même époque, Michael Faraday, un scientifique anglais, a commencé à s'interroger sur la possibilité de créer un courant électrique à partir d'un champ magnétique. En 1821, Faraday a créé le premier moteur électrique, et dix ans plus tard, il a créé les premières versions d'un alternateur, grâce aux travaux effectués par des scientifiques américains sur les bobines de cuivre. C'est ainsi que Faraday est devenu le père de l'électromagnétisme. [1].

De nos jours, les systèmes électromagnétiques utilisent généralement des dispositifs d'électronique de puissance pour changer la forme des tensions et des courants électriques, ce qui leur permet d'associer l'aspect énergétique des circuits électriques. Ces dispositifs sont également appelés convertisseurs statiques d'énergie électrique, et ils ont connu une évolution technologique au fil du temps. Grâce à leur utilisation dans les systèmes électromagnétiques, ces convertisseurs sont devenus à la fois plus complexes et plus performants. [1].

Les appareils électromagnétiques produisent toujours des phénomènes de chaleur, qui peuvent être bénéfiques, comme dans le chauffage par induction, ou nuisibles, comme dans le cas des machines électriques. La longévité de ces dispositifs dépend largement de la température atteinte en régime permanent. Dans le chauffage par induction, on cherche toujours à obtenir des températures élevées, localisées et avec des rendements élevés. Une installation typique de chauffage par induction comprend un convertisseur statique de puissance comme générateur de puissance, un coffret d'adaptation et un ensemble inducteur/charge.

En plus de ses avantages en termes d'efficacité et de précision, le chauffage par induction présente également un intérêt majeur en matière de sécurité. Étant donné qu'il ne nécessite pas de flamme ou de source de chaleur externe, il réduit considérablement les risques liés aux incendies, aux brûlures et aux accidents. De plus, le contrôle précis de la chaleur permet d'éviter les surchauffes et les dommages aux matériaux, garantissant ainsi des conditions de travail plus sûres pour les opérateurs. Cette sécurité accrue en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications industrielles où la protection des travailleurs et des installations est primordiale.

Le présent travail se concentre sur l'étude et la conception d'une installation de chauffage par induction en utilisant une modélisation complète qui inclut les différents phénomènes d'électronique de puissance, d'électromagnétisme et de thermique, en vue d'une conception optimale du système de chauffage par induction.

Le mémoire est divisé en trois chapitres:

Le premier chapitre traite du chauffage par induction et de ses applications. Nous présentons à nouveau le principe du chauffage par induction électromagnétique, ses caractéristiques, ainsi que ses avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, on exposera la partie électronique de puissance. On débutera avec l'historique des générateurs de puissance utilisés dans l'industrie, puis on se focalisera sur les

circuits à résonance. On présentera les différentes topologies possibles du convertisseur de puissance susceptible d'être efficace dans la réalisation du générateur de chauffage par induction.

Le troisième chapitre se concentre sur l'étude et la simulation de notre système de chauffage Par induction. On commence par la modélisation mathématique des phénomènes entre l'inducteur et la charge. Une simulation du convertisseur de puissance choisi dans le chapitre précédent sera effectuée sous Matlab/Simulink, et une conception de l'inducteur sera effectuée sous le logiciel COMSOL Multiphysics.

Chapitre I :

Le chauffage par induction et ces applications.

I.1. Introduction

Dans ce chapitre Nous allons présenter l'analyse approfondie du procédé de chauffage par induction. Il explique en détail les bases, il met en évidence plusieurs applications industrielles de ce système de chauffage tout en examinant ses principaux avantages et inconvénients.

Le chauffage par induction est une application directe de deux lois physiques, la loi de Faraday-Lenz et l'effet Joule : tout corps conducteur d'électricité plongé dans un champ magnétique variable voit apparaître des courants induits appelées courant de Foucault à l'intérieur de celui-ci [2].

D'autre part, tout corps conducteur de l'électricité s'échauffe par effet Joule quand il est parcouru par un courant électrique.

On peut également chauffer la pièce en appliquant aux extrémités du conducteur une différence de potentiel, appelé couramment chauffage résistif [3].

L'induction se veut être la meilleure technologie disponible de chauffage des solides dans les industries agro-alimentaires et en métallurgie (traitement thermique des métaux et fusion), cette technique recèle encore des possibilités importantes de progrès technologiques dues essentiellement au progrès rapide de l'électronique de puissance durant ces dernières décennies [4].

I.2. Historique du chauffage par induction

En 1831, Faraday a fait la découverte du phénomène d'induction, dont les lois ont été précisées par Foucault en 1851. Plus tard, vers 1860, Maxwell a proposé une théorie générale de l'électromagnétisme classique qui a jeté les bases de la théorie moderne.

Les premières recherches sur les effets thermiques ont commencé en 1885, mais les principes de base du chauffage par induction ont été compris et appliqués dans les processus industriels depuis les années 1920. À partir de 1925, l'effet de peau dû à une concentration périphérique des courants de Foucault dans les masses métalliques a considérablement élargi 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. Grâce à l'évolution de la technologie à partir de 1980, les systèmes de chauffage par induction sont devenus très complexes et très courants. Aujourd'hui, le chauffage par induction est un procédé industriel bien maîtrisé dans un grand nombre de domaines, tels que la fonderie, le soudage ou le durcissement. [5].

I.3. Principe de fonctionnement

Le chauffage par induction électromagnétique est une technique électrothermique permettant de chauffer des pièces conductrices d'électricité, sans contact matériel direct.

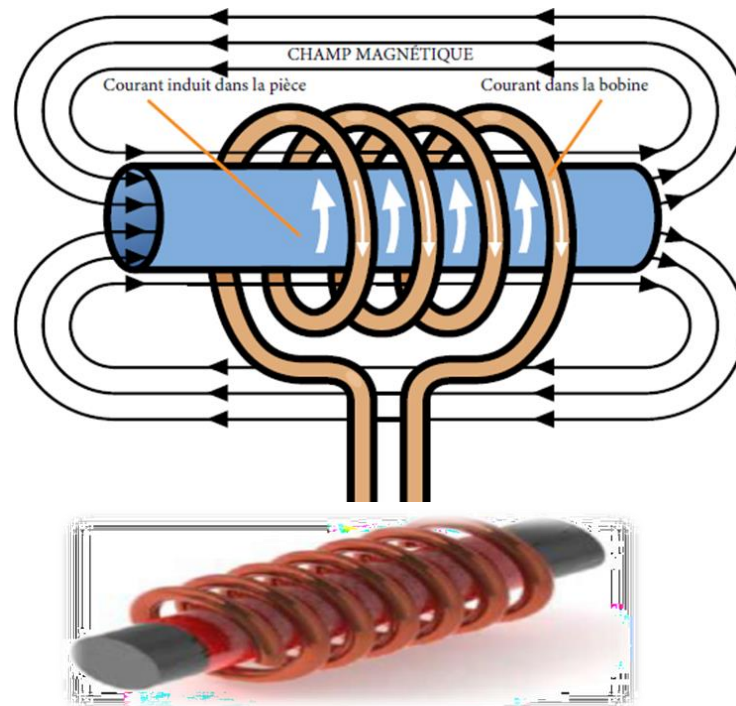


Figure I.1. Principe du chauffage par induction [6].

Ce procédé fonctionne en utilisant un inducteur alimenté par un courant alternatif pour créer un champ magnétique alternatif. Ce champ pénètre plus ou moins profondément dans le matériau proche de l'inducteur en fonction de ses propriétés électromagnétiques et de la fréquence utilisée. La variation de ce champ magnétique crée des courants de Foucault selon la loi de Faraday-Lenz, qui s'opposent au courant initial de l'inducteur et provoquent un échauffement de la zone parcourue par ces courants. La quantité de chaleur générée dépend des propriétés physiques et géométriques du matériau, ainsi que de la fréquence et de l'intensité du champ magnétique, ainsi que de la durée d'exposition. [2].

Le chauffage par induction entraîne principalement trois phénomènes physiques successifs :

- Le transfert de l'énergie par voie électromagnétique de l'inducteur vers le matériau à chauffer.
- La transformation de cette énergie électrique en chaleur par effet Joule.
- La transmission de la chaleur par conduction, convection et rayonnement thermique [7].

I.4. Constitutions

Une installation de chauffage par induction est constituée de deux principaux composants :

I.4.1. Les composants d'électronique de puissance

- Un convertisseur branché sur le réseau électrique (50 Hz). Il permet de modifier la fréquence du courant.
- Un coffret d'adaptation d'impédance constitué d'une batterie de condensateurs. Il permet d'obtenir le point de fonctionnement optimal du générateur (fréquence et puissance).

Ces composants seront l'objet du chapitre II.

I.4.2. Les composants électromagnétiques

- Un ou plusieurs inducteurs alimentés par un courant sinusoïdal. Il crée un champ électromagnétique agissant sur la charge.
- Un corps à chauffer [7].

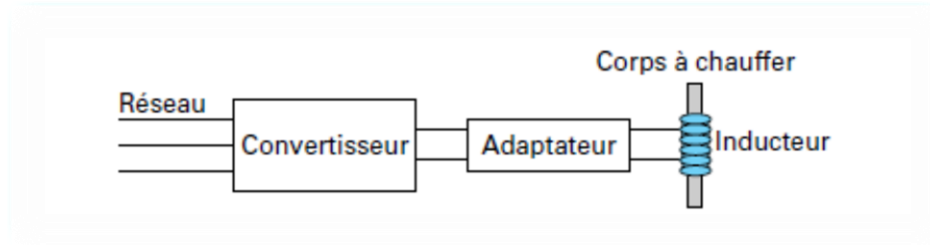


Figure I.2. Constitution générale d'un système de chauffage par induction [7].

Et on ajoute généralement à ces deux composants :

- Un système de refroidissement par eau par exemple 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 contrôle-commande de l'installation.

I.4.2.1. Inducteur

L'inducteur est le composant principal du système de chauffage par induction qui joue un rôle crucial dans l'efficacité et le rendement de la chauffe de la pièce. La complexité de la bobine varie largement, allant d'une simple configuration hélicoïdale à plusieurs spires de tube de cuivre enroulées sur un mandrin à des bobines sophistiquées en cuivre massif usinées et brasées. La fonction principale de la bobine consiste à transférer l'énergie électrique à la pièce sous forme de puissance en générant un champ électromagnétique alternatif, ce qui induit un courant dans la pièce qui coule en sens inverse du courant dans la bobine. La résistance de la pièce face à ce courant génère de la chaleur en raison des pertes joule.

L'inducteur est la partie essentielle d'une installation de chauffage par induction. Sa forme et sa position par rapport à la pièce dépendent, dans une certaine mesure, du critère choisi [8] :

- Transfert maximum d'énergie.
- 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.
- Durée de l'opération.

I.4.2.1.1. Géométries et types d'inducteur

Du fait que chaque application du chauffage par induction nécessite son profil 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 [9].

Les bobines d'induction sont des conducteurs conçus en tubes de cuivre refroidis à l'eau. Les inducteurs peuvent prendre plusieurs formes [10], telles que :

A. Inducteur hélicoïdal multi-spires

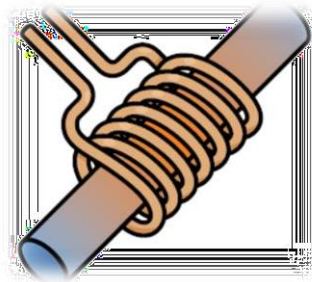


Figure I.3. Inducteur hélicoïdal multi spires [10].

L'inducteur hélicoïdal (solénoïde) est la forme la plus courante et la plus efficace dans le cas des pièces cylindriques. Le nombre de spires définit la hauteur de la zone de chauffage. La pièce peut être immobile dans l'inducteur pour créer une bande de chauffage définie « en une seule passe », ou bien elle peut être déplacée à travers la bobine afin d'être entièrement chauffée de façon très uniforme, selon un schéma appelé « chauffage par balayage ou au défilé ».

Pour les alésages internes, ils peuvent être chauffés à l'aide d'inducteurs internes à une ou plusieurs spires.

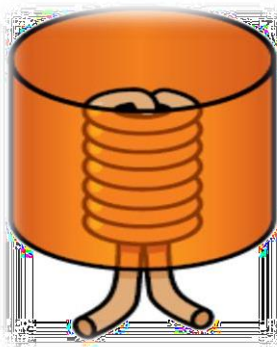
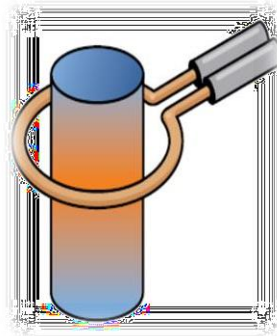
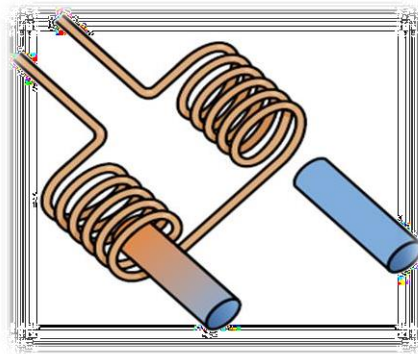


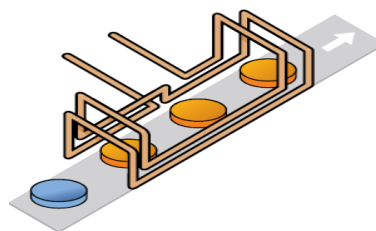
Figure I.4. Inducteur interne [10].

B. Inducteur à une spire (inducteur mono spire)**Figure I.5.** Inducteur à une spire [10].

Les inducteurs à une spire sont idéals pour chauffer une bande étroite ou l'extrémité d'une pièce. Elles peuvent également passer sur toute la longueur de la pièce et sont souvent utilisées pour les traitements thermiques. Ces inducteurs son souvent serrées au plus près de l'objet afin de créer un schéma de chauffage précis.

C. Inducteur hélicoïdale multipostions**Figure I.6.** Inducteur hélicoïdale multipostions [10].

Les inducteurs multipostions servent souvent à chauffer un plus grand nombre de pièces dans un temps donné. Pendant qu'une pièce est chauffée dans une position, l'autre bobine peut être déchargée et rechargée pour le cycle de chauffage suivant. Il est théoriquement possible d'avoir autant de bobines que l'on veut.

D. Inducteur Tunnel (Bobine canal)**Figure I.7.** Inducteur Tunnel [10].

Les inducteurs peuvent être formés de telle manière que la pièce soit acheminée à travers le champ magnétique par un mécanisme de transport linéaire. La pièce est chauffée pendant qu'elle traverse la bobine canal, qui peut être configurée pour chauffer toute la pièce ou seulement une bande de celle-ci.

E. Inducteur canal incurvée

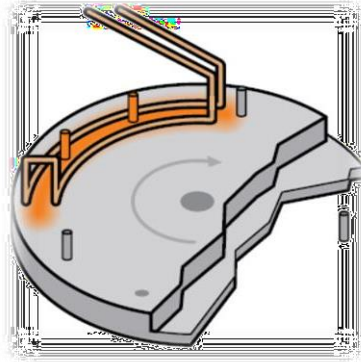


Figure I.8. Inducteur canal incurvée [10].

L'inducteur canal peut être incurvé afin de s'adapter sur une table tournante et de s'intégrer dans l'une des étapes d'un processus d'assemblage en plusieurs temps.

F. Inducteur Pancakes (Bobine en galette)

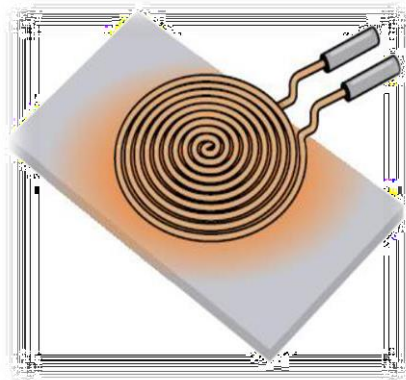


Figure I.9. Inducteur Pancakes [10].

Les inducteurs en galette sont utilisées quand il faut chauffer la pièce d'un seul côté ou quand il n'est pas possible de l'entourer, ce type d'inducteur est utilisé dans les tables de cuisson.

G. Inducteur hélicoïdale partagée (forme spéciale)

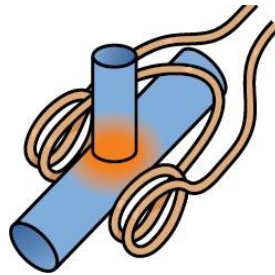


Figure I.10. Inducteur hélicoïdale partagée [10].

Les inducteurs hélicoïdaux partagés à une ou plusieurs spires sont utilisés quand il n'est pas possible d'accéder à la zone chauffée avec un solénoïde classique.

H. Forme spéciale

a. Inducteur à plaque de concentration

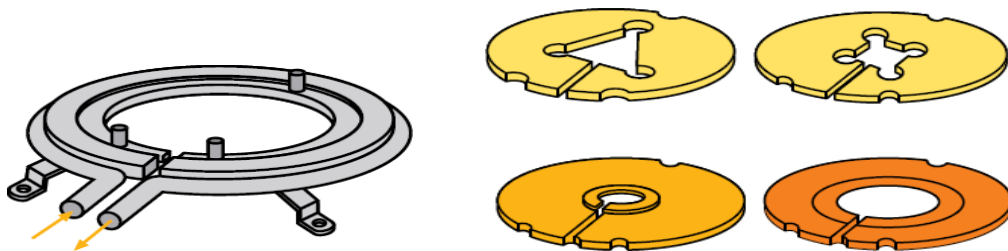


Figure I.11. Inducteur à plaque de concentration [10].

Les plaques de concentration sont utilisées dans les Inducteurs à une ou plusieurs spires pour produire un effet de chauffage défini dans la pièce. Ces inducteurs peuvent aussi posséder un inducteur principal, munie d'inserts conçus pour chauffer des pièces de différentes formes.

b. Bobines et convoyeurs

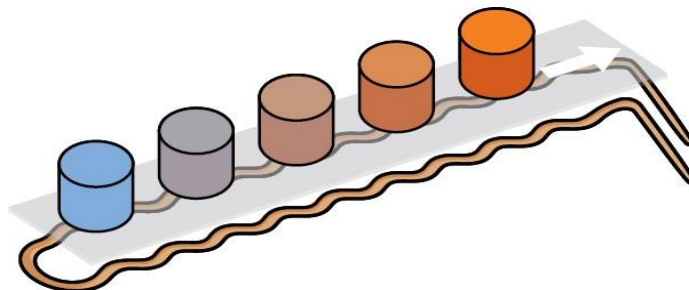


Figure I.12. Bobines et convoyeurs [10].

De nombreuses pièces sont chauffées pendant leur transport par un système de convoyeurs. Tant que le matériau du convoyeur n'est pas conducteur électrique, le champ magnétique le traverse pour chauffer la pièce au passage.

c. Inducteur en épingle à cheveux

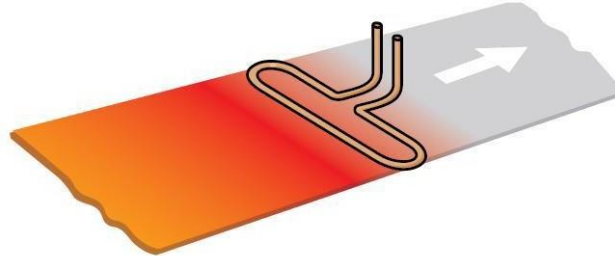


Figure I.13. Inducteur en épingle à cheveux [10].

C'est un inducteur long et fin à une ou plusieurs spires utilisées pour chauffer une longue zone étroite sur une pièce ou pour chauffer une bande d'acier fine ou d'aluminium en mouvement.

I.4.2.2. Corps à chauffer

Pour chauffer un objet, il est nécessaire qu'il soit constitué d'un matériau conducteur d'électricité. L'intensité de la chaleur dépend de divers facteurs, comme les propriétés magnétiques, électriques et thermiques du matériau. [11].

I.4.2.2.1. Propriétés magnétiques

Dans le vide les vecteurs champs d'induction magnétique \vec{B} et champ d'excitation magnétique \vec{H} sont colinéaires et liés par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{I.1})$$

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide (T.m/A).

On définit le vecteur d'aimantation \vec{J} qui indique l'influence du milieu. Champ d'excitation et aimantation se superposent pour exprimer le champ d'induction :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} \quad (\text{I.2})$$

Or l'aimantation est proportionnelle au champ d'excitation, si bien que :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (\text{I.3})$$

χ : est la susceptibilité magnétique du matériau

Il en résulte une nouvelle expression liante \vec{B} et \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (\text{I.4})$$

μ_r : La perméabilité relative du matériau.

μ_0 : La perméabilité absolue.

Les matériaux peuvent être classés suivant leur comportement magnétique, c'est à dire suivant la susceptibilité magnétique et leur perméabilité relative comme ci-dessous [3] :

- **Diamagnétique** : La susceptibilité χ est faible (donc $\mu \approx 1$) Matériel faiblement magnétique Si l'on place une barre magnétique près de lui, celle-ci le repousse.

Exemple : bismuth (Bi), argent (Ag), plomb (Pb), eau.

- **Paramagnétique** : La susceptibilité χ est faible (donc $\mu \approx 1$) Présente un magnétisme très peu significatif. Attiré par une barre magnétique.

Exemple : air, aluminium (Al), palladium (Pd), aimant moléculaire.

- **Ferromagnétique** : la susceptibilité χ est élevée ($\mu \gg 1$) Magnétique par excellence ou fortement magnétique. Attiré par une barre magnétique. Exemple : fer (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni), acier doux.
- **Antiferromagnétique** : Non magnétique, même sous l'action d'un champ magnétique induit.

Exemple : oxyde de manganèse (MnO_2)

Température de Curie

La température de Curie, également appelée point de Curie, est le seuil thermique à partir duquel un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique perd son aimantation spontanée. Cela se produit lorsque le matériau est dans un état désordonné, appelé paramagnétique. Cette transition de phase est réversible et le matériau retrouve ses propriétés ferromagnétiques dès que sa température revient en dessous du point de Curie.

Dans le processus de chauffage par induction, les caractéristiques magnétiques du matériau ont un impact sur la densité de puissance transférée ainsi que sur la zone de concentration de cette dernière. Cette zone de concentration devient de plus en plus étroite lorsque la valeur de la perméabilité magnétique relative μ_r est élevée. Le chauffage d'un acier en-dessous de sa température de Curie ($\mu_r \gg 1$) est plus facile que de le chauffer au-dessus ($\mu_r = 1$), ce qui explique pourquoi les matériaux ferromagnétiques sont les plus adaptés à ce type de chauffage. C'est d'ailleurs pour cette raison que la plupart des ustensiles de cuisine destinés aux tables à induction sont en acier.

I.4.2.2.2. Propriétés électriques

Parmi tous les matériaux, on peut distinguer trois catégories :

- Les matériaux qui conduisent l'électricité : les conducteurs.
- Les matériaux qui ne la conduisent pas : les isolants.
- Les matériaux qui laissent plus ou moins passer le courant électrique que l'on

- Appelle : les semi-conducteurs.

La résistance qu'oppose un matériau à la circulation du courant électrique est appelée résistivité, exprimée en ohm-mètre [$\Omega.m$] et notée ρ . Elle correspond à la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'une section d'un mètre carré. La résistivité varie en fonction de la température et peut être multipliée par un facteur de 10^5 pour un métal très pur entre une température proche de 0° K et la température ambiante (20°C). Dans le chauffage par induction, la résistivité électrique du matériau à chauffer est un paramètre crucial qui influe sur la puissance reçue. À une fréquence de 10 kHz, une pièce en aluminium de mêmes dimensions sera chauffée plus rapidement qu'une pièce en cuivre en raison de leur différence de résistivité.

I.4.2.2.3. Propriétés thermiques

La capacité d'un matériau à conduire la chaleur est mesurée par sa conductivité thermique, symbolisée par λ (lambda). La conduction thermique est le mécanisme de transfert de chaleur associé à cette grandeur. Un matériau ayant une conductivité thermique élevée conduit mieux la chaleur, et est donc moins isolant. [12].

Les propriétés thermiques d'un matériau dans le chauffage par induction sont caractérisées par sa conductivité thermique (λ), sa masse volumique et sa chaleur spécifique (ou chaleur massique) [13].

I.5. Les caractéristiques électriques du chauffage par induction

Pour les applications industrielles, deux grandeurs caractérisent l'efficacité thermique et énergétique de l'induction [14].

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

De nombreux paramètres interviennent:

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

La répartition des courants et l'énergie dissipée dans la pièce peuvent être déterminées rigoureusement en utilisant les lois de Maxwell traduisant les lois fondamentales de l'électromagnétisme en régime quasi stationnaire, qui vont être expliquées plus tard. [14]

I.5.1. La profondeur de pénétration

C'est la notion fondamentale qui régit le phénomène de l'induction. Plus la fréquence d'alimentation f augmente, plus les courants induits se concentrent en surface.

D'après la loi de Lenz, le sens du courant de Foucault est toujours inverse à celle du courant inducteur. Comme le courant inducteur, le courant de Foucault crée son champ magnétique alternatif. Les deux champs, avec leurs directions inverses, s'annulent partiellement à l'intérieur du métal. Ce n'est que près des bords qu'il reste un champ résultant:

On parle de l'effet de peau (en anglais: skin-effect). La répartition exacte de la densité de courant dans la pièce dépend des caractéristiques physiques du matériau chauffé, de sa forme,

De la forme et de la position de l'inducteur, du niveau et de la fréquence du courant dans l'inducteur: on verra plus loin quelles méthodes peuvent être utilisées pour la déterminer avec précision. Cependant, on montre facilement sur un exemple très simple (un cylindre de rayon infini) que cette densité de courant dans la pièce décroît exponentiellement comme il est montré en figure 1.3.

La profondeur de pénétration δ est définie par le point où la densité de courant J a atteint 37% (soit $1/e$) de sa valeur maximale [14].

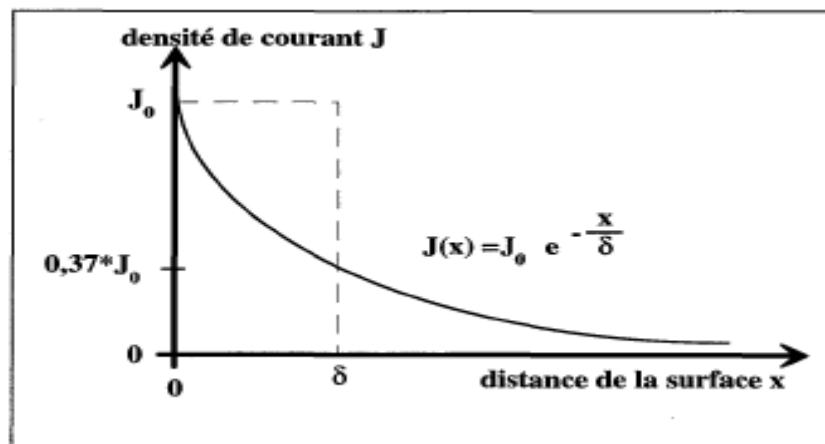


Figure I.14. Répartition de la densité de courant depuis la surface [14].

Dans cet exemple très simple, en première approximation, la répartition de la densité de courant est donnée par :

$$J(x) = J_0 e^{-x/\delta} \quad (\text{I.5})$$

$$J(\delta) = J_0 e^{-1} = \frac{J_0}{e} = 0.37 J_0 \quad (\text{I.6})$$

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

J_0 : valeur maximale de la densité de courant [A m^{-2}];

x : distance de la surface [m]

σ : conductivité électrique ($\sigma = \frac{1}{\rho}$) [$\Omega^{-1} m^{-1}$]

δ : profondeur de pénétration [m];

μ_0 : perméabilité magnétique du vide = $4\pi * 10^{-7} = 1,257 * 10^{-6}$ [Vs A⁻¹ m⁻¹];

μ_r : perméabilité magnétique relative;

f : fréquence du courant d'excitation [S⁻¹].

Il est très important de noter qu'en réalité la résistivité et la perméabilité dépendent de la température. La perméabilité dépend aussi du champ magnétique. Les interdépendances vont être traitées plus tard.

Dans la couche d'épaisseur δ on a 87 % de la puissance dissipée, il y a donc une concentration de l'effet calorifique dans cette couche. La puissance transformée en chaleur s'écrit $P = RI^2$, proportionnelle au carré de la valeur du courant. Seulement 13% de l'énergie induite est absorbée au-delà de la profondeur de pénétration δ .

La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence. Alors que la résistivité et la perméabilité magnétique sont des caractéristiques du corps à chauffer, la fréquence est une grandeur qui peut être choisie par l'utilisateur. Celui-ci possède ainsi un moyen de contrôler la dissipation à l'intérieur du corps à chauffer et de choisir le chauffage le mieux adapté.

Pour une haute fréquence on obtient une faible profondeur

Pour une faible fréquence on obtient une grande profondeur [14].

I.5.2. La puissance dissipée dans la pièce

La formulation simple de la puissance RI^2 ne peut pas être utilisée du fait de la non-uniformité de la distribution des courants induits dans le corps à chauffer [15,16].

La puissance absorbée peut être décrite par :

$$P = \rho \cdot J^2 \quad (\text{I.8})$$

J : étant la densité de courant induite.

I.5.3. Rendement électrique

Le rendement électrique est défini comme suit :

$$\eta = \frac{P_{ch}}{P_i + P_{ch}} \quad (\text{I.9})$$

p_{ch} : Puissance transmise à la charge

P_I : Puissance dissipée dans l'inducteur

Le rendement dépend fortement du ratio diamètre/profondeur de pénétration (dans le cas de charge cylindrique) et de la conception de l'inducteur. Les règles de base à respecter pour un meilleur rendement sont [16]:

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

I.5.4. Facteur de puissance

L'ensemble constitué de l'inducteur et de la charge est assimilable à une charge globalement inductive gourmande en énergie réactive. Ce caractère inductif est dû, d'une part à l'entrefer (entre l'inducteur et la charge) et d'autre part, au comportement inductif de la charge elle-même (dans le cas d'un cylindre).

I.6. Paramètres de réglage

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

A- La fréquence

Le chauffage par induction nécessite un réglage de la fréquence durant le traitement thermique. On distingue habituellement les plages de fréquence suivantes [9] :

- Basse fréquence : de 50 Hz à 1000 Hz
- Moyenne fréquence : de 1 kHz à 35 kHz
- Haute fréquence : de 35 kHz à 5 MHz

a- Amplitudes des courants inducteurs

Etant donné que la puissance dissipée dans la charge dépend du carré des courants induits. De cet effet, le réglage de l'intensité des courants inducteurs apparaît essentiel pour chaque application du traitement thermique.

b- Temps d'exposition

Le temps d'exposition ou d'échauffement est un facteur essentiel dans le chauffage par induction, on peut le changer selon le type d'application. Ainsi, il peut dépendre du matériau traité et de la fréquence utilisée.

I.7. Les différentes applications

Parmi les nombreuses applications de chauffage à induction; industriel, domestique et médicale sont les plus importants en termes de puissance et de l'importance économique.

Les sous-sections suivantes détaillent les principales caractéristiques de ces applications.

I.7.1. Les Applications industrielle

Les applications industrielles de chauffage à induction les plus répandues sont : la Fusion de métal, le brasage, le soudage et toutes sortes de traitements de surface.

I.7.1.1. Fusion de métal par induction dans les fours à creuset

La surface intérieure du creuset est constituée d'un revêtement réfractaire (brasque), qui contient le matériau à porter à la fusion, il est entouré par une bobine inductrice.

L'inducteur est refroidi par eau et entouré d'un noyau de fer pour améliorer le couplage magnétique [17].

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

Les fours à creuset à basse fréquence (50Hz) sont dédiés aux applications de taille importante (en termes de puissance et de capacité). Les applications à fréquences moyennes sont de taille plus modeste, mais elles offrent une plus grande flexibilité de production, et pour cela on observe un remplacement progressif des applications à basses fréquences par des applications moyennes fréquences dans ce système [18].

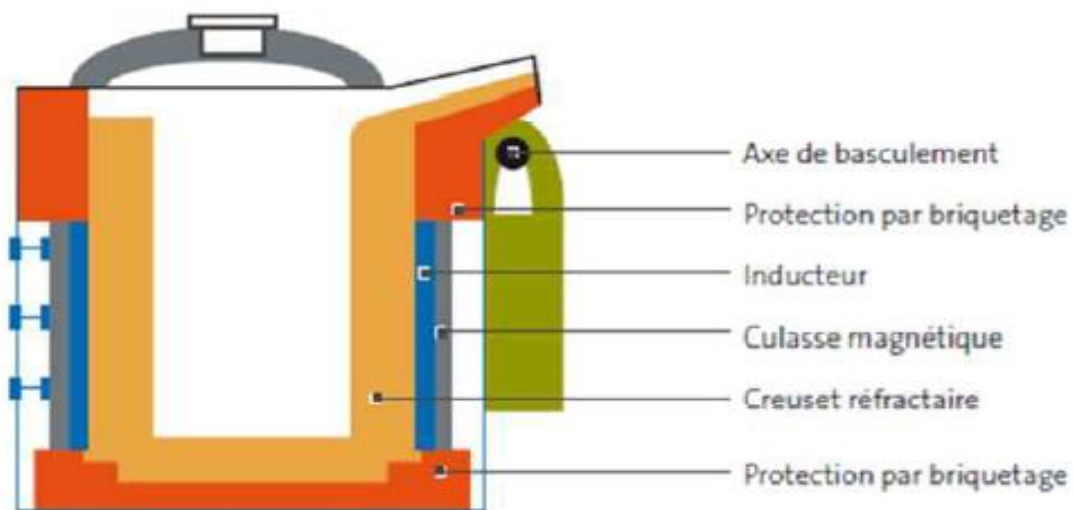


Figure I.15. Une coupe longitudinale d'un four à creuset [18].

I.7.1.2. Le brasage

Le brasage est une technique d'assemblage de deux pièces jointes par action d'un matériau porté à la température de fusion. A la zone de connexion, les deux pièces sont portées à une température plus élevée que la température de fusion du troisième matériau.

L'induction est souvent utilisée pour chauffer les pièces localement. De plus, l'augmentation rapide de la température permet de mieux contrôler les éventuels problèmes d'oxydation et de changement de structure ou de composition du matériau.

De plus, le chauffage à induction correspond bien à des vitesses de production élevées sur des lignes de production automatisées [19].

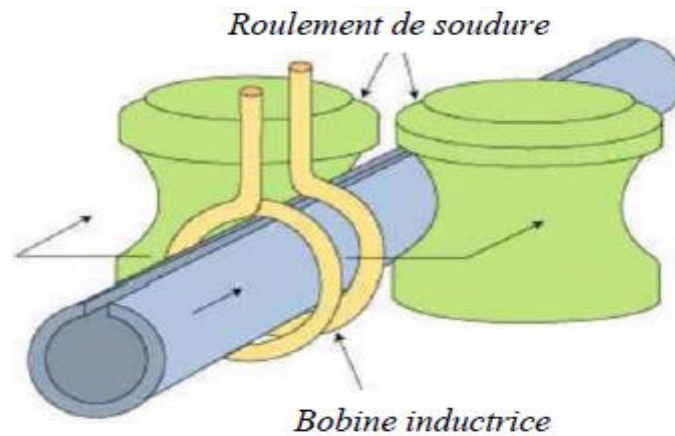


Figure I.16. Le brasage [19].

I.7.1.3. Durcissement de l'acier par induction

Les aciers dont le pourcentage de carbone est supérieur à 0,3% sont adaptés aux traitements de durcissement de surface. La pièce est d'abord portée à une température de 900°C puis brusquement refroidie. Cette technique est utilisée pour le durcissement des aciers des pignons de boîte à vitesse, des vilebrequins, des soupapes, des lames de scie, des bèches, des rails et pour d'autres applications.

Le procédé de chauffage à induction présente l'avantage d'appliquer le traitement localement, de ne pas changer la composition chimique de la couche superficielle et d'éviter les déformations. Grâce à la précision d'échauffement, les consommations d'énergie sont moindres par rapport aux autres techniques.

Les densités de puissance mises en jeu pour les applications de durcissement par induction sont de l'ordre de 1.5 à 5kW/cm², pour un temps de traitement de 2 secondes [17].

La figure 1.17 ci-dessous représente des inducteurs. Certains sont équipés d'un système de spray permettant de refroidir la pièce juste après l'échauffement.

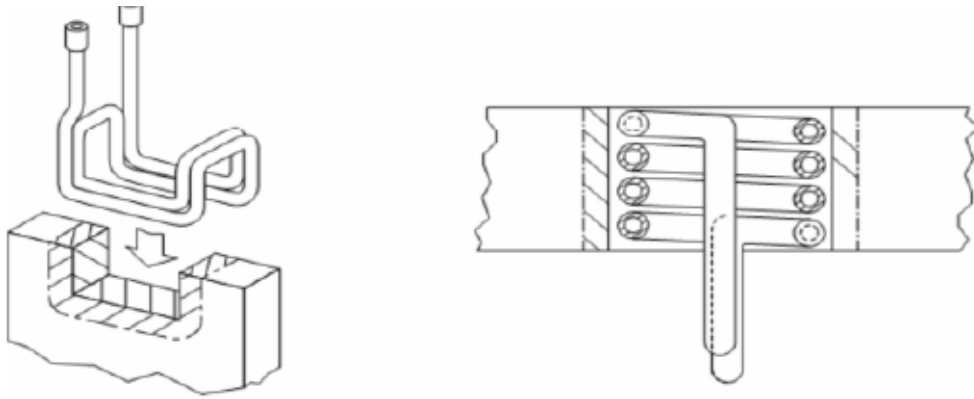


Figure I.17. Inducteurs pour le durcissement [17].

Le durcissement est particulièrement appliqué pour les processus automatisés avec des volumes de production élevés. Grâce au chauffage à induction, une production constante et de bonne qualité peut être atteinte. La consommation énergétique et les pertes de production sont plus faibles que pour les techniques de chauffage conventionnelles [19].

I.7.2. Application domestique

Les principales applications domestiques du chauffage par induction sont les appareils Cuiseurs, qui profitent non seulement de l'amélioration des temps d'échauffement et de l'efficacité, mais aussi des températures de surface inférieure, ce qui implique une meilleure sécurité et propreté, aussi la nourriture qui ne brûle pas [20].



Figure I.18. Le concept de surface active totale [20].

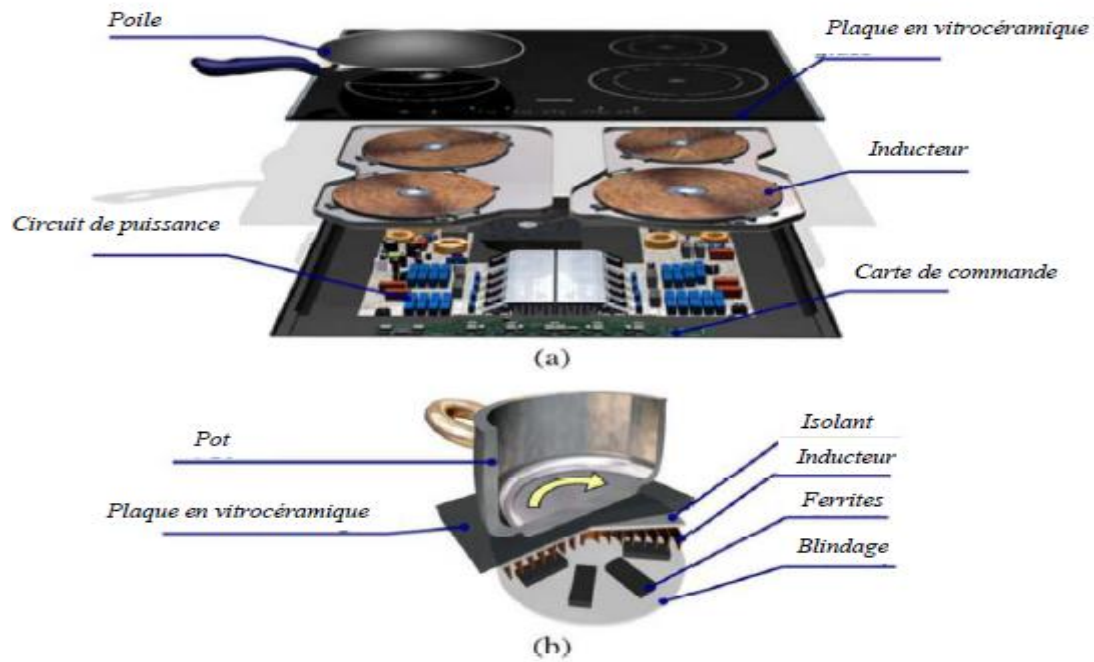


Figure I.19. Les appareils de chauffage à induction : (a) vue éclatée, (b) détail du système D'inductance [20].

Les principales caractéristiques de ces applications sont la conception compacte à profil bas, de plus l'échauffement très variable de la cible peut changer très facilement la forme des matériaux et de leurs positions.

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

Pour l'Europe et l'Amérique sont généralement spécifiés pour des puissances de sortie allant jusqu'à 4 kW, et la topologie du convertisseur de puissance généralement choisi est l'onduleur à résonance série en demi-pont. Par contre les appareils des pays asiatiques sont généralement conçus avec 2 kW de puissance de sortie et la topologie préférée c'est l'onduleur quasi-résonnant (ZVS). Cette technologie offre également la possibilité de chauffer les matériaux de haute conductivité, tel que l'aluminium ou le cuivre [21].

Compte tenu de la puissance de sortie et les restrictions de coûts, les fréquences de commutation se situent généralement entre 20 kHz à 100 kHz. La limite inférieure est réglée pour éviter les émissions de bruit acoustique, ce qui n'est pas souhaitable dans les applications domestiques, alors que la limite supérieure est imposée par les pertes par commutation des dispositifs de puissance.

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

Actuellement, les tendances de recherche sont axées sur l'amélioration des convertisseurs de puissance et aussi les surfaces de cuisson, où un effort particulier est nécessaire pour concevoir les convertisseurs de puissance à sorties multiples et bobines compactes. Le concept de surface active totale (Figure 1.10), encore en développement, c'est un exemple de développement moderne où l'utilisateur peut placer n'importe quel pot, avec n'importe quelle forme, et n'importe où dans la surface de cuisson [20].

Ce nouveau concept nécessite un développement au niveau des convertisseurs de puissance à sortie multiples de haute performance pour satisfaire les spécifications requises avec une solution rentable.

En outre, les stratégies de contrôle et de modulation deviennent plus complexes puisque la direction précise multi charge est nécessaire, C'est un remarquable exemple de la façon dont les progrès des technologies conduisent à l'amélioration des systèmes de chauffage présents sur le marché.

I.7.3. Applications médicales

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

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

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

En raison de la faible résistivité de la nature typique de la charge pour les applications médicales, les onduleurs résonnants parallèles sont appliqués à minimiser le courant à travers l'onduleur. De plus, les fréquences de fonctionnement sont configurées pour être supérieure à 300 kHz et/ou plusieurs MHz pour obtenir des paramètres électriques équivalents appropriés, le transistor est le dispositif de puissance couramment mis en œuvre.

Les futures recherches comprennent plus de précision et un échauffement homogène, et une surveillance de la température dans les tissus cancéreux et voisins, ainsi que la combinaison de cette technique avec d'autres thérapies pour améliorer les résultats [21].

I.8. Les avantages et les inconvénients de chauffage par induction

I.8.1. Les avantages du chauffage à induction

Parmi les avantages du chauffage à induction, les suivants sont reconnus [22] :

- Un Chauffage rapide : le chauffage à induction chauffe directement la cible (pièce), Réduisant la chaleur perdue et réduire considérablement les temps d'échauffement grâce à des densités de puissance élevées et sans aucune inertie thermique.
- L'efficacité : une conception moderne et efficace de la bobine et de convertisseur de puissance permettrait d'obtenir l'efficacité à des valeurs supérieures à 90%, et améliorant de manière significative les techniques de chauffage conventionnels. En plus, étant donné que seule la cible est chauffée par induction, la perte de chaleur par l'air ambiant et les éléments environnants est minimisée et des températures élevées peut-être atteignent.
- Un chauffage contrôlé : La puissance appliquée par le système de chauffage à induction peut être contrôlée avec précision par la conception appropriée de la bobine et la commande de convertisseur de puissance. En conséquence, des fonctionnalités avancées peuvent être mis en œuvre telles que le chauffage local, et les profils de température prédéfinies, etc....
- La propreté et la sécurité : Depuis le chauffage, la cible d'induction s'échauffe directement, la température de l'environnement de la zone d'échauffement est inférieure, ce qui évite la combustion des autres matières, telles que la nourriture dans le cas de chauffage domestique. En revanche, il n'y a pas de pollution locale contrairement aux fours à combustibles fossiles.

I.8.2. Les inconvénients du chauffage par induction

Les inconvénients du chauffage par induction qui sont bons à savoir [23]:

- Le plus gros inconvénient du traitement est le coût associé à fabriquer les inducteurs.
- Des coûts d'acquisition élevés pour les fortes puissances.
- Des champs électriques peuvent apparaître ce qui peut alors perturber sa chaleur ce qui peut faire apparaître des champs électromagnétiques néfastes si les isolations sont l'environnement, ou/et lorsque les isolations sont mauvaises.

I.9. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons examiné le chauffage par induction en détail, en exposant ses principes, ses propriétés et ses différentes caractéristiques. Nous avons également présenté plusieurs applications industrielles de ce système de chauffage et examiné ses avantages et ses inconvénients principaux.

Nous avons constaté que la conception de ce système est cruciale pour son efficacité de chauffage et son rendement. Nous avons identifié les différentes structures possibles de l'inducteur et examiné l'influence de la nature électrique, magnétique et thermique du matériau à chauffer sur le processus de chauffage. Cependant, la partie électronique de puissance (convertisseur statique de puissance) est d'une importance particulière car elle est la source de ce système. Par conséquent, cette partie sera examinée et développée plus en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre II :

Convertisseurs Statiques à Résonances

II.1. Introduction

Les convertisseurs statiques à résonance jouent un rôle essentiel dans le domaine du chauffage par induction. Ils permettent de fournir une alimentation électrique adaptée aux caractéristiques spécifiques de ce processus thermique, en utilisant la résonance pour atteindre des performances optimales. Dans cet article, nous explorerons les convertisseurs statiques à résonance dans le contexte du chauffage par induction, en examinant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs applications. [24].

Les convertisseurs statiques à résonance jouent un rôle clé dans le chauffage par induction, car ils permettent de générer le champ magnétique alternatif nécessaire au processus. Ils ajustent la fréquence et la puissance de l'alimentation électrique pour correspondre aux caractéristiques du matériau à chauffer, garantissant ainsi un transfert optimal de l'énergie électrique vers la chaleur. [25].

Dans ce chapitre, nous aborderons les différentes topologies de convertisseurs statiques à résonance utilisées dans le chauffage par induction, telles que les onduleurs à résonance, les convertisseurs série-parallèle et les convertisseurs à semi-pont. Nous examinerons également les composants électroniques utilisés dans ces convertisseurs, tels que les transistors de puissance, les diodes et les condensateurs, et nous discuterons de leurs performances et de leurs limites. [26].

Pour soutenir nos discussions, nous nous appuyerons sur des références pertinentes dans le domaine du chauffage par induction et de l'électronique de puissance. Parmi ces références, citons des articles scientifiques, des ouvrages spécialisés et des publications de chercheurs renommés. Ces sources nous permettront d'explorer en profondeur les principes et les avancées technologiques liés aux convertisseurs statiques à résonance dans le contexte spécifique du chauffage par induction. [27].

II.2. Les convertisseurs de fréquence

Les convertisseurs de fréquence ont comme fonction de fournir, à partir d'un courant à la fréquence du réseau, un courant de fréquence différente, généralement plus élevée, destiné à alimenter l'inducteur. On distingue quatre types de générateurs à induction [28] :

- Systèmes d'alimentation classiques.
- Convertisseurs à groupe rotatif.
- Convertisseurs statiques à moyenne fréquence.
- Système à haute fréquence.

II.2.1. Systèmes d'alimentation classique

Ces systèmes se raccordent directement sur le réseau de distribution (50-60 Hz) [29]. Généralement, ils n'ont pas besoin d'un convertisseur de fréquence. On y trouve, souvent des éléments réactifs (transformateurs, condensateur), des dispositifs de protection et d'adaptation et parfois des éléments semi-conducteurs. Ils peuvent opérer à très haute puissance.

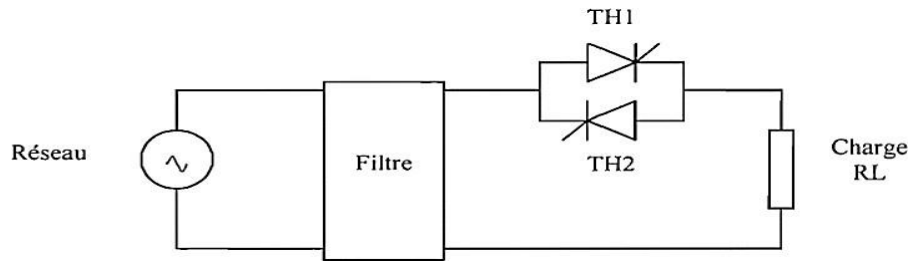


Figure II.1. Système d'alimentation classique avec gradateur [30]

La **figure II.1** illustre un exemple d'un système d'alimentation d'une charge par contacteur statique à thyristors. Dans ce système, on utilise un gradateur à thyristors, un filtre passif à l'entrée et une charge RL à la sortie. La régulation de puissance est assurée par une commande par retard de phase ou une commande par train d'ondes [30].

II.2.2. Convertisseurs à groupe rotatif

Les convertisseurs rotatifs sont utilisés comme source de moyenne fréquence variant (500 Hz à 10 kHz). Ce groupe de convertisseur se compose essentiellement d'un moteur asynchrone triphasé alimenté à partir du réseau 50 Hz entraînant un alternateur qui fournit le courant à la fréquence désirée [29]. Cet alternateur alimente la charge formée de l'inducteur et des condensateurs de compensation. Les tensions fournies par les alternateurs sont souvent supérieures à celles qui sont nécessaires aux inducteurs. On utilise alors des transformateurs d'adaptation. Le dispositif d'excitation permet de régler en charge la tension de sortie de l'alternateur et la puissance du convertisseur.

Les groupes convertisseurs utilisés, sont la plupart du temps des ensembles monoblocs à axe vertical et refroidis à l'eau. La vitesse de rotation est généralement de 3000 tr/mn. Le rendement des convertisseurs rotatifs est de l'ordre de 85 % dans la gamme de fréquence 1-3 kHz, de 75 à 80 % dans la gamme de fréquence 3-10 kHz. Le rendement Global du groupe convertisseur dépend de la puissance et de la fréquence. Parmi les inconvénients, on cite l'alimentation à fréquence fixe, le faible rendement, le prix élevé, le poids important et le niveau de bruit élevé.



Figure II.2. Photo réelle d'un convertisseur à groupe rotatif [29].

II.2.3. Convertisseurs statiques

Les convertisseurs électriques statiques sont un ensemble de dispositifs électroniques permettent, avec de forts rendements, de combiner différentes natures de sources d'électricité et la grande diversité des récepteurs qui les utilisent.

L'énergie électrique est utilisée soit sous la forme de tensions et courants alternatifs, soit sous la forme de tensions et courants continus, de ce fait on peut classer les convertisseurs statiques en quatre catégories :

- Continu – continu (hacheur).
- Alternatif – continu (redresseur).
- Continu – alternatif (onduleur).
- Alternatif-alternatif (gradateur)

Dans le cas de chauffage par induction, la puissance volumique transmise croît quand la fréquence augmente, donc il faut avoir recours à des fréquences plus élevées que celle du réseau (50 ou 60 Hz). Néanmoins le gradateur ne permet pas agir sur la fréquence de la tension, on doit alors faire appel à des convertisseurs spécialement développés à cet effet. Les convertisseurs statiques à moyenne fréquence fournissent des fréquences variant de quelques centaines de hertz à une dizaine de milliers de Hz environ.

Ils sont destinés à produire du courant alternatif à partir d'une source à courant continu. Dans les installations de chauffage par induction, les dispositifs sont composés d'un transformateur destiné à abaisser la tension, d'interrupteurs à semi-conducteurs et des composants passifs [29.31]

Par rapport aux autres systèmes, les convertisseurs statiques sont plus simples et plus économiques. Ils présentent les principaux avantages suivants :

- Adaptation automatique de la fréquence : la fréquence s'ajuste au fur et à mesure de la variation de l'impédance du four à induction pour fonctionner en permanence à la résonance
- Puissance maximale possible est constamment transmise (générateurs statiques à onduleurs).
- Implantation plus simple et taille plus petite.
- Absence de bruit.
- Meilleur rendement.

Ils sont soit à fréquence imposée par le circuit de commande et de régulation, soit le plus souvent à fréquence imposée par le circuit d'utilisation. Ces convertisseurs sont appelés les convertisseurs à résonance.

II.2.4. Convertisseurs statiques à résonance

Dans les circuits de chauffage par induction, l'inducteur consomme toujours une énergie réactive supérieure à l'énergie active. Pour que le générateur qui l'alimente n'ait à fournir que la puissance active, il faut utiliser des condensateurs de compensation de la puissance réactive. De ce fait la plupart des générateurs utilisent les propriétés des circuits oscillants.

Pour avoir un fort courant variant dans l'inducteur, la plupart des auteurs ont tendance à utiliser un circuit oscillant formé par l'inductance et un condensateur en série ou en parallèle. Ce circuit oscillatoire, également connu sous le nom résonnant, est généralement alimenté par un convertisseur, dont les caractéristiques dépendent de la fréquence, la puissance et du type de structure [32].

II.2.4.1. Circuits oscillants

Principe

Une charge inductive peut être représentée par une inductance et une résistance soit sous forme d'éléments L_s et R_s en série (figure II.3 a), soit en forme d'éléments L_p et R_p en parallèle (figure II.3) :

$$L_p \omega = \frac{Z_s^2}{L_s \omega} \quad (\text{II.1})$$

$$R_p = \frac{Z_s^2}{R_s} \quad (\text{II.2})$$

Avec,

$$Z_s^2 = L_s^2 \omega^2 + R_s^2$$

Ou d'une autre façon :

$$L_s \omega = \frac{Z_p^2}{L_p \omega} \quad (\text{II.3})$$

$$R_s = \frac{Z_p^2}{R_p} \quad (\text{II.4})$$

Avec,

$$Z_s^2 = L_p^2 \omega^2 R_p^2 / (L_p^2 \omega^2 + R_p^2)$$

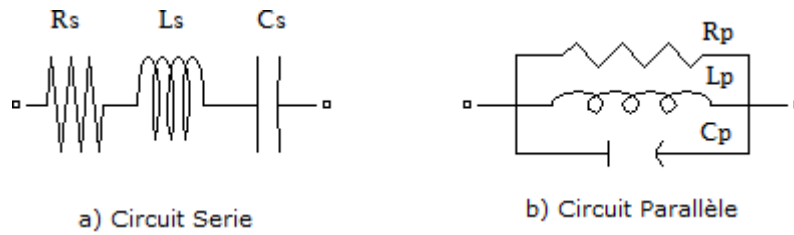


Figure II.3. Les différentes associations d'un condensateur de compensation avec une charge.

L'association de condensateur de compensation réactive à cette charge soit en série (Figure II.3a), soit le plus souvent en parallèle (Figure II.3b), constitue un circuit oscillant.

a) Pour le circuit résonnant série

L'impédance totale de circuit Z :

$$Z_s = \sqrt{R^2 + X_T^2} \tag{II.5}$$

Avec,

$$X_T = X_L - X_c \tag{II.6}$$

Le facteur de qualité :

$$Q = \frac{L_s \omega_0}{R_s} = \frac{1}{C_s \omega_0 R_s} \tag{II.7}$$

b) Pour le circuit résonnant parallèle

L'impédance totale de circuit Z :

$$Z_p = \sqrt{R^2 + X_T^2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (\frac{1}{L\omega} - C\omega)^2}} \tag{II.8}$$

et le facteur de qualité :

$$Q = \frac{R_p}{L_p \omega_0} = C_p \omega_0 R_p \tag{II.9}$$

La fréquence de résonance

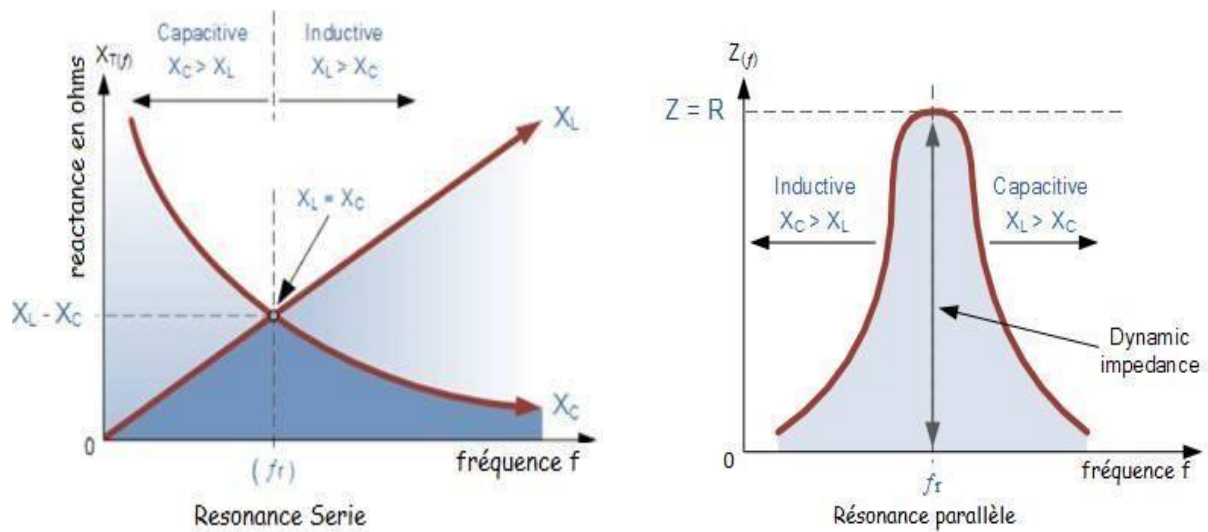


Figure II.4. Graphe illustrant la fréquence de résonance en fonction de la réactance [33].

La résonance électrique se produit dans un circuit AC lorsque $X_L = X_C$, ce dernier est représenté par le point où les deux courbes de réactance se croisent dans la figure (II.4). Dans un circuit de résonance, la fréquence de résonance f_r peut être calculée comme suit [33].

$$\omega_0 = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.10})$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{II.11})$$

II.2.4.2. Types de convertisseurs statiques à résonance

Les convertisseurs à résonance sont définis ici comme une combinaison de la topologie du convertisseur et la technique de commutation, ce qui résulte en ZVS (zéro-voltage-switching) et ZCS (Zero-Current-Switching). On peut distinguer trois catégories de ces convertisseurs :

- Convertisseurs à résonance coté alimentation.
- Convertisseurs à interrupteurs résonants.
- Convertisseurs à résonance coté charge.

II.2.4.2.1. Convertisseurs à résonance coté alimentation

Dans les onduleurs conventionnels à MLI (Figure II.5), l'entrée de l'onduleur est une tension avec une amplitude constante V_s , et la sortie sinusoïdale (monophasé ou triphasé) est obtenue par le mode de commutation, la tension d'entrée est faite pour osciller autour de la tension V_s au moyen d'un circuit résonant L-C, donc la tension d'entrée reste zéro pour une durée finie pendant laquelle les états des interrupteurs de l'onduleur peuvent être changés, aboutissant ainsi aux ZVS [34, 35].

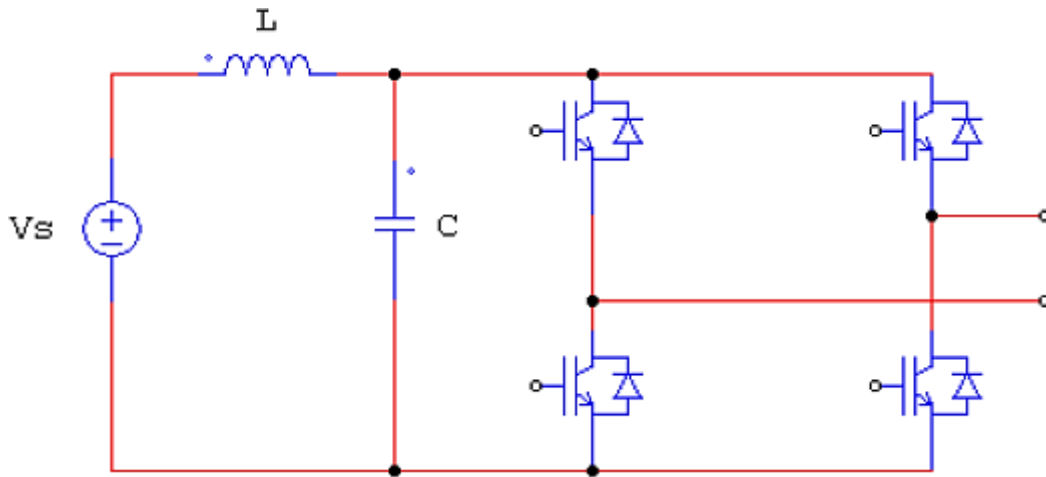


Figure II.5. Convertisseur à résonance coté alimentation [34,35].

II.2.4.2.2. Convertisseurs à interrupteurs résonants

Les interrupteurs sont caractérisés par une commutation spontanée et possèdent nécessairement trois segments. On aboutit aux quatre fonctions de la (figure II.6) auxquelles sont associés les CALC (circuits d'aide à la commutation) adéquats, à savoir un condensateur parallèle pour les fonctions de blocage et une inductance série pour les fonctions d'amorçage.

Les interrupteurs résonants sont alors obtenus en ajoutant à chacune des fonctions précédentes l'élément dual du CALC associé [36].

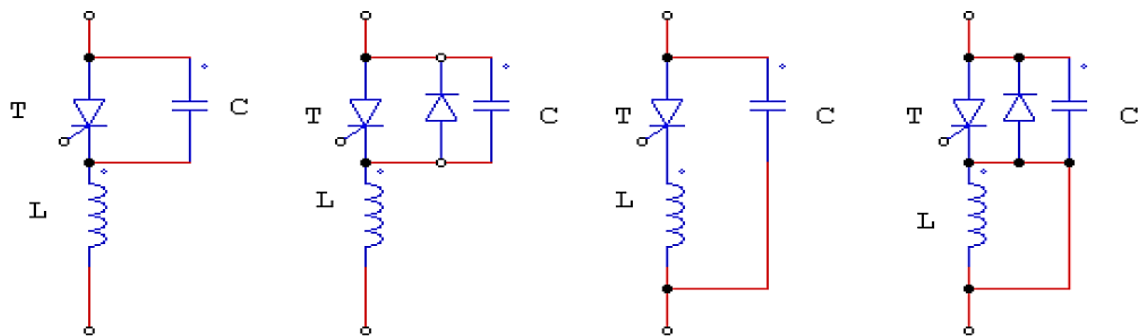


Figure II.6. Interrupteurs résonnants [36].

II.2.4.2.3. Convertisseurs à résonances coté charge

Ces convertisseurs sont obtenus par des circuits résonants LC. La tension et le courant oscillants, en raison de la résonance du circuit LC, sont appliqués à la charge et les interrupteurs du convertisseur peuvent être commutés à tension nulle et/ou à courant nul. Le circuit LC peut être employé en série ou en parallèle.

Dans ces convertisseurs, la puissance écoulee vers la charge est contrôlée par l'impédance résonante, qui à son tour contrôlée par la fréquence de commutation en comparaison avec la fréquence de résonance. Ces convertisseurs DC/DC et DC/AC peuvent être classés comme suit [34] :

A. Onduleurs à résonance

- Convertisseurs résonant séries (onduleurs de tension)
- Convertisseurs résonants parallèles (onduleurs de courant)
- A injection de courant

B. Convertisseurs à résonances classe E et sub-classe E.

II.3. Onduleurs à résonance

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC).

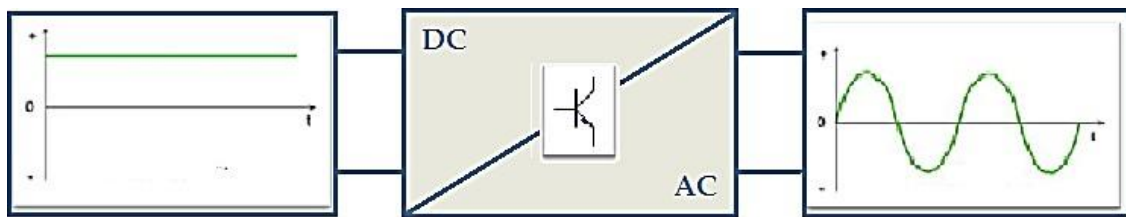


Figure II.7. Le principe de l'onduleur [34].

Leur principe est connu depuis de nombreuses années, leurs réels développements ne sont venus qu'après l'énorme de la progression de la technologie des semi-conducteurs.

La conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant la séquence adéquate de commande.

Par rapport aux autres convertisseurs de fréquence utilisés dans le chauffage par induction, les onduleurs présentent les avantages principaux suivants :

- Implantation facilitée par une masse plus faible.
- Meilleur rendement, en particulier sous charge partielle.
- Disponibilité de fonctionnement immédiate.
- Fonctionnement statique et silencieux.
- Compensation capacitive automatique par adaptation de la fréquence.

Dans les applications du chauffage par induction tous les onduleurs sont monophasés et autonomes par opposition aux onduleurs assistés dont la fréquence est imposée par le réseau. Ils sont soit pilotés c'est-à-dire à fréquence imposée par le circuit de commande, soit autopiloté, c'est-à-dire, à fréquence imposé par le circuit lui-même [37].

Parmi les onduleurs de tension ou de courant, on trouve les onduleurs à résonance qui sont une association de ces derniers avec un circuit oscillant.

Les onduleurs à résonance permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome. On distingue deux modèles à résonance [38, 39, 40].

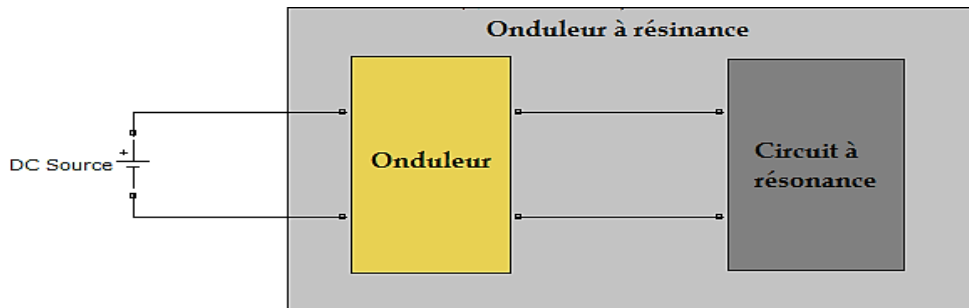


Figure II.8. Constitution de l'onduleur à résonance [38].

II.3.1. Onduleur à résonance série

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

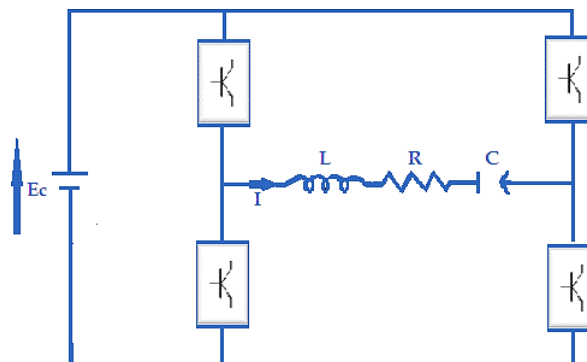


Figure II.9. Onduleur à résonance série (onduleur de tension) [39].

Un tel montage s'applique naturellement aux cas de fortes puissances et en basses fréquences, car l'impédance de l'inducteur est élevée ($L\omega$), ce qui nécessite une forte tension.

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

- Si $f < fr$, le courant est en avance par rapport à la tension, on a affaire à une commutation spontanée de blocage et amorçage commandé.

- Si $f > fr$, le courant est en retard par rapport à la tension, on a affaire à une commutation spontanée d'amorçage et un blocage commandé.

Le contrôle du convertisseur ne peut être effectué que par l'intermédiaire de la fréquence de commande [41,42].

II.3.2. Onduleur à résonance parallèle

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

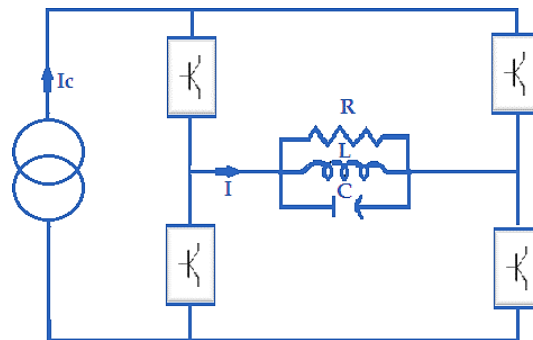


Figure II.10. Onduleur à résonance parallèle (onduleur de courant) [40].

L'analyse du fonctionnement montre que l'influence de la fréquence est tout à fait contraire à celle observée dans les onduleurs de tension :

- Pour $f < fr$, les signes de la commutation et du courant, dans chaque cellule, sont opposés, ce qui correspond à un blocage commandé des interrupteurs.
- Pour $f > fr$, les signes de la commutation et du courant sont identiques, ce qui correspond à un amorçage commandé des interrupteurs. [41, 42]

II.3.3. Onduleur à injection de courant

Le principe de ce type de dispositif est indiqué par la (figure II.11). Un circuit oscillant parallèle reçoit périodiquement des impulsions de courant apportant l'énergie dissipée dans la charge au cours de la période.

Ces impulsions sont commandées par l'inversion de la tension (dans le sens croissant, dans notre cas de figure) aux bornes de la charge ; elles proviennent de la décharge d'un condensateur C, décharge provoquée par l'enclenchement d'un thyristor T; les bobines servent à limiter l'intensité des courants de charge L et de déchargé (1) [43].

La tension aux bornes du thyristor s'exprime, lorsque T est bloqué par :

$$V_T = V_C - V \tag{II.12}$$

La tension V_T : prend une valeur maximale voisine de la somme des valeurs maximales de V_C et de V .

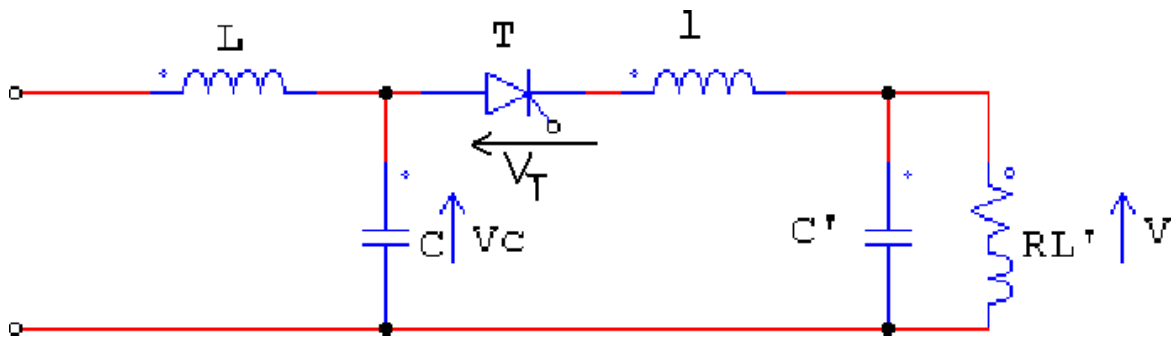


Figure II.11. Onduleur à injection de courant [43].

II.4. Convertisseurs à résonance classe E

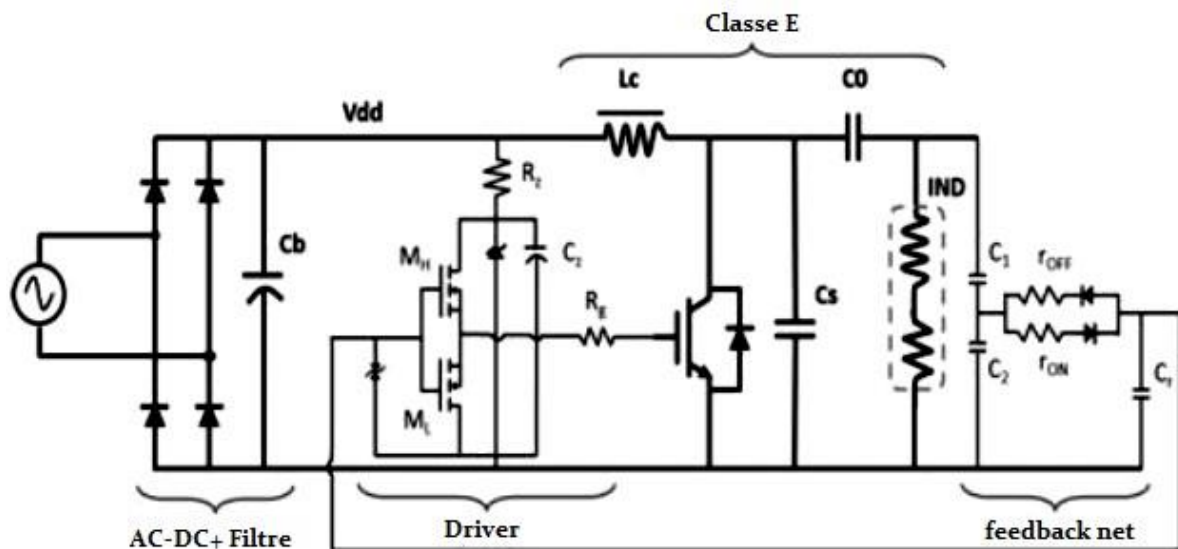


Figure II.12. Schéma du convertisseur à résonance Classe-E [44].

Le convertisseur à résonance Classe-E, offre plusieurs avantages tels que le coût, le bruit réduit, et l'absence de la commande du système d'alimentation par logique floue. Le courant de la charge est quasi sinusoïdal. La conception donnée ci-dessus convient aux applications de la puissance de sortie constantes, telles que des cuiseurs de riz ou les machines à café [44].

II.5. Les différents interrupteurs d'électroniques de puissance

II.5.1. Interrupteur parfait

Un interrupteur idéal est un dipôle qui réalise un court-circuit ou un circuit ouvert en fonction d'une commande externe. Il doit avoir les caractéristiques suivantes : impédance nulle à l'état fermé et infinie à l'état ouvert, puissance consommée et temps de commutation nuls. On peut donc avancer qu'un interrupteur idéal n'existe pas aujourd'hui. Dans l'état fermé, on dit que l'interrupteur est passant et dans l'état ouvert, on dit que l'interrupteur est ouvert.

II.5.2. Interrupteur à semi-conducteur

Il existe un grand nombre de composants à base de semi-conducteur assurant la fonction d'interrupteur. Tous ces composants fonctionnent en commutation entre deux états, ouvert (ou bloqué) et fermé (ou passant). La fermeture (ou mise en conduction) désigne le basculement de

l'état bloqué à l'état passant, et l'ouverture (ou blocage), le basculement inverse. On distingue trois familles de composants à base de semi-conducteurs, suivant les phénomènes physiques présents lors du fonctionnement. On parle de composants bipolaires, unipolaires et mixtes [45].

- **Composants bipolaires**

Comme la diode et le transistor bipolaire : ils mettent en jeu l'effet de modulation de conductivité qui permet de réduire autant que possible la chute de tension à l'état passant, par contre, ceci dégrade les performances dynamiques à l'ouverture et à la fermeture. Le principe est l'injection, dans la base, de porteurs (électrons/trous), qui réduisent la résistivité dès que leur concentration devient notablement supérieure à celle des porteurs normalement présents (phénomène de forte injection) [46].

- **Composants unipolaires**

Exemple la diode de Schottky, transistor MOS : contrairement aux précédents, ceux-ci ne mettent en jeu qu'un seul type de porteurs, les majoritaires de la région de base. Ainsi, la résistivité intrinsèque de la région de base n'est pas modulée et intervient pleinement dans la chute de tension. Il en résulte que, l'emploi de ce type de composants est réservé aux applications de basse tension (jusqu'à quelques centaines de Volts) ce sont des composants plus rapides que les bipolaires [46].

- **Composants mixtes**

L'idée d'associer les deux types de structures (bipolaire et unipolaire) donne naissance à une nouvelle structure appelée mixte. Un composant mixte est donc celui qui conjugue dans le même cristal les deux types précédemment cités, tel le transistor IGBT.

II.5.2.1. Classification des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs de puissance actuels peuvent être classés en trois catégories :

- Les éléments non commandables (diodes),
- Les éléments commandables à la fermeture (thyristors, triacs),
- Les éléments commandables à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, MOSFETs, IGBTs, GTOs).

A. Les diodes

La diode bipolaire est le composant bipolaire usuel en électronique de puissance. A la base, il est simplement issu d'une jonction PN. En électronique de puissance, cette jonction est améliorée pour satisfaire aux exigences de ce domaine. Un compromis doit être trouvé entre la tenue en tension, le courant de fuite, la chute de tension à l'état passant et le temps de commutation. Selon les applications, les compromis sont différents et l'optimisation se fera plus vers une caractéristique désirée (haute tension, fort courant ou temps de commutation). [47]

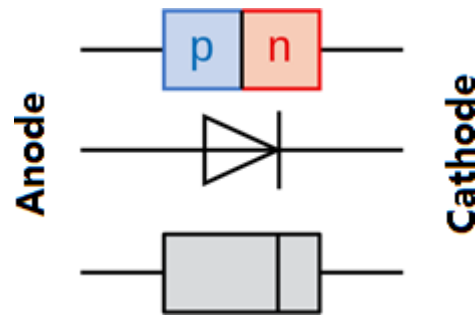


Figure II.13. Diode [47].

B. Thyristors

Le thyristor (ou "Diode commandée") est un semi-conducteur de structure PNPN (P étant un semi-conducteur Positif et N négatif) assimilable à un ensemble de trois jonctions ; il constitue un interrupteur unidirectionnel à fermeture commandée. Outre l'anode A et la cathode K, il est muni d'une électrode de déblocage ou gâchette.

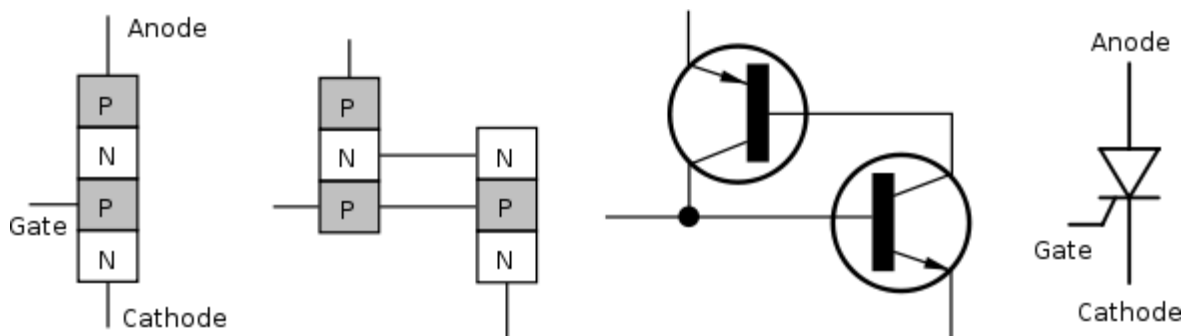


Figure II.14. Représentation schématique d'un thyristor [47].

C. Les MOSFETS

Le MOSFET (Métal Oxide Semi conductor Field Effect Transistor) ou transistors MOS est le transistor unipolaire (à porteurs majoritaires), le plus utilisé en électronique de puissance du fait qu'il soit normalement fermé. Il est constitué d'une grille métallique totalement isolée d'un canal par une mince couche isolante d'oxyde de silicium (SiO_2) d'épaisseur voisine de $0,1 \mu\text{m}$. La grille, la couche de silice et le canal constituent un condensateur dont la polarisation peut modifier la conductivité du canal.

Le transistor MOS possède 4 électrodes :

- La Source (Source) S : elle représente le point de départ des porteurs.
- Le Drain (Drain) D : point de collecte des porteurs.
- La Grille (Gate) G et le Substrat (Body) B sont les électrodes de la capacité MOS qui contrôle le nombre de porteurs présents dans le canal.
- **Paramètres du transistor MOSFET**

Voici quelques paramètres utiles à la compréhension de ce composant :

Vgs: c'est la tension entre la grille du transistor, équivalent à la base d'un bipolaire, et la source. Il faut noter que pour un transistor MOS, le respect de ce paramètre est crucial, car autrement, on risque le claquage du transistor.

Idss: courant circulant entre le drain et la source: c'est le courant continu maximal qui peut circuler sans destruction du composant. La plupart des datasheets de ces transistors décrivent le courant max en pointe, pendant une période de temps très court.

Rdson: c'est la résistance série entre le drain et la source, pour une tension VGS (grille source) donnée. On veillera à ce que la puissance générée dans cette résistance soit dissipée par le boîtier du transistor : $P=RI^2$.

Vds: C'est la tension drain source maximale avant destruction du composant.

Vth: C'est le seuil du MOS.

Ciss: Capacité d'entrée: capacité de grille. en cas d'ajout d'une résistance de grille, on veillera à ce que le filtre RC passe bas ainsi créé, ne gêne en rien quant au bon fonctionnement du circuit.

Coss: Capacité de sortie.

- **Fonctionnement du MOSFET**

La principale différence avec un transistor bipolaire se situe au niveau du circuit de commande (grille source) : celui-ci présente une impédance d'entrée quasiment infinie. Ce transistor est donc commandé en tension par VGS contrairement au bipolaire qui l'était en courant par le courant de base. Le principal avantage du transistor MOS est donc de pouvoir maintenir un état donné sans avoir à fournir de puissance (courant d'entrée nul). Ce composant est surtout utilisé en commutation que ce soit pour l'électronique de puissance ou pour la réalisation de circuit numérique. Le transistor MOS à canal N se commande avec une tension grille source positive ($VGS > 0$) qui provoque la circulation d'un courant dans le sens drain source. ($ID > 0$) Le transistor MOS à canal P se commande avec une tension VGS négative et le courant circule de la source vers le drain : ID négatif. Lorsque la tension VGS est nulle le courant de drain l'est aussi [48].

- **MOSFET canal N**

Le transistor MOSFET à canal N doit être dirigé du côté où le potentiel est le plus bas, c'est-à-dire que la source (l'arrière de la flèche doit être du côté du potentiel le plus bas) Ce transistor MOSFET fonctionne avec une tension VGS positive. En effet pour que le transistor devienne passant il faut que la tension VGS soit positive. Plus la tension VGS sera positive et plus le MOSFET sera passant et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus fort (interrupteur complètement fermé). Cas inverse, lorsque la tension VGS sera proche de zéro il deviendra un interrupteur ouvert et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus faible lorsque la tension VGS diminuera. [48]

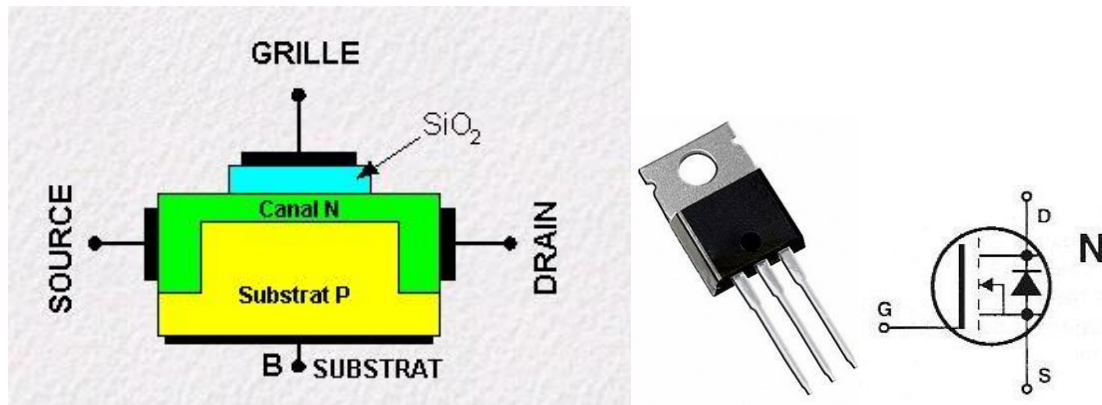


Figure II.15. MOSFET canal N [49].

- **MOSFET canal P**

Le transistor MOSFET à canal P doit être dirigé du côté où le potentiel est le plus haut, c'est-à-dire que la source (la tête de la flèche doit être du côté du potentiel le plus haut) Ce transistor MOSFET fonctionne avec une tension V_{GS} négative, en effet pour que le transistor devienne passant il faut que la tension V_{GS} soit négative. Plus la tension V_{GS} sera négative et plus le MOSFET sera passant et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus fort (interrupteur complètement fermé). Cas inverse, lorsque la tension V_{GS} sera proche de zéro il deviendra un interrupteur ouvert et le courant circulant dans le drain sera de plus en plus faible lorsque la tension V_{GS} augmentera.[48]

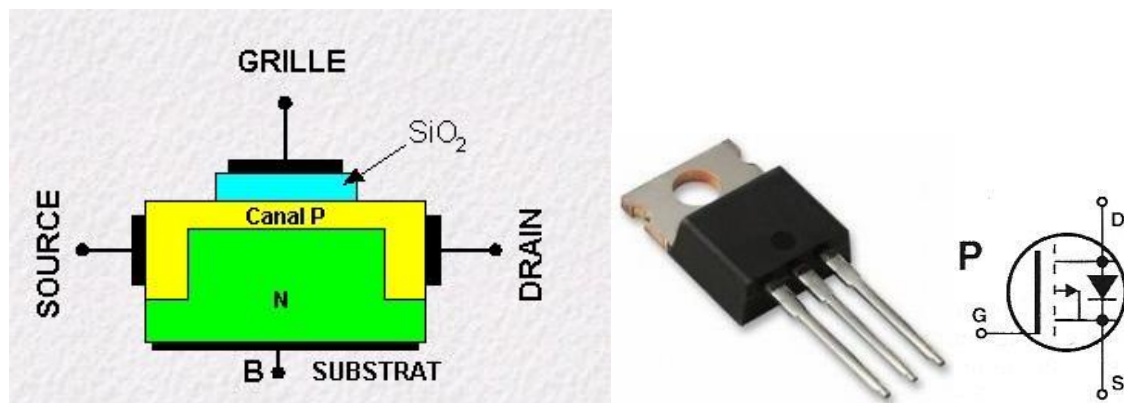


Figure II.16. MOSFET canal P [49].

Ces dispositifs présentent de nombreuses qualités :

- Impédance d'entrée élevée et donc une facilité de commande par la grille isolée.
- Grande vitesse de commutation liée à l'absence de stockage des porteurs minoritaires.
- Comportement électrothermique positif (augmentation de la résistance à l'état passant lorsque la température augmente) qui empêche l'emballement thermique.

D. LES IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)

Ce sont des composants de puissance qui associent MOS et transistor bipolaire de puissance. Ils cumulent les avantages des deux sans totalement en éliminer les inconvénients un IGBT type NPN possède comme un transistor bipolaire un collecteur et un émetteur mais la base est remplacée par une électrode haute impédance qui est la grille d'un MOS. Il est constitué par un transistor bipolaire PNP de puissance de faible gain associé à un MOS canal N qui fournit le courant de base. La structure interne est représentée sur la figure ci-contre.[49]

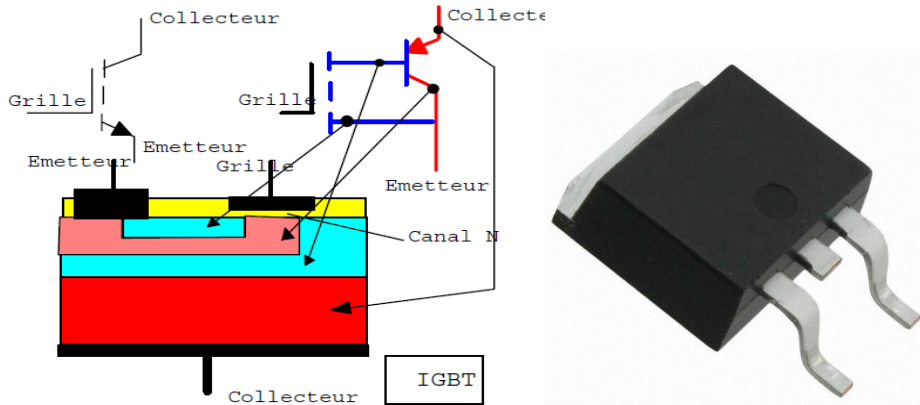


Figure II.17. Structure d'un IGBT [49].

II.5.3. Gamme de fréquences des interrupteurs

Tableau II.1. Gamme de fréquences des interrupteurs [30].

Game de fréquence	300 à 2000 Hz	2 à 5 KHz	10 à 50 KHz	50 à 500 KHz
Interrupteurs	Thyristors Thyristors IGCT	Thyristors rapides IGCT	Transistors IGBT	Transistors à effet de champ (MOSFET)

- IGBT : Isolated Gate Bipolar Transistor
- MOSFET: Metal Oxyde Semi-conductor.
- IGCT : Integrated Gate Commutated Thyristor

II.5.4. Les modes de commande des interrupteurs

Les thyristors ne sont commandables qu'à la fermeture.

Les thyristors IGCT et les transistors bipolaires, IGBT et MOSFET sont commandables soit à la fermeture ou à l'ouverture.

Ainsi, selon le type de convertisseurs de fréquence et les interrupteurs utilisés, il existe différents modes de commande de ces interrupteurs, sachant qu'ils sont commandés :

- Soit à la fermeture (mode thyristor), l'ouverture étant spontanée,
- Soit à l'ouverture (mode thyristor dual ou thyristor diode dual), la fermeture étant spontanée, et que leurs caractéristiques intensité/tension sont différentes.

II.6. Principe et critères de choix de la topologie et des convertisseurs de fréquence pour le chauffage par induction

Le choix de la topologie dépend entièrement de la situation et des différences liés aux limitations sur la puissance, le rendement et le coût.

A. Choix du type d'onduleur et des interrupteurs

Dans les deux cas (onduleurs série et parallèle), à la résonance, il débite sur une résistance pure.

- Un montage série s'applique naturellement aux cas des fortes puissances et en basses fréquences, car l'impédance de l'inducteur est alors élevée $L\omega$ (inducteur impédant), ce qui nécessite une forte tension
- Dans le montage parallèle, la tension aux bornes de l'inducteur est celle du générateur. Un tel montage s'applique au cas des faibles puissances et en hautes fréquences pour lesquelles l'impédance de l'inducteur ne demande pas une forte tension. Pour ce qui est de la fréquence on peut citer :
- Le réseau pour du chauffage à 50 Hz et pour des puissances pouvant atteindre plusieurs MW.
- Les générateurs à thyristors pour les fréquences comprises entre 300Hz et 10 kHz,
- Les générateurs à transistors IGBT pour les fréquences comprises entre 10 à 50 kHz.

Et pour les applications qui nécessitent des fréquences plus élevées avec des puissances mises en jeu plus faible, on utilise les générateurs à Transistors à effet de champ (MOSFET).

B. Choix de la topologie interne de l'onduleur

- **Onduleur en Demi-pont (Half Bridgt)**

Un onduleur en demi-pont est constitué de deux interrupteurs comme le montre la figure (II.18)

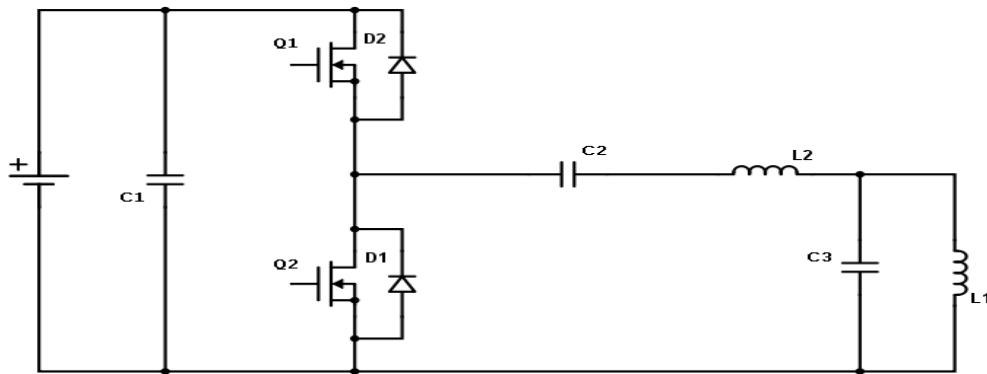


Figure II.18. Onduleur en demi-pont.

Les générateurs réalisés selon cette structure sont de faibles puissances, mais ont l'avantage de ne pas être très onéreux. Le problème majeur à résoudre sur cette topologie est la surtension qui apparaît aux bornes des deux interrupteurs, et qui devient rapidement prohibitive lorsque le générateur ne fonctionne pas dans ses conditions optimales (charge magnétique, petit entrefer).

Les puissances restent toujours modestes (inférieur à 15 kW). Les fréquences peuvent être élevées, selon l'interrupteur utilisé.

Dans le chauffage par induction ce type d'onduleur est utilisé dans le cas où les charges sont fixes, constantes et bien couplées.

- **Onduleur en pont-complet (Full Bridgt)**

Utilisé dans les conceptions de puissance élevée, il est constitué de 4 interrupteurs formant un pont en H (un pont complet).

L'onduleur en pont-complet est préférable à l'onduleur en demi-pont. Il peut fournir deux fois la tension de sortie. Ceci implique que, pour la puissance équivalente de sortie, le courant de sortie est divisé par deux [2].

Il est utilisé quand la charge dans le chauffage par induction est évoluant.

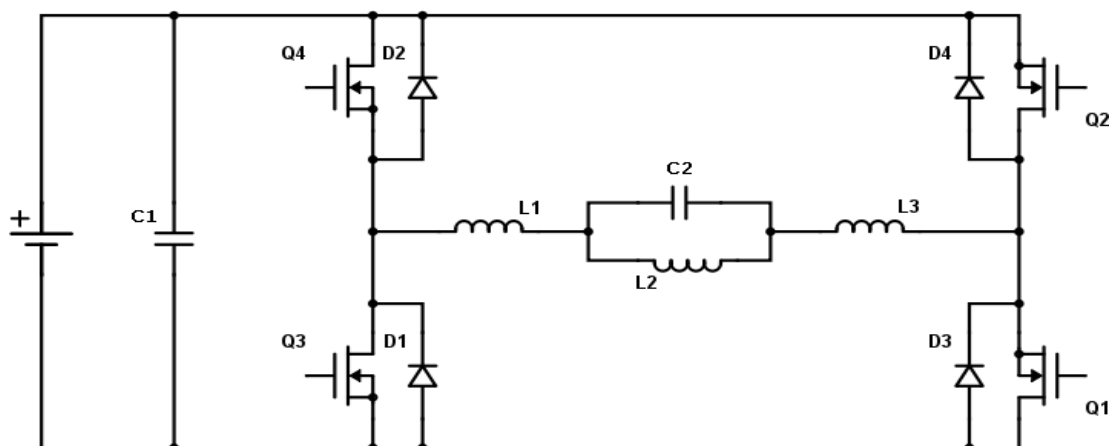


Figure II.19. Onduleur en pont-complet [2].

C. Exemple :

Un four de fusion de 500 kW- 1 000 Hz :

- $f < 10$ kHz thyristors
- Charge évoluant onduleur en H ↔ Onduleur de tension à thyristors
- Inducteur impédant tension

Pour notre système de chauffage, la puissance devrait avoisiner 500 W- 1 KW la fréquence est inférieure à 100 KHz et notre charge sera constante et bien couplée à l'inducteur, ce qui nécessiterai donc un convertisseur parallèle en demi-pont avec des transistors MOSFET

II.7. Conclusion

Le chauffage par induction se distingue par la nécessité de régler la fréquence utilisée en fonction de la nature et des dimensions des charges à chauffer. Par conséquent, dans la plupart des cas, l'utilisation de convertisseurs de fréquence, également appelés "alimentations à résonance", est requise. Dans ce chapitre, nous avons examiné les différentes configurations de convertisseurs à résonance, notamment celles des onduleurs à résonance, ainsi que les divers composants semi-conducteurs utilisés dans le domaine du chauffage par induction. Nous avons également étudié les différentes plages de fréquences des interrupteurs et leur mode de commande, dans le but de sélectionner la meilleure configuration adaptée à notre application.

Chapitre III :

Conception de l'inducteur et simulation du circuit de puissance de commande

III.1. Introduction

À partir des chapitres précédents, nous avons constaté que le phénomène de chauffage par induction (CPI) est étroitement lié aux principes fondamentaux de l'électromagnétisme. Afin de calculer les différentes grandeurs physiques liées au CPI, il est nécessaire de résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP). Cette résolution peut être effectuée soit à l'aide de méthodes analytiques, soit plus couramment avec des méthodes numériques telles que les méthodes des éléments finis, des différences finies ou des volumes finis.

Dans le présent chapitre, nous allons explorer la manière dont les EDPs décrivant le CPI, dérivée des équations de Maxwell, peut être formulée. Nous allons également présenter les outils de simulation disponibles, ainsi que les équations thermiques régissant le CPI. Nous utiliserons deux logiciels pour effectuer ces calculs : Matlab avec sa plateforme Simulink et le logiciel COMSOL Multiphysics.

III.2. Description mathématique des phénomènes liés au chauffage par induction

III.2.1. Phénomènes physiques dans l'induction

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

III.2.1.1. L'électromagnétisme dans l'induction

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

- Équation du flux magnétique :

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{III.1})$$

- Équation de Maxwell-Gauss :

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (\text{III.2})$$

- Équation de Maxwell-Faraday :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{III.3})$$

- Équation de Maxwell-Ampère :

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{III.4})$$

avec,

H : Champ magnétique [A/m].

E : Champ électrique [V/m].

B : Induction magnétique [T].

Chapitre III Conception de l'inducteur et simulation du circuit de puissance de commande

$D = (\varepsilon E)$: Induction électrique [C/m^2].

J : Densité du courant [A/m^2].

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m^3] En particulier pour les métaux, les charges libres sont les électrons de conduction et les charges liées sont représentées par les cations du réseau cristallin.

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

L'équation (III.1) appelée aussi la première loi de Gauss (magnétique), stipule que la divergence de la densité du flux magnétique est nulle. Autrement dit, les lignes du champ (B) forment des boucles continues. L'équation (III.2) est appelée aussi la deuxième loi de Gauss (électrique), elle montre que les lignes du champ de déplacement électrique (D) forment aussi des boucles continues. L'équation (III.3) décrit comment la variation d'un champ magnétique peut créer (induire) un champ électrique et des courants induits dans la région au voisinage du conducteur dont le sens est contraire à celui du champ magnétique. L'équation (III.4) énonce que les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par les courants électriques (théorème d'Ampère) et par la variation d'un champ électrique. [50]

Pour pouvoir simuler le phénomène électromagnétique, il faut compléter les équations de Maxwell par les paramètres matériaux qui relient les différentes valeurs scalaires entre elles :

$$D = \varepsilon E \quad (\text{III.5})$$

ε : La permittivité diélectrique [$F.m^{-1}$].

$$B = \mu H \quad (\text{III.6})$$

μ : La perméabilité magnétique [$H. m^{-1}$].

$$j = \sigma E \quad (\text{III.7})$$

σ : La conductivité électrique [$\Omega^{-1}. m^{-1}$].

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

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

A : le vecteur potentiel magnétique [Wb/m].

v : le vecteur vitesse de la particule [m/s].

Cette équation découle du théorème d'Ampère, qui énonce que « la circulation, le long d'un circuit fermé, du champ magnétique engendré par une distribution de courant est égal à la somme algébrique des courants qui traversent la surface définie par le circuit orienté, multiplié par la perméabilité magnétique ». [51] soit :

$$\oint B. dl = \mu \sum I_{traversant} \quad (\text{III.9})$$

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

Chapitre III Conception de l'inducteur et simulation du circuit de puissance de commande

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

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

Sachant que [52] :

$$\sum I_{traversant} = \iint J_{total} \cdot ds \quad (\text{III.10})$$

et en utilisant le théorème de Stokes :

$$\oint B \cdot dl = \iint \text{rot} B \cdot ds \quad (\text{III.11})$$

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

$$\text{rot} B = \nabla \times B = \mu J_{total} \quad (\text{III.12})$$

or,

$$J_{total} = J + J_{maxwell} + J_{lorentz} \quad (\text{III.13})$$

avec

- J : La densité de courant électrique dans l'inducteur.
- $J_{maxwell}$: La densité de courant de déplacement de Maxwell.

$$J_{maxwell} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = -\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \quad (\text{III.14})$$

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

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

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

$$\nabla \times B = \mu\left(J - \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \sigma\left(-\frac{\partial A}{\partial t} + v \times B\right)\right) \quad (\text{III.16})$$

Finalement on trouve:

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

En utilisant,

- $A = A_0 e^{j\omega t + \varphi}$: la notation complexe.
- φ : la phase.
- j tel que $j^2 = -1$.

On obtient :

$$\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \varepsilon (J\omega)^2 A_0 e^{j\omega t + \varphi} = -\varepsilon \omega^2 A \quad (\text{III.18})$$

et

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

d'où :

$$\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = (J\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)A \quad (\text{III.20})$$

On obtient finalement :

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

L'équation sous dessous montre la générale de l'électromagnétisme (III.8) telle qu'elle apparait dans COMSOL.

$$(J\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_r)A + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}B) - \sigma v \times B = J_e$$

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

III.2.1.2. Transfert de chaleur

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

III.2.1.2.1. Transfert de chaleur par conduction

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

$$\mathbf{q}_{cond} = -\mathbf{k}_{grad} \quad (\text{III.22})$$

où,

\mathbf{q}_{cond} : est le flux de chaleur transmise par conduction [W. m^2].

K : est la conductivité thermique [W. $m^{-1}.k^{-1}$].

T : est la température [K].

D'après cette loi, le taux de chaleur transmet par conduction est proportionnel au gradient de la 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.

III.2.1.2.2. Transfert de chaleur par convection

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

$$q_{conv} = h(T_s - T_a) \quad (\text{III.23})$$

où,

q_{conv} : le flux de chaleur transmise par convection [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

h : le coefficient de transfert par convection [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

T_s : la température de la surface [K].

T_a : la température ambiante [K].

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

III.2.1.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

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

$$q_{rad} = c_s(T)(T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{III.24})$$

Où

q_{rad} : le flux de chaleur transmise par rayonnement [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

c_s : le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

T_s : la température de la surface [K].

T_a : la température ambiante [K].

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, du fini 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 suivante. [52] :

$$q_{rad} = \sigma_s \varepsilon_{emi}(T)(T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{III.25})$$

Où

σ_s : la constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

$\varepsilon_{emi}(T)$: l'émissivité du matériau.

III.3. Conception et simulation de l'inducteur

Dans notre circuit, nous aurons besoin d'un inducteur multi-spire pour stocker de l'énergie sous forme de champ magnétique. Ce composant est composé d'un noyau en matériau ferromagnétique autour duquel sont enroulées plusieurs spires de fil conducteur. Le courant électrique traversant les spires crée un champ magnétique stocké dans le noyau. [53]

L'inductance de l'inducteur multi-spire dépend de plusieurs facteurs, tels que le nombre de spires, la taille du noyau et la perméabilité magnétique du matériau. Les inducteurs multi-spire sont largement utilisés dans les circuits électroniques pour filtrer les signaux, réguler les tensions et stocker de l'énergie. Dans ce cas précis, nous pourrions opter pour un inducteur toroïdal, un type commun d'inducteur multi-spire, pour ses avantages en termes de faible rayonnement électromagnétique et d'efficacité élevée en matière de stockage d'énergie. Les inducteurs toroïdaux sont également utilisés dans les applications industrielles, notamment les transformateurs de puissance et les convertisseurs de fréquence. [54]

III.3.1. Conception et simulation de l'inducteur (multispire) sous COMSOL Multiphysics

III.3.1.1. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un outil de simulation numérique conçu par l'entreprise « COMSOL » qui spécialise dans le domaine de développement de logiciels, de support technique, de formation spécialisée et de conseil, développé au Royal Institute of Technology (Suède) [55]. Ce logiciel est largement utilisé à travers le monde pour modéliser et simuler tout système basé sur la physique parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel [56]. Le logiciel COMSOL basé principalement sur la méthode des éléments finis permet de traiter de nombreux problèmes grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées. Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique, 2D, 2D-axisymétrique ou 3D). Par ailleurs, COMSOL Multiphysics possède un environnement de programmation dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Par défaut le maillage est automatique et se compose de triangle en 2D et de tétraèdre en 3D. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « solvers », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendant du temps. [57]

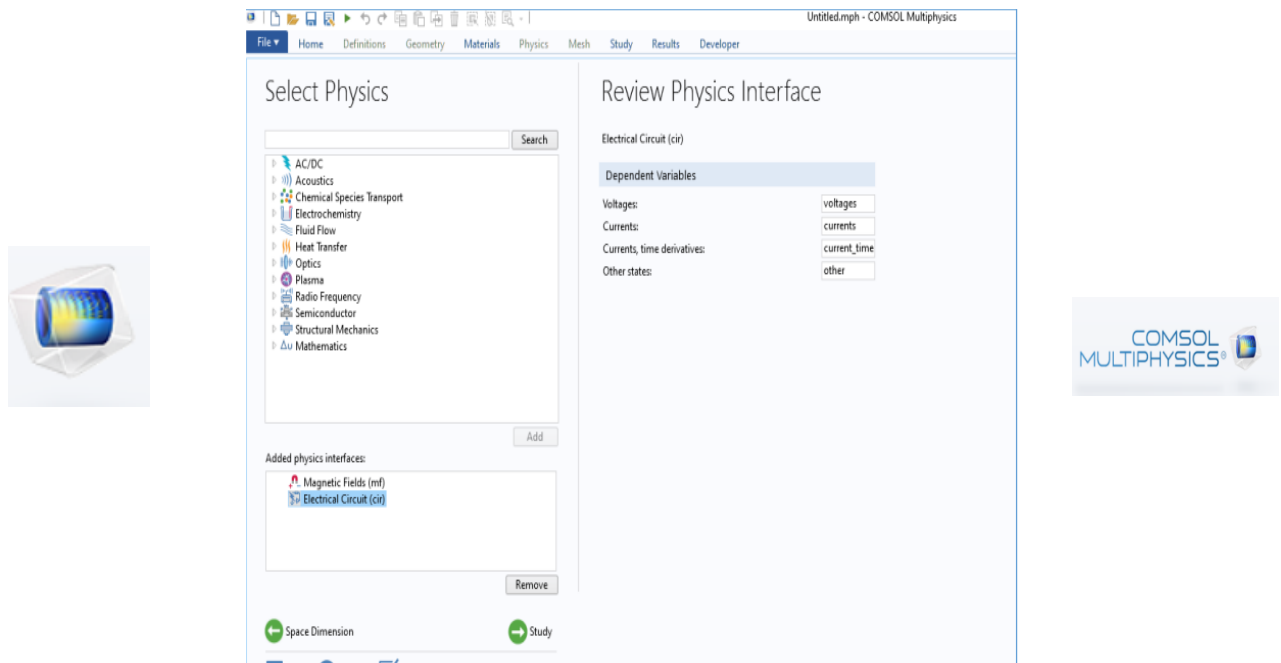


Figure III.1. Logos et interface du logiciel COMSOL Multiphysics.

III.3.1.2. Conception et simulation de l'inducteur multi spires et la charge

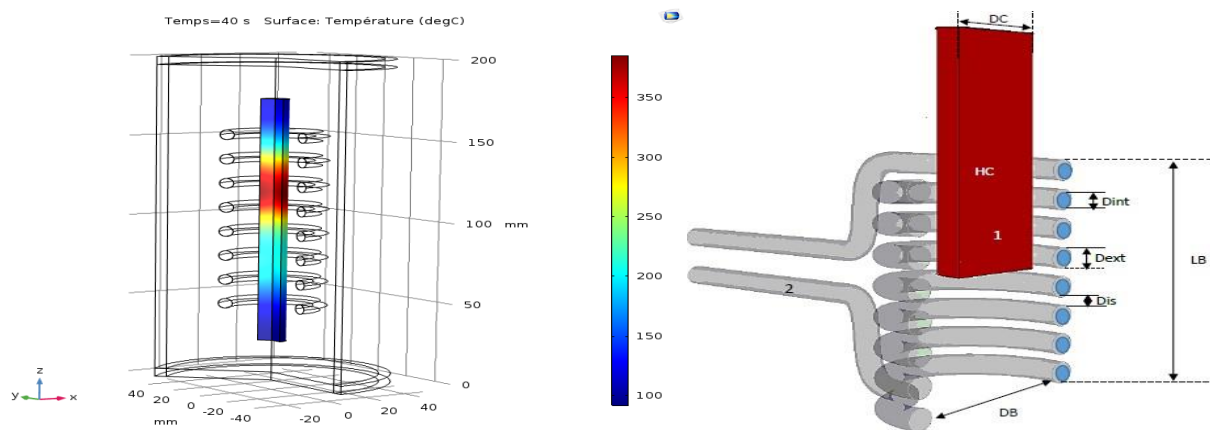


Figure III.2. Schémas général de l'inducteur multi spires et la charge.

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

1: Charge

DB : diamètre de l'inducteur

2: Inducteur

Dint : diamètre intérieur du tube en cuivre

LB : longueur de l'inducteur

Dext : diamètre extérieur du tube de cuivre

HC : Hauteur de la charge

DC : diamètre de la charge (cas charge cylindrique)

Chapitre III Conception de l'inducteur et simulation du circuit de puissance de commande

On ajoute à ses paramètres la valeur de l'entrefer entre l'inducteur et la charge qu'on notera enf et N_s qui représente le nombre de spires égale à 8 dans la figure ci-dessus.

Les paramètres géométriques de l'inducteur sont :

Tableau III.1. Paramètres géométrique de l'inducteur

DB	LB	Dint	Dext	HC	DC	N_s	Enf	Dis
52mm	100 mm	3mm	5mm	150mm	6mm	8spires	10 mm	15mm

Remarque :

Les diamètres DB, Dext, Dint sont imposés, les seuls paramètres qui varient dans la conception de l'inducteur sont sa longueur LB et le nombre de spires N_s

A. En Application magnéto Harmonique 2D axisymmetric

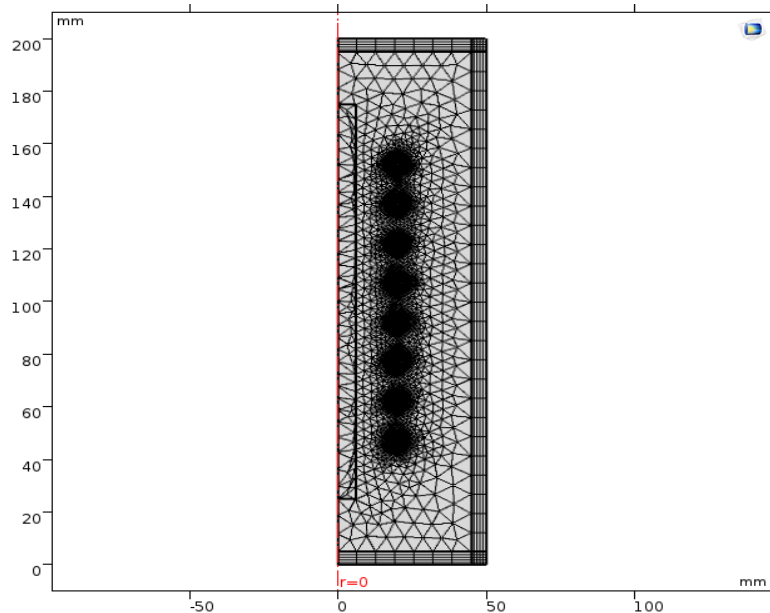


Figure III.3. Inducteur multi spires et la charge sous COMSOL Multiphysics , structure maillée

Cette **figure III.3.** représente L'étude de convergence du modèle 2D axisymétrique s'est faite en deux parties. Dans la première, le maillage a été raffiné jusqu'à convergence des résultats, ensuite le temps a été est judicieusement choisi pour assurer la convergence du modèle pour faciliter les calculs.

Résolution de la charge :

Cette **figure III.4.** Représente la Distribution de la densité du courant [A/m^2] dans l'inducteur et la charge

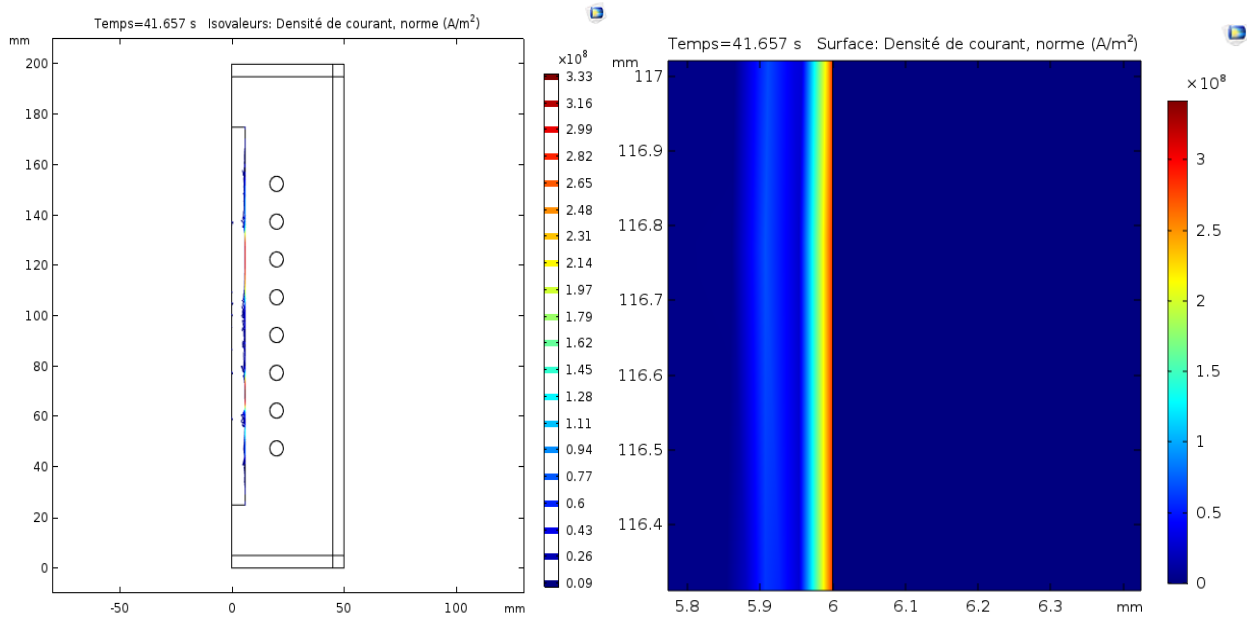


Figure III.4. Distribution de la densité du courant [A/m^2] dans l'inducteur et la charge.

Cette **figure III.5.** Représente Distribution de la densité de flux magnétique[T] dans l'inducteur (multi spires) et la charge.

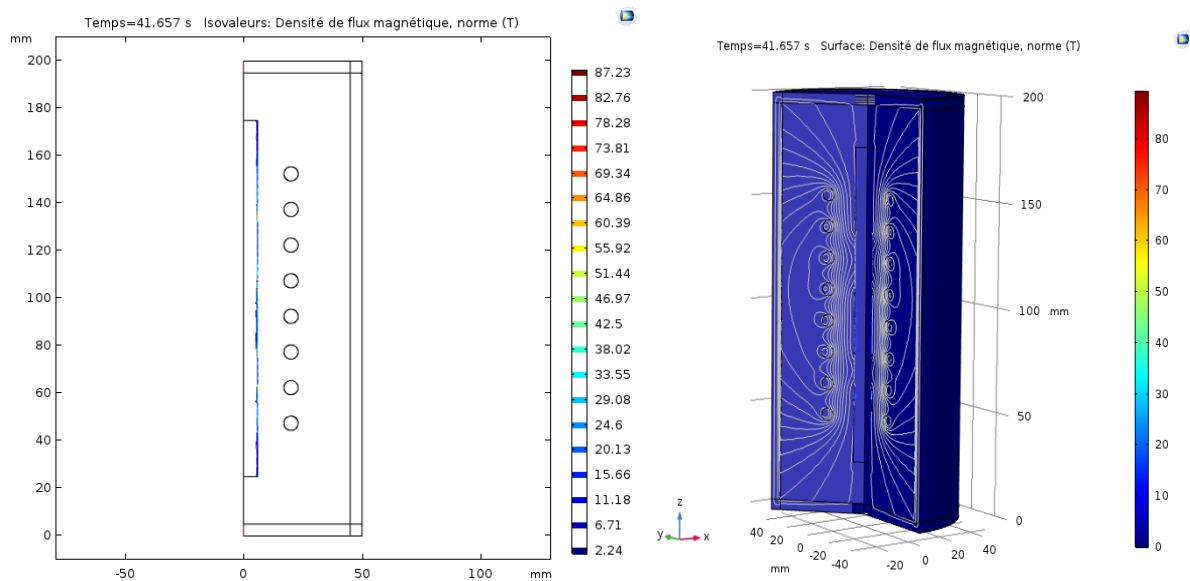


Figure III.5. Distribution de la densité de flux magnétique[T] dans l'inducteur multi spires et la charge.

Résultats de simulation

Le **tableau III.2.** Représente Les résultats de simulation sous COMSOL Multiphysics en charge nous obtenons sept valeurs de : Tension(V), Fréquence (Hz), Courant (I), Induction (H)

Résistance (Ohm), P-active (W), P-réactive (Var).

Tableau III.2. Les résultats de simulation sous COMSOL Multiphysics en charge

Tension V	Fréquence Hz	Courant I	Induction H	Résistance Ohm	P-active W	P-réactive Var
58	75000	90.43	0.118	0.028	228.6	4466.13

En application Magnéto-Harmonique couplé à la Thermique Transitoire 2D

Cette application est utilisée pour résoudre simultanément le problème électromagnétique en fréquentiel et le problème thermique en temporel. Le changement de température dans notre dispositif est donné par la figure ci-dessous.

Cette **figure III.6.** Représente la distribution de la température [K] et [degré C°] dans la charge après quarante et une seconde de chauffe.

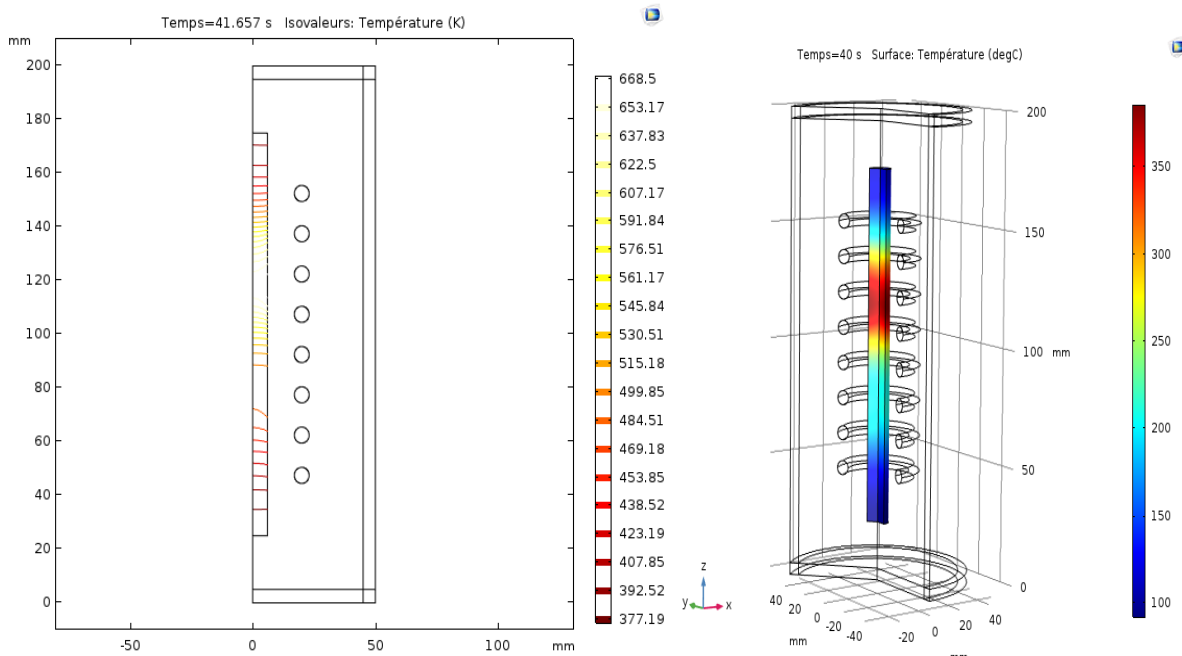


Figure III.6. Distribution de la température[K] et [degré C°] dans la charge après quarante et une seconde de chauffe.

III.4. Etude et Simulation du circuit de puissance

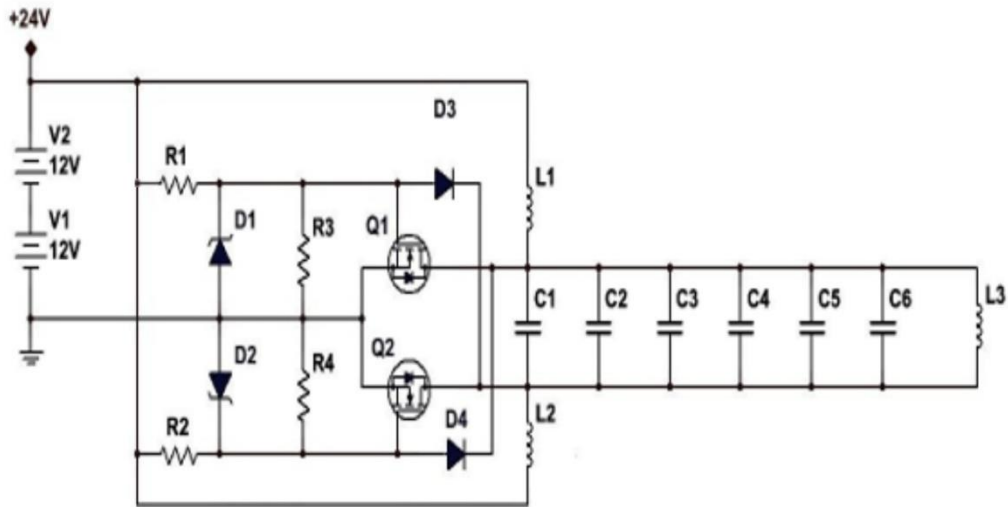


Figure III.7. Schéma général du système étudié.

Dans ce schéma on utilise une alimentation continue capable de fournir une puissance de 400 watts.

Avec une fréquence élevée et une impédance très faible, on a un courant important dans la bobine et un champ magnétique variant rapidement, ce qui permet d'obtenir une tension élevée dans la charge, donc un courant de court-circuit très important et un effet Joules considérable.

Le circuit 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 μH (Micro hertz).

III.4.1. Représentation et étude du schéma sous Matlab Simulink

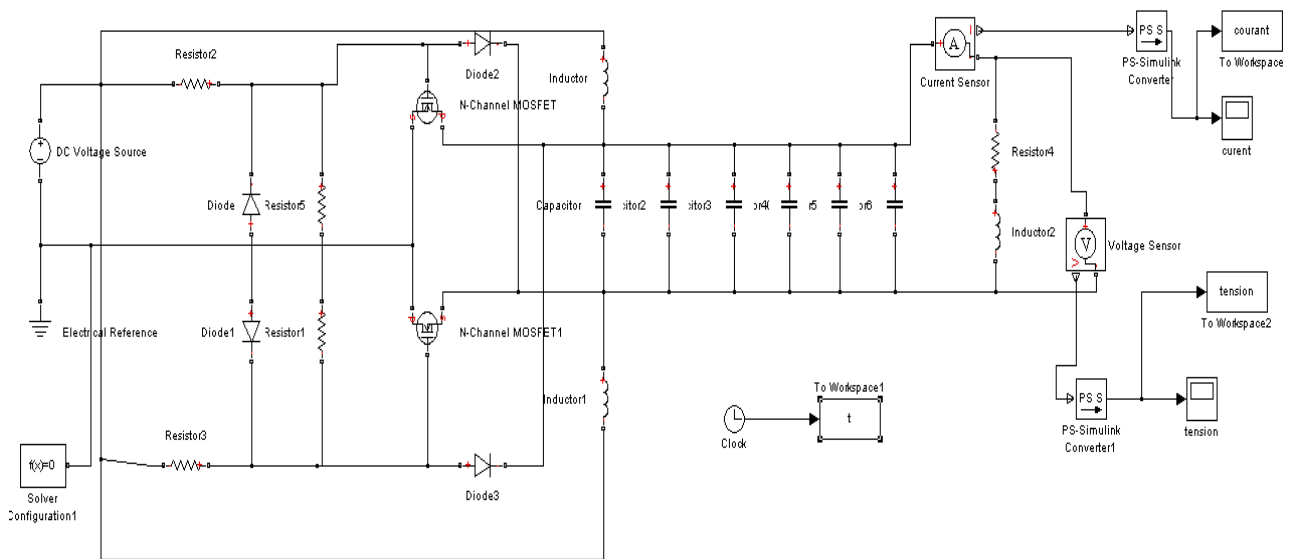


Figure III.8. Schéma bloc du système étudié sous Matlab/Simulink.

A. Résultat de la simulation avec six capacités de 0.47µF

La capacité équivalente est de : **2.82 µF (Micro farad)**

Cette **figure III.9.** représente la courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur d'une capacité équivalente de **2.82 µF** on observe deux parties dans la courbe la première partie on voit un régime transitoire , tel que la deuxième partie on voit que le régime est permanent.

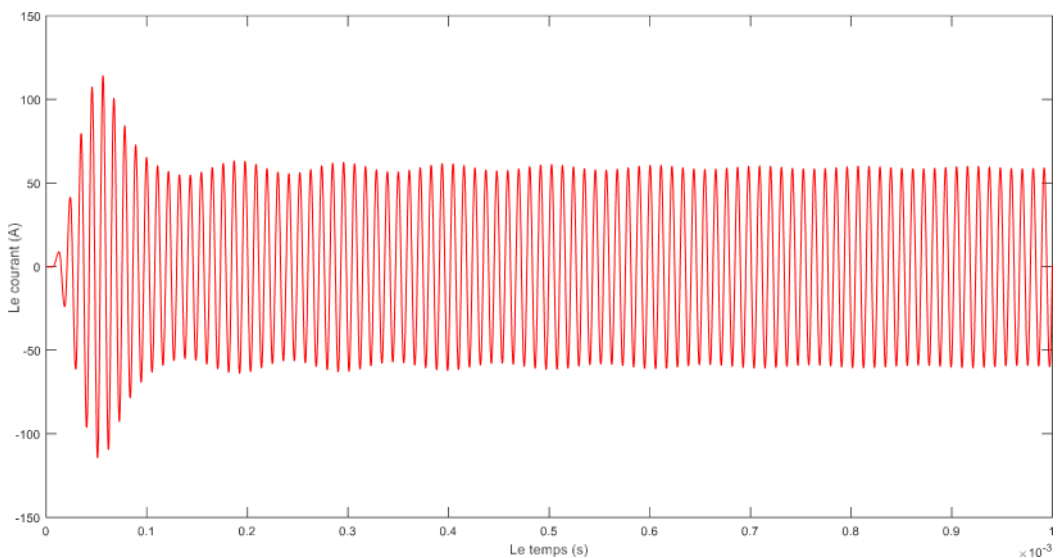


Figure III.9. Courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur.

Cette **figure III.10.** Représente la courbe d'évolution temporelle du tension à l'entrée de l'inducteur d'une capacité équivalente de **2.82 µF** on observe deux parties dans la courbe la première partie on voit un régime transitoire , tel que la deuxième partie on voit que le régime est permanent .

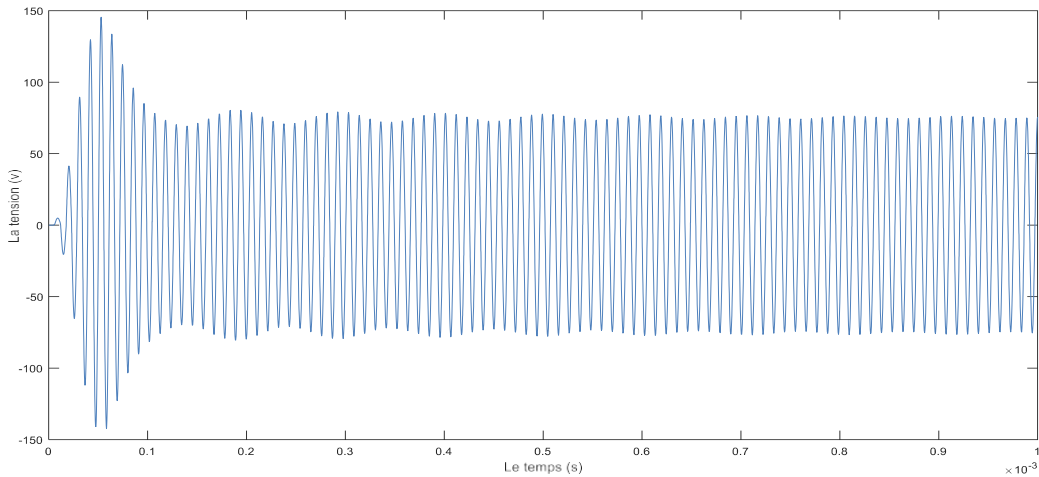


Figure III.10. Courbe d'évolution temporelle de la tension aux bornes de l'inducteur.

Résultats de simulation

Le **tableau III.3.** représente les résultats de la simulation en utilisant trois capacités de **0.47 μF** (micro farad) et nous obtenons quatre valeurs de : tension Max (V) , tension efficace (V) , courant Max (A) , courant efficace (A) :

Tableau III.3. Les résultats de simulation sous Matlab avec trois capacités de **0.47 μF** (micro farad).

Tension max (v)	Tension efficace (v)	Courant max (A)	Courant efficace (A)
74	52.48	53	37.58

La simulation a été conduite pour une fréquence égale à la fréquence de résonance telle que :

$$LC\omega^2 = 1$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{27 \times 10^{-6} \cdot 2.82 \times 10^{-6}}} = 57678 \text{ Hz}$$

B. Résultat de la simulation avec six capacités de 0.44 μF

La capacité équivalente est de : **2.64 μF (Micro farad)**

Cette **figure III.11.** représente la courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur d'une capacité équivalente de **2.64 μF** on observe deux parties dans la courbe la première partie on voit un régime transitoire , tel que la deuxième partie on voit que le régime est permanent.

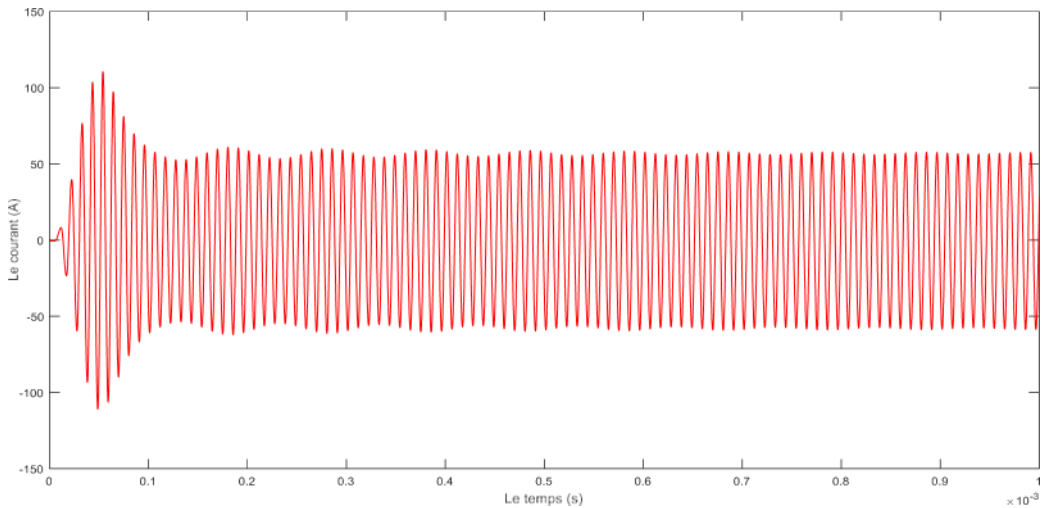


Figure III.11. Courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur.

Cette **figure III.12.** représente la courbe d'évolution temporelle du tension à l'entrée de l'inducteur d'une capacité équivalente de **2.64 μF** on observe deux parties dans la courbe la première partie on voit un régime transitoire , tel que la deuxième partie on voit que le régime est permanent.

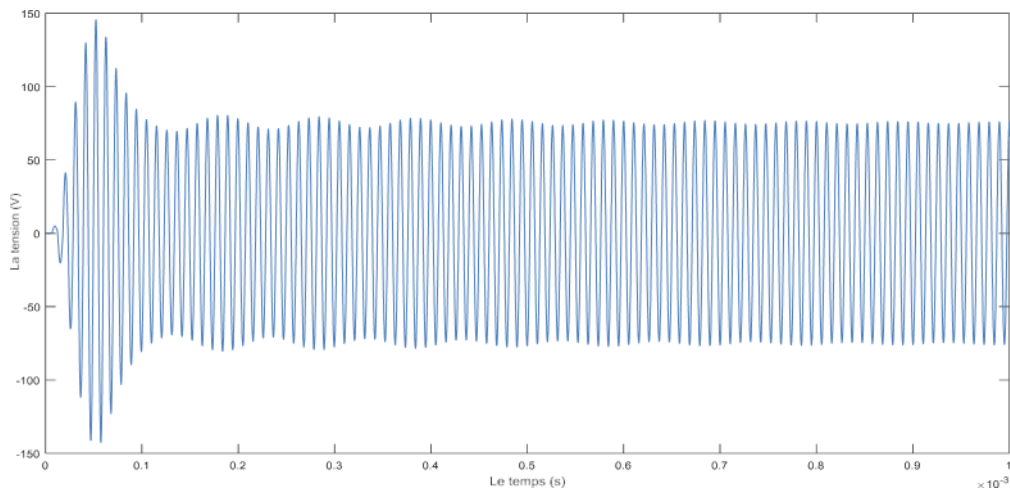


Figure III.12. Courbe d'évolution temporelle de la tension aux bornes de l'inducteur.

Résultats de simulation

Le **tableau III.4.** représente les résultats de la simulation en utilisant trois capacités de **0.44 μF** et on a obtenu quatre valeurs de : tension Max (V) , tension efficace (V) , courant Max (A) , courant efficace (A) :

Tableau III.4. Les résultats de simulation sous Matlab avec trois capacités de **0.44 μF** (micro farad).

Tension max (v)	Tension efficace (v)	Courant max (A)	Courant efficace (A)
75	53.16	52	36.87

La simulation a été conduite pour une fréquence égale à la fréquence de résonance telle que :

$$LC\omega^2 = 1$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{27 \times 10^{-6} \cdot 2.64 \times 10^{-6}}} = 59612 \text{ Hz}$$

C. Résultat de la simulation avec six capacités de $0.50 \mu\text{F}$

La capacité équivalente est de : $3 \mu\text{F}$ (Micro farad)

Cette **figure III.13.** représente la courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur d'une capacité équivalente de $3 \mu\text{F}$ on observe deux parties dans la courbe la première partie on voit un régime transitoire , tel que la deuxième partie on voit que le régime est permanent .

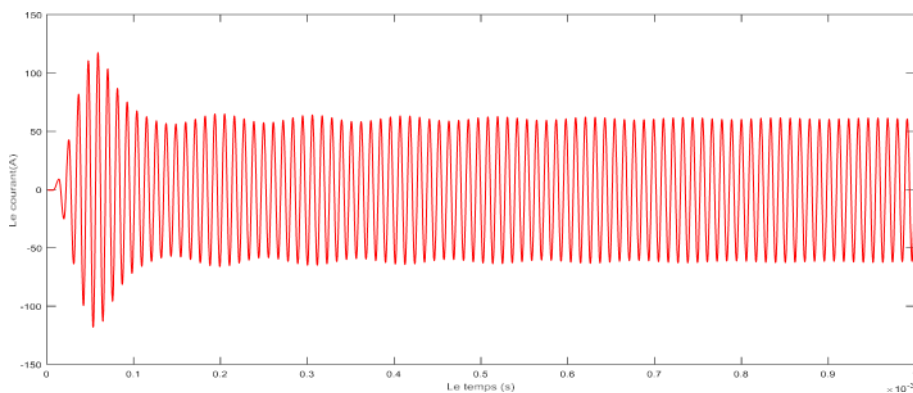


Figure III.13. Courbe d'évolution temporelle du courant à l'entrée de l'inducteur.

Cette **figure III.14.** représente la courbe d'évolution temporelle du tension à l'entrée de l'inducteur d'une capacité équivalente de $3 \mu\text{F}$ on observe deux parties dans la courbe la première partie on voit un régime transitoire , tel que la deuxième partie on voit que le régime est permanent .

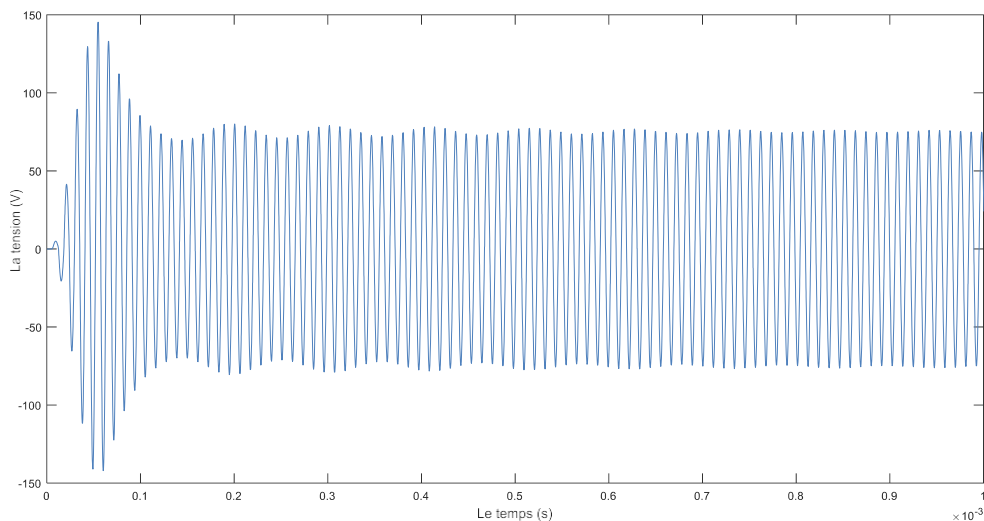


Figure III.14. Courbe d'évolution temporelle de la tension aux bornes de l'inducteur.

Résultats de simulation

Le **tableau III.5.** représente les résultats de la simulation en utilisant trois capacités de **0.50 μF** (micro farad) et on a obtenu quatre valeurs de : tension Max (V) , tension efficace (V) , courant Max (A) , courant efficace (A) :

Tableau III.5. Les résultats de simulation sous Matlab avec trois capacités de **0.50 μF** (micro farad).

Tension max (v)	Tension efficace (v)	Courant max (A)	Courant efficace (A)
73	51.77	56	39.71

La simulation a été conduite pour une fréquence égale à la fréquence de résonance telle que :

$$LC\omega^2 = 1$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{27 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{-6}}} = 55921 \text{ Hz}$$

III.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons démontré qu'il est nécessaire de recourir à une modélisation numérique afin de décrire le fonctionnement du chauffage par induction et les phénomènes qui le régissent. En effet, il existe différents logiciels de simulation pour étudier un tel système, comme le cas du logiciel COMSOL Multiphysics, qui permet de concevoir et de simuler l'inducteur du dispositif considéré, ainsi que MATLAB/Simulink, qui permet de simuler l'ensemble du circuit électrique de puissance.

Nous avons donc simulé la topologie de l'inducteur considéré en utilisant COMSOL. Aussi, nous avons simulé le circuit électrique de puissance via Simulink.

À travers ce chapitre, nous avons bien déterminé les paramètres et la géométrie optimaux pour assurer un fonctionnement nominal du chauffage par induction avec les moyens dont nous disposons, ainsi que de fournir des résultats finaux qui valident nos conclusions.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons présentés en détail le chauffage par induction, en mettant en évidence ses principes, ses caractéristiques et ses applications industrielles. Nous avons identifié les avantages et les inconvénients de ce système de chauffage, ainsi que l'importance de sa conception pour optimiser son efficacité et son rendement.

Nous avons également souligné l'importance de la partie électronique de puissance, en particulier des convertisseurs de fréquence, pour ajuster la fréquence utilisée en fonction des charges à chauffer. Nous avons examiné différentes configurations de convertisseurs à résonance, y compris les onduleurs à résonance, et les composants semi-conducteurs utilisés dans le domaine du chauffage par induction.

De plus, nous avons souligné l'importance de la modélisation numérique pour comprendre le fonctionnement du chauffage par induction et prédire les phénomènes associés. Nous avons mentionné des logiciels de simulation tels que COMSOL Multiphysics pour la conception et la simulation de l'inducteur, ainsi que MATLAB/Simulink pour la simulation du circuit électrique de puissance.

Dans l'ensemble, ce chapitre nous a permis d'identifier les paramètres et la géométrie optimaux pour assurer un fonctionnement efficace du chauffage par induction. Les résultats obtenus à travers les simulations nous ont fourni des conclusions solides et validées pour guider nos travaux futurs dans ce domaine.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] J.Callebaut, Laborelec, « Chauffage par induction », Leonardo ENERGY. Guide Power Quality, 2007, n°7.
- [2] M. Orfeuill, (1981), « Electrothermie industrielle. Fours et équipements thermiques électriques industriels », Paris (France) : Dunod/Bordas. 803p
- [3] K.Alexander, N.Matthew, O.Sadiku « Fundamentals of Electric Circuits », Mcgraw-Hill, 2012.
- [4] L. Levacher, D. Clodic, F. Marechal, « Efficacité énergétique pour l'industrie : des technologies existantes aux solutions innovantes », 2009 , European Center Laboratories for Energy Efficiency Research, p.4.
- [5] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook et M. Black. « Handbook of induction heating. Ohio», 1st edition, Boca Raton, ASM international, 2003, 796p.
- [6] <https://www.inducpower.com/fr/chauffage-par-induction/> , Consulté Le 20/03/2023
- [7] S. Wanser, « Simulation des phénomènes de chauffage par induction – Application à la trempe superficielle », thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1995, 127p.
- [8] M. Namoune, « Etude Magnétothermique d'une pièce Métallique cylindrique chauffée par induction magnétique » mémoire de Magistère, Université des Sciences et de la Technologie D'oran, 1994.
- [9] H. Michalet « Le livre blanc des inducteurs », 1^{er} Edition, 2013, 46p
- [10] <https://www.ambrell.com/hubfs/ambrell-images/Literature/411-0168-13.pdf>, Consulté Le 20/03/2023
- [11] M. Namoune, A. H. Belbachir et M. Feliachi « Etude de Distribution de Température dans une Pièce Métallique Cylindrique Chauffée par Induction Magnétique » Revue. Energie. Renouvelable. Vol. 1 (1998), p.125-135.
- [12] A. De Vriendt (A.) « La transmission de la chaleur vol 1 T.2 » G. Morin, 1999, 750p.
- [13] S. Bensaid « Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes », thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2006.

- [14] M. Sven Wanser « simulation des phénomènes de chauffage par induction » thèse de Doctorat, l'école doctorale de Lyon des sciences pour l'ingénieur, 1995 , 8-10 p.
- [15] Y. Sup, Kwon, S. Bong and D, Seok, Hyun, 1998 « Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Applications with Load-Adaptive PFM Control Strategy », IEEE Journal, p. 575- 581.
- [16] www.leonardo-energy.org/france Consulté Le 09/04/2023.
- [17] B. Adnani « Modélisation et contrôle des convertisseurs à résonance : Application au chauffage par induction ». mémoire de Magistère en commande électrique, Université de Batna. 2010.
- [18] M. Kamel « Etude de simulation d'un onduleur à haute fréquence , application au chauffage à induction » mémoire de Magistère, Université Mammeri Mouloud Tizi-Ouzou, 2015, 17p.
- [19] T. Mohamed « Application des onduleurs multi niveaux dans les systèmes de Chauffage par induction : Analyse, Modélisation, et Commande » mémoire de Magistère en Commande Electrique, Université de Laghouat. 2012.
- [20] O. Lucia, J. Acero, C. Carretero et José M.Burio « Induction Heatin Appliances » IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013.
- [21] N. Mohan, T. M. Undeland, & W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design. John Wiley & Sons, 2003.
- [22] G. Bertotti, I. D. Mayergoz, «The science of hysteresis: mathematical modeling and applications ». Elsevier, 2005.
- [23] A. K. Ziarani, G. B. Gharehpetian, 2011 « A comparative study on different resonant topologies for induction heating applications ». IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, n°1, p.95-102.
- [24] R. Cozma, F. Musuroi, « Control strategies for resonant inverters used in induction heating applications ». International Journal, 2014.
- [25] L. Jacques (2005) « Electronique de puissance Convertisseur » Paris (France) : Dunod.

- [26] D. Pimentel « implantation d'un contrôle de puissance pour onduleur à modulation de densité d'impulsions et optimisation des séquences de modulation à l'aide d'algorithmes génétiques » mémoire de Magistère, Université du Québec à Trois-Rivières, 2006.
- [27] J. Nuns, Jean -louis Peureux, 1995 « Chauffage par induction : principe et critères de choix des convertisseurs de fréquence », n°4, p. 82-95
- [28] S. L. Semiatin et D.E. Stutz « Induction heat treatment of steel » Metals Park, Ohio American Society for Metals 1986, États-Unis.
- [29] V. Paschkis (1952) « Les fours électroniques industriels » paris (France), Dunod.
- [30] H. Fujita et H. Akagi 1996 « Pulse-density modulated power control of a 4 kw,50 kHz voltage-source inverter for induction melting applications», IEEE Transactions on Industry Applications, vol.32, n°2, p. 279-286
- [31] K. Izaki, H. Yamashita, H. Omori, 1998 « A novel high-frequency ZVSPWM inverter for multi-burners induction heating appliance », IEEE Power Electronics and Variable Speed Drives, p. 656-661.
- [32] G.M Segura «Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating», thèse de Doctorat, université Politecnica de Catalunya Barcelona, 2012.
- [33] https://coowa.net/news/library_info/id/452.html ,Consulté Le 20/04/2023
- [34] N. Mohan, T.M Undeland et W. Robins, « Power electronics, converter, application and design »1er Edition , By J. Wiley and Sons, Singapore, 1989, 812 p.
- [35] P. Karlson, (1999). « Quasi resonant DC link converters: analysis and design for a battery charge application ». Suède: Lund. 207 p.
- [36] J.P Ferrieau, F. Forest, « Alimentations à découpages et convertisseurs à résonances ». 3^e Edition. Paris : France : Dunod, 1999. 294p.
- [37] A. Touraine « chauffage par induction électromagnétique ». Techniques d'ingénieur, 1984. Vol.1.
- [38] B.Abdelkader, « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'Approche Bond-Graph », mémoire de Magistère, Université ferhat abbas de setif, 2009
- [39] M. Gerin, « Onduleurs et harmoniques », Cahiers techniques n°159, 20p

- [40] T. Wildi, « Electrotechnique », 3eme édition, éditions de Boeck université, 1999.
- [41] H. Akagi, T. Sawae et A. Nabae, 1988 «130 kHz, 7,5 kW current source inverter using static induction transistors for induction heating application », IEEE Trans power electronics ,Vol.3, p. 303-309.
- [42] G. Devely, « Chauffage par induction électromagnétique : principes », Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique, , p. 1-22.
- [43] Damasson, J. Louis, « Cours d'électrotechnique 2 : traitement de l'énergie électrique », Belin, 1984.
- [44] M. Yacine « Alimentation Des Systèmes De Chauffage Par Induction Par Convertisseurs à Résonance. », mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2014.
- [45] L. Fatma « Calcul des Pertes dans les Convertisseurs Statiques, Application du Modèle Moyen et du Modèle Instantané » mémoire de Magistère, Université Mammeri Mouloud Tizi-Ouzou, 2011
- [46] H. Hassan « Méthodologie de pré - dimensionnement de convertisseurs de puissance : Utilisation des techniques d'optimisation multi- objectif et prise en compte de contraintes CEM », thèse de Doctorat, institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2006.
- [47] P. Brosselard « Conception, Réalisation et Caractérisation d'interrupteurs (thyristors et JFETs) haute tension (5kV) en carbure de silicium » thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.
- [48] N. Boutaleb, R. Bourahla « Commande d'un onduleur via PIC 16f877A » mémoire de Magistère, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2020
- [49] <https://emrecmic.wordpress.com/2017/02/28/que-de-mos-12/> Consulté Le 15 /05/2023
- [50] V. S. Nemkov, et C. Robert Goldstein. « Design principles for induction heating and hardening », In. Vol. 15. Michigan (U.S.A.): induction technology Center, 2004.
- [51] I. Nathan. « Engineering electromagnetic ». Springer. 396 p, 2000.
- [52] A. senhaji « simulation numérique de la chauffe par induction électromagnétique d'un disque en AISI 4340, mémoire de Magistère, Université du Québec, 23, 26 p, 2017.

- [53] M.H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, Third Edition. Prentice Hall, 2004.
- [54] H. Muhammad Rashid, Power Electronics Handbook, Third Edition, Elsevier, 2011. (2)
- [55] N. Merzougui, H. Merzougui, « Diagnostic de l'état de surface d'un isolateur de haute tension en utilisant « Current Flow Problem » », mémoire de Magistère, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2019.
- [56] N. Fekiri, « Transferts de chaleur dans des éléments micro et nano structurés : Simulation et expérimentation par thermographie infrarouge et microscopie SThM », thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2013.
- [57] H. Khaldoune, « Modélisation numérique de comportement thermophysique de composite de mortier à base des fibres de palmier dattier », mémoire de Magistère, université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2017.

Annexes

Annexes :

Annexe A : Chapitre 1

Tableau A.1 : Quelques valeurs de la profondeur de pénétration δ exprimées en mm, pour une perméabilité relative $\mu_r = 1$ (sauf acier à 20 °C)

f (Hz)	acier ($\mu_r = 100$) (20 °C)	acier (800 °C)	cuivre (20 °C)	cuivre (800 °C)	aluminium (20 °C)	aluminium (500 °C)	graphite (20-1 300 °C)
50	3,18	67,2	9,35	19,4	11,9	19,4	201
100	2,25	47,5	6,61	13,4	8,4	13,4	142
10^3	0,71	14,6	2,09	4,26	2,66	4,26	45
10^4	0,225	4,75	0,661	1,34	0,84	1,34	14,2
10^5	0,071	1,46	0,209	0,426	0,266	0,426	4,5
10^6	0,0225	0,475	0,066	0,134	0,084	0,134	1,42
10^7	0,007	0,146	0,021	0,043	0,0266	0,043	0,45

Tableau A.2 : Classement des matériaux selon leur température de curie

Matériau	T_C (K)	Matériau	T_C (K)
Co	1 388	MnB	578
Fe	1 043	MnOFe ₂ O ₃	573
Fe ₂ B	1 015	Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	560
SmCo ₅	995	Cu ₂ MnAl	500
FeOFe ₂ O ₃	858	CrO ₂	386
NiOFe ₂ O ₃	858	MnAs	318
CuOFe ₂ O ₃	728	Gd	292
MgOFe ₂ O ₃	713	Au ₂ MnAl	200
MnBi	630	Dy	88
Cu ₂ MnAl	630	EuO	69
Ni	627	CrBr ₃	37
MnSb	587	EuS	16,5
Nd ₂ Fe ₁₄ B	585	GdCl ₃	2,2

Tableau A.3 : Classement des matériaux selon leur résistivité électrique à 300 K.

Nom du métal	Résistivité à 300 K ($\Omega \cdot m$)
Argent	16×10^{-9}
Cuivre	17×10^{-9}
Or	22×10^{-9}
Aluminium	28×10^{-9}
Magnésium	43×10^{-9}
Bronze	55×10^{-9}
Zinc	61×10^{-9}
Nickel	87×10^{-9}
Laiton	71×10^{-9}
Cadmium	76×10^{-9}
Platine	111×10^{-9}
Fer	100×10^{-9}
Étain	120×10^{-9}
Plomb	208×10^{-9}
Germanium	460×10^{-9}
Constantan	500×10^{-9}
Mercure	941×10^{-9}
Nichrome	$1\,000 \times 10^{-9}$

Tableau A.4 : Classement de matériau selon leur conductivité thermique.

Matériau	Conductivité Electrique (10.E6 Siemens/m)	Résistivité Electrique (10.E-8 Ohms.m)	Conductivitéthermi que (W/m.k)	Coef. expansio n thermiqu e. 10E-6(k- 1) de 0 à 100°C	Densité (g/cm 3)	Point fusion ou dégradati on (°C)
Argent	62,1	1,6	420	19,1	10,5	961
cuivre	58,5	1,7	401	17	8,9	1083
Or	44,2	2,3	317	14,1	19,4	1064
Aluminium	36,9	2,7	237	23,5	2,7	660
Molybdène	18,7	5,34	138	4,8	10,2	2623
Zinc	16,6	6,0	116	31	7,1	419
Lithium	10,8	9,3	84,7	56	0,54	181
Laiton	15,9	6,3	150	20	8,5	900
Nickel	14,3	7,0	91	13,3	8,8	1455
Fer	10,1	9,9	80	12,1	7,9	1528
Palladium	9,5	10,5	72	11	12	1555
Platine	9,3	10,8	107	9	21,4	1772
Tungstène	8,9	11,2	174	4,5	19,3	3422
Etain	8,7	11,5	67	23,5	7,3	232
Bronze 67Cu33Sn	7,4	13,5	85	17	8,8	1040
Acier au carbone	5,9	16,9	90	12	7,7	1400
Carbone (ex PAN)	5,9	16,9	129	0,2	1,8	2500
Plomb	4,7	21,3	35	29	11,3	327
Titane	2,4	41,7	21	8,9	4,5	1668
Mercure	1,1	90,9	8	61	13,5	-39
Fe. Cr. Al	0,74	134	16	11,1	7,2	+1440

Annexe B : Chapitre 3

1) Partie Matlab simulink :

a) Schéma Matlab Simulink

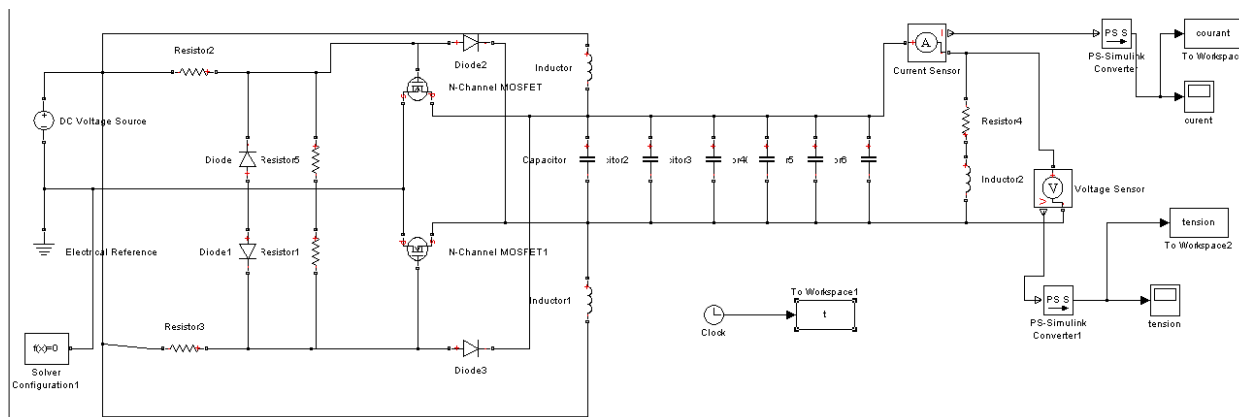


Figure B.1. Schéma bloc du système étudié sous Matlab/Simulink.

b) Paramètres de simulation

Block Parameters: Capacitor

Capacitor

Models a linear capacitor. The relationship between voltage V and current I is $I=C*dV/dt$ where C is the capacitance in farads.

The Initial voltage parameter sets the initial voltage across the capacitor. Note that this value is not used if the solver configuration is set to Start simulation from steady state.

The Series resistance and Parallel conductance represent small parasitic effects. The parallel conductance can be used to model dielectric losses and the series resistance used to represent the effective series resistance (ESR) of the capacitor. Simulation of some circuits may require the presence of the small series resistance. Consult the documentation for further details.

[View source for Capacitor](#)

Parameters

Capacitance: 0.50 μF

Initial voltage: 0 V

Series resistance: 0 Ohm

Parallel conductance: 0 1/Ohm

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: N-Channel MOSFET

$I_{ds} = K * [(V_{gs} - V_{th}) * V_{ds} - V_{ds}^2/2] * (1 + L * |V_{ds}|)$ if $0 < V_{ds} < V_{gs} - V_{th}$ (linear region)

$I_{ds} = (K/2) * (V_{gs} - V_{th})^2 * (1 + L * |V_{ds}|)$ if $0 < V_{gs} - V_{th} < V_{ds}$ (saturated region)

where K is a constant, V_{th} is the Threshold voltage, L is the channel modulation, V_{gs} is the gate-source voltage and V_{ds} is the drain-source voltage.

Parameters

Main | Ohmic Resistance | Junction Capacitance | Temperature Dependence

Parameterization: Specify from a datasheet

Drain-source on resistance, $R_{DS(on)}$: 0.04 Ohm

Drain current, I_{ds} , for $R_{DS(on)}$: 28 A

Gate-source voltage, V_{gs} , for $R_{DS(on)}$: 10 V

Gate-source threshold voltage, V_{th} : 3 V

Channel modulation, L : 0 1/V

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Resistor1

Resistor

The voltage-current ($V-I$) relationship for a linear resistor is $V=I*R$, where R is the constant resistance in ohms.

The positive and negative terminals of the resistor are denoted by the + and - signs respectively. By convention, the voltage across the resistor is given by $V(+)-V(-)$, and the sign of the current is positive when flowing through the device from the positive to the negative terminal. This convention ensures that the power absorbed by a resistor is always positive.

[View source for Resistor](#)

Parameters

Resistance: 10 kOhm

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Diode3

Diode

Piece-wise linear model of a diode. If the voltage across the diode is bigger than the Forward voltage V_f , then the diode behaves like a linear resistor with low On resistance R_{on} plus a series voltage source. If the voltage across the diode is less than the Forward voltage, then the diode behaves like a linear resistor with low Off conductance G_{off} .

When forward biased, the series voltage source is given by $V_f(1-R_{on}*G_{off})$. The $R_{on}*G_{off}$ term ensures that the diode current is exactly zero when the voltage across it is zero.

[View source for Diode](#)

Parameters

Forward voltage: 1.3 V

On resistance: 0.3 Ohm

Off conductance: 500 nS

OK Cancel Help Apply

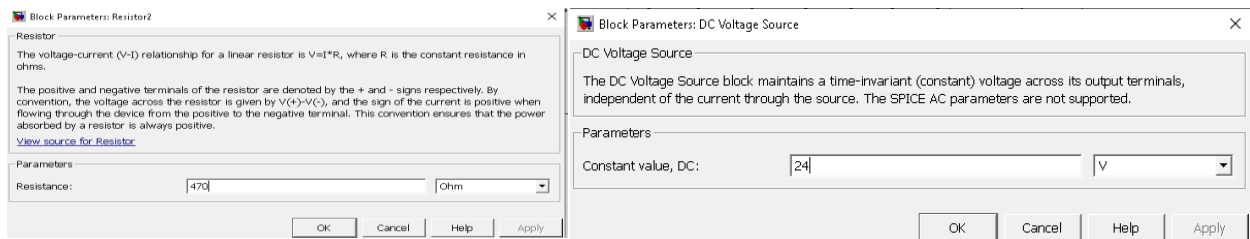


Figure B.2. Paramètres de simulation

2) Partie COMOSOL Multiphysics

A. Les étapes de la conception de l'inducteur en application magnéto-harmonique

Avant tout on doit définir l'application dans laquelle on voudrait étudier notre dispositif dans ce premier cas on choisit champs magnétique sachant qu'on va travailler dans le domaine 2d axisymétrique.

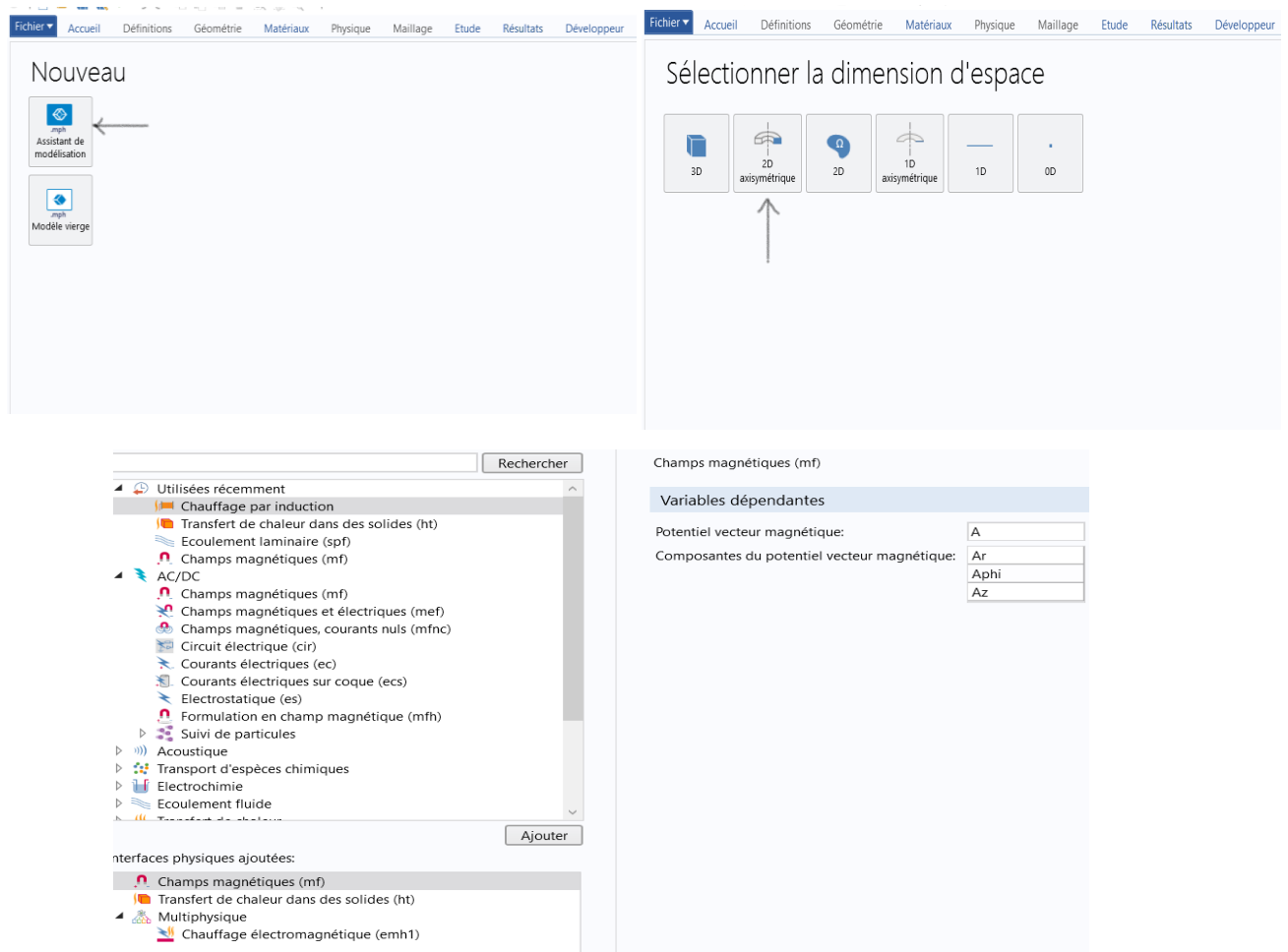


Figure B.3 définition de l'application.

B. Définitions des paramètres géométriques

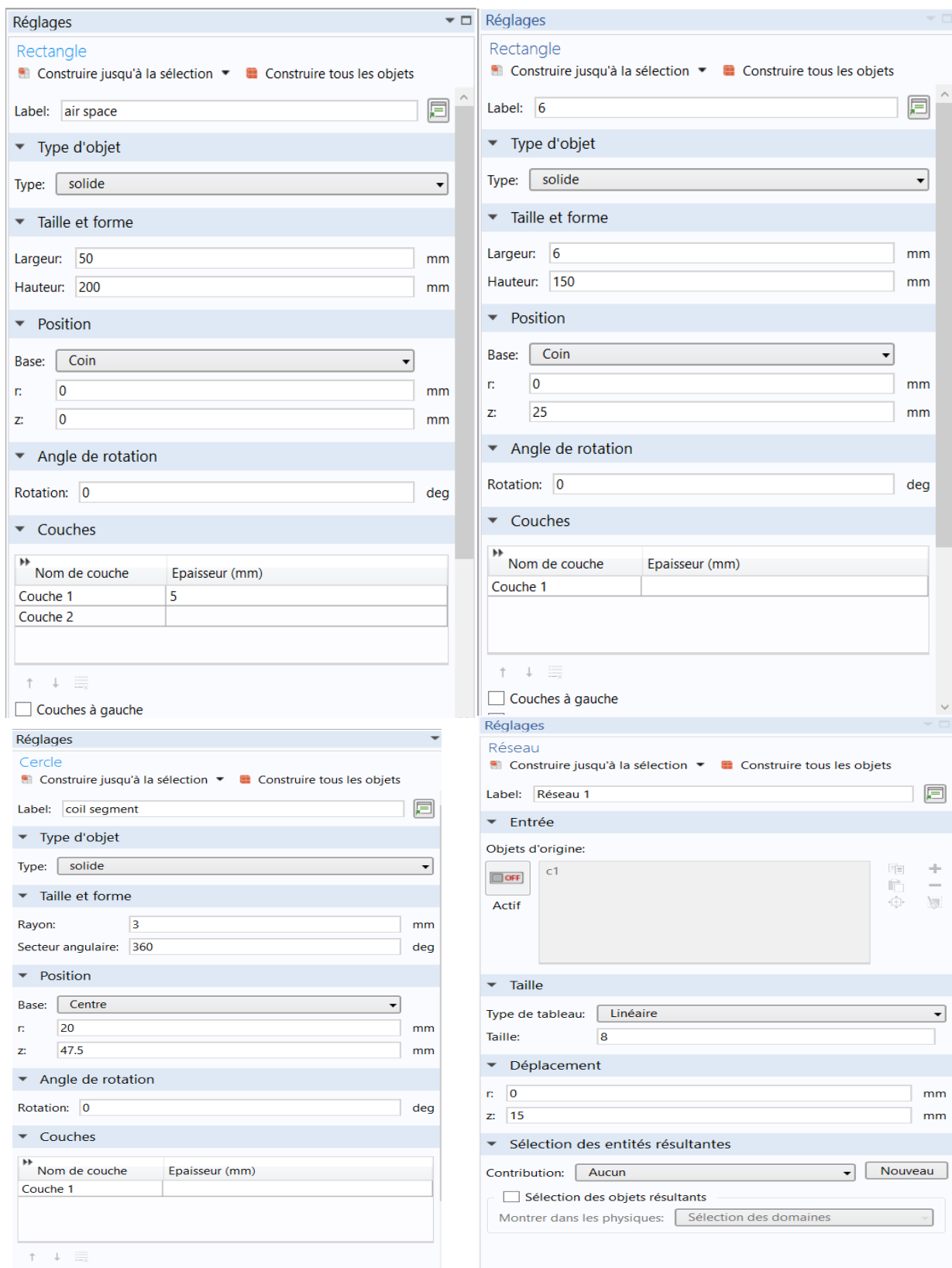
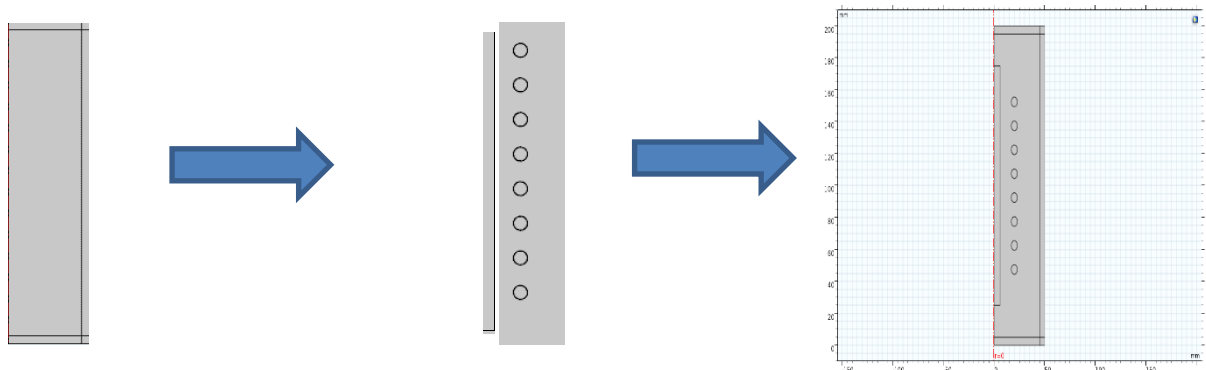


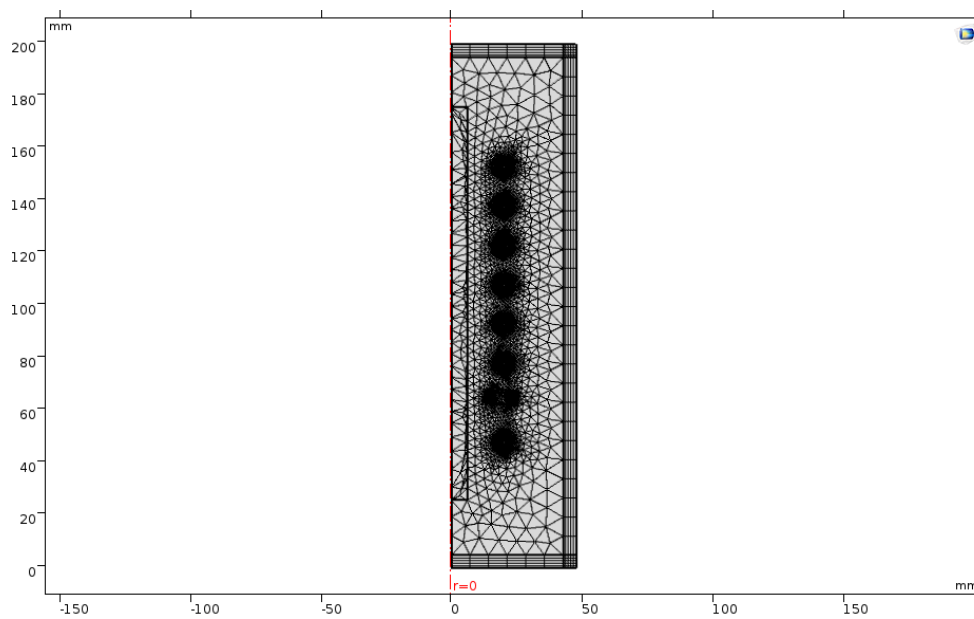
Figure B.4. Les dimensions totales de l'air space et le cylindre et la bobine

Tableau B.1 : Valeurs des paramètres à introduire sous COMSOL Multiphysics

DB	LB	Dint	Dext	HC	DC	Ns	Enf	Dis
52mm	100 mm	3mm	5mm	150mm	6mm	8spires	10 mm	15mm

**Figure B.5.** Schéma de la construction totale de l'inducteur

C. Le Maillage

**Figure B.6.** Schéma du Maillage

D. La visualisation de température

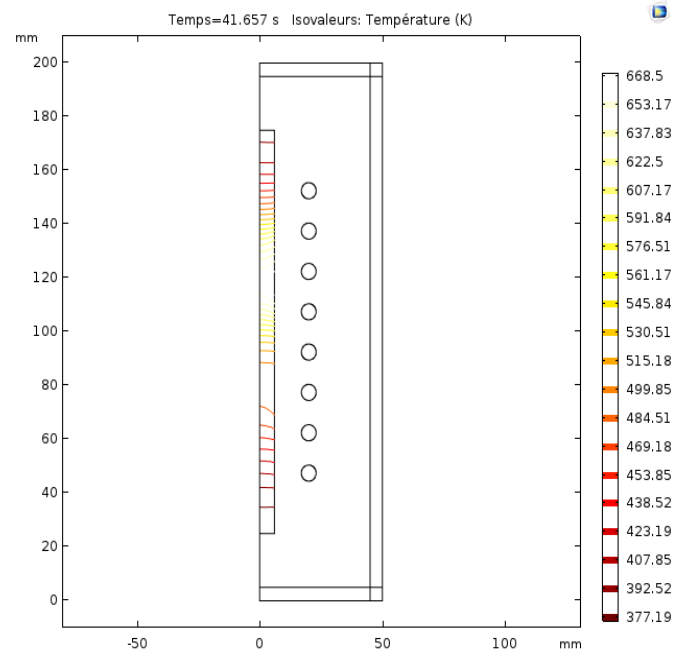


Figure B.7. Schéma de la visualisation de température.

Résumé :

Le chauffage par induction est une technique électromagnétique souvent utilisée comme source thermique pour le traitement et la transformation des métaux ainsi que pour l'assemblage des pièces. Son rendement et son efficacité font de lui un dispositif très demandé dans plusieurs applications industrielles. Le but de ce projet est de faire une étude et une conception complète d'un dispositif de chauffage par induction (CPI) de type multi-spires, cela en prenant compte des aspects : magnétique, thermique, et électrique. Nous avons donc effectué une simulation numérique de l'inducteur en utilisant l'outil COMSOL Multiphysics. Aussi, nous avons simulé le circuit électrique de contrôle en faisant varier les paramètres clés du circuit et qui régissent le CPI, ceci pour un maximum de rendement. Nous avons donc défini les paramètres clés et la géométrie idéal du CPI pour avoir un fonctionnement nominal du chauffage par induction. Ce travail peut être considéré comme plateforme solide pour des réalisations pratiques de CPI.

Mots clés : chauffage par induction, technique électromagnétique, source thermique, traitement des métaux, transformation des métaux.

Abstract:

Induction heating is an electromagnetic technique commonly used as a thermal source for metal processing, transformation, and assembly of parts. Its efficiency and effectiveness make it a highly sought-after device in various industrial applications. The objective of this project is to conduct a comprehensive study and design of a multi-turn induction heating device (IHD), considering magnetic, thermal, and electrical aspects. We performed a numerical simulation of the inductor using the COMSOL Multiphysics tool. Additionally, we simulated the control circuit by varying key circuit parameters that govern the IHD, aiming for maximum efficiency. We defined the key parameters and the ideal geometry of the IHD to ensure optimal operation of induction heating. This work can serve as a solid foundation for practical implementations of IHDs.

Keywords: induction heating, electromagnetic technique, thermal source, metal processing, part assembly.

ملخص :

التسخين بالتوالد هو تقنية كهرومغناطيسية يتم استخدامها بشكل شائع كمصدر حراري لمعالجة وتحويل المعادن وأيضاً لتجميع القطع. كفاءته وفعاليتته تجعله جهازاً مطلوباً جداً في العديد من التطبيقات الصناعية. هدف هذا المشروع هو إجراء دراسة وتصميم شامل لجهاز تسخين بالتوالد متعدد اللفات، مع مراعاة الجوانب المغناطيسية والحرارية والكهربائية. قمنا بإجراء محاكاة عددية للملف المولد باستخدام أداة COMSOL Multiphysics بالإضافة إلى ذلك، قمنا بمحاكاة الدائرة التحكمية من خلال تغيير معالم الدائرة الرئيسية التي تحكم في جهاز التسخين بالتوالد، بهدف تحقيق أقصى كفاءة. حددنا المعالم الرئيسية والهندسة المثلى لجهاز التسخين بالتوالد لضمان التشغيل المثلى لعملية التسخين بالتوالد. يمكن اعتبار هذا العمل كمنصة قوية لتطبيقات عملية لجهاز التسخين بالتوالد.

الكلمات الرئيسية : التسخين بالتوصيل، تقنية كهرومغناطيسية، مصدر حراري، معالجة المعادن، تجميع الأجزاء.