



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# Mémoire de Fin d'Etudes

Réalisé par :

**LARBI-CHERIF Yanis**

Pour l'obtention du diplôme de Master en

*Electrotechnique Industrielle*

Thème

**Modélisation électromagnétique des plaques chauffantes à  
induction des cuisinières électriques**

Encadré par :

*Pr. Bachir MAOUCHE*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur **Bachir MAOUCHE**, professeur à l'université de Bejaia, pour son aide et son soutien tout au long de ma formation universitaire.

Un encadreur aussi rationnel que généreux ; Il a pu transmettre des valeurs humaines en plus des connaissances scientifiques, il a aussi su donner à l'électromagnétisme un aspect banalisé malgré la complexité de cette physique. Et c'est, entre autres, pour tout ça que je lui dis **MERCI**.

Je remercie aussi **Mr BABOUCHE Kamel, AMARI Abes, AMEUR Slimane** et **MAOUCHE Houssam** ainsi que toutes les personnes qui m'ont accueilli et qui ont contribuées au bon déroulement de mon stage à Bordj Bou Arreridj.

Je veux aussi remercier ceux qui m'ont enseignés, en commençant par mes parents pour m'avoir mis sur les rails de la science et de la culture et ensuite passer à mes enseignants, du cycle primaire au cycle universitaire. Je veux particulièrement remercier **Mme MAKHLOUFI Rahima**, mon enseignante au primaire.

Enfin, je remercie **MES PARENTS** et **MES SOEURS** -Khadija,Hafsa et Rym- pour tout ce qu'ils font pour moi, ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à faire de moi ce que je suis.

*A mes parents, mes sœurs, Imma Zahwa et tous ceux qui comptent pour moi.*

*A la mémoire de mes grands parents.*

## TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>1</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>8</b>
<b>I- Etat de l'art théorique et technologique du chauffage par induction .....</b>	<b>9</b>
I.1- Introduction.....	10
I.2- Histoire de l'induction électromagnétique.....	10
I.3- Description du chauffage par induction.....	12
I.4- Principe de fonctionnement .....	13
I.4.1- Sens du champ magnétique.....	13
I.4.2- Lois de Faraday et de Lenz .....	13
I.5- Analogie avec le transformateur .....	15
I.6- Effet de peau électromagnétique .....	17
I.6.1- Résistance d'un conducteur avec effet de peau .....	18
I.6.2- Effet de peau dans le corps à chauffer .....	19
I.7- Chauffage par effet Joule.....	19
I.8- Les récipients compatibles.....	20
I.8.1- Matériaux des récipients .....	20
I.8.2- Forme et dimensions des récipients .....	21
I.9- Plaque à induction et alimentation électrique.....	22
I.9.1- Description.....	22
I.9.2- Composition de la plaque.....	23
I.9.2.1- La vitrocéramique .....	23
I.9.2.2- Les inducteurs .....	26
I.9.3- Installation électrique et électronique .....	29
I.9.3.1- Schéma synoptique .....	29
I.9.3.2- Filtrage .....	30
I.9.3.3- Redresseur.....	31

I.9.3.4- Onduleur .....	31
<b>II- Etude électromagnétique .....</b>	<b>35</b>
II.1- Equations de Maxwell .....	34
II.2- Lois de comportement des milieux .....	35
II.3- Simplification des équations .....	36
II.4- Equations simplifiées de maxwell .....	36
II.5- Théorème d'Ampère .....	36
II.6- Formule de Biot et Savart .....	37
II.7- Champ crée par une spire circulaire .....	38
II.8- Champ magnétique créé par une bobine plate .....	40
II.9- Equations électromagnétiques couplées .....	40
II.10- Equation de diffusion électromagnétique .....	41
II.10.1- Forme générale de l'équation de diffusion .....	41
II.10.2- Régime harmonique .....	42
II.10.3- Ecriture de l'équation de diffusion relative aux milieux.....	42
II.10.3.1- Dans le vide .....	43
II.10.3.2- Dans la pièce à chauffer.....	43
II.10.3.3- Dans l'inducteur.....	43
II.11- Système axisymétrique .....	44
II.12- Résolution de l'équation de diffusion électromagnétique .....	45
II.12.1- Méthodes analytiques.....	45
II.12.2- Méthodes semi analytiques .....	46
II.12.3- Méthodes numériques - Eléments finis .....	46
II.12.3.1- Eléments finis en 2D.....	46
II.12.3.2- Fonction d'approximation.....	47
II.12.3.3- Formulation intégrale.....	48
II.12.3.4- Variationnelle.....	48
II.12.3.5- Formulation résidus pondérés .....	48
II.13- Calcul de la puissance.....	49
<b>III- Applications et résultats .....</b>	<b>52</b>

III.1- Introduction.....	51
III.2- Présentation de COMSOL .....	51
III.3- Modèles du dispositif.....	51
III.3.1- Géométrie du système.....	51
III.3.2- Structuration de la géométrie sous COMSOL 5.3a .....	53
III.3.3- Le maillage.....	54
III.4- Calcul des grandeurs électromagnétique sans ferrite.....	55
III.5- Calcul des grandeurs électromagnétique avec ferrite .....	57
III.6- Etude de l'effet de la fréquence .....	59
III.7- Etude de l'effet de la perméabilité.....	65
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>68</b>
<b>REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>69</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Expérience de Faraday .....	11
Figure I.2 Tension en fonction de la distance –Expérience de faraday- .....	11
Figure I.3 Schéma d'une plaque à induction.....	13
Figure I.4 Champ créé par une spire circulaire .....	13
Figure I.5 Loi de faraday.....	14
Figure I.6 Illustration des courants de Foucault.....	15
Figure I.7 Equivalence entre transformateur et plaque à induction .....	16
Figure I.8 Photographie montrant l'analogie Transformateur-Table à induction .....	17
Figure I.9 Effet de peau en fonction de la fréquence du courant .....	18
Figure I.10 Conducteur alimenté en haute fréquence .....	19
Figure I.11 Mise en évidence de l'effet de peau en fonction de l'épaisseur du récipient	19
Figure I.12 Disque de cuisson (adaptateur pour induction) .....	21
Figure I.13 Type de récipients .....	22
Figure I.14 Plaque de cuisson NARDI N701_106 (CONDOR) .....	23
Figure I.15 Plaque de cuisson à 4 foyers.....	24
Figure I.16 Plaque à induction à 2 foyers .....	25
Figure I.17 Robot de pose de silicone sur les vitrocéramiques.....	26
Figure I.18 Inducteur de la plaque NARDI N701_106 (CONDOR) .....	27
Figure I.19 Inducteur A.....	27
Figure I.20 Inducteur B .....	28
Figure I.21 Composition électronique de l'alimentation de la plaque NARDI 701_601 .	29
Figure I.22 Schéma structurel de la plaque à induction .....	29
Figure I.23 Schéma électrique d'un dispositif de filtrage.....	30

Figure I.24 Schéma électronique du redresseur .....	31
Figure I.25 Schéma électronique de l'onduleur .....	32
Figure I.26 Clavier de commande NARDI N701_106 (CONDOR).....	32
=====	
Figure II.1 Théorème D'ampère.....	37
Figure II.2 Représentation vectorielle.....	38
Figure II.3 Champ crée par une spire circulaire sur son axe.....	39
Figure II.4 Champ crée par N spire(s) circulaire(s) en leur axe.....	40
Figure II.5 représentation des milieux constitutifs du modèle .....	42
Figure II.6 Géométrie de la bobine émettrice (Inductrice).....	44
Figure II.7 Géométrie de l'étude .....	45
Figure II.8 éléments classiques en deux dimensions .....	46
=====	
Figure III.1 Modèle géométrique .....	52
Figure III.2 Vue éclatée du dispositif.....	52
Figure III.3 Géométrie de base en 2D axisymétrique .....	54
Figure III.4 Mise en évidence du maillage de la géométrie .....	55
Figure III.5 Densité du flux magnétique .....	56
Figure III.6 Densité du flux magnétique 3D .....	56
Figure III.7 Géométrie de base en 2D axisymétrique .....	58
Figure III.8 Densité du flux magnétique après amélioration .....	58
Figure III.9 Densité du flux magnétique en 3D après amélioration.....	59
Figure III.10 Densité du flux magnétique à 50Hz.....	60
Figure III.11 Densité de courant à 50Hz .....	60



Figure III.12 Densité du flux magnétique à 5000Hz.....	61
Figure III.13 Densité de courant à 5000Hz.....	61
Figure III.14 Densité du flux magnétique à 30000Hz.....	62
Figure III.15 Densité de courant à 30000Hz.....	62
Figure III.16 Densité des courants induits en fonction du rayon pour différentes fréquences.....	63
Figure III.17 Puissance en fonction du rayon pour différentes fréquences.....	63
Figure III.18 Densité des courants induits en fonction du rayon pour différentes fréquences.....	64
Figure III.19 Puissance en fonction du rayon pour différentes fréquences.....	64
Figure III.20 Densité de courant en fonction de la fréquence avec $\mu_r=1$ .....	65
Figure III.21 Densité de courant en fonction de la fréquence avec $\mu_r=10$ .....	65
Figure III.22 Densité de courant en fonction de la fréquence avec $\mu_r=100$ .....	66
Figure III.23 Densité de courant en fonction de la fréquence avec $\mu_r=1000$ .....	66

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Nomination des éléments de la figure (I.7).....	16
Tableau I.2	Zone de chauffe de récipient en fonction du diamètre du foyer .....	22
Tableau I.3	Récapitulatif des dimensions des inducteurs A et B.....	28
=====		
Tableau III.1	Dimensions du modèle .....	53
Tableau III.2	Géométrie améliorée en 2D axisymétrique sur COMSOL 5.3a.....	57

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le chauffage est l'action de transmettre de l'énergie thermique à un objet, et ce par divers moyens découverts et développés depuis la préhistoire dans le but de se réchauffer et de cuire ses aliments.

La persévérance des hommes a mis à notre disposition un nouveau moyen de chauffage ; le chauffage par induction, qui est une technique reposant sur, comme son nom l'indique, l'induction électromagnétique. C'est un phénomène qui a changé les pratiques industrielles. Il a intégré tout les domaines et a facilité la vie à l'homme malgré la complexité de cette physique. Son avantage est de chauffer sans qu'il y ait de contact avec la source d'énergie.

Cette technique est applicable à plusieurs niveaux, autant pour le traitement de surface de métaux que pour la fonderie. On peut ainsi dire que c'est un chauffage ciblé et précis. A ce niveau, on ne se soucie pas de la compatibilité électromagnétique vue la disposition de l'appareillage. Par contre au niveau domestique, le défi est d'assurer la fonction principale de chauffer tout en faisant cohabiter l'électronique avec l'ensemble inducteurs-plaque.

Dans ce mémoire, on s'intéresse à la modélisation électromagnétique des plaques chauffantes à induction des cuisinières électriques.

Pour cela, on organise le travail en trois (03) chapitres.

Dans le premier chapitre, on évoque la technologie des cuisinières à induction électromagnétique, leur principe de fonctionnement et une présentation de leurs composants.

Dans le deuxième chapitre, on présente les équations fondamentales de l'électromagnétisme, ainsi que les théorèmes et les lois utiles à cette étude.

Le troisième chapitre est consacré à l'application du modèle électromagnétique développé et en tirer des résultats, pour ainsi pouvoir donner une contribution à l'étude électromagnétique de ce phénomène.



# **CHAPITRE I**

## **I- Etat de l'art théorique et technologique du chauffage par induction**

## **I.1-Introduction**

L'induction électromagnétique est une technique de chauffage pour les matériaux conducteurs d'électricité (métaux), fréquemment utilisée pour de nombreux procédés thermiques tels que la fusion et la chauffe des métaux ainsi que la cuisson d'aliments.

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

Les hautes densités de puissance mises en jeu permettent d'obtenir des vitesses de chauffe très rapides [1] [2].

Ayant diverses applications, l'induction fut appliquée au chauffage et à la cuisson d'aliments et ce en fabriquant des plaques spéciales fonctionnant avec ce principe.

## **I.2-Histoire de l'induction électromagnétique**

Le phénomène de l'induction fut observé par divers savants du génie électrique à travers le temps, et ce en faisant des expériences qui, à ce jour, restent le fondement de ce dernier.

Parmi ces acteurs de la science, Michael Faraday fut l'un des plus percutant, se basant sur les travaux de ces précurseurs tel que Hans Christian Ørsted, Jean-Baptiste Biot, Félix Savart, Pierre Simon de Laplace et André Marie Ampère, il a pu modéliser et établir par son expérience la fameuse loi, la loi de Faraday. [4]

L'expérience clé qui permit à Michael Faraday d'établir sa loi est très simple. Elle peut être reproduite facilement avec des objets de la vie de tous les jours. Faraday a enroulé un fil de fer isolé autour d'un tube de carton pour former ainsi une bobine. Il a branché un voltmètre aux extrémités de la bobine et a mesuré la FEM induite lorsqu'il déplaçait un aimant dans la bobine. Le dispositif est représenté sur la Figure (I.1).

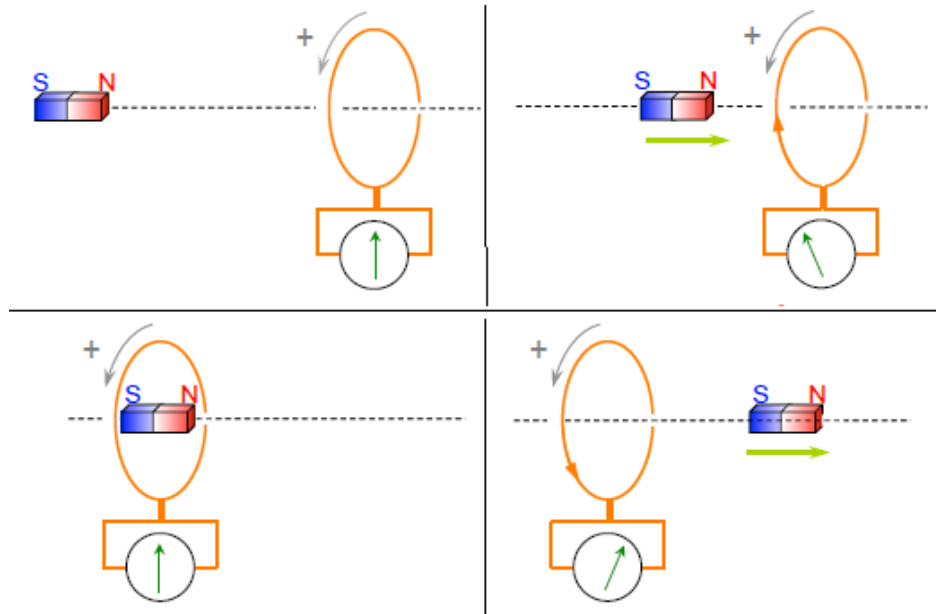


Figure I.1 Expérience de Faraday

Cette expérience a pour but de montrer l'influence qu'a le mouvement d'un aimant sur une spire fermée sur un voltmètre, c'est à dire montrer le principe de l'induction électromagnétique.

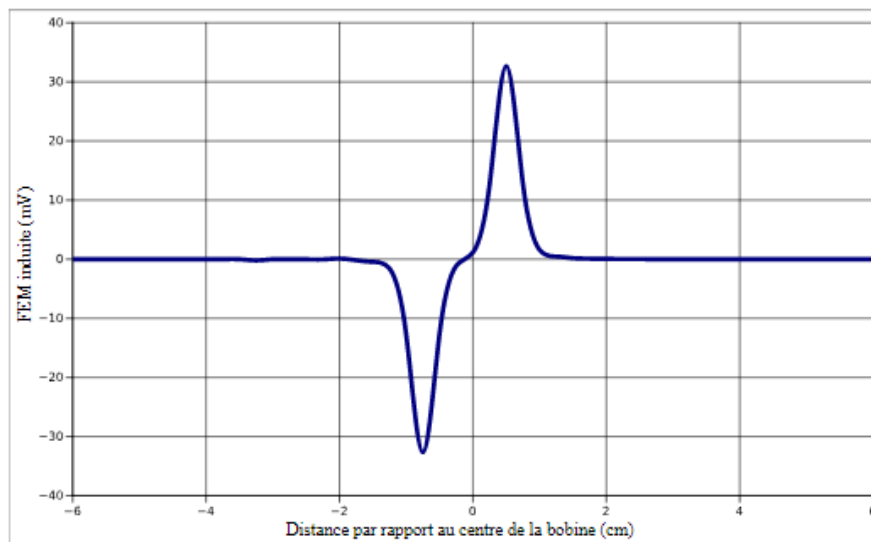


Figure I.2 Tension en fonction de la distance –Expérience de Faraday-

La Figure (I.2) montre un exemple de tension mesurée (FEM) en fonction de la distance par rapport au centre de la bobine.

Faraday fit les observations suivantes :

- Il n'y a aucune tension mesurée lorsque l'aimant est immobile en dehors ou à l'intérieur de la bobine.
- Une tension est mesurée et elle augmente progressivement jusqu'à un maximum un peu avant le centre de la bobine lorsque l'aimant se déplace en direction de la bobine.
- Dès que l'aimant passe le centre de la bobine, la tension mesurée change directement de signe.
- Lorsque l'aimant ressort de la bobine, la tension obtenue est de signe opposé à celle mesurée quand l'aimant entrait dans la bobine.

### **I.3-Description du chauffage par induction**

Sous la plaque de cuisson en vitrocéramique, un électroaimant constitué d'enroulements de cuivre est alimenté avec un courant alternatif à une fréquence de l'ordre du KHz. Il crée ainsi un champ magnétique variable. Celui-ci induit directement des courants électriques dans la surface inférieure de la casserole (courant de Foucault).

Tout matériau conducteur de l'électricité plongé dans un champ magnétique variable (créé par une bobine inductrice ou inducteur) est le siège de courants électriques induits, ces courants dissipent de la chaleur par effet Joule dans le matériau où ils ont pris naissance. En effet, un conducteur parcouru par un courant donne naissance à un champ magnétique, variable ou constant. Ce champ électromagnétique pénètre dans la pièce à partir de la surface sur une profondeur plus ou moins importante suivant la fréquence du champ électromagnétique et les propriétés du matériau considéré. Si maintenant un courant alternatif alimente notre inducteur, le champ électromagnétique va osciller plus ou moins à la même fréquence que le courant imposé suivant que le matériau constitutif de la pièce est magnétique, amagnétique ou diamagnétique. Ces oscillations rapides du champ électromagnétique induisent des courants de Foucault dans la pièce. La direction et le sens de déplacement des courants obéissent à la loi de Lenz qui stipule que « les courants induits s'opposent à la cause qui leur a donné naissance ». Ainsi les courants induits dans la pièce vont circuler dans la même direction mais dans le sens opposé au courant imposé dans l'inducteur. La région parcourue par les courants est une zone de dissipation de chaleur par effet Joule pour enfin se propager vers le contenu de l'ustensile par convection thermique. Voir la figure (I.3)[5][6]

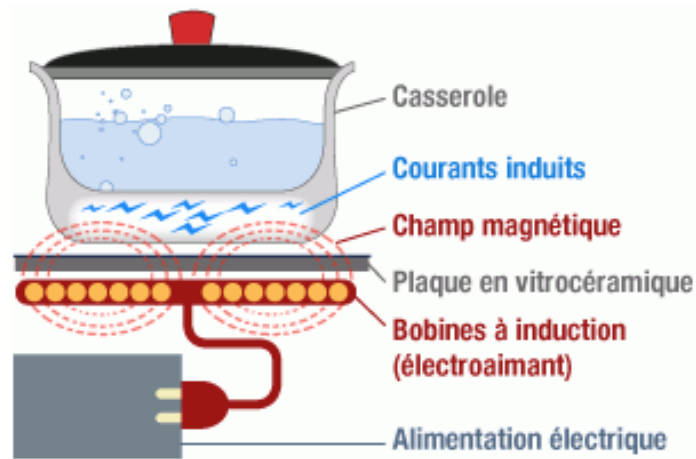


Figure I.3 Schéma d'une plaque à induction

## I.4-Principe de fonctionnement

### I.4.1- Sens du champ magnétique

Si, dans une bobine, on fait passer un courant continu, l'induction est dirigée dans le sens donné par la règle de la main droite ou dur tir bouchon comme le montre la figure (I.4).

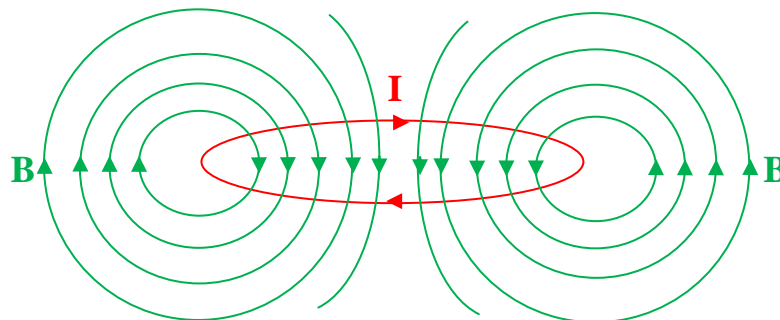


Figure I.4 Champ créé par une spire circulaire

### I.4.2- Lois de Faraday et de Lenz

On peut induire une f.é.m. dans un circuit filiforme en faisant varier le flux magnétique à travers ce circuit : c'est le phénomène d'induction électromagnétique. Les cas de variations du flux du champ magnétique à travers un circuit sont :

- Le cas d'un circuit mobile dans un champ magnétique permanent (Lorentz),
- Le cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique variable (Newman),
- Le cas général d'un circuit mobile dans un champ magnétique variable.



Le sens du courant induit est imposé par la loi de Lenz qui stipule que le sens du courant induit est tel que le champ magnétique qu'il crée s'oppose à la variation de flux qui lui a donné naissance.

Si le circuit est fermé, la f.e.m. génère un courant électrique ; ceci implique l'existence d'un champ électromoteur agissant sur les porteurs de charge du circuit. Ce champ est appelé champ électrique induit [8].

Pendant un temps  $dt$ , la variation du flux magnétique total à travers une surface quelconque s'appuyant sur le circuit (C) est  $d\phi$  ; la f.é.m. induite  $E$  s'exprime à l'aide de la loi de Faraday :

$$E = - \frac{d\phi}{dt} \quad (I.1)$$

**E** : Tension induite [V]

$\phi$  : Flux magnétique [Wb]

**t** : Temps [s]

Cette loi, établie expérimentalement pour des variations relativement lentes du flux magnétique en fonction du temps, est valable pour tout régime variable et elle sert de base à l'étude de l'électromagnétisme. [1][8]

Quand une boucle d'un matériau conducteur (voir figure I.5a) est placée dans un champ magnétique, on voit apparaître aux bornes de la boucle une tension induite **E** exprimée par l'équation (I.1).

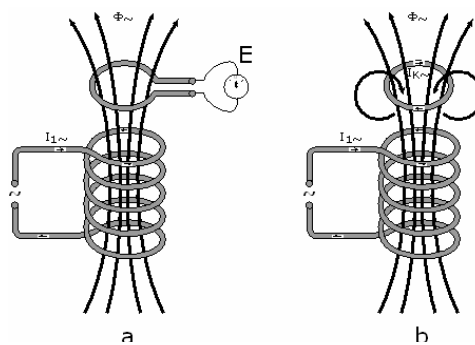


Figure I.5 Loi de Faraday

Quand la boucle est mise en court-circuit, la tension induite  $E$  va entraîner l'apparition d'un courant de court-circuit circulant dans le sens opposé au phénomène qui le génère. C'est la loi de Faraday-Lenz figure (I.5b) [1]

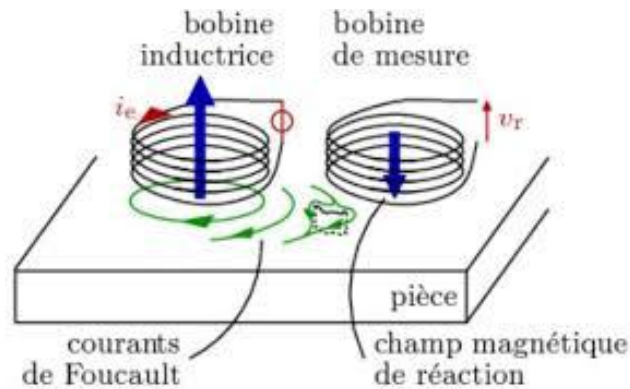


Figure I.6 Illustration des courants de Foucault

Si un conducteur plein, est soumis à une variation de flux magnétique (ou placé dans un champ magnétique alternatif), on voit apparaître, comme dans le cas de la boucle fermée, des courants induits. Ces courants sont dits courants de Foucault et circulent de façon non homogène dans le conducteur, voir figure (I.6). Les courants de Foucault, via la résistance électrique interne du cylindre, viennent chauffer le conducteur conformément à la loi de Joule.

### I.5-Analogie avec le transformateur

On peut assimiler le dispositif de chauffage par induction électromagnétique à celui du transformateur électrique en termes de structure comme le montre la figure (I.7).

Pour appuyer l'analogie entre la table à induction et le transformateur, on forme une bobine de  $N$  spires qu'on ferme sur une ampoule. Pour mettre en évidence le phénomène d'induction, on pose le circuit (bobine+ampoule) sur la vitrocéramique, on alimente la table et on pose au dessus de cette dernière le disque métallique pour activer la table et ainsi faire passer les lignes de champ à travers la bobine, l'ampoule s'allume, il y a une f.é.m. induite aux bornes de la bobine. (Figure I.8)

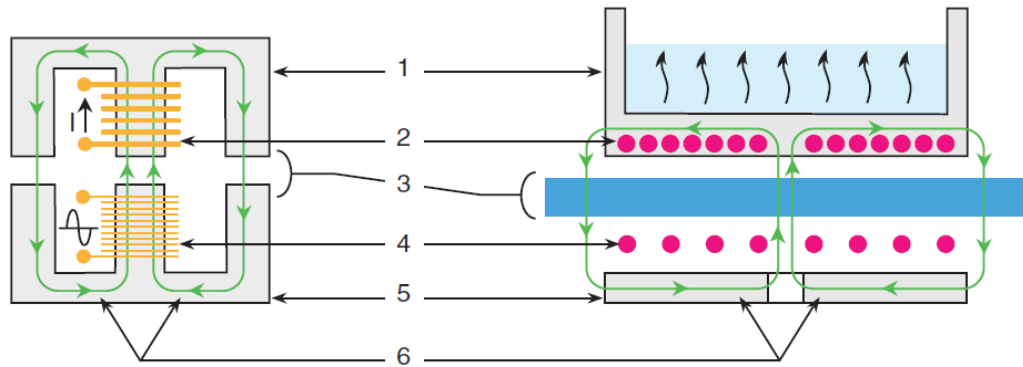


Figure I.7 Equivalence entre transformateur et plaque à induction

Le tableau (I.1) énumère les détails de la figure (I.7).

Tableau I.1 Nomination des éléments de la figure (I.7)

<b>TRANSFORMATEUR</b>		<b>TABLE A INDUCTION</b>
Circuit magnétique du secondaire	1	Casserole
Bobine secondaire en court-circuit	2	Casserole (récepteur)
Entre fer	3	Plaque vitrocéramique
Bobine primaire	4	Inducteur (émetteur)
Circuit magnétique du primaire	5	Ferrite (canalisation du champ)
Champ magnétique	6	Champ magnétique



Figure I.8 Photographie montrant l'analogie Transformateur-Table à induction

A partir des touches de fonction, on commande l'alimentation électrique du primaire du transformateur qui crée un champ magnétique. Ce champ induit des courants dans le fond du récipient posé sur la table. Ces courants induits chauffent instantanément le récipient qui cède la chaleur produite aux aliments qu'il contient, la cuisson s'effectue pratiquement sans perte d'énergie, la puissance de chauffe de l'appareil est restituée à son maximum.

### I.6-Effet de peau électromagnétique

Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur comme le montre la figure (I.9), ce qui provoque une augmentation de la résistance du conducteur et par la même occasion la densité des courant induits.

On a donc un courant qui ne circule pas uniformément dans toute la section du conducteur. Tout se passe comme si la section utile du câble était plus petite. La résistance augmente donc, ce qui conduit à des pertes par effet joule plus importantes. [1][9]

L'effet de peau est donné par la formule :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (I.2)$$

$\delta$  : Épaisseur de peau.

$\omega$  : Pulsation par seconde [rad/s].

f : Fréquence du courant en [Hz].

$\mu$  : Perméabilité magnétique en [H/m].

$\rho$  : Résistivité en [ $\Omega$ ].

$\sigma$  : Conductivité électrique en [S/m].

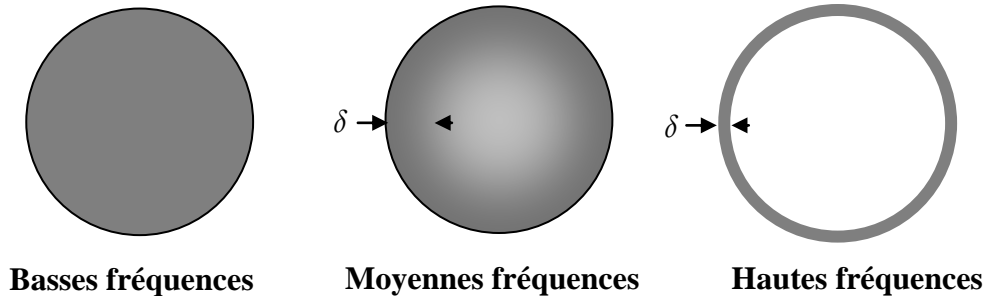


Figure I.9 Effet de peau en fonction de la fréquence du courant

Avec des plages de fréquence considérées comme suit : [13]

\*Basses fréquences : 50Hz à 1000Hz

\*Moyennes fréquences : 1000Hz à 35000Hz

\*Hautes fréquences : 35000Hz à 10MHz

### I.6.1- Résistance d'un conducteur avec effet de peau

En continu ou en alternatif basse fréquence, la résistance d'un conducteur de longueur (l) et de rayon (a) est donnée par :

$$R_0 = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{\pi a^2} \quad (I.3)$$

A haute fréquence, le courant circule majoritairement dans la périphérie du fil comme sur la figure (I.10). La diminution de la section efficace du conducteur entraîne une augmentation de sa résistance. Cette résistance est exprimée par la relation (I.4).

$$R_\delta = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{\pi \delta (2a - \delta)} \quad (I.4)$$

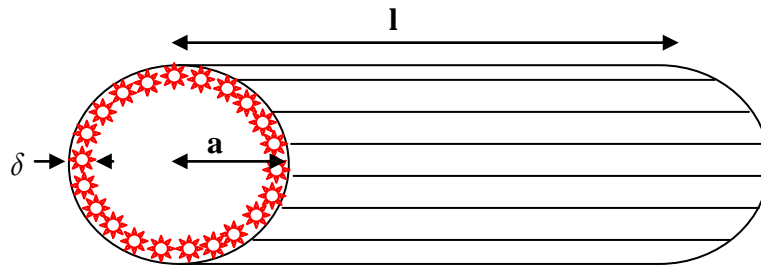


Figure I.10 Conducteur alimenté en haute fréquence

### I.6.2- Effet de peau dans le corps à chauffer

A une fréquence de 20kHz, et pour une casserole en acier (matériau ferromagnétique conducteur), l'épaisseur de la casserole dans laquelle les courants induits circulent est d'environ 35  $\mu\text{m}$ . Ceci permet de générer un courant dans une partie seulement du fond de la casserole. La résistance y devient importante et les échauffements conséquents. [10]

La densité des courants induits dans la charge décroît exponentiellement comme il est montré dans la figure (I.11).

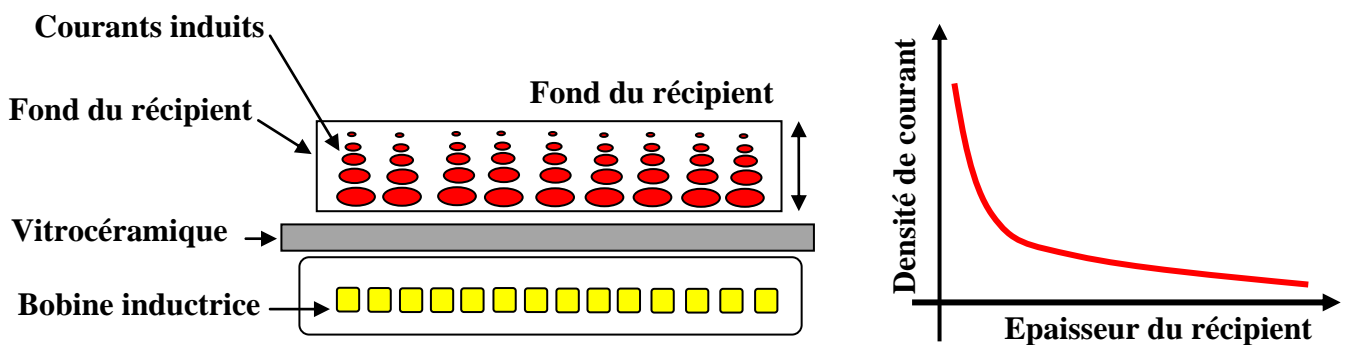


Figure I.11 Mise en évidence de l'effet de peau en fonction de l'épaisseur du récipient

### I.7- Chauffage par effet Joule

Si on applique aux bornes de la bobine une différence de potentiel  $U$  alternative, le courant alternatif qui parcourt cette bobine va créer une induction magnétique alternative à la fréquence du courant. Si on met un objet conducteur sur la bobine, il sera soumis à un flux magnétique variable. Ce flux va à son tour, d'après la loi de Faraday, induire une force électromotrice qui donnera naissance à des courants induits circulant dans le conducteur. Ces courants induits sont les courants de Foucault qui par effet joule chauffent le corps. [2]

Dans les tables de cuisson à induction, le corps qui chauffe va à son tour chauffer le contenu du récipient (corps) par convection thermique.

Le chauffage par induction est une technique d'électrothermie qui permet de chauffer un objet à distance, sans contact direct avec la source, ce dernier entraîne principalement trois phénomènes physiques successifs :

- Le transfert électromagnétique de l'énergie de l'inducteur vers le matériau à chauffer.
- La transformation par effet joule de cette énergie en chaleur.
- La diffusion de la chaleur du récipient vers le contenu de ce dernier par convection thermique. [7]

Lorsqu'un courant  $I$  [A] parcourt un conducteur électrique de résistance  $R$  [ $\Omega$ ], la puissance dissipée  $P$  [W] dans le conducteur est de type :

$$P = R.I^2 \quad (I.5)$$

Dans le chauffage par induction, c'est cet effet qui permet de transformer les courants induits en chaleur pour ensuite être transmis par convection thermique au contenu du récipient. [1]

## **I.8-Les récipients compatibles**

### **I.8.1- Matériaux des récipients**

L'induction nécessite une casserolierie appropriée. La cuisson se faisant par champ magnétique, il faut des matériaux conducteurs. Un moyen simple permet de vérifier si un ustensile est compatible : Un aimant doit pouvoir se coller sur le fond.

Lors de la cuisson, certains récipients sont susceptibles d'émettre du bruit (cliquetis). Ceci est normal et est dû au champ magnétique produit par l'induction. Il n'y a donc aucun risque, ni pour la table, ni pour la casserole. [10]

Les récipients compatibles avec l'induction sont :

- Les récipients en acier émaillé avec ou sans revêtement anti adhérent.
- Les récipients en fonte avec ou sans fond émaillé.
- Certains récipients en inox.
- Récipients en aluminium à fond ferromagnétique.
- Les disques de cuissons (adaptateurs). (figure I.12)



Figure I.12 Disque de cuisson (adaptateur pour induction)

## I.8.2- Forme et dimensions des récipients

Les tables à inductions présentent plusieurs diamètres de chauffe afin de permettre l'adaptation de toutes les tailles de récipients. Le diamètre à prendre en considération est le diamètre de contact avec le dessus vitrocéramique. Et le fond de la casserole doit être inférieur ou égal à la zone de chauffe de la table. [10]

Le diamètre du récipient doit être adapté à celui des foyers, il faut bien les centrer pour avoir un rendement optimal.

Le tableau (I.2) montre quelques exemples de diamètre de zone de chauffe en fonction du diamètre du foyer.



Tableau I.2 Zone de chauffe de récipient en fonction du diamètre du foyer

Diamètre du foyer	Diamètre minimum du fond de la casserole
150mm	90mm
175mm	110mm
215mm	130mm

Le fond de la casserole doit impérativement épouser la surface de la vitrocéramique comme il est indiqué sur la figure (I.13) pour assurer un bon rendement et ainsi avoir un fonctionnement optimal

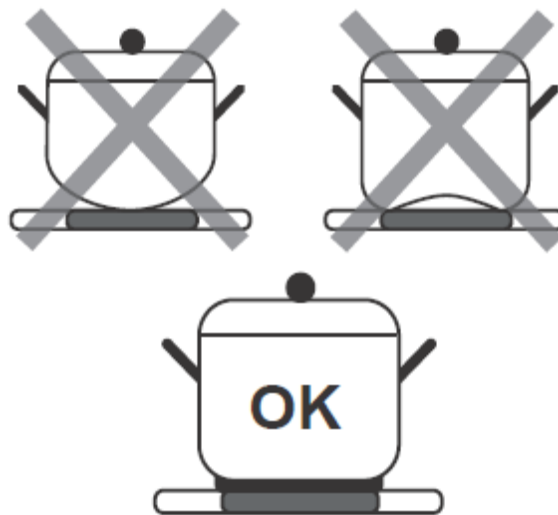


Figure I.13 Type de récipients

## I.9-Plaque à induction et alimentation électrique

### I.9.1- Description

Les plaques à induction sont des plaques de cuisson fonctionnant à l'électricité et dont le mécanisme de chauffage est basé sur le principe des courants de Foucault et utilise donc le principe d'induction électromagnétique.

La plaque qui a été mise à ma disposition durant le stage porte l'indication NARDI N701\_106 (CONDOR) comme illustré sur la figure (I.14). Elle est composée d'une carte électronique clavier, dotée d'une commande avec capteur de présence à infrarouge donnant la possibilité de régler le niveau de fonctionnement avec dix modes, allant de 1 à P(Booster) et un réglage de la minuterie pour chaque foyer, d'inducteurs et d'une vitrocéramique pour couvrir l'ensemble et faire office de support aux ustensiles de cuisson.

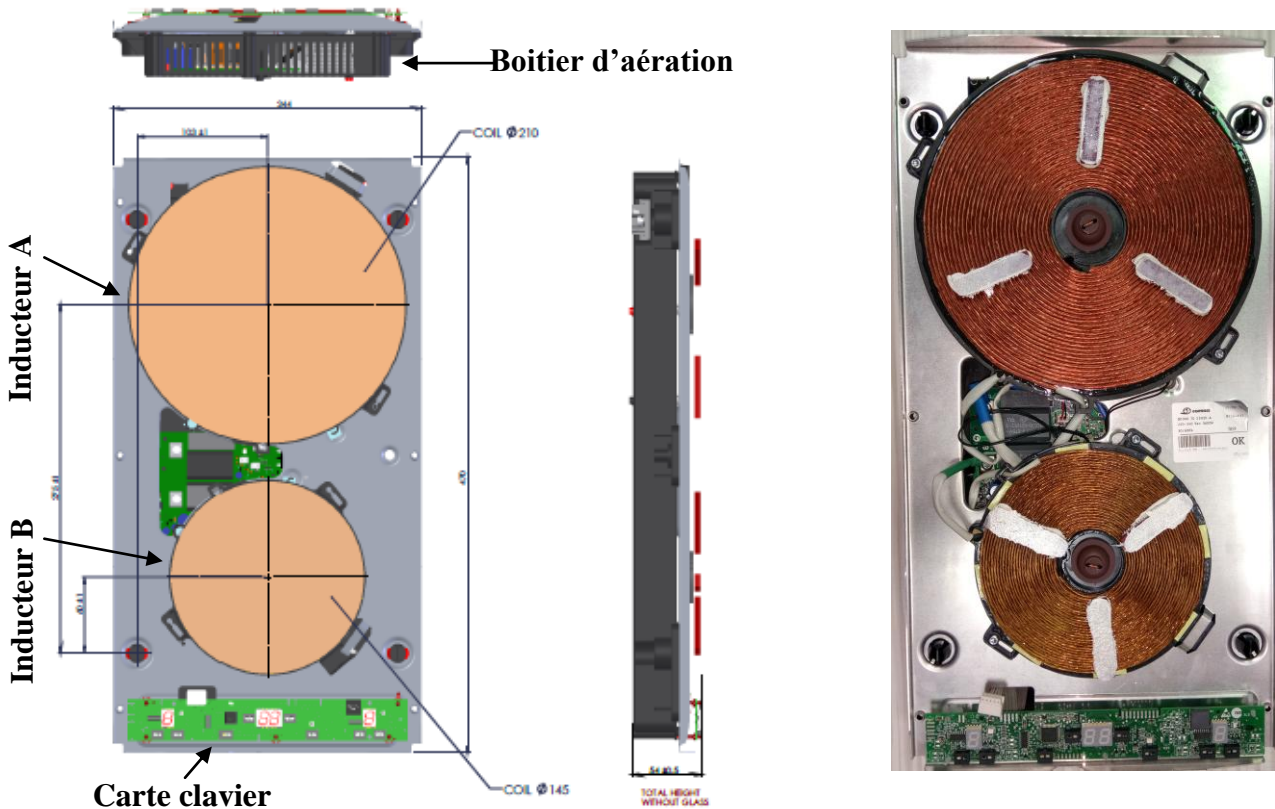


Figure I.14 Plaque de cuisson NARDI N701\_106 (CONDOR)

## I.9.2- Composition de la plaque

### I.9.2.1- La vitrocéramique

La vitrocéramique fut inventée en 1954, c'est un matériau récent comparé au verre et à la céramique. Il faut savoir que la vitrocéramique est un matériau vitreux à base de silice qui ne se dilate pas comme le verre. Ses dimensions ne varient quasiment pas jusqu'à 750°C car une partie des molécules qui la composent se dilatent à la chaleur, tandis qu'un nombre égal se rétractent. Une caractéristique de ce matériau est d'être mauvais conducteur de chaleur d'où la limitation des déperditions de chaleur. [10][9].

➤ **Vitrocéramique 4 foyers**

Elle dispose de deux foyers de 210mm de diamètre pour une puissance de 2000W et deux autres foyers, petit de 145mm de diamètre pour une puissance de 1600W. (Figure I.15)

Ses dimensions sont 580\*510\*4mm, respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur.

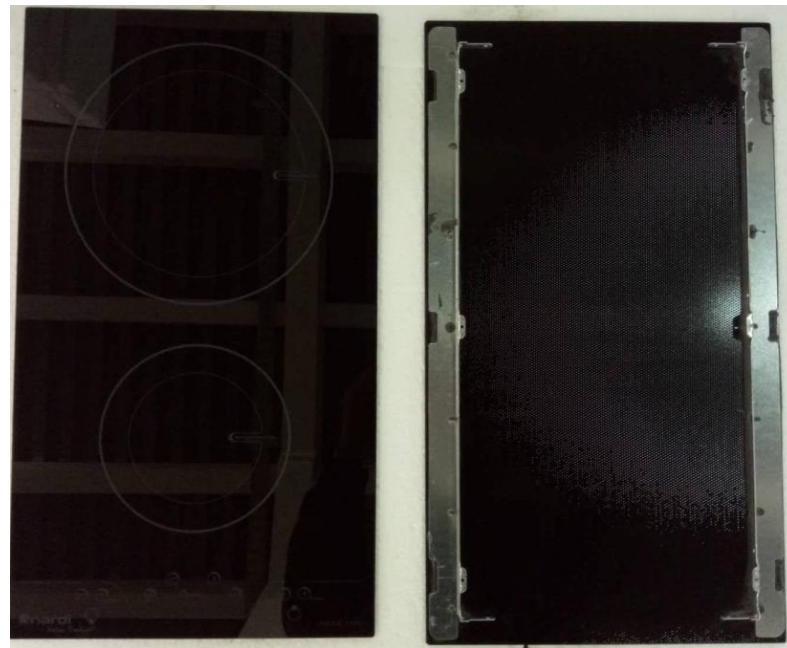


Figure I.15 Plaque de cuisson à 4 foyers

➤ **Vitrocéramique 2 foyers**

Elle dispose de deux foyers de 210mm de diamètre pour une puissance de 2000W et deux autres foyers, petit de 145mm de diamètre pour une puissance de 1600W. (Figure I.16)

Ses dimensions sont 510\*290\*4mm, respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur.



(a) (b)  
Figure I.16 Plaque à induction à 2 foyers

Des supports métalliques sont fixés sur les vitrocéramiques à l'aide d'une colle silicone spéciale qui est appliquée sur le revers de la vitrocéramique par un robot programmé pour des dimensions bien précises comme le montre la figure (I.17).

Le principe est simple, de la silicone est pompée dans la tuyauterie, et à l'aide des embouts aux extrémités des bras qui se déplacent suivant l'axe X, Y et Z en fonction du programme lancé par l'opérateur. Après la pose de la silicone, la vitrocéramique est déplacée sur un gabarit qui permet la fixation des supports métalliques comme sur la figure (I.16.b).

Ainsi, la vitrocéramique est prête pour être fixée sur le reste de la table et permettre l'utilisation de cette dernière.



Figure I.17 Robot de pose de silicone sur les vitrocéramiques

### **I.9.2.2- Les inducteurs**

Le chauffage par induction destiné à la cuisson utilise des inducteurs qui sont faits de fils électriques multibrins en cuivre torsadés et enroulés sous forme de spires jointives et concentriques, ce qui donne une bobine plate.

Les bobines sont disposées sur un support en plastique, sous lequel sont fixés des barrettes en ferrites qui ont pour rôle de canaliser les lignes de champs et de les renvoyer vers la charge et de les empêcher d'atteindre la tôle et les cartes électroniques.

Sur chaque inducteur est fixée une feuille spéciale dans le but de protéger le vernis des conducteurs de la bobine de la chaleur résiduelle émanant de la vitrocéramique.

Pour le cas de la plaque de cuisson on a deux inducteurs, l'inducteur A et l'inducteur B montrés sur la figure (I.18).



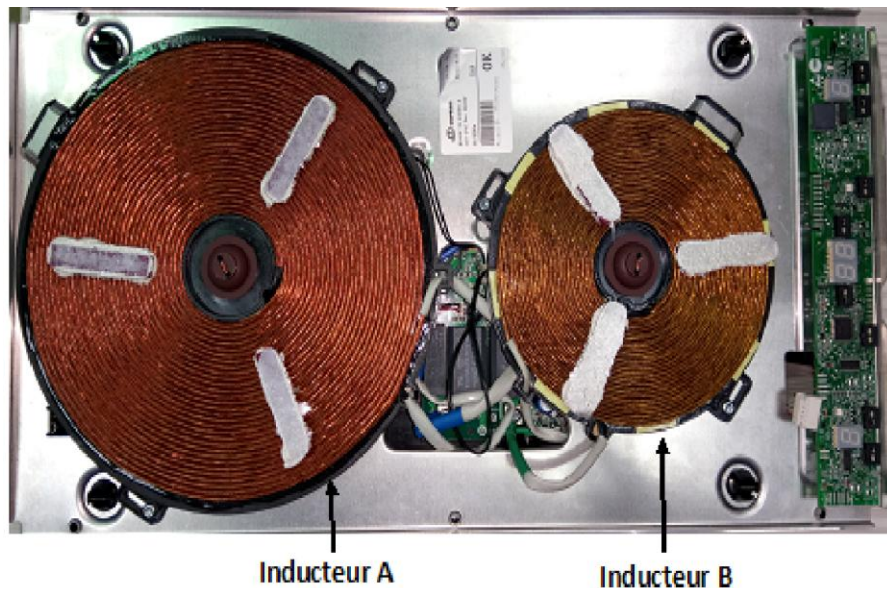


Figure I.18 Inducteur de la plaque NARDI N701\_106 (CONDOR)

- **L'inducteur A**

Il est caractérisé par un rayon intérieur  $r=25\text{mm}$ , par un rayon extérieur  $R=102.5\text{mm}$  et il se compose de 30 spires concentriques. On peut aussi voir une thermistance fixée au centre de la bobine sur un support en silicone comme indiqué sur (la figure I.19).



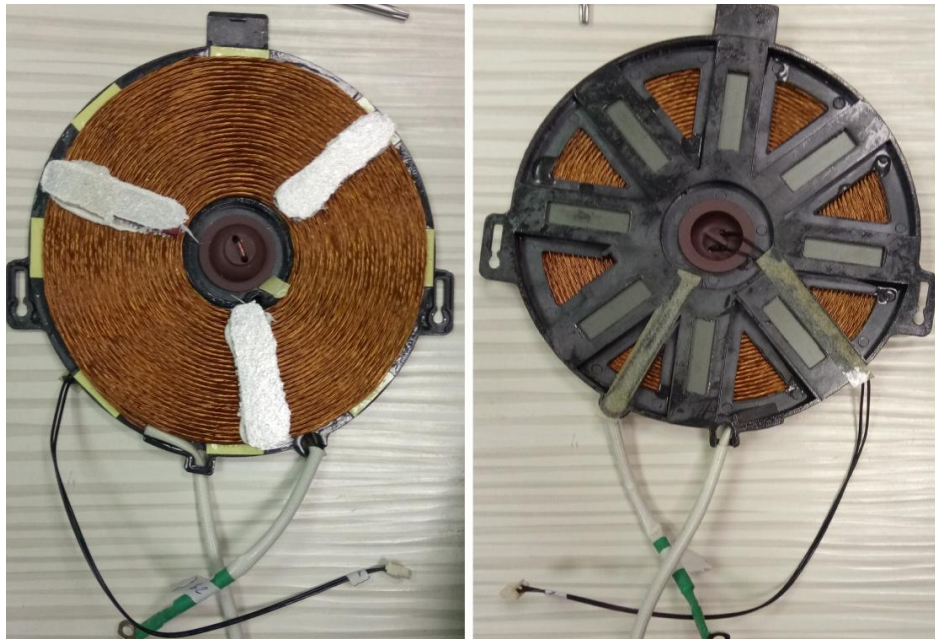
**a- Dessus de l'inducteur**

**b- Dessous de l'inducteur**

Figure I.19 Inducteur A

- **L'inducteur B**

Il possède la même structure que celle de l'inducteur A, la différence est au niveau des dimensions avec un rayon intérieur  $r=25\text{mm}$  et un rayon extérieur  $R=75\text{mm}$  avec 29 spires. (Figure I.20)



**a - Dessus de l'inducteur**

**b - Dessous de l'inducteur**

Figure I.20 Inducteur B

Tableau I.3 Récapitulatif des dimensions des inducteurs A et B

	<b>Inducteur A</b>	<b>Inducteur B</b>
Rayon intérieur (mm)	25	20
Rayon extérieur (mm)	105	75
Nombre de spires	30	29
Diamètre du conducteur de la spire (mm)	3	2
Puissance (W)	2000	1600

### I.9.3- Installation électrique et électronique

Elle est composée de deux parties distinctes, une partie filtre et une partie commande et alimentation des inducteurs. (Figure I.21)

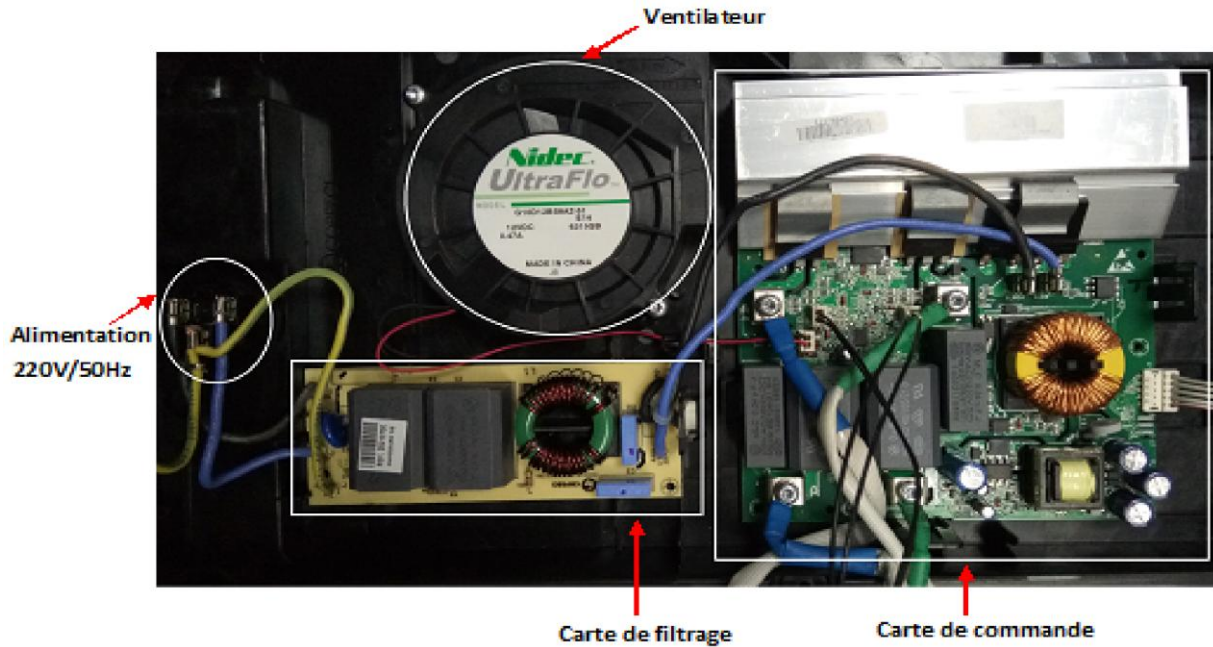


Figure I.21 Composition électronique de l'alimentation de la plaque NARDI 701\_601

#### I.9.3.1- Schéma synoptique

L'installation est constituée principalement des filtres électriques, d'un redresseur, d'un onduleur et des bobinages [10]. La figure (I.22) montre le schéma synoptique de la structure.

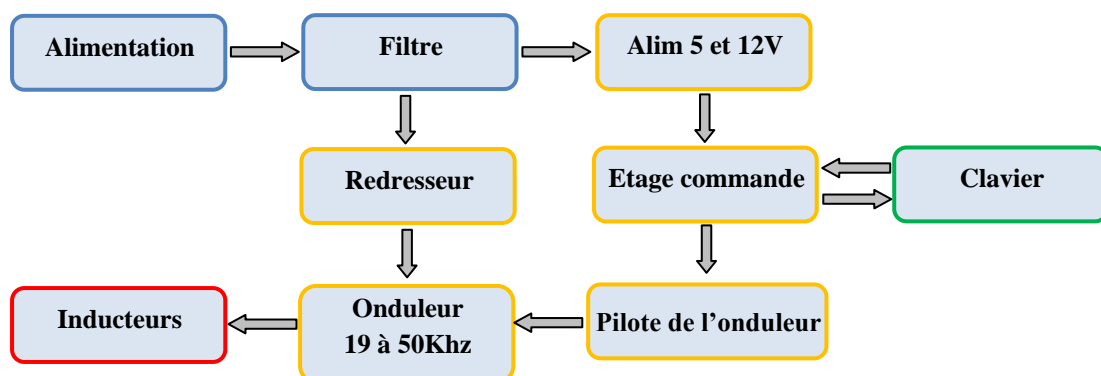


Figure I.22 Schéma structurel de la plaque à induction



### I.9.3.2- Filtrage

Par son principe, l'appareil peut générer des parasites haute fréquence importants. Afin d'assurer un niveau de perturbation minimum, un important dispositif de filtrage est utilisé. Il permet de rendre les tables à induction compatible avec leur environnement dont le niveau de perturbation est inférieur à celui d'un téléviseur.

Le filtrage remplit plusieurs missions :

- Il protège contre les surintensités de fonctionnement,
- Il élimine les parasites entrant et sortant,
- Il élimine les surtensions (pointes de tension).

Pour cela, on utilise généralement le schéma de la figure (I.23). Ce dispositif est composé de condensateurs, fusible(s), VDR, self à forte inductance et une indispensable liaison à la terre.

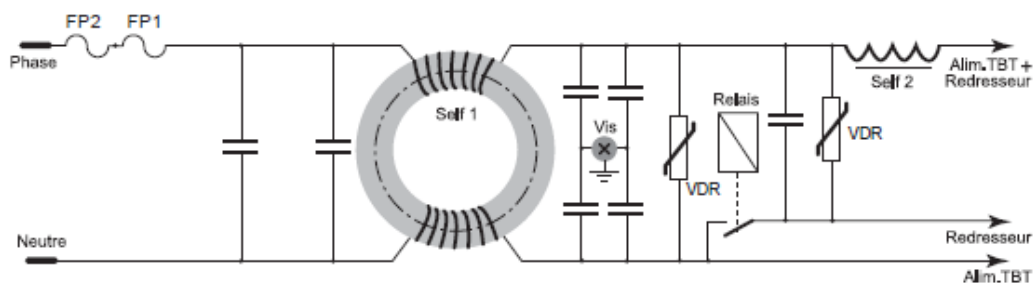


Figure I.23 Schéma électrique d'un dispositif de filtrage

- **Les VDR** (Voltage Dependent Resistor) ou plus connue sous le nom de varistance, c'est un élément qui protège contre les surtensions possible dans un réseau électrique ou dans une alimentation, le but est de protéger les semi conducteurs de ces dernières contre les surtensions.
- **Les selfs** ont un rôle "d'amortisseurs" qui ne laisse passer que les basses fréquences. Elles sont complétées dans leur action par des condensateurs.
- **La connexion à la masse** permet d'évacuer les résidus parasites de haute fréquence. [10]

### I.9.3.3- Redresseur

Pour alimenter les inducteurs, il faut leur appliquer une fréquence élevée. Pour passer de 50Hz à 50KHz il faut d'abord redresser la tension du secteur à l'aide d'un pont de diode. Un condensateur de filtrage est associé afin d'atténuer les signaux haute fréquence. Comme le montre la figure (I.24), la tension en sortie du redresseur est approximativement la tension de crête du secteur lorsqu'aucun inducteur n'est alimenté. Cette tension chute durant le fonctionnement.

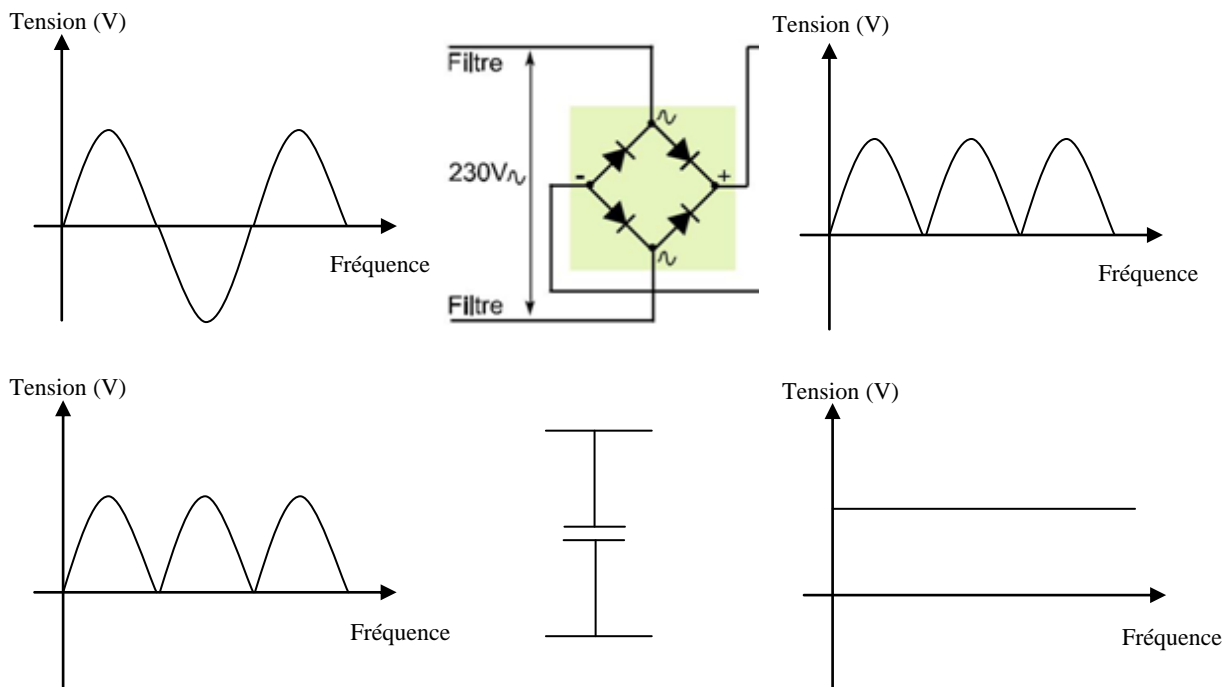


Figure I.24 Schéma électronique du redresseur

### I.9.3.4- Onduleur

L'onduleur permet de transformer un signal continu en un signal alternatif à fréquence réglable. Il est composé de deux transistors (dont la technologie peut varier en fonction de la génération de table), deux condensateurs et de deux diodes de roue libre (indispensable sur tout circuit inductif). (Figure I.25)

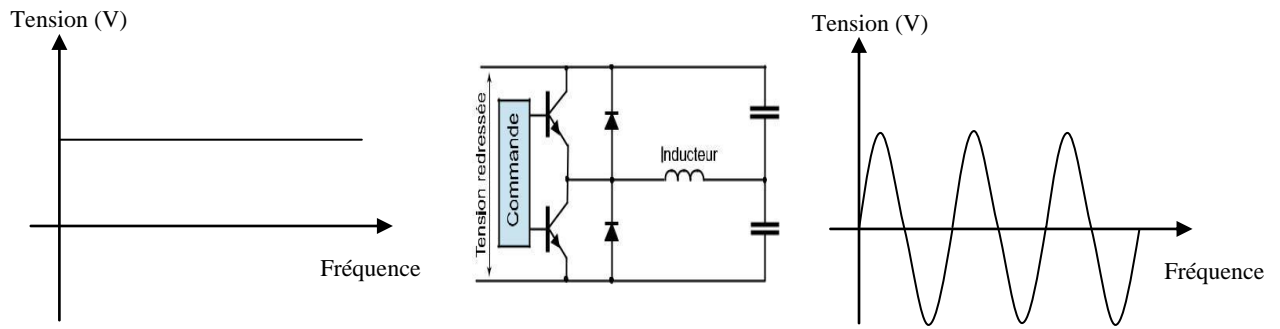


Figure I.25 Schéma électronique de l'onduleur

La commande des deux foyers et la minuterie se font via des capteurs de proximités à infrarouge, en jaune sur la figure (I.26), installés sur la carte de commande reliée à la carte principale.

L'affichage se fait via des afficheurs 7 segments, mis en rouge sur (Figure I.26).

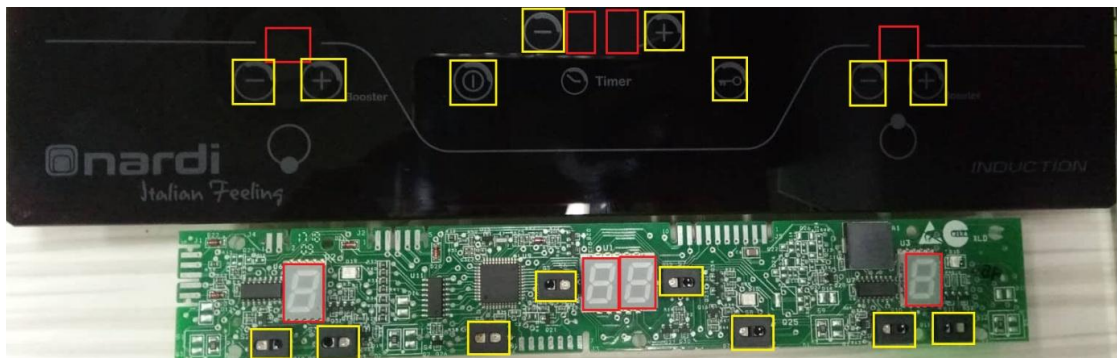
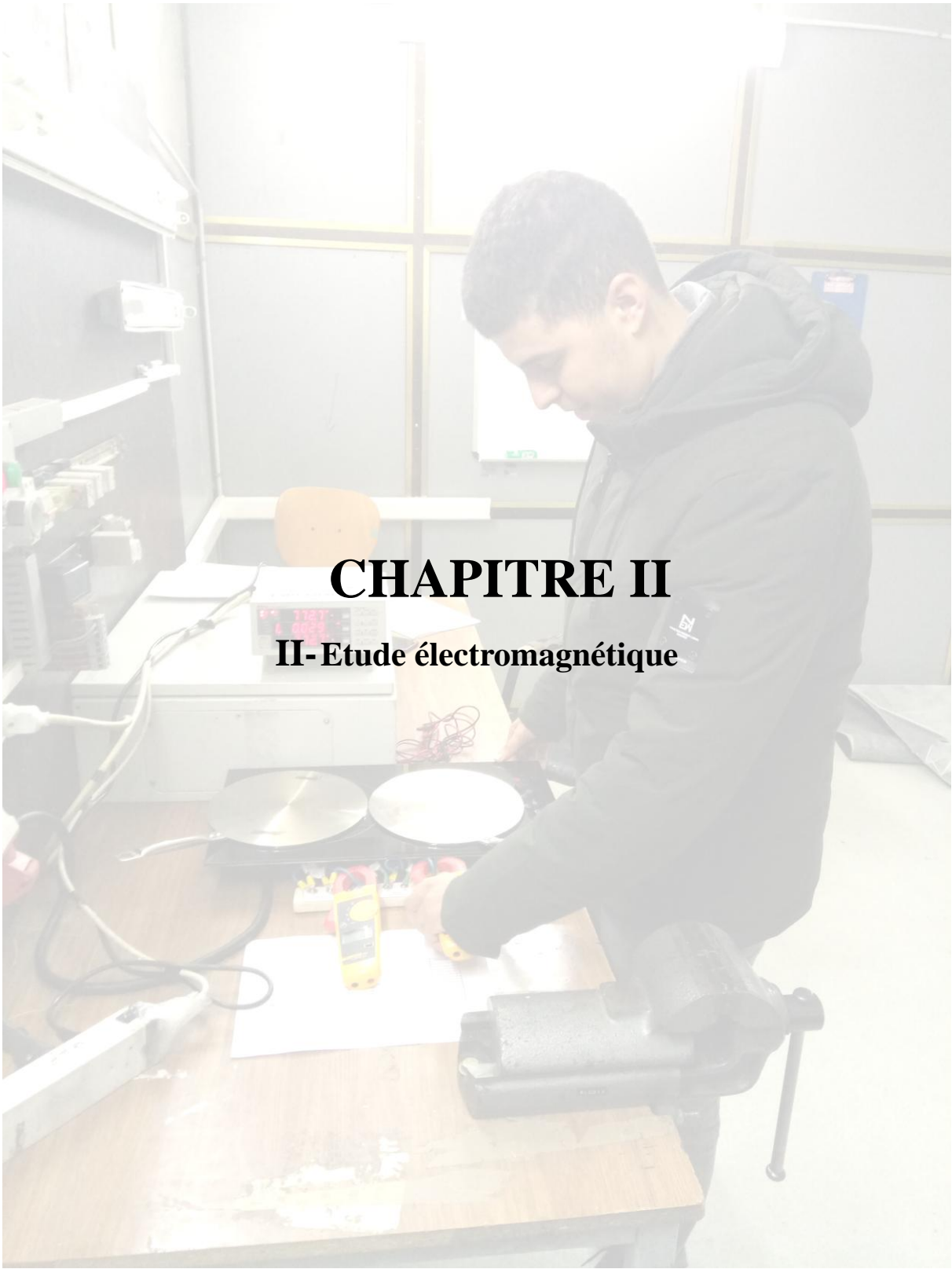


Figure I.26 Clavier de commande NARDI N701\_106 (CONDOR)

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a fait un état de l'art sur cette technique de chauffage, et on a appuyé notre recherche par des structures existantes et un contacte directe avec un modèle réel au sein du stage effectué.



# **CHAPITRE II**

## **II- Etude électromagnétique**

## II.1- Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont des équations locales qui expriment des relations entre le champ électromagnétique  $(\vec{E}, \vec{B})$  et ses sources  $(\rho, \vec{j})$ , elles sont au nombre de quatre :

$$\text{Equation de Maxwell-Faraday (MF) : } \text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Ampère (MA) : } \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Thomson (MT) : } \text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Gauss (MG) : } \text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Ces équations sont en fonction des coordonnées des points de l'espace et du temps ; on dit qu'elles sont locales. Pour la simplicité d'écriture, on ne fait pas apparaître ces variables.

Elles ne se démontrent pas car elles sont établies sur la base des expériences. A l'heure actuelle, ces équations ne sont jamais résolues d'une manière complète.

$\vec{E} [V/m]$  : Champ d'excitation électrique

$\vec{H} [A/m]$  : Champ d'excitation magnétique

$\vec{D} [A.s/m]$  : Champ d'induction électrique

$\vec{B} [T]$  : Champ d'induction magnétique

$\vec{j} [A/m^2]$  : Densité surfacique de courant électrique

$\rho [C/m^3]$  : Densité volumique de charge électrique

$(\vec{E}, \vec{H})$  : Champ d'excitation électromagnétique

$(\vec{D}, \vec{B})$  : Champ d'induction électromagnétique

$(\rho, \vec{j})$  : Sources de champs électromagnétiques

## II.2- Lois de comportement des milieux

Il faut bien comprendre que les équations de Maxwell sont à la base de tous les phénomènes électriques et magnétiques mais elles ne pourront jamais être résolues telles qu'elles sont car il reste à définir l'interaction entre la matière et le champ électromagnétique  $(\vec{E}, \vec{B})$ .

Pour qu'elles soient complètes, il faut leurs ajouter les relations de comportement des milieux (matières) où règne le champ électromagnétique  $(\vec{E}, \vec{B})$

Il existe quatre (04) types de milieux électro-magnétiquement différents :

- **Milieu diélectrique**

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{avec} \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (\text{II.5})$$

La constante  $\epsilon_0 = 1 / \mu_0 c^2 = 10^{-9} / 36\pi [F/m]$  est la permittivité du vide avec  $c[m/s]$  la vitesse de la lumière alors que  $\epsilon_r$  est la permittivité relative du milieu qui caractérise le comportement diélectrique du matériau.

- **Milieu magnétique**

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{avec} \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{II.6})$$

La constante  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [A/m]$  est la perméabilité magnétique du vide alors que  $\mu_r$  est la perméabilité relative du milieu qui caractérise le comportement magnétique du matériau.

- **Milieu conducteur** (loi d'ohm)

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

$\sigma[\Omega.m]^{-1}$  : Conductivité électrique,

$\rho[\Omega.m] = \frac{1}{\sigma}$  : Résistivité électrique.

- **Milieu isolant**

Ce milieu est caractérisé par une conductivité nulle ( $\sigma = 0$ ),  $\epsilon_0$  et  $\mu_0$ . Dans ce cas le courant de conduction est nul  $\vec{J} = 0$ .

### II.3- Simplification des équations

Dans le cadre de cette étude, on exploite les équations (II.1), (II.2) et (II.3) combinées avec les lois de comportement des milieux pour analyser le phénomène du chauffage par induction.

Travaillant dans un domaine de champs proches :

- On procède à l'approximation des régimes quasi stationnaires qui prendra effet sur l'équation (II.2) en négligeant les courants de déplacement par rapport aux courants de conduction :

$$\text{Equation de Maxwell-Ampère (MA) : } \vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.8})$$

- L'étude électromagnétique concerne les matériaux conducteurs, de ce fait, la charge d'espace est négligée ce qui conduit à l'équation (II.9) suivante :

$$\text{Equation de Maxwell-Gauss (MG) : } \text{div}\vec{E} = 0 \quad (\text{II.9})$$

### II.4- Equations simplifiées de maxwell

$$\text{Equation de Maxwell-Faraday (MF) : } \vec{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\vec{\partial B}}{\partial t} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Ampère (MA) : } \vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Thomson (MT) : } \text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Gauss (MG) : } \text{div}\vec{D} = 0 \quad (\text{II.13})$$

### II.5- Théorème d'Ampère

Le théorème d'Ampère permet la détermination rapide du champ magnétostatique pour des distributions de courants symétriques. Après détermination de la forme du champ à l'aide de considération de symétrie, son application à un contour fermé comme sur la figure (II.1),

orienté, de géométrie adaptée aux symétries du problème permet de déterminer l'amplitude du champ magnétostatique.

La circulation du champ magnétostatique  $\vec{B}$  créé par un ensemble de courants sur un contour  $\Gamma$  orienté est égale à la somme des courants enlacés multipliée par  $\mu_0$  :

$$c_{\Gamma} = \oint_{\Gamma} \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_k \varepsilon_k I_k \quad (\text{II.14})$$

$\varepsilon_k = 1$ , si  $I_k$  traverse S orienté par  $\Gamma$  dans le sens de  $\vec{n}$

$\varepsilon_k = -1$ , si  $I_k$  traverse S orienté par  $\Gamma$  dans le sens inverse de  $\vec{n}$

$\varepsilon_k = 0$ , si  $I_k$  ne traverse pas S.

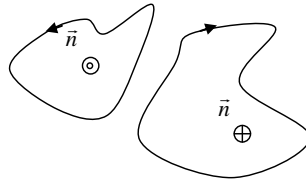


Figure II.1 Théorème D'ampère

## II.6- Formule de Biot et Savart

Dans le cas de configuration ne possédant pas de symétries comme montrée par la figure (II.2), on applique la loi de Biot et Savart.

Un conducteur de longueur (l) quelconque peut être décomposé en une somme de tous petits morceaux de conducteurs de longueur (dl) mis bout à bout. Lorsqu'il est parcouru par un courant, chacun de ces petits morceaux engendre en chaque point de l'espace qui l'entourne un petit champ d'induction noté (dB).

En faisant la somme vectorielle des contributions de tous les petits morceaux conducteurs, on peut en déduire le champ d'induction en tout point engendré par la totalité du conducteur parcouru par ce courant.



Le champ magnétique créé en un point M par un circuit fermé parcouru par un courant peut être considéré comme la somme géométrique des champs créés par les éléments du circuit. (Cas d'un circuit filiforme)

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_c \frac{Id\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2} \quad (\text{II.15})$$

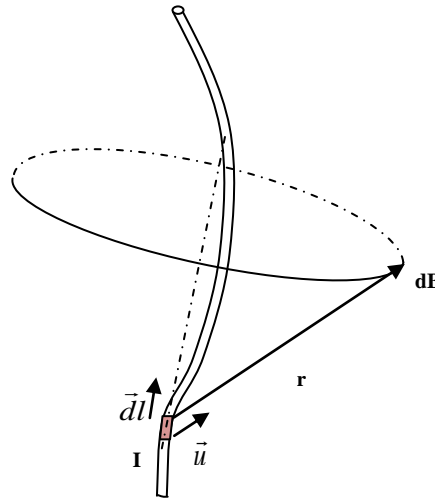


Figure II.2 Représentation vectorielle

En utilisant les équations (II.3) et (II.23) on peut aboutir à l'expression (II.16) du potentiel vecteur magnétique A :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_c \frac{Id\vec{l}}{r} \quad (\text{II.16})$$

## II.7- Champ créé par une spire circulaire

Considérons le schéma de la figure (II.3) où on calcule le champ magnétique créé sur l'axe d'une spire circulaire de rayon R, parcourue par un courant

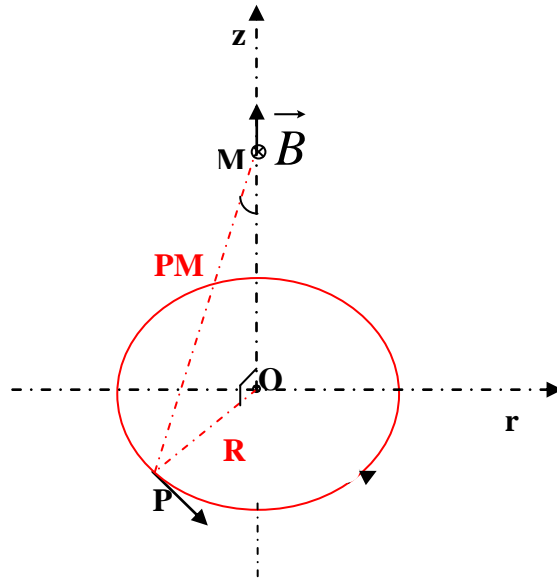


Figure II.3 Champ créé par une spire circulaire sur son axe

En dehors de l'axe, nous ne connaissons pas précisément le sens du vecteur  $\vec{B}$ , ce qui nous empêche de trouver un «contour d'Ampère» sur lequel le produit scalaire  $\vec{B} \cdot d\vec{l}$  serait simple à calculer ; nous allons donc appliquer la relation de Biot et Savart. Dans ce cas, la relation (II.15) s'écrit :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_{\text{spire}} d\vec{l} \wedge \frac{\vec{PM}}{r^2} \quad (\text{II.17})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\vec{l}}{r^2} \wedge \vec{PM} = \frac{d\vec{l}}{r^2} \wedge (\vec{PO} + \vec{OM}) \quad (\text{a}) \\ \int \frac{d\vec{l}}{r^2} \wedge \vec{PO} = \frac{2\pi R^2}{r^2} \quad (\text{b}) \\ \int \frac{d\vec{l}}{r^2} \wedge \vec{OM} = 0 \quad (\text{c}) \\ r = \sqrt{R^2 + z^2} \quad (\text{d}) \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

En tenant compte des relations (II.18), on arrive à exprimer le champ magnétique en un point z créé par une spire de rayon R.

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} I \quad (\text{II.19})$$

## II.8- Champ magnétique créé par une bobine plate

On exploite l'expression (II.19) du champ dans le cas d'une spire circulaire de rayon  $R_1$ , parcourue par un courant, figure (II.4). En faisant la somme des champs créés par chaque spire, on obtient :

$$B_i = \frac{\mu_0 I}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(R_1 + (i-1)D)^2}{[(R_1 + (i-1)D)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{II.20})$$

Où  $R_1$  est le rayon de la première spire,  $D$  son diamètre et «  $i$  » est l'indice qui repère les spires dont le rayon est donné par :

$$R_i = R_1 + (i-1)D \quad (\text{II.21})$$

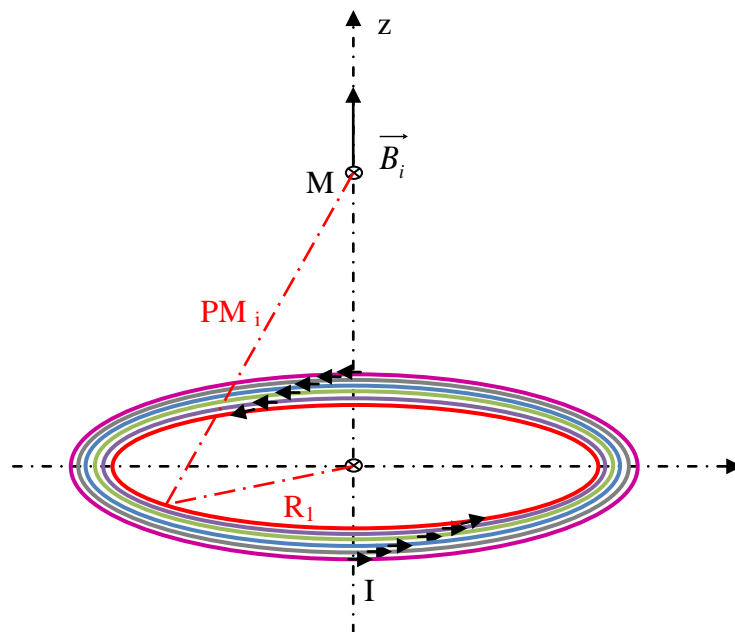


Figure II.4 Champ crée par N spire(s) circulaire(s) en leur axe

## II.9- Equations électromagnétiques couplées

Les approximations précédentes ont pour rôle de réduire le phénomène électromagnétique à un phénomène d'induction.

On étudie le phénomène selon la géométrie des dispositifs avec un choix approprié de la variable d'état. Dans notre cas la configuration est spirale (cylindrique), ainsi on a intérêt à

choisir comme variable d'état le champ électrique ou bien le potentiel vecteur magnétique car ils n'ont qu'une composante orthogonale au plan d'étude.

Dans le cas des systèmes axisymétriques, traités en coordonnées cylindriques, cette composante est dans la direction angulaire et elle ne dépend que de  $r$  et  $z$ .

En introduisant le potentiel magnétique vecteur, duquel l'induction magnétique dérive dans l'espace, et le potentiel scalaire électrique où le champ électrique dérive de celui-ci, le problème se résume à résoudre les deux équations couplées [11], [12].

$$\begin{cases} r\vec{\text{rot}}(\nu r\vec{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{J} & \text{(a)} \\ \vec{J} = -\sigma\left(\frac{d\vec{A}}{dt} + g r \vec{\text{grad}}V\right) & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(II.22)}$$

Avec :

$\vec{A}[T.m]$  : Le potentiel vecteur magnétique.

$V[v]$  : Le potentiel scalaire électrique.

$\nu = \frac{1}{\mu}$  : Représente la réductivité magnétique

## II.10- Equation de diffusion électromagnétique

### II.10.1- Forme générale de l'équation de diffusion

Le problème formulé en termes de champ magnétique ou électrique présente l'inconvénient de la discontinuité possible de ces grandeurs en passant d'un milieu à un autre, par contre le potentiel vecteur magnétique est continu, de plus, il réduit le nombre d'inconnues.

L'équation (II.3) permet de déduire qu'il existe un potentiel vecteur magnétique  $A$  tel que

$$\vec{B} = r\vec{\text{rot}}A \quad \text{(II.23)}$$

La combinaison des équations (II.6) et (II.8) nous donne :

$$r\vec{\text{rot}}(\nu r\vec{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{J} \quad \text{(II.24)}$$

En utilisant la relation (II.1) combinée avec (II.23), on montre que le champ  $\vec{E}$  dérive dans le temps du potentiel vecteur  $\vec{A}$  et dans l'espace du potentiel scalaire électrique  $V$ ; d'où

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad}V \quad (\text{II.25})$$

On remplace l'équation (II.25) dans l'équation (II.7)

$$J = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad}V \right) \quad (\text{II.26})$$

Ainsi on obtient, en rassemblant les équations (II.7), (II.24) et (II.25), l'équation généralisée de diffusion électromagnétique de la grandeur  $\vec{A}$ .

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\sigma \text{grad}V \quad (\text{II.27})$$

### II.10.2- Régime harmonique

En régime harmonique, on change la notation de la variation du potentiel vecteur magnétique  $A$ , on écrit en notation complexe  $\frac{dA}{dt} = j\omega A$ .

L'équation de diffusion s'écrit alors sous la forme :

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + j\omega A \sigma = -\sigma \text{grad}V \quad (\text{II.28})$$

### II.10.3- Ecriture de l'équation de diffusion relative aux milieux

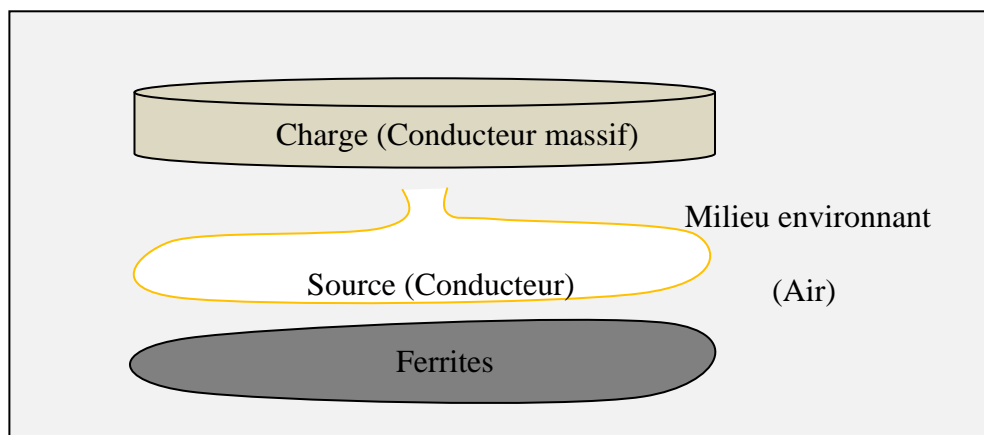


Figure II.5 représentation des milieux constitutifs du modèle

### II.10.3.1- Dans le vide

Le vide est caractérisé par une conductivité nulle et une perméabilité  $\mu_0$  ce qui nous permet d'écrire l'équation de diffusion sous la forme :

$$\nu_0 \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) = 0 \quad (\text{II.29})$$

### II.10.3.2- Dans la pièce à chauffer

La charge est un matériau conducteur massif caractérisé par une permittivité  $\epsilon_r$ , une conductivité  $\sigma_r$  et une perméabilité  $\mu_r$ .

Un conducteur massif est semblable à une multitude de spires en court-circuit, donc la tension  $V$  au sein de ce milieu est nulle.

Ceci nous permet d'écrire l'équation de diffusion :

$$\text{rot}(v \text{rot} \vec{A}) + j\omega A \sigma = 0 \quad (\text{II.30})$$

### II.10.3.3- Dans l'inducteur

La source étant un conducteur sous forme de bobine, on peut dire que c'est un milieu conducteur de conductivité  $\sigma$ , parcouru par un courant  $I$  et d'une tension à ses bornes  $V$ .

L'équation de diffusion s'écrit telle l'équation (II.28).

On a deux sortes d'excitation possible, l'excitation en courant et l'excitation en tension.

#### ➤ Excitation en tension :

Cette excitation revient à dire que la tension est constante et que le courant est variable ; c'est-à-dire que toute influence extérieure peut modifier le courant dans l'inducteur (source), d'où la nécessité de résoudre l'équation (II.28) de diffusion dans la source et de trouver le potentiel vecteur  $A$  pour ensuite pouvoir trouver la valeur du courant  $I$  qui y circule.

#### ➤ Excitation en courant

Cette excitation revient à dire que le courant inducteur est imposé. Par conséquent, ce dernier ne réagit à aucune influence magnétique extérieure. Dans ce cas la résolution de l'équation de diffusion électromagnétique n'est pas nécessaire dans l'inducteur.

Pour cela ; la résolution de l'équation de diffusion se fera dans le vide et dans la charge uniquement.

## II.11- Système axisymétrique

On peut traiter un problème de diverses façons, chacune d'elles se différencie de l'autre selon la géométrie et les conditions simplificatrices, dans notre cas nous avons affaire à un inducteur sous forme de bobine multi spires concentriques, donc on dit que l'inducteur est spiral. En négligeant l'hélicité des spires, on peut dire que notre système possède une symétrie de révolution, ainsi notre problème se réduit à une géométrie bidimensionnelle comme l'illustre la figure (II.6).

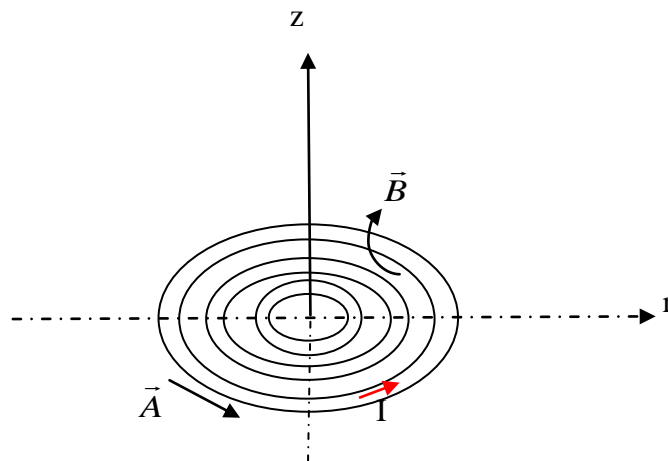


Figure II.6 Géométrie de la bobine émettrice (Inductrice)

Le potentiel se réduit à sa composante azimutale suivant l'axe  $\theta$  qui ne dépend que de  $r$  et  $z$ , où celui-ci est perpendiculaire au plan  $r$ - $z$  (Figure. II.6)

D'où :

$$\begin{cases} \vec{A} = A_{\theta}(r, z)\vec{e}_{\theta} & (a) \\ \vec{J} = J_{\theta}(r, z)\vec{e}_{\theta} & (b) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$A$  et  $J$  seront considérés dans la suite de l'étude comme étant des scalaires et sont respectivement égaux à  $A_{\theta}$ ,  $J_{\theta}$ . L'équation de diffusion s'écrit sous la forme donnée par la formule (II.32).

$$\text{div}(\text{grad}A) - \mu\sigma(j\omega A + \vec{v} \text{grad}A) = \sigma\mu \text{grad}V \quad (\text{II.32})$$

Dans notre modèle d'étude, le courant de source  $J_s$  est dirigé suivant la direction  $\Theta$ , imposant ainsi pour le potentiel vecteur magnétique une seule composante  $A_\Theta$ .

Le champ magnétique  $B$  possède alors deux composantes, l'une suivant  $r$  et l'autre suivant  $z$ .

Le problème est traité avec comme variable d'état le potentiel vecteur magnétique  $A$  pour lequel l'axe ( $oz$ ) représente un axe d'antisymétrie comme le montre la figure (II.7).

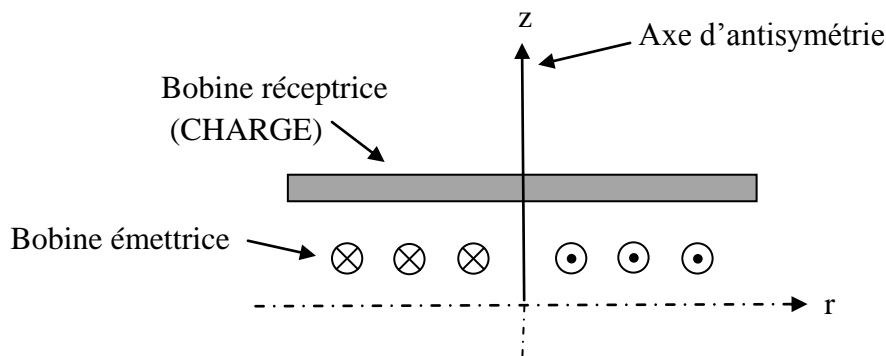


Figure II.7 Géométrie de l'étude

## II.12- Résolution de l'équation de diffusion électromagnétique

Les méthodes analytiques, s'avèrent d'application très difficile dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux, dans des conditions de fonctionnement optimales, présentent des non-linéarités physiques, donc mathématiques.[11][12]

La résolution de l'équation de diffusion électromagnétique (II.28) peut se faire à l'aide de différentes méthodes. On distingue trois types de méthodes de résolution :

- Les méthodes analytiques
- Les méthodes numériques
- Les méthodes semi analytiques.

### II.12.1- Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques permettent d'obtenir une solution mathématique exacte mais en utilisant des restrictions géométriques, phénoménologiques et structurelles. On distingue plusieurs outils et méthodes analytiques de formulation d'un problème électromagnétique (noyau de Green, équation de Fredholm, loi de Biot et Savart, théorème de réciprocité de



Lorentz, théorème des images utilisé en optique, méthode de séparation des variables, etc.).[11]

### II.12.2- Méthodes semi analytiques

Ces méthodes relient à la fois des solutions partiellement analytiques et un schéma numérique complémentaire à fin de réduire le temps de calcul tout en ayant des résultats les plus proches possible de la réalité. [12]

### II.12.3- Méthodes numériques - Eléments finis

La méthode des éléments finis est la méthode numérique la plus populaire dans toutes les disciplines physiques confondues ((Jin, 1993) et (H. Liu, 2013)). Elle a été le sujet de bons nombres de publications au cours des dernières décennies. Elle est considérée comme l'une des méthodes les plus fiables et éprouvée. La majorité des logiciels de simulation commerciaux sont basés sur cette méthode, dont les logiciels COMSOL, Infolytica et ANSYS. [15]

Cette méthode consiste à subdiviser le domaine étudié en éléments finis, et approcher l'inconnu dans chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de premier ou deuxième degré. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnu sur les interfaces des éléments. Le principe de la méthode des éléments finis est la transformation de l'équation aux dérivées partielles (EDP) qui régit le problème traité à un système d'équation algébrique dont la résolution permet de définir l'inconnu à un ensemble de points (noeuds) de la discrétisation. [14], [15]

Cette méthode consiste à subdiviser le système en éléments finis dont la forme dépend de la géométrie de base afin d'optimiser les résultats et d'avoir une meilleure précision.[14]

#### II.12.3.1- Eléments finis en 2D

La figure (II.8) montre les éléments finis classiques en deux dimensions.

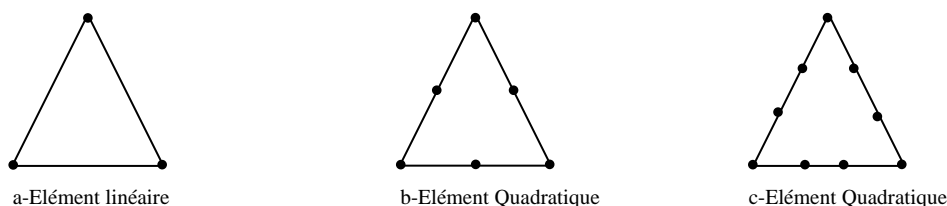


Figure II.8 éléments classiques en deux dimensions

Dans la majorité de cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on raffine ainsi le maillage. [8]

### II.12.3.2- Fonction d'approximation

Le potentiel vecteur magnétique  $A$  dans un élément peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes) dont l'expression varie d'un type d'élément à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. Généralement on utilise des fonctions polynomiales. Pour un élément triangulaire de premier ordre:

$$A_e(r, z) = a + br + cz \quad (\text{II.33})$$

Avec  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$  et  $\mathbf{c}$  des constantes à déterminer.

Dans le domaine global contenant  $ne$  éléments, le potentiel  $A(r, z)$  est la contribution des potentiels de tous les éléments du maillage. On écrit donc :

$$A(r, z) = \sum_{e=1}^{ne} A_e(r, z) \quad (\text{II.34})$$

$ne$ : est le nombre total des éléments du maillage

Le potentiel en tout point dans un élément ainsi que la densité de courant est parfaitement définie en fonction des valeurs de ses sommets.

Pour un élément triangulaire :

$$A_e = a + br + cz = \sum_i^3 a_i A_i \quad (\text{II.35})$$

$$J_e = a + br + cz = \sum_i^3 a_i J_i \quad (\text{II.36})$$

Où  $\mathbf{i}$  sont des fonctions d'interpolations, appelées aussi fonctions de formes  $\alpha$ .

Ces fonctions de formes ont les propriétés suivantes :

$$a_i(r_j, z_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

$$\sum_{i=1}^3 a_i(r, z) = 1 \quad (\text{II.38})$$

Pour un élément triangulaire de premier ordre on a :

$$a_1 = \frac{1}{2s} [(r_2 z_2 - r_3 z_2) + (z_2 - z_3)r + (r_3 - r_2)z] \quad (\text{II.39})$$

$$a_2 = \frac{1}{2s} [(r_3 z_1 - r_1 z_3) + (z_3 - z_1)r + (r_1 - r_3)z] \quad (\text{II.40})$$

$$a_3 = \frac{1}{2s} [(r_1 z_2 - r_2 z_1) + (z_1 - z_2)r + (r_2 - r_1)z] \quad (\text{II.41})$$

Avec  $s$  la surface de l'élément triangulaire.

$$s = \frac{1}{2} [(r_2 - r_1)(z_3 - z_1) - (r_3 - r_1)(z_2 - z_1)] \quad (\text{II.42})$$

### II.12.3.3- Formulation intégrale

L'étape importante qui permet d'aboutir au système algébrique est la mise sous forme intégrale de l'équation EDP. Au premier lieu, cette formulation nous permet d'obtenir les expressions des éléments des différentes matrices et vecteurs du système algébrique élémentaire (dans un élément type). La formulation intégrale peut être de deux manières:

- . Variationnelle.
- . Résidus pondérés.

### II.12.3.4- Variationnelle

L'utilisation de la méthode Variationnelle exige la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Cette fonctionnelle est déterminée à partir du principe de l'action hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle de type intégral défini par :

$$\tau(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (\text{II.43})$$

$L$  : est la fonction de Lagrange qui résulte de la Co-énergie du système de type cinétique et son énergie potentielle.

$\Omega$  est le domaine de résolution.

La résolution du problème Variationnelle revient à minimiser cette fonctionnelle d'énergie.

### II.12.3.5- Formulation résidus pondérés

C'est la méthode projective où on cherche à projeter l'équation locale sur des fonctions de base d'un espace de fonctions de pondérations, et on essaie de minimiser le résidu par l'approximation de la fonction de l'inconnu, dont l'expression est:

$$\int_{\Omega} R_i \phi_i d\Omega \quad (\text{II.44})$$

$$R = DF(A) - g \quad (\text{II.45})$$

$\mathbf{R}$  : est le résidu de l'approximation,  $\mathbf{DF}(\mathbf{A})$  est l'opérateur différentiel,  $\mathbf{g}$  est une fonction définie dans le domaine de résolution,  $\psi_i$  est la fonction de projection et  $\mathbf{A}$  est l'inconnu du problème. Les valeurs de  $\mathbf{A}$  qui permettent d'annuler l'intégrale sont solutions du système algébrique obtenu. Parmi les méthodes qui découlent de la méthode des résidus pondérés on cite:

- La méthode de collocation par points.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de GALERKINE.

La méthode de collocation par points utilise les fonctions de Dirac comme fonction de projection. La méthode des moindres carrés utilise la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites. Quant à la méthode de GALERKINE, elle consiste à choisir les fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation. [8]

### II.13- Calcul de la puissance

Dans notre cas, le chauffage se fait par courants induits, donc par effet joule. En utilisant la loi d'ohm (II.7), la dissipation volumique par courants de Foucault s'écrit :

$$P = JE = \frac{J^2}{\delta} \quad (\text{II.46})$$

Avec :  $P=[\text{W}/\text{m}^3]$

#### Conclusion :

Dans ce chapitre, on a pu mettre en avant les différentes lois qui régissent le chauffage par induction. On a ainsi groupé les principaux éléments pour permettre la modélisation électromagnétique de ce dernier.



# **CHAPITRE III**

## **III- Applications et résultats**

### **III.1- Introduction**

Le chapitre précédant a exposé le phénomène d'induction électromagnétique dans son aspect physique et mathématique pour pouvoir, dans ce chapitre, simuler et mettre en évidence les différents grandeurs régissant ce phénomène.

Pour ce faire, on utilise le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics 5.3a.

### **III.2- Présentation de COMSOL**

Le logiciel COMSOL, c'est un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser les différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, magnétostatique, électrodynamique l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux. L'environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. Il permet de coupler les différentes l'équation aux dérivées partielles (EDP), de manière à décrire des phénomènes multiphysiques, particulièrement adapté au magnétisme [8].

Pour cette étude, on utilise la version 5.3a de ce dernier.

### **III.3- Modèles du dispositif**

#### **III.3.1- Géométrie du système**

La géométrie du système étudié est donnée par la figure(III.1) avec  $d$  et  $D$  respectivement le diamètre intérieur et le diamètre extérieure de la bobine émettrice (inductrice).

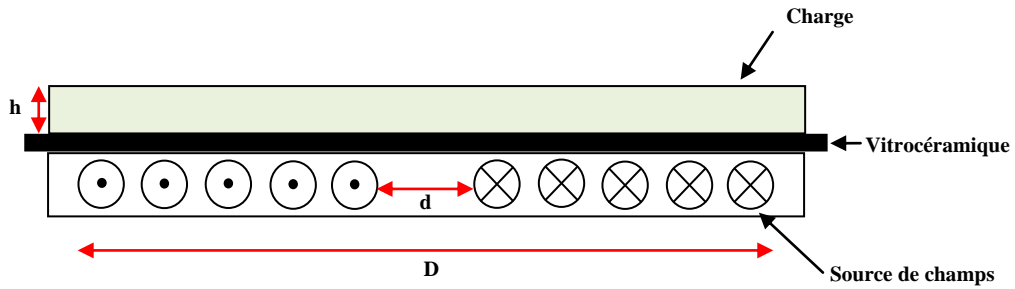


Figure III.1 Modèle géométrique

Le dispositif étant composé d'un inducteur (émetteur) sous forme de bobine formée de  $N$  spires concentriques, d'un induit (récepteur) qu'on représente par une bobine en court-circuit (disque plein) et une vitrocéramique qui sépare les deux comme le montre la figure (III.1) et la figure (III.2).

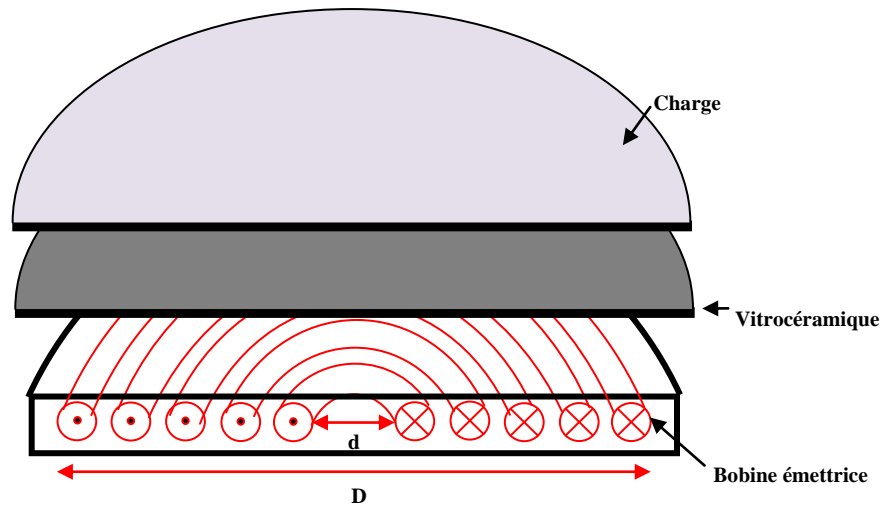


Figure III.2 Vue éclatée du dispositif

Ce système peut être décrit en système statique ; l'inducteur et l'induit sont immobiles. On alimente la bobine inductrice (émettrice) en alternatif, ce qui nous donne un champ magnétique variable qui induira dans la bobine réceptrice des courants de Foucault qui dissiperont la chaleur dans le matériau par effet joule.

### III.3.2- Structuration de la géométrie sous COMSOL 5.3a

Avant d'entamer la conception de la géométrie, nous devons préciser la dimension d'espace, qui pour notre cas est, 2D axisymétrique.

L'environnement COMSOL 5.3a nous permet de concevoir des géométries de façon relativement simple grâce à la dimension d'espace choisie ; Il suffit tout simplement d'introduire les dimensions respectives de chaque sous structure pour avoir enfin le modèle final. La conception passe par certaines étapes principales :

- Définition de la géométrie,
- Définition des matériaux,
- Définition du maillage,
- Choix de la physique,
- Choix du domaine d'étude (Temporel, fréquentiel, ...),
- Affichage des résultats.

#### a. Structure de base

Notre modèle est composé de cercle pour définir la section des inducteurs, d'un rectangle pour représenter la vitrocéramique et la charge ainsi que l'espace environnant avec la précision des dimensions de chaque phase comme représenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.1 Dimensions du modèle

Elément	Matériau	Forme	Dimensions (m)	
Inducteurs	Cuivre (Copper)	Cercles	Rayon	0.002
Vitrocéramique	Glass	Rectangle	Hauteur	0.01
			Largeur	0.15
Charge	Acier (IRON)		Hauteur	0.005
			Largeur	0.14
Air	Air		Hauteur	0.3
			Largeur	0.4



Après avoir fini de dessiner le modèle et d'avoir attribué à chaque géométrie son matériau correspondant, on obtient un modèle prêt à l'emploi comme le montre la figure (III.3).

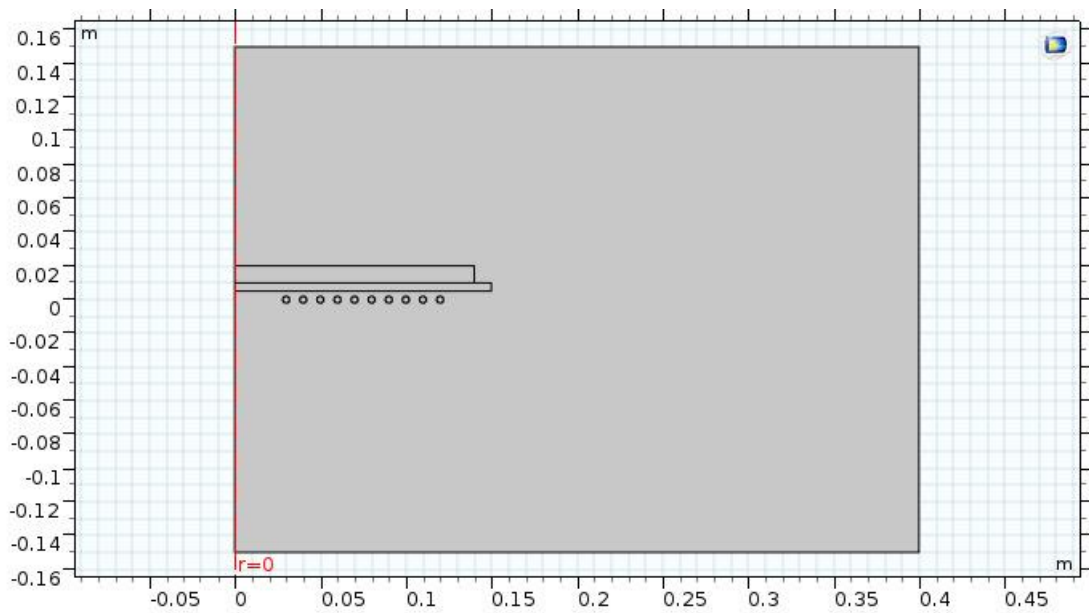
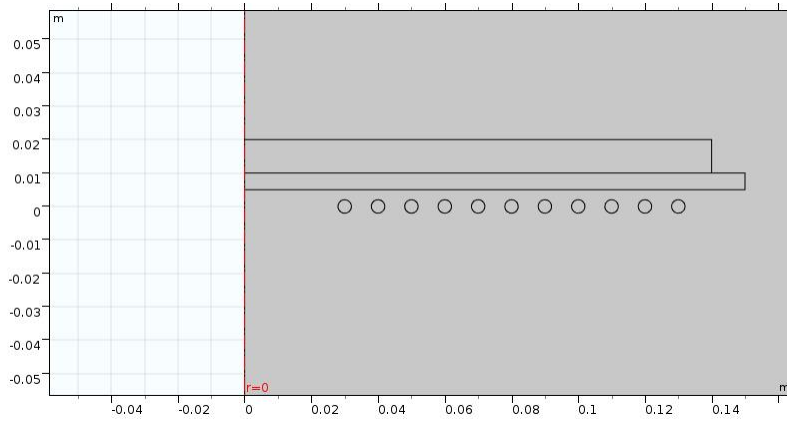


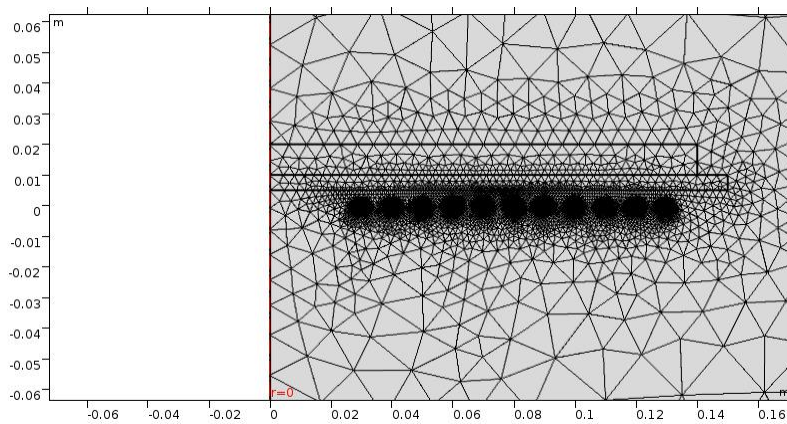
Figure III.3 Géométrie de base en 2D axisymétrique

### III.3.3- Le maillage

COMSOL permet la conception de différents maillages, il faut savoir que plus le maillage est fin, plus la solution est réaliste et précise. Notre maillage est montré sur la figure (III.9).



(a)

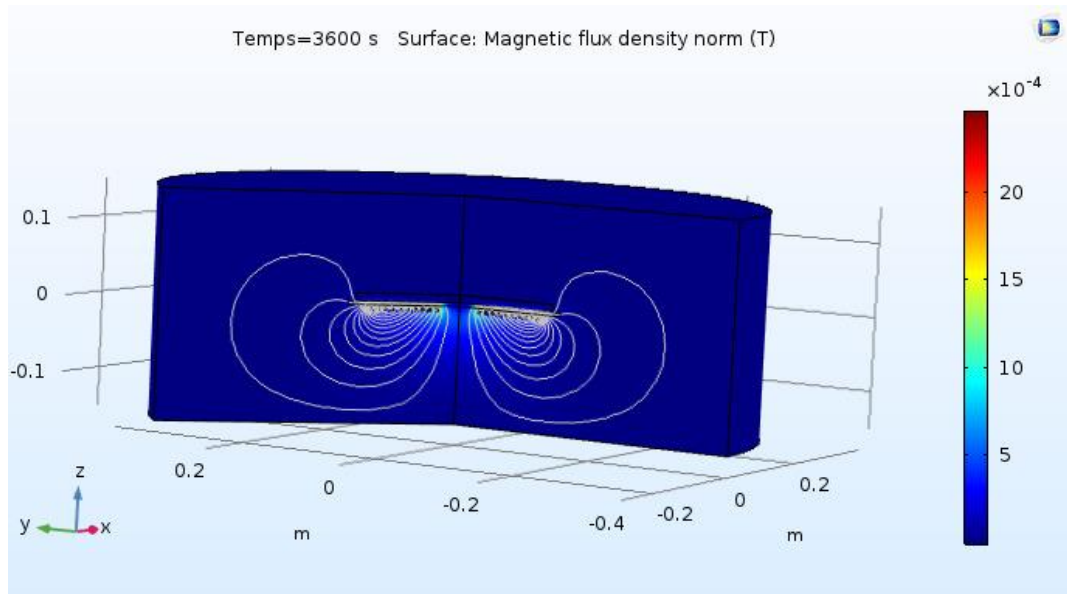
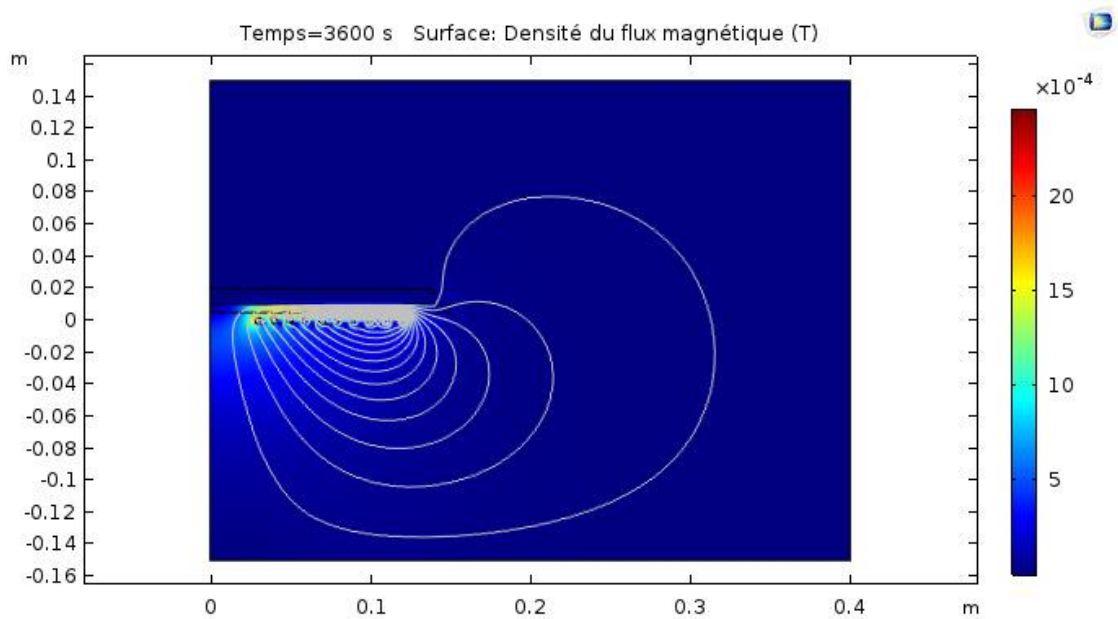


(b)

Figure III.4 Mise en evidence du maillage de la géometrie

### III.4- Calcul des grandeurs électromagnétique sans ferrite

On alimente l'inducteurs avec un courant  $I_{exc}=16A$  de fréquence  $f=28KHz$  et on visualise la densité du flux magnétique généré par l'inducteur comme le montre les figures (III.5) et (III.6).



Des résultats obtenus, on voit que les lignes de champs magnétiques  $\mathbf{B}$  exposées dans les figures (III.5) et (III.6) se propagent en dessous des inducteurs ; vue la structure de la table à induction, on peut dire que cette propagation peut

nuire à la carte électronique disposée en dessous des inducteurs, ce qui est un gros problème.

Pour y remédier, on propose de disposer en dessous des inducteurs des ferrites pour essayer de canaliser les lignes de champs, et ainsi protéger la carte électronique.

### III.5- Calcul des grandeurs électromagnétique avec ferrite

Cette nouvelle structure est identique à la celle décrite précédemment sauf que dans ce cas, on apporte un plus avec des ferrites disposée comme indiqué précédemment. Le tableau suivant montre les dimensions de la nouvelle géométrie.

Tableau III.2 Géométrie améliorée en 2D axisymétrique sur COMSOL 5.3a

<b>Elément</b>	<b>Matériau</b>	<b>Forme</b>	<b>Dimensions (m)</b>	
<b>Inducteurs</b>	Cuivre (Copper)	Cercles	<b>Rayon</b>	0.002
<b>Vitrocéramique</b>	Glass	Rectangle	<b>Hauteur</b>	0.01
			<b>Largeur</b>	0.15
<b>Charge</b>	Acier (IRON)		<b>Hauteur</b>	0.005
			<b>Largeur</b>	0.14
<b>Air</b>	Air		<b>Hauteur</b>	0.3
			<b>Largeur</b>	0.4
<b>Ferrites</b>	Alloy Powder Core Ferrite K Material		<b>Hauteur</b>	0.005
			<b>Largeur</b>	0.14

Après avoir fini de dessiner le modèle et d'avoir attribué a chaque géométrie son matériau correspondant, on obtient un modèle prêt à l'emploi comme le montre la figure (III.6).

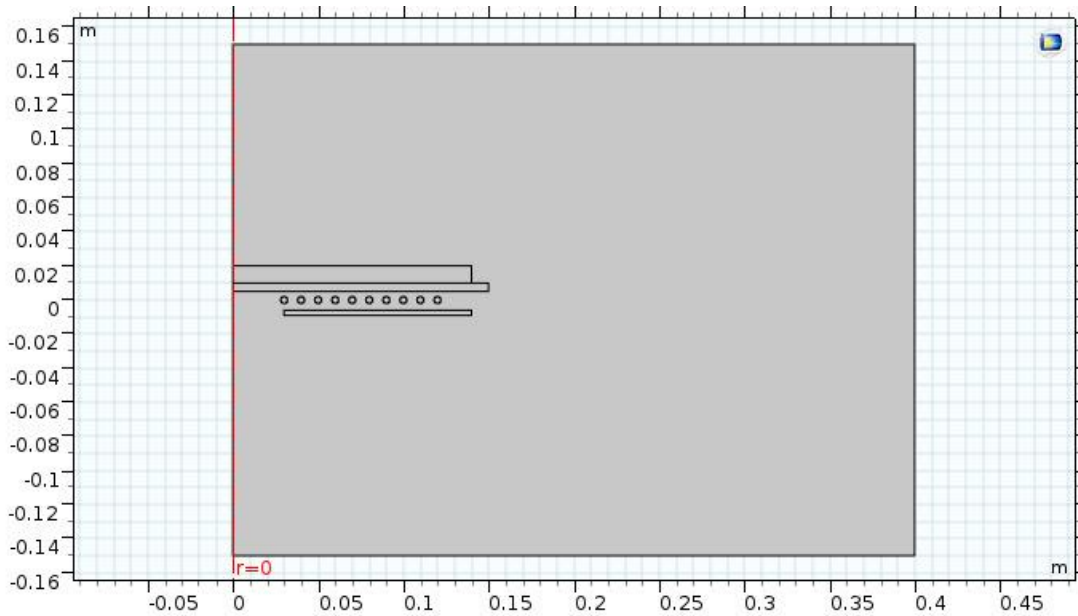


Figure III.7 Géométrie de base en 2D axisymétrique

On maintient les mêmes conditions précédentes et on obtient les résultats montrés sur les figures (III.8) et (III.9).

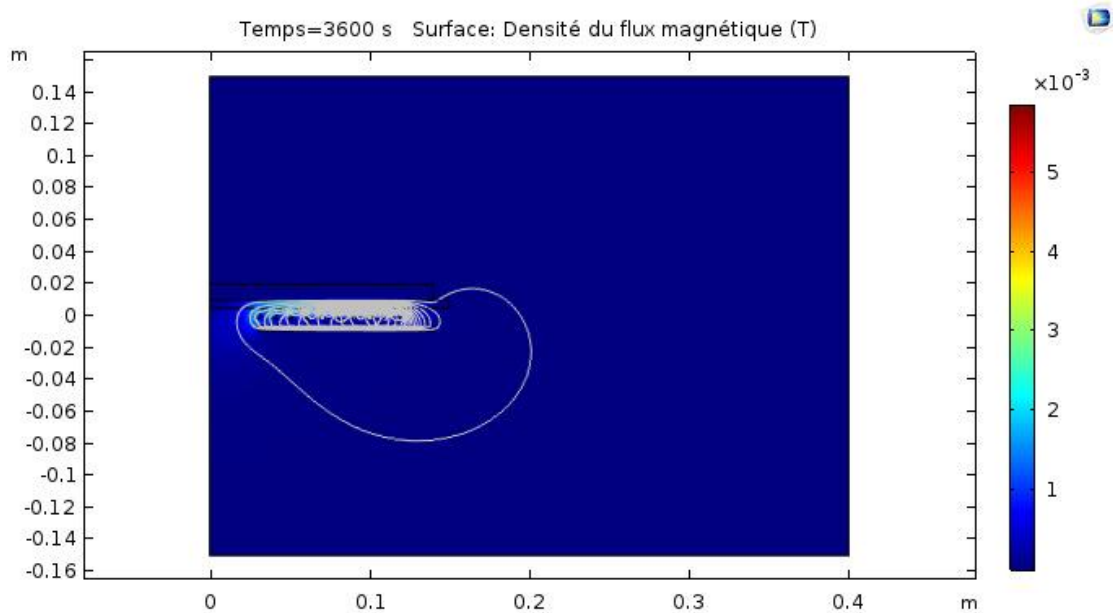


Figure III.8 Densité du flux magnétique après amélioration

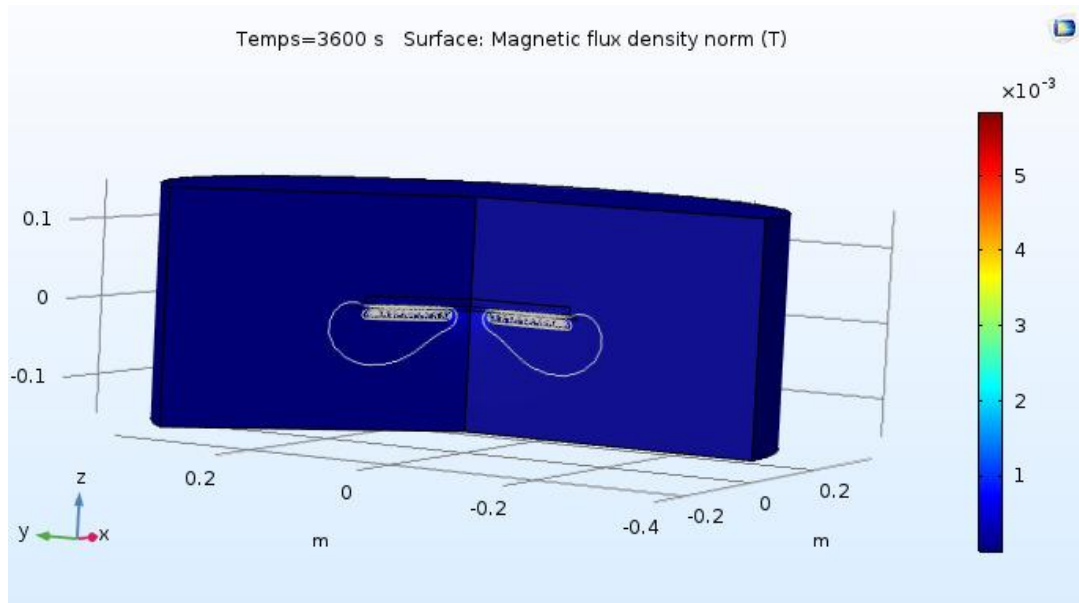


Figure III.9 Densité du flux magnétique en 3D après amélioration

En analysant les figures (III.5), (III.6) et les figures (III.8), (III.9), on voit clairement que l'ajout des ferrites en dessous des inducteurs a permis de canaliser les lignes de champs et ainsi protéger la carte électronique et d'augmenter la densité du flux magnétique vers la charge.

### III.6- Etude de l'effet de la fréquence

Dans cette étude, on veut montrer la densité du flux magnétique  $B$  et la densité des courants induits  $J$  en fonction de la fréquence d'alimentation. On se base sur trois valeurs de fréquences (50Hz, 5000Hz et 30000Hz).

En injectant un courant  $I=16A$  dans l'inducteur, et à chaque fois avec une valeur de fréquence, on obtient les résultats montrés dans les figures (III.10), (III.12) et (III.14) pour les densités du flux magnétique et dans les figures (III.11), (III.13) et (III.15) pour les densités de courants induits.

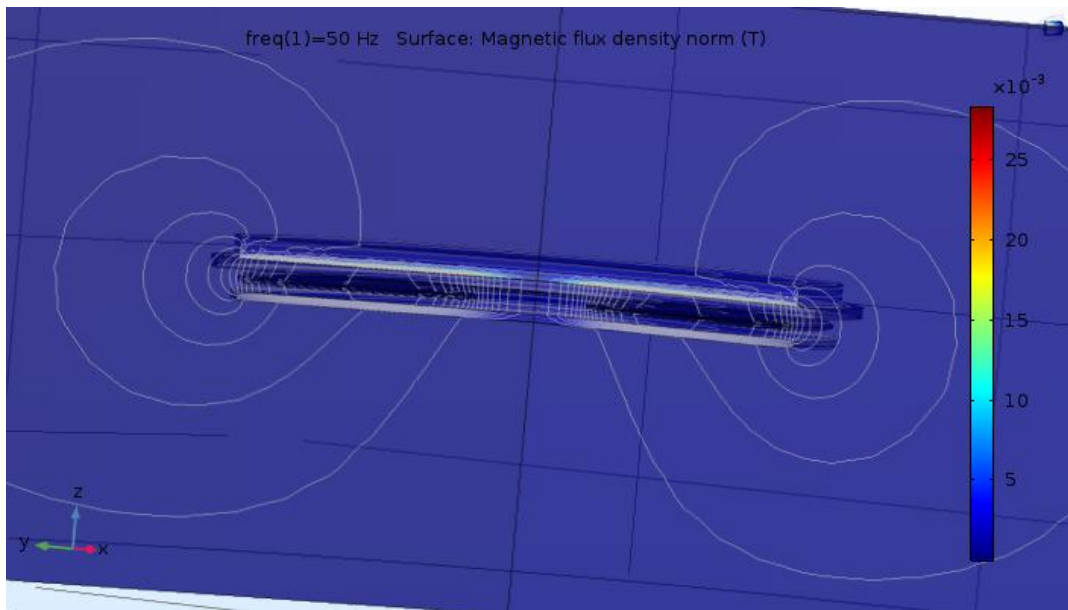


Figure III.10 Densité du flux magnétique à 50Hz

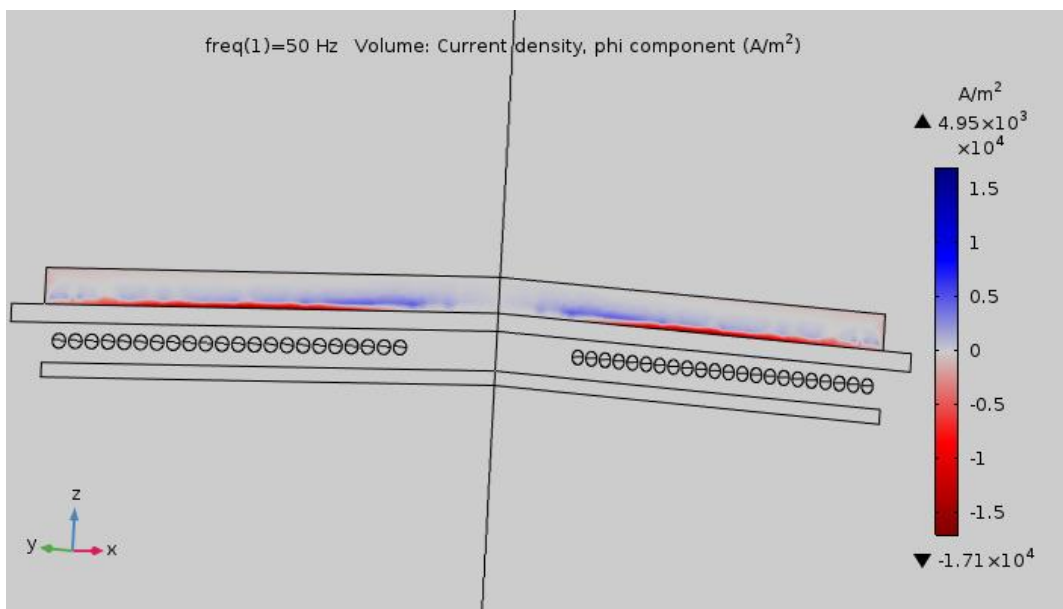


Figure III.11 Densité de courant à 50Hz

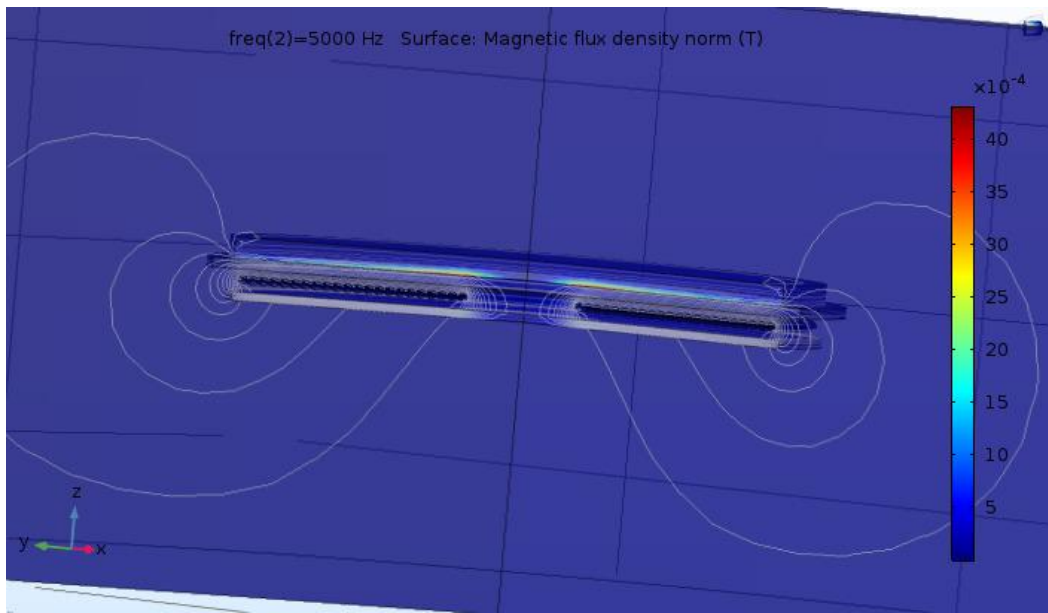


Figure III.12 Densité du flux magnétique à 5000Hz

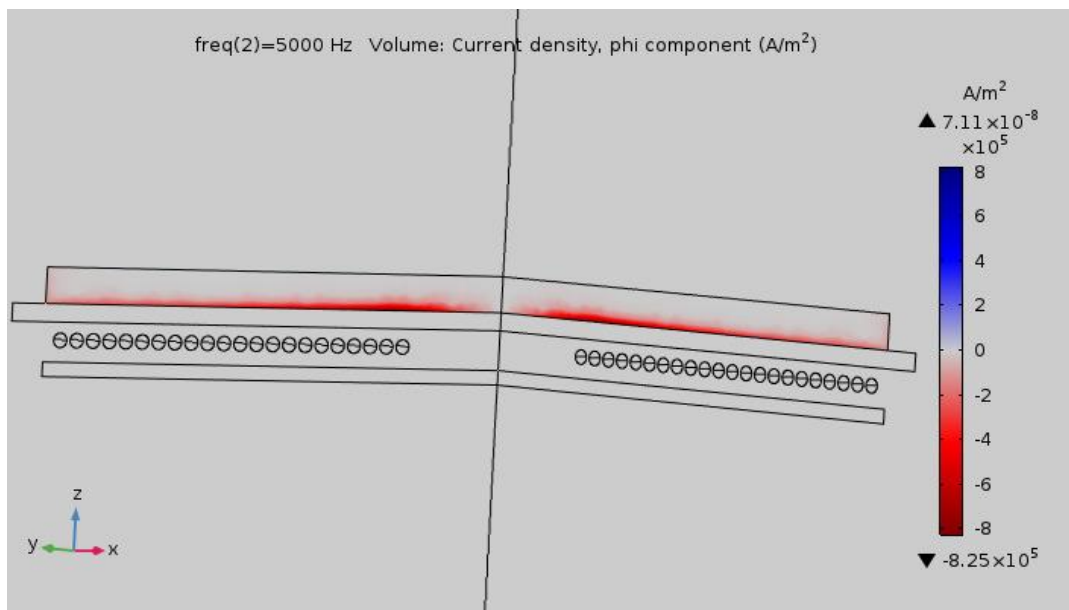


Figure III.13 Densité de courant à 5000Hz



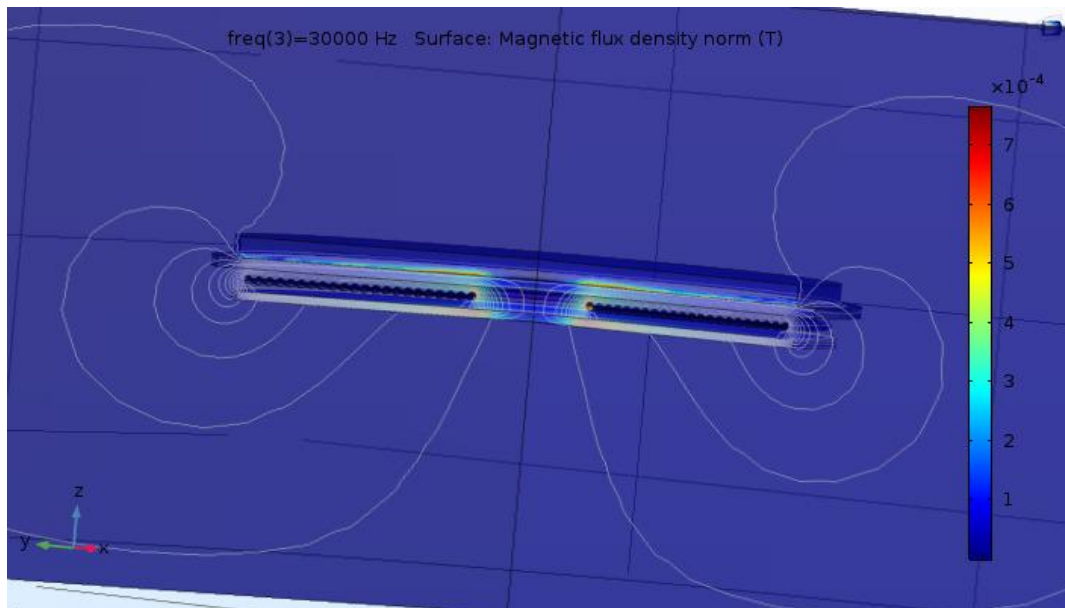


Figure III.14 Densité du flux magnétique à 30000Hz

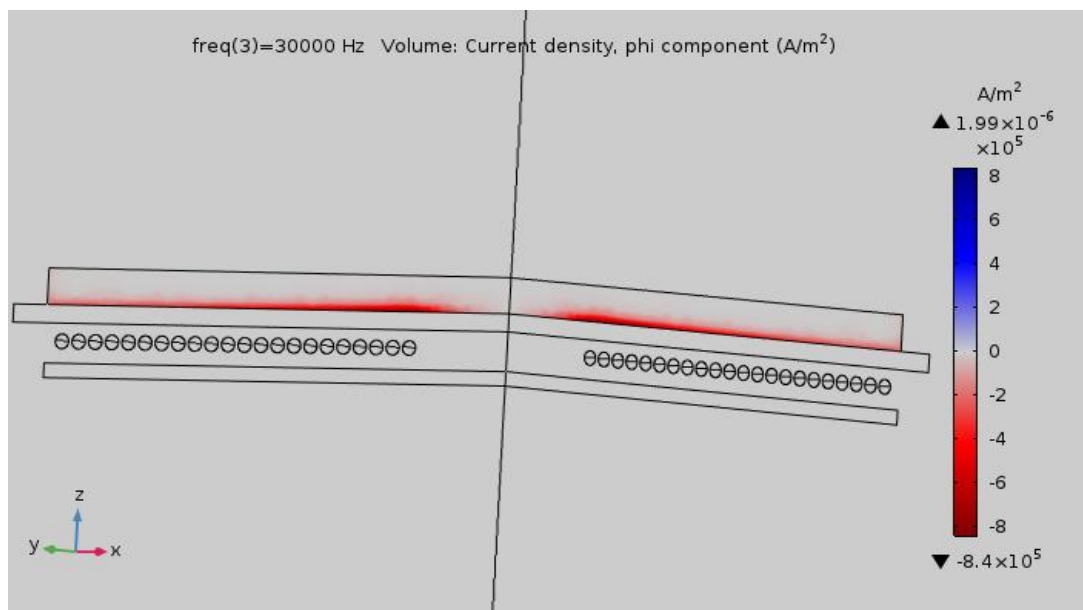


Figure III.15 Densité de courant à 30000Hz

Basé sur les résultats obtenus précédemment et illustrés par les figures ci-dessus, on voit que la densité des courants induits dans la charge augmente rapidement avec l'augmentation de la fréquence et se concentrent sur la surface inférieure de la plaque.

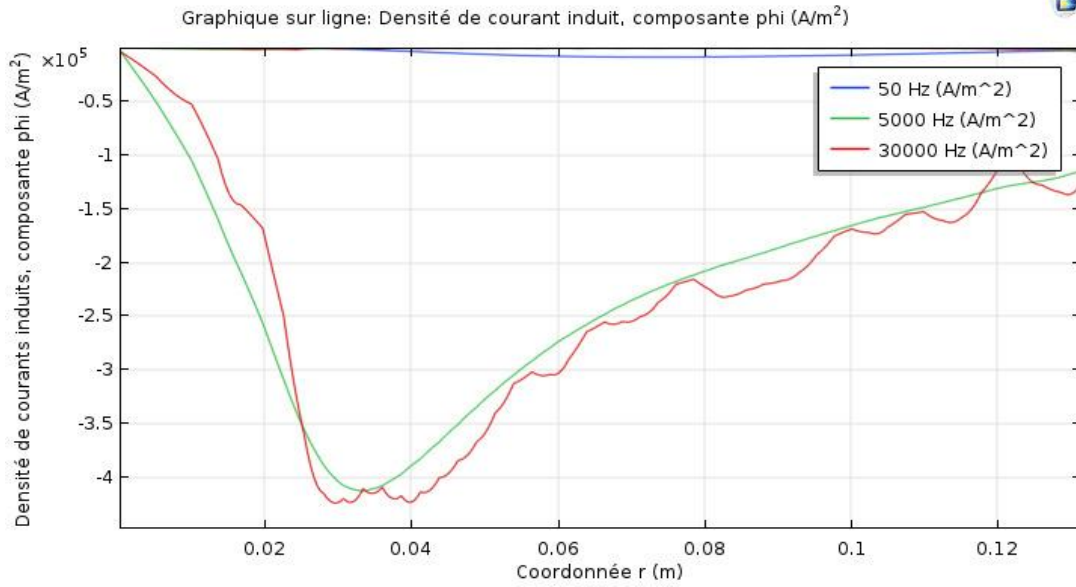


Figure III.16 Densité des courants induits en fonction du rayon pour différentes fréquences

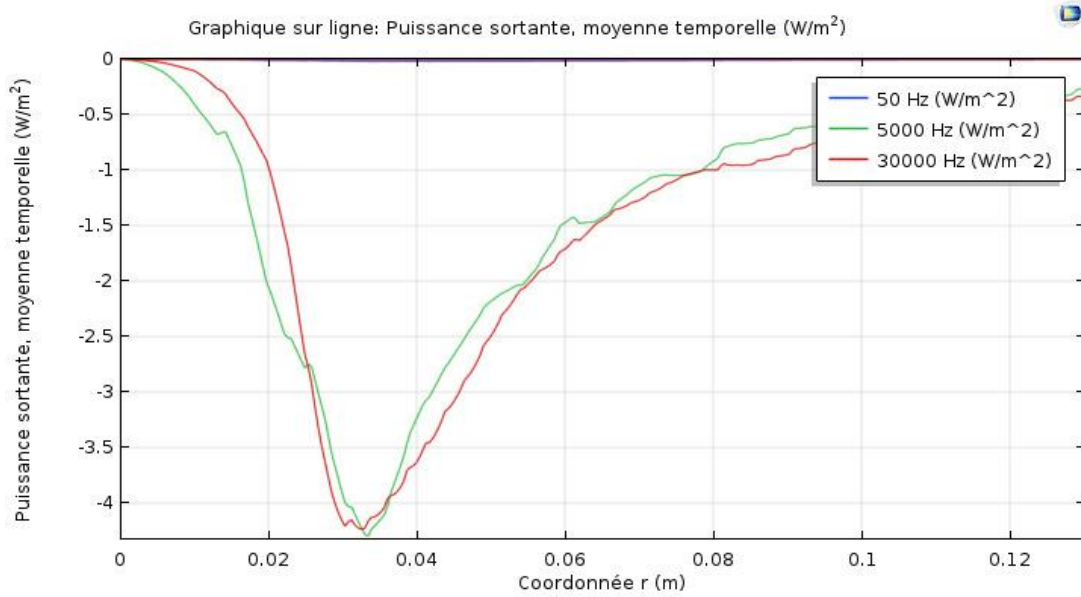


Figure III.17 Puissance en fonction du rayon pour différentes fréquences

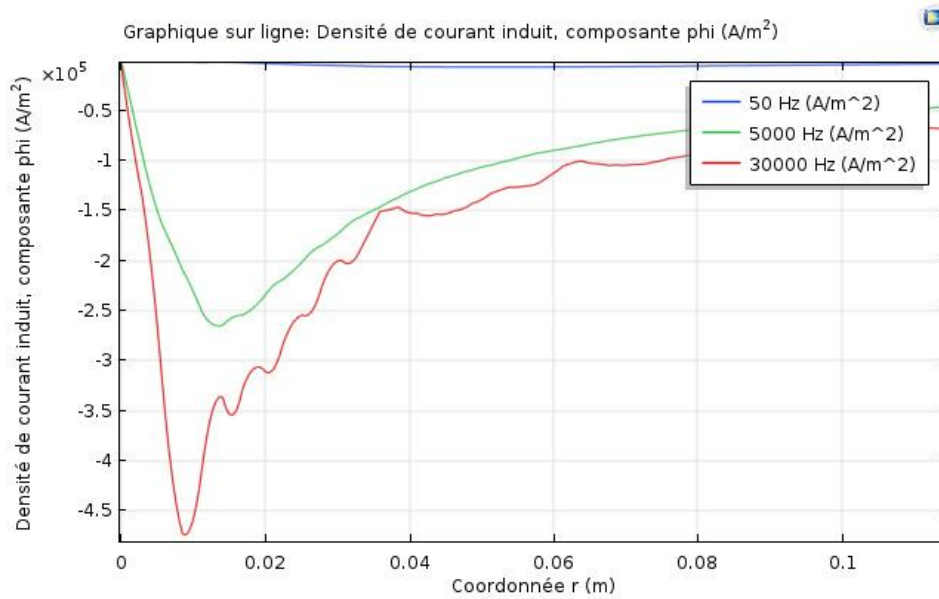


Figure III.18 Densité des courants induits en fonction du rayon pour différentes fréquences

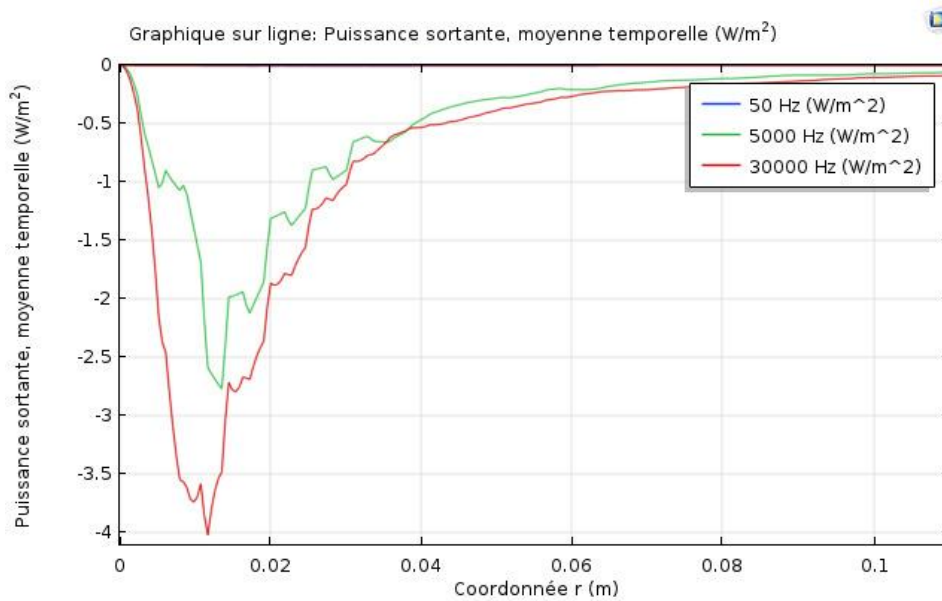


Figure III.19 Puissance en fonction du rayon pour différentes fréquences

Basé sur les résultats obtenus précédemment et illustrés ci-dessus, on voit clairement que la densité des courants induits ainsi que la puissance se concentrent près de l'axe de l'inducteur.

### III.7- Etude de l'effet de la perméabilité

Dans cette étude, on veut montrer la densité des courants induits  $J$  en fonction de la fréquence d'alimentation et de la perméabilité relative du matériau de la charge. On se base sur quatre valeurs de la perméabilité relative (1, 10, 100, 1000).

En injectant un courant  $I=16A$  dans l'inducteur, et à chaque fois avec une valeur de la perméabilité, on obtient les résultats décrits dans les figures suivantes :

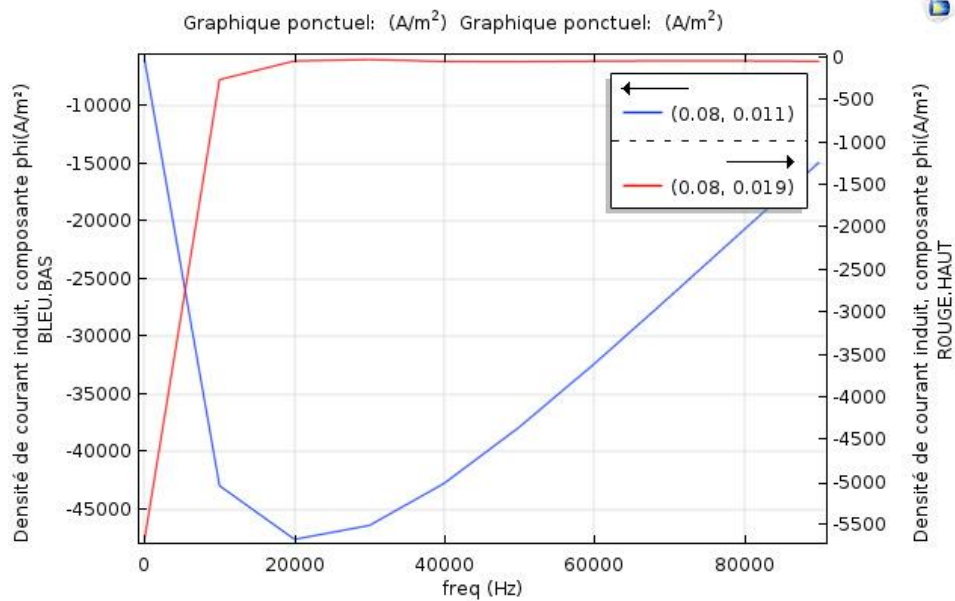


Figure III.20 Densité de courant en fonction de la fréquence avec  $\mu_r=1$

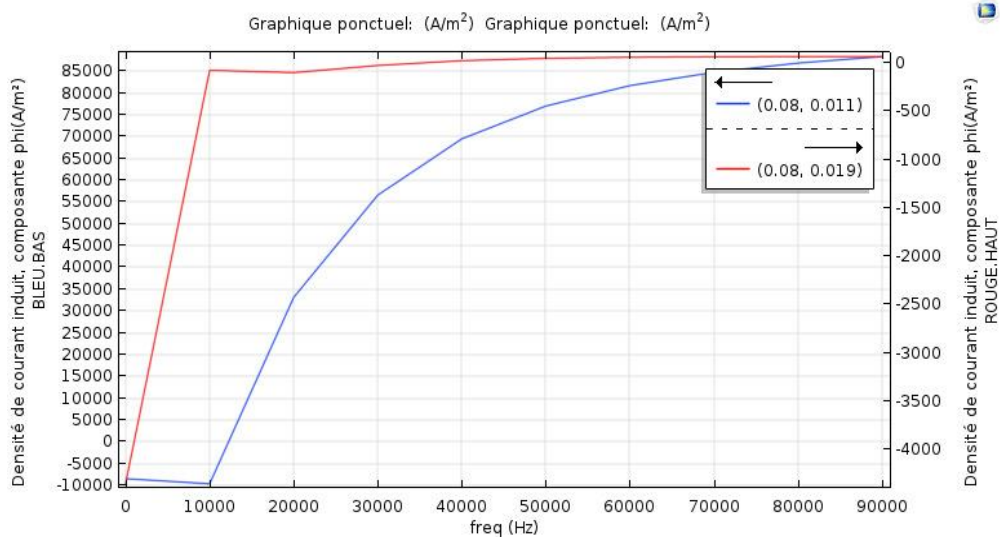


Figure III.21 Densité de courant en fonction de la fréquence avec  $\mu_r=10$

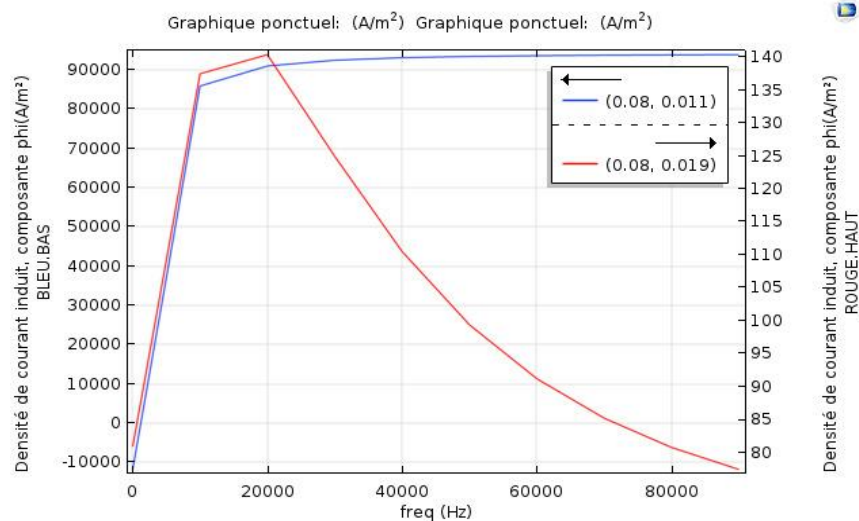


Figure III.22 Densité de courant en fonction de la fréquence avec  $\mu_r=100$

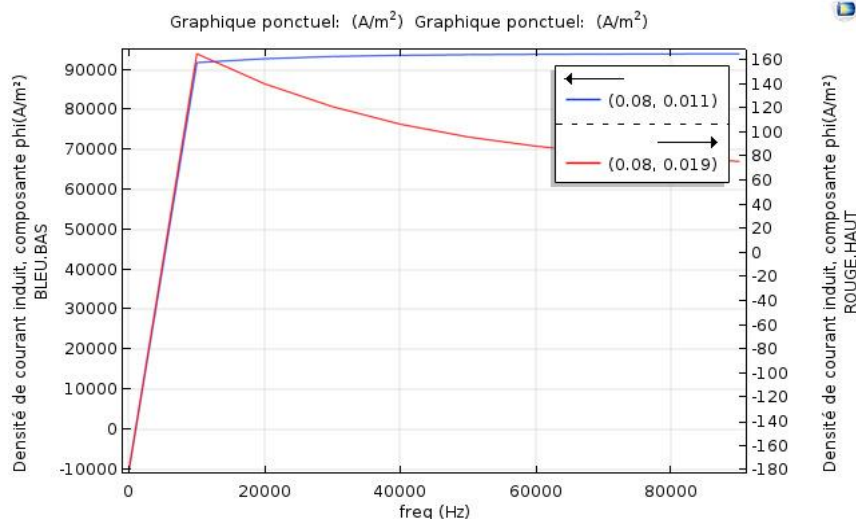


Figure III.23 Densité de courant en fonction de la fréquence avec  $\mu_r=1000$

Basé sur les résultats obtenus précédemment et illustrés sis dessus, on voit que la densité des courants induits augmente proportionnellement à la perméabilité du matériau de la charge et de la fréquence d'alimentation. C'est-à-dire que plus la perméabilité est grande, plus l'épaisseur de peau est petite avec l'augmentation de la fréquence d'alimentation.

On peut dire que la variation de l'épaisseur de peau est inversement proportionnelle à l'augmentation de la perméabilité  $\mu_r$  à une valeur de fréquence donnée.

Plus  $\mu_r$  est grand, plus l'épaisseur de peau diminue rapidement.

**Conclusion :**

On voit clairement que la fréquence et la perméabilité relative du matériau de la charge ont une influence directe sur l'évolution de l'épaisseur de peau de la charge.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à la modélisation électromagnétique d'un chauffage par induction.

Le chauffage par induction est une technique d'électrothermie qui ne cesse d'évoluer. En effet, de la géométrie aux grandeurs physiques qui la régissent, plusieurs paramètres définissent son fonctionnement.

Au cours de ce travail, nous avons présenté le principe de cette physique et sa modélisation électromagnétique. La simulation est réalisée sous COMSOL 5.3a pour mieux mettre en valeur ce phénomène.

D'après les résultats obtenus, on constate que la densité de puissance dans la plaque dépend de plusieurs paramètres électromagnétiques et géométriques ainsi que du milieu environnant (présence ou non d'une ferrite). Cette puissance est d'autant plus importante que la fréquence et la perméabilité sont élevées.

La présence d'une ferrite est d'un apport double. Il contribue à l'augmentation de la puissance tout en assurant une compatibilité électromagnétique adéquate entre les différents éléments du système de chauffage.

## REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jean CALLEBAUT, « Chauffage par induction », Laborelec, édition aout 2007.
- [2] Olivier PERROT, « Cours d'électrothermie », I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie, 2010-2011
- [3] INRS, « Champs électromagnétiques », institut national de recherche et de sécurité, ed 4211, juin2012
- [4] Cours LP203, Chapitre 6 – Induction magnétique, 2012-2013
- [5] Christian BISSIERES et Claude GIRAUD, « Cours d'électrothermie » BTS, ELECTROTECHNIQUE (Physique appliquée)
- [6] Jamila ESSADAoui, « Commande d'un onduleur de puissance destiné au chauffage par induction par la modulation de densité d'impulsions avec amélioration du facteur de puissance », UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2003
- [7] Hakim DJELOUAH, « Electromagnétisme Cours & Exercices », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, 2012-2013
- [8] HABI Meriem KHENGUAoui Bouchra, « simulation d'un électroaimant », Université Kasdi Merbah ouargla, 09/06/2015
- [9] Allix, Mathieu & Cormier, Laurent. (2013). Les vitrocéramiques. Techniques de l'Ingénieur. N4802.
- [10] A FAGOR GROUP COMPANY, « La table de cuisson à induction »
- [11] B. MAOUCHE, « Elaboration de modèles par les grandeurs électromagnétiques couplés: application à l'étude du contrôle non destructif par courants de Foucault », thèse Doctorat en Electrotechnique, université FERHAT ABBAS, Sétif, 2007.
- [12] B.MAOUCHE, « Etude et développement semi analytique de l'équation de diffusion électromagnétique avec terme du déplacement dans le cas des dispositifs axisymétrique excité en courant ou en tension ». Thèses de magistère en génie électrique, université A. Mira de Bejaia, 1996.
- [13] Noureddine BEN SEDIRA, « Contribution à l'étude du couplage électromagnétique-thermique dans une charge à symétrie axiale (Étude + Simulation), Thèses de magistère en génie électrique, Université de Batna, 2012-2013.
- [14] Valérie Labbé. Modélisation numérique du chauffage par induction : approche éléments finis et calcul parallèle. Mécanique [physics.med-ph]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2002. Français. NNT : 2002ENMP1085. tel-00443740
- [15] Mathieu GENDRON, «Modélisation électro-magnéto-thermique et optimisation des paramètres de chauffe d'un nouveau système de traitement thermique par induction robotisé », ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 15 janvier 2018