

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*

*Université Akli Mohand Oulhadj Bouira*

*Faculté des sciences et des sciences appliquées*

*Département Génie électrique*



N° d'ordre : ...../Master/2017.

Série : ...../GE/2017.

### ***Mémoire***

*Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master*

*En Electrotechnique*

***OPTION : Conversion et Gestion d'Energie***

### ***Thème***

***Modélisation et Etude du comportement électromagnétique d'une bobine à air, en basses et hautes fréquences***

*Présenté et réalisé par :*

*M<sup>elle</sup>. SLIMANI Dounyazad*

*M<sup>elle</sup>. AMMOUCHE Saida*

*Soutenu publiquement le 24/09/2017 devant le jury composé de :*

*Mme. YASSA Nasira*

*Présidente du jury*

*Mr. KIHAL Med Cherif*

*Examineur*

*Mr. BOUHADDA*

*Examineur*

*Mr. BENSAID Samir*

*Encadreur*

*Mr. SAFER Omar Adib*

*Co-encadreur*

*Année universitaire 2016/2017*

# *Remerciement*

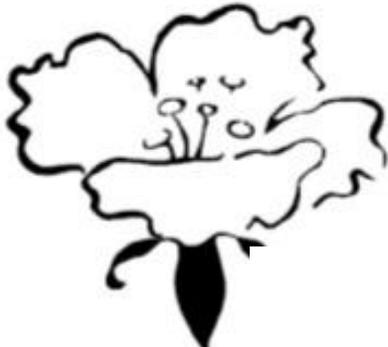
*A l'issue de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu le bon Dieu qui a donné la force et le courage de suivre nos études et d'arriver à ce stade et à nos parents qui nous ont beaucoup soutenus pendant tout au long de notre parcours avoir donné l'aide afin de réaliser ce modeste travail.*

*Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadreur Mr Bensaid Samir pour nous avoir confié ce sujet, pour leur disponibilité, leur critique, leur orientation, et leur précieux conseil.*

*Nos profonds remerciements vont également à Mr Safer Omer, Co- encadreur de projet, pour ses conseils appréciables, sa disponibilité, sa pédagogie, et ses critiques constructives.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Enfin nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



## *Dédicaces*

*Plus que tout, je voudrais dédier ce modeste  
travail à*

*Ma mère HADDA et à mon père AMAR pour  
leur encouragement, leur patience et leur  
amour ...ils sont l'origine de tout ce que j'ai  
accompli de bien.*

*A tous mes frères surtout ABDOU et à  
mapetite sœur.*

*A tous mes meilleures amies et collègues  
d'étude.*

*A tous ce qu'ils ont aimé me voir à ce jour là.*

*AMMOUCHE Saida*



## *Dédicaces*

*A mes chers parents, pour tous leurs  
sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur  
soutien et leurs prières tout au long de mes  
études,*

*A tous mes frères et sœurs,*

*A tous mes amis et collègues,*

*A tous les étudiants de la promotion  
2016/2017 Option : Génie électrique,*

*A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la  
force de continuer.....*

*SLIMANI Dounyazad*

## Résumé:

Les bobines à air trouvent leurs applications dans les différents dispositifs de l'électronique et l'électrotechnique. Le modèle de la bobine à air dépend étroitement de la fréquence de travail. L'objectif de ce projet est de mettre en place un modèle analytique qui décrit exactement, le comportement de la bobine pour les basses et hautes fréquences. Utiliser un modèle numérique associé à un cas réel (expérimental) pour valider les résultats. Etude de l'influence sur les paramètres du modèle de la bobine en présence de matériaux conducteurs ou magnétiques.

**Mots clé :** Modélisation analytique, bobine à air, modélisation numérique.

## Abstract:

The air coils find their applications in the various devices of the electronics and electrical engineering. The model of the air coil depends closely on the working frequency. The objective of this project is to put in place an analytical model that describes exactly the behavior of the bobbin for the bass and high frequencies. Use a numerical model associated with a real (experimental) case to validate the results. Study of the influence on the parameters of the coil model in the presence of conductive or magnetic materials.

**Keywords:** Analytical modeling, air coil, numerical modeling.

## المخلص:

الوشيعة الهوائية تجد تطبيقاتها في مختلف الأجهزة من الالكترونيات والهندسة الكهربائية. نموذج الو شيعة الهوائية يعتمد بشكل وثيق على تردد العمل. والهدف من هذا المشروع هو وضع نموذج تحليلي يصف بالضبط طريقة عمل هذه الو شيعة في الترددات الضئيلة و العالية. استخدام نموذج عدديا مرتبط بحالة حقيقية (تجريبية) للتحقق من صحة النتائج. دراسة التأثير على ضوابط نموذج الو شيعة في وجود مواد ناقلة أو مغناطيسية.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة التحليلية، الو شيعة الهوائية، النمذجة العددية.

## Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I: Etat de l'art sur les bobines à air</b>	
I.1.Introduction.....	3
1.2.Historique.....	3
1.3.Les formes des bobines.....	4
1.4.Utilisations.....	4
1.5.A quoi sert la bobine.....	8
1.6.Les types des bobines.....	8
1.6.1.Bobine simple (monocouche).....	8
1.6.2.Bobine multicouche.....	10
1.7.Principe de fonctionnement.....	10
I.8.Le phénomène d'induction (La loi de Lenz).....	10
I.9.Comportements des conducteurs.....	11
I.9.1.Effet de peau.....	11
I.9.2.Effet de proximité.....	14
I.9.2.1.Effet de proximité induit.....	15
I.9.2.2.Effet de proximité direct.....	15
I.9.2.3.Effet de proximité inverse.....	16
I.10.Conclusion.....	17
<b>Chapitre II: Etude d'un modèle analytique et numérique</b>	
II.1.Introduction.....	18
II.2.Model analytique.....	19
II.2.1.Le modèle plan.....	19
II.2.1.1.Bobinage continu ou discontinu.....	20
II.2.1.2.Bobinage en couches ou en galette.....	21
II.2.2.Le modèle pavé.....	21
II.2.3.Utilisation de l'article Massarini.....	22
II.3.Model numérique.....	25
II.3.1.Formulation en potentiel vecteur (couple A-V).....	27

## Table des matières

II.3.2.Relations de continuité Conditions aux interfaces .....	27
I.4.Une représentation équivalente d'une bobine .....	29
II.5.Fréquence de résonance .....	30
III.6.Calcul de l'impédance équivalente d'une capacité avec la méthode de circuit équivalent .....	31
III.6.1.Circuit équivalent d'une bobine quatre couches .....	31
I.7.Conclusion.....	34

## Chapitre III: Modélisation et Etude d'une bobine à air

III.1.Introduction .....	35
III.2.Conception et simulation de la bobine à air .....	35
III.2.1.Présentation du logiciel Flux 2D .....	35
III.2.2.Conception et simulation d'une bobine à air .....	36
III.2.2.1.Bobine à 4 couches :.....	36
III.3.En Application magnéto Harmonique 2D .....	38
III.4. Comportement des bobines solénoïdales à air à haute et à basse fréquence .....	38
III.4.1.Bobine à quatre couches .....	39
III.4.1.1.Sans Condensateur .....	39
III.4.1.2.Avec Condensateur .....	42
III.5.Distribution de la densité de courant :.....	45
III.6.Conclusion.....	47
Conclusion Générale .....	48

## Liste des Figures

### Chapitre I : Etat de l'art sur les bobines à air

<b>Figure I.1:</b> Bobine et son symbole. ....	3
<b>Figure I. 2 a.</b> bobine composées b. bobines simple. ....	4
<b>Figure I.3:</b> Les ballasts magnétiques. ....	5
<b>Figure I.4:</b> Chargeur de batterie sans fil. ....	6
<b>Figure I.5:</b> Principe du CND par courant de Foucault. ....	6
<b>Figure I.6:</b> Image d'une IRM. ....	7
<b>Figure I.7:</b> Chauffage par induction. ....	8
<b>Figure I.8:</b> Une bobine simple. ....	9
<b>Figure I.9:</b> Champ magnétique d'une bobine. ....	11
<b>Figure 1.10:</b> Exemple de l'effet de peau, densité du courant $J$ (A/m <sup>2</sup> ). ....	12
<b>Figure I.11:</b> La densité du courant en fonction de la fréquence. ....	13
<b>Figure I.12:</b> Conducteur de rayon $r$ considéré. ....	13
<b>Figure I.13:</b> Epaisseur de peau. ....	14
<b>Figure I.14:</b> Effet de proximité. ....	14
<b>Figure I.15:</b> Exemple de l'effet de proximité, densité du courant $J$ (A/m <sup>2</sup> ) ....	15
<b>Figure I.16:</b> Exemple de l'effet de proximité direct (Ducluzaux, 1977). ....	15
<b>Figure I.17:</b> Exemple de l'effet de proximité direct, densité du courant $J$ (A/m <sup>2</sup> ) ....	16
<b>Figure I.18:</b> Exemple de l'effet de proximité inverse, densité du courant $J$ (A/m <sup>2</sup> ). ....	16

### Chapitre II : Etude d'un modèle analytique et numérique

<b>Figure II.1:</b> Réseau de condensateur parasites pour une bobine monocouche ....	18
<b>Figure II.2:</b> Modèle plan utilisé pour l'étude analytique du couplage capacitif de deux couches de spires ....	20
<b>Figure. II.3:</b> Comparaison des deux modes de bobinage. Bobinage continu (a) et bobinage discontinu (b) ....	20
<b>Figure II.4:</b> Comparaison des deux orientations possibles pour le bobinage dans une fenêtre rectangulaire : en couches (a) ou en galettes (b). ....	21

## Liste des Figures

<b>Figure II.5:</b> Modèle pavé: les fils sont disposés suivant un maillage régulier dans la fenêtre de bobinage fréquence de résonance. ....	22
<b>Figure II.6:</b> Le circuit équivalent d'un inducteur auto-résonant. ....	22
<b>Figure II.7:</b> Chemin supposé $x(\theta)$ D'une ligne de champ électrique E à angle entre deux virages adjacents.....	23
<b>Figure II.8:</b> Surface cylindrique élémentaire située à l'intérieur du revêtement solant.....	24
<b>Figure II.9:</b> Circuits équivalents utilisés pour représenter une inductance.....	30
<b>Figure II.10 :</b> Évolution de la réactance et de la résistance en fonction de la fréquence.....	30
<b>Figure II.11 :</b> Le schéma simplifié de bobine à 4 couches.....	31
<b>Figure II.12 :</b> Transformation de l'étoile a triangle.....	32

## Chapitre III : Modélisation et Etude d'une bobine a l'air

<b>Figure III. 1:</b> Logos et interface du logiciel cédrat Flux 2D.....	35
<b>Figure III. 2:</b> Schéma des dimension de la bobine multicouches.....	37
<b>Figure III. 3:</b> La bobine sous flux 2d, structure maillée.....	38
<b>Figure III.4:</b> RLC Mètre.....	39
<b>Figure III.5:</b> Schéma électrique sans condensateur.....	39
<b>Figure II.6 :</b> Courbe d'évolution de la réactance partie imaginaire de l'impédance (Calculée/ Mesurée) son condensateur en fonction de la fréquence.....	40
<b>Figure II.7 :</b> Courbe d'évolution de la résistance partie imaginaire de l'impédance (Calculée/ Mesurée) son condensateur en fonction de la fréquence.....	41
<b>Figure III.8:</b> Circuit électrique d'une bobine à quatre couches avec condensateur.....	42
<b>Figure III.9:</b> Courbe d'évolution de la réactance partie imaginaire de l'impédance (Calculée/ Mesurée) avec condensateur en fonction de la fréquence.....	43
<b>Figure III.10:</b> Courbe d'évolution de la résistance partie réelle de l'impédance (Calculée/ Mesurée) avec condensateur en fonction de la fréquence. ....	44
<b>Figure III.11 :</b> Évolution de la Distribution de la densité de courant : effet pelliculaire et effet de proximité à $f=1kHz$ . ....	45
<b>Figure III.12 :</b> Évolution de la Distribution de la densité de courant : effet pelliculaire et effet de proximité à $f=100kHz$ .....	46

## Liste des Figures

<b>Figure III.13</b> : Évolution de la Distribution de la densité de courant : effet pelliculaire et effet de proximité à $f=600\text{kHz}$ .....	46
---	----

## Listes des tableaux

<b>Tableau III.1:</b> Paramètres géométrique d'une bobine à 4 couches.....	37
--	----

**Liste des symboles**

V Tension Electrique [V]

I Courant Electrique [A]

$f$  Fréquence [Hz]

$\vec{B}$  Induction Magnétique [T]

$\vec{H}$  Champ Magnétique [A/M]

$\vec{E}$  Champ Electrique [V/M]

$\vec{D}$  Induction Electrique [C/M<sup>2</sup>]

J Densité Du Courant [A/M<sup>2</sup>]

$\mu$  Perméabilité Magnétique [H/M]

$\mu_0$  Perméabilité Magnétique A Vide ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ ) [H/M]

$\mu_r$  Perméabilité Magnétique Relative

$\Phi$  Le flux magnétique

L l'inductance de la bobine [H]

$\rho$  Résistivité [ $\Omega \cdot M$ ],

$\sigma$  Conductivité Electrique [S/M]

# *Introduction générale*

## Introduction général

Le passage du courant dans un conducteur engendre un champ d'induction magnétique dans l'espace environnant. Ce phénomène se traduit par une accumulation locale d'énergie sous forme de lignes de flux magnétique [1][2]. Tout composant qui utilise ces propriétés est appelé inductance, nous pouvons dire également qu'une inductance est caractérisée par la propriété de créer un flux magnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. Le facteur de proportionnalité entre le flux créé et le courant électrique est appelé coefficient d'auto-induction, inductance, et est symbolisé par la lettre L et exprimé en Henry [H], [3][4].

La valeur de l'inductance propre dépend essentiellement des dimensions de la bobine, notamment par le nombre de spires N, la section A du corps de la bobine, la longueur du circuit magnétique l obtenu à l'intérieur de la bobine et enfin de la nature du matériau qui se trouve à l'intérieur de la bobine, La perméabilité relative exprime de combien de fois le matériau utilisé au centre de la bobine est meilleur "conducteur" des lignes de flux magnétique, plus la perméabilité est grande plus la bobine possède un grand pouvoir d'emmagasiner de l'énergie magnétique [5][3][6].

Depuis quelques années, en particulier en raison de l'accroissement des fréquences de travail des convertisseurs, la connaissance fine du comportement des composants bobinés est devenue une question de tout premier plan, [7].

En haute fréquence ces composants bobinés présentent des effets capacitifs inter spires non négligeables et doivent être pris en compte non seulement pour l'analyse des harmoniques qui en résultent, mais aussi pour la conception des blindages dans la norme de la compatibilité électromagnétique et pour l'étude du vieillissement des matériaux diélectriques [5][8][9].

L'objectif de ce projet est de déterminer les propriétés électromagnétiques est de montrer comment étudier le comportement magnétodynamique d'une bobine dans le cadre d'une formulation éléments finis.

Les résultats, appliqués au calcul de capacités parasites seront comparés aux méthodes d'analyses traditionnelles.

Notre mémoire est constitué de quatre chapitres :

## Introduction général

Dans le premier chapitre, on se basera sur les généralités sur les bobines à air.

Nous rappellerons, ses propriétés et ses différentes formes, ses principes et ses domaines d'utilisation, sa constitution générale.

Nous terminons par le comportement des conducteurs à haute et à basse fréquence (l'effet de peau et de proximité)

Dans le deuxième chapitre, on exposera le principe de fonctionnement d'une bobine basé sur les phénomènes d'électromagnétisme (magnéto dynamique) avec les différentes méthodes (analytiques et numériques), aussi calculé l'impédance d'une capacité ont utilisant le circuit équivalent.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude et la simulation de notre système qu'est une bobine à quatre couches avec et sans condensateur à basse et à haute fréquence, qui sera effectuée sous le logiciel Cédrat Flux 2D.

Nous terminons ce chapitre par la comparaison entre les résultats de mesure (analytique) est simulé (numérique) pour les deux cas, (sans est avec condensateurs)

On terminera ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

***Chapitre I***  
***Etat de l'art sur les***  
***bobines à air***

## I.1.Introduction :

Classiquement, une inductance (appelée également bobine, self ou solénoïde) est un composant courant que l'on rencontre en électrotechnique et en électronique de puissance. Il s'agit d'un dipôle formé d'une ou plusieurs spires de fil conducteur. Le fil de la bobine peut être enroulé sur un noyau magnétique ou sur un support non magnétique (bobine à air). [10][11]

Le noyau magnétique peut former un circuit magnétique fermé ou ouvert suivant l'utilisation [12]. Ce noyau ou matériau magnétique, permet de canaliser les lignes de champ ce qui permet d'augmenter la valeur de l'inductance  $L$  [13][14], qui désigne normalement une caractéristique de la bobine. Le facteur de proportionnalité entre le flux  $\Phi$  créé et le courant électrique (notée  $L = \frac{\Phi}{I}$ ) est appelé coefficient d'auto-induction ou encore inductance. Il est symbolisé par la lettre  $L$  exprimé en Henry [H]. Le terme de bobine peut aussi désigner un dispositif destiné à produire des tensions élevées [15] [16] [17].

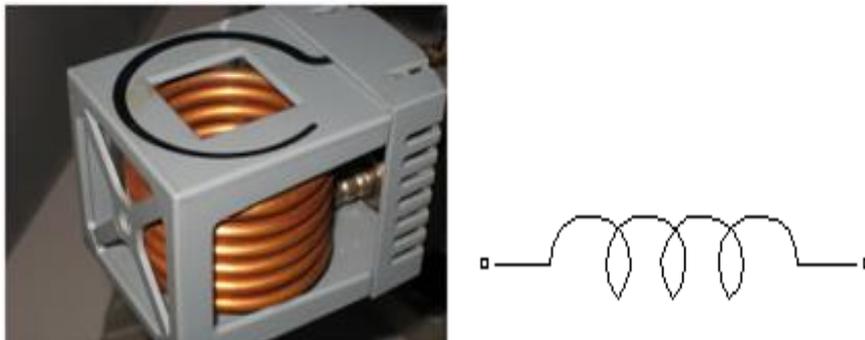


Figure I.1:Bobine est son symbole [10]

## 1.2. Historique

L'inductance est la propriété d'une bobine de fil à s'opposer à un changement du courant. Le phénomène de base à l'origine de l'inductance est le champ magnétique qui entoure tout conducteur traversé par un courant, [18]. Le composant électrique que l'on forme en enroulant un fil et qui possède une inductance s'appelle un inducteur ou une bobine.

Joseph Henry (1797/1878) débuta sa carrière comme professeur dans une petite école d'Albany dans l'état de New York, puis devint directeur à la smithsonian institution,[19] il fut le premier américain après franklin à entreprendre des expériences scientifiques

originales[20]. En 1830, il enveloppe un assemblage de bobines de fil autour d'un noyau ferreux et observe les effets de l'induction électromagnétique.[19]

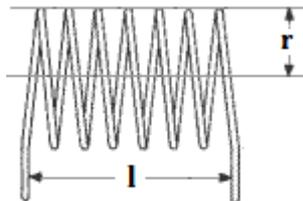
### 1.3. Les formes des bobines

Comme pour les autres composants, on en trouve de différentes tailles, de différentes formes. Voici quelques exemples :



**Figure I. 2:**a. bobine composées b. bobines simple[.]

Suivant la forme de la bobine, différents noms peuvent lui être donnés.



- Si la longueur  $l$  est petite devant son rayon  $r$ , la bobine est dite plate.
- Si  $l$  est voisin de  $r$ , la bobine est appelée solénoïde. [5]

### 1.4. Utilisations

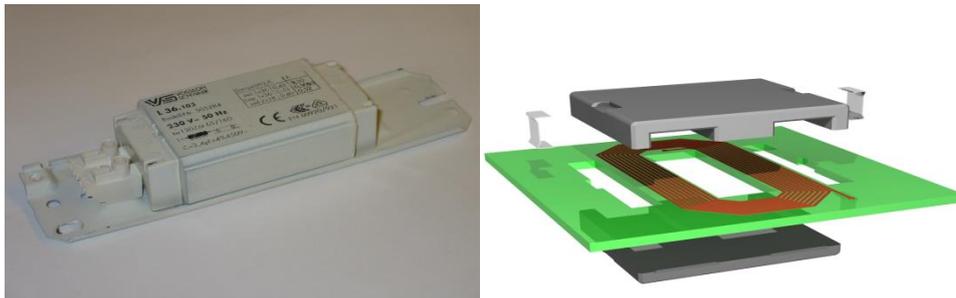
Une bobine peut être employée pour diverses fonctions :

- Assurer l'élimination des parasites d'une alimentation électrique ou d'un signal analogique, elle joue alors le rôle d'impédance [7];
- Raccourcir une antenne (la bobine joue le rôle d'amplificateur de signal) [7] ;
- Accorder en impédance un circuit [7];
- Créer un filtre pour une fréquence ou une bande de fréquences particulière [3] ;

- Lisser les courants continus (le bruit est éliminé) ou contrôler la croissance des courants dans les dispositifs d'électronique de puissance [6];

- Stocker de l'énergie électromagnétique (magnétique en l'occurrence) sous la forme  $w = \frac{1}{2} L \times i^2$  Il faut alors que sa résistance soit très faible [3]. En fait l'énergie est entièrement stockée dans le champ magnétique dans le noyau de la bobine [6]. En comparaison, l'énergie électromagnétique est purement stockée dans le champ électrique d'un condensateur, un autre type de composant de circuit. Des bobines en supraconducteur, appelées SMES (Superconducting Magnet Energy Storage) sont utilisées pour cette application [20].

- Les ballasts magnétiques et électroniques pour l'éclairage par lampes à décharges (lampes fluorescentes, lampes aux halogénures métalliques, etc.) utilisent des bobines. Dans ces circonstances, la bobine sert à générer un courant de haut voltage en pic: la tension n'est pas alternative mais elle est variable et n'est non nulle qu'un très court instant par rapport au moment où la tension est nulle, [21].



**Figure I.3:** Les ballasts magnétiques.[21]

- Chargeur de batterie sans fil: Des développements plus récents montrent que, si l'on place l'un à côté de l'autre (c'est-à-dire dans le champ proche) deux circuits résonants (bobines) dimensionnés pour un minimum de pertes et d'absorption (valeur Q Important) et résonant à la même fréquence, la transmission de l'énergie entre l'émetteur et le récepteur est extrêmement efficace du fait d'un couplage d'ondes évanescentes [22].

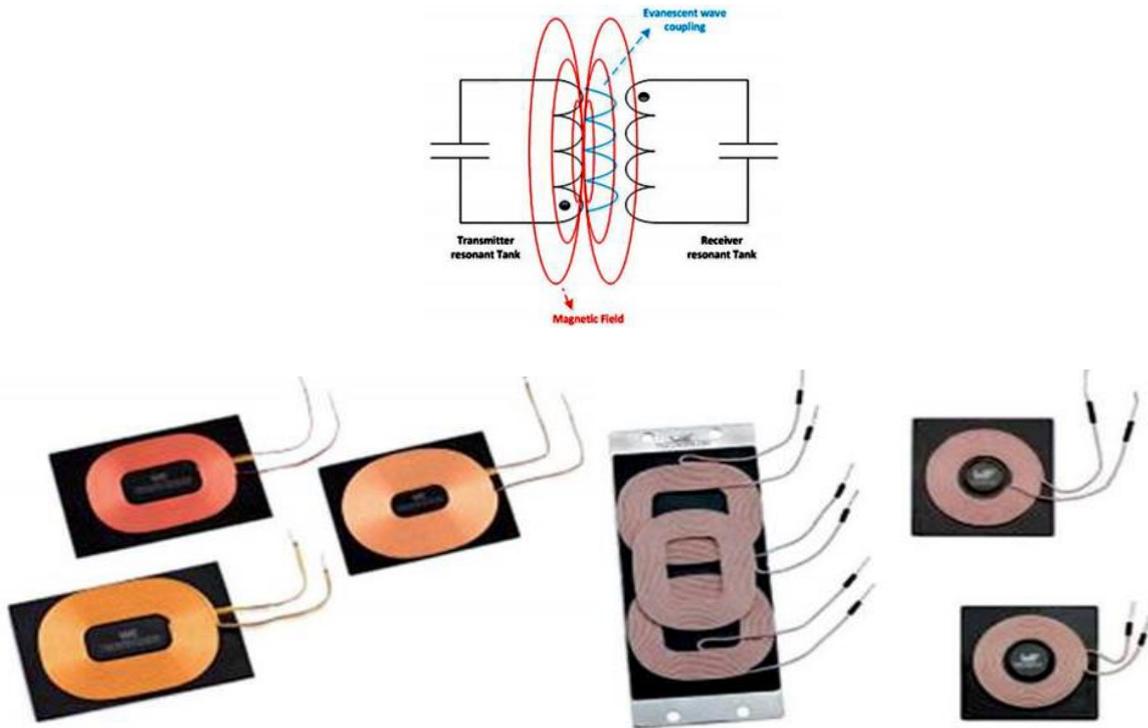


Figure I.4: Chargeur de batterie sans fil[22].

- L'évaluation non destructive par les courants de Foucault: Pour appliquer la technique de CND (Contrôle Non Destructif) par courants de Foucault, une bobine (appelée émetteur ou exciteur) parcourue par un courant alternatif est placée au voisinage de la pièce conductrice testée. Des courants de Foucault se développent dans la pièce en formant des boucles. Ces courants ont la même fréquence que le courant émetteur et génèrent, [23][24].

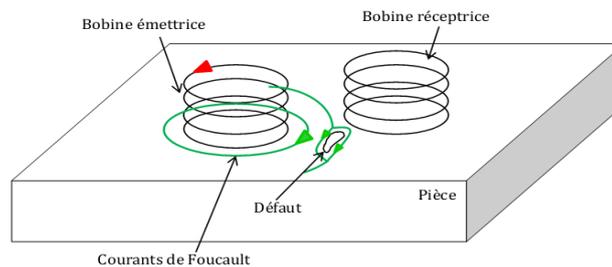


Figure I. 5: Principe du CND par courant de Foucault[23].

- IRM (Imagerie par résonance magnétique): Les trois principales parties physiques d'une machine à imagerie magnétique sont l'aimant principal, un gradient et un résonateur RF. Beaucoup de composants supplémentaires comme les amplificateurs, les mélangeurs, la fréquence des générateurs et un ordinateur d'acquisition sont requis pour l'acquisition du

signal et le traitement de l'image. Des bobines RF séparées pourraient être utilisées comme émetteurs RF (produisant du signal RF) et des bobines réceptrices (détecter le signal de résonance magnétique MR). Parfois, une bobine RF peut à la fois transmettre RF et recevoir le signal MR et est souvent appelé un émetteur-récepteur. L'aimant principal est essentiel dans la conception de la machine d'imagerie par infrarouge, car il est la source pour créer le champ. Afin de créer un champ magnétique statique suffisamment solide, un grand courant est porté par un fil supraconducteur [2].



Bobine de tête de transmission-réception de IRMIRM

**Figure I.6:**Image d'une IRM [2].

- Le chauffage par induction magnétique est l'un des principaux procédés de chauffer la matière utilisé dans les nombreuses branches de l'industrie, concernant les applications suivantes: les traitements de surface (brasage ou soudage), et le chauffage à cœur (cisaillement). La méthode utilise la résolution analytique des équations couplées de la densité de courant avec celle de température pour ces deux types de matériaux avec des caractéristiques de l'inducteur (fréquence, tension, et courant de l'alimentation ) et de la géométrie de la charge à chauffer imposées.[25]

Un système de chauffage par induction consiste en une alimentation en induction pour convertir l'alimentation en ligne en courant alternatif et en le livrant à une tête de travail, et une bobine de travail pour générer un champ électromagnétique à l'intérieur de la bobine. La pièce de travail est positionnée dans la bobine de sorte que ce champ induit un courant dans la pièce, ce qui produit à son tour une chaleur [25].

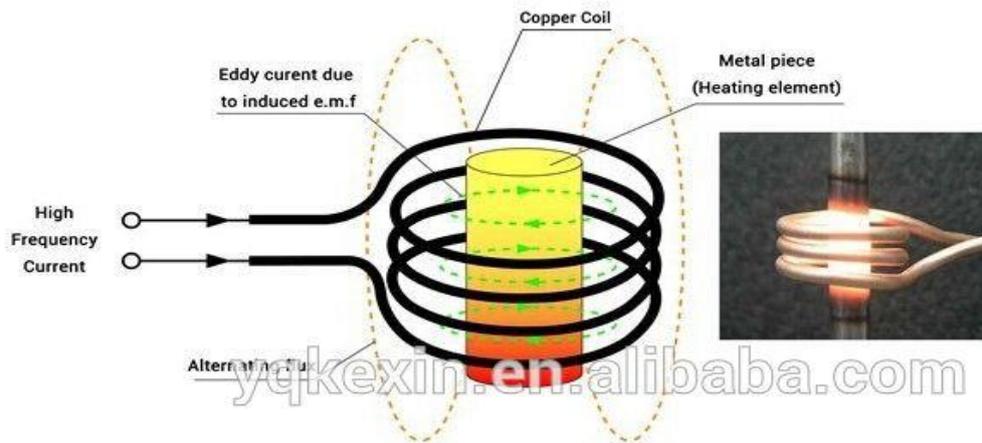


Figure I.7: Chauffage par induction [25].

### 1.5. A quoi sert la bobine

La bobine permet d'emmagasiner le courant électrique sous énergie électromagnétique. Contrairement au condensateur qui permet de lisser les tensions, la bobine (ou inductance) va lisser le courant dans le circuit de redressement, [7].

En entrée d'alimentation, elle sert de filtre. C'est souvent son utilisation. Elle sert aussi au système RLC pour créer des signaux. Dans une ampoule à économie d'énergie, elle va permettre de monter suffisamment vite en tension pour créer une décharge, dans un allumage de voiture, elle va déclencher de petites étincelle (faible intensité, forte tension).[7]

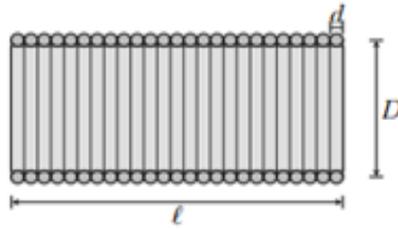
### 1.6. Les types des bobines

#### 1.6.1. Bobine simple (monocouche)

On forme une bobine simple en enroulant du fil de cuivre sur un cylindre de diamètre "D" et de longueur "L", le fil de cuivre a pour épaisseur "d" et est enroulé en formant "N" spires jointives. On cherche à exprimer la self-inductance "L" et la résistance interne "r" en fonction de N, D, d, et  $\gamma$  la conductivité du cuivre.

La tension aux bornes de la bobine est donné part :

$$U = L \frac{dI}{dt} \quad (I.1)$$



**Figure I.8:** Une bobine simple.

### ❖ Etude d'une bobine

Or si  $d$  est le diamètre du fil, sa section vaut  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ . De plus, il y a  $N$  spires enroulées qui ont pour longueur  $\pi D$  de sorte que  $c = N\pi D$ . Finalement la bobine possède une résistance interne qui augmente avec le nombre de spires  $r = \frac{4ND}{\gamma d^2}$  [23].

### ❖ La self inductance

Étudions maintenant la self inductance. On considère la bobine suffisamment longue pour pouvoir négliger les effets de bord de sorte que la bobine est assimilable à un solénoïde infini. Dans ce cas, lorsqu'elle est parcourue par un courant d'intensité  $I$ , elle produit un champ magnétique axial et uniforme dans la bobine [26].

$$B_{\infty} = \mu_0 n I \text{ Avec } \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (\text{I.2})$$

Où  $n$  désigne la densité d'enroulement en nombre de spires/mètre, Par ailleurs le flux du champ magnétique à travers une spire vaut.

$$\phi_1 = \frac{B_{\infty} \pi D^2}{4} \quad (\text{I.3})$$

Donc le flux embrassé par les  $N$  spires, il est proportionnel à l'intensité électrique.

Définition L'inductance  $L$  d'un circuit électrique est définie comme le rapport entre le flux magnétique embrassé par le circuit et l'intensité du courant :

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (\text{I.4})$$

On en déduit la valeur de l'auto-inductance de la bobine :

$$L = \mu_0 N^2 \frac{\pi D^2}{4 l} \quad (\text{I.5})$$

### 1.6.2. Bobine multicouche

Pour les mesures on utilise une bobine dont l'enroulement est répété plusieurs fois de façon à former plusieurs couches. Si l'épaisseur du fil est faible devant le diamètre de la bobine on peut considérer que toutes les spires ont le même diamètre de sorte que les formules précédentes restent approximativement valides. On a donc:

$$L = \mu_0 N^2 \frac{\pi D^2}{4 l} \quad \text{et} \quad r = \frac{4ND}{\gamma d^2} \quad (\text{I.6})$$

### 1.7. Principe de fonctionnement

Une bobine traversée par un courant est un aimant. Le relais se sert de cette propriété :

- lorsque aucun courant n'est appliqué à la bobine, la palette est libre, les connecteurs ne sont pas en contact et aucun courant, ni aucune puissance, n'y circulent : c'est un interrupteur ouvert [3].
- lorsqu'un courant est appliqué à la bobine, la palette est attirée vers la bobine, et pousse, par un jeu de levier le connecteur de gauche sur celui de droite. Il y a contact : c'est un interrupteur fermé [26].

### I.8. Le phénomène d'induction (La loi de Lenz)

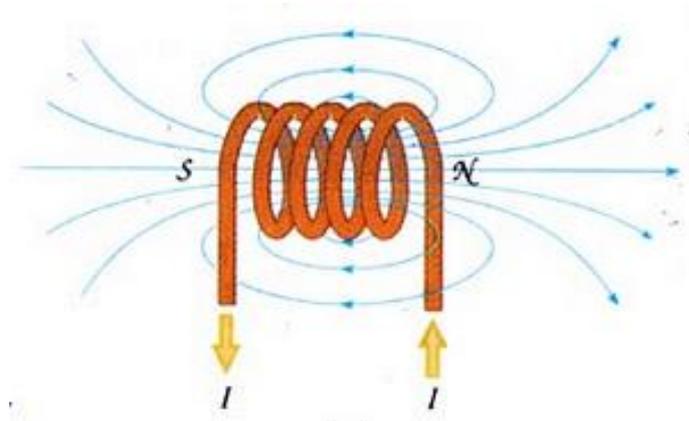
La loi de Lenz s'exprime simplement :

« Le phénomène d'induction électromagnétique est tel que par ses effets, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance. » [24]

Bien Loi de Lenz nous permet de déterminer rapidement l'orientation de la fém induite créée dans un circuit [25]

$$fem = \frac{-d\phi}{dt} \quad (\text{I.7})$$

On rappelle d'abord qu'une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant. Les lois de l'électromagnétisme (établies par Maxwell au passage) permettent de relier le sens du courant aux lignes de champ magnétique et donc de déterminer les pôles de l'aimant ainsi créé, [25].



**Figure I.9:** Champ magnétique d'une bobine.

Reprenons à présent notre circuit, et supposons-le fermé. La loi de Lenz nous dit que le courant induit, de par sa circulation dans le circuit s'opposerait à la cause qui lui donne naissance.

Ainsi, si l'on approche le pôle Nord de l'aimant de la bobine par la droite, le courant induit fait apparaître un pôle Nord dans la bobine à droite, pour repousser l'aimant (les pôles de même nature se repoussent). On peut alors en déduire, grâce au schéma précédent, le sens du courant induit et par suite celui du fém induit, dans le même sens que le courant puisque la bobine se comporte comme un générateur [3].

## **I.9. Comportements des conducteurs**

### **I.9.1. Effet de peau**

L'effet de peau ou l'effet pelliculaire est un phénomène électromagnétique, qui a tendance à localiser la densité de courant dans les couches périphériques du conducteur et cela de manière de plus en plus marquée au fur et à mesure que la fréquence augmente. Par conséquent, plus la fréquence augmente, plus la section « réelle » du conducteur est faible et la résistance du câble croît en fonction de la fréquence (Mugala, 2005; Weens, 2006).

Pour illustrer ces propos nous présentons sur la (Figure I.10) la distribution de la densité de courant dans un conducteur cylindrique (résultats de simulation numérique) [25].

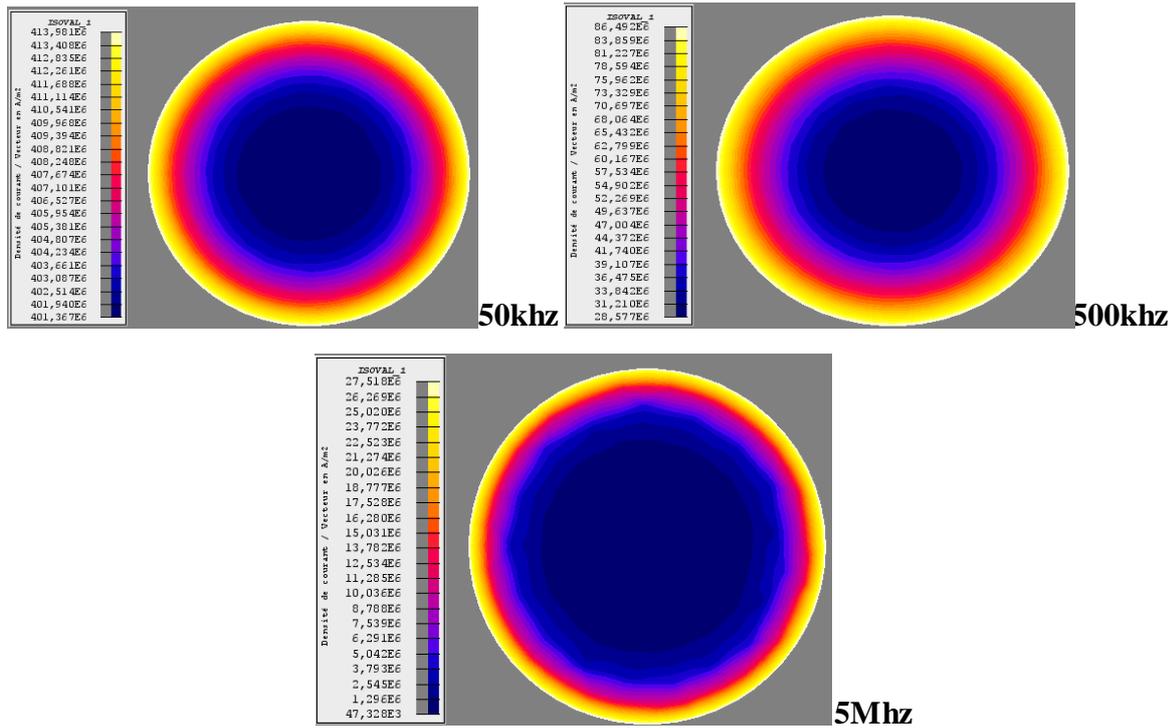


Figure I.10:Exemple de l'effet de peau, densité du courant J (A/m<sup>2</sup>).

On remarque que la distribution de la densité de courant décroît dans le conducteur de façon exponentielle suivant le rayon, qui peut s'exprimer par cette relation :

$$J = \frac{I}{S} \tag{I.8}$$

J : la densité du courant de la source

I : le courant de source

S : la surface parcouru par la densité du courant J tel que:

$$S = \pi (r^2 - (r - \delta)^2) \tag{I.9}$$

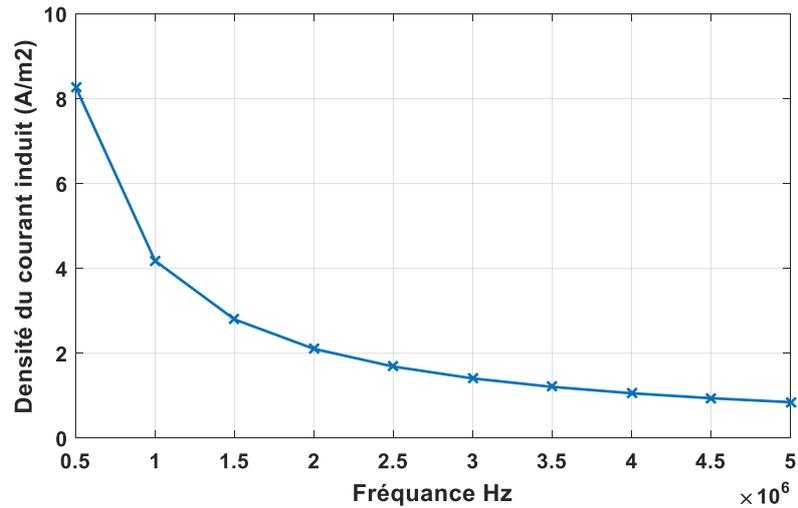
Avec:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \tag{I.10}$$

$\mu$ : la perméabilité,

$\sigma$ :la conductivité

f: la fréquence d'excitation du conducteur



**Figure I.11:**La densité du courant en fonction de la fréquence.



**Figure I.12:**Conducteur de rayon r considéré.

Nous trouvons que la densité de courant  $j$  devient très faible à l'intérieur du conducteur après une épaisseur de quelques  $\delta$ . Le développement mathématique appliqué  $\delta$  à un conducteur cylindrique est donné dans (Bel, 2000) l'épaisseur  $\delta$  de peau est donnée par :

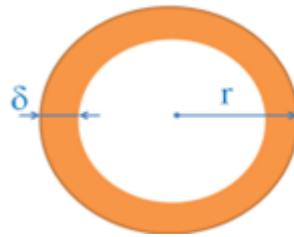
Avec:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (\text{I.11})$$

$\mu$ : La perméabilité,

$\sigma$ : La conductivité

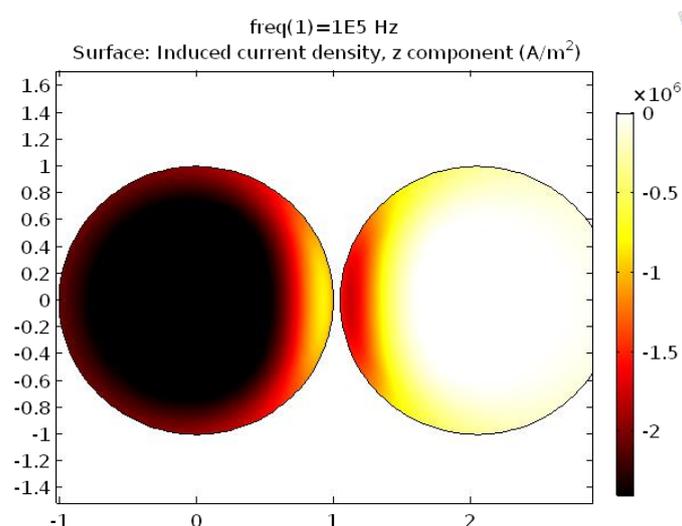
$f$ : La fréquence d'excitation du conducteur



**Figure I.13:**Epaisseur de peau.

### I.9.2.Effet de proximité

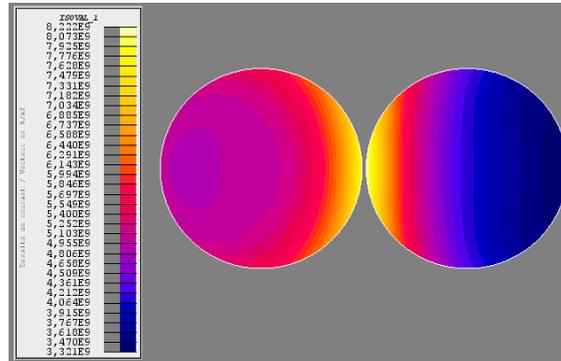
Lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant variable, il crée un champ magnétique variable dans lequel se trouvent plongés les conducteurs voisins. Les variations de champs engendrant un flux variable à travers les sections du conducteur qui induit des courants de Foucault dans les conducteurs voisins (Figure I.14). Ces courants induits augmentent avec la fréquence et la largeur des pistes ce qui engendre des pertes par effets Joule dans les conducteurs voisins. On traduit généralement cette augmentation des pertes par une augmentation de la résistance des conducteurs. L'effet de proximité est donc lié à l'apparition des courants de Foucault entre conducteurs voisins. Trois types d'effet de proximité peuvent être distingués: les effets de proximité induit, direct et inverse (Ducluzaux, 1977)[1].



**Figure I.14:**Effet de proximité

### I.9.2.1.Effet de proximité induit

C'est un phénomène de couplage mutuel qui apparaît lorsque des conducteurs situés à proximité et parcourus par un courant alternatif. Afin d'illustrer ce phénomène nous présentons sur la (Figure I.15) le résultat d'une simulation numérique qui met en évidence cet effet [1][25].

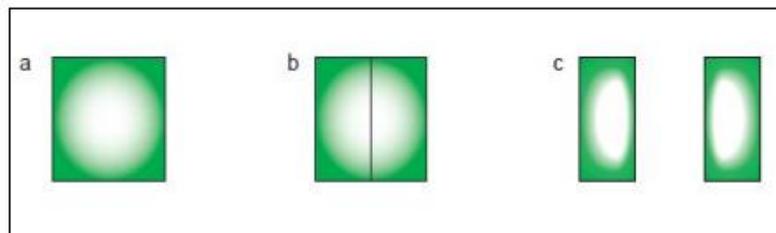


**Figure I.15:**Exemple de l'effet de proximité, densité du courant  $J$  (A/m<sup>2</sup>)

Sur cette figure, nous observons l'effet de peau dans le conducteur 1 (à gauche) où le courant est imposé. Dans l'autre conducteur 2 (à droite), il existe une densité du courant induite ayant une direction opposée dans la partie proche du conducteur 1 empêchant le champ créé par ce dernier de pénétrer. Le courant dans le conducteur 2 se referme alors dans sa partie droite.

### I.9.2.2.Effet de proximité direct

Ce cas concerne l'influence mutuelle de courants dans des conducteurs proches parcourus dans le même sens.

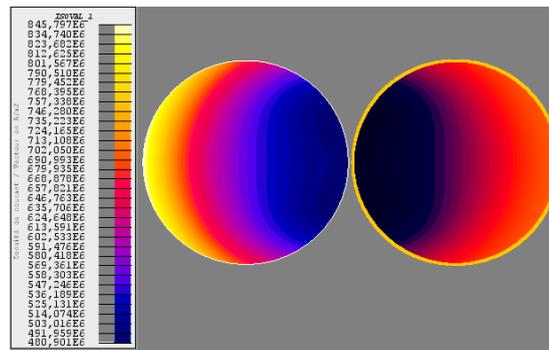


**Figure I.16:**Exemple de l'effet de proximité direct (Ducluzaux, 1977)

Dans la (Figure I.16), nous trouvons trois états d'un conducteur massif :

- a- l'état initial, la densité de courant se concentre sur la périphérie par effet de peau ;

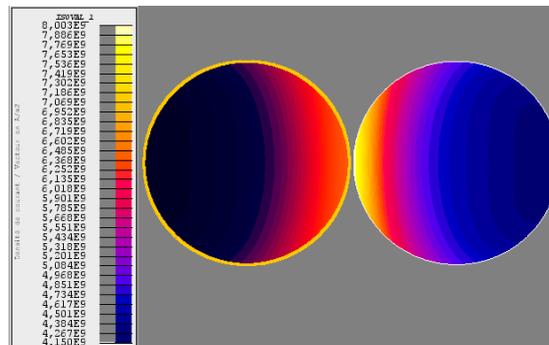
- b- le conducteur est coupé en deux par une fine zone isolante : la répartition du courant ne change pratiquement pas ;
- c- les deux parties de conducteur sont éloignées, la répartition du champ magnétique se modifie alors, la densité de courant se concentre alors aussi sur les faces opposées. Sur la (Figure I.17) nous avons repris le cas présenté précédemment en appliquant deux courants identiques dans le même sens dans les deux conducteurs [1].



**Figure I.17:**Exemple de l'effet de proximité direct, densité du courant  $J$  (A/m<sup>2</sup>)

### I.9.2.3.Effet de proximité inverse

Ce cas est proche du cas précédent mais les conducteurs sont parcourus par des courants en sens inverse.



**Figure I.18:**Exemple de l'effet de proximité inverse, densité du courant  $J$  (A/m<sup>2</sup>)

Un exemple de phénomène de proximité inverse est présenté sur la (Figure I.18). Dans ce cas, la densité de courant sur les faces en regard augmente contrairement au cas précédent où les conducteurs sont alimentés dans le même sens [1].

## **I.10.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait le point sur les bobines à air, nous avons exposé ses principes, ses propriétés et ses différentes formes et types. Nous avons répertorié un certain nombre d'applications industrielles et présenté le phénomène d'induction électromagnétique.

Nous avons constaté qu'un conducteur parcouru par un courant électrique induit un phénomène électromagnétique qui s'appelle effet de peau et dans le cas d'un plusieurs conducteurs on remarque un autre phénomène qui est l'effet de proximité. Ainsi que nous avons fait la simulation sous logiciel flux pour visualiser ces deux phénomènes.

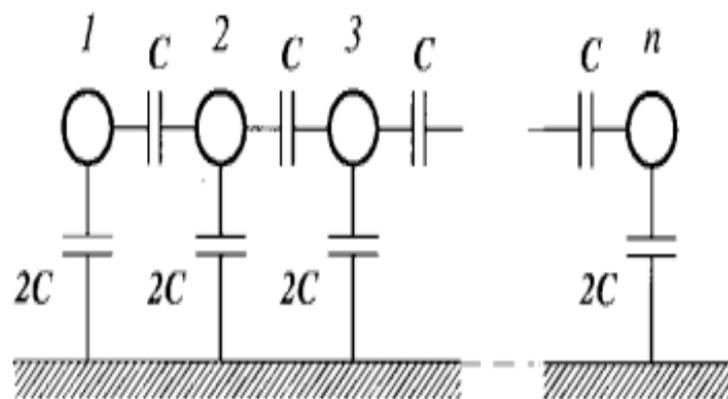
# *Chapitre II*

*Etude d'un modèle  
analytique et numérique*

## II.1.Introduction

Le principe de fonctionnement d'une bobine auto-résonante est basé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour la modélisation mathématique puis la simulation et faire des modifications pour la conception des sondes selon le domaine d'application (CND-CF, RF, scanner IRM). En premier lieu nous allons mettre l'équation qui régit notre système [25][2][23].

La fréquence de fonctionnement supérieure de chaque inductance est limitée par son auto-capacité. Aux hautes fréquences, la réponse des inductances et des transformateurs est très différente de leur réponse basse fréquence. Les effets de la peau et de la proximité provoquent une augmentation de la résistance parasite de l'enroulement avec la fréquence de fonctionnement, et la capacité parasite du bobinage ne peut pas être négligée non plus [1][25]. Par conséquent, une prédiction précise de la réponse des inductances qui fonctionnent aux fréquences ci-dessus plusieurs centaines de kilohertz, comme, par exemple, ceux utilisés dans les convertisseurs de puissance de commutation à haute fréquence, est crucial pour la conception de circuits de puissance à haute fréquence. Malheureusement, les capacités parasites et les résistances sont des paramètres répartis, et leurs valeurs dépendent de la fréquence de fonctionnement. Par conséquent, la prédiction théorique de la réponse en fréquence d'une inductance est un problème difficile, [3].



**Figure II.1:** Réseau de condensateur parasite pour une bobine [3]

Le comportement à haute fréquence des composants magnétiques est largement discuté dans la littérature, mais principalement les aspects liés aux résistances de bobinage parasite et aux pertes de noyau ont été abordés..

Ces publications offrent des connaissances physiques intéressantes, mais les résultats s'appuient sur certaines données expérimentales [5][8][9].

Le but de ce chapitre est de présenter une méthode qui est développée par Antonio massarin pour prédire la capacité parasite des inducteurs à une ou plusieurs couches et comparer les résultats théoriques et expérimentaux. La méthode proposée est basée sur une approche analytique. Il peut prédire la capacité parasite d'une inductance en fonction de quelques paramètres de la géométrie et du nombre de couches la deuxième méthode ça sera l'équation de la magnétodynamique en régime dynamique pour une formulation en potentiel vecteur magnétique A-V [1].

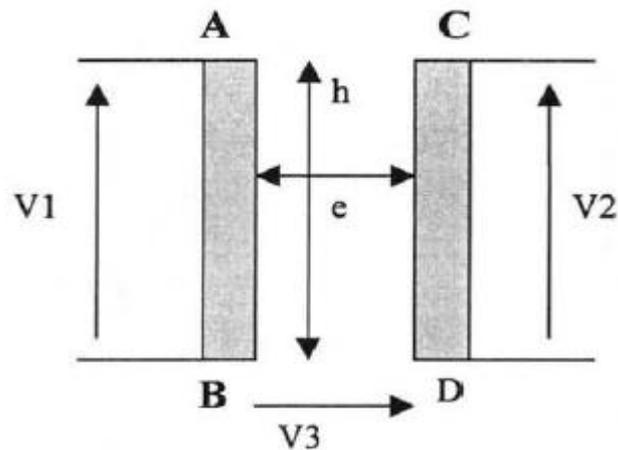
En suite la résolution de cette équation (qui est une équation différentielle aux dérivées partielles) se fait à l'aide des méthodes numériques en l'occurrence la méthode des éléments finis.

## **II.2. modèle analytique**

Dans notre exemple on à utiliser deux modèles analytiques simples qui permettre de tenir compte de la géométrie de la bobine.

### **II.2.1.Le modèle plan**

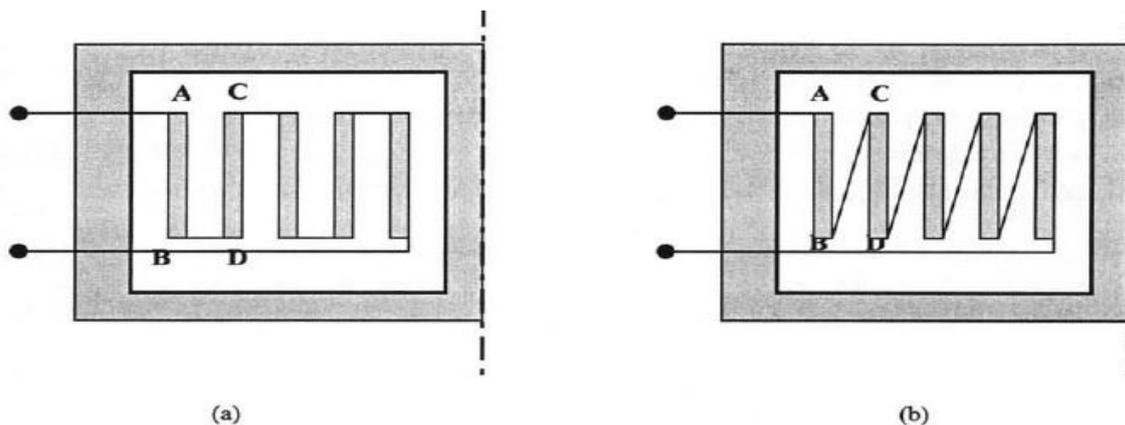
Dans le but d'évaluer l'énergie électrostatique stockée entre deux couches de spires, nous supposons, dans un premier temps, que les tensions aux bornes de toutes les spires d'une même couche sont identiques. Ainsi, le potentiel varie linéairement d'une extrémité à l'autre de cette couche. Cette observation est à la base d'un modèle simple (figure II.1), que nous appelons "modèle plan", et qui nous permet d'étudier le couplage électrostatique de deux couches de spires se faisant face [26].



**Figure II.2:** Modèle plan utilisé pour l'étude analytique du couplage capacitif de deux couches de spires [26]

### II.2.1.1. Bobinage continu ou discontinu

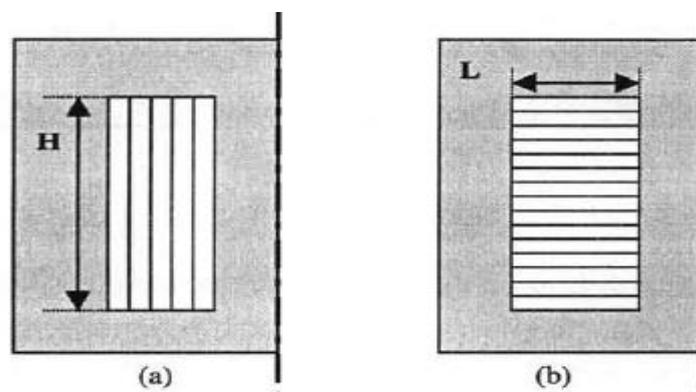
Un autre intérêt du modèle plan est l'étude de l'incidence du mode de bobinage sur la valeur de la capacité parallèle d'un enroulement. Il existe en effet deux façons de bobiner une inductance multicouche. Soit le fil est bobiné de façon "continue", c'est à dire qu'il va alternativement d'un côté de l'enroulement à l'autre lorsqu'on change de couche (figure II.3.a), soit il est bobiné de façon "discontinue", c'est à dire que toutes les couches sont bobinées dans la même direction, puis reliées l'une à l'autre par une connexion transversale (figure II.3.b)[26].



**Figure. II.3:** Comparaison des deux modes de bobinage. Bobinage continu (a) et bobinage discontinu (b)[26]

### II.2.1.2. Bobinage en couches ou en galette

En utilisant toujours le modèle plan, nous pouvons trouver une autre façon de diminuer la capacité parallèle d'un bobinage. Supposons que l'enroulement remplit une fenêtre rectangulaire de hauteur  $H$  supérieure à sa largeur  $L$ . Nous allons montrer qu'il est préférable de ranger les spires parallèlement au plus petit côté de la fenêtre (de dimension  $L$ ). Dans la fenêtre définie ci-dessous, les fils peuvent être bobinés soit en "couches" parallèles au grand côté (figure II.3.a), soit en "galettes" parallèles au petit côté (Figure II.4.b)[26].

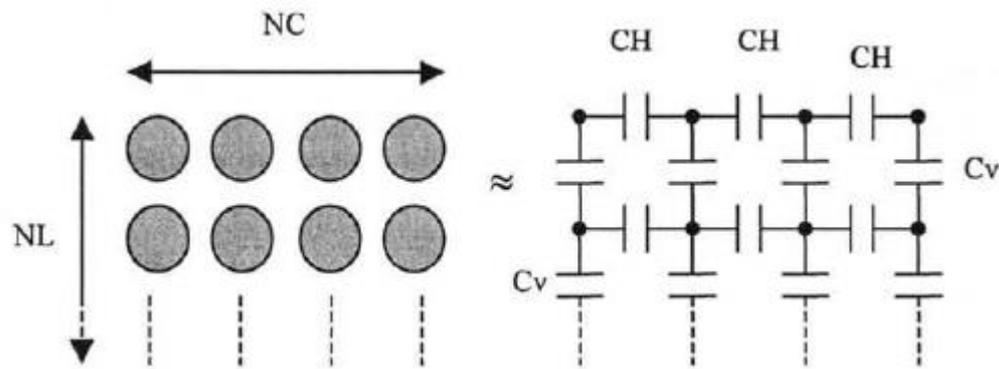


**Figure. II.4:** Comparaison des deux orientations possibles pour le bobinage dans une fenêtre rectangulaire : en couches (a) ou en galettes (b) [26].

**N.B :** dans notre travail on a fait le bobinage discontinu en couche

### II.2.2. Le modèle pavé

Alors que le modèle plan fait appel à une représentation simplifiée des couches de spires, le modèle pavé s'appuie, lui, sur une description géométrique un peu plus fine : il tient compte, de façon approximative, de la forme des conducteurs. Ceux-ci sont supposés répartis de façon régulière (figure II.4) dans la fenêtre de bobinage. L'énergie électrostatique totale est évaluée en additionnant les énergies stockées entre conducteurs, se faisant face uniquement. Cela implique que les capacités entre conducteurs non face à face soient négligées et que celles existantes entre les conducteurs du pourtour de la fenêtre et des matériaux extérieurs soient supposées nulles. Il suffit donc de définir deux capacités uniquement :  $C_H$  la capacité horizontale entre deux fils, et  $C_V$ , la capacité verticale [26].

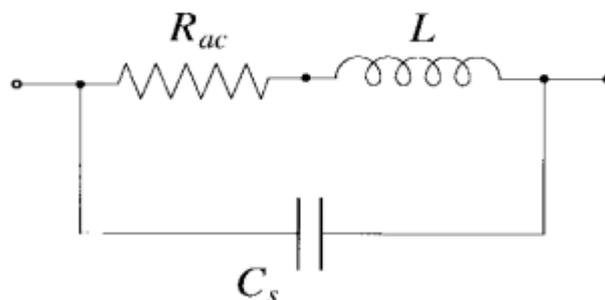


**Figure II.5:** Modèle pavé: les fils sont disposés suivant un maillage régulier dans la fenêtre de bobinage fréquence de résonance [26].

### II.2.3.Utilisation de l'article Massarini

Les enroulements d'inductance ont une capacité parasite distribuée.

La capacité distribuée des inducteurs peut être modélisée par une capacité groupée connectée entre les bornes de l'enroulement, comme le montre la (Figure II.6).



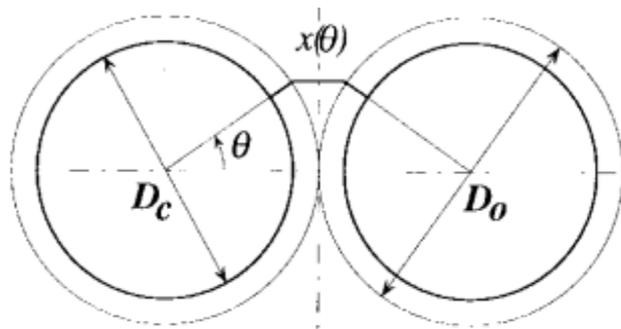
**Figure II.6:** Le circuit équivalent d'un inducteur auto-résonant [5]

L'analyse dans ce article est effectuée pour des inducteurs en un seul fil uniformément enroulé, comme la montre la (Figure II.6) La capacité totale des inductances parasites se compose des éléments suivants :

- 1) les capacités de virage à tourner entre des spires de la même couche;
- 2) les capacités de virage à tourner entre les spires des couches adjacentes;
- 3) les capacités de virage et de blindage.

A partir de ces figures, nous pouvons remarquer des symétries dans la géométrie sinueuse. En particulier, les lignes du champ électrique  $E$  qui sortent d'un virage entièrement entouré par d'autres conducteurs s'adressent à ces conducteurs.

Les symétries géométriques de la bobine, les lignes du champ électrique doivent être partagées également entre les conducteurs adjacents [5].



**Figure II.7:** Chemin supposé  $x(\theta)$  D'une ligne de champ électrique  $E$  à angle entre deux virages adjacents.

### A- La capacité entre spires:

Si l'on considère deux conducteurs adjacents, la capacité élémentaire entre deux surfaces élémentaires correspondantes opposées de ces conducteurs est donnée par [4]:

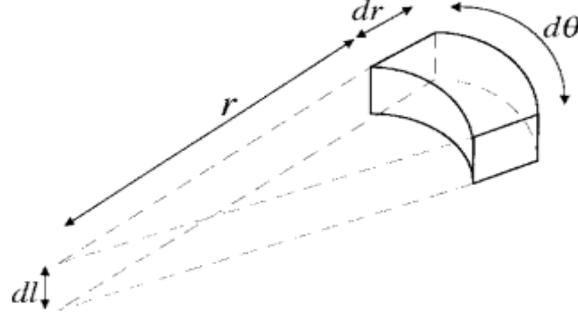
$$dC = \varepsilon \frac{dS}{x(\theta)} \quad (\text{II. 1})$$

Tel que:

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot r$  : La permittivité électrique.

$d_c$  : La capacité élémentaire entre deux surfaces opposées élémentaire.

$x(\theta)$ : La longueur de l'arc entre les deux surfaces opposées.



**Figure II.8:** Surface cylindrique élémentaire située à l'intérieur du revêtement isolant. [4]

La capacité élémentaire liée à la coque de revêtement cylindrique est donnée par:

$$dC = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{r dl d\theta}{dr} \quad (\text{II. 2})$$

Intégrant cette équation:

$$dC_c = \varepsilon_0 \varepsilon_r d\theta \int_0^{l_t} dl \int_{r_c}^{r_0} \frac{r}{dr} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l_t}{\int_{r_c}^{r_0} \frac{dr}{r}} d\theta = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l_t}{\ln \frac{r_0}{r_c}} d\theta \quad (\text{II. 3})$$

Par conséquent, la capacité par unité d'angle de la partie de la cellule de base correspondant aux revêtements isolants est donnée par [4] :

$$\frac{dC_{ttc}}{d\theta} = \frac{dC_c}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l_t}{\ln \frac{r_0}{r_c}} \quad (\text{II. 4})$$

### B- la capacité de l'air:

D'après les considérations géométriques de la (Figure II.7), la longueur des chemins supposés en fonction  $\theta$  est donnée par:

$$x(\theta) = D_0(1 - \cos\theta) \quad (\text{II. 5})$$

$$\frac{dC_{\text{air}}}{d\theta} = \varepsilon_0 \frac{l_t D_0}{2 x(\theta)} = \varepsilon_0 \frac{l_t D_0}{2 D_0(1 - \cos\theta)} = \varepsilon_0 \frac{l_t}{2(1 - \cos\theta)} \quad (\text{II. 6})$$

La combinaison en série des capacités élémentaires (II.4) et (II.6) est donnée par

$$dC_{eq} = \frac{dC_{ttc}dC_g}{dC_{ttc} + 2dC_g} = \frac{\varepsilon_0 l_t}{2} \frac{1}{1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \ln \frac{D_0}{D_c} - \cos\theta} d\theta \quad (\text{II.7})$$

L'intégration de (II.7) dans la cellule de base donne la capacité globale :

$$C_{tt} = \varepsilon_0 l_t \int_0^{\pi/6} \frac{1}{1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \ln \frac{D_0}{D_c} - \cos\theta} d\theta$$

$$= \varepsilon_0 l_t \frac{2\varepsilon_r \arctan \left[ \frac{(-1+\sqrt{3})(2\varepsilon_r + \ln \frac{D_0}{D_c})}{(1+\sqrt{3}) \sqrt{\ln \frac{D_0}{D_c} (2\varepsilon_r + \ln \frac{D_0}{D_c})}} \right]}{\sqrt{2\varepsilon_r \ln \frac{D_0}{D_c} + \left( \ln \frac{D_0}{D_c} \right)^2}} \quad (\text{II.8})$$

### II.3. Model numérique

Tous les phénomènes d'électromagnétismes variables dans le temps et dans l'espace dans nos études des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de maxwell suivantes, [3] [6] :

1-Loi de Maxwell Faraday (induction)

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

2-Loi de Maxwell Gauss (électrique)

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{II.10})$$

3-Loi de Maxwell Ampère

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.11})$$

3-Loi de Maxwell flux magnétique

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II.12})$$

$\vec{E}$  : Champ électrique [V/m].

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m].

$\vec{j}$  : Densité du courant [A/m<sup>2</sup>].

$\rho$  : La charge volumique [C/m<sup>3</sup>].

$\vec{D}$  : Induction électrique [A.s/m].

$\vec{B}$  : Induction magnétique [T].

Tel que :

$$\vec{j} = \vec{j}_{\text{ind}} + \vec{j}_{\text{exi}} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$\vec{j}_{\text{ind}}$  : La densité de courant induit.

$\vec{j}_{\text{ext}}$  : La densité de courant d'excitation.

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré sont, [3][20][1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \text{Avec} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

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

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [H/m] : Perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r$  : Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m].

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \text{Avec} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

$\varepsilon$  : Permittivité diélectrique [F/m] .

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  [F/m] : Constante diélectrique du vide

$\epsilon_r$  : Permittivité électrique relative du milieu[F/m].

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.16})$$

Où

$\sigma$  : Conductivité électrique[S.m<sup>-1</sup>].

### II.3.1. Formulation en potentiel vecteur (couple A-V)

Pour résoudre les équations de Maxwell, des changements de variables sont nécessaires. La méthode la plus connue est la « méthode A-V ». Les équations différentielles aux dérivées partielles (II.9) et (II.11) correspondent aux équations de diffusion des grandeurs H et E, toutefois, les formulations en champ présentent un inconvénient majeur, c'est celui de la discontinuité aux interfaces et particulièrement aux coins, [27][28]. (Continuité de la composante normale de l'induction B). Ce qui est justifié par les relations de passage, [29][30][31].

### II.3.2. Relations de continuité Conditions aux interfaces

La méthode des éléments finis, lorsque l'inconnue recherchée aux nœuds est le potentiel vecteur magnétique, impose la continuité à l'interface de deux milieux de nature différente. Si  $A_1$  et  $A_2$  sont respectivement les potentiels du milieu 1 et 2 à l'interface alors, [1]:

$$\vec{A}_1 = \vec{A}_2$$

La continuité du potentiel assure la continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface. Compte tenu des équations de passage qu'on rappelle ci-après, [1]:

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K}$$

$\vec{n}$  : Le vecteur normal à la surface.

$\vec{K}$  : représente la composante de la densité de courant perpendiculaire à l'axe du plan.

De plus les vecteurs ont généralement trois composantes augmentant de ce fait le nombre d'inconnues, et par la même le temps de calcul.

On à :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{II.17})$$

Pour assurer l'unicité de la solution nous allons imposer une condition de jauge (condition de coulomb) de telle sorte que [29] :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{II.18})$$

On à :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II.19})$$

Le rotationnel étant associatif on aura :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II.20})$$

On remarque que la quantité  $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$  est conservée donc c'est une dérivée d'un potentiel  $V$  alors :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II.21})$$

Alors la loi d'ohm(II.16) est :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V)\right) \quad (\text{II.22})$$

Ce qui permet de définir les deux densités de courant cité précédemment [29]:

$$\vec{j}_{\text{ind}} = -\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{j}_{\text{exi}} = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

On remplace (II.22) dans (II.11) on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V)\right) \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{II.24})$$

**Formulation éléments finis**

En considérant le régime harmonique et en faisant le même raisonnement que le cas des coordonnées cartésiennes on aura[29]:

$$-\iint_{\Omega} \alpha_i \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial z} \right) \right) dr dz + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \sigma A_{\varphi} \frac{dr dz}{r} = \iint_{\Omega} \alpha_i j_{s\varphi} dz dz \quad (\text{II. 25})$$

L'application du théorème de Green, nous permet d'écrire :

$$\iint_{\Omega} \frac{\nu}{r} \left( \frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial z} \right) dr dz - \int_{\Gamma} \frac{\nu}{r} \alpha_i \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \sigma A_{\varphi} \frac{dr dz}{r} = - \iint_{\Omega} \alpha_i j_{s\varphi} dz dz \quad (\text{II. 26})$$

En considérant les conditions aux limites type Dirichlet ou Neumann homogène, le terme sur la frontière s'annule.

En remplaçant  $A$  par sa forme discrétisée :

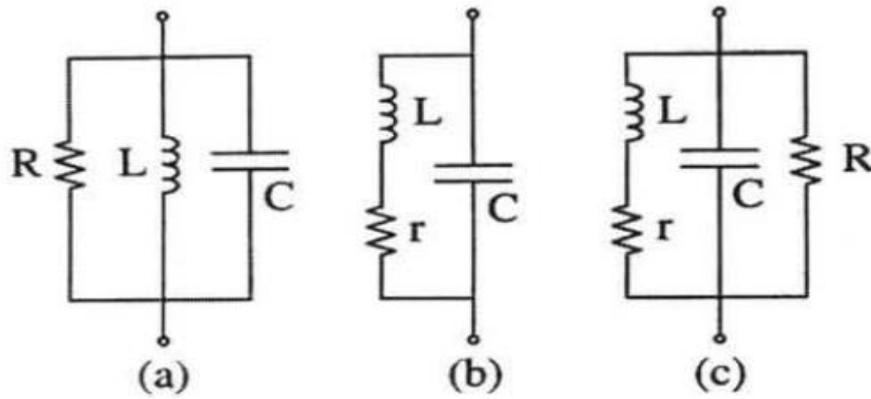
$$A_{\varphi} = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \quad (\text{II. 27})$$

On aura :

$$-\sum_{j=1}^N \left( \iint_{\Omega} \frac{1}{\mu r} \nabla \alpha_i \alpha_j dr dz \right) A_j + j\omega \sum_{j=1}^N \left( \iint_{\Omega} \alpha_i \alpha_j \sigma \frac{dr dz}{r} \right) A_j = \iint_{\Omega} \alpha_i J_{s\varphi} dr dz \quad (\text{II. 28})$$

**I.4. Une représentation équivalente d'une bobine**

Dans la basse fréquence, l'inductance comporte comme une résistance et dans les fréquences élevées c'est une capacité. Cela nécessite, en termes de circuit équivalent, l'ajout de résistances et de capacités, à l'inductance idéale de départ. Les circuits présentés sont des solutions possibles (figure II.9).



**Figure II.9:** Circuits équivalents utilisés pour représenter une inductance [26]

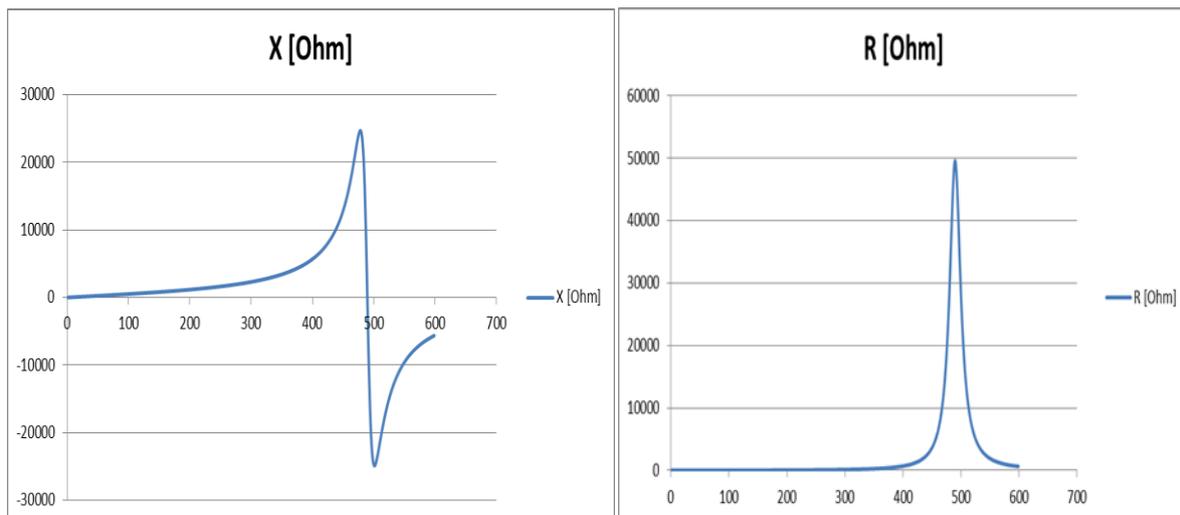
Les deux premières représentations (a,b) sont très répandues et certains analyseurs d'impédance, nous avons utilisé la représentation (b)[26][32].

### II.5.Fréquence de résonance

En électricité, il est plus habituel de parler de fréquence de résonance, introduirons-nous la grandeur suivante :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{II.29}$$

Dans notre analyse de la bobine on utilise la représentation (a) on visualise la résonance dans les fréquences élevées comme montre la figure suivante :



**Figure II.10 :** Évolution de la réactance et de la résistance en fonction de la fréquence.

### III.6. Calcule l'impédance équivalent d'une capacité avec la méthode de circuit équivalent

#### III.6.1. Circuit équivalent d'une bobine quatre couches

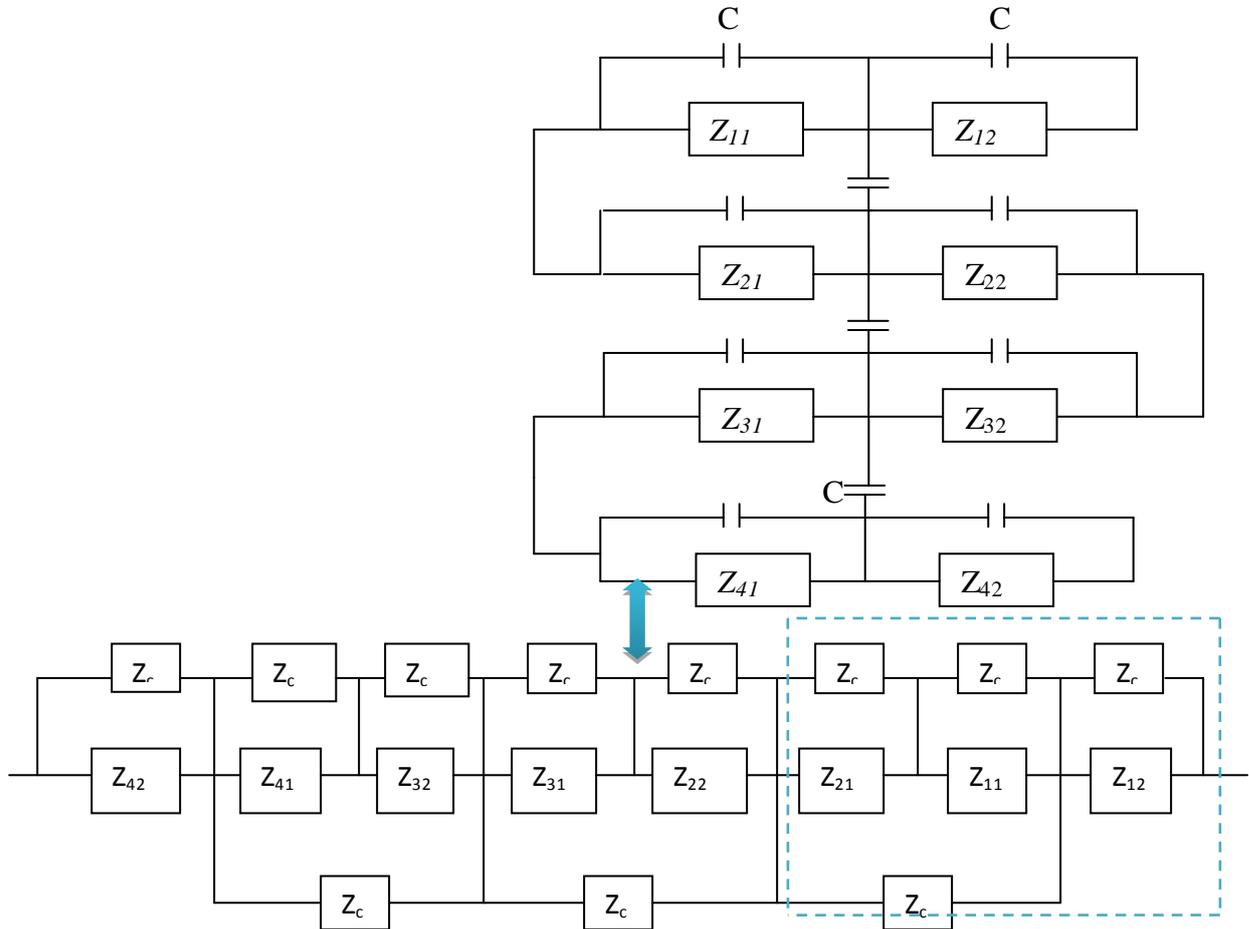


Figure II.11 : Le schéma simplifié de bobine à 4 couches

D'après le circuit on a :

❖  $Z_c$  en parallèle avec  $Z_{11}$

En note  $Z_{eq1}$  l'impédance équivalente de  $Z_c$  et  $Z_{11}$

$$Z_{eq1} = \frac{Z_c \cdot Z_{11}}{Z_c + Z_{11}}$$

❖  $Z_c$  en parallèle avec  $Z_{21}$

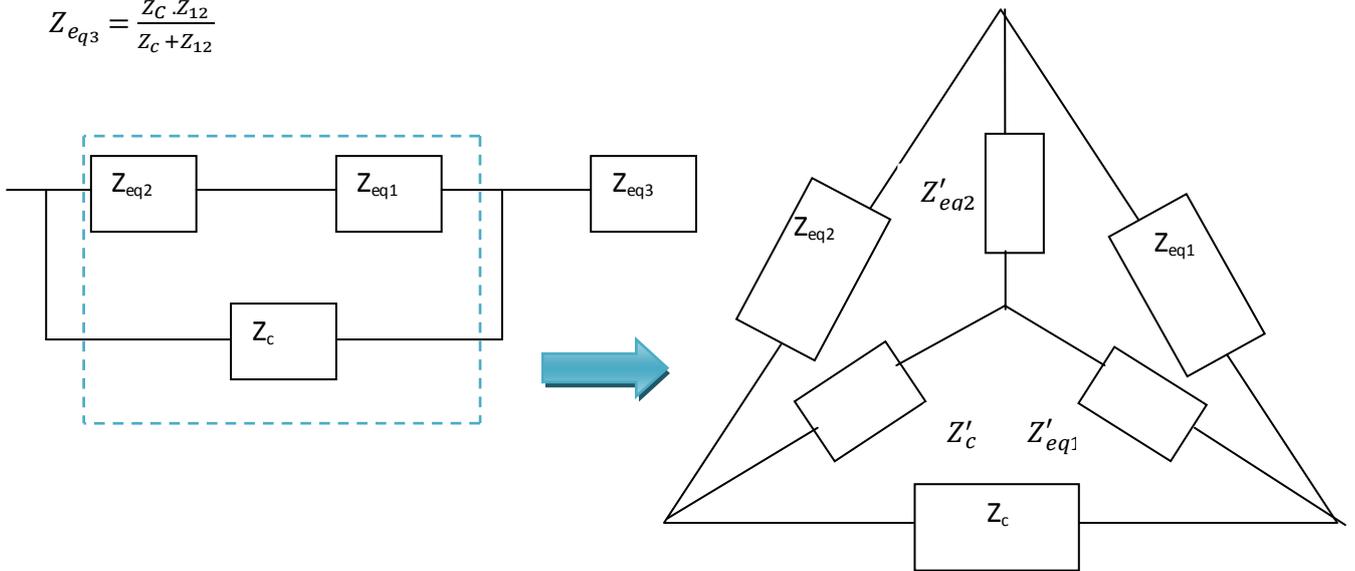
En note  $Z_{eq2}$  l'impédance équivalente de  $Z_c$  et  $Z_{21}$

$$Z_{eq2} = \frac{Z_{21} \cdot Z_c}{Z_c + Z_{21}}$$

❖  $Z_c$  en parallèle avec  $Z_{12}$

En note  $Z_{eq3}$  l'impédance équivalente de  $Z_c$  et  $Z_{12}$

$$Z_{eq3} = \frac{Z_c \cdot Z_{12}}{Z_c + Z_{12}}$$



On applique le théorème de Kennelly, pour établir une équivalence entre les impédances placées en triangle et les impédances placées en étoiles comme montre la figure suivante.

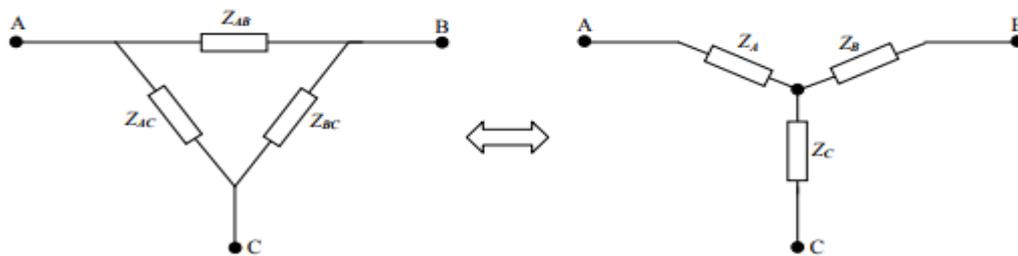


Figure II.12 : Transformation de l'étoile a triangle

➤ **Conversion triangle-étoile**

La résistance d'une branche de l'étoile équivalente est égale au produit des résistances adjacentes divisé par la somme totale des résistances.[29]

$$Z_A = \frac{Z_{AB}Z_{AC}}{Z_{AB}+Z_{AC} + Z_{BC}}$$

$$Z_B = \frac{Z_{AB}Z_{BC}}{Z_{AB}+Z_{AC} + Z_{BC}}$$

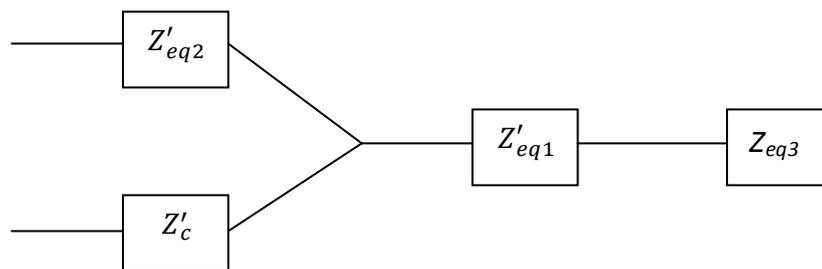
$$Z_C = \frac{Z_{AC}Z_{BC}}{Z_{AB}+Z_{AC} + Z_{BC}}$$

Donc on trouve :

$$\diamond Z'_{eq1} = \frac{Z_{eq1} \cdot Z_c}{Z_c + Z_{eq1} + Z_{eq2}}$$

$$\diamond Z'_{eq2} = \frac{Z_{eq2} \cdot Z_{eq1}}{Z_c + Z_{eq1} + Z_{eq2}}$$

$$\diamond Z'_c = \frac{Z_c \cdot Z_{eq2}}{Z_c + Z_{eq1} + Z_{eq2}}$$



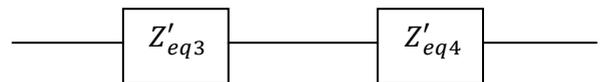
❖  $Z'_{eq2}$  en parallèle avec  $Z'_c$

En note  $Z'_{eq3}$  l'impédance équivalente de  $Z'_{eq2}$  et  $Z'_c$

$$Z'_{eq3} = \frac{Z'_{eq2} \cdot Z'_c}{Z'_{eq2} + Z'_c}$$

❖  $Z'_{eq1}$  en série avec  $Z_{eq3}$

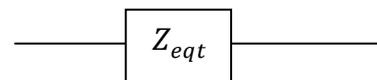
En note  $Z'_{eq4}$  l'impédance équivalente de  $Z'_{eq1}$  et  $Z_{eq3}$



$$Z'_{eq4} = Z'_{eq1} + Z_{eq3}$$

❖  $Z'_{eq4}$  en série avec  $Z'_{eq3}$

En note  $Z_{eqt}$  l'impédance équivalente de  $Z'_{eq3}$  et  $Z'_{eq4}$



$$Z_{eqt} = Z'_{eq4} + Z'_{eq3}$$

**I.7. Conclusion**

Le principe de fonctionnement d'une bobine est basé sur les phénomènes d'électromagnétisme (magnétodynamique) ; en haute fréquence les effets de peau et de proximité provoquent la résistance parasite, cette dernière on ne peut pas la négliger par contre en basse fréquence ces capacités elle n'appâter pas.

Dans ce chapitre nous avons présenté l'étude de comportement magnétique d'une bobine. Nous avons utilisé le modèle analytique basés sur l'article de massarini pour calculer la capacité élémentaire et le modèle numérique (éléments finis) utilisant les équations de maxwell ; et aussi calculé l'impudence d'une capacité ont utilisant le circuit équivalent.

# *Chapitre III*

## *Modélisation et Etude d'une bobine à air*

### III.1.Introduction

Dans ce chapitre, on présente toutes les manipulations et résultats expérimentaux en vue de la détermination des comportements électromagnétique d'une bobine à air.

On a vu précédemment que le comportement électromagnétique des bobine a aire (les effets capacitives), celle-ci est effectuée soient par des méthodes analytiques ou le plus souvent par des méthodes numériques, telles que les méthodes des éléments finis, différences finies ou volumes finis.

Nous exposeront également les outils de simulation. Les logiciels utilisés sont le logiciel Matlab, le logiciel Cédrat Flux 2D.

### III.2.Conception et simulation de la bobine à air

#### III.2.1.Présentation du logiciel Flux 2D

Flux2D/3D/ Cedrat est un logiciel de simulation numérique utilisé en conception assistée par ordinateur. Il utilise la méthode des éléments finis et permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiparamétrique étendues, les couplages circuit et cinématique. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses : équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux [33].

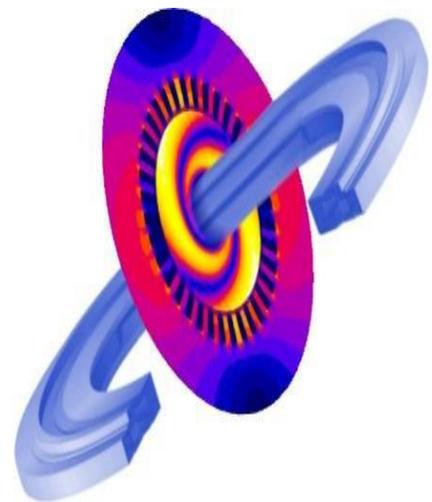
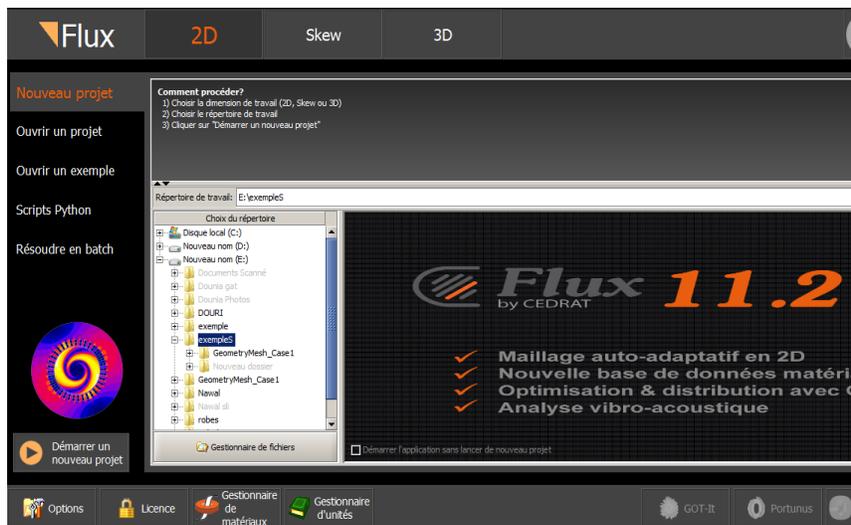


Figure III. 1:Logos et interface du logiciel cédrat Flux 2D.

Flux est utilisé pour la conception, l'optimisation et l'analyse de nombreux dispositifs et applications tels que :

- Les machines tournantes.
- Les actionneurs linéaires.
- La compatibilité électromagnétique.
- Les transformateurs et inductance.
- Les dispositifs de chauffage par induction.
- Les capteurs.
- Les dispositifs hauts tension.
- Les câbles.
- Le contrôle non destructif [34].

Flux est développé en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué par la société CEDRAT S.A [33].

### III.2.2. Conception et simulation d'une bobine à air

#### III.2.2.1. Bobine à 4 couches :

$H_b$  : La hauteur d la bobine.  $R_{cu}$  : Rayon de cuivre.

$N_{couche}$  : Nombre de couche.  $N_{section}$  : Nombre de section (spire).

$R_{b-ext}$  : Rayon extérieure d la bobine.

$R_{b-int}$  : Rayon interne d la bobine.

$e$  : Epaisseur de l'enroulement.

$D_b$ : diamètre de la bobine en m

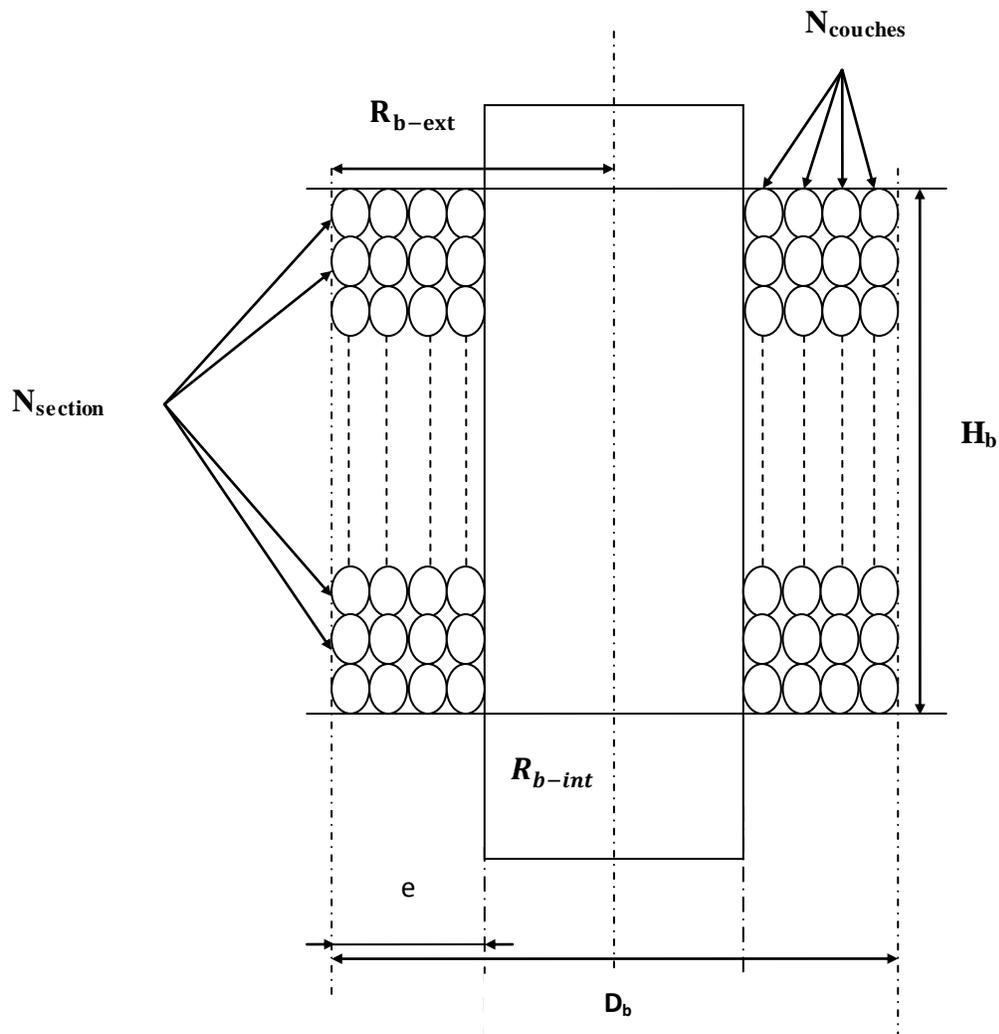


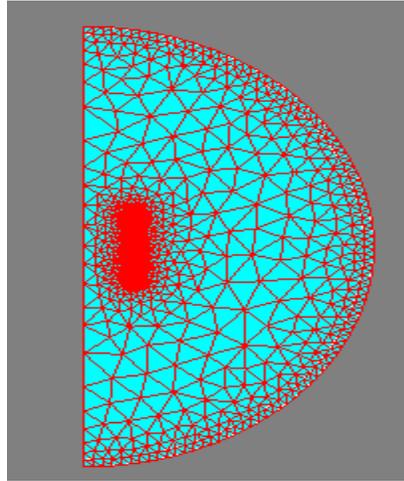
Figure III.2:Schéma des dimensions de la bobine multicouche.

Les paramètres géométriques de l'inducteur sont :

$H_b$	$R_{cu}$	$N_{couche}$	$N_{section}$	$R_{b-ext}$	$R_{b-int}$	$Dis_V$	$Dis_H$
29.03mm	0.25mm	4	51spires	16.14mm	13.13mm	$\frac{(H_b - 2 \cdot R_{cu})}{(N_{section} - 1)}$	$\frac{(R_{b-ext} - R_{b-int} - 2 \cdot R_{cu})}{(N_{couche} - 1)}$

Tableau III.1 : Paramètres géométrique d'une bobine à 4 couches.

### III.3. En Application magnéto Harmonique 2D



**Figure III.3 :** La bobine sous flux 2d, structure maillée.

On a fait le maillage pour visualisation les lignes de champs, l'effet de peau et de proximité. La structure de ce maillage utilise les éléments fins de forme triangulaire à chaque point on définit le (A-V).

### III.4 : Comportement des bobines solénoïdales à air à haute et à base fréquence

Après avoir calculé tous les paramètres de schéma électrique équivalent de la bobine, une première étape de validation de modèle numérique consiste en l'étude de l'évolution de l'impédance de la bobine en fonction de fréquence. Dans cette partie on a étudié le comportement électromagnétique d'une bobine multi couche, dans des fréquences de 20 Hz allons jusqu'à 600kHz, par l'utilisation de RLC mètre (Figure III.4) pour mesurer la variation de la résistance et l'inductance de la bobine et aussi on a fait la simulation avec logiciel flux 2D. Une comparaison a été effectuée avec les valeurs expérimentaux et mesurées.



Figure III.4: RLC Mètre

### III.4.1. Bobine à quatre couches

#### III.4.1.1. Sans Condensateur

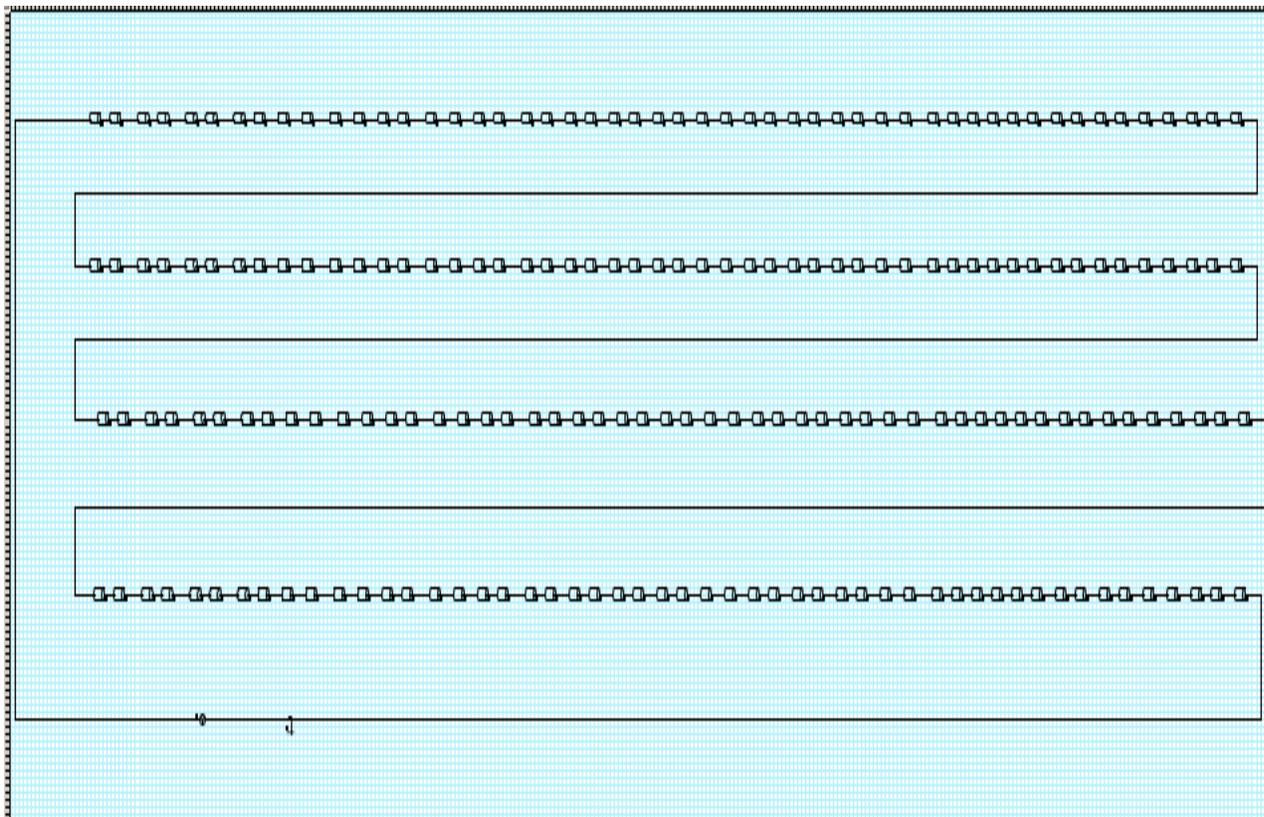
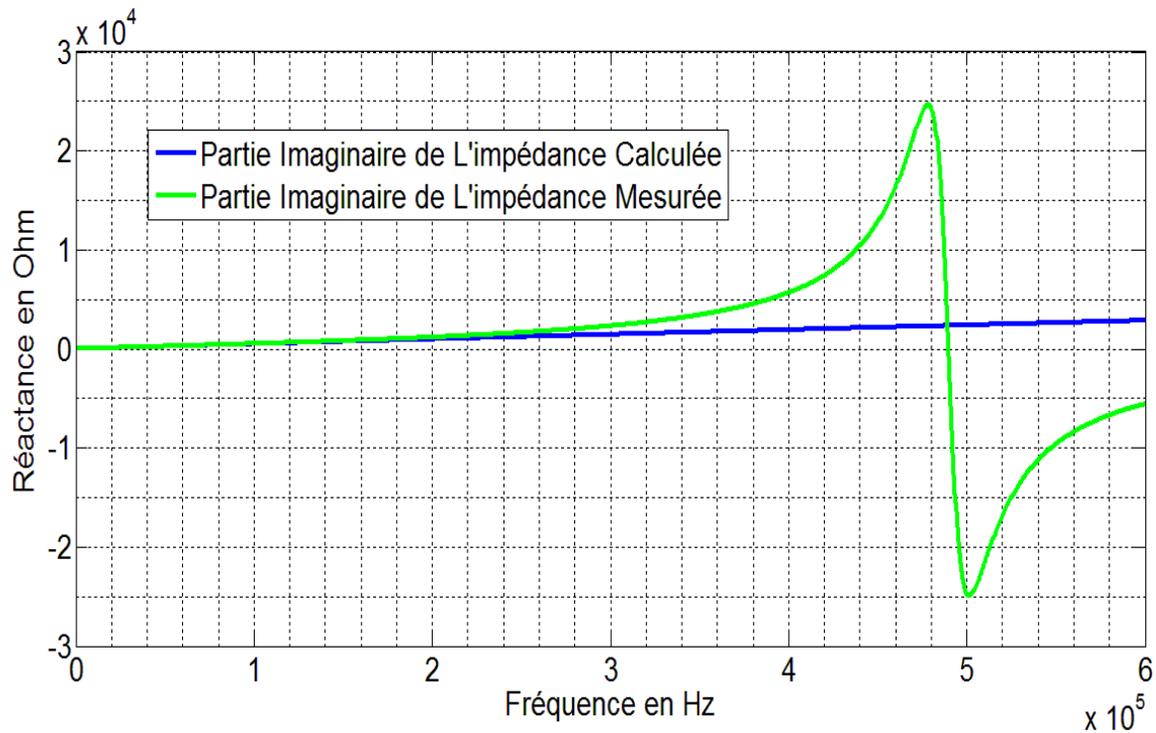


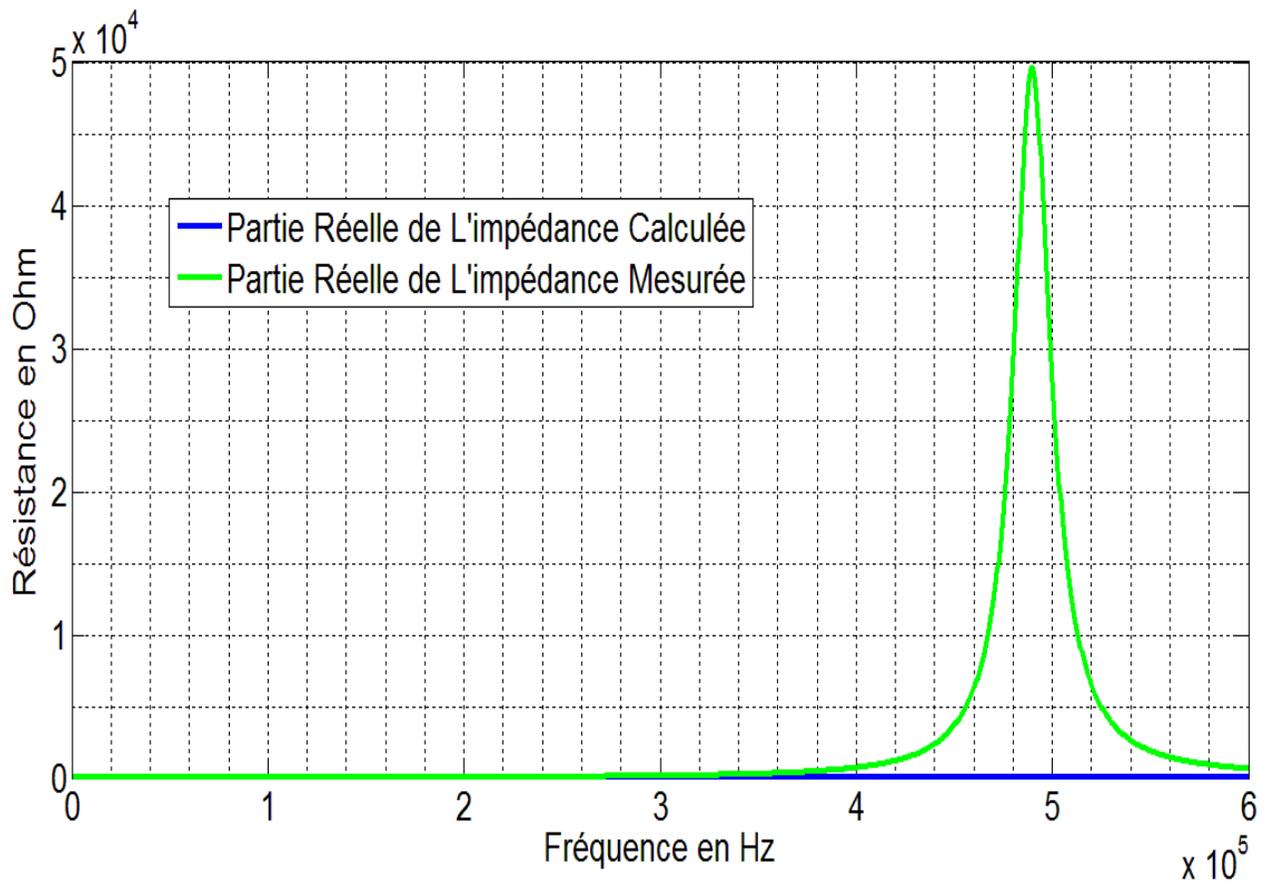
Figure III.5: Schéma électrique sans condensateur.

❖ **Partie imaginaire**

**Figure III.6:** Courbe d'évolution de la réactance partie imaginaire de l'impédance (Calculée/ Mesurée) son condensateur en fonction de la fréquence

### A. Interprétation

On remarque que lorsqu'on augmente la valeur de la fréquence, les valeurs (calculé/mesuré) de la partie imaginaire de l'impédance (l'inductance L) sont pas identiques, on visualise la résonance (résonance de l'inductance) dans l'intervalle des fréquences élevés pour la partie imaginaire de l'impédance mesurée, par contre pour les valeurs calculée on ne visualise pas cette résonance car le model il ne prend pas on considération l'effet capacitive.

❖ **Partie réelle**

**Figure III.7:** Courbe d'évolution de la résistance partie réelle de l'impédance (Calculée/ Mesurée) sans condensateur en fonction de la fréquence.

**B. Interprétation**

C'est la même chose pour la partie réelle de l'impédance  $R$ , on remarque que à basse fréquence les valeurs de  $R$  (mesurée/ calculée) sont identiques, mais quand on augmente la fréquence on visualise la résonance (résonance d'une résistance) pour le model expérimentale.

III.4.1.2.Avec Condensateur

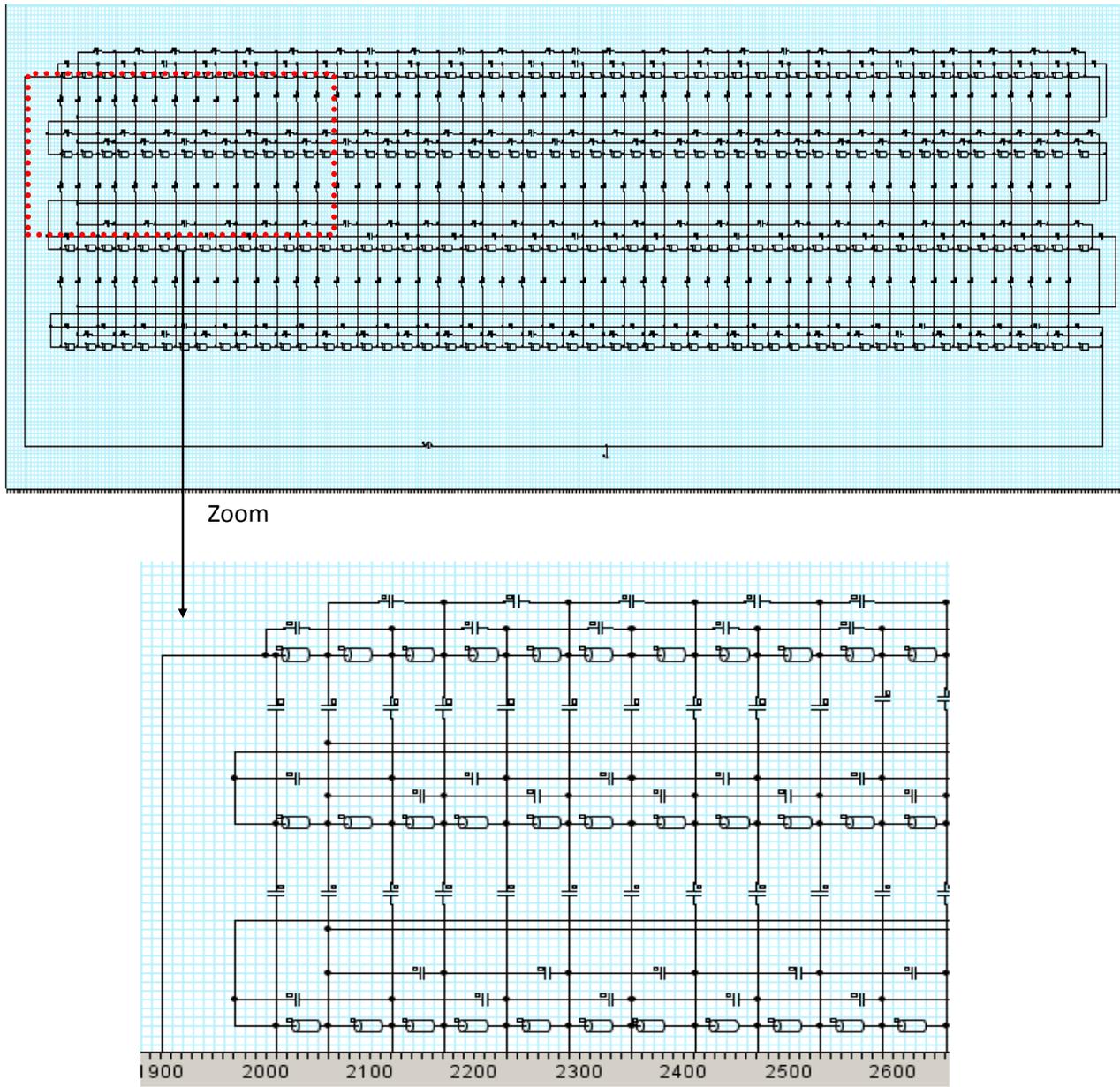
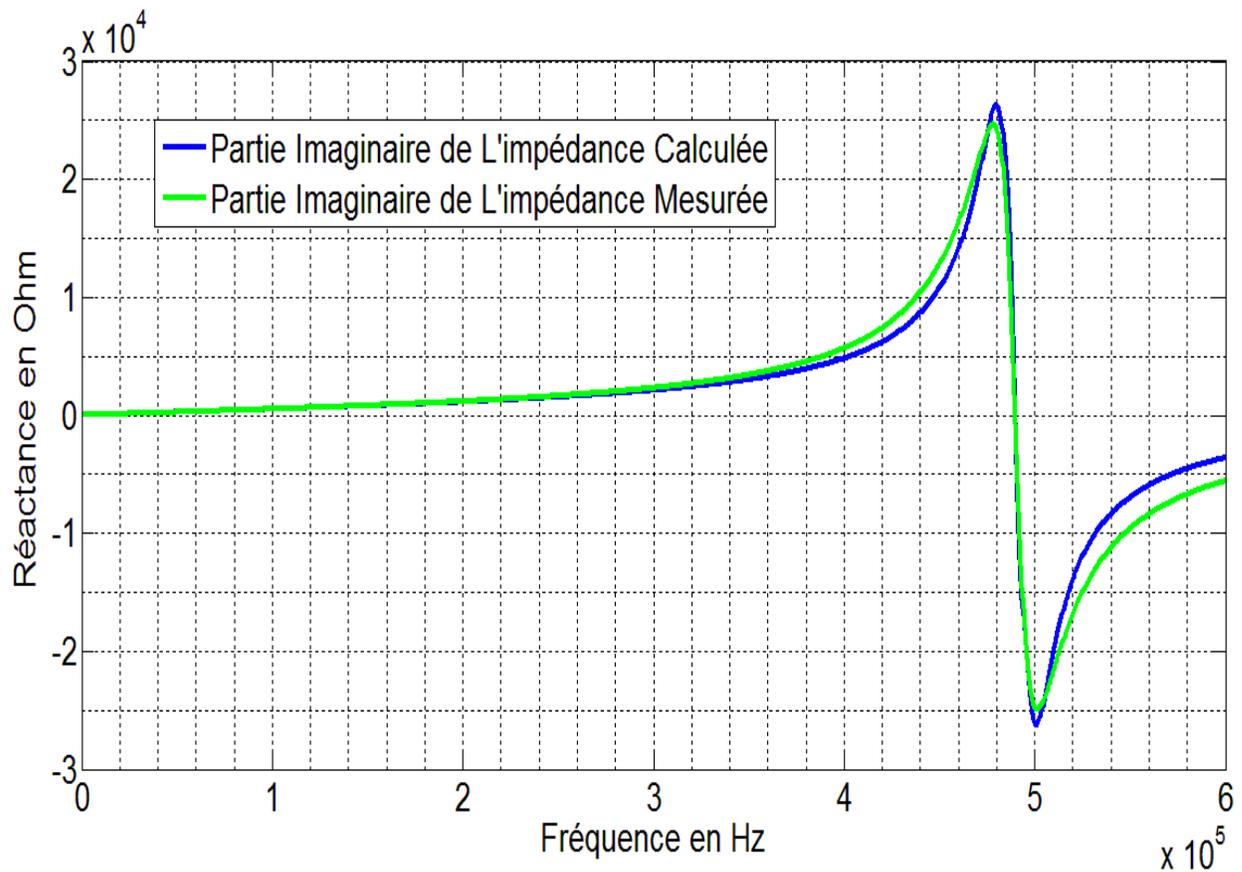


Figure III.8:Circuit électrique d'une bobine à quatre couches avec condensateur.

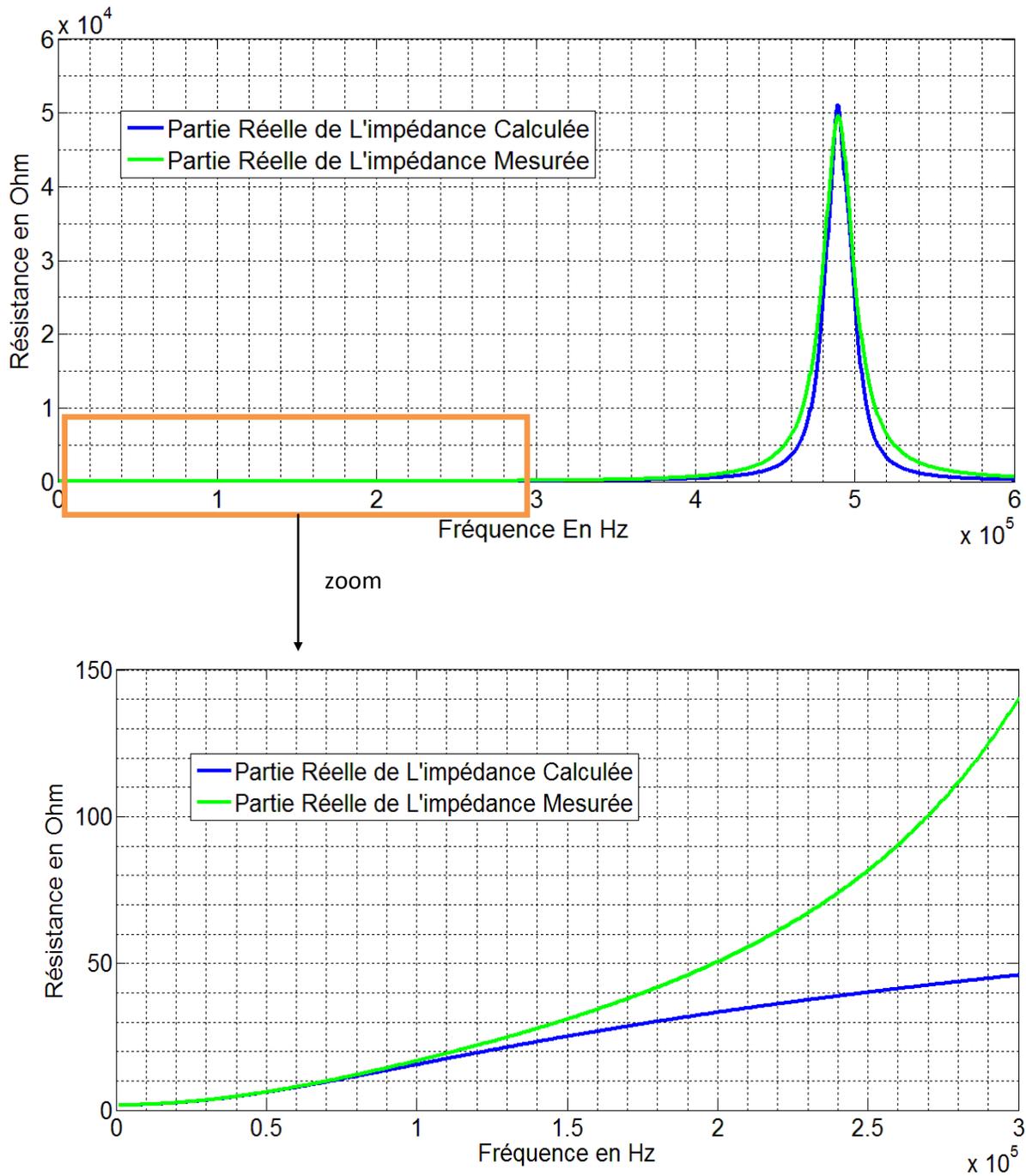
❖ **Partie imaginaire**

**Figure III.9:** Courbe d'évolution de la réactance partie imaginaire de l'impédance (Calculée/ Mesurée) avec condensateur en fonction de la fréquence.

**C. Interprétation**

On remarque, lorsque on ajoute les condensateurs entre spire et entre couches les valeurs de la partie imaginaire de l'impédance L (calculée/ mesurée) sont identiques sur toute l'intervalle de la fréquence, avec l'apparition de la résonance dans les fréquences élevées.

❖ **Partie Réelle**



**Figure III.10:** Courbe d'évolution de la résistance partie réelle de l'impédance (Calculée/ Mesurée) avec condensateur en fonction de la fréquence.

## D. Interprétation

D'après la courbe on remarque, pour les basses fréquences les valeurs (calculé/mesuré) sont pareils, mais quand on augmente la fréquence on remarque que les valeurs sont presque égaux, il y'a un petit décalage entre les deux valeurs ça revient à l'erreur de modèle, avec l'apparition de la résonance.

### III.5. Distribution de la densité de courant :

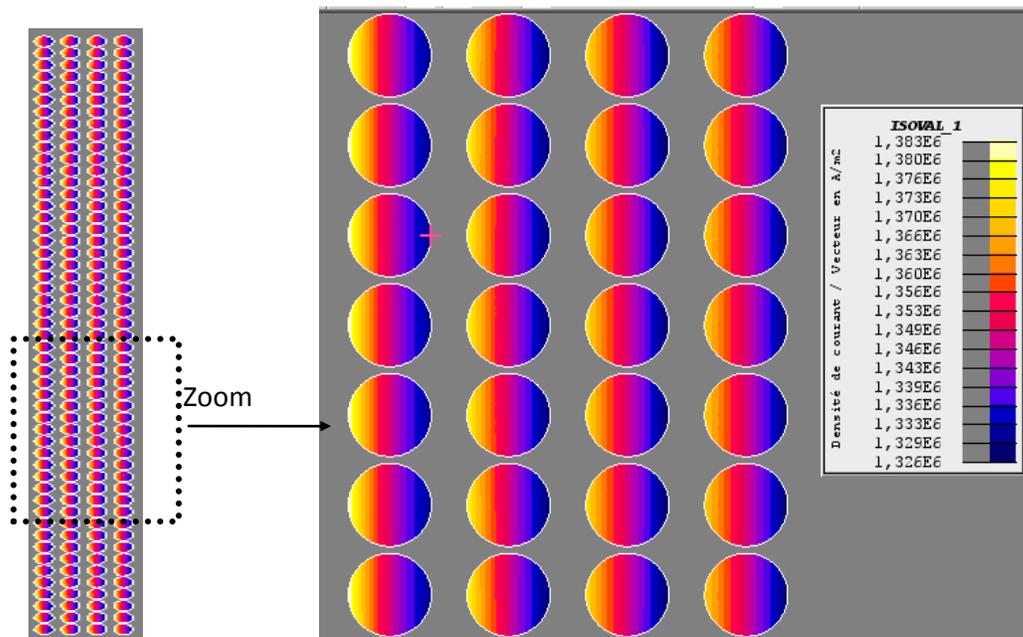


Figure III.11:Évolution de la Distribution de la densité de courant : effet pelliculaire et effet de proximité à  $f = 1kHz$

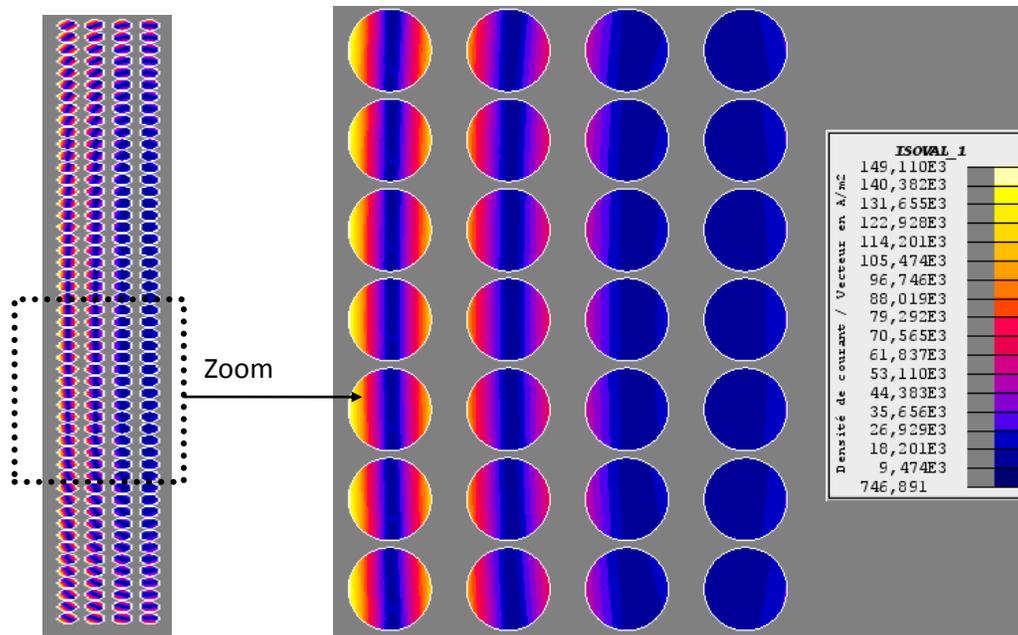


Figure III.12: Évolution de la Distribution de la densité de courant : effet pelliculaire et effet de proximité à  $f=100\text{kHz}$

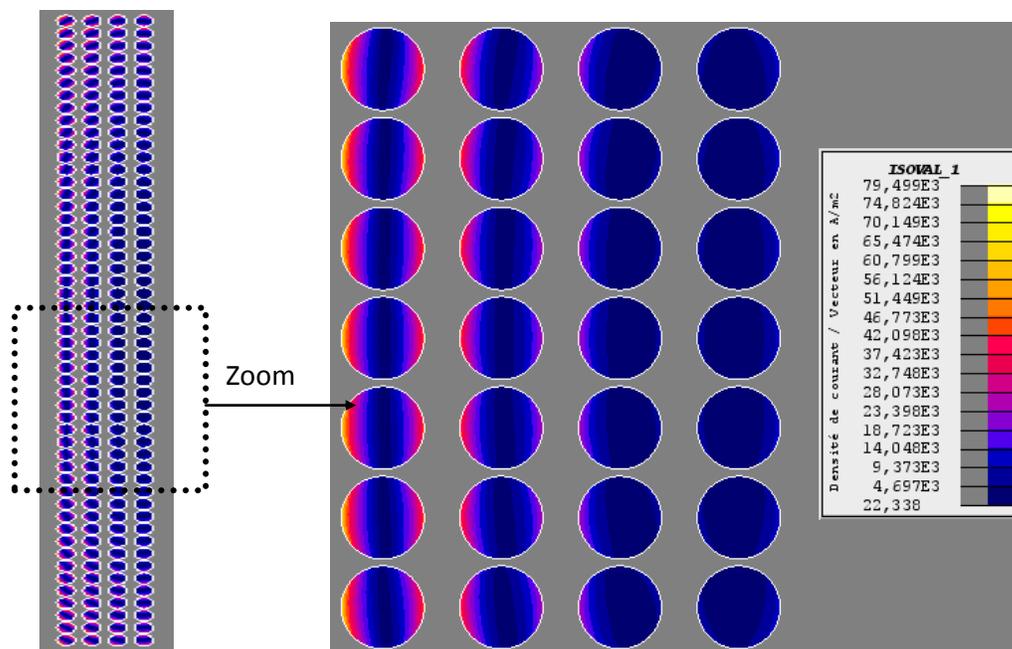


Figure III.13: Évolution de la Distribution de la densité de courant : effet pelliculaire et effet de proximité à  $f=600\text{kHz}$

### ❖ Discussion des résultats

Quand la fréquence augmente, commence à apparaître l'effet pelliculaire, le courant traverse le chemin le plus court, ne circule alors que sur une couronne en périphérie du conducteur.

En effet, la répartition du courant dans un conducteur n'est pas seulement influencée par l'effet pelliculaire mais également par le champ magnétique créé par les courants induits dans les conducteurs voisins, c'est l'effet de proximité. Ce phénomène induit des pertes supplémentaires qui se traduisent par une augmentation de la résistance propre du conducteur. L'épaisseur de peau dépend des propriétés du matériau et de la fréquence d'excitation, les figures précédents (Figure III.12, Figure III.13, Figure III.14) illustre bien ces deux phénomènes : lorsqu'un conducteur est alimenté, plus la fréquence augmente et plus le courant qui circule dans le conducteur tend à se concentrer sur une petite épaisseur à sa périphérie. De même les courants induits dans les conducteurs avoisinant celui alimenté tendent également à se concentrer sur la périphérie.

### III.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les bancs expérimentaux utilisés durant tout notre projet pour atteindre les objectifs fixés dans ce thème.

Nous avons mesuré la réactance et la résistance aussi l'inductance pour notre bobine à l'aide de RLC mètre.

L'étude de ce système peut se faire avec plusieurs programmes de simulation, est par ces programmes Cédrat Flux 2D qui nous sert à concevoir et à simuler l'inducteur (bobine).

L'objectif final de ce chapitre est de faire la comparaison entre les résultats de mesure (analytique) est simulé (numérique) pour la bobine à quatre couches son et avec condensateurs.

# *Conclusion générale*

### Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons présenté la conception d'une bobine à air, ses différentes applications. Puis, nous avons exposé ses différents modes de fonctionnement et les caractéristiques.

Modèle analytique développé dans notre travail s'appuie sur une représentation simplifiée de la géométrie d'un composant bobiné et a considéré le domaine d'étude électrostatique. Cette étude électrostatique, a permis d'établir des modèles analytiques pour calculer des capacités parasites, l'utilisation de la méthode des éléments finis peut réaliser une analyse plus complète et considérer aussi, dans une formulation magnétodynamique par exemple, les problèmes couplés magnétiques - électriques importantes quand ces composants sont soumis à des hautes fréquences.

Nous avons effectué une simulation de la partie électromagnétique du système sous le logiciel Cédrat Flux 2D, cette simulation nous a permis d'identifier les différentes caractéristiques et la géométrie adéquate des constituants de l'application et plus précisément sa partie électronique de puissance ou on a varié la fréquence pour en déduire l'effet qu'elle a sur le rendement du système.

#### **Perspectives :**

Ce travail a tout d'abord consisté en une démarche de modélisation d'un bobinage , les perspectives de ce travail sont :

- Mettre un modèle analytique d'une bobine à air en basses et hautes fréquences.
- Etude d'influence de la présence de matériaux conducteurs ou magnétiques à proximité de la bobine.
- Etude d'un cas réel (expérimental).
- simulation Flux 2D, pour la prise en compte des phénomènes magnétiques dans les matériaux.

# *Bibliographie*

## Bibliographies

- [1] Hayt, William H. (1989), *Engineering Electromagnetics* (5th ed.), McGraw-Hill, ISBN 0070274061.
- [2] Haolun Zhang " HIGH FREQUENCY MRI RF COIL DESIGN A Thesis in Engineering Science and Mechanics he Pennsylvania State University 2013.
- [3] Théodore Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*, 6th edition, *Upper Saddle River, N.J.*, Pearson Prentice Hall, 2006, 934 p. (ISBN 9780131776913).
- [4] "Joseph Henry". Distinguished Members Gallery, National Academy of Sciences. Archived from the original on 2006-12-09. Retrieved 2006-11-30.
- [5] Antonio Massarini and Marian K. Kazimierczuk, " Self-Capacitance of Inductors", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 12, NO. 4, JULY 1997.
- [6] Théodore Wildi et Gilbert Sybille, *Électrotechnique*, 4e édition, Québec, Presse de l'Université Laval / De Boeck, 2005, 1215 p. (ISBN 9782763781853).
- [7] Walt Jung, " Op Amp applications handbook ", (Analog Devices series) ISBN 0-7506-7844-5.
- [8] A. Mariscotti, " MEASURING THE STRAY CAPACITANCE OF SOLENOIDS WITH A TRANSMITTING AND A RECEIVING COIL", *Metrol. Meas. Syst.*, Vol. XVIII (2011), No. 1, pp. 47–56.
- [9] Gabriele Grandi, Marian K. Kazimierczuk, Senior Member, IEEE, Antonio Massarini, and Ugo Reggiani, Member, IEEE " Stray Capacitances of Single-Layer Solenoid Air-Core Inductors", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 35, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 1999.
- [10] Stauffer, H. Brooke (2005). *NFPA's Pocket Dictionary of Electrical Terms*. Jones and Bartlett Learning. p. 36. ISBN 0877655995.
- [11] Laplante, Phillip A. (1999). *Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering*. Springer. pp. 114–115. ISBN 3540648356.
- [12] F.DE COULON et M.JUFER, «Introduction à l'Electrotechnique, Traité d'électricité » volume1 (7ème édition) Lausanne Pour ,1995.

- [13] ADOUM KRIGA, «Étude et réalisation de micro-inductances pour convertisseur DC/DC», Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint Etienne, 2008.
- [14] ALLASSEM Désiré, « Contribution à la réalisation d'une micro-inductance planaire », Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint Etienne, 2010.
- [15] Tesla, Nikola (March 5, 1904). "The Transmission of Electric Energy Without Wires". *Electrical World and Engineer*. McGraw Publishing Co. 43: 23760–23761. Retrieved November 19, 2014.
- [16] Tomar, Anuradha; Gupta, Sunil. "Wireless Power Transmission: Applications and Components". ISSN 2278-0181. November 9, 2014.
- [17] L. Kojovic " Rogowski coils suit relay protection and measurement ~of power systems" *IEEE Computer Applications in Power* ( Volume: 10, Issue: 3, Jul 1997 ).
- [18] Laplante, P.A. (1999). *Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering*. Springer Berlin Heidelberg. p. 633. ISBN 9783540648352. Retrieved 2017-01-07.
- [19] Ulaby, Fawwaz (2001-01-31). *Fundamentals of Applied Electromagnetics* (2nd ed.). Prentice Hall. p. 232. ISBN 0-13-032931-2.
- [20] Hassenzahl, W.V., "Applied Superconductivity, Superconductivity, an enabling technology for 21st century power systems?", *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 1447-1453, Volume: 11, Issue: 1, Mar 2001.
- [21] Sinclair, Ian Robertson (2001). *Sensors and transducers*, 3rd Ed. Newnes. pp. 69–70. ISBN 0750649321.
- [22] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *SCIENCE*, vol. 317, July 2007.
- [23] Theodoros Theodoulidis, Member, IEEE, "Analytical Model for Tilted Coils in Eddy-Current Nondestructive Inspection," *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 41, No. 9, September 2005.
- [24] Wuliang Yin, Senior Member, IEEE, and Kai Xu, "A Novel Triple-Coil Electromagnetic Sensor for Thickness Measurement Immune to Lift-Off Variations" *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, Vol. 65, No. 1, January 2016.

- [25] D. Trichet, "Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites," Thèse de doctorat, École Doctorale Sciences pour l'ingénieur de Nantes, 2000.
- [26] J.L. Cocquerelle, L'Électronique de commutation, Paris, Technip ; J.-P. Ferrieux, F. Forest, Alimentations à découpage — Convertisseurs à résonance, Paris, Dunod, 3<sup>e</sup> édition, 1999.
- [27] Yahya, CHOUA, «Application de la méthode des éléments finis», Orsay : 2009. 9535.
- [28] WANIN, Maurice, «Évaluation non destructive de la qualité des matériaux», (Partie 2). Nancy . M 4 131 – 16.
- [29] CHOUA, Y., L. S ANTANDRÉA, Y. LE BIHAN et C. MARCHAND (2010), « Mesh Refinement in Eddy Current Testing With Separated T-R Probes », IEEE Trans. Mag. 46, 2795–2798.
- [30] THEODOULIDIS, T. et J. B OWLER (2005), « Eddy-current interaction of a long coil with a slot in a conductive plate », IEEE Trans. Mag. 41(4), 1238–1247.
- [31] Safer Omar Adib, «Etude et Modélisation de capteur à courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif», Université de M'Sila , 2014.
- [32] Fabiano Luiz Santos Garcia, «Modélisation des composants électromagnétiques haute fréquence Par la méthode des éléments finis», Thèse de doctorat Université de Federal de Santa Catarina, 1999.
- [33] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Flux2D>.
- [34] <http://www.cedrat.com/fr/software/flux.html>.

# *Annexe*

## Annexe A : Chapitre III

### A-Partie Flux 2D

➤ Les étapes de la conception de l'inducteur en application magnéto-harmonique:

#### 1- Définition de l'application:

Avant de commencer le travail on doit définir l'application dans laquelle on voudrait étudier notre dispositif dans ce premier cas on choisit magnéto harmonique sachant qu'on va travailler dans le domaine 2d axisymétrique.

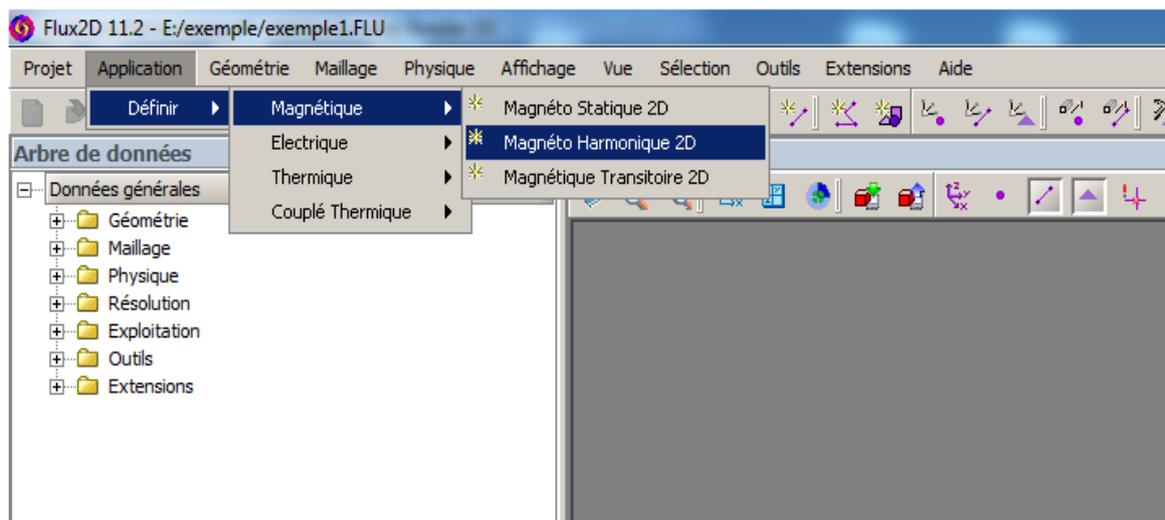


Figure A.1 : Définition de l'application.

#### 2-Définition des paramètres géométriques :

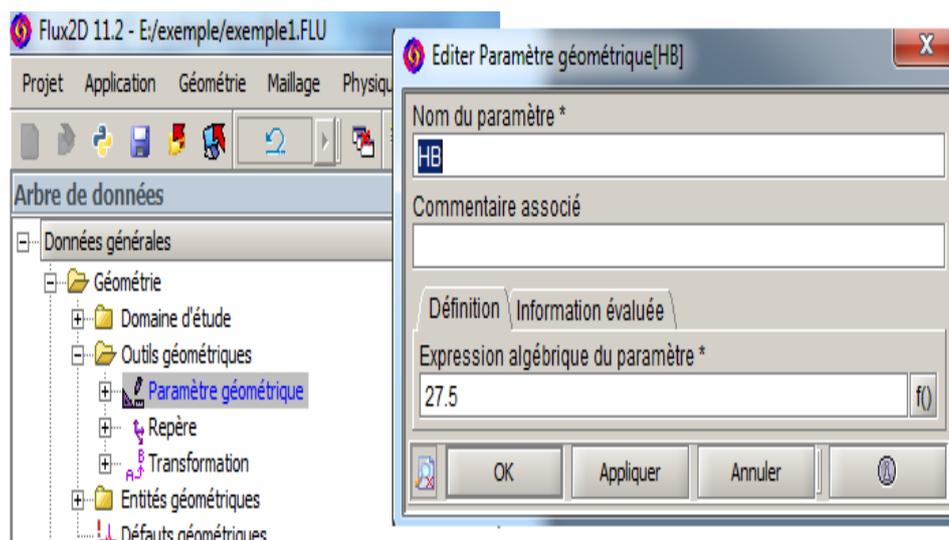


Figure A.2 : Définition des paramètres géométriques.

3- Après on définit les points puis on construit les lignes et on procède aux transformations afin de construire les faces :

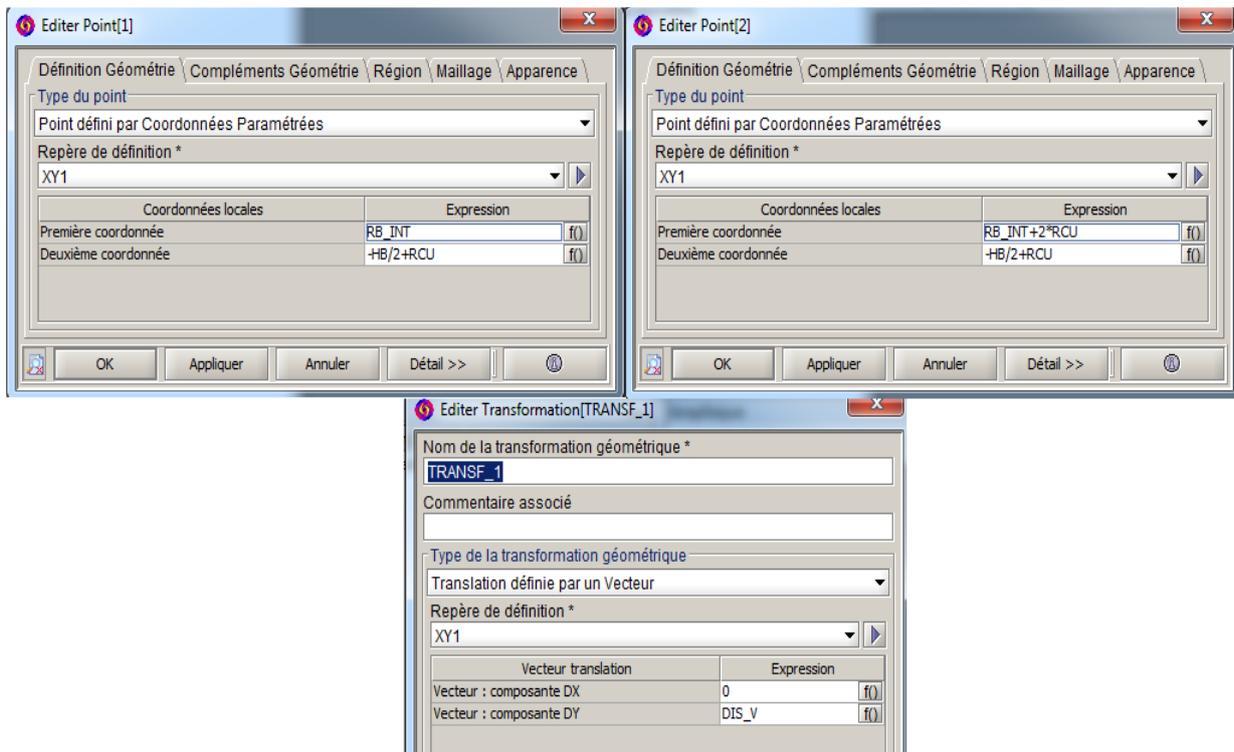


Figure A.3 : Construction de faces.

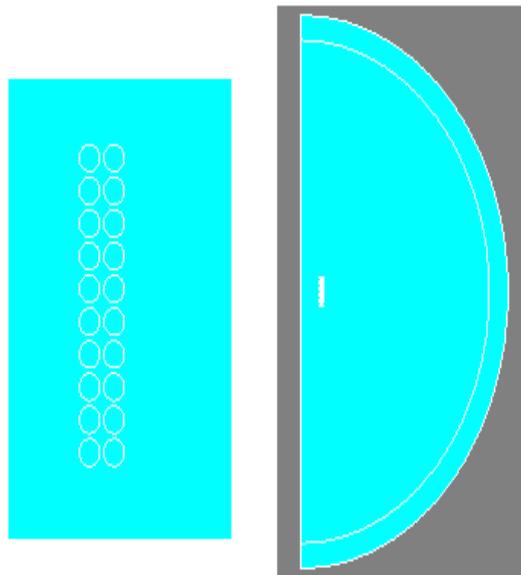


Figure A.4 : Faces construites.

#### 4- La création du circuit électrique :

Physique  Circuit

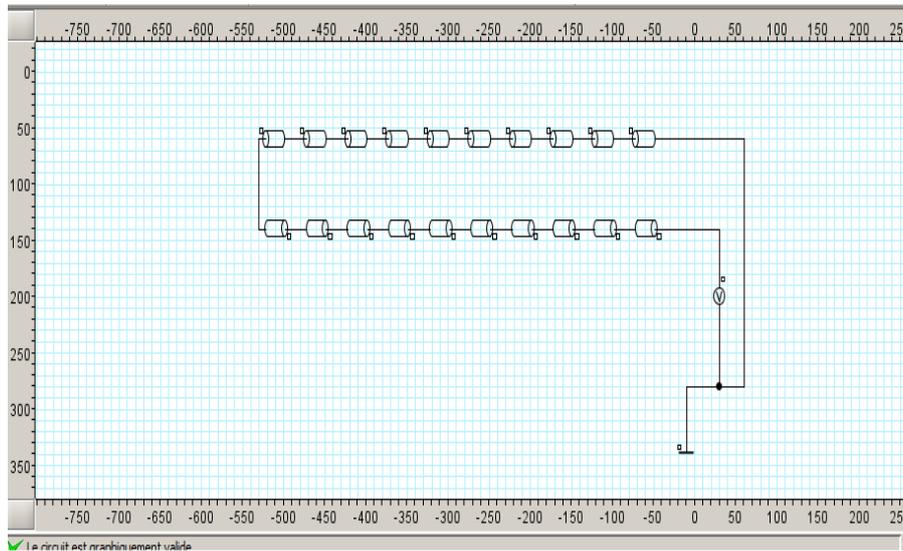
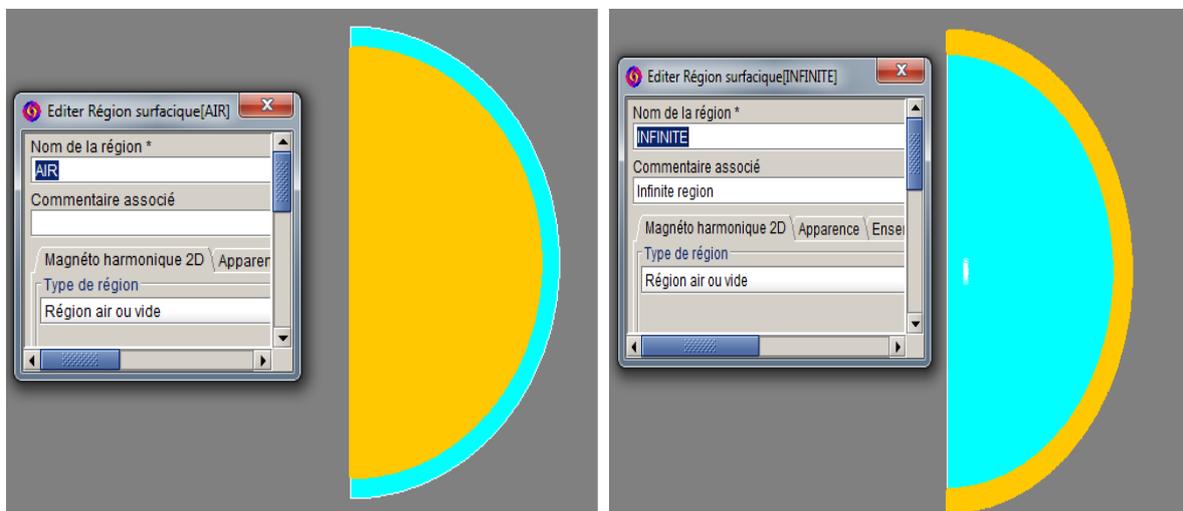


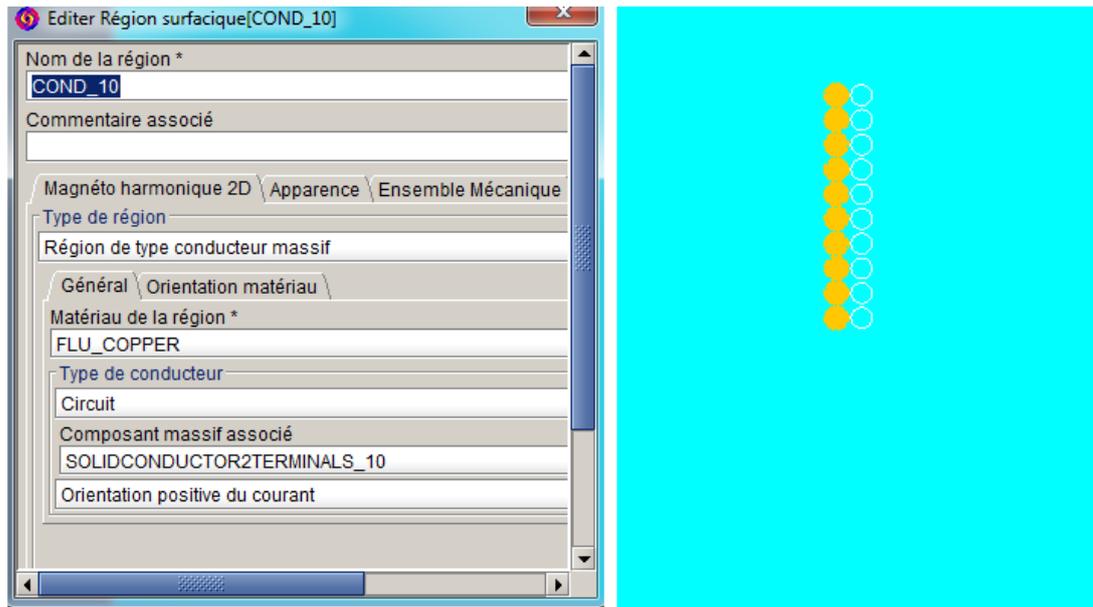
Figure A.5 : Création du circuit électrique.

#### 5)-Affectation des régions :

Physique  Régions



Air et infinité



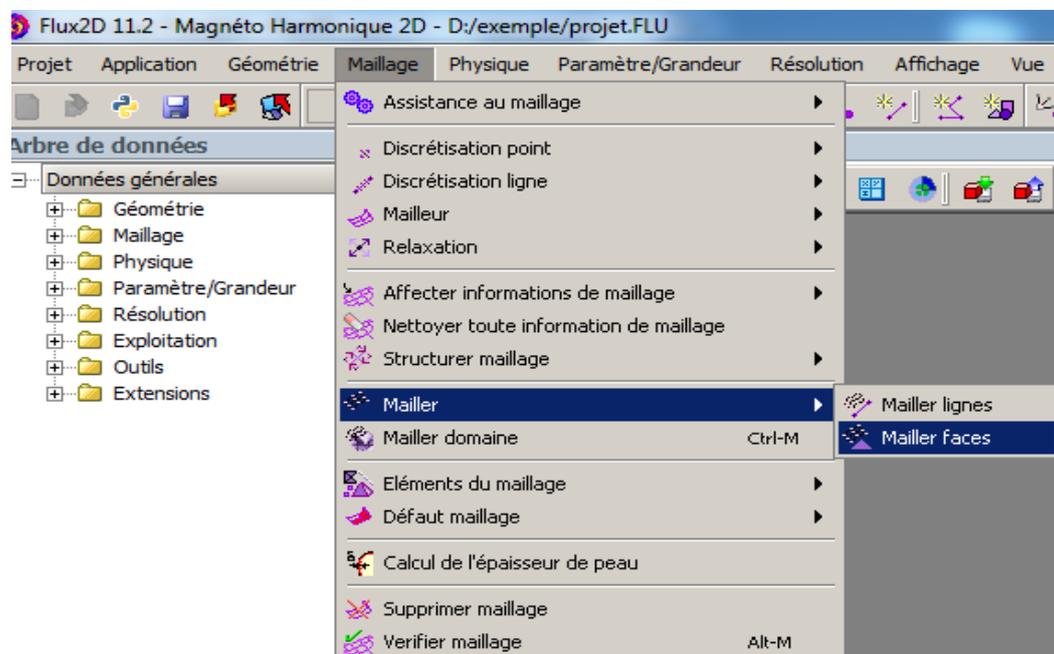
Le conducteur avec ces paramètres

Spires avec les conducteurs bobines

**Figure A.6:** Affectation des régions.

## 6- Maillage :

Maillage  $\longrightarrow$  Mailler  $\longrightarrow$  Mailler faces



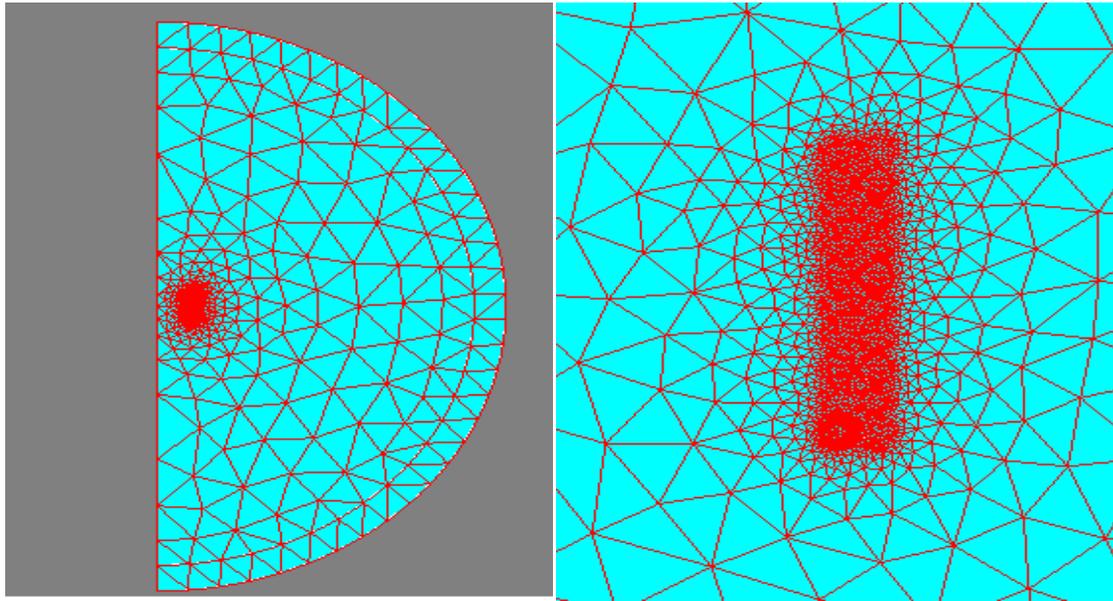


Figure A.7: Maillage.

## 7- Résolution :

Dans cette étape on va créer un scénario de résolution comme le montre la figure suivante :

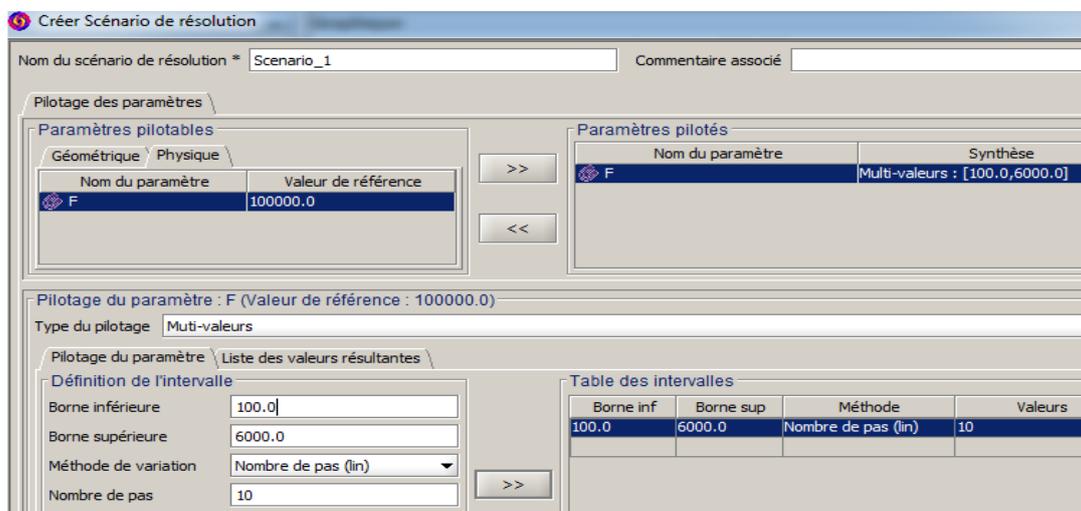
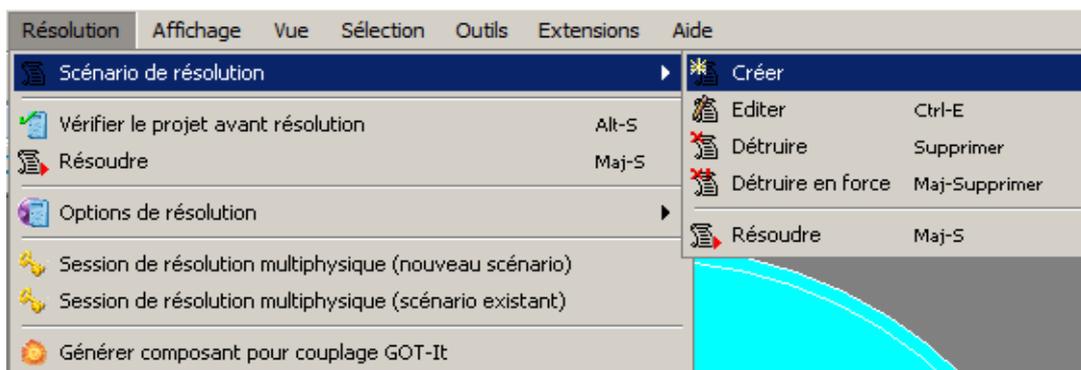


Figure A.8 : Résolution.

**B- Partie Mesure (Expérimentale) :**

- Les mesures obtenus par l'appareil RLC mètre pour la bobine quatre couche (20Hz\_1kHz) :

Fréquence [Hz]	X (Ohm)	R [Ohm]
20	0,10392	1,70166
29,8	0,15336	1,70118
39,6	0,20274	1,70083
49,4	0,25201	1,70064
59,2	0,30129	1,70032
69	0,35056	1,69981
78,8	0,39961	1,69979
88,6	0,4489	1,69962
98,4	0,49807	1,69947
108,2	0,54748	1,69948
118	0,59698	1,69947
127,8	0,6465	1,69948
137,6	0,69594	1,69948
147,4	0,74537	1,69952
157,2	0,79483	1,69953
167	0,84432	1,6996
176,8	0,89374	1,69959
186,6	0,94317	1,69962
196,4	0,99265	1,69963
206,2	1,04208	1,6996
216	1,09154	1,69966
225,8	1,14091	1,69969
235,6	1,19037	1,69973
245,4	1,23935	1,69978
255,2	1,28884	1,69976
265	1,33818	1,69982
274,8	1,3876	1,69983
284,6	1,43703	1,69987
294,4	1,48639	1,69987
304,2	1,53542	1,70008
314	1,58489	1,70017
323,8	1,63432	1,70018
333,6	1,68372	1,70017
343,4	1,7333	1,70008
353,2	1,78238	1,70108
363	1,8319	1,70049
372,8	1,88112	1,70022
382,6	1,92995	1,69905
392,4	1,9808	1,69997
402,2	2,03044	1,69976
412	2,07823	1,70047

## Annexe

421,8	2,12824	1,69922
431,6	2,17834	1,70101
441,4	2,22819	1,70113
451,2	2,27749	1,70115
461	2,32668	1,70127
470,8	2,37633	1,70101
480,6	2,42564	1,70114
490,4	2,47479	1,70154
500,2	2,52458	1,70093
510	2,57366	1,70171
519,8	2,62334	1,70141
529,6	2,67272	1,70151
539,4	2,72174	1,70162
549,2	2,77164	1,70152
559	2,82109	1,70166
568,8	2,8702	1,70172
578,6	2,91957	1,7017
588,4	2,96899	1,70176
598,2	3,01842	1,70178
608	3,06776	1,70179
617,8	3,11712	1,70178
627,6	3,16648	1,70199
637,4	3,21599	1,70195
647,2	3,26525	1,70215
657	3,31455	1,70182
666,8	3,36399	1,70193
676,6	3,41318	1,70212
686,4	3,46291	1,70207
696,2	3,51177	1,70218
706	3,56131	1,70212
715,8	3,61063	1,70241
725,6	3,65988	1,70231
735,4	3,70933	1,7023
745,2	3,75863	1,70242
755	3,80793	1,70241
764,8	3,85726	1,70237
774,6	3,9068	1,70256
784,4	3,95601	1,70252
794,2	4,00527	1,70246
804	4,05436	1,70267
813,8	4,10379	1,70276
823,6	4,15818	1,70466
833,4	4,20539	1,7046
843,2	4,25479	1,70487
853	4,30411	1,70488
862,8	4,35351	1,70485
872,6	4,40292	1,70497

882,4	4,45235	1,70502
892,2	4,50169	1,70516
902	4,5512	1,70525
911,8	4,60034	1,70531
921,6	4,64984	1,70533
931,4	4,69909	1,70535
941,2	4,7486	1,70549
951	4,79796	1,7056
960,8	4,84725	1,70551
970,6	4,89668	1,70551
980,4	4,94616	1,7057
990,2	4,99534	1,70579
1000	5,04491	1,706

Figure A.9: Tableau de mesure (20Hz\_1kHz).

➤ Les mesures pour la bobine quatre couche (1kHz\_600kHz):

Fréquence [kHz]	X [Ohm]	R [Ohm]
1	5,045	1,70654
1,599	8,06265	1,71127
2,198	11,0794	1,71741
2,797	14,1062	1,7251
3,396	17,1368	1,73423
3,995	20,1553	1,7443
4,594	23,174	1,75523
5,193	26,1909	1,76944
5,792	29,2071	1,78409
6,391	32,2027	1,79979
6,99	35,2155	1,81839
7,589	38,2411	1,83397
8,188	41,256	1,85344
8,787	44,2711	1,87594
9,386	47,2862	1,89813
9,985	50,2994	1,92057
10,584	53,3152	1,94581
11,183	56,3287	1,97303
11,782	59,3452	2,00036
12,381	62,3581	2,0301
12,98	65,3764	2,05918
13,579	68,3885	2,09168
14,178	71,4056	2,12383
14,777	74,4932	2,15972
15,376	77,5136	2,19598
15,975	80,5317	2,23191
16,574	83,5484	2,26898
17,173	86,567	2,30977

## Annexe

137,572	736,103	27,0942
138,171	739,785	27,2711
138,77	743,472	27,452
139,369	747,167	27,6306
139,968	750,853	27,8234
140,567	754,56	28,0024
141,166	758,289	28,1904
141,765	761,992	28,3688
142,364	765,731	28,5573
142,963	769,445	28,7535
143,562	773,209	28,9334
144,161	776,956	29,1313
144,76	780,722	29,3148
145,359	784,506	29,5109
145,958	788,295	29,6784
146,557	792,068	29,8846
147,156	795,864	30,071
147,755	799,679	30,2761
148,354	803,504	30,4598
148,953	807,314	30,667
149,552	811,115	30,8636
150,151	814,97	31,0526
150,75	818,813	31,2526
151,349	822,661	31,4533
151,948	826,515	31,6449
152,547	830,408	31,8324
153,146	834,288	32,0494
153,745	838,158	32,2432
154,344	842,08	32,4573
154,943	845,974	32,6384
155,542	849,929	32,85
156,141	853,795	33,0447
156,74	857,749	33,2535
157,339	861,714	33,4622
157,938	865,685	33,6378
158,537	869,632	33,8567
159,136	873,62	34,0823
159,735	877,572	34,2828
160,334	881,577	34,4755
160,933	885,562	34,7028
161,532	889,6	34,9057
162,131	893,615	35,1301
162,73	897,642	35,3326
163,329	901,681	35,5204
163,928	905,697	35,7366
164,527	909,801	35,9524
165,126	913,875	36,1965
165,725	917,965	36,4016
166,324	922,061	36,621
166,923	926,174	36,8284

## Annexe

167,522	930,274	37,0538
168,121	934,417	37,277
168,72	938,549	37,5014
169,319	942,683	37,7183
169,918	946,838	37,9264
170,517	951,039	38,1641
171,116	955,227	38,4088
171,715	959,395	38,6244
172,314	963,61	38,8512
172,913	967,835	39,0744
173,512	972,02	39,3045
174,111	976,257	39,5376
174,71	980,544	39,7611
175,309	984,787	39,9787
175,908	989,043	40,2277
176,507	993,345	40,491
177,106	997,639	40,7007
177,705	1001,94	40,9208
178,304	1006,27	41,1488
178,903	1010,56	41,414
179,502	1014,88	41,6394
180,101	1019,27	41,8786
180,7	1023,6	42,1123
181,299	1027,98	42,3723
181,898	1032,36	42,6203
182,497	1036,77	42,8445
183,096	1041,18	43,1049
183,695	1045,64	43,3536
184,294	1050,05	43,5996
184,893	1054,46	43,8369
185,492	1058,96	44,1003
186,091	1063,41	44,3495
186,69	1067,92	44,6041
187,289	1072,46	44,8287
187,888	1076,97	45,0963
188,487	1081,48	45,3694
189,086	1086,04	45,6076
189,685	1090,62	45,8761
190,284	1095,17	46,1348
190,883	1099,77	46,3958
191,482	1104,34	46,658
192,081	1108,95	46,934
192,68	1113,57	47,1848
193,279	1118,23	47,4543
193,878	1122,86	47,7213
194,477	1127,59	48,0057
195,076	1132,29	48,2861
195,675	1136,95	48,5261
196,274	1141,63	48,848
196,873	1146,32	49,0975

## Annexe

197,472	1151,19	49,3667
198,071	1155,91	49,6481
198,67	1160,63	49,9153
199,269	1165,44	50,2326
199,868	1170,25	50,4966
200,467	1175,07	50,8106
201,066	1179,89	51,0863
201,665	1184,72	51,3492
202,264	1189,62	51,6894
202,863	1194,53	51,9407
203,462	1199,38	52,1974
204,061	1204,32	52,5254
204,66	1209,28	52,8194
205,259	1214,22	53,1395
205,858	1219,19	53,4259
206,457	1224,17	53,7347
207,056	1229,2	54,0348
207,655	1234,16	54,3469
208,254	1239,22	54,6116
208,853	1244,25	54,9533
209,452	1249,33	55,2653
210,051	1254,42	55,5748
210,65	1259,53	55,8907
211,249	1264,65	56,2017
211,848	1269,77	56,5289
212,447	1274,94	56,8555
213,046	1280,09	57,1791
213,645	1285,33	57,4829
214,244	1290,5	57,8031
214,843	1295,73	58,1323
215,442	1300,96	58,4423
216,041	1306,23	58,8136
216,64	1311,54	59,1302
217,239	1316,87	59,4726
217,838	1322,19	59,8217
218,437	1327,56	60,1275
219,036	1332,76	60,497
219,635	1338,14	60,8601
220,234	1343,52	61,1897
220,833	1348,92	61,5412
221,432	1354,34	61,8633
222,031	1359,81	62,2607
222,63	1365,27	62,6016
223,229	1370,79	62,9551
223,828	1376,3	63,3122
224,427	1381,86	63,6822
225,026	1387,42	64,0674
225,625	1392,96	64,4206
226,224	1398,57	64,7786
226,823	1404,19	65,1557

## Annexe

317,272	2629,87	173,501
317,871	2641,78	174,746
318,47	2653,86	176,084
319,069	2666,02	177,502
319,668	2678,31	178,878
320,267	2690,52	180,302
320,866	2702,93	181,724
321,465	2715,46	183,165
322,064	2728,05	184,636
322,663	2740,62	186,084
323,262	2753,41	187,592
323,861	2766,21	189,1
324,46	2779,06	190,607
325,059	2792,06	192,165
325,658	2805,21	193,703
326,257	2818,4	195,297
326,856	2831,59	196,804
327,455	2844,98	198,436
328,054	2858,41	200,013
328,653	2871,99	201,735
329,252	2885,55	203,383
329,851	2899,35	205,054
330,45	2913,11	206,754
331,049	2927,04	208,536
331,648	2941,17	210,228
332,247	2955,28	211,986
332,846	2969,48	213,767
333,445	2983,9	215,558
334,044	2998,28	217,382
334,643	3012,8	219,185
335,242	3027,5	221,09
335,841	3042,23	223,046
336,44	3057,1	224,955
337,039	3072,12	226,866
337,638	3087,26	228,813
338,237	3102,41	230,749
338,836	3117,63	232,751
339,435	3133,1	234,839
340,034	3148,7	236,912
340,633	3164,35	238,973
341,232	3180,26	241,114
341,831	3196,01	243,172
342,43	3212,14	245,341
343,029	3228,34	247,555
343,628	3244,66	249,76
344,227	3260,95	252,046
344,826	3277,55	254,3
345,425	3294,25	256,653
346,024	3311,1	258,945
346,623	3327,93	261,332

## Annexe

407,122	6216,81	841,85
407,721	6265,35	854,582
408,32	6314,55	867,751
408,919	6364,6	881,182
409,518	6415,03	894,93
410,117	6466,53	908,838
410,716	6518,45	923,31
411,315	6571,4	938,017
411,914	6625,04	953,087
412,513	6679,2	968,33
413,112	6734,22	984,06
413,711	6789,93	1000,22
414,31	6846,15	1016,75
414,909	6904,6	1033,59
415,508	6963,05	1050,81
416,107	7022,39	1068,71
416,706	7082,69	1086,77
417,305	7143,77	1105,44
417,904	7206,3	1124,39
418,503	7269,55	1143,8
419,102	7333,19	1163,82
419,701	7398,53	1184,37
420,3	7464,57	1205,44
420,899	7531,71	1227,05
421,498	7599,79	1249,23
422,097	7669,34	1272,25
422,696	7739,64	1295,35
423,295	7811,1	1319,28
423,894	7883,65	1343,8
424,493	7957,74	1369,06
425,092	8033,28	1395,04
425,691	8109,48	1421,51
426,29	8187,43	1449,18
426,889	8266,5	1477,33
427,488	8347,28	1506,25
428,087	8428,69	1535,88
428,686	8512,36	1566,78
429,285	8597,14	1598,42
429,884	8683,72	1630,78
430,483	8771,54	1664,55
431,082	8861,13	1698,97
431,681	8952,22	1734,49
432,28	9044,97	1770,71
432,879	9139,38	1808,71
433,478	9235,91	1847,28
434,077	9333,99	1887,56
434,676	9434,1	1929,11
435,275	9535,72	1971,93
435,874	9640,24	2015,72
436,473	9745,89	2061,22

## Annexe

496,972	-22492,4	35448,6
497,571	-23191,4	33823,4
498,17	-23754,4	32216,3
498,769	-24192,2	30670,3
499,368	-24504	29176,6
499,967	-24715,2	27733,4
500,566	-24839,5	26357,6
501,165	-24892,7	25042,8
501,764	-24877,7	23795,8
502,363	-24793,3	22616,4
502,962	-24670,2	21496,8
503,561	-24510,3	20449
504,16	-24306,2	19449
504,759	-24075,2	18509,8
505,358	-23829,9	17629,4
505,957	-23560,6	16795,1
506,556	-23276,7	16012,7
507,155	-22985,6	15275,5
507,754	-22688,6	14583,3
508,353	-22379,7	13932,7
508,952	-22067,3	13318,5
509,551	-21753,6	12739,1
510,15	-21440,3	12193,2
510,749	-21130,2	11678,5
511,348	-20818	11196,3
511,947	-20509	10740,7
512,546	-20205,8	10308,5
513,145	-19904	9899,9
513,744	-19605,8	9513,9
514,343	-19314,9	9147,9
514,942	-19028,7	8803,49
515,541	-18746,4	8474,85
516,14	-18469,9	8167,54
516,739	-18197,9	7872,26
517,338	-17935,6	7592,05
517,937	-17677,1	7330,62
518,536	-17418,6	7075,19
519,135	-17168,1	6836,8
519,734	-16924,8	6607,17
520,333	-16686,4	6393,08
520,932	-16452,6	6183,97
521,531	-16224,8	5987
522,13	-16001,7	5798,6
522,729	-15784,7	5618,93
523,328	-15571,7	5447,61
523,927	-15364,7	5283,57
524,526	-15161,5	5126,65
525,125	-14963,5	4977,04
525,724	-14770,4	4832,01
526,323	-14579,9	4694,7

## Annexe

556,872	-8713,46	1570,99
557,471	-8645,91	1544,62
558,07	-8577,87	1520,95
558,669	-8513,22	1497,56
559,268	-8446,13	1473,47
559,867	-8382,23	1450,6
560,466	-8318,86	1428,35
561,065	-8256,01	1406,25
561,664	-8195,4	1385,71
562,263	-8134,9	1364,1
562,862	-8075,35	1344
563,461	-8016,29	1324,76
564,06	-7958,02	1304,92
564,659	-7902,21	1284,89
565,258	-7845,85	1267,43
565,857	-7790,34	1249,6
566,456	-7735,86	1231,64
567,055	-7681,9	1214,37
567,654	-7628,71	1197,61
568,253	-7576,78	1180,88
568,852	-7525,07	1164,57
569,451	-7474,29	1148,49
570,05	-7424,32	1133,05
570,649	-7374,69	1117,72
571,248	-7326,2	1103,1
571,847	-7278,13	1088,4
572,446	-7230,82	1074,03
573,045	-7183,13	1060,05
573,644	-7136,88	1046,45
574,243	-7091,58	1033
574,842	-7046,44	1020,06
575,441	-7002,23	1007
576,04	-6958,43	994,28
576,639	-6915,16	981,89
577,238	-6872,58	969,83
577,837	-6830,38	957,86
578,436	-6788,85	946,2
579,035	-6747,77	934,81
579,634	-6707,24	923,44
580,233	-6667,41	912,35
580,832	-6627,74	901,61
581,431	-6588,61	890,902
582,03	-6550,05	880,358
582,629	-6512,07	870,37
583,228	-6474,46	860,195
583,827	-6437,27	850,549
584,426	-6400,57	840,796
585,025	-6364,03	831,2
585,624	-6328,35	821,846
586,223	-6292,65	812,745

## Annexe

586,822	-6257,73	803,709
587,421	-6223,07	794,871
588,02	-6189,06	786,261
588,619	-6155,11	777,843
589,218	-6121,48	769,24
589,817	-6088,62	761,185
590,416	-6055,69	752,93
591,015	-6023,35	745,008
591,614	-5991,43	737,159
592,213	-5959,79	729,496
592,812	-5928,54	721,874
593,411	-5897,61	714,268
594,01	-5867,05	707,25
594,609	-5836,86	699,736
595,208	-5807,04	692,887
595,807	-5777,16	685,744
596,406	-5747,89	678,763
597,005	-5718,99	671,835
597,604	-5690,16	665,295
598,203	-5661,67	658,778
598,802	-5633,68	652,31
599,401	-5606,01	646,083
600	-5578,53	639,798

Figure A.10: Tableau de mesure (1kHz\_600kHz)