

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Projet de Fin d'Études  
Présenté pour l'obtention du Diplôme  
De Master en électromécanique

*Spécialité : Electromécanique*

## Thème

*Modélisation par la méthode des éléments finis d'un transformateur en vue de la détection des différentes défaillances de son bobinage*

**Proposé et dirigé par :**

Dr. HOUASSINE Hamza

Dr. CHAUCHE Moustafa

**Préparé et présenté par :**

Mr. KHALDOUNE Zakaria

Mr. SEDJAL Walid

Année Universitaire : 2017/2018

# *Dédicace*

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à notre réussite et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.*

*Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le Primaire à ce jour, en particulier : Dr. HOUASSINE Hamza et Mr.*

*CHAOUCHE Moustafa*

*Nous espérons qu'un jour, nous pourrons leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et longue vie.*

*Nous dédions aussi ce travail à nos frères et sœurs, nos familles, nos amis, tous nos professeurs qui nous ont enseigné et à tous ceux qui nous sont chers*

*A tous nos amis et nos collègues surtout et à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.*

*A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électromécanique.*

**ZAKARIA**

# *Dédicace*

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à notre réussite et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.*

*Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le Primaire à ce jour, en particulier : Dr. HOUASSINE Hamza et Mr.*

*CHAOUCHE Moustafa*

*Nous espérons qu'un jour, nous pourrons leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et longue vie.*

*Nous dédions aussi ce travail à nos frères et sœurs, nos familles, nos amis, tous nos professeurs qui nous ont enseigné et à tous ceux qui nous sont chers*

*A tous nos amis et nos collègues surtout et à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.*

*A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électromécanique.*

**WALID**

# Remerciement

*D'abord merci au **DIEU** le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*On tient à remercier **Dr. HOUASSINE hamza** chef département génie électrique à l'université d Akli Mohand Oulhadj de Bouira qui a accepté la charge de notre travail, et on lui exprime particulièrement toute notre reconnaissance pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.*

*Nous adressons nos vifs remerciements **Mr. CHAUCHE Moustafa** enseignant à l'université Yahia Farés de Médéa pour son aide pour l'accomplissement de ce travail.*

*Nous remercions les membres du jury pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives. Nous remercions également tous les enseignants de département génie électrique de l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

*On adresse nos vifs remerciements et nos profondes gratitudeux aux nos familles et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, on tient*

***Vivement à leur dire merci.***

## *Table des matières*

---

Remerciement

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviation

Introduction générale ..... 1

### *Chapitre I : Généralité sur le transformateur*

I.1 Introduction..... 3

I.2 Définition d'un transformateur ..... 3

I.3 Principe de fonctionnement ..... 4

I.4 Constitution de transformateur ..... 5

I.4.1 Le circuit magnétique..... 5

I.4.2 Les enroulements ..... 6

I.4.2.1 Emplacement des bobinages ..... 7

I.4.2.2 Réalisation..... 8

I.5 Technologies de bobinages ..... 8

I.5.1 Technologie Cuirassé..... 9

I.5.2 Technologie Colonne ..... 10

I.5.2.1 L'enroulement en couches [7]..... 10

I.5.2.2 L'enroulement en galettes ..... 11

I.6 Les différents types de défauts étudiés ..... 12

I.6.1 Point chaud régleur ..... 12

I.6.2 Défaut de type électrodynamique ..... 13

I.6.4 Fuite d'huile ..... 14

I.7 Détection de la déformation de bobinage de transformateur ..... 15

---

## *Table des matières*

---

I.7.1 Méthode de comparaison de réactance .....	15
I.7.2 Fréquence d'analyse de réponse (FRA).....	15
I.8 Diagnostic de défaut.....	15
I.9 Techniques de diagnostic .....	16
I.10 Diagnostic des enroulements.....	16
I.11 Conclusion .....	18

### ***Chapitre II : Modélisation par la méthode des éléments finis (MEF)***

II.1 Introduction .....	19
II.2 Modélisation et discrétisation des éléments finis .....	19
II.2.1 Modélisation du comportement de la structure : .....	19
II.2.2 Discrétisation de la structure modélisée :.....	20
II.2.2.1 Le maillage : .....	20
II.2.2.1.1 Les types de maillage : .....	20
II.3 Le couplage avec la méthode des éléments finis .....	21
II.3.1 Technique mixte circuits couplés-éléments finis : .....	22
II.3.2 Formulation éléments finis des électromagnétique du noyau : .....	22
II.3.2.1 Formulation intégrale : .....	23
II.3.2.1.1 Formulation variationnelle : .....	23
II.3.2.1.2 Méthode des résidus pondérés :.....	24
II.4 Élément de référence .....	24
II.5 Approximation sur un élément 2D .....	25
II.5.1 Fonctions d'interpolation d'un élément triangulaire : .....	25
II.6 Avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis.....	29
II.6.1 Avantages : .....	29
II.6.2 Les inconvénients : .....	29

---

## *Table des matières*

---

II.7 Utilisation d'un logiciel éléments finis .....	29
II.7.1 Parcours pédagogique :.....	30
II.7.2 Organigramme d'un logiciel éléments finis : .....	30
II.7 L'équation magnétodynamique par la méthode des éléments finis.....	32
II.8.1 Ecriture intégrale de l'équation .....	32
II.9 Conclusion .....	35

### ***Chapitre III : Calcule des paramètres de l'enroulement par MEF***

III.1 Introduction .....	36
III.2 Modélisation par MEF du bobinage testé.....	36
III.2.1 Géométrie de l'enroulement étudié : .....	36
III.2.2 Résultats de simulation en flux 2D : .....	37
III.2.2.1 Tension appliquée : .....	37
III.2.2.2 Présentation de l'induction magnétique du bobinage : .....	37
III.2.2.4 Présentation du banc d'essai : .....	38
III.3 Méthodologie de calcul des paramètres de l'enroulement par l'exploitation du modèle élément finis du bobinage .....	39
III.3.1. Calcul des inductances propres et mutuelles :.....	39
III.3.2 Calcul des capacités de l'enroulement : .....	40
III.3.2.1 Calcul de capacité série (Cs) : .....	40
III.3.2.2. Calcul de capacité avec la terre (Cg) :.....	41
III.3.3 Modèle équivalent du bobinage : .....	41
III.4 Simulation des défauts étudiés .....	44
III.4.1 La déformation axiale : .....	44
III.4.1.1 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 1 et 2 : .....	45
III.4.1.2 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 2 et 3 : .....	46
III.4.1.3 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 3 et 4 : .....	46

---

## *Table des matières*

---

III.4.1.4 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 4 et 5 : .....	46
III.4.2 Analyse de la réponse fréquentielle de l'enroulement déformé : .....	47
III.5 Détection de défaut.....	48
III.6 Localisation de défaut de long de l'enroulement .....	48
III.6.1. Localisation du défaut de la déformation de long du bobinage : .....	48
III.7 Conclusion .....	52
Conclusion générale.....	53
<b>Bibliographie</b>	
<b>Résumé.</b>	

---

# *Liste des figures*

## *Liste des figures*

---

### **Chapitre I :**

<b>Figure (I.1) :</b> Transformateur classique le bobinage primaire et secondaire sont séparés. ....	4
<b>Figure (I.2) :</b> Transformateur généralisé .....	5
<b>Figure (I.3) :</b> Schémas des tôles d'un transformateur. ....	6
<b>Figure (I.4) :</b> Schémas de la carcasse d'un transformateur monophasé bas de gamme .....	6
<b>Figure (I.5) :</b> Enroulement de transformateur .....	7
<b>Figure (I.6) :</b> Schéma de transformateur cuirassé. ....	9
<b>Figure (I.7) :</b> Le transformateur à colonnes. ....	10
<b>Figure (I.8) :</b> Enroulements de la couche. ....	11
<b>Figure (I.9) :</b> Enroulement en galettes .....	12
<b>Figure (I.10) :</b> Point chaud régleur.....	13
<b>Figure (I.11) :</b> Déformation électrodynamique. ....	13
<b>Figure (I.12) :</b> Déformation diélectrique.....	14
<b>Figure (I.13) :</b> Déformation de Fuite d'huile. ....	15

### **Chapitre II :**

<b>Figure (II.1) :</b> Etape de l'analyse d'un problème aux limites. ....	19
<b>Figure (II.2) :</b> Maillage triangulaire (3 et 6 nœuds) .....	20
<b>Figure (II.3) :</b> Maillage quadrangle (4, 8 et 9 nœuds).....	20
<b>Figure (II.4) :</b> Discrétisation d'un domaine par le maillage. ....	21
<b>Figure (II.5) :</b> Discrétisation des enroulements et du noyau.....	22
<b>Figure (II.6) :</b> Éléments à deux dimensions. ....	25
<b>Figure (II.7) :</b> Élément triangulaire.....	26
<b>Figure (II.8) :</b> Organigramme d'un logiciel éléments finis.....	31
<b>Figure (II.9) :</b> Dispositif électro magnétique .....	32

### **Chapitre III**

<b>Figure (III.1) :</b> Géométrie de la bobine testée .....	36
---	----

---

## *Liste des figures*

---

<b>Figure (III.2) : Tension appliqué à l'enroulement étudié .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure (III.3) : Induction magnétique.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure (III.4) : Appareil de mesure RLC mètre.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure (III.5) : Bobine test.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure (III.6) : Ordinateur.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure (III.7) : Champ magnétique d'une spire.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure (III.8) : représentation physique des paramètres capacitifs de bobinage .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure (III.9) : Banc d'essai.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure (III.10) : Schéma équivalent du bobinage.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure (III.11) : Comparaison entre la réponse en fréquence Mesurée et Simulée de l'impédance .....</b>	<b>42</b>
<b>Figure (III.12) : Comparaison entre les fréquences de résonance mesurés et calculés. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figure (III.13) : la déformation axiale de l'enroulement.....</b>	<b>45</b>
<b>Figure (III.14) : Comparaison de la réponse en fréquence d'un enroulement sain et des enroulements affectés par la déformation axiale.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure (III.15) : Inductances mutuelles déformation entre disques 1-2 .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure (III.16) : Inductances mutuelles déformation entre disques 1-2 .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure (III.17) : Inductances mutuelles déformation entre disques 3-4. ....</b>	<b>50</b>
<b>Figure (III.18) : Inductances mutuelles déformation entre disques 4-5. ....</b>	<b>50</b>

---

# *Liste des tableaux*

**Chapitre III :**

<b>Tableau (III.1) :</b> Les valeurs inductances propres et mutuelles de l'enroulement sain. ....	39
<b>Tableau (III.2) :</b> Comparaison entre les fréquences de résonance de la mesure et celles de calculé par MEF. ....	43
<b>Tableau (III.3) :</b> Les valeurs des inductances propres et mutuelles à déformation 1-2.....	45
<b>Tableau (III.4) :</b> Les valeurs des inductances propre et mutuelles à déformation 2-3 .....	46
<b>Tableau (III.5) :</b> Les valeurs des inductances propre et mutuelles à déformation 3-4 .....	46
<b>Tableau (III.6) :</b> Les valeurs des inductances propre et mutuelles à déformation axiale 4-5.	46
<b>Tableau (III.7) :</b> Comparaison entre les fréquences de coupure d'un enroulement sain et un défaut de déformation axiale. ....	47
<b>Tableau (III.9) :</b> Valeur des inductances mutuelle de l'enroulement concerne par le défaut de déformation par rapport à l'enroulement sain. ....	51

---

# *Abréviations*

**Abréviation**

**SFRA** : ANALYSE DE LA REPONSE EN FREQUENCE DE BALAYAGE.

**DFR** : REPONSE EN FREQUENCE DIELECTRIQU.

**FRSL** : REPONSE EN FREQUENCE DES PERTES.

**RLC** : RESISTANCE-INDUCTANCE-CAPACITE.

**FRA** : FREQUENCE D'ANALYSE DE REPONSE.

**MEF** : METHODE DES ELEMENTS FINI.

**C-C**: COURT-CIRCUIT.

**DEF**: DEFORMATION.

**LS** : INDUCTANCE PROPRE.

**Cs** : CAPACITE SERIE.

**Cg** : CAPACITE AVEC LA TERRE.

**kVA**: KILO VOLT AMPER.

**kV**: KILO VOLT.

**MVA**: MEGA VOLT AMPER.

**V**: VOLT.

**Hz**: HERTZ

**kHz**: KILOHERTZ.

**mHz**: MEGAHERTZ.

**A**: AMPERE.

**mH** : MILI-HENRY.

**F**: FARAD. **F<sub>0</sub>** : FREQUENCE DE COUPURE.

**$\Delta f_0$**  : TAUX DE DECALAGE DES FREQUENCES DE RESONANCE.

---

# *Introduction générale*

### **Introduction générale**

Le transformateur est un convertisseur d'énergie électrique alternatif, dont les enroulements sont isolés l'un de l'autre.

Les deux fonctions principales sont la transmission isolée d'énergie et la modification du niveau de tension d'une source alternative.

La structure géométrique des enroulements du transformateur est soumise à des forces mécaniques, ces contraintes imposées aux transformateurs peuvent entraîner des déformations mécaniques dans les enroulements.

La maintenance des transformateurs est un facteur important pour la fiabilité et de la maintenabilité de l'alimentation électrique.

L'analyse de la réponse en fréquence (souvent appelée technique FRA ou SFRA) est une méthode efficace et sensible pour tester l'intégrité mécanique des circuits magnétiques, des enroulements.

Le test de la réponse en fréquence est recommandé, notamment après le transport des transformateurs ou après l'apparition de défauts à des courants élevés. Vous pouvez utiliser notre solution de test pour vérifier si les enroulements ont été endommagés et déclencher éventuellement toute action future nécessaire.

- La réponse en fréquence est généralement caractérisée par l'amplitude de la réponse du système, mesurée en décibels, et la phase, mesurée en degrés en fonction de la fréquence. La réponse en fréquence d'un système peut être mesurée.
- En appliquant une impulsion au système et en mesurant sa réponse (voir réponse impulsionnelle) : En balayant une amplitude constante de fréquences situées dans la bande passante d'intérêt et en mesurant le niveau de sortie et de déphasage par rapport à l'entrée.

L'objectif de ce travail est une modélisation par la méthode des éléments finis d'un enroulement du transformateur en vue la détection des différents qui peuvent y avoir lieu.

Notre mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est une étude bibliographie sur le transformateur.

## *Introduction générale*

---

Le second chapitre porte sur une présentation de la méthode des éléments finis comme un outil de modélisation de bobinage du transformateur.

Le dernier chapitre est l'application de la méthode des éléments finis par l'identification des paramètres du module du transformateur en vue de son diagnostic.

# *Chapitre I*

## *Généralité sur le transformateur*

## I.1 Introduction

Le réseau électrique est constitué de plusieurs composants pour assurer une bonne transmission de l'énergie vers différents utilisateurs. Parmi ces composants, on trouve le transformateur [1]. Le transformateur est une machine électrique statique à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative, mais de même fréquence et de même forme [2]. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est analogue à un engrenage en mécanique (le couple sur chacune des roues dentées étant l'analogue du courant et la vitesse de rotation étant l'analogue de la tension). [3]

On peut distinguer les transformateurs statiques et les commutatrices. Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que forme la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci sert à réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits. [3]

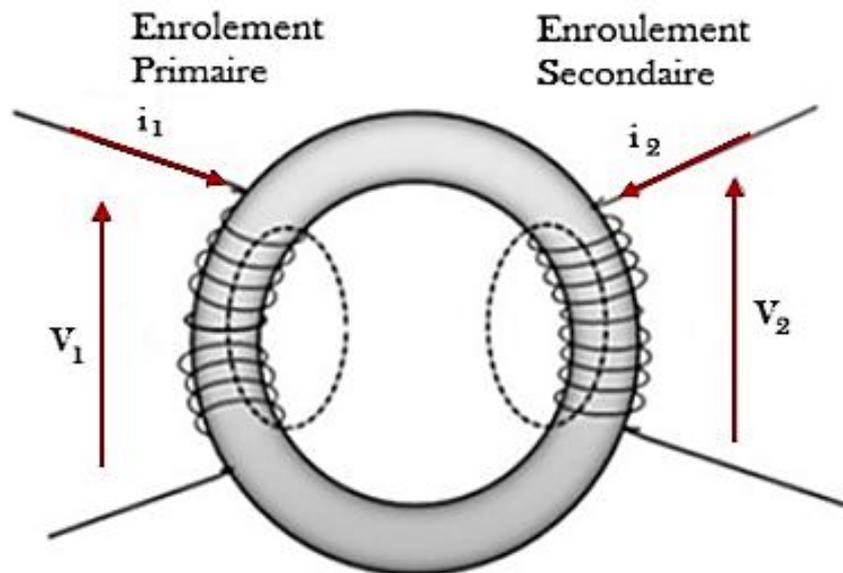
Dans une commutatrice, l'énergie est transmise de manière mécanique entre une génératrice et un moteur électrique. [3]

## I.2 Définition d'un transformateur [4]

Un transformateur est un composant magnétique qui permet de modifier les valeurs des courants et/ou des tensions délivrées par une source alternative reliée au primaire en d'autres valeurs de courants ou tensions au secondaire sans changer la forme et la fréquence du signal initial. Classiquement les deux parties du transformateur n'ont aucune liaison électrique entre elles, c'est-à-dire que les enroulements primaire et secondaire sont isolés galvaniquement.

Le transformateur est généralement constitué de deux bobinages fortement couplés, d'un noyau et d'un isolant :

- Les bobinages primaire et secondaire : ils sont constitués d'un conducteur souvent en cuivre et éventuellement en aluminium, bobinés autour du noyau **figure (I.1)**.
- Le noyau : peut-être magnétique ou non selon l'application désirée, mais l'utilisation d'un matériau magnétique permet de mieux canaliser les lignes de champ magnétique et ainsi d'augmenter les performances du transformateur.
- Les isolants : ils assurent l'isolation électrique entre spires, entre les couches des bobinages et entre les deux bobinages du transformateur **figure (I.1)**.



**Figure (I.1) :** Transformateur classique le bobinage primaire et secondaire sont séparés. [4]

### I.3 Principe de fonctionnement [2]

L'un des deux bobinages joue le rôle de primaire, il est alimenté par une tension variable et donne naissance à un flux magnétique variable dans le circuit magnétique. Le circuit magnétique conduit avec le moins de réluctance possible les lignes de champ magnétique créées par le primaire dans les spires de l'enroulement secondaire. D'après la loi de Faraday, ce flux magnétique variable induit une force électromotrice dans le deuxième bobinage appelé secondaire du transformateur. Le transformateur ne peut pas fonctionner s'il est alimenté par une tension continue, le flux doit être variable pour induire une f.é.m. au secondaire, il faut donc que la tension primaire soit variable. Le transformateur est réversible, chaque bobinage peut jouer le rôle de primaire ou de secondaire. Le transformateur peut être abaisseur ou élévateur de tension. La figure (I.1) représente le schéma électromagnétique du transformateur généralisé, qui constitue la base de l'analyse de n'importe quel transformateur :

- Un circuit magnétique fermé, son rôle est de transmettre le plus efficace possible l'énergie magnétique du primaire, qui la génère, au secondaire.

- Deux bobinages :
  - Le primaire alimenté par un générateur de tension alternative de tension  $V_1$  et comportant  $n_1$  spires. Il absorbe un courant  $I_1$ . Le primaire transforme l'énergie électrique reçue en énergie magnétique.
  - Le secondaire comporte  $n_2$  spires ; il fournit, sous la tension  $V_2$ , un courant  $I_2$  au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique reçue du primaire en énergie électrique.

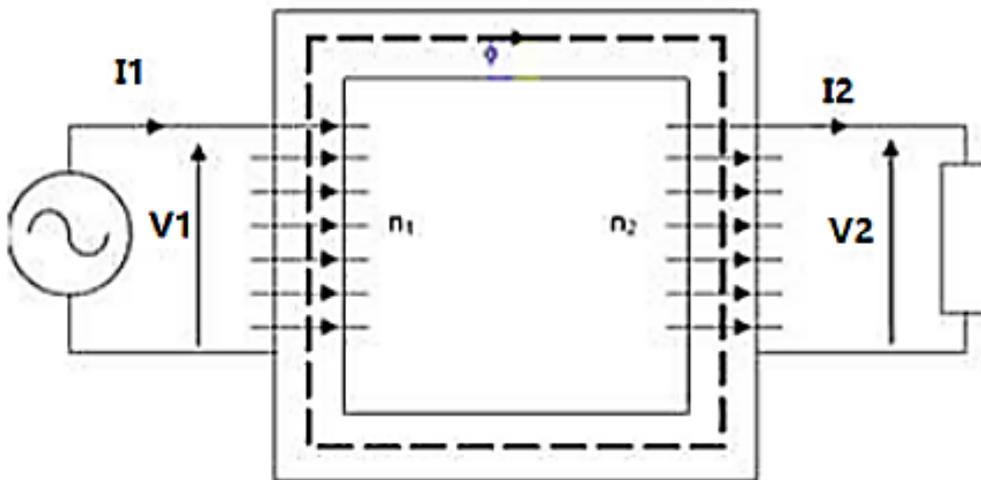


Figure (I.2) : Transformateur généralisé. [2]

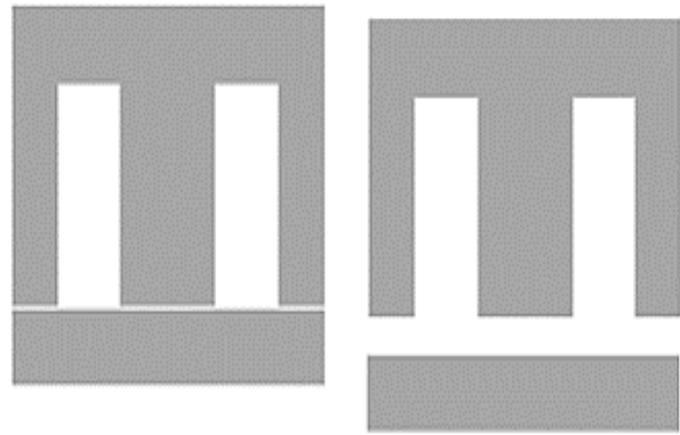
## I.4 Constitution de transformateur

Il est constitué de deux parties principales, le circuit magnétique et les bobinages (circuit électrique). [3]

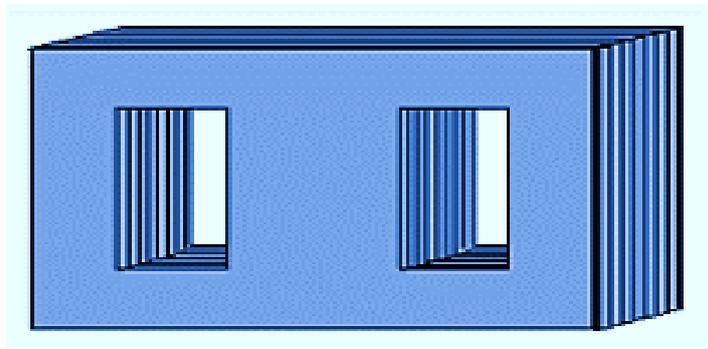
### I.4.1 Le circuit magnétique

Le circuit magnétique d'un transformateur est soumis à un champ magnétique variable au cours du temps. Pour les transformateurs reliés au secteur de distribution, cette fréquence est de 50 ou 60 hertz. Le circuit magnétique est le plus souvent feuilleté pour diminuer les pertes par courants de Foucault, qui dépendent de l'amplitude du signal et de sa fréquence. Pour les transformateurs les plus courants, les tôles empilées ont la forme de E et de I, donnant la possibilité ainsi de glisser une bobine au sein des fenêtres du circuit magnétique ainsi constitué.

Les circuits magnétiques des transformateurs « haut de gamme » ont la forme d'un tore. Le bobinage des tores étant plus délicat, le prix des transformateurs toroïdaux est nettement plus. [3]



**Figure (I.3) :** Schémas des tôles d'un transformateur. [3]



**Figure (I.4) :** Schémas de la carcasse d'un transformateur monophasé bas de gamme. [3]

#### I.4.2 Les enroulements [5]

Les enroulements sont constitués des conducteurs transportant le courant ils sont enroulés autour des sections de l'âme, et ceux-ci doivent être correctement isolés, soutenus et refroidis à résister à des conditions d'exploitation et d'essai.

Le Cuivre et l'aluminium sont les principaux matériaux utilisés pour la fonction les enroulements des transformateurs de puissance. Bien que l'aluminium soit plus léger et moins coûteux que le cuivre, une section transversale du conducteur en aluminium plus importante doit être utilisé pour transporter un courant avec une performance similaire à celle du cuivre.

Le cuivre a une résistance mécanique plus élevée et il est utilisé presque exclusivement, sauf dans les gammes de plus petite taille, où des conducteurs en aluminium peuvent être tout à fait acceptables.



**Figure (I.5) :** Enroulement de transformateur. [5]

#### I.4.2.1 Emplacement des bobinages [6]

Selon l'emplacement des enroulements sur les colonnes on distingue :

- **Bobinage concentrique (en tonneau) :**

L'enroulement BT est placé près de la colonne car la distance d'isolation entre la bobine et la colonne sera la plus faible.

- **Bobinage mixte :**

Pour éviter les très forts ddp entre les spires d'extrémité de deux couches successives, on réalise des bobines plates (galettes) qui sont montées en série les unes avec les autres.

- **Bobinage alterné en galettes :**

Les galettes MT et BT sont alternées, l'empilage est terminé par les galettes BT plus faciles à isoler du circuit magnétique.

### I.4.2.2 Réalisation [6]

Suivant le mode de réalisation de bobinage on distingue les bobines en cylindre des ceux en hélice.

- **Enroulement en cylindre :**

Ils sont soit en une seule couche, soit en plusieurs couches.

Les bobines cylindriques en plusieurs couches en conducteur à section circulaire sont utilisés comme enroulement HT pour une tension  $< 36$  kv.

- **Enroulement en hélice :**

La bobine est composée de spires utilisant de 4 à 20 conducteurs de section carrée en parallèle. Pour diminuer les pertes du au non symétrie de distribution du flux, on réalise une transposition des conducteurs au sein des spires. Les enroulements en hélice sont les plus robustes et sont utilisés comme bobinage BT pour des transformateurs de grande puissance ( $I > 300$  A).

## I.5 Technologies de bobinages [7]

Pour réaliser un enroulement de transformateur d'une tension nominale donnée et d'un nombre de spires défini, deux technologies de bobinages sont réalisables : cuirassé ou colonne.

Chacune d'elles est caractérisée par sa configuration d'enroulements par rapport au circuit magnétique. La technologie dite cuirassé consiste à disposer les bobines au centre du circuit magnétique. Dans la technologie colonne, c'est l'inverse.

Chaque technologie tient les contraintes qui lui sont définies dans le cahier des charges. Le choix de l'une ou l'autre des technologies de bobinages relèvera souvent du constructeur.

Chacune d'elles a ses avantages qui peuvent être :

- Un gain de place (cuirassé)
- Une meilleure tenue au court-circuit (cuirassé)
- Un meilleur refroidissement (couches)
- Une meilleure tenue au choc de foudre (couches)
- Une (relative) facilité de réalisation et bonne tenue diélectrique (galettes)

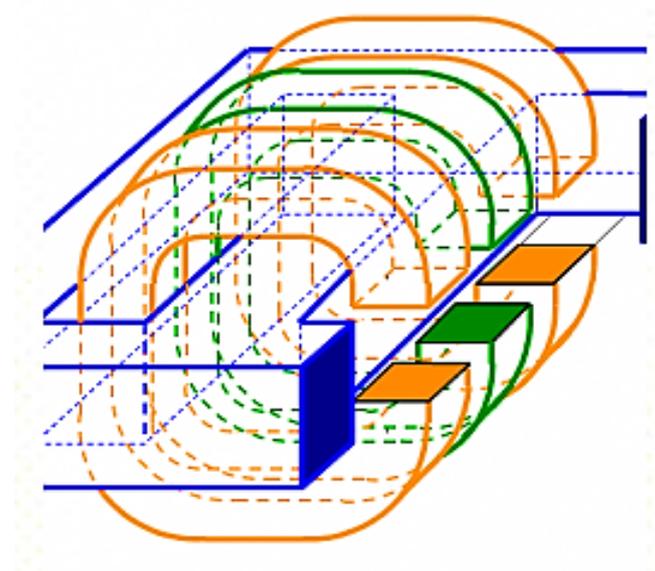
TSV est capable de rebobiner tout type d'enroulements de par son savoir-faire, son expérience et son outil industriel qui ont été pérennisés depuis 1922.

### I.5.1 Technologie Cuirassé [7]

Dans la technologie cuirassée le circuit magnétique entoure les bobinages hauts et basse tension d'une phase donnée, comme sur la figure ci-dessous.

Dans ces transformateurs cuirassés les chemins de retour du flux magnétique à travers le circuit magnétique sont externes et entourent les bobinages. Grâce à son excellent arrangement de l'écrantage magnétique le transformateur cuirassé correspond particulièrement bien à la fourniture de basse tension et fort courant, comme par exemple dans le cas de transformateurs de fours à arcs.

Cette technologie est particulièrement compacte par rapport à la technologie colonne. Cependant elle requière une certaine expérience et beaucoup de main d'œuvre quant à la construction des bobinages et à l'assemblage des tonnes de circuit magnétique.



**Figure (I.6)** Schéma de transformateur cuirassé. [7]

### I.5.2 Technologie Colonne [7]

Les transformateurs à colonnes ont leurs chemins de retour du flux magnétique qui passent dans des jambes de circuit magnétique qui sont entourées concentriquement par les enroulements principaux, comme sur la figure ci-dessous.

Dans un transformateur triphasé il y a une jambe de circuit magnétique par phase électrique. Ce type de transformateur est particulièrement répandu dans le monde pour tout type d'application.

Dans la technologie à colonne il y a principalement deux techniques de bobinages qui sont :

- L'enroulement en couches.
- L'enroulement en galettes.

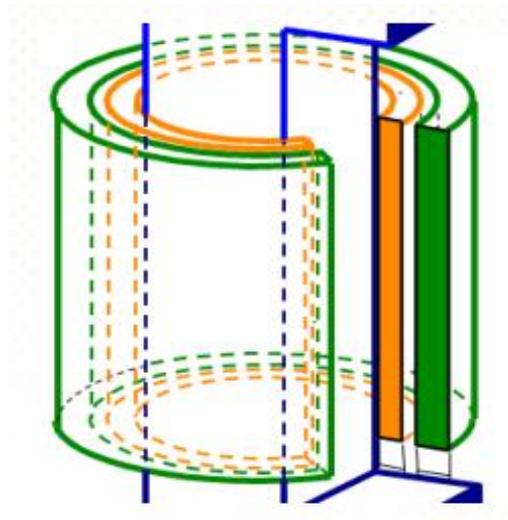


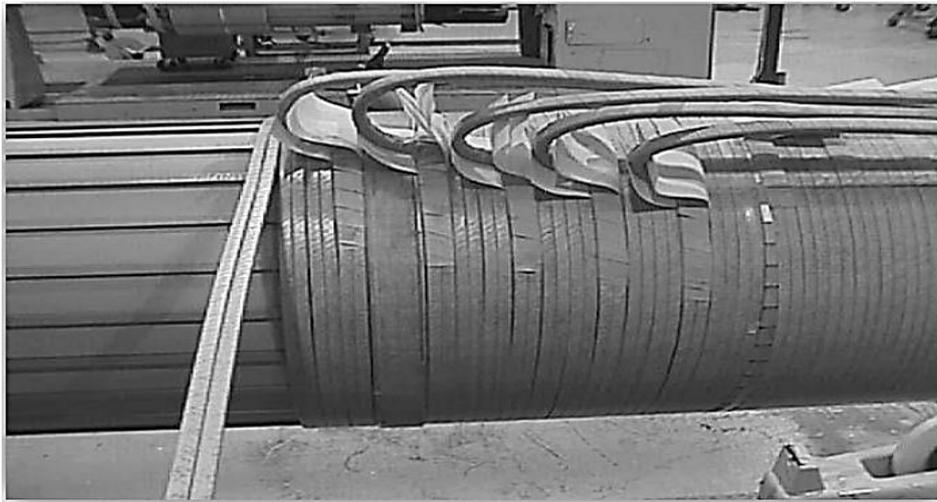
Figure (I.7) : Le transformateur à colonnes. [7]

#### I.5.2.1 L'enroulement en couches [7]

Un des avantages de cette construction est sa bonne répartition, par capacité, des chocs de foudre le long des spires. En revanche un des points à prendre en compte est que sur l'épaisseur d'une bobine on obtient la pleine tension de l'enroulement considéré. Ceci implique de bien isoler électriquement les couches entre elles.

Par construction l'huile peut relativement facilement passer de bas en haut à travers ces enroulements. Cela favorise leurs refroidissements et les systèmes à huile naturelle (ONAN, ONAF) sont particulièrement bien adaptés.

Les enroulements en couches sont en général sur les enroulements haute tension, et historiquement l'usine de fabrication Alstom Saint-Ouen a construit un grand nombre de transformateurs de ce type.



**Figure (I.8) :** Enroulements de la couche.

### I.5.2.2 L'enroulement en galettes [7]

De par la construction des enroulements en galettes la pleine tension de l'enroulement est répartie sur toute la hauteur de la bobine, à contrario de l'enroulement en couches où la tension de l'enroulement est à tenir dans l'épaisseur du bobinage. Ainsi les précautions d'isolation à tenir sont moins contraignantes que la longue couche.

De façon générale les enroulements en galettes ont un facteur de remplissage de l'espace important.

Classiquement un seul conducteur est roulé pour réaliser l'ensemble de l'enroulement, ce qui est « relativement » simple à mettre en œuvre.

Pour améliorer la répartition des contraintes électriques, des chocs de foudre principalement, d'autres façons de rouler ou connecter les conducteurs ont été mises en œuvre.

Les enroulements en galettes les plus classiques étant :

- Les galettes simples
- Les galettes à spires entrelacées
- Les galettes inter écran

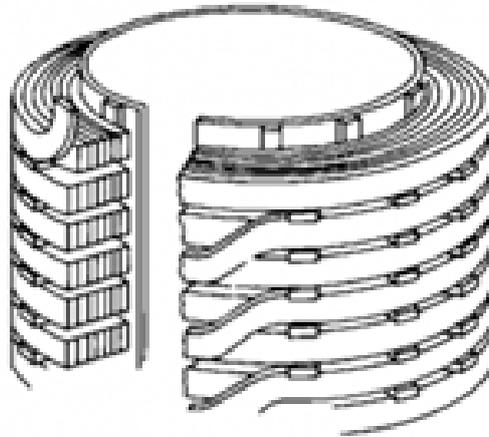


Figure (I.9) : Enroulement en galettes. [7]

## I.6 Les différents types de défauts étudiés

Voici quelques des défauts pouvant arriver sur les transformateurs.

### I.6.1 Point chaud régleur [8]

Quel que soit la marque si les régleurs, en charge comme hors charge, ne sont pas manipulés durant des années ceux-ci peuvent former des points chauds au niveau de leurs prises internes comme après.

Le régleur par construction possède plusieurs prises qui incluent des contacts pour que le courant nominal passe sur chaque position.

Si les positions ne sont jamais passées mécaniquement, ces contacts voyant passer du courant peuvent chauffer anormalement.

Par suite l'huile peut se décomposer et former des points de carbone solide autour du défaut. Dans certains cas le contact peut même être soudé.



**Figure (I.10) : Point chaud régleur. [8]**

### **I.6.2 Défaut de type électrodynamique [8]**

En cas de court-circuit, interne ou externe au transformateur, les courants au sein des enroulements sont très importants et peuvent provoquer des déplacements mécaniques de ceux-ci. Ci-contre un exemple d'enroulement ayant subi un court-circuit.

Afin d'empêcher le déplacement des bobinages sur des efforts de court-circuit tous les enroulements sont très solidement serrés en usine lors de sa construction, ou suite à des réparations de la partie active.



**Figure (I.11) : Déformation électrodynamique. [8]**

### I.6.3 Défaut de type diélectrique [8]

Lors de surtensions sur le réseau, comme des chocs de foudre ou de manœuvre de disjoncteurs par exemple, le papier isolant des enroulements peut permettre un amorçage entre spires (photo ci-contre) ou dans la cuve.

Si l'huile est trop acide ou le transformateur a subi de nombreux court-circuit dans sa vie alors ses papiers isolants peuvent être endommagés ou fatigués. Par suite une contrainte électrique trop importante peut dépasser la tenue diélectrique de ces papiers à des endroits critiques, alors un amorçage se formera à cet endroit.



**Figure (I.12) :** Déformation diélectrique. [8]

### I.6.4 Fuite d'huile [8]

Le transformateur possède de nombreux joints en caoutchouc, typiquement en bas de cuve, à la base des bornes, aux raccords de la réfrigération, etc.

Dans le temps ces joints peuvent se dégrader, se durcir, et fuir ! Comme on peut le voir sur la photo ci-contre une fuite d'huile coule le long de la cuve sans arrêt.

Des inspections visuelles régulières de l'état du transformateur avec une maintenance adaptée permettent de s'affranchir des fuites d'huile.



**Figure (I.13) : Déformation de Fuite d'huile. [8]**

## **I.7 Détection de la déformation de bobinage de transformateur**

Les techniques de diagnostic les plus utilisées sont

### **I.7.1 Méthode de comparaison de réactance**

Dans cette méthode, Avant et après avoir testé le court-circuit est mesurée dans la réaction de l'adaptateur de test. L'interaction ne doit pas être dépassée 1% Pour 100 MVA mais cette méthode n'est pas appliquée pour détecter le déplacement de courbure a peu d'effet sur l'interaction.

### **I.7.2 Fréquence d'analyse de réponse (FRA)**

Fréquence procédée d'analyse de réponse est actuellement la plus avancée d'une méthode de diagnostic d'enroulement de déformation de transformateur est apte à détecter la déformation de bobinage, [9]

## **I.8 Diagnostic des défauts**

Le diagnostic est une tâche hautement cognitive l'objectif visé par le diagnostic, consiste à déterminer les causes d'un dysfonctionnement à partir d'observation et de symptômes constatés, les principaux enjeux du diagnostic de défaut consistent à : [10]

- Identifier et cibler les défauts et les dégâts éventuels.
- Identifier les causes de ces défauts, lorsque cela est possible.
- Estimer les risques inhérents à ces défauts.

## **I.9 Techniques de diagnostic**

L'utilisation des techniques de diagnostic, à une grande importance car elle permet d'évaluer l'état des composantes du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter les programmes des travaux de maintenance et réduire l'indisponibilité. [11]

### **I.9.1 Mesure électrique**

Les mesures électriques effectuées sur le transformateur son utilisés comme outil de diagnostic de défaut. [12]

### **I.9.2 Mesure diélectriques [12]**

Les isolants des équipements sont soumis à un vieillissement donnant lieu à une perte progressive de leurs caractéristiques diélectriques pouvant être la cause des défauts dans le transformateur.

L'objectif des mesures diélectriques est de détecter d'éventuelles dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenu d'un incident due à une avarie.

## **I.10 Diagnostic des enroulements [12]**

- **Le rapport du nombre de spires ou rapport de transformation**

Vérifie le caractère opérationnel d'un transformateur, par exemple, qu'il est en train de transformer la tension comme prévu, et peut aider à identifier les courts-circuits dans les spires, les conditions de circuit ouvert, et les connexions d'enroulements irrégulières.

- **Le courant de magnétisation :**

Particulièrement pratique dans la détection de court-circuit partiels dans un enroulement (sensibles à la détérioration de l'isolation dont le facteur de puissance n'a pas été mesuré).

- **La résistance CC d'enroulement :**

Evalue l'état du trajet du courant entre les bornes de traversée du transformateur, détecte des problèmes tels que les connexions desserrées ou défectueuses, des éléments cassés, des cas de circuit ouvert, ou de résistance de contact élevée dans les régleurs en charge.

- **Réactance de fuite / Impédance de court-circuit :**

Les tests majeurs pour identifier ou confirmer le caractère défectueux d'un enroulement.

- **Réponse en fréquence des pertes fer (FRSL) :**

Le seul en capacité de détecter des courts-circuits indépendamment dans un ensemble de conducteurs ; également sensible aux problèmes qui ont conduit à une perte de conductivité des composants structurels tels que la cuve du transformateur, la structure de fixation et les plaques de raccordement.

- **Analyse de la réponse en fréquence de balayage (SFRA) :**

Sensible aux tendances de court-circuit(s), aux situations de circuit ouvert et aux déformations d'enroulement.

- **Facteur de perte/Tangente delta/Capacité (Fréquence de ligne) :**

Évaluent l'isolation des enroulements en HT ou BT du potentiel de terre, ou l'isolation entre les enroulements haute tension et de basse tension, pour stocker efficacement l'énergie : détecter l'humidité et d'autres contaminants, et l'augmentation des espaces vides dans l'isolant. La capacité est sensible à la déformation importante des enroulements

- **Facteur de perte à fréquence variable/Tan delta :**

Confirment l'interprétation des résultats de facteur de puissance/tan delta ci-dessus et donnent des informations plus précises sur des facteurs de puissance ou de tan delta élevés.

- **Réponse en fréquence diélectrique (DFR) :**

## **I.11 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur le transformateur, nous avons aussi donné un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent, leur importance dans cette machine statique.

A la fin de ce chapitre, étudié les techniques de diagnostic qui nous permettent détecter les défauts qui existent dans les transformateurs.

# *Chapitre II*

*Modélisation par la méthode  
des éléments finis (MEF)*

## II.1 Introduction

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. En analyse numérique, la méthode des éléments finis est une méthode de résolution approchée d'équations aux dérivées partielles. D'une manière plus simple il s'agit de remplacer un problème compliqué pour lequel a priori on ne connaît pas de solution, par un problème plus simple que l'on sait résoudre. [15]

Elle est devenue un outil de travail, calcul et conception quotidien, voir familier, de l'ingénieur, dans des domaines aussi variés que l'analyse des structures, le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, les écoulements souterrains, la combustion ou encore la diffusion des polluants.

## II.2 Modélisation et discrétisation des éléments finis [16]

Pour s'assurer qu'une analyse numérique simulera au mieux un problème réel donné, il faut effectuer deux opérations essentielles, la modélisation dans un premier temps et la discrétisation dans un deuxième temps figure (II.1). Ces opérations portent sur deux aspects principaux du problème pratique :

- Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites et du milieu.
- Choix des éléments finis et du maillage.

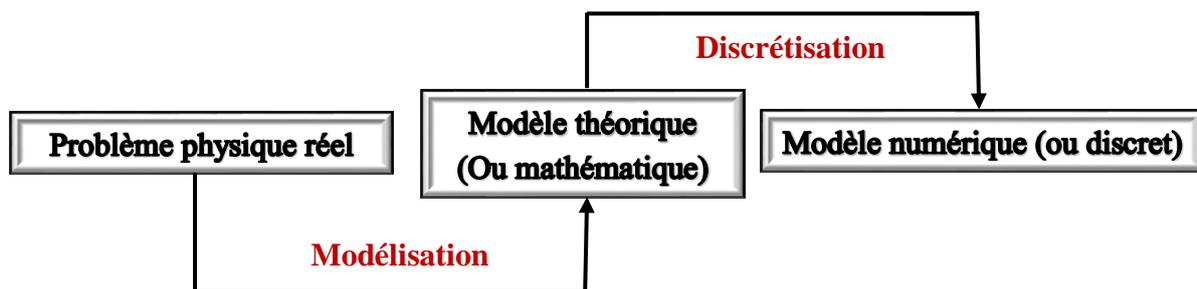


Figure (II.1) : Etape de l'analyse d'un problème aux limites. [16]

### II.2.1 Modélisation du comportement de la structure [16]

La méthode des éléments finis est une méthode incontournable lorsque l'on traite la modélisation des milieux continus. Son domaine d'application très étendu fait probablement d'elle le premier outil de conception. Ainsi, appliquée au domaine de l'électromagnétisme, elle permet d'étudier des problèmes aux formes complexes, avec des matériaux linéaires ou non,

des couplages circuits, du mouvement...etc. La modélisation consiste à rattacher la structure réelle à un modèle de la mécanique des solides, structures et matériaux, capable d'en décrire le fonctionnement avec une précision convenable.

## II.2.2 Discrétisation de la structure modélisée : [16]

L'opération de discrétisation est aussi importante que celle de modélisation. Une fois l'équation aux dérivées partielles est transformée en une forme intégrale, on passe à l'étape de discrétisation qui consiste à subdiviser le domaine concerné en un nombre fini de sous domaines appelés « Eléments », dont la géométrie est préalablement choisie. Cette étape est très importante dans l'analyse par élément fini, car l'espace de stockage sur ordinateur, le temps de calcul et la précision de la solution en dépendent.

### II.2.2.1 Le maillage :

Le maillage respecte les règles dites de conformité. Les éléments ne se recouvrent pas et deux éléments sont voisins, soit par un sommet commun, soit par une arête qu'ils partagent alors entièrement.

#### II.2.2.1.1 Les types de maillage :

Un maillage est une structure polyédrique dont les faces sont des triangles (triangle à 3 nœuds, triangle à 6 nœuds) à bords droits ou curvilignes :

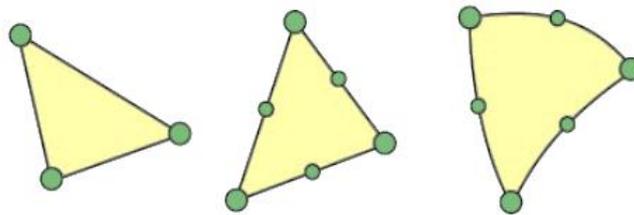


Figure (II.2) : Maillage triangulaire (3 et 6 nœuds). [16]

Ou des quadrangles, Quadrangle à 4, 8 ou 9 nœuds :

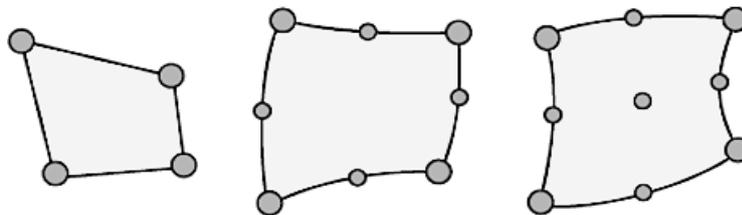
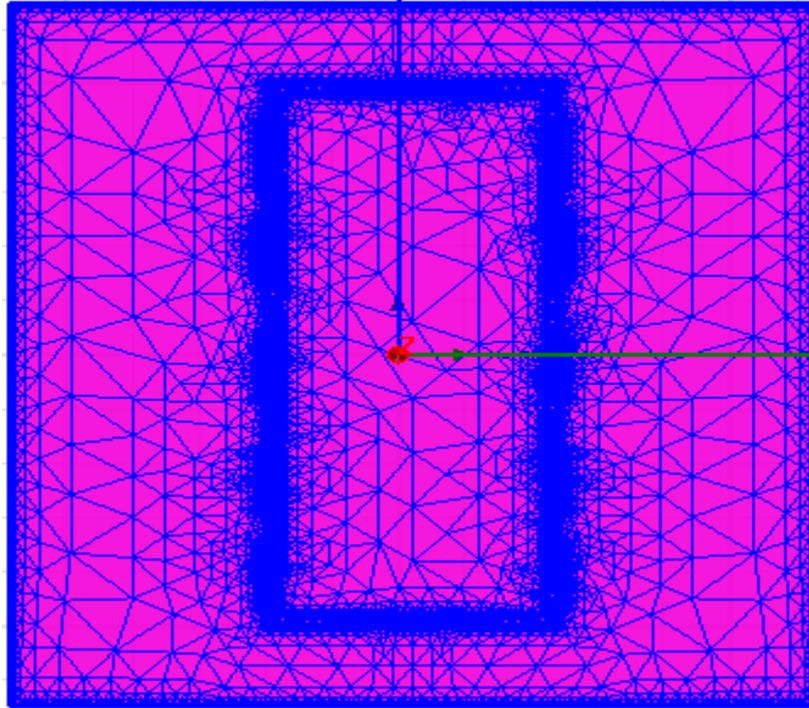


Figure (II.3) : Maillage quadrangle (4, 8 et 9 nœuds). [16]

Un maillage permet d'approcher des objets géométriques en vue de simulations cependant un bon maillage.

Exemple d'un maillage en triangle sur la figure suivant :



**Figure (II.4) :** Discretisation d'un domaine par le maillage.

### II.3 Le couplage avec la méthode des éléments finis [17]

La méthode des circuits électriques magnétiquement couplés qui ne discrétise que les parties actives (inducteur, charge amagnétique, etc.), peut être avantageusement couplée à une méthode numérique de représentation des milieux non linéaires. Le noyau ferromagnétique peut être modélisé par une méthode analytique basée sur l'introduction de densités fictives et superficielles de courant pour un cas linéaire isotrope est homogène, vu les caractéristiques physiques non linéaires du noyau magnétique la nécessité d'un couplage avec une méthode numérique est inévitable. Le couplage tire profit des avantages des deux méthodes, cela nous offre l'avantage de limiter le domaine de résolution de ces méthodes aux seuls domaines conducteurs. Cela engendre la réduction de maillage (non maillage de l'air) et un gain en espace mémoire et en temps de résolution.

### II.3.1 Technique mixte circuits couplés-éléments finis : [17]

On applique la méthode des circuits couplés uniquement dans les enroulements primaire et secondaire et sur la frontière du domaine  $\Gamma$ , et on lui associe la méthode des éléments finis à l'intérieur du domaine  $\Omega$ .

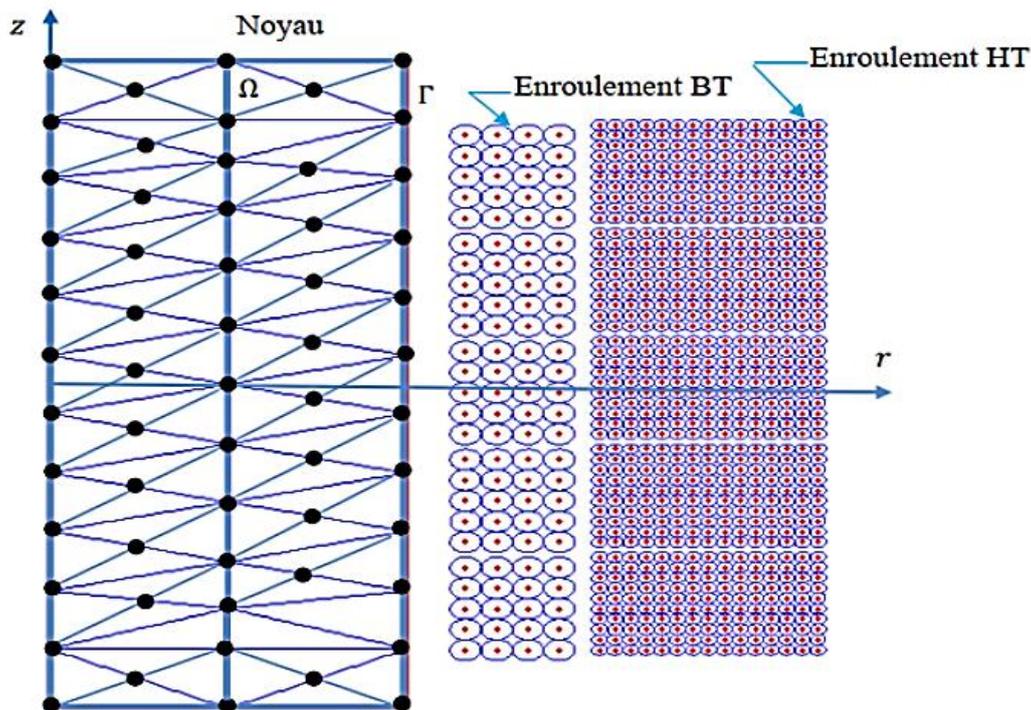


Figure (II.5) : Discretisation des enroulements et du noyau. [17]

### II.3.2 Formulation éléments finis des problèmes électromagnétiques [17]

Le domaine d'étude est décomposé en un nombre fini d'éléments triangulaires qui forment le maillage. La valeur du potentiel vecteur est déterminée sur tous les nœuds des triangles. En utilisant des fonctions d'interpolation appropriées, la solution sera déterminée sur tout point sommet de l'élément. Pour transformer un système d'équations aux dérivées partielles en une formulation intégrale, on utilise soit la formulation des résidus pondérés ou encore la méthode variationnelle. On se limitera dans ce qui suit à présenter la méthode projective de Galerkin. La méthode de Galerkin consiste à choisir des fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation.

### II.3.2.1 Formulation intégrale

Nous allons exposer les deux formulations intégrales qui sont le plus couramment utilisées dans la méthode des éléments finis pour le calcul du champ électromagnétique : formulation variationnelle et la formulation des résidus pondérés. [18]

#### II.3.2.1.1 Formulation variationnelle [19]

La méthode variationnelle exige la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système à étudié, elle s'exprime par :

$$F(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (1)$$

$L = W_c - W_p$  : Lagrangien construit à partir de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système à étudier.

$\Omega$  : est le domaine d'étude.

Donnée La fonction L par la relation :

$$L = \int_0^B v B dB - JA \quad (II-2)$$

En remplace l'équation (II-2) dans l'équation (II-1) pour obtient la fonction d'énergie F(A) :

$$F(A) = \int_{\Omega} \left[ \int_0^B v B dB - JA \right] d\Omega \quad (II-3)$$

$v$  : est la reluctivité magnétique.

$B$  : L'induction magnétique.

$J$  : La densité de courant.

$A$  : Le potentiel vecteur magnétique.

La résolution du problème variationnel ainsi défini, revient à minimiser la fonctionnelle d'énergie F (A), la minimisation est effectuée en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A} = 0 \quad (II-4)$$

Et :

$$\frac{\partial F(\mathbf{A})}{\partial A_1} = \frac{\partial F(\mathbf{A})}{\partial A_2} = \dots = \frac{\partial F(\mathbf{A})}{\partial A_N} = 0 \quad (\text{II-5})$$

Avec :

N : le nombre de nœuds du domaine d'étude.

$A_i$  : est l'inconnue au nœud  $i$  du domaine.

### II.3.2.1.2 Méthode des résidus pondérés [19]

On va définir le résidu  $\mathbf{R}(\mathbf{u})$  comme étant la quantité s'annulant quand  $\mathbf{u}$  est la solution du problème physique :

$$\mathbf{R} = \mathbf{L}(\mathbf{A}) - \mathbf{f} \quad (\text{II-6})$$

$\mathbf{R}$  : Représente le résidu de l'approximation.

$\mathbf{L}$  : Opérateur différentiel.

$\mathbf{f}$  : Fonction définie sur le domaine d'étude  $\Omega$ .

$\mathbf{A}$  : La fonction inconnue.

La méthode des résidus pondérés consiste à rechercher des fonctions  $\mathbf{A}$  qui annule la forme intégrale globale :

$$\iint_{\Omega} \mathbf{R}_i \Psi_i d\Omega = 0 \quad (\text{II-7})$$

$\Psi_i$  : Fonction de projection définie sur  $\Omega$  (fonction de test).

Les valeurs  $\mathbf{A}$  qui permettent d'annuler intégrale solutions du système are algébrique Obtenu.

## II.4 Elément de référence

Les éléments de référence utilisés pour la subdivision du domaine sont des éléments simples, comme le triangle, le rectangle, le tétraèdre et le parallélépipède, pour lesquels on associe un système de coordonnées normées, dans le but de définir pour chaque type d'élément, la fonction d'interpolation associée. [20]

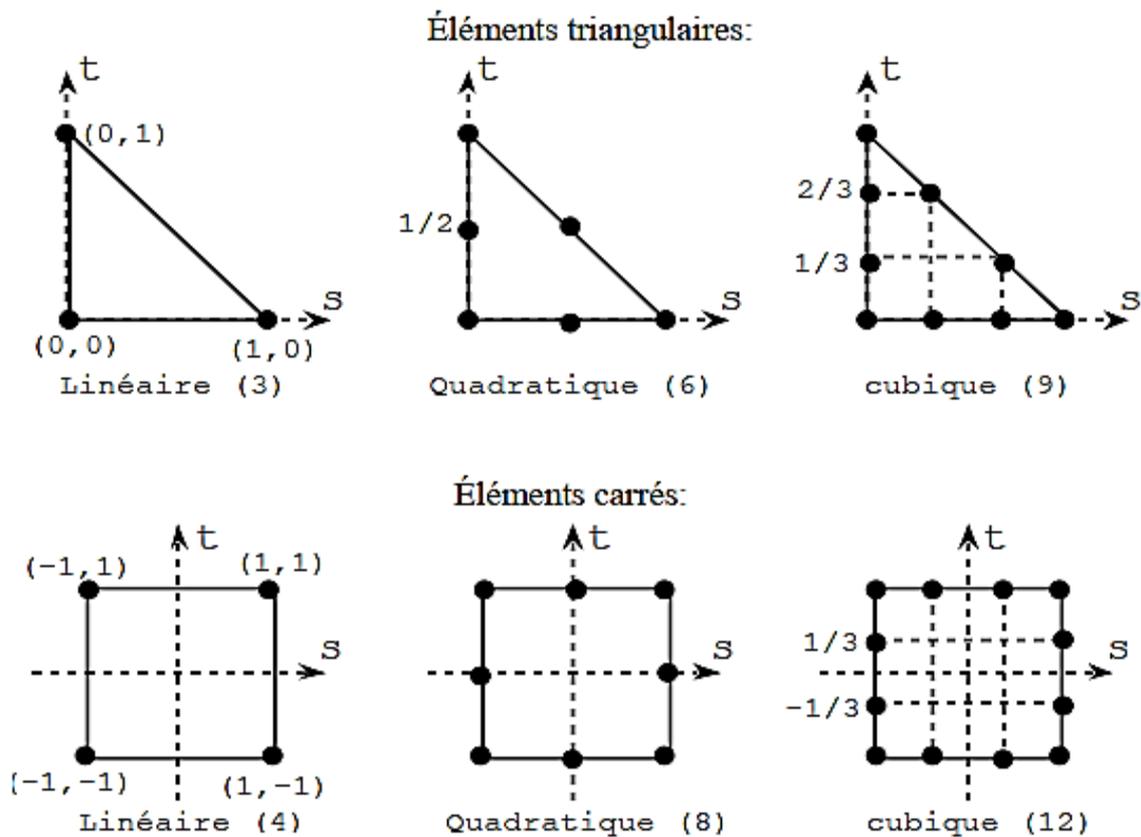


Figure (II.6) : Éléments à deux dimensions. [20]

### II.5 Approximation sur un élément 2D

Sur le domaine ( $\Omega$ ), nous choisisons un ensemble de  $n$  nœuds d'interpolations de coordonnées  $(x_i, y_i)$ . Sur chaque élément ( $\Omega_e$ ), nous utiliserons une approximation nodale de la fonction exacte  $U(x, y)$ . [19]

$$U(x, y) = \sum_{e=1}^N U_e(x, y) \tag{II-8}$$

Le plus commun d'approximation pour  $U_e$  dans un élément est l'approximation polynomiale, à savoir.

$$U_e(x, y) = a + bx + cy \tag{II-9}$$

Pour un élément triangulaire et :

$$U_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \tag{II-10}$$

II.5.1 Fonctions d'interpolation d'un élément triangulaire

Soit l'élément triangulaire linéaire réel à trois nœuds indiqués sur la figure (II-5). Du fait des trois variables nodales, nous cherchons donc une approximation polynomiale linéaire de la

$$forme : U(x,y) = [1 \quad x \quad y] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{II-11}$$

Il est alors possible d'identifier le champ de déplacement au niveau des valeurs nodales de telle manière que  $U(x,y) = U_i$ . L'écriture de ces relations permet d'obtenir le système matriciel suivant :

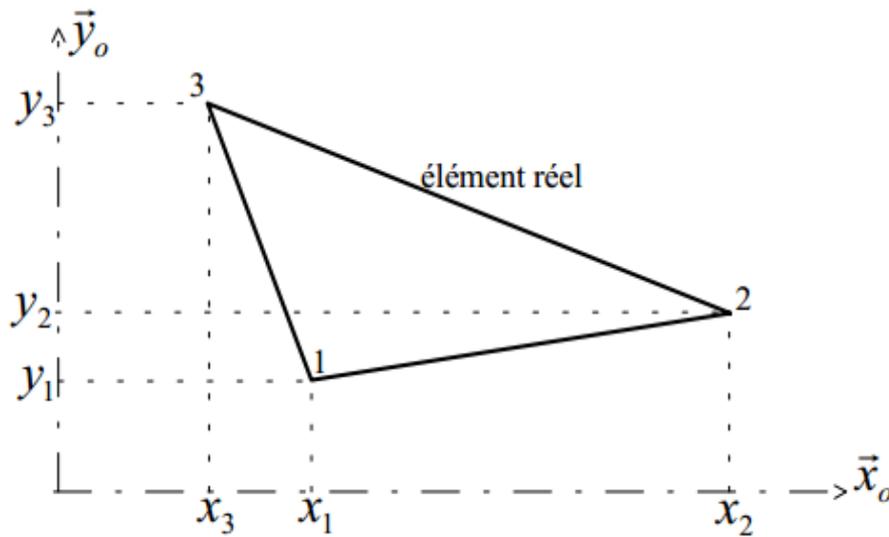


Figure (II.7) : Élément triangulaire. [21]

On pose  $U_1, U_2, U_3$  les valeurs de la fonction respectivement aux nœuds 1, 2, 3, et donnée pour chaque point une équation :

$$\begin{cases} U(x_1, y_1) = a + bx_1 + cy_1 = U_1 \\ U(x_2, y_2) = a + bx_2 + cy_2 = U_2 \\ U(x_3, y_3) = a + bx_3 + cy_3 = U_3 \end{cases} \tag{II-12}$$

Nous obtenons la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \tag{II-13}$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^c$$

$$\begin{bmatrix} x_2y_3 - y_2x_3 & x_3y_1 - y_3x_1 & x_1y_2 - y_1x_2 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Calcule déterminant dans cette matricielle  $\det[X]$  :

$$\det = x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 + x_1y_2 + y_1x_3 - y_1x_2 \quad (\text{II-16})$$

On ajoute et on soustrait le terme  $y_3x_3$  à l'expression du déterminant

$$\begin{aligned} \det &= x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 + x_1y_2 + y_1x_3 - y_1x_2 + y_3x_3 - y_3x_3 \\ &= (y_2 - y_3)(x_1 - x_3) - (y_3 - y_1)(x_3 - x_2) \end{aligned} \quad (\text{II-17})$$

On obtient :

$$\det = 2\Delta = (y_2 - y_3)(x_1 - x_3) - (y_3 - y_1)(x_3 - x_2) \quad (\text{II-18})$$

$\Delta$  : L'aire du triangle.

Il est simple de vérifier que la relation inverse est de la forme :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} \xi_{23} & \xi_{31} & \xi_{12} \\ y_{23} & y_{31} & y_{12} \\ x_{32} & x_{13} & x_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-19})$$

$$\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$$

$$\mathbf{y}_{ij} = \mathbf{y}_i - \mathbf{y}_j$$

$$\xi_{ij} = \mathbf{x}_i \mathbf{y}_j - \mathbf{x}_j \mathbf{y}_i$$

Nous avons trois variables nodales, nous cherchons donc une approximation polynomiale linéaire de la forme :

$$U(x,y) = [1 \quad x \quad y] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

$$U(x,y) = \frac{1}{2\Delta} [1 \quad x \quad y] \begin{bmatrix} \xi_{23} & \xi_{31} & \xi_{12} \\ y_{23} & y_{31} & y_{12} \\ x_{32} & x_{13} & x_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

$$\xi_{23} = x_2 y_3 - x_3 y_2 \quad \xi_{31} = y_1 x_3 - x_1 y_3 \quad \xi_{12} = x_1 y_2 - y_1 x_2$$

$$y_{23} = y_2 - y_3 \quad y_{31} = y_3 - y_1 \quad y_{12} = y_1 - y_2$$

$$x_{32} = x_3 - x_2 \quad x_{13} = x_1 - x_3 \quad x_{21} = x_2 - x_1$$

Reportons ce résultat dans l'approximation, nous obtenons :

$$U(x,y) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

Avec par permutation circulaire de  $ijk$  :  $N_i = \frac{1}{2\Delta} (\xi_{jk} + xy_{jk} + yx_{kj})$

$$\begin{cases} N_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2 y_3 - y_2 x_3) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\ N_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3 y_1 - y_3 x_1) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \\ N_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1 y_2 - y_2 x_2) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

Nous venons de construire les fonctions d'interpolation d'un élément triangulaire quelconque, si la démarche est simple les calculs le sont moins du fait de la forme quelconque de l'élément. En pratique les fonctions d'interpolation sont construites pour des éléments possédant des propriétés géométriques permettant de simplifier les calculs. Ce sont les éléments de référence dont nous présentons maintenant quelques exemples. [21]

Pour chaque élément du domaine, on a alors :

$$U^e(x,y) = [N_1^e \quad N_2^e \quad N_3^e] \begin{bmatrix} U_1^e \\ U_2^e \\ U_3^e \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

$$\begin{cases} N_1^e = \frac{1}{2\Delta^e} (a_1^e + b_1^e x + c_1^2 y) \\ N_2^e = \frac{1}{2\Delta^e} (a_2^e + b_2^e x + c_2^2 y) \\ N_3^e = \frac{1}{2\Delta^e} (a_3^e + b_3^e x + c_3^2 y) \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

Avec :

$$a_1^e = (x_2^e y_3^e - y_2^e x_3^e) \quad b_1^e = (y_2^e - y_3^e) \quad c_1^2 = (x_3^e - x_2^e)$$

$$a_2^e = (x_3^e y_1^e - y_3^e x_1^e) \quad b_2^e = (y_3^e - y_1^e) \quad c_2^2 = (x_1^e - x_3^e)$$

$$a_3^e = (x_1^e y_2^e - y_1^e x_2^e) \quad b_3^e = (y_1^e - y_2^e) \quad c_3^2 = (x_2^e - x_1^e)$$

$$\Delta^e = \frac{1}{2} (b_1^e c_2^e - b_2^e c_1^e)$$

## II.6 Avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis

### II.6.1 Avantages [20]

- On peut représenter un grand nombre de formes de structures à l'aide du modèle analytique général commun.
- La faculté de définir des maillages très irréguliers et depuis l'origine est l'un des grands avantages de la méthode des éléments finis.
- On peut accepter des lois complexes de propriétés intrinsèques des matériaux si on compare aux possibilités des méthodes classiques de résolution, et offrent plus vastes perspectives en analyse non linéaire.

### II.6.2 Les inconvénients [19]

- Inapplicable sur les domaines infinis.
- Présence des singularités dans le domaine d'étude.
- Mise en œuvre relativement difficile.

## II.7 Utilisation d'un logiciel éléments finis [22]

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de

logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM 2000, CESAR, SAMCEF, etc.

Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- Analyse linéaire ou non d'un système physique continu.
- Analyse statique ou dynamique.
- Prise en compte de lois de comportement complexes ;
- Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement. . .) pouvant être couplés ;
- Problèmes d'optimisation, etc.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale. La mise en œuvre pratique sur des cas tests (si possible simples) permettront de savoir comment modéliser et analyser différents éléments d'un problème plus complexe. Avant de passer à la pratique, précisons comment se déroule une étude basée sur l'utilisation d'un logiciel éléments finis.

### **II.7.1 Parcours pédagogique**

Dans le cadre des projets vous aurez à utiliser un code de calcul industriel. Il faudra formaliser votre analyse du problème, en précisant les choix explicites ou implicites de votre modèle. Puis à partir des simulations numériques, valider la discrétisation du modèle, et analyser les résultats de l'étude. [23]

### **II.7.2 Organigramme d'un logiciel éléments finis**

Tout logiciel de calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristiques ou blocs fonctionnels décrits sur la figure (II.6). [23]

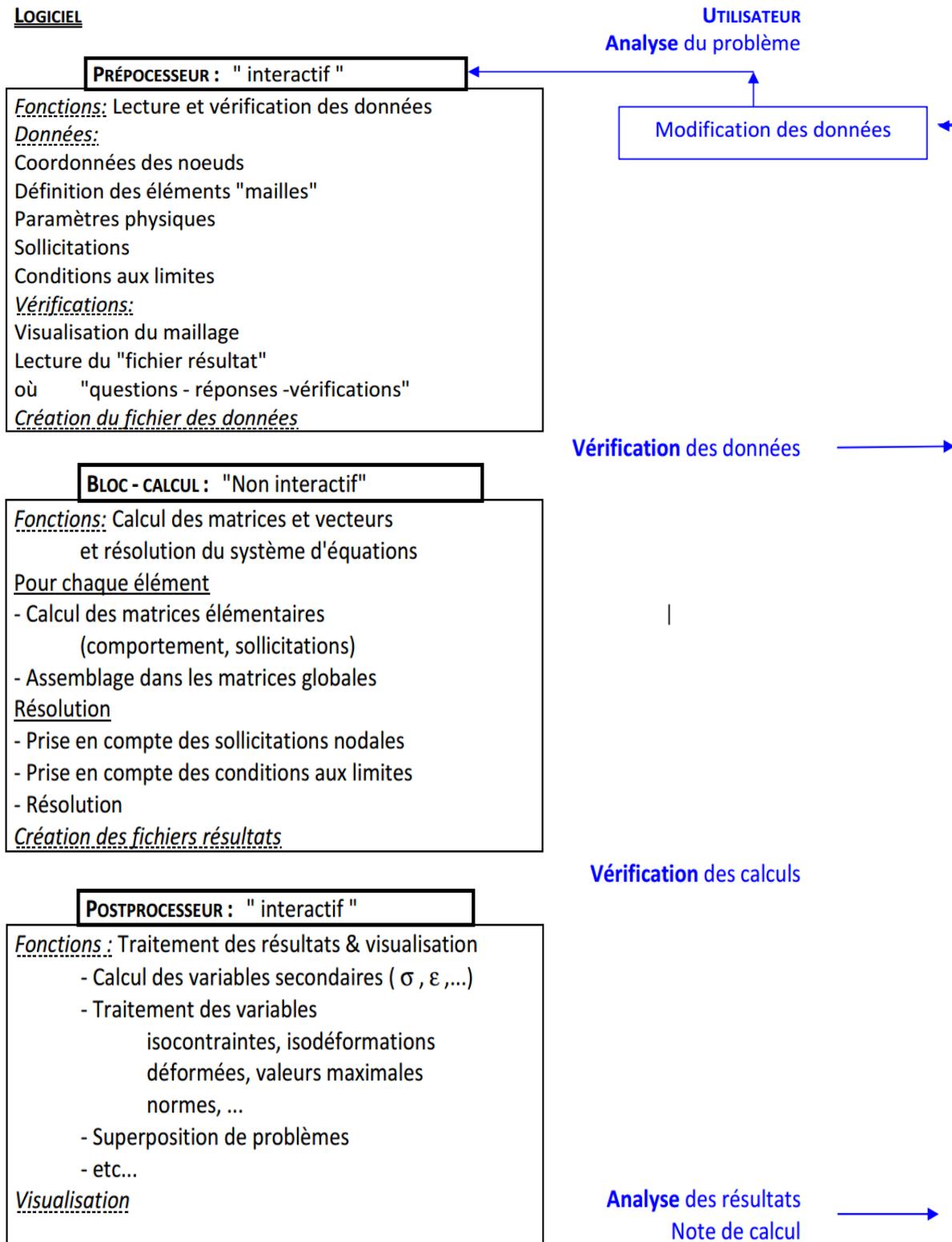


Figure (II.8) : Organigramme d'un logiciel éléments finis. [23]

### II.8 L'équations magnétodynamique par la méthode des éléments finis

L'équation magnétodynamique régissant le champ magnétique dans une tôle ferromagnétique, comme illustré dans la figure ci-dessous, soumise à une excitation harmonique de pulsation  $\omega$  est la suivante : [24]

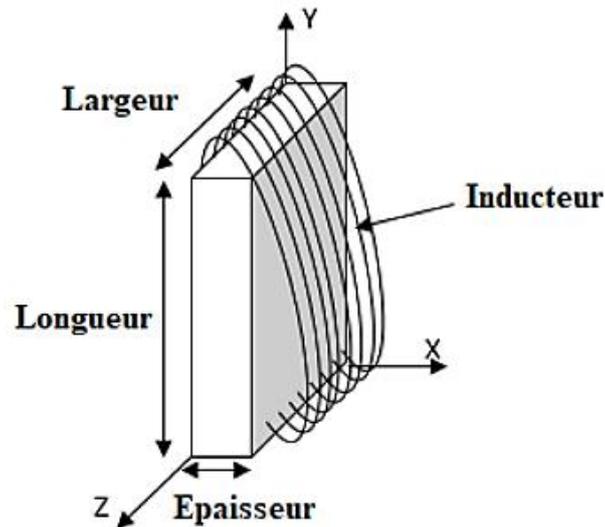


Figure (II.9) : Dispositif électro magnétique. [24]

$$\frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} \right) + j\omega\mu\mathbf{H} = 0 \quad (\text{II-26})$$

#### III.8.1 Ecriture intégrale de l'équation

Pour mettre l'équation magnétodynamique en forme intégrale, nous utiliserons la Formulation des résidus pondérés. [24]

On pose

$$\mathbf{L}(\mathbf{H}) = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} \right) + j\omega\mu\mathbf{H} \quad (\text{II-27})$$

$\mathbf{F}=0$

Le résidu  $\mathbf{R}$  s'écrit alors :  $\mathbf{R} = \mathbf{L}(\mathbf{H}) - \mathbf{F}$

$$\iint_{\Omega} \Psi R(H) d\Omega \quad (\text{II-28})$$

$\Omega$  : Représente le domaine sur lequel est définie la fonction  $H$ , et  $\Psi$  une fonction quelconque définie aussi sur  $\Omega$ .

$$\iint_{\Omega} \Psi \left[ \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + j\omega\mu H \right] d\Omega = 0 \quad (\text{II-29})$$

Cette dernière équation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\iint_{\Omega} \Psi \left[ \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + j\omega\mu H \right] dx dy = 0 \quad (\text{II-30})$$

$$\frac{1}{\sigma} \iint_{\Omega} \left( \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) dx dy + j\omega\mu \iint_{\Omega} \Psi H dx dy = 0 \quad (\text{II-31})$$

$$\iint_{\Omega} \left( \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (\text{II-32})$$

$$\iint_{\Omega} \left( \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) dx dy = \iint_{\Omega} \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} dx dy + \iint_{\Omega} \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} dx dy \quad (\text{II-33})$$

On a :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$$

(II-34)

Alors :

$$\Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (\text{II-35})$$

De même, on trouve que :

$$\Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} \quad (\text{II-36})$$

Alors :

$$\iint_{\Omega} \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} dx dy + \iint_{\Omega} \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} dx dy = - \iint_{\Omega} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} dx dy + \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \right) dx dy - \iint_{\Omega} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} dx dy + \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \right) dx dy \quad (\text{II-37})$$

$$\iint_{\Omega} \left( \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) dx dy = - \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} \right) dx dy + \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) dx dy$$

(II-38)

On pose :

$$\vec{f} = \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \vec{i} + \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \vec{j} \quad (\text{II-39})$$

On a :

$$\text{div}(\vec{f}) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (\text{II-40})$$

En utilisant le théorème de divergence qui énonce que :

$$\iint_{\Omega} \text{div}(\vec{f}) dx dy = \oint_{\Gamma} \vec{f} \cdot \vec{n} d\Gamma \quad (\text{II-41})$$

Où :

$\Gamma$  : est le contour entourant le domaine  $\Omega$ .

On aboutit à la relation suivante :

$$\iint_{\Omega} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) dx dy = \oint_{\Gamma} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \vec{i} + \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \vec{j} \right) \cdot \vec{n} d\Gamma \quad (\text{II-42})$$

$$\oint_{\Gamma} \Psi \left( \frac{\partial H}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial H}{\partial y} \vec{j} \right) \cdot \vec{n} d\Gamma \quad (\text{II-43})$$

Comme :

$$\left( \frac{\partial H}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial H}{\partial y} \vec{j} \right) \cdot \vec{n} = \frac{\partial H}{\partial n} \quad (\text{II-44})$$

Alors :

$$\iint_{\Omega} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Psi \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) dx dy = \oint_{\Gamma} \Psi \frac{\partial H}{\partial n} d\Gamma \quad (\text{II-45})$$

D'où :

$$\iint_{\Omega} \left( \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) dx dy = - \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} \right) dx dy + \oint_{\Gamma} \Psi \frac{\partial H}{\partial n} d\Gamma \quad (\text{II-46})$$

L'équation (II-47) devient :

$$-\frac{1}{\sigma} \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} \right) dx dy + \oint_{\Gamma} \Psi \frac{\partial H}{\partial n} d\Gamma + j\omega\mu \iint_{\Omega} \Psi H dx dy = 0 \quad (\text{II-47})$$

## II.10. Conclusion :

Un aperçu général sur la méthode des éléments finis a fait l'objet de ce chapitre afin de comprendre la procédure de modélisation par élément finis, un exemple sur le calcul du champ électromagnétique en régime harmonique est présent.

L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple.

# *Chapitre III*

*Calcul des paramètres de  
l'enroulement par MEF*

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, des paramètres telles que la capacité série, la capacité avec la terre et l'inductance propre et mutuel sont calculées à l'aide du logiciel Maxwell en se basant sur la méthode des élément finis pour un enroulement sain, et axialement déformé.

Le but principal de calcul de ces paramètres est de réaliser une empreinte pour l'analyse de la réponse en fréquence FRA et de les comparer à ceux des défauts effectués. Dans le but de détecter et localiser les défauts naissants dans l'enroulement du transformateur.

### III.2 Modélisation par MEF du bobinage testé

L'objectif principal de cette modélisation est de calculer les paramètres du schéma équivalent du bobinage afin d'obtenir sa réponse fréquentielle pour son exploitation Pour le diagnostic du bobinage du transformateur.

#### III.2.1 Géométrie de l'enroulement étudié

L'enroulement étudié est subdivisé en 05 disques où chaque disque contient 30 spires sur 03 couches, à une hauteur totale de 500mm et un diamètre de 220mm la hauteur de chaque disque est 56mm.

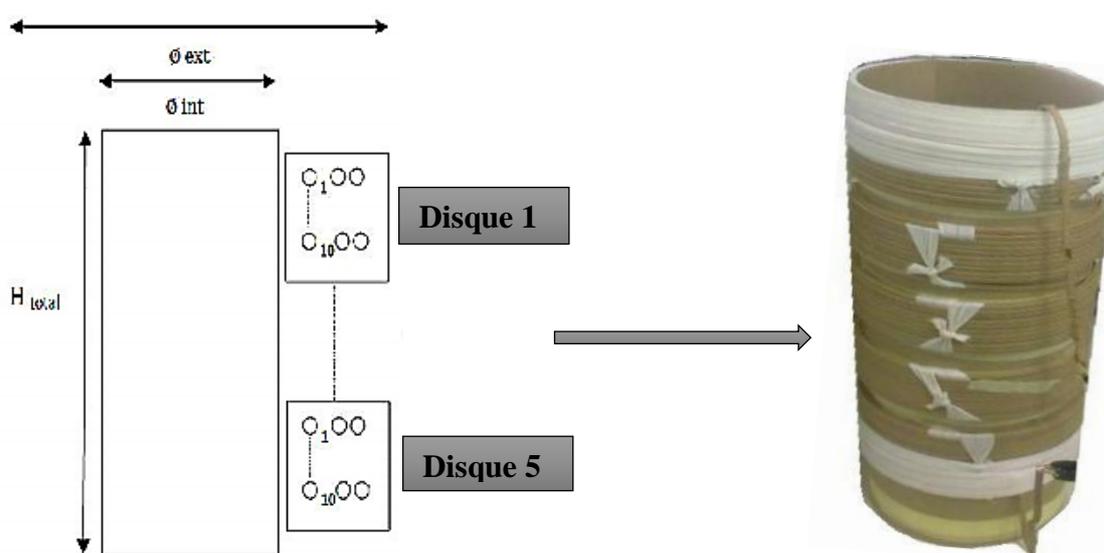


Figure (III.1) : Géométrie de la bobine testée. [19]

### III.2.2 Résultats de simulation en flux 2D

#### III.2.2.1. Tension appliquée

La figure (III.2) représente la tension appliquée au bobinage sous maxwell 2D :

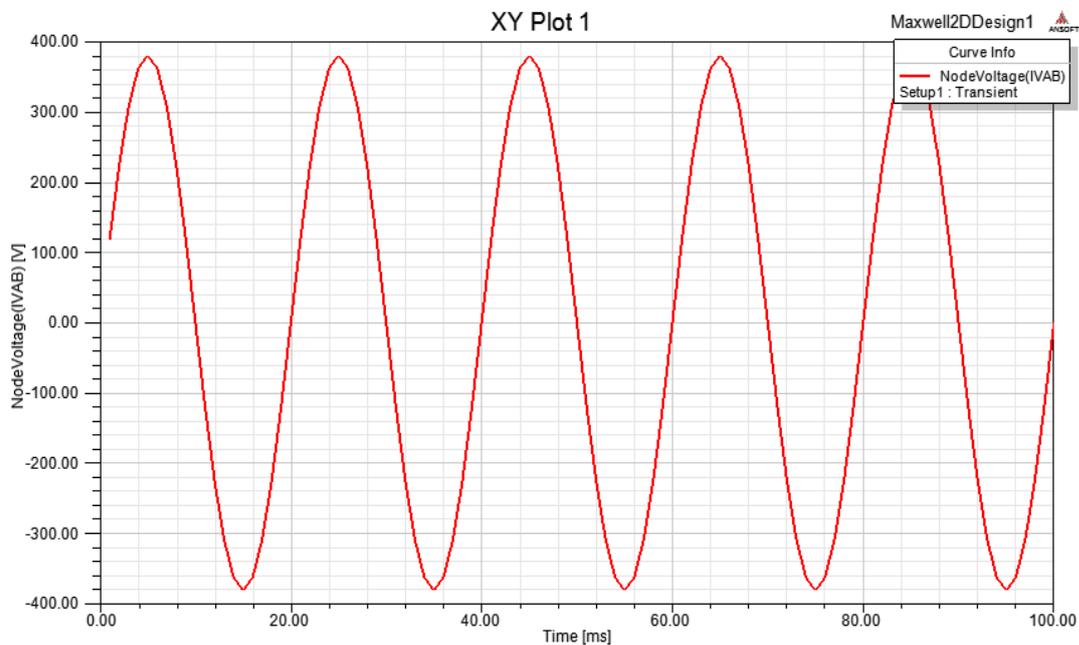


Figure (III.2) : Tension appliquée à l'enroulement étudié.

#### III.2.2.2 Présentation de l'induction magnétique du bobinage

La figure (III.3) représente le profil de l'induction magnétique dans le domaine étudié.

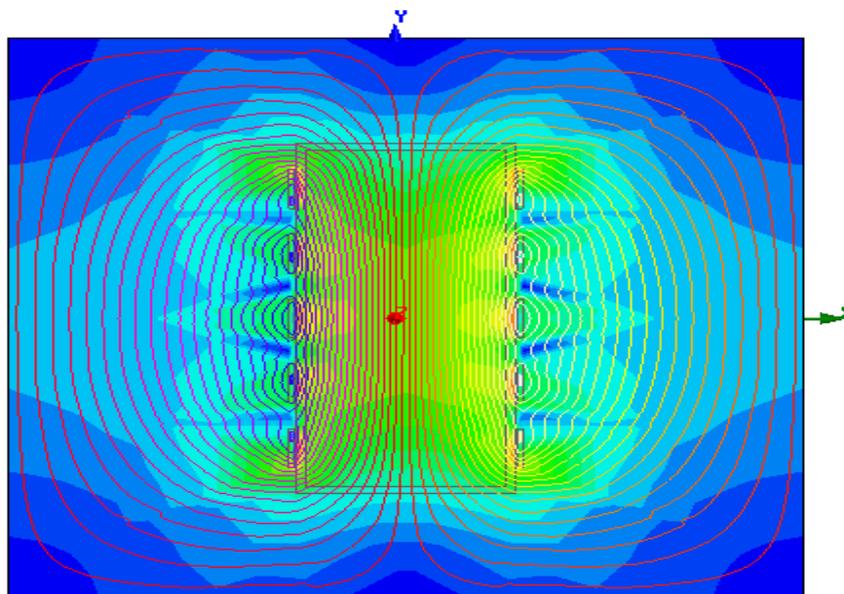


Figure (III.3) : Induction magnétique.

Le figure (III.3), réalisées avec le logiciel maxwell représentent une simulation en coupe du champ magnétique créé par un électroaimant cylindrique.

#### III.2.2.4. Présentation du banc d'essai

- Appareil de mesure RLC mètre 20 Hz-1MHz pour la mesure des paramètres de l'enroulement.



Figure (III.4) : Appareil de mesure RLC mètre.

- Bobine test dont les caractéristiques géométriques sont données précédemment :



Figure (III.5) : Bobine test.

- Ordinateur pour l'acquisition et le traitement des données



Figure (III.6) : Ordinateur.

### III.3. Méthodologie de calcul des paramètres de l'enroulement par l'exploitation du modèle élément finis du bobinage

#### III.3.1. Calcul des inductances propres et mutuelles :

Le calcul des inductances propres et mutuelles d'enroulement est effectuée, en alimentant un disque seulement sous un courant de 1 A. Après la résolution par élément finis de cette configuration, on obtient le flux propre du disque alimenté qui permet de déduire son inductance propre et les flux résultants dans les autres disques ce qui permettront de déterminer les différentes inductances mutuelles. [25]

Les résultats sont illustrés par le **Tableau (III.1)**.

$L_s(H)$	$M_{12}(H)$	$M_{13}(H)$	$M_{14}(H)$	$M_{15}(H)$
$1.7948 * 10^{-4}$	$6.255 * 10^{-5}$	$2.0525 * 10^{-5}$	$8.0783 * 10^{-6}$	$3.7835 * 10^{-6}$

**Tableau (III.1)** : Les valeurs inductances propres et mutuelles de l'enroulement sain.

On déduit l'inductance équivalente totale de l'enroulement, qui est exprimée par l'équation suivante :

$$L_{eq} = nL_s + 2 * \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^k (n-1)M_{ik} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

$n$  : Nombre de cellules.

$L_s$ : Inductance propre.

$M_{ik}$ : Inductance mutuelle.

L'inductance mesurée est de l'ordre de 1.56 mH et l'inductance calculée en utilisant la MEF ont donnée 1.58 mH

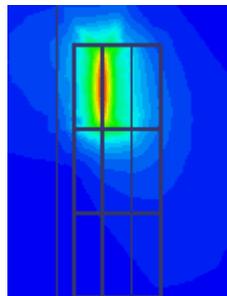
L'écart entre ces deux valeurs ne dépasse pas 2 %, ce qui valide le modèle adopté.

### III.3.2 Calcul des capacités de l'enroulement

#### III.3.2.1 Calcul de capacité série $C_s$

Pour calculer la valeur  $C_s$  la capacité série ont alimenté une seule spire d'un disque avec une tension de 1V.

Le résultat représenté avec figure suivant :



**Figure (III.7) :** Champ magnétique d'une spire

On calcule la valeur d'une spire est trouver par la relation suivante

$$W_{stockee} = \frac{1}{2} CV^2$$

La capacité série total calculé par disque est constitué de trois couches de dix spires.

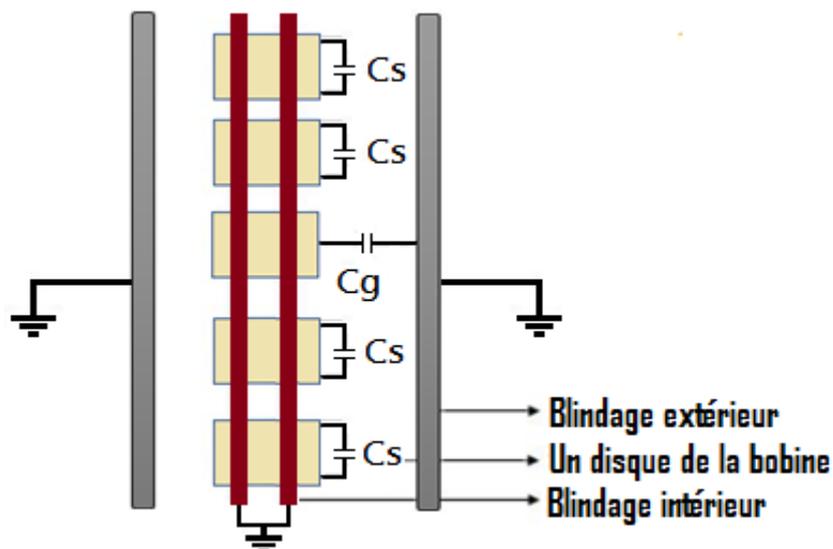


Figure (III.8) : représentation physique des paramètres capacitifs de bobinage

### III.3.2.2. Calcul de capacité avec la terre ( $C_g$ )

La capacité des différents disques avec la terre est calculée de la même façon que l'inductance propre et mutuelle, en alimentant un seul disque sous 1V.

### III.3.3 Modèle équivalent du bobinage

Le bobinage test avait des caractéristiques géométriques bien précises, qui sont déjà discutées, cette bobine est soumise à un test en régime fréquentiel figure (III.6). [5]

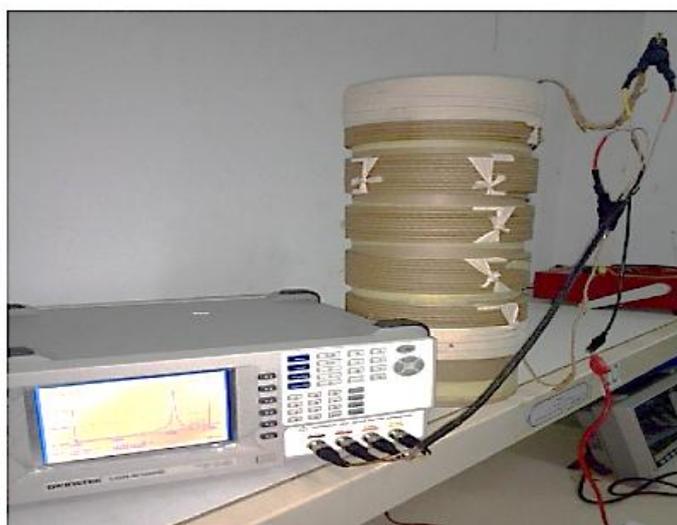


Figure (III.9) : Banc d'essai. [19]

Les résultats de simulation du modèle représenté sur la figure (III.10) :

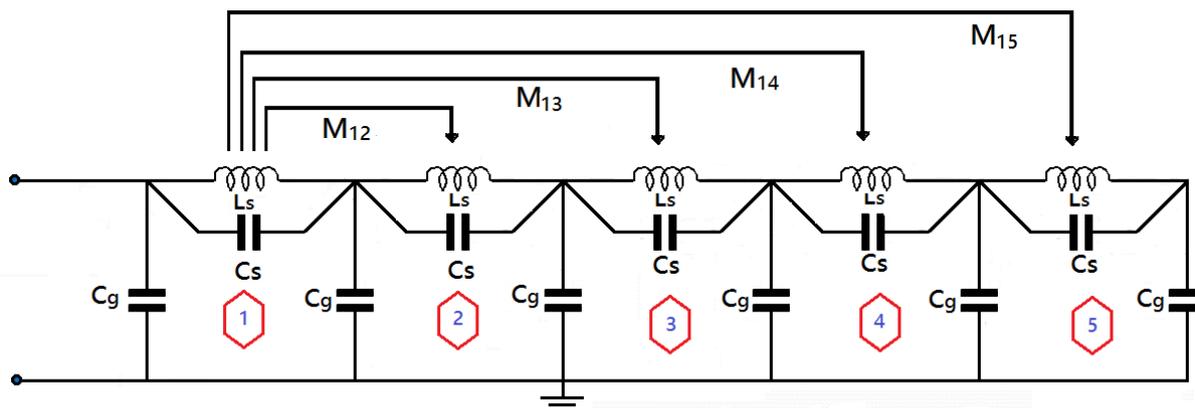


Figure (III.10) : Schéma équivalent du bobinage.

La figure ci-dessous présente comparaison entre la réponse en fréquence Mesurée et Simulée de l'impédance.

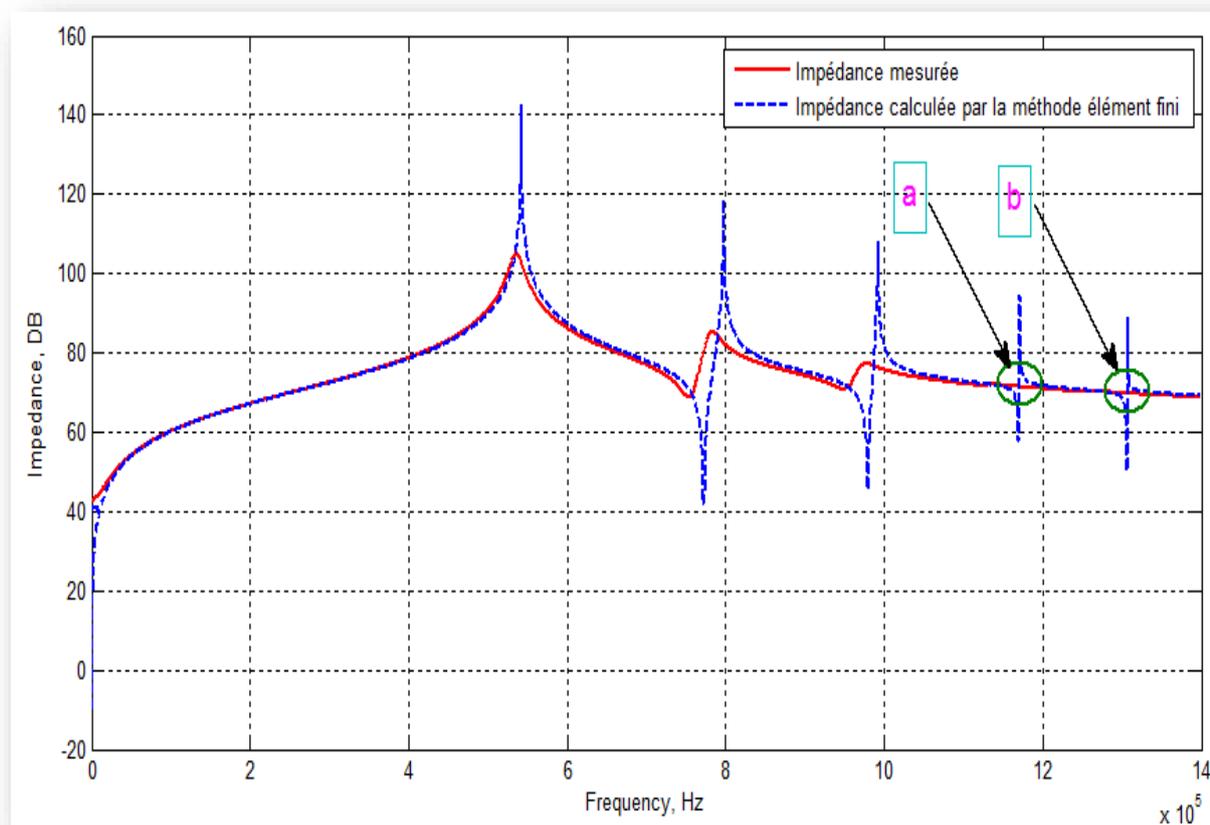
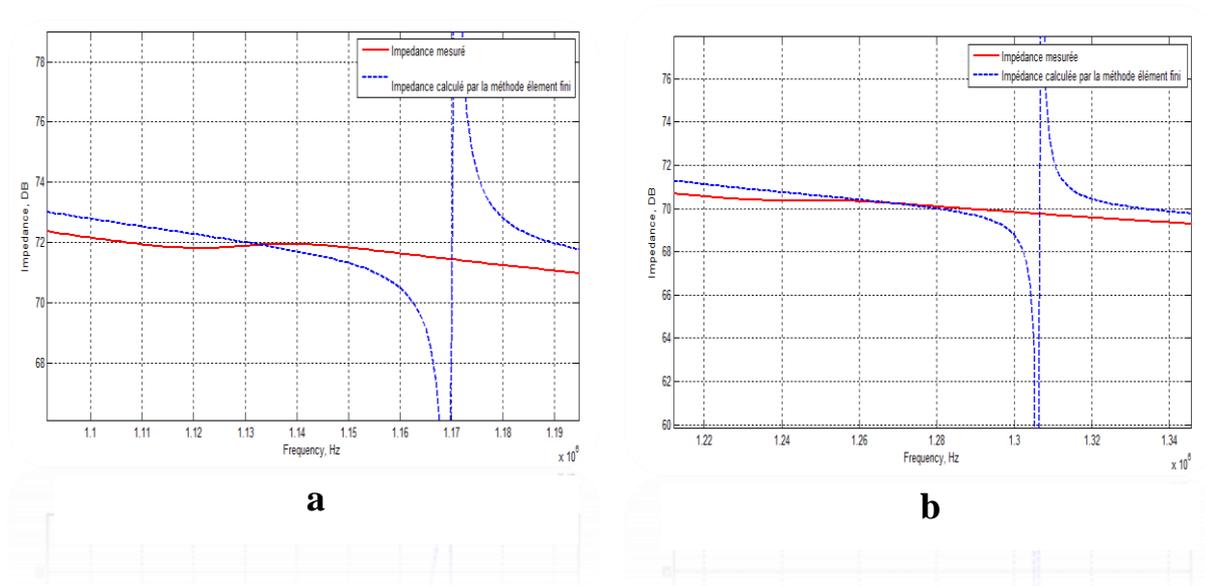


Figure (III.11) : Comparaison entre la réponse en fréquence Mesurée et Simulée de l'impédance.



Le tableau (III.2) représente comparaison entre la réponse en fréquence Mesurée et Simulée de l'impédance en fonction de la fréquence.

Les Pics Fréquences	Pic1	Pic2	Pic3	Pic4	Pic5
	Mesurée ( KHz)	535	784	976	1145
Calculée par MEF (KHz)	542	797	992	1171	1307
<b>Erreur %</b>	<b>1.3</b>	<b>1.65</b>	<b>1.64</b>	<b>2.3</b>	<b>3.81</b>

**Tableau (III.2) :** Comparaison entre les fréquences de résonance de la mesure et celles de calculé par MEF.

La figure (III.9) représente la comparaison entre les fréquences de résonances mesurées et calculés.

Obtenues par la simulation du modèle dans les paramètres sont calculés par élément finis.

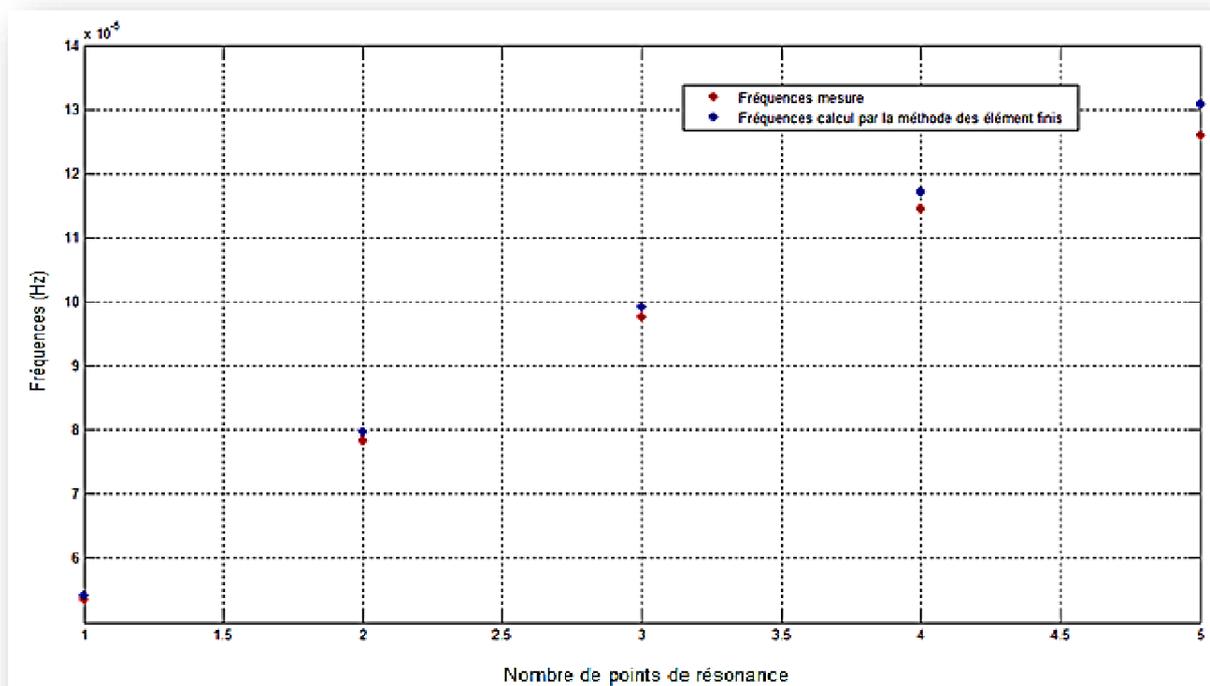


Figure (III.12) : Comparaison entre les fréquences de résonance mesurés et calculés.

D'après les résultats illustrés dans le tableau (III.12) et les figures (III.9) et (III.10), on constate que l'erreur entre la simulation et la mesure est de l'ordre de 1.3 % pour la première fréquence de résonance et n'excède pas 5 % pour les autres points de résonances. D'où on déduit que les résultats du modèle de MEF sont en concordance avec ceux de la mesure.

### III.4 Simulation des défauts étudiés [5]

Après avoir validé le modèle adopté nous allons l'exploiter pour une étude de diagnostic de l'enroulement de transformateur afin d'étudier les différentes défaillances, de l'enroulement avec la technique d'analyse fréquentielle. Les défauts ont été réalisés sur l'enroulement test en modifiant sa géométrie, les défauts simulés sont les suivants :

- Déformation axiale de l'enroulement.

#### III.4.1 La déformation axiale

La déformation axiale est due à l'action des forces axiales sur les conducteurs d'enroulement en particulier dans des situations de court-circuit important. Cette déformation

axiale est modélisée sous maxwell par modification de la géométrie du disque concerné par la déformation. [26]

La déformation est réalisée sur les différents disques d'une manière séparée afin de mettre en évidence l'effet de la déformation d'un disque donné par rapport aux autres figure (III-13).

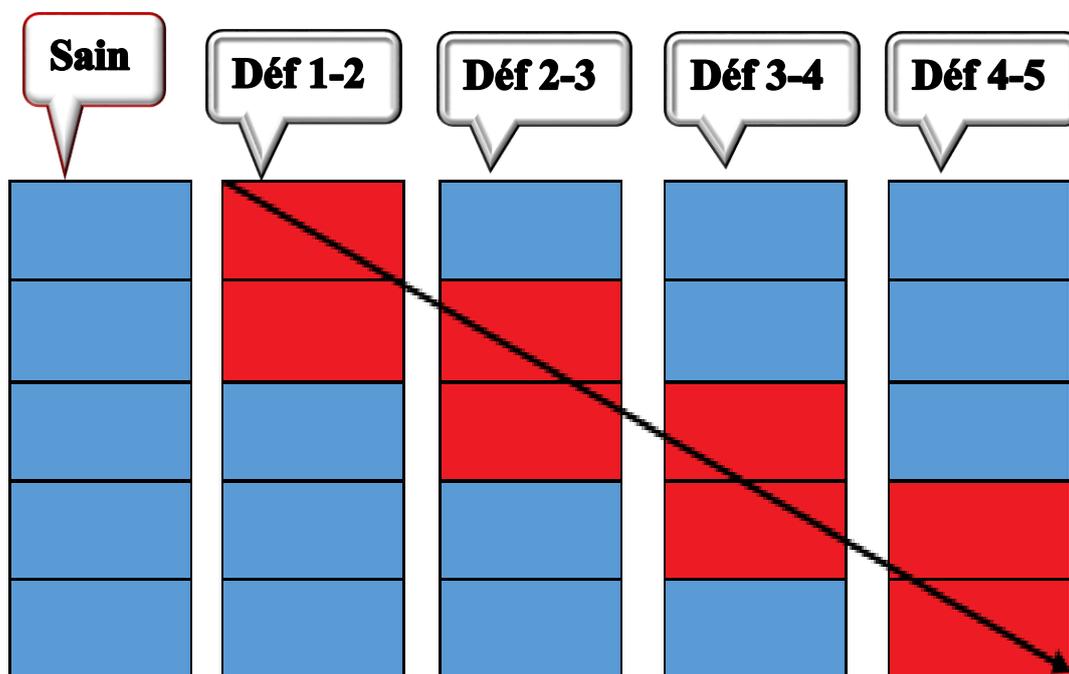


Figure (III.13) : la déformation axiale de l'enroulement. [5]

#### III.4.1.1 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 1 et 2

Le tableau (III-3) représenté les paramètres des déformations axiale du disque 1 et 2

$$L_{eq} = 1.67 \text{ mH}$$

$$C_s = 3.8342 * 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_g = 2.6528 * 10^{-11} \text{ F}$$

$L_s(\text{H})$	$M_{12}(\text{H})$	$M_{13}(\text{H})$	$M_{14}(\text{H})$	$M_{15}(\text{H})$
$1.7916 * 10^{-4}$	<b><math>9.2657 * 10^{-5}</math></b>	$2.0512 * 10^{-5}$	$8.073 * 10^{-6}$	$3.7830 * 10^{-6}$

Tableau (III.3) : Les valeurs des inductances propres et mutuelles à déformation 1-2

### III.4.1.2 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 2 et 3

Le tableau (III-4) est présenté les paramètres des déformations axiale du disque 2 et 3

$$L_{eq} = 1.58 \text{ mH}$$

$$C_s = 3.8342 * 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_g = 2.5364 * 10^{-11} \text{ F}$$

$L_s(H)$	$M_{12}(H)$	$M_{13}(H)$	$M_{14}(H)$	$M_{15}(H)$
$1.7942 * 10^{-4}$	$6.2694 * 10^{-5}$	<b><math>3.372 * 10^{-5}</math></b>	$8.068 * 10^{-6}$	$3.7802 * 10^{-6}$

**Tableau (III.4) :** Les valeurs des inductances propre et mutuelles à déformation 2-3

### III.4.1.3 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 3 et 4

Le tableau (III-5) représenté les paramètres des déformations axiale du disque 3 et 4

$$L_{eq} = 1.453 \text{ mH}$$

$$C_s = 3.8342 * 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_g = 2.6094 * 10^{-11} \text{ F}$$

$L_s(H)$	$M_{12}(H)$	$M_{13}(H)$	$M_{14}(H)$	$M_{15}(H)$
$1.7914 * 10^{-4}$	$6.2548 * 10^{-5}$	<b><math>1.3638 * 10^{-5}</math></b>	$8.0779 * 10^{-6}$	$3.7825 * 10^{-6}$

**Tableau (III.5) :** Les valeurs des inductances propre et mutuelles à déformation 3-4

### III.4.1.4 Déformation axiale de l'enroulement entre disque 4 et 5

Le tableau (III-6) représenté les paramètres des déformations axiale du disque 4 et 5

$$L_{eq} = 1.62 \text{ mH}$$

$$C_s = 3.8342 * 10^{-10} \text{ F}$$

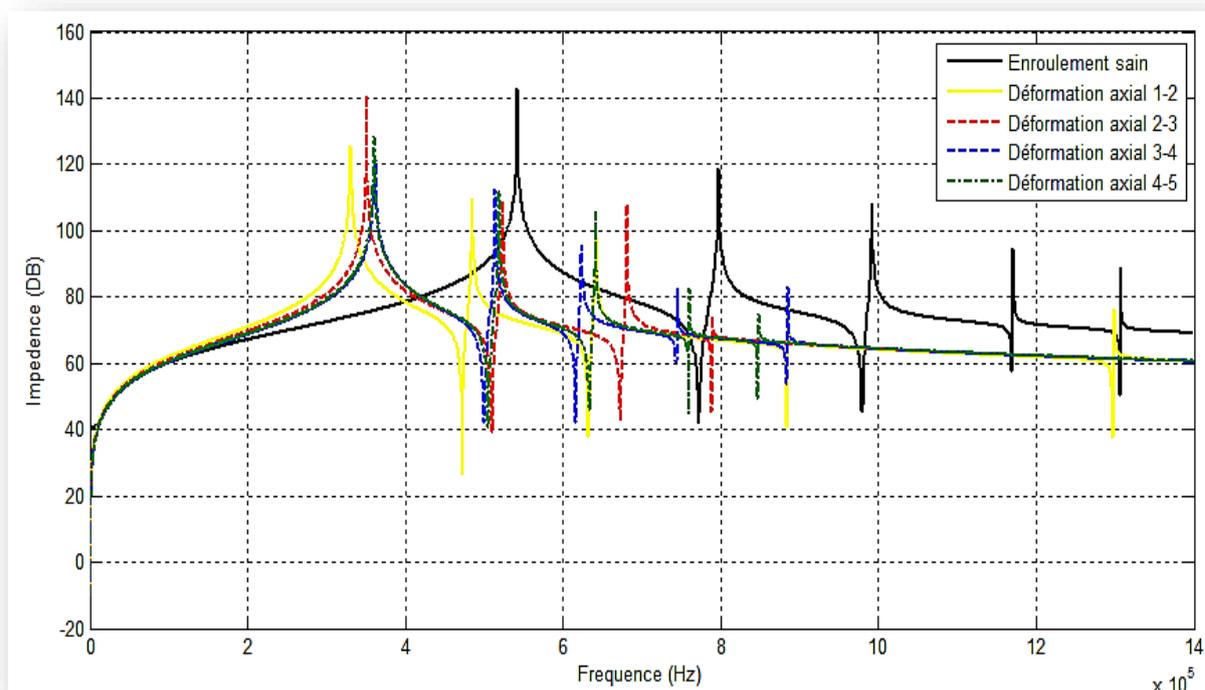
$$C_g = 2.50315 * 10^{-11} \text{ F}$$

$L_s(H)$	$M_{12}(H)$	$M_{13}(H)$	$M_{14}(H)$	$M_{15}(H)$
$1.7916 * 10^{-4}$	$6.2557 * 10^{-5}$	$2.025 * 10^{-5}$	$8.0783 * 10^{-6}$	<b><math>4.8884 * 10^{-6}</math></b>

**Tableau (III.6) :** Les valeurs des inductances propre et mutuelles à déformation axiale 4-5

### III.4.2 Analyse de la réponse fréquentielle de l'enroulement déformé :

La figure (III-12) représente la comparaison entre la réponse fréquentielle de l'enroulement déformé axiale et celle d'enroulement sain.



**Figure (III.14) :** Comparaison de la réponse en fréquence d'un enroulement sain et des enroulements affectés par la déformation axiale.

Le tableau (III-7) représentées La comparaison entre les fréquences de coupe d'un enroulement sain et un défaut de déformation axiale :

Les Pics Fréquences	Les Pics				
	Pic1	Pic2	Pic3	Pic4	Pic5
$f_0$ sain(Khz)	542	797	992	1171	1307
$f_0$ déf 1_2(Khz)	331	485	642	885	1299
$f_0$ déf 2_3(Khz)	351	523	681	789	----
$f_0$ déf 3_4(Khz)	361	514	624	745	885
$f_0$ déf 4_5(Khz)	360	520	641	760	848
$\Delta f_0$ déf 1_2(Khz)	211	312	350	285	108
$\Delta f_0$ déf 2_3(Khz)	191	274	311	382	----
$\Delta f_0$ déf 3_4(Khz)	181	283	368	426	422
$\Delta f_0$ déf 4_5(Khz)	182	277	351	411	459

**Tableau (III.7) :** Comparaison entre les fréquences de coupe d'un enroulement sain et un défaut de déformation axiale.

### Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus on a constaté que dans le cas d'une déformation entre deux disque (1-2), et un décalage vers la gauche de fréquence de la première résonance de l'ordre de 200KHz par rapport au l'enroulement sain.

Une même atténuation a été relevée sur le cas des déformations entre les disques (2-3), (3-4) et (4-5), et un décalage vers la gauche de la fréquence de la première résonance d'ordre 180KHz par rapport à l'enroulement sain.

Pour les trois défauts, nous avons également constaté que ce décalage s'éloigne vers la gauche avec le défaut qui s'éloigne de l'entrer e vers la sortie de l'enroulement.

### III.5 Détection de défaut

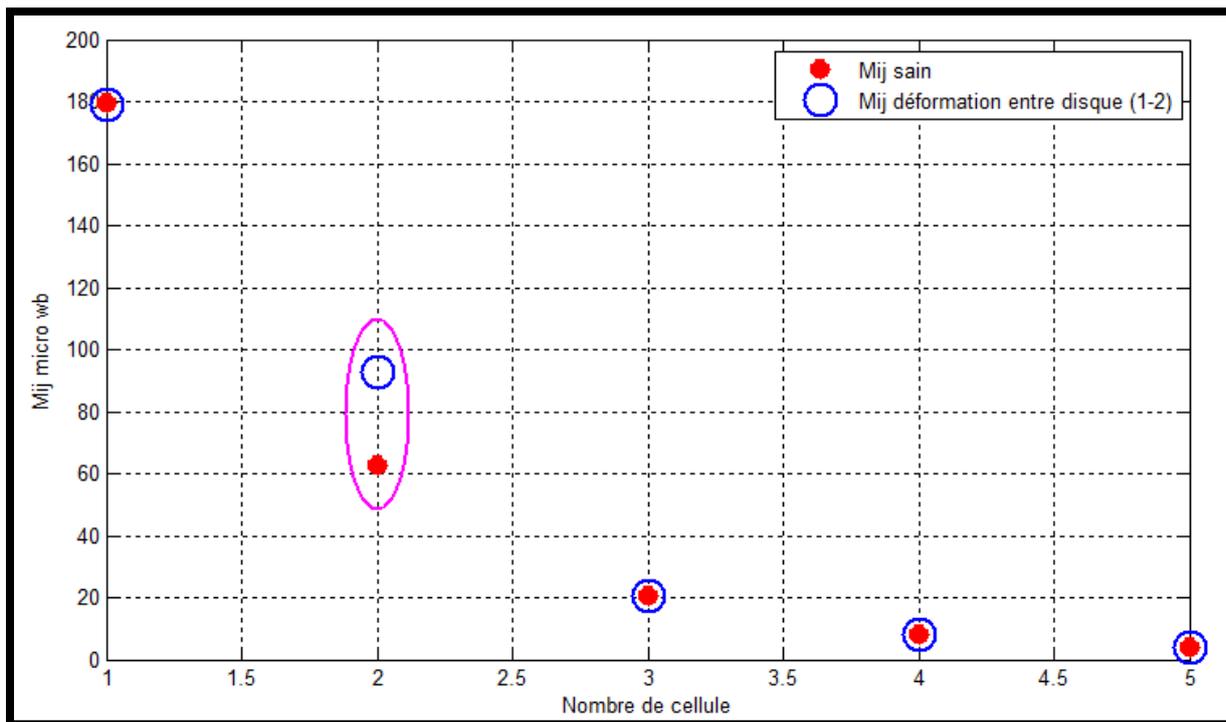
Afin de localiser les défauts entre déformation axial, une comparaison des différentes réponses en fréquences de l'impédance a été effectué par rapport à l'enroulement sain, pour nous proposons, une méthode basée sur la comparaison des valeurs des mutuelles inductances dans le cas sain et dans le cas d'effectués en fonction de la position du défaut. [5]

### III.6. Localisation de défaut de long de l'enroulement

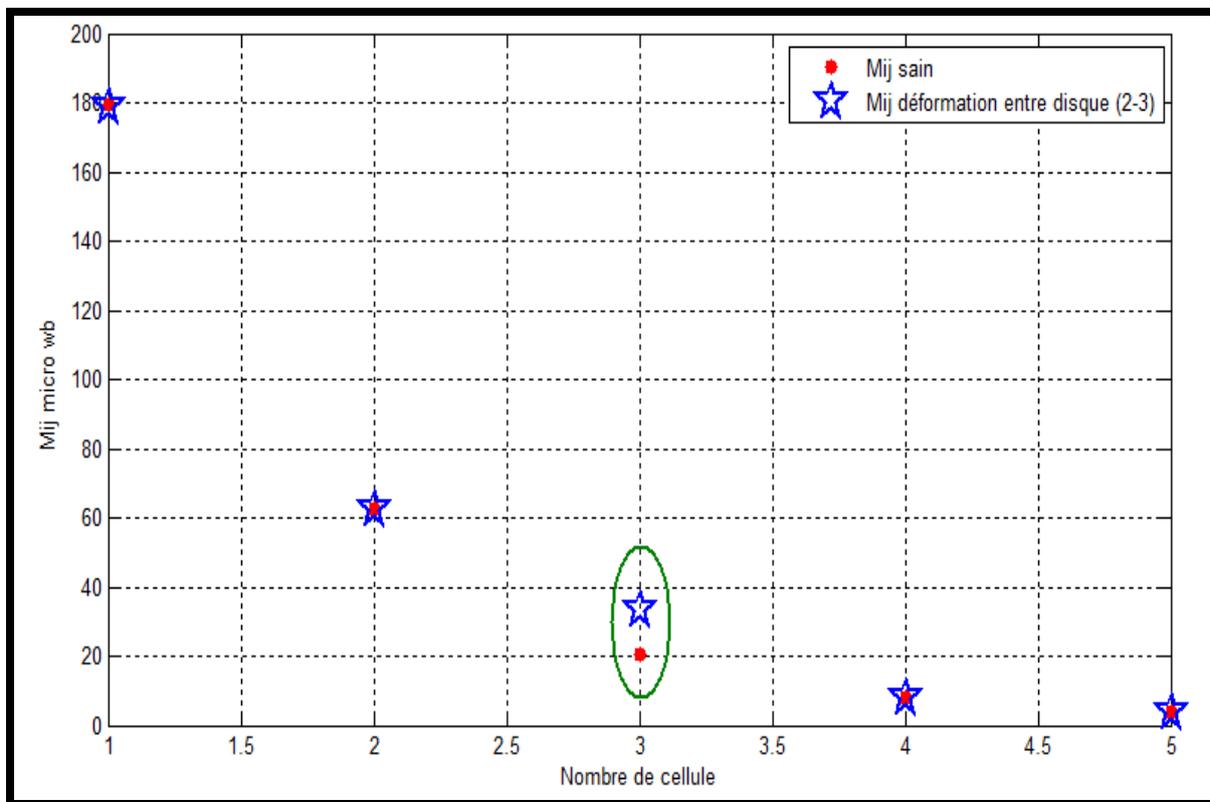
#### III.6.1. Localisation du défaut de la déformation de long du bobinage

Une étude paramétrique de la localisation de la déformation lors de la simulation par éléments finis d'essais de traction est présentée ici afin d'analyser l'influence de différents paramètres numériques et matériaux sur la courbe de réponse globale et sur les propriétés géométriques (angle, taille, intensité...) de la localisation.

La figure suivante représente la comparaison entre les différentes valeurs des inductances propre et mutuelles calculées dans le cas d'un enroulement sain d'une part et d'autre part dans le cas d'une déformation entre le disque (1-2).



**Figure (III.15) :** Variation des inductances mutuelles déformation entre disques 1-2



**Figure (III.16) :** Inductances mutuelles déformation entre disques 2-3

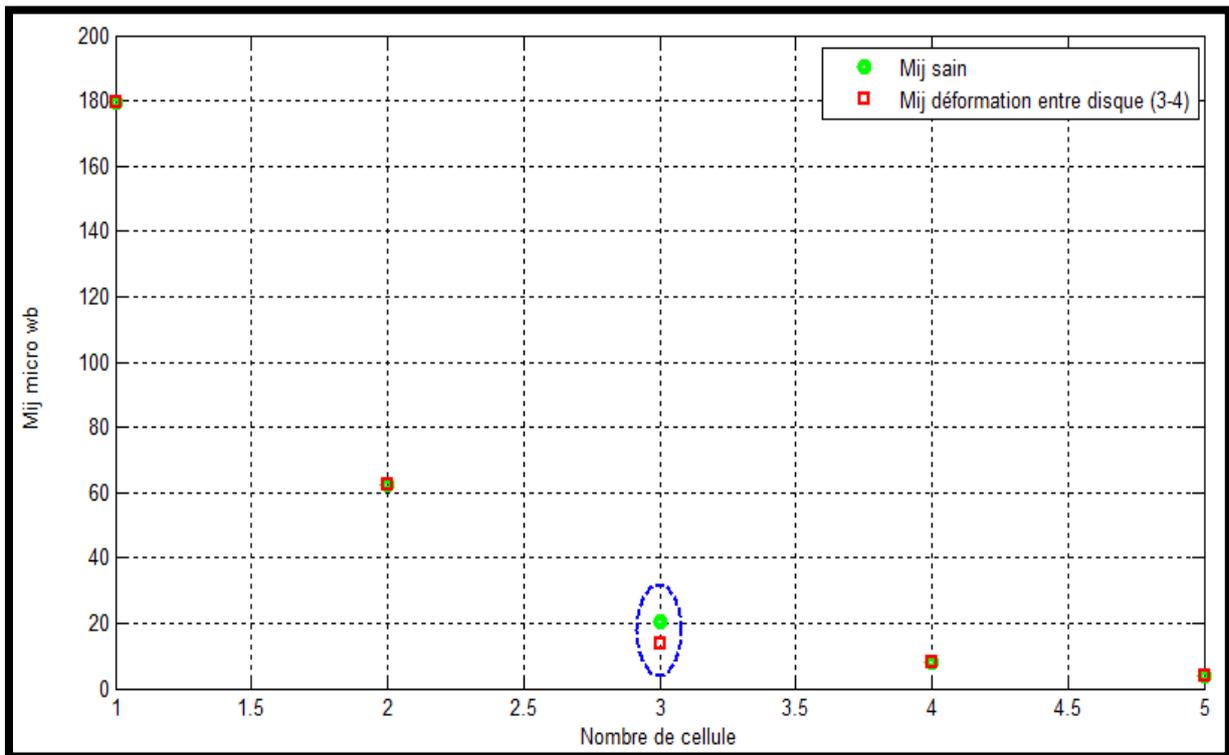


Figure (III.17) : Inductances mutuelles déformation entre disques 3-4.

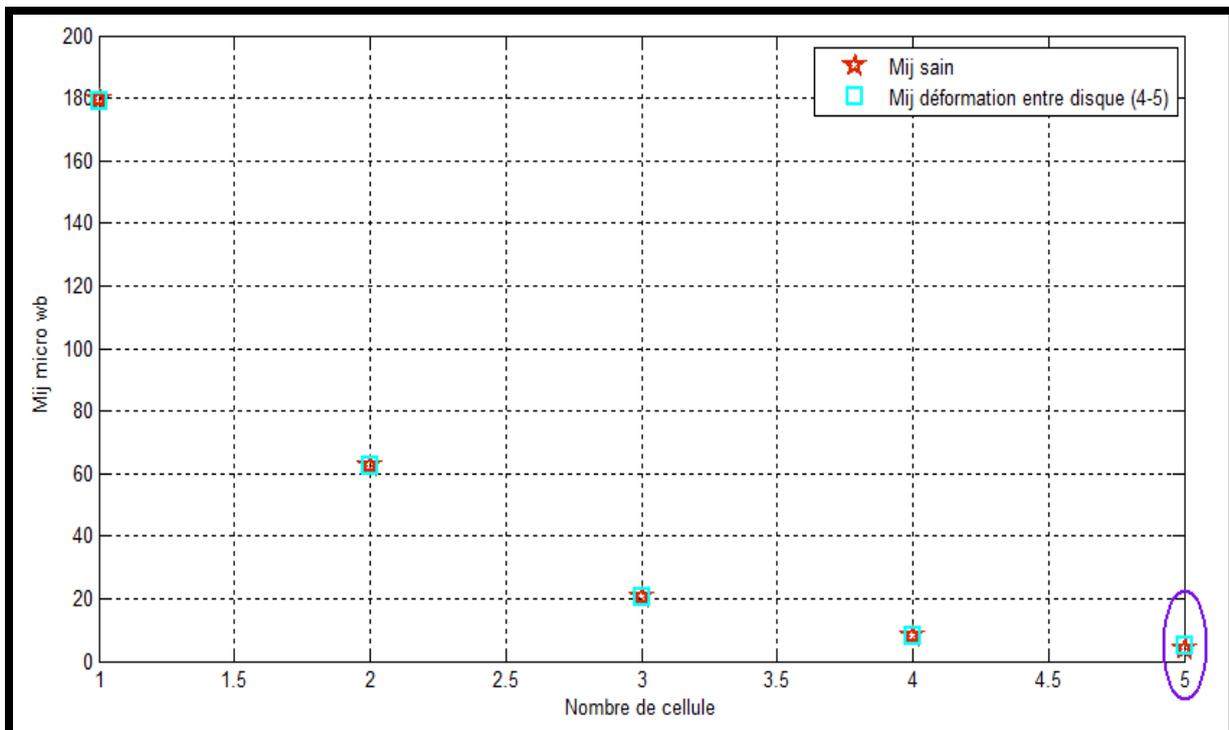


Figure (III.18) : Inductances mutuelles déformation entre disques 4-5

**Interprétation des résultats :**

Les figure (III.15), (III.16) et (III.17), (III.18) représente la comparaison entre les différentes valeurs des inductances mutuelles calculées dans le cas d'un enroulement sain d'une part et d'une autre par dans le cas d'une déformation entre les disques (2-3), (3-4) et (4-5) respectivement.

D'après la figure on a constaté une augmentation des valeurs des inductances mutuelles le long de l'enroulement, cette augmentation est plus remarquable entre les disques (1-2) et (2-3) par la déformation.

Le tableau (III.13) représenté la variation des inductances mutuelle de l'enroulement sain (sans défauts) avec les inductances mutuelles avec défaut.

<i>Inductances</i> <i>Défaut</i> <i>De</i> <i>Déformation</i>	$L_s(H)$	$M_{12}(H)$	$M_{13}(H)$	$M_{14}(H)$	$M_{15}(H)$
<i>Sain</i>	$1.7948 * 10^{-4}$	$6.2550 * 10^{-5}$	$2.0525 * 10^{-5}$	$8.0783 * 10^{-6}$	$3.7835 * 10^{-6}$
<i>Déformation 1-2</i>	$1.7916 * 10^{-4}$	$9.2657 * 10^{-5}$	$2.0512 * 10^{-5}$	$8.0730 * 10^{-6}$	$3.7830 * 10^{-6}$
<i>Déformation 2-3</i>	$1.7904 * 10^{-4}$	$6.2694 * 10^{-5}$	$3.372 * 10^{-5}$	$8.0680 * 10^{-6}$	$3.7802 * 10^{-6}$
<i>Déformation 3-4</i>	$1.7942 * 10^{-4}$	$6.2608 * 10^{-5}$	$1.3638 * 10^{-5}$	$8.0779 * 10^{-6}$	$3.7825 * 10^{-6}$
<i>Déformation 4-5</i>	$1.7916 * 10^{-4}$	$6.2557 * 10^{-5}$	$2.025 * 10^{-5}$	$8.0783 * 10^{-6}$	$4.8884 * 10^{-6}$

**Tableau (III.9) :** Valeur des inductances mutuelle de l'enroulement concerne par le défaut de déformation par rapport à l'enroulement sain.

Dans les cas de figure étudiés, on remarque une augmentation de l'inductance mutuelle à la position du défaut par rapport celles calculée dans le cas d'un enroulement sain.

Ce changement d'induction mutuelle au point d'injection de défaut peut être considéré comme un moyen de localisation de défaut.

### **III.7 Conclusion**

Nous avons détaillé dans premier partie de ce chapitre les calculs des paramètres, du modèle d'un enroulement du transformateur par la méthode des éléments finis. Faire un diagnostic en utilisant sa réponse fréquentielle.

Dans le deuxième partie, une validation du calcul a été effectuée en comprend la réponse musera à celle estimée. Des défauts du déformation axial ont été simulés, a qui nous permet de remarque une variation significative de l'inductance mutuelle en fonction de la position de défaut ce qui nous a permis d'exploiter cette variation par la localisation de la déformation axiale le long de l'enroulement.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

---

### **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire rentre dans un axe de recherche dans le domaine de diagnostic de défaillance dans les transformateurs.

L'analyse de la réponse fréquentielle est un outil pertinent dans le diagnostic des défaillances des enroulements. Pour cela, une modélisation de l'enroulement du transformateur en vue d'une étude fréquentielle est l'objectif de notre travail.

Une modélisation par éléments finis de l'enroulement du transformateur est un calcul de paramètres du modèle de l'enroulement en vue de son diagnostic a été effectuée.

La comparaison entre les résultats issus de la mesure et ceux de la simulation, montre la validité du modèle adopté.

D'après l'étude menée, on a tiré les points suivants :

- Une atténuation d'impédance de défaut dans le cas d'un enroulement déformé.
- Un décalage vers la gauche de fréquence de la première résonance de l'ordre de 300 kHz des réponses des enroulements effectuées par rapport à l'enroulement sain.
- Une comparaison entre les fréquences de résonance mesurées et calculées.
- Sa variation des inductances mutuelles des enroulements défectueux peut être à l'outil de la localisation du défaut de la déformation axiale.

L'étude paramétrique permettez-nous d'étudier les différences de paramètres et localiser les déformations.

Comme perspective pour ce travail ; on propose :

- Enrichir la base de données des défauts par l'étude de la déformation radiale.
- Étude d'un transformateur réel afin de généraliser l'étude en tenant compte de circuit magnétique.

*Référence*  
*bibliographique*

## *Référence bibliographique*

---

- [1] : YAHIOU Abdelghani : « Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : Cas du courant d'appel » ; UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF UFAS (ALGERIE), Soutenu le 21/6/2012.
- [2] : Imad Eddine HARZELLI : « Contribution à la modélisation par la méthode des volumes finis d'un transformateur de courant » ; Magister en électrotechnique université Mohamed Khider-Biskra, La soutenue publiquement le 02/10/2014
- [3] : Transformateur électrique, ([http://www.composelec.com/transformateur\\_electrique.php](http://www.composelec.com/transformateur_electrique.php))
- [4] : Faouzi KAHLOUCHE : « Fabrication et Caractérisation de Micro Transformateurs Planaires à Couches Magnétiques » ; Ecole doctorale Science, Ingénierie, Santé de L'université Jean Monnet De Saint-Étienne, Présentée et soutenue publiquement le 10/06/2014.
- [5] : BEBOUKHA Abd Errazzak, GHILANI Moussa : « Modélisation et simulation de la protection différentielle d'un transformateur de puissance » ; Mémoire master en Réseaux Électriques, Université d'EL-Oued, Soutenu 23-24 Juin 2014.
- [6] : Mr. REKIK BADRI : « Etude Et Modélisation Des Défauts Des Transformateurs De Puissance » ; Mémoire de Magister en réseaux électriques, Université Badji Mokhtar-Annaba Année 2008.
- [7] : Les enroulements, ( <http://www.tsv-transfo.com/fr/decouvrir-le-transformateur/les-enroulements/>)
- [8] : Exemples de types de défauts de transformateurs, (<http://www.tsv-transfo.com/fr/decouvrir-le-transformateur/defauts-transformateurs/> ).
- [9] : [MT] Transformer la déformation et solutions enroulement, (<http://fr.365gbo.com/newshow.htm/?2013-06-26-118721-1->).
- [10] : Mr. Abde Ikebir Amir et Mr. Saadi Nassim : « Application de la logique floue pour le diagnostic des transformateurs de puissance par analyse des gaz dissous » ; mémoire de master en machines électriques, Université Mohammed bougara boumerdes. Promotion Juin 2017
-

## *Référence bibliographique*

---

- [11] : Mme Benaïcha Halima, « Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle » ; thèse de doctorat département d'Electrotechnique, option Réseau Electriques, université des sciences de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 2015
- [12] : MEZARI Naouel, « Diagnostic des transformateurs de puissances », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011
- [13] : <https://fr.megger.com/applications/transformateur/windings-and-leads>.
- [14] : ([tps://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9actance\\_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9actance_(%C3%A9lectricit%C3%A9)))
- [15] : Chapitre-III-Méthode-des-éléments-finis, ( <https://fr.scribd.com/doc/36683282/4-Chapitre-III-Methode-des-elements-finis>).
- [16] : IBRAHIME HAMANI : « Modélisation Par La Méthode Des Éléments Finis 3d Du Chauffage Infrarouge D'une Membrane Semi-Transparente En Polyéthylène téréphtalate amorphe » ; Université Du Québec, Février 2007
- [17] : Madjid MEZIANI : « Contribution à la modélisation analitico-numérique des transformateurs de puissance » ; mémoire de magister en électrotechnique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [18] : Pierre Brissonneau :« Magnétisme et matériaux, pour l'électrotechnique », Edition Hermès, Paris1979.
- [19] : M. GACEM Zakaria et M BOUTOUBA soufyane : « Identification des paramètres des enroulements du transformateur en vue de son diagnostic » ; mémoire de master en électrotechnique UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA, Année universités 2015-2016.
- [20] : Méthode des éléments finis et modélisation des plaques, (<http://thesis.univ-biskra.dz/2294/4/Chapitre%2002.pdf>)
- [21] : J. E. Thomson: «The magnetic properties of materials », Edition Newnes Books, New York, 1968.
- [22] : Méthode des éléments finis, (<http://meefi.pedagogie.ecnantes.fr/meef/archives/Chap2.pdf> ).
-

## *Référence bibliographique*

---

- [23] : Utilisation d'un logiciel éléments finis. ([http://meefi.pedagogie.ec-nantes.fr/MEF/MIAS\\_/MIAS/projets/logiciel/util-logiciel.pdf](http://meefi.pedagogie.ec-nantes.fr/MEF/MIAS_/MIAS/projets/logiciel/util-logiciel.pdf))
- [24] : P. LORRAIN, D.R. CORSON : « Champs et ondes électromagnétiques » ; ARMAND COLIN, Paris, 1979.
- [25] : Gérard DEBEAUMARCHE : « Introduction aux équations aux dérivées partielles linéaires », Technique de l'ingénieur, AF 162.
- [26]: F. W. Grover, Inductance Calculations: Working Formulas and Tables, Dover Publications Inc., New York, 1946.
- [27]: Christain, J.,and K. Feser (2004) , “Procedures for detecting winding displacement in power transformers by transfer function method”, IEEE Transactions on Power Delivery., vol.19, no.1, pp. 214-219.
-

### الملخص :

قمنا في هذا العمل بنمذجة ودراسة تشخيصية لوشية محول كهربائي وذلك باستخدام طريقة العناصر المحددة الوشية التي تم اعتمادها حيث تتكون الوشية المدروسة في هذا المشروع على خمسة أقراص متطابقة يتضمن كل قرص على 30 لفة بعد اكمال نموذج الوشية والتأكد من صحة عمله قمنا بدراسة تشخيصية لمختلف الأعطال الممكن حدوثها في الوشية استنادا الى تقنية تحليل استجابة الترددات مع تحليل النتائج المتحصل عليها. هذه النتائج تم استعمالها كقاعدة بيانات للكشف وتحديد موقع العطل في لفات المحولات الكهربائية. **كلمات مفتاحية:** المحولات. استجابة الترددات. العناصر المحددة.

### Résumé :

Dans ce travail nous avons étudié est modélisé par la méthode des élément fins d'un enroulement du transformateur en vue des différent défaillances.

Le modèle élaboré est valide expérimental sur une bobine réel composé de 05 disque identique comportant chacun 30 spires

Après avoir complété le modèle adopte et vérifié la validité de ses travaux, nous avons effectué une étude diagnostique des différentes défaillances possibles dans l'enroulement basée sur la technique d'analyse de la réponse fréquentielle (FRA). Avec une analyse des résultats obtenus

Ces résultats ont été utilisés comme base de données pour détecter et localiser les défauts dans les enroulements du transformateurs électriques :

**Mots clés :** Transformateur. Elément finis. Analyses fréquentielle

### Abstract:

In this work we studied is modeled by the method of the fine elements of a winding of the transformer with a view to deferent failures.

The model developed is valid experimental on a real coil composed of 05 identical disc each comprising 30 turns.

After completing the model adopts and verified the validity of its work, we carried out a diagnostic study of the various possible failures in winding based on the frequency response analysis technique (FRA). With an analysis of the results obtained.

These results were used as a database to detect and locate faults in the windings of electrical transformers.

**Key words:** Transformer. Finite element. Analyze frequency.

---