REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Application de la méthode d'analyse fréquentielle pour le diagnostique des défaillances des enroulements du transformateur de puissance

---

Préparé et présenté par,

Mr. HASNAOUI Ahmed

Mr. MOUSSA Salah

Proposé et dirigé par,

Dr. Sahnoune Chaouche Moustafa, Promoteur

et

Mr. Amara Abderrazak, Co-Promoteur

Promotion 2020

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement exceptionnel de **Dr. SAHNOUNE CHAOUCHE Moustafa,** enseignant à l'université de Médéa, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent à pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.

Nous aimerions tout particulièrement remercier **Mr. Amara Abderrazak**, doctorant à l'université de Médéa, pour ses précieux conseils et commentaires sur notre mémoire et pour son soutien constant dans notre travail.

Mes sincères remerciements vont également les membres du jury, **Dr. Houassine Hamza**, MCA de l'université de Bouira, **Dr. Gasmi Abderrazak**, MCA de l'université de Médéa*, d'avoir acceptés d'examiner ce mémoire*.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Dédicace

A mes très chers parents, source de vie, d'amour
Et d'affectation

A mes chers frères et leurs enfants, source de joie
Et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir
Et de motivation

A tous mes amis, tout particulièrement Mohammed
Amin CHALOUCHE
A ABBACI & DAHMANE

A Ahmed HASNAOUI, cher ami avant être binôme

Et à tous les membres de la famille de Réseaux

Electriques

SALAH

Dédicace

A ma défunte mère paix à son âme qui pour moi était la source de toutes les inspirations et dont je souhaite de vous une prière et une pensée à sa mémoire Allah yerhamha

A mes très chers parents, source de vie, d'amour
Et d'affectation

A mes chers frères et leurs enfants, source de joie
Et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir
Et de motivation

A tous mes amis, tout particulièrement Mohammed Amin CHALOUCHE

A Salah MOUSSA, cher ami avant être binôme

Et à tous les membres de la famille de Réseaux Electriques

AHMED

Résumé

ملخص

يقترح هذا العمل استخدام المعلمات الرئيسية (الحث المكافئ ومجموع المربعات العكسية للترددات الرنين) لاستجابة التردد FRA من أجل تحديد وتقييم شدة الأعطال الشعاعية الحقيقية لأقراص لفات المحولات الكهربائية. بالإضافة إلى ذلك، تم فحص حساسية تحديد وتقييم مدى هذه الأعطال باستخدام معلمات استجابة التردد FRA هذه مقارنة بالمؤشرات الرقمية المستخدمة بشكل شائع في مجال تشخيص المحولات الكهربائية، حيث انه، تم التوصل إلى أن معلمات FRA لديها القدرة على تحديد وتقييم سلامة لفات المحولات بحساسية أعلى وجهد أقل.

Résumé

Ce travail propose l'utilisation des paramètres principaux (tels que; l'inductance équivalente et la somme de l'inverse des carrés de fréquences de résonance) de la réponse FRA d'un enroulement du transformateur afin de localiser et d'évaluer la gravité des défaillances radiales réelles des disques de l'enroulement. En outre, la sensibilité de la localisation et de l'évaluation de l'étendue de ces défaillances a été examinée en utilisant ces paramètres de la réponse FRA par rapport aux indices numériques couramment utilisés dans le domaine du diagnostic des transformateurs électriques. Dans lequel, il est conclu que les paramètres de FRA ont la capacité à la fois de localiser et d'évaluer de la l'intégrité des enroulements du transformateur avec une sensibilité plus élevée et moins d'effort.

Abstract

This work proposes the use of the main parameters (ex. equivalent inductance and the sum of the inverse of the squares of resonant frequencies) of the response FRA of a transformer winding in order to locate and evaluate the severity of the actual radial failures of the transformer winding discs. In addition, the sensitivity of locating and evaluating the extent of these failures was examined using these FRA response parameters against to the numerical indices commonly used in electrical transformer diagnostics. In which, it is concluded that FRA parameters have the ability to both locate and assess the integrity of transformer windings with higher sensitivity and less effort.

Tables des Matières

Résumé I
Tables des Matières III
Liste des Figures VI
Liste des Tableaux VIII
Liste des Abréviations IX
Introduction Générale : 1

Chapitre. I. Géralités et méthodes de diagnostic des bobinages du transformateur de puissance

I.1 Introduction 4
I.2 Définition 4
I.3 Données Techniques [4] [6]: 5
I.3.1 Paramètres techniques des transformateurs 5
I.3.2 Puissance nominale 5
I.3.3 Haute tension 5
I.3.4 Fréquence nominale 5
I.3.5 Conditions ambiantes et hausse de la température 5
I.3.6 Résistance mécanique de la cuve 5
I.3.7 Mise en charge des transformateurs 5
I.3.8 Tenue en court-circuit 6
I.3.9 Tension de tenue 6
Rendement du transformateur (η) 6
I.3.10 Caractéristiques liées à la technologie et aux conditions d'utilisation : 6
I.3.11 Bruit du transformateur 6
I.4 Construction et conception du transformateur [7]: 7
I.4.1 Circuit magnétique 7
I.4.2 Enroulements 7
I.4.3 Changeur de prises 7
I.4.4 Cuve 7
I.4.5 Isolation papier-huile 7
I.4.6 Huile du transformateur 8
I.5 Accessoires et équipement du transformateur [5] : 8
I.5.1 Thermomètre à double contact 8
I.5.2 Soupape de sécurité 8
I.5.3 Relais Buchholz (dans les transformateurs respirant, à conservateur) 8
I.6 Types de transformateurs : 9
I.6.1 Processus de production : 11
I.6.2 Exploitation d'un transformateur 12
I.6.2.1 Exploitation 12
I.6.2.2 Transformateurs en parallèle : 12

I.6.2.2.1 Conditions de mises en parallèle....13
I.6.2.3 Fiabilité des transformateurs....13
I.6.2.4 Composants du transformateur et....13
leurs défauts détectables....13
I.7 Surveillance les transformateurs en continu :....15
I.7.1 Les Transformateurs Concernés :....15
I.7.2 Les Grandeurs Mesurées :....16
I.7.3 Les huit (8) Raisons De S'équiper En Monitoring Online :....16
I.7.3.1 Évaluation du transformateur en continu :....16
I.7.3.2 Suivi de refroidissement prédictif et contrôle :....16
I.7.3.2.1 Surveillance des traversées :....16
I.7.3.2.2 Suivi des analyses des gaz dissous :....16
I.7.3.3 Modélisation thermique :....17
I.7.3.3.1 Surveillance de décharge partielle :....17
I.7.3.3.2 Suivi et contrôle des tensions et des changeurs de prises :....17
I.7.3.4 Alarme et analyse :....17
I.8 Conclusion....17

Chapitre.II. Défauts et modèles du transformateur en vue de l'analyse de la réponse en fréquence (FRA)

II.1. Introduction....19
II.2. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA)....19
II.3.Objectifs de la FRA....19
II.4. Comparaison entre la méthode IFRA et SFRA :....20
II.5. Théorie fondamental de la FRA....21
II.6. Le Transformateur de puissance comme un réseau RLC complexe....21
II.7. Quand mesurer un FRA?....22
Après des maintenances majeures sur traversées, enroulements..etc.....22
II.8. Types de mesure FRA....22
II.9. Défauts externes et internes dans le transformateur [9]:....23
II.9.1. Défauts externes dans le transformateur de puissance....23
II.9.1.1. Court-circuit externe du transformateur de puissance....23
II.9.1.2. Haute perturbation de tension dans le transformateur de puissance....23
II.9.1.2.1.Surtension transitoire....23
II.9.1.2.2.Fréquence de surtension....23
II.9.2. Défauts internes dans le transformateur de puissance....24
II.9.2. 1. Défauts à la terre [10] :....24
II.9.2.2. Défauts de base....25
II.9.2.3. Défauts entre tours....25
II.9.2.4. Défauts phase à phase....26
II.9.2.5. *Décharges Partielles* [12]....26

II.9.2.6. *Mouvement Axial et déformations radiales d'un enroulement :* 26
II.10. Modélisation fréquentielle du transformateur 27
II.10.1. Modèle de RESEL 27
II.10.2. Modèle de Chimklai [14] 28
II.10.3. Modélisation par inductances propres et mutuelles 28
II.10.4. Modèle d'Andrieu 29
II.10.5. Modèle en π du transformateur : 30
II.10.6. Modèle en cascade des cellules RLC parallèle 31
II.10.7. Modèle mutuellement couplé 32
II.11.Conclusion 33

Chapitre. III. Localisation et évaluation de la gravité des défauts radiaux d'un enroulement du transformateur

III.1 Introduction : 35
III.2 L'enroulement et ses paramètres obtenus par la technique FRA : 35
III.3 Modèle utilisé pour le diagnostique des déformations des bobinages du transformateur 37
III.3.1 Paramètres principales du modèle mutuellement couplé équivalant à un enroulement du transformateur 38
III.3.1.1. Fréquences de résonances 38
III.3.1.2 Inductance équivalente ($\boldsymbol{Leq}$) de l'enroulement du transformateur 39
III.3.1.3 Capacité shunt effective ($\boldsymbol{Cg}$, $\boldsymbol{eff}$) 39
III.3.1.4 Capacité équivalente ($\boldsymbol{Ceq}$) de l'enroulement 39
III.4 Etudes des déplacements radiaux des disques 1 et 2 de l'enroulement 39
III.4.1. Déplacement radiale du disque 01 de l'enroulement 39
III.4.2. Déplacement radiale du disque 02 de l'enroulement 40
III.4.3. Déplacement radiale des disques 01 et 02 de l'enroulement 41
III.5.1 Localisation des déplacements radiaux 41
III.5.2. Evaluation de la gravité de défaut 45
III.5.3. Localisation et évaluation de la gravité des déplacements radiaux 46
III.5.4. L'utilisation des indices numériques pour l'analyse et l'interprétation de la RA 48
III.6. Conclusion 52
Conclusion générale 53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 54

Liste des Figures

Figure I.1 : Premier transformateur à circuit magnétique fermé (1886)……...……04
Figure I.2 : Relais Buchholz d'après Max Buchholz, 1875-1956…….……09
Figure I.3 : transformateurs de type sec……10
Figure I.4 Transformateurs de type immergé……10
Figure I.5 : transformateurs de type gaz SF_6 Toshiba……..……11
Figure I.6 : Composants du Transformateur…….……13

FigureII.1 : Théorie Et Fondamental De FRA……21
FigureII.2 : Le transformateur de puissance comme un réseau RLC complexe……..……22
Figure II.3 :Défaut à la terre d'un enroulement……...……24
FigureII.4 : Dommages à l'intérieur de la pile d'enroulements de bobine du transformateur rempli d'huile……25
Figure II.5 : Défaut entre les tours du transformateur……25
Figure II.6: Tests complémentaires recommandés……..……26
FigureII.7 :Déplacement axial (a) et déformation radiale (b) d'un enroulement……...……26
Figure II.8: Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL……..……27
Figure II.9: Modèle du transformateur de Chimklai a)- circuit d'origine. b)- circuit simplifié……..…28
Figure II.10: Représentation d'un enroulement…….……29
Figure II.11: Modèle d'Andrieu……30
Figure II.12: Circuit équivalent de Zcc…….……30
Figure II.13: Structure de modèle d'un quadripôle……...……31
Figure II.14: Modèle triphasé en cascade de cellules RLC parallèles…….……32
Figure II.15: Modelé mutuellement couple équivalent a deux enroulements du transformateur.…33

Figure III.1 : Représentation schématique dans l'état sain du bobinage étudié (a) Banc d'essai, (b) représentation de la bobine étudié avec son modèle équivalent……36
Figure. III.2. Modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur…..…37
Figure III.3 : Points de résonances et d'antirésonances (O_{cnfs} et S_{cnfs}) de la réponse fréquentielle de l'enroulement……...……38
Figure III.4 : Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 01……40
Figure III.5 : Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 02……40

Liste des Figures

Figure III.6. : Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 01 et 02……41

Figure III.7. : L'influence de déplacement radial du disque 3 sur les paramètres du modèle équivalent……..……..……42

Figure III.8. Processus de localisation en utilisant $\boldsymbol{M_{0x}}$ en fonction de $\boldsymbol{x}$**…….……44**

Figure III.9 : Caractéristique de$\boldsymbol{L_{eq}}$ en fonction des déplacements radiaux de l'enroulement……46

Figure III.10. Caractéristique de $\Delta\boldsymbol{L_{eq}}$ en fonction des déplacements radiaux des disques 1 et 2…47

Figure III.11. Caractéristique de $\Delta\boldsymbol{\Psi_{Ocnf}}$ en fonction $\Delta\mathbf{L_{eq}}$ des déplacements radiaux des disques 1 et 2……..…….……48

Figure III.12 : Coefficient de Corrélation en fonction de $\Delta\boldsymbol{L_{eq}}$…….....51

Figure III.13 : Indice Max-Min en fonction de ΔL_{eq}……51

Figure III.14. CD en fonctionΔL_{eq}……...……52

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Composants du transformateur et leurs défauts détectables……14

Tableau I.2 : Méthodes de mesure possibles.....15

Tableau I.3 : Les grandeurs mesurées ……..……16

Tableau.II.1 :Comparaison entre la méthode IFRA et SFRA…….……20

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques du bobinage…….……37

Tableau III.2 : Valeurs des fréquences de résonances et d'antirésonances (O_{cnfs} et S_{cnfs})……38

Tableau III.3 : $\boldsymbol{M_{0x}}$ en fonction de $\boldsymbol{x}$ pour un enroulement nominal uniforme……...…44

Tableau III.4 : Localisation des déplacements radiaux……45

Tableau III.5 : Valeurs de L_{eq} pour des déplacements radiaux du disque 1 et 2……..…46

Tableau III.6 : Variation $\Delta\boldsymbol{\Psi_{Ocnf}}$ en fonction $\Delta\mathbf{L_{eq}}$ des déplacements radiaux des disques 1 Et 2……48

Tableau III.7. Coefficient de Corrélation en fonction des déplacements radiaux des disques 1 Et 2……..……50

Tableau III.8. L'indices Max-Min (MM) en fonction de $\Delta\mathbf{L_{eq}}$…….……50

Tableau III.9.CD en fonction de déplacements radiaux de disques 1 et 2 …….……50

Liste des Abréviations

FRA : technique d'analyse de la réponse fréquentielle

SFRA : La méthode de balayage de l'analyse de la réponse en fréquence 'Sweepfrequencyresponseanalysis.

IFRA : La méthode impulsionnelle de l'analyse de la réponse en fréquence 'Impulse frequencyresponseanalysis

HT, THT : Haute Tension,Très Haute Tension

MT : Moyenne Tension.

BT : Basse Tension.

kV : kilo Volt.

kVA:kilo Volt Ampère.

Ph : La puissance assignée.

IEC : La Commission internationale d'électrotechnique.

kW : kilo Watt.

PN : La Norme Polonaise.

P_{ZW} **:** Les Pertes.

S : La Puissance Apparente.

At : La Pression Atmosphérique.

MPa : Méga Pascal.

GIT : Gas – Insulated Transformer

TC : Transformateur de courant.

RLC : Circuit Résistance, Inductance et Capacité

F : Fréquence.

HF : Haute Fréquence.

kHz, MHz : killo Hertz , Méga Hertz.

T : La Température.

RESEL : Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité (Engineers of Study and Research of the Electricity).

Z_{CC} **:** L'impédance de court-circuit.

Liste des Abréviations

RD : Déformation Radiale.

$\boldsymbol{O_{cnfs}}$: Fréquences de résonance correspond un circuit ouvert.

$\boldsymbol{S_{cnfs}}$: Fréquences de résonance correspond un court-circuit.

$\Delta\mathbf{L_{eq}}$: La Variation de l'inductance équivalente

$\boldsymbol{\theta}$: L'angle

LCR mètre : Appareil de mesure fréquentiel.

$\boldsymbol{C_{g.eff}}$: Capacité shunt effective.

$\boldsymbol{C_{eq}}$: La Capacité équivalente de l'enroulement.

CC : Coefficient de Corrélation.

MM : L'indice Min-Max.

CD : Distance Complexe.

Φ : Le flux magnétique.

Introduction Générale :

Au-delà d'une certaine distance et/ou d'une certaine puissance, le transport d'énergie électrique doit se faire sous une tension suffisamment élevée. En effet, la puissance est le produit de la tension par le courant; pour une puissance donnée, plus la tension est élevée, plus le courant est faible. Il en résulte donc des pertes par effet Joule et des sections de conducteurs plus faibles [1].

Le transformateur de puissance est certainement le dispositif qui a permis l'essor puis la domination des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique.

La première fonction d'un transformateur est l'élévation de la tension de transport afin de réduire le courant et donc les pertes joules générées dans les lignes. Cette élévation est bien entendue allée de pair avec l'abaissement de la tension aux points d'utilisation. D'un point de vue plus général, un transformateur est un élément indispensable à l'interconnexion des différents réseaux d'énergie.

Les pannes sur les transformateurs, bien que peu fréquentes au vu du nombre d'appareils en service, sont généralement problématiques vis-à-vis du coût de réparation, mais souvent encore plus critiques au niveau de l'indisponibilité du réseau électrique concerné [2].

Il paraît donc évident, dans le cadre. De leur maintenance préventive, de réaliser des tests et des méthodes de diagnostics qui permettent de suivre et d'identifier précocement des symptômes de pannes pouvant apparaître en phase d'exploitation du réseau.

C'est pourquoi, les études se positionnent aujourd'hui sur la montée en puissance du diagnostic d'état des transformateurs, sur laquelle s'appuie un des leviers de développement de l'assistance technique en électricité [3].

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 et des supports à l'intérieur des transformateurs de puissance.

Le travail présenté dans cette mémoire consiste à la proposition d'une approche de diagnostique des défaillances (localisation et évaluation de la gravité des déformations radiales) des enroulements du transformateur en utilisant la technique d'analyse fréquentielle (FRA), qui est présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude théorique sur les transformateurs de puissance, portant sur le rôle, le fonctionnement, la constitution, les moyens de protection contre les

défaillances, les défauts fréquents dans les transformateurs ainsi que les différentes méthodes de diagnostic.

Une étude préliminaire qui est abordée au deuxième chapitre sur les principaux modèles du transformateur en régime fréquentiel rencontrés dans la littérature ainsi que les différentes techniques de l'analyse fréquentielle des enroulements du transformateur.

Le dernier chapitre propose une technique de localisation et d'évaluation des déformations radiales des enroulements du transformateur, dans laquelle cette approche s'appuie sur le modèle mutuellement couplé largement reconnu pour l'analyse et l'interprétation de la réponse fréquentielle des enroulements du transformateur pour diagnostiquer leurs défaillances. Néanmoins, les déformations géométriques des enroulements entraînent des changements paramétriques (les inductances, les capacités et les fréquences de résonances) sur le modèle équivalent mutuellement couplé et la réponse fréquentielle de l'enroulement, où les caractéristiques de ces changements paramétriques ont été utilisées pour la proposition d'une technique permettant à la fois la localisation de la position et de l'évaluation de l'étendue des défauts radiaux de l'enroulement.

Chapitre I

Généralités et méthodes de diagnostic des bobinages du transformateur de puissance

I.1 Introduction

Le transformateur de puissance est certainement le dispositif qui a permis l'essor puis la domination des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique [4]. La première fonction d'un transformateur a été l'élévation de la tension de transport afin de réduire le courant et donc les pertes joules générés dans les lignes. Cette élévation est bien entendue allée de pair avec l'abaissement de la tension aux points d'utilisation. D'un point de vue plus général, un transformateur est un élément indispensable à l'interconnexion des différents réseaux d'énergie. En effet, dans le cas de l'Algérie, on trouve plusieurs types de réseaux classés en réseau de transport 400kV et 225kV (domaine THT), réseau de répartition 90kV et 63 kv (domaine HT), réseau de distribution 20kV (domaine MT) et réseau BT. A noter que la norme UTE C a redéfini les niveaux de tension. Pour obtenir une connaissance de l'état des équipements et d'adopter les solutions les plus adéquates qui garantissent le fonctionnement correct des transformateurs, il est nécessaire d'effectuer périodiquement des inspections et des travaux de réparation**.**

Dans ce qui suit, une étude théorique portant sur le fonctionnement, la construction, les dispositifs de protection, les défauts fréquents dans les transformateurs ainsi que les techniques de diagnostic du transformateur sont présentés.

I.2 Définition

« Transformateur de puissance : Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique » [5].

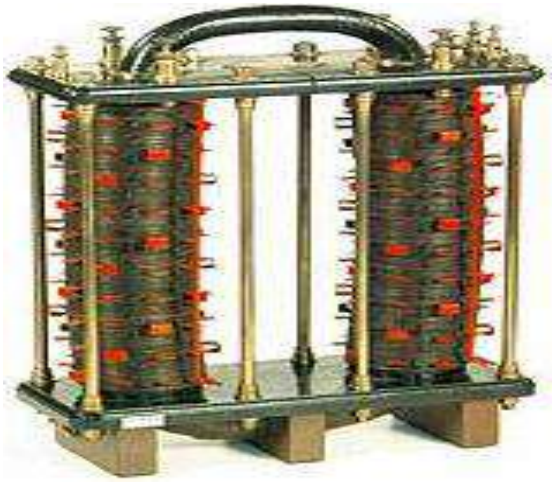


Figure I.1 : Premier transformateur à circuit magnétique fermé (1886).

I.3 Données Techniques

I.3.1 Paramètres techniques des transformateurs

Les paramètres techniques des transformateurs sont indiqués sur leur plaque signalétique et sur le procès-verbal de l'essai de routine réalisé en usine [5].

I.3.2 Puissance nominale

Puissance assignée Ph : valeur conventionnelle de la puissance apparente en kVA destinée à servir de base à la construction du transformateur. Les essais et garanties du constructeur se référant à cette valeur [5].

I.3.3 Haute tension

Pour une double tension primaire, préciser la puissance en kVA correspondant à chaque niveau. La(es) tension(s) secondaire(s) sont celles à vide en circuit ouvert [5].

I.3.4 Fréquence nominale

En Algérie, la fréquence du réseau est de 50 Hz.

I.3.5 Conditions ambiantes et hausse de la température

Les transformateurs sont conçus pour fonctionner normalement dans les conditions ambiantes suivantes [5]:

- La température de l'air ambiant ne peut pas dépasser la valeur indiquée dans la spécification technique ;
- La hausse de température garantie (hausse maximale de la température de l'huile et hausse moyenne de la température des enroulements) au-dessus de la température ambiante ne dépassera pas les valeurs précisées dans la spécification technique [5].

  Dans le cas où la température ambiante dépasse la valeur définie dans la spécification technique, il faut abaisser la hausse admissible de la température de l'huile et des enroulements dans une proportion identique en réduisant la puissance du transformateur.

I.3.6 Résistance mécanique de la cuve

Les cuves de transformateurs immergés dans l'huile sont capables de résister à une pression sans subir de déformation permanente [5].

I.3.7 Mise en charge des transformateurs

Les transformateurs doivent être mis en charge conformément aux normes selon lesquelles ils ont été conçus.

Il est notamment recommandé de respecter les règles visées dans le document suivant :

I.3.8 Tenue en court-circuit

Les transformateurs sont conçus pour résister sans dommage à tous les effets mécaniques et thermiques d'un court-circuit conformément à la norme 60076 de la CEI ou à la norme polonaise PN-IEC60076-1. Cette résistance est garantie [6].

I.3.9Tension de tenue

Les transformateurs sont conçus pour résister sans dommage à toutes les tensions d'essai de l'intervalle spécifié dans la norme 60076 de la CEI ou la norme polonaise PN-IEC 60076-1.

Rendement du transformateur (η)

$$\eta = \frac{P_0 \ + n^2 \ P_{zw}}{n \ .S.\cos\varphi + P_0 \ + n^2 \ P_{zw}} \qquad \text{(I.1)}$$

Où :

P_0 : Perte à vide en KW.

P_{zw} : Perte en charge en KW.

S : Puissance nominale en KVA.

n :Facteur de charge (charge nominale = 1)

$\cos\varphi$:Facteur de puissance.

I.3.10 Caractéristiques liées à la technologie et aux conditions d'utilisation :

Cette liste n'est pas exhaustive :

- choix du diélectrique,
- installation intérieure ou extérieure,
- altitude (≤ 1000 m est le cas standard),
- température **:**
  - ambiante maximum : 40°C.
  - ambiante moyenne journalière : 30°C.
  - ambiante moyenne annuelle : 20°C.

Ces températures sont des valeurs standard selon la norme CEI 60076 [6].

I.3.11 Bruit du transformateur

Les transformateurs situés à proximité d'une zone résidentielle doivent avoir un niveau sonore aussi bas que possible. Un transformateur à faible bruit est de plus en plus spécifié par les transformateurs utilisateurs ; les niveaux de bruit spécifiés sont de 10 à 15 Db inférieurs aux niveaux dominants mentionnés dans les normes internationales. La conception et la fabrication d'un transformateur avec un faible niveau sonore nécessitent une compréhension approfondie des sources de bruit. Noyau, les enroulements et les équipements de refroidissement sont les trois principales sources de bruit. Le noyau est la source la plus importante et la plus significative du bruit du transformateur.

I.4 Construction et conception du transformateur

I.4.1Circuit magnétique

Réalisé à partir d'un empilage de tôles en matériaux ferromagnétique, le circuit magnétique a pour but de canaliser le flux magnétique Φ et de présenter le minimum de pertes par hystérésis et par courant de Foucault. Pour éviter les pertes par rayonnement magnétique on utilise principalement des circuits magnétiques fermés [7].

I.4.2 Enroulements

Pour les transformateursPrincipalement fait de cuivre, les enroulements de transformateurs doivent être le plus proche possible afin de disposer du même flux magnétique (Φ).Pour les plus fortes puissances on utilise des conducteurs multibrins pour limiter l'effet de peau ainsi que les pertes par courants de Foucault [8].

I.4.3 Changeur de prises

Les régleurs en charge sont des appareils électromécaniques particulièrement sollicités. Ils font l'objet d'une maintenance attentive car leur moindre défaillance peut endommager sérieusement le transformateur.Ce dispositif permet d'ajuster le rapport de transformation sans interruption de service.

I.4.4 Cuve

La cuve doit satisfaire à des exigences de différentes natures

- Le remplissage de l'huile s'effectue généralement sous vide, de sorte que la cuve doit pouvoir supporter cette opération sans déformation excessive
- La stabilité mécanique doit être assurée durant le transport qui, pour les plus gros transformateurs, est une opération extrême complexe.
- L'étanchéité à l'huile doit être garantie au niveau des soudures et de toutes les ouvertures (bornes de traversées, capteurs de mesure, etc.).
- La géométrie doit être optimisée de manière à réduire les pertes Joule dues aux courants induits.
- La structure doit être conçue afin d'éviter les accumulations d'eau de pluie [9].

I.4.5 Isolation papier-huile

Les spires sont isolées à l'aide d'un papier fabriqué à partir du bois ou du coton (ou d'une combinaison des deux). Le plus connu est le papier Kraft, obtenu par un procédé chimique particulier (au sulfate). Ses principales caractéristiques sont l'uniformité de l'épaisseur (de 2 à 3 mm, sous forme d'une superposition de couches comprimées les unes sur les autres), son lissé, sa résistance mécanique, sa résistance au vieillissement, sa rigidité diélectrique et sa permittivité. Cette dernière doit être aussi proche que possible de celle de l'huile d'imprégnation, afin d'éviter les contraintes électriques à l'interface entre les deux matériaux. Les huiles existent en multiples qualités, selon le type de transformateur, les conditions de température à supporter, etc. Leurs deux

principales fonctions sont l'isolation électrique et le refroidissement. La chaleur est transportée depuis le noyau et les enroulements vers la cuve du transformateur, par une convection de l'huile. Cette convection peut être naturelle (sous l'effet des gradients de température) ou forcée (à l'aide de pompes). La chaleur peut être évacuée simplement par la surface de la cuve ; mais le circuit de refroidissement peut aussi comporter des radiateurs, ventilés ou non, et parfois refroidis à l'eau [10].

I.4.6 Huile du transformateur

Les transformateurs de distribution baignent dans une cuve contenant de l'huile minérale. L'huile assure le transport de la chaleur provenant du noyau et des enroulements jusqu'à la paroi de la cuve : de là, la chaleur est ensuite cédée à l'air extérieur. De plus, l'huile assure un isolement meilleur que l'air et elle protège les enroulements contre l'humidité de l'air. L'humidité a pour effet d'accélérer l'oxydation des isolants soumis aux hautes tensions. La cuve est ordinairement refroidie par ventilation naturelle [11].

I.5 Accessoires et équipement du transformateur

I.5.1 Thermomètre à double contact

Ce thermomètre est équipé de deux contacts électriques réglables que l'on peut raccorder à des circuits d'alarme ou de déclenchement. Les contacts ajustables sont conçus pour des tensions continues ou alternatives de 250 V maximum. Le circuit d'alarme ou de déclenchement respectif se ferme quand l'indicateur (l'aiguille) passe par la valeur préréglée (définissable par l'utilisateur) sur la face avant du thermomètre.

I.5.2 Soupape de sécurité

La soupape de sécurité est tarée pour une surpression de 0,030 à 0,035 MPa (0,3 à 0,35 at.).

I.5.3 Relais Buchholz (dans les transformateurs respirant, à conservateur)

Le relais Buchholz comprend deux flotteurs et deux contacts d'alarme et de déclenchement. Il est monté sur la tubulure reliant le transformateur au conservateur [12].

La flèche placée sur le couvercle du relais doit pointer vers le conservateur.

- Accumulation de gaz : alarme
- Court-circuit interne : déclenchement
- Caractéristiques des contacts
- Tension assignée : 24 à 240 Vca ou Vcc
- Courant assigné : 0,5 A
- Pouvoir de coupure : 2 Aca ou Acc

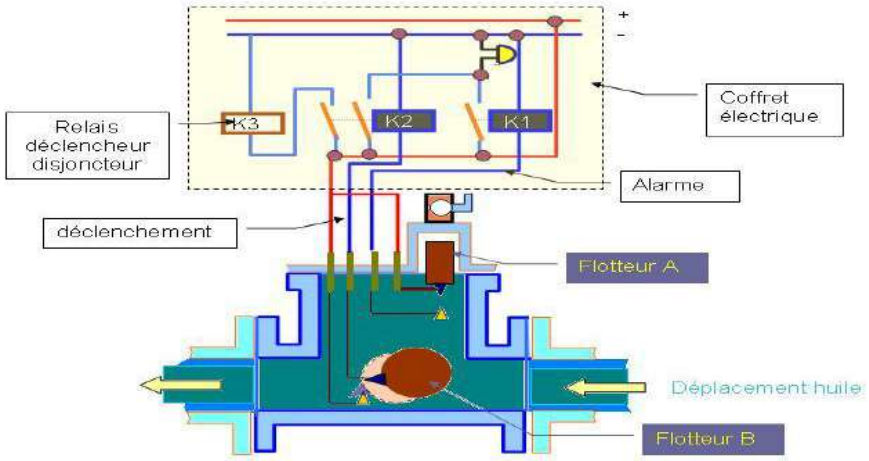


Figure I.2 : Relais Buchholz d'après Max Buchholz, 1875-1956

- Flotteur A de surveillance du niveau, à fonctionnement lent : provoque une alarme lorsqu'il manque de l'huile.
- Flotteur B de surveillance des mouvements de l'huile, à fonctionnement rapide provoque une alarme en cas d'événement transitoire.

I.6 Types de transformateurs [7] [8] :

Il existe trois types de transformateurs **:**

- les transformateurs de type secs enrobés.
- les transformateurs de type immergés.
- Transformateur isolé au gaz (GIT, Gas-insulated transformer).

A. Les transformateurs de type secs enrobés :

L'isolation des enroulements est réalisée par des isolants solides à base de résine. Le refroidissement est donc réalisé par l'air ambiant sans liquide intermédiaire. Il est recommandé de choisir le transformateur sec avec les caractéristiques suivantes **:**

- classe E2 de comportement vis à vis de l'environnement (condensation fréquente, pollution élevée) : enrobage procurant un excellent comportement en atmosphère industrielle et une insensibilité aux agents extérieurs (poussière, humidité...) tout en garantissant une parfaite protection de l'environnement et des personnes par la suppression des risques de pollution froide ou chaude,
- classe C2 climatique (fonctionnement transport et stockage jusqu'à -25°C),
- classe F1 de comportement au feu (F2 correspond à un accord spécial entre constructeur et utilisateur), c'est à dire **:**auto extinction rapide **:** enrobage possédant une excellente résistance au feu et une autoextinguibilité immédiate, ce qui permet de qualifier ces transformateurs d'ininflammables, matériaux et produits de combustion non toxiques : enrobage exempt de composés halogénés (chlore, brome, etc.) et de composés générateurs de produits corrosifs ou toxiques, ce qui garantit une sécurité élevée contre les risques de

pollution chaude en cas de pyrolyse, fumées non opaques : du fait des composants utilisés [13].

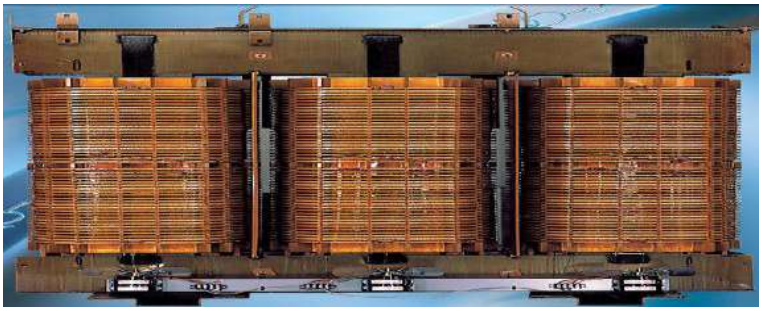


Figure I.3 : transformateurs de type sec

B. Les transformateurs de type immergés :

Le liquide utilisé comme diélectrique dans les transformateurs immergés est :

- **soit de l'huile minérale**, tirée du pétrole (transformateur Minera)
- **soit de l'huile végétale**, extraite des plantes (transformateur Vegeta).

Ces liquides étant inflammables, voire très inflammables dans le cas de l'huile minérale, il est recommandé de prendre des mesures de sécurité, obligatoires dans la plupart des cas dont la plus simple est le relais de protection type DMCR ou DGPT2.

En cas d'anomalie, il donne l'ordre de mise hors service du transformateur avant que la situation ne devienne dangereuse. L'huile minérale est difficilement biodégradable, même sur le long terme, alors que l'huile végétale est biodégradable à 99 % en 43 jours. Elle constitue une alternative écologique, apportant de plus des performances optimisées.

Le diélectrique liquide sert aussi à évacuer les calories. Il se dilate en fonction de la charge et de la température ambiante. La conception des transformateurs leur permet d'absorber les variations de volume correspondantes [14].

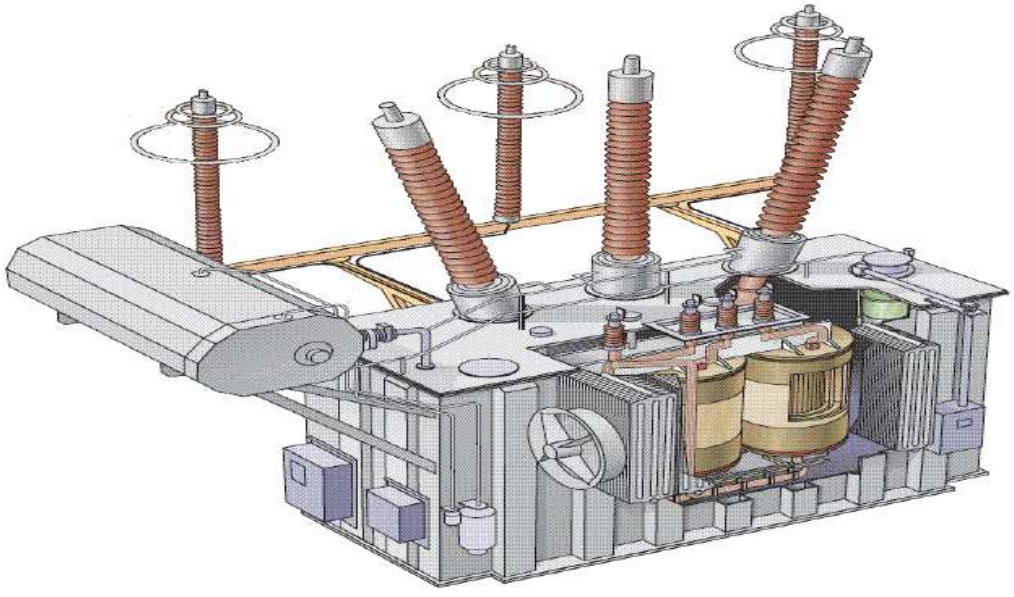


Figure I.4 Transformateurs de type immergé

C. Transformateur isolé au gaz (GIT, Gas-insulated transformer) :

Contiennent un transformateur de courant et un transformateur inductif de tension. Leurs avantages sont [5] :

- Sécurité totale en cas d'arc interne : la surpression est diminuée grâce au dispositif de libération de pression (disque de rupture) situé sur la partie supérieure.
- Conception pensée pour minimiser le volume, la pression ainsi que les fuites de gaz, et réduire ainsi son impact environnemental.
- Surveillance en ligne de l'état de l'isolation au moyen de l'alarme du manomètre.
- Réservoir et isolants conçus, fabriqués et testés conformément aux normes internationales de récipients sous pression.
- Conçu pour travailler avec une tension nominale avec pression de gaz interne atmosphérique.



Figure I.5 : transformateurs de type gaz SF_6 Toshiba

I.6.1 Processus de production :

Quelle que soit la configuration sur mesure, tous les transformateurs de puissance passent par le même processus de production de base. Le processus peut prendre de plusieurs mois à une année, depuis la commande jusqu'à la livraison, suivant la taille du transformateur de puissance. Les gros transformateurs de puissance sont habituellement plus longs à produire que les petits transformateurs de puissance. La production des transformateurs de puissance comporte un certain nombre d'étapes clés **:** la conception, la fabrication du noyau, la fabrication du bobinage, l'assemblage du bobinage et du noyau, la mise en cuve, la mise à l'essai ainsi que la livraison [15].

- La première étape dans le processus de production est la conception du transformateur de puissance. Comme il s'agit d'un produit sur mesure, les ingénieurs doivent d'abord établir la conception électrique et mécanique du transformateur de puissance, sous réserve de l'agrément du client. L'ingénieur prépare des dessins mécaniques, des dessins détaillés et de

transport, des conceptions de commandes schématiques, des diagrammes de câblage et des diagrammes d'armoires de commande.

- Après l'étape de la conception commence celle de la fabrication. La première phase dans l'étape de fabrication est la création du noyau du transformateur de puissance. Le noyau est obtenu en taillant des tôles d'acier magnétiques laminées et en les superposant d'une façon bien définie. Les tôles superposées sont ensuite pressées et un matériel de positionnement sert à mettre le noyau en position debout.
- L'étape suivante consiste à préparer les bobinages (fabrication des bobines). Les bobinages sont fabriqués avec du fil de cuivre et recouverts d'un papier isolant. Ils sont séchés pour éliminer toute teneur en humidité. La méthode de bobinage particulière employée peut varier suivant la conception particulière d'un transformateur de puissance.
- Les bobinages sont ensuite placés sur le noyau et les connexions requises sont établies. La conception optimale de l'ensemble noyau-bobine est réalisée en considérant les particularités techniques requises, y compris le refroidissement, la taille, la compacité et la disposition des prises. Après le montage, l'assemblage noyau-enroulement est séché une seconde fois afin d'éliminer toute trace d'humidité.
- L'ensemble noyau-bobine est ensuite déposé dans une cuve en acier et y est fixé en place par boulonnage. La cuve est habituellement peinte à l'intérieur et à l'extérieur afin d'empêcher la corrosion et est équipé d'un système de refroidissement. Le système de refroidissement est précisé par le client.

I.6.2 Exploitation d'un transformateur

I.6.2.1 Exploitation

Les exploitants veulent aujourd'hui réduire leur coût d'exploitation et de maintenance. Ils sont poussés dans cette voie par la compétition que génère la déréglementation. La réduction des coûts passe par l'accès aux données du poste depuis les centres de contrôle distant, accès qui accélère l'usage de la technologie numérique. Cette technologie pour un prix équivalent à des solutions traditionnelles, apporte un nombre accru de fonctionnalités nouvelles, fonctionnalités devenues nécessaires pour répondre aux nouveaux besoins de l'exploitant. Les transformateur sont munis progressivement de possibilités de monitoring, autodiagnostic, … et surveillés à distance, permettant ainsi de réduire les frais de maintenance [16]. Malgré tout, le problème reste aujourd'hui la maîtrise de la mutation fonctionnelle et technologique sans précédent du contrôle de l'énergie (dans les postes et au niveau des centres de contrôle distant). La normalisation suit plus qu'elle ne précède le mouvement ce qui doit inviter concepteur et exploitant à une certaine prudence devant les différentes possibilités qui apparaissent aujourd'hui.

I.6.2.2 Transformateurs en parallèle :

La mise en parallèle de transformateurs impose des précautions (couplages compatibles, tensions de court-circuit identiques…) afin d'optimiser le rendement. La puissance du plus gros transformateur ne doit pas en outre dépasser deux fois celle du plus petit .Lorsqu'on utilise plusieurs transformateurs de même puissance en parallèle, la puissance totale disponible est égale à

la somme des puissances des appareils. Si les puissances sont différentes, la puissance totale disponible est inférieure à la somme des puissances des appareils couplés.

I.6.2.2.1 Conditions de mises en parallèle

- indices horaires compatibles.
- Des tensions de court-circuit égales à 10 % près.
- Une différence des tensions au secondaire des divers appareils, entre phases correspondantes ou entre ces phases et le neutre, inférieure à 0,4 %.

I.6.2.3 Fiabilité des transformateurs

Les pannes importantes sont rares mais souvent problématiques, en particulier par rapport à l'indisponibilité du matériel. Bien que des actions de maintenance préventive existent, comme les analyses d'huile, il n'existe pas encore de maintenance prédictive qui donne l'état futur d'un appareil. La dernière enquête internationale conséquente sur les défaillances des transformateurs de puissance date de 1983 (CIGRE, 1983). Elle regroupait un retour d'expérience de 961 défaillances sur des transformateurs de haute tension supérieure à 60 kV, et de moins de 20 ans. Elle montre que sur les transformateurs de puissance de type poste avec régleur en charge (692 cas de défaillance), les principaux composants défaillants sont :

- Les régleurs en charge 41 %
- Les enroulements 26 %
- Les traversées 12 %

I.6.2.4 Composants du transformateur etleurs défauts détectables [17]

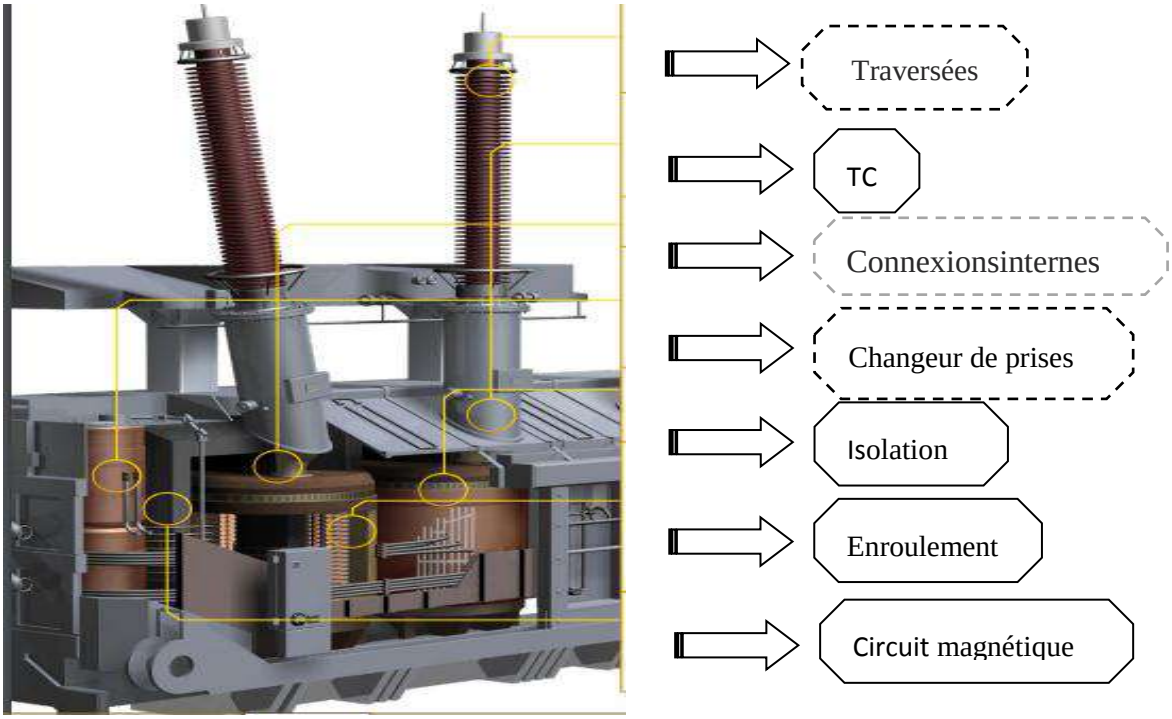


Figure I. 6 : Composants du Transformateur**.**

Tableau 1 : Composants du transformateur et leurs défauts détectables [17].

Composant	**Défauts détectables**	**Méthodes de mesure possibles**
Traversées	Claquage partiel entre les couches capacitives de répartition	**1/8/11/13**
	Vieillissement et pénétration d'humidité	**1/8/13**
	Connexion de la prise de mesure ouverte ou défectueuse	**1/13**
	Décharges partielles dans l'isolation	**1/11/13**
TC	Erreur de rapport de courant ou de déphasage en tenant compte de la charge, magnétisme résiduel excessif, non-conformité à la norme IEEE ou CEI applicable	**10**
	Rapport de courant et déphasage dépendant de la charge	**10**
	Spires en court-circuit	**10**
Connexions internes	Problèmes de contact Déformation mécanique	**2/9**
	Problèmes de contact Déformation mécanique.	**9**
Changeur de prises	Problèmes de contact au niveau du sélecteur de prise	**2/4/9**
	et du commutateur Circuits ouverts, spires en court-circuit, ou connexions	**2/4/9**
	fortement résistives dans les réactances du Changeur	**2/4/9**
	de Prises en Charge	**2/4/9**
Isolation	Humidité dans l'isolation solide	**1/7**
	Vieillissement, humidité, contamination des liquides isolants	**1/7**
	Décharges partielles	**1/11/12/13**
Enroulements	Court-circuit entre les enroulements ou entre les spires	**2/3/4/9**
	Court-circuit entre les conducteurs	**6/9**
	Circuits ouverts dans les conducteurs parallèles	**2/6/9**
	Court-circuit à la terre	**¼**
	Déformation mécanique	**1/5/9**
	Problèmes de contact, circuits ouverts	**2/9**
Circuit magnétique	Déformation mécanique	**1/9**
	Terre du circuit magnétique flottante	**1/9**
	Tôles du circuit magnétique en court-circuit	**4/9**
	Magnétisme résiduel	**4/7/9**

Tableau I.2 : Méthodes de mesure possibles [17].

Méthodes de mesure possibles	N°
Mesure de la capacité et du facteur de puissance/dissipation à 50 Hz ou 60 Hz par paliers de tension à fréquence variable	**1**
Mesure de la résistance d'enroulement et vérification du CPeC	**2**
Mesure du rapport de transformation (TTR)	**3**
Mesure du courant de magnétisation	**4**
Mesure de la tension de court-circuit/ réactance de fuite	**5**
Mesure de réponse en fréquence des pertes parasites supplémentaires (FRSL)	**6**
Démagnétisation	**7**
Analyse de la réponse diélectrique (en fréquence)	**8**
Analyse de la réponse au balayage en fréquence (SFRA)	**9**
Analyse des transformateurs de courant	**10**
Analyse des décharges partielles	**11**
Localisation des décharges partielles	**12**
Surveillance et de mesure en ligne des décharges partielles	**13**

I.7 Surveillance les transformateurs en continu

Les mesures ONLINE ont l'avantage d'être effectuées automatiquement et en permanence ; elles donnent des indications pendant le fonctionnement du transformateur, ce qui permet la détection des défauts dès leur apparition. Compte tenu de cet avantage déterminant, un grand nombre de technologies ont été et continuent à être développées. Un nombre important de paramètres de fonctionnement peut aujourd'hui être surveillé en continu. Dans la plupart des cas les mesures effectuées sont générées séparément les unes des autres en provoquant une alarme lorsqu'un seuil défini comme la limite admissible/acceptable est dépassé [4].

L'appareil a la capacité de surveiller les transformateurs en continu et de détecter un défaut dès sa naissance afin de diminuer les risques de défaillances. Il a trois fonctions principales [4] **:**

- **Le suivi** des capteurs stratégiquement placés autour du transformateur afin de surveiller tous les paramètres.
- **Le contrôle** de la tension primaire et du système de refroidissement complet qui sont importants pour prolonger la durée de vie de l'isolation et celle du transformateur lui-même.
- **La communication** différente options qui permettent de se connecter sur n'importe quel réseau en ayant accès aux résultats virtuellement.

I.7.1 Les Transformateurs Concernés :

Deux familles de transformateurs sont particulièrement concernées par le monitoring [7]**:**

- Les transformateurs de puissance stratégiquement critiques
  (transformateurs élévateur à la sortie des centrales, transformateur situés dans un site ou l'accès est difficile, transformateurs travaillant sans réserve pour des raisons économiques).
- Les transformateurs de puissance en service depuis un grand nombre d'années
  dont il serait avantageux de réduire les coûts de maintenance et planifier le remplacement.

I.7.2 Les Grandeurs Mesurées :

Tableau I.3 : Les grandeurs mesurées [7]**.**

Ensemble Monitoring	Les Traversées	Régleur En Charge	Parties Actives	Système De Refroidissement
DÉFAUTS OBSERVÉS	Dégradation des isolants	Contact déficient Fonctionnement du moteur anormal Point chaud sur une connexion	Défauts électriques Défaut thermique de haute température Teneur en eau trop élevée Anormale dégradation des isolants cellulosiques	Problème de pompe de refroidissement Débit insuffisant Refroidissement insuffisant
MESURES NÉCESSAIRES	Capacité et tangente delta Courant de fuite Décharges partielles	Courant de consommation des moteurs Analyse des gaz dissous Nombre total de manœuvre Position du régleur en charge Courant de charge	Analyse des gaz dissous Teneur en eau Température du fluide en haut de cuve Courant du transformateur Charge du transformateur	Température haut de cuve Température bas de cuve Courant de consommation des pompes Statut des aéroréfrigérants Courant de consommation des moteurs de ventilateurs

I.7.3 Les huit raisons de s'équiper en monitoring online [18] :

I.7.3.1 Évaluation du transformateur en continu :

Évaluer le transformateur en continu permet de sécuriser au sa durée de vie estimée. Celle-ci se calcule en se basant sur les températures du fluide et la charge de l'appareil.

I.7.3.2 Suivi de refroidissement prédictif et contrôle :

Le contrôle du refroidissement et son déclenchement prédictif s'adapte de manière proactive a la variation de charge et permet de prolonger la vie de l'isolation du transformateur.

I.7.3.2.1 Surveillance des traversées :

La surveillance en ligne des traversées permet de transmettre en temps réel des informations sur les capacités et le tangent delta de celles-ci pour détecter le plus tôt possible les défaillances.

I.7.3.2.2 Suivi des analyses des gaz dissous :

Surveiller l'état du transformateur par l'analyse des gaz dissous permet de détecter et de diagnostiquer les premiers symptômes de défaillances.

I.7.3.3 Modélisation thermique :

Le monitoring accepte différentes mesures comme les températures du fluide en bas de cuve, en haut de cuve, et ambiante la charge du transformateur. A partir de ces données d'entrée et des caractéristiques de l'appareil, le monitoring permet de créer un modèle thermique du transformateur. Ce modèle peut être utilisé ensuite pour calculer le taux de vieillissement de l'isolation, la capacité de charge dynamique etc.…

I.7.3.3.1 Surveillance de décharge partielle :

La surveillance dynamique permet de surveiller les décharges partielles des transformateurs de puissance et autres équipements électriques. En se connectant aux prises capacitives des traversées les signaux des décharges partielles se mesurent. La technologie antibruit utilisée permet au système de différencier automatiquement les sources des signaux internes et externes.

I.7.3.3.2 Suivi et contrôle des tensions et des changeurs de prises :

Le monitoring online offre différentes options de surveillance et de contrôle de défauts pour le suivi des tensions et des changeurs de prises, dont l'état des contacts, le nombre de de manœuvres, le courant de consommation du moteur.

I.7.3.4 Alarme et analyse :

Un large choix de configurations d'alarmes personnalisables est disponible. Les différentes alarmes font du monitoring une solution complète de surveillance, contrôle, analyse et diagnostic des transformateurs.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les transformateurs de puissance, les composants du transformateur et leurs défauts détectables, ainsi que la surveillance des transformateurs en continu, dans le but de réduire la défaillance dans les enroulements et d'augmenter la durée de vie de transformateur.

Chapitre II

Défauts et modèles du transformateur en vue de l'analyse de la réponse en fréquence (FRA)

II.1. Introduction

Les modèles de transformateurs traditionnels disponibles ne sont pas capables de représenter le comportement du transformateur pendant un état transitoire, qui comprend des fréquences élevées, car ils ne prennent généralement pas suffisamment en compte le comportement résonnant du transformateur causé par sa conception très complexe. Par conséquent, des modèles plus complexes de «boîte noire» sont développés. Ces modèles peuvent être établis sans aucune connaissance de la géométrie du transformateur, sur la base de l'ajustement de la matrice d'admittance mesurée du transformateur en fonction de la fréquence. Ce chapitre est consacré, à la présentation des principaux modèles de transformateur de puissance rencontrés dans la littérature dans l'objectif de choisir le modèle le plus approprié à notre étude, et d'autre part à la présentation de la technique d'analyse fréquentielle comme outil pertinent dans le domaine de diagnostic de défaillances dans les enroulements du transformateur.

II.2. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA)

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est largement utilisée pour détecter les déformations des enroulements et du noyau dans l'alimentation des transformateurs. Cependant, l'interprétation de la FRA est toujours un domaine difficile qui nécessite des efforts de recherche, afin d'établir une interprétation standard et largement acceptée. Par ailleurs, pour étudier l'impact de diverses déformations d'enroulement sur le transformateur, l'interprétation de la signature FRA en une haute fréquence et le modèle équivalent de l'enroulement de transformateur est requise.

II.3.Objectifs de la FRA

L'objectif principal de la technique FRA est de détecter les défaillances d'un transformateur (noyaux magnétiques et enroulements). Cette technique permet de détecter de toute forme de défaillances tels que **:**

- les déformations ou déplacements des enroulements.
- les spires court-circuitées ou les enroulements ouverts.
- les défauts de la structure de fixation.
- les défauts dans les connexions du noyau magnétique.
- les affaissements partiels d'enroulement.
- les circuits de terre du noyau magnétique défectueux.
- les déplacements du noyau magnétique.
- le claquage des enroulements.

II.4. Comparaison entre la méthode IFRA et SFRA [18] :

Tableau.II.1. Comparaison entre la méthode IFRA et SFRA .

	SFRA	**IFRA**
Technique de mesure	Injection et mesure à chaque fréquence. Chaque mesure est sélective en fréquence	Seulement une impulsion les résultats provient d'une transformée de Fourier rapide FTT
Suppression du bruit	Très bon rapport signal/bruit La méthode démesure permet de supprimer Le bruit sur une large bonde de fréquence	Difficultés à filtrer le bruit
Précision	Même précision sur toute la plage de fréquence	La puissance injectée différente selon les fréquences, la précision également.
Résolution à basse fréquence	possibilité d'augmenter la résolution à basse fréquence bonnes mesures à basse fréquence	La résolution en fréquence est fixe Mauvaise qualité des mesures à basse fréquence
Analyse des défauts électrique	Les défauts électriques et Mécanique sont faciles à reconnaitre (ex : noyau, flux, parties magnétiques,….)	Très difficile (voire impossible) de décret le défaut électriques (à cause de la basse résolution)
Respectabilité	Haute	Moins bonne que pour la SFRA à cause de la technique de mesure
Temps de mesure	Environ30s avec un réglage correct de la bonde passante	Environ1min
Mesures simultanées	Une mesure à la foi	Mesures simultanée possible
Equipment	Un seule équipement est nécessaire (unité SFRA)	Plusieurs équipements nécessaires (générateur de signal, oscilloscope numérique, bobine Rogowski,…..)

II.5. Théorie fondamental de la FRA

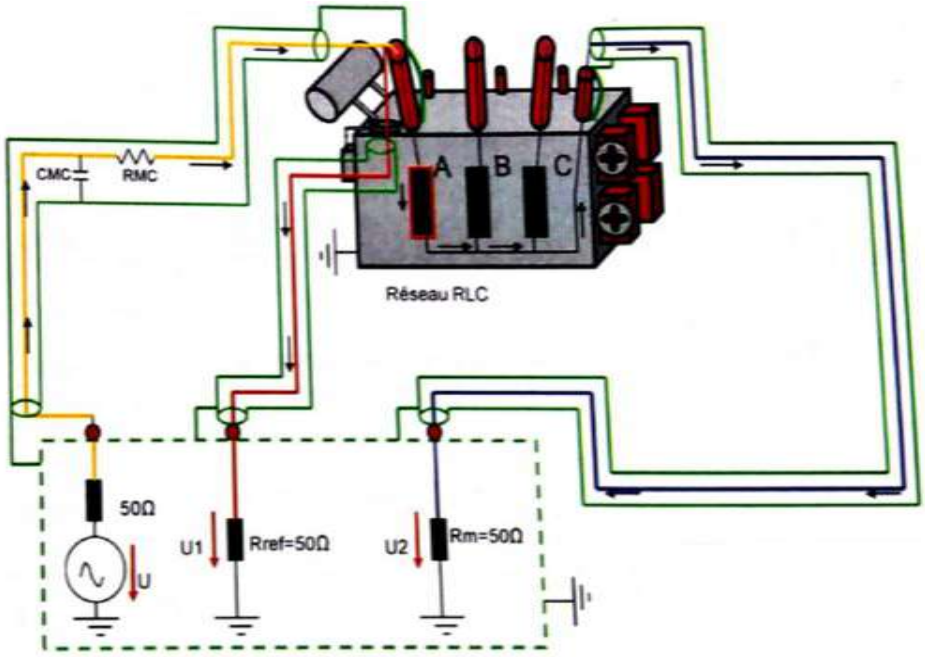


Figure.II.1. Théorie Et Fondamental De FRA [17]

La technique FRA est basé sur l'analyse d'une fonction de transfert d'enroulements, dans lequel, le générateur de signaux est connecté avec une référence de tension à une prise de phase sur le transformateur et la réponse est mesurée sur la sortie neutre du même enroulement comme le montre par la figure**.** II**.**1**.**

II.6. Le Transformateur de puissance comme un réseau RLC complexe

Le transformateur de puissance peut être représenté par réseau complexe d'éléments R, L et C. Toutefois, la figure II.2 montre le modèle physique de circuit RLC équivalent au transformateur de puissance**.**

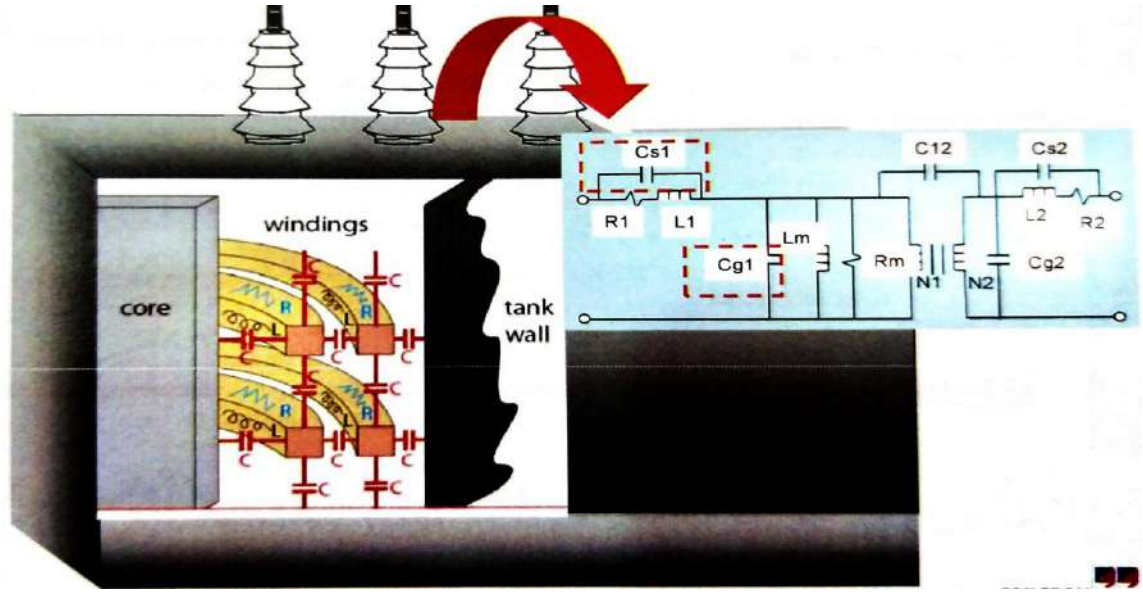


Figure .II.2. Le transformateur de puissance comme un réseau RLC complexe [17]

II.7. Quand mesurer un FRA?

- Au constructeur **:**
  - Pour assurance qualité
  - Avant et après les tests en court-circuit.
  - Avant et après les tests en HT.
  - Avant le transport.
- Sur site **:**
  - Après le transport.
  - Test de routine.
  - Après un défaut.
  - Après un message d'alarme et déclenchement par des relais de protection.
  - Après détection d'anomalies avec des testes traditionnel

Après des maintenances majeures sur traversées, enroulements..etc.

- Modélisation du transformateur pour analyse des régimes transitoires.

II.8. Types de mesure FRA

- End to end (circuit overt).
- End to end (court-circuit).
- Inter-enroulement (capacitive et inductif).

II.9. Défauts externes et internes dans le transformateur

Il est essentiel de protéger les transformateurs à haute capacité contre défauts électriques externes et internes [19].

II.9.1. **Défauts externes dans le transformateur de puissance**

II.9.1.1. Court-circuit externe du transformateur de puissance

Le court-circuit peut se produire dans deux ou trois phases du système d'alimentation électrique. Le niveau de courant de défaut est toujours suffisamment élevé. Cela dépend de la tension qui a été court-circuitée et de l'impédance du circuit jusqu'au point de défaut. La perte de cuivre du transformateur d'alimentation en panne est augmentée de manière abrupte. Cette perte de cuivre croissante provoque un échauffement interne dans le transformateur. Un courant de défaut important génère également de fortes contraintes mécaniques dans le transformateur. Les contraintes mécaniques maximales apparaissent lors du premier cycle de courant de défaut symétrique [20].

II.9.1.2. Haute perturbation de tension dans le transformateur de puissance

Perturbation haute tension dans le transformateur de puissance sont de deux sortes [20]:

II.9.1.2.1. Surtension transitoire

Une surtension et une surtension à haute fréquence peuvent survenir dans le système électrique pour l'une des causes suivantes**:**

- Mise à la terre si le point neutre est isolé.
- Opération de commutation de différents équipements électriques.
- Impulsion de lumière atmosphérique.

Quelles que soient les causes de la surtension, il est après tout une onde progressive ayant une forme d'onde élevée et raide, ainsi qu'une haute fréquence. Cette onde se propage dans le réseau électrique lorsque, une fois dans le transformateur de puissance, elle provoque une rupture de l'isolation entre les spires adjacentes à la borne de ligne, ce qui peut créer un court-circuit entre les spires [20].

II.9.1.2.2.Fréquence de surtension

Il peut toujours y avoir une chance de système surtension due à la déconnexion soudaine d'une charge importante. Bien que l'amplitude de cette tension soit supérieure à son niveau normal mais que sa fréquence soit la même qu'elle était dans des conditions normales. Une surtension dans le système provoque une augmentation de la contrainte sur l'isolation du transformateur. Comme nous le savons, la tension s'exprime par la relation suivante :

$$V = 4.44\Phi.f.T \Rightarrow V \propto \Phi \quad \text{(II.1)}$$

Une tension accrue entraîne une augmentation proportionnelle du flux de travail.

Cela provoque donc une augmentation de la perte de fer et d'une augmentation proportionnellement importante du courant magnétisant. Le flux d'augmentation est dévié du noyau du transformateur vers d'autres pièces structurelles en acier du transformateur. Les boulons à noyau qui transportent normalement peu de flux peuvent être soumis à une grande partie du flux dévié de la région saturée du noyau le long. Dans de telles conditions, le boulon peut être rapidement chauffé et détruire son propre isolant ainsi que celui des enroulements.

II.9.2. Défauts internes dans le transformateur de puissance

Les principaux défauts qui se produisent à l'intérieur d'un transformateur de puissance sont classés comme suit [21]:

II.9.2. 1. Défauts à la terre

Un défaut sur un enroulement de transformateur entraînera des courants qui dépendent de la source, de l'impédance de mise à la terre du neutre, de la réactance de fuite du transformateur et de la position du défaut dans les enroulements. Les connexions des enroulements influencent également l'amplitude du courant de défaut.

Si le neutre est solidement mis à la terre, le courant de défaut est contrôlé par la réactance de fuite, qui dépend de l'emplacement du défaut [21].



Figure II.3. Défaut à la terre d'un enroulement [11].

II.9.2.2. Défauts de base

Les défauts du noyau dus à une rupture d'isolation peuvent permettre à un courant de Foucault suffisant à circuler pour provoquer une surchauffe, qui peut atteindre une ampleur suffisante pour endommager l'enroulement [21].



Figure. II.4. Dommages à l'intérieur de la pile d'enroulements de bobine du transformateur rempli d'huile [11].

II.9.2.3. Défauts entre tours

Les défauts entre produisent en raison de contournements d'enroulement causés par des surtensions de ligne**.** Un court-circuit de quelques spires de l'enroulement donnera lieu à des courants élevés dans les boucles court-circuitées, mais les courants aux bornes seront faibles. Cela arrive souvent suite à déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements, ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas.

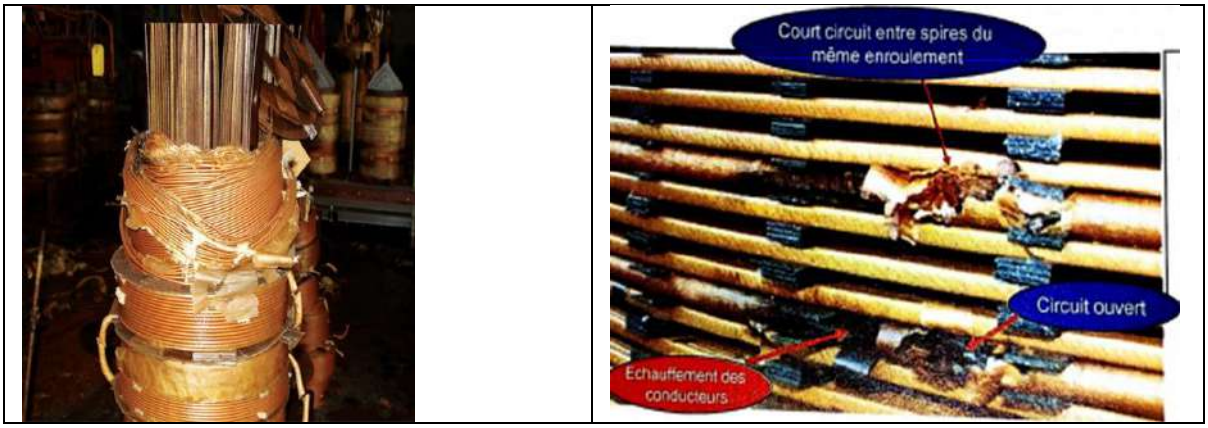


Figure II.5 :Défaut entre les tours du transformateur [22]

II.9.2.4. Défauts phase à phase

Les défauts phase à phase sont rares mais entraîneront des courants importants de magnitudes similaires aux défauts de terre.

II.9.2.5. ***Décharges Partielles*** [23]

Les décharges partielles, sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l'isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible (Figure II.6).Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage**.**Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs



Figure II.6: Tests complémentaires recommandés

II.9.2.6. ***Mouvement Axial et déformations radiales d'un enroulement :***

- Déplacement axial et déformation radiale d'un enroulement par rapport à une autre suite un défaut



(a) (b)

Figure. II.7. Déplacement axial (a) et déformation radiale (b) d'un enroulement.

II.10. Modélisation fréquentielle du transformateur

Le transformateur a long temps été un maillon faible dans la qualité de la modélisation d'une chaîne de transfert d'énergie électrique. Il est à lui seul le siège de multiples phénomènes complexes ce qui peut expliquer que jusque dans une période assez récente, les modèles proposés pouvaient paraître soit excessivement simplifiés, soit trop concentrés sur une caractéristique particulière. Il existe maintenant des modèles à constantes localisées faisant appel à un nombre de paramètres suffisamment limité pour que le transformateur ne puisse plus systématiquement être rendu responsable de la médiocre qualité d'un modèle.

Les modèles couramment utilisés dans l'étude des régimes transitoires et fréquentiels sont **:**

II.10.1. **Modèle de RESEL**

RESEL est un programme (Laboratoire Roumain) pour l'analyse des transitoires dans les réseaux électrique. Ce programme modélise le transformateur à l'aide de deux schémas couplés, l'un traduit le comportement électrique, l'autre exprime son comportement magnétique. Le circuit électrique est composé de plusieurs cellules résistances, capacités tandis que le circuit magnétique est composé d'un réseau de réluctance et de forces électromotrices. Les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique. Pour prendre en compte les effets de la fréquence, le circuit magnétique est décomposé en éléments de géométrie simple pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement simple. De même, pour tenir compte de l'effet de peau, on introduit des éléments complexes qui traduisent les pertes dans les conducteurs. Le programme ne traite que des éléments de réseau à constantes localisées, et ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur [24].

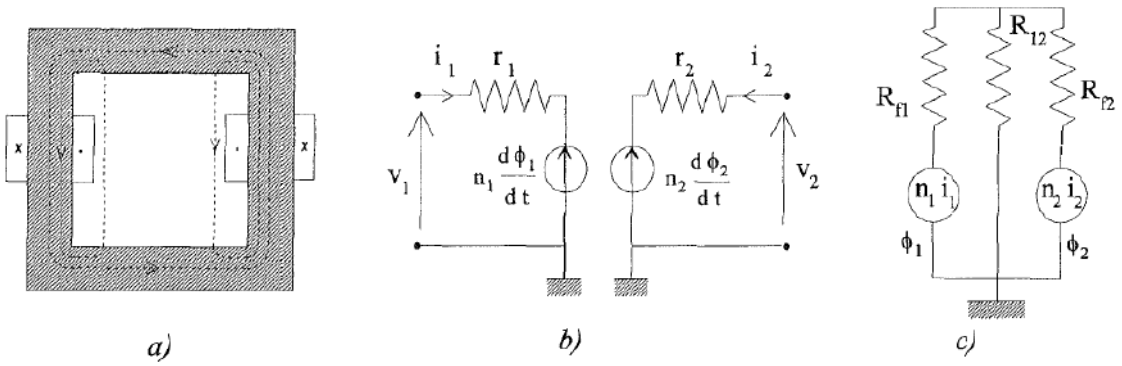


Figure II.8: Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL

a) Coup transversal d'un transformateur à 2 enroulements

b) Le circuit électrique correspondant

c) Le circuit magnétique correspondant

II.10.2. Modèle de Chimklai [25]

Ce modèle se base sur le modèle classique du transformateur. Ensuite pour modéliser le transformateur en régime fréquentiel, les capacités et les circuits R, L, C, sont synthétiséspar les mesures et ajoutés dans le circuit du modèle classique. En effet, chaque circuit rajouté représente un phénomène qui se produit en régime fréquentiel. Les capacités représentent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer

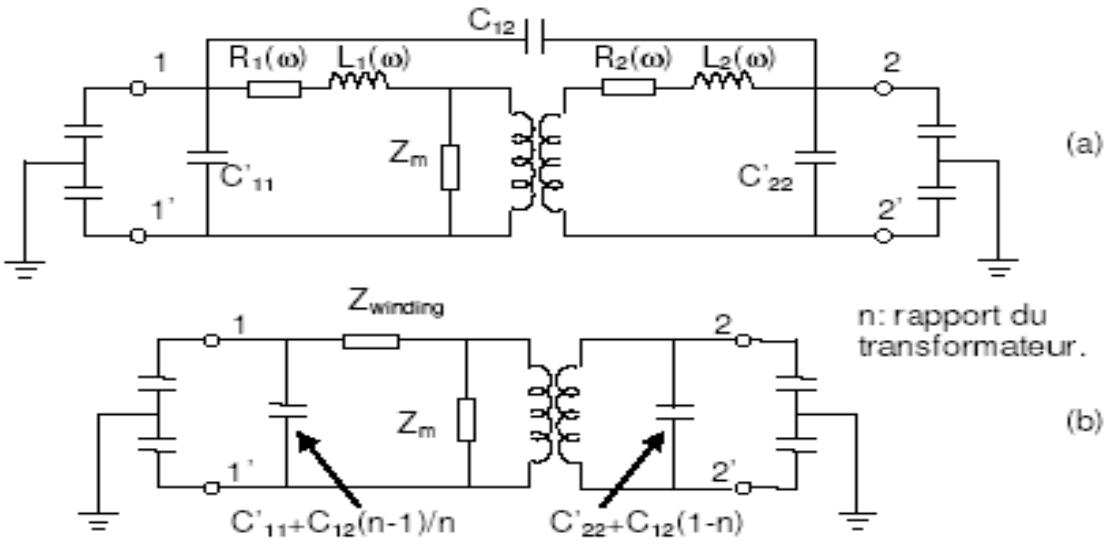


Figure II.9. Modèle du transformateur de Chimklai
a)- circuit d'origine. b)- circuit simplifié**.**

II.10.3. Modélisation par inductances propres et mutuelles [23]

On peut assimiler le comportement de l'enroulement soumis à une onde de choc à celui d'un système de condensateurs et d'inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances inductances et condensateurs (paramètres concentrés ou répartis), selon l'étude envisagée. Le cout et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement atteint dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques des simulations mises en œuvre. On discrétise le transformateur par spires ou galettes ou par des bobinages que l'on appellera élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres inductances. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse.

L'avantage de ce modèle réside dans la simplicité de sa mise en ouvre puisqu'il peut être traité d'une manière simple grâce à la théorie des réseaux électriques. Son inconvénient est le nombre

important des paramètres à calculer. C'est ce modèle qu'est dans la mesure de notre possible afin d'étudier le transformateur à HF

La figure illustre le principe utilisé dans la recherche du schéma équivalent.

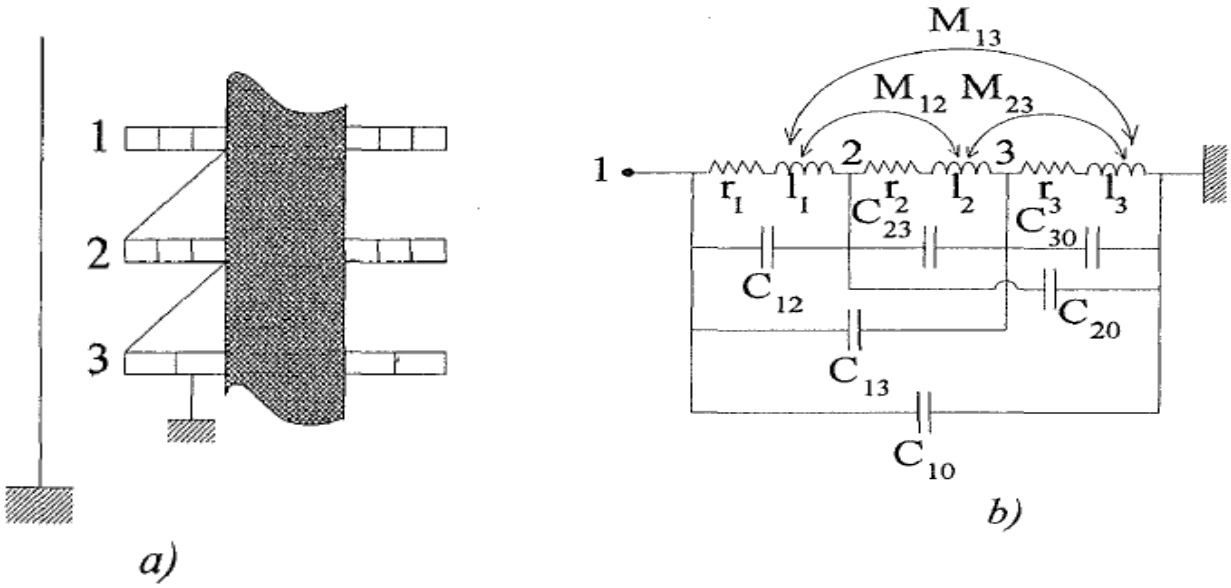


Figure II.10. Représentation d'un enroulement

II.10.4. Modèle d'Andrieu

C'est un modèle de transformateur de distribution triphasée à deuxenroulements par des principes comme dans le modèle de Chimklai. Pour modéliser untransformateur en régime fréquentiel les phénomènes suivants sont pris en compte :

- les capacités.
- les résonances dans l'enroulement HT.
- L'impédance de l'enroulement de BT, dépendant de la fréquence ($\mathbf{Z_{cc}}$).

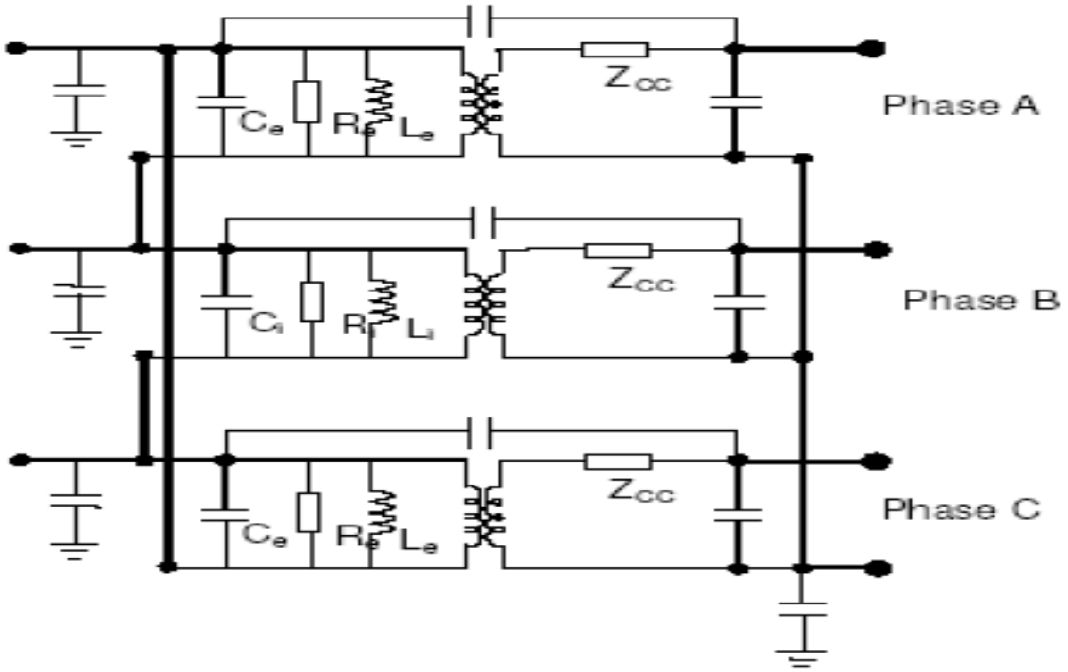


Figure II.11: Modèle d'Andrieu

La procédure de calcul des paramètres de ce modèle ; est basée sur les mesures des capacités, les mesures des grandeurs électriques en court-circuit et en circuit ouvert. Mais la fréquence limite dans laquelle le modèle est valable reste inférieure à 1MHz.

Le circuit équivalent de l'impédance Zcc est montré dans la figure. II.12.

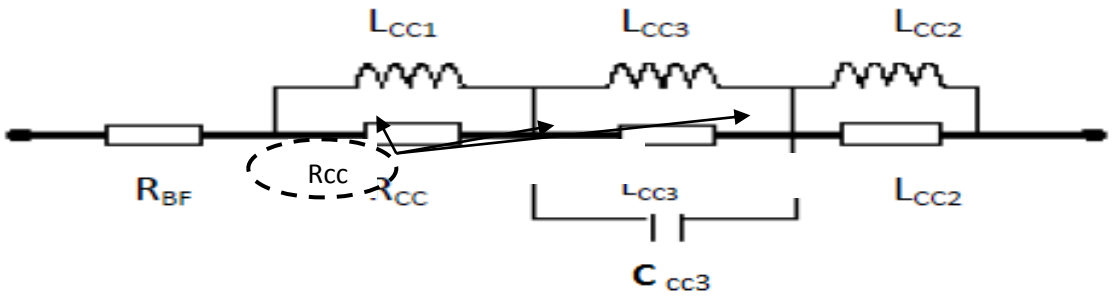


Figure II.14. Circuit équivalent de Zcc.

II.10.5. Modèle en π du transformateur :

La structure de ce modèle est basée sur la théorie du quadripôle enπ. Elle établit la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes d'entrée et de la sortie d'une phase du transformateur, les impédances obtenues sont exploitées pour construire un modèle en π du transformateur illustré dans la figure. II.13 [23].

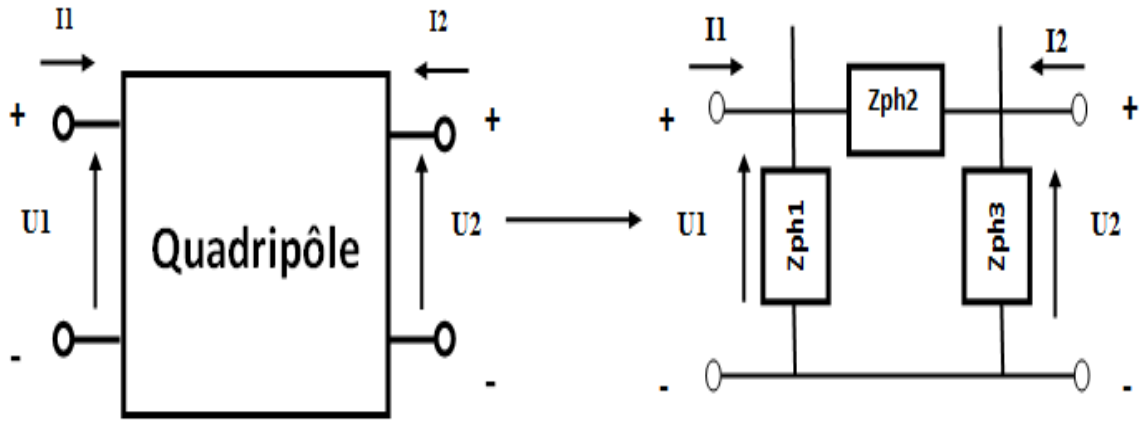


Figure II.15: Structure de modèle d'un quadripôle.

II.10.6. **Modèle en cascade des cellules RLC parallèle**

Ce modèle est composée de paramètres électriques R, L et C, tels qu'établis dans ce qu'on a appelé le concept de stockage et de dissipation d'énergie. Ce principe établit que le stockage de l'énergie contenue dans un milieu provoquée par la présence d'un champ magnétique et électrique peut être représenté de façon équivalente au moyen d'un paramètre inductif et capacitif, respectivement. De la même manière, les pertes peuvent être représentées par un paramètre résistif.

Par conséquent, on peut déduire que les effets des champs magnétiques, électriques et de perte peuvent être simulés avec les paramètres L, C et R respectivement. Autrement, les Circuits RLC parallèle sont déterminés à partir des pics de résonance correspondant aux Différentes fréquences de coupure de la réponse de l'enroulement, dans lesquelles ; les paramètres électriques de chaque pic de résonance doivent être déterminé afin de construire un circuit dont la réponse en fréquence reproduit la mesure de la réponse fréquentielle d'un Transformateur réel. Ce motif est équivalent à la réponse typique d'une combinaison en série de plusieurs Cellules de paramètres R, L et C connectés en parallèle comme illustré dans le circuit de la Figure II.14 [26].

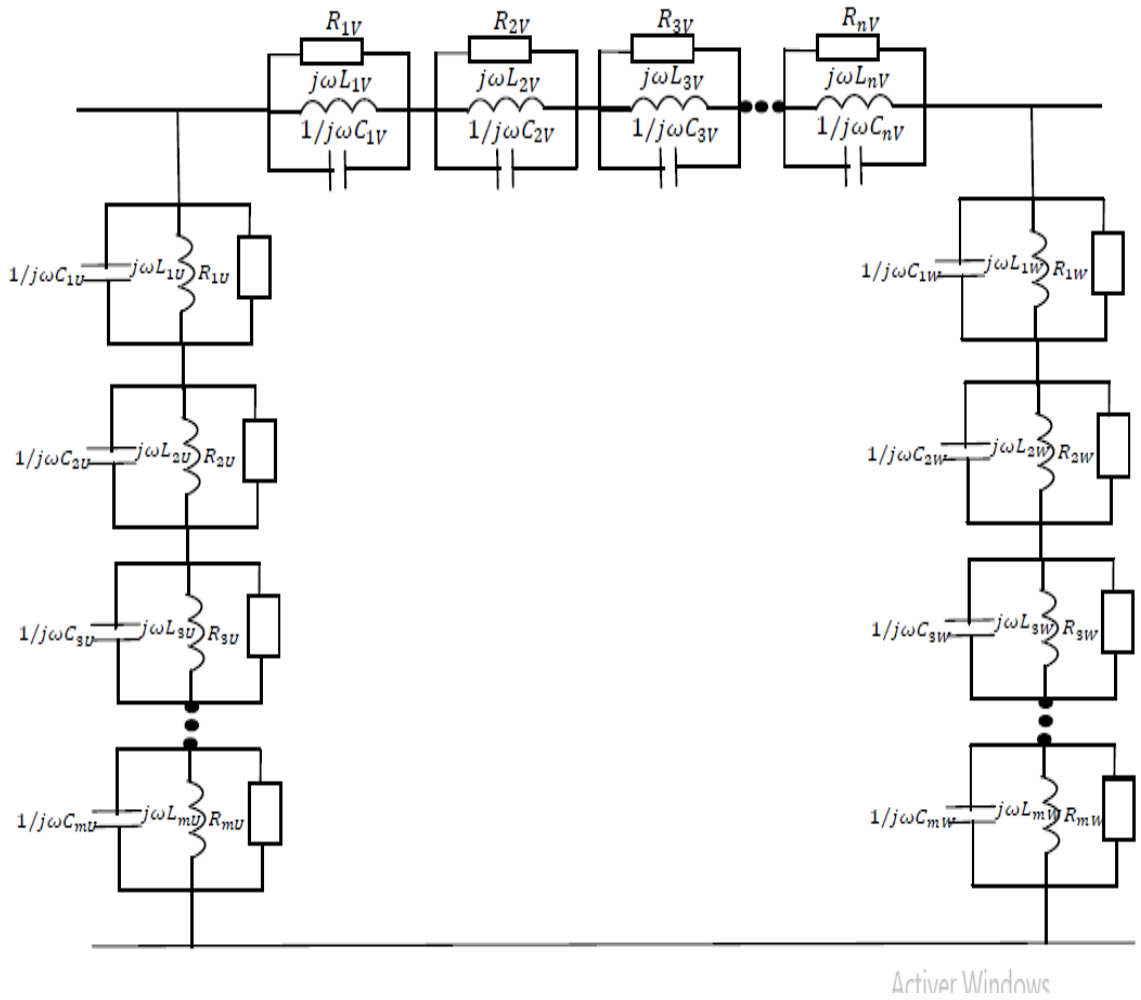


Figure II.14. Modèle triphasé en cascade de cellules RLC parallèles

II.10.7. **Modèle mutuellement couplé**

Ce modèle est largement adopté dans le domaine FRA prend en compte tous les couplages électrostatiques et magnétiques. Pour ce modèle, les paramètres de base (résistances, inductances et capacités) pour modéliser les bobinages avec précision sur une large gamme de fréquence (de quelques Hz à l'ordre de quelques MHz) sont combinés afin d'obtenir la structure équivalente au transformateur montrée par la figure .II.15.

Ce modèle équivalent a deux enroulements du transformateur est constitué de deux modèles mutuellement couples comme le montre sur la figure II.15, tels que chaque modèle correspond à un enroulement. En outre, le couplage électrique et magnétique entre ces deux enroulements peut être représenté par des capacités entre enroulements et des inductances mutuelles, respectivement [26].

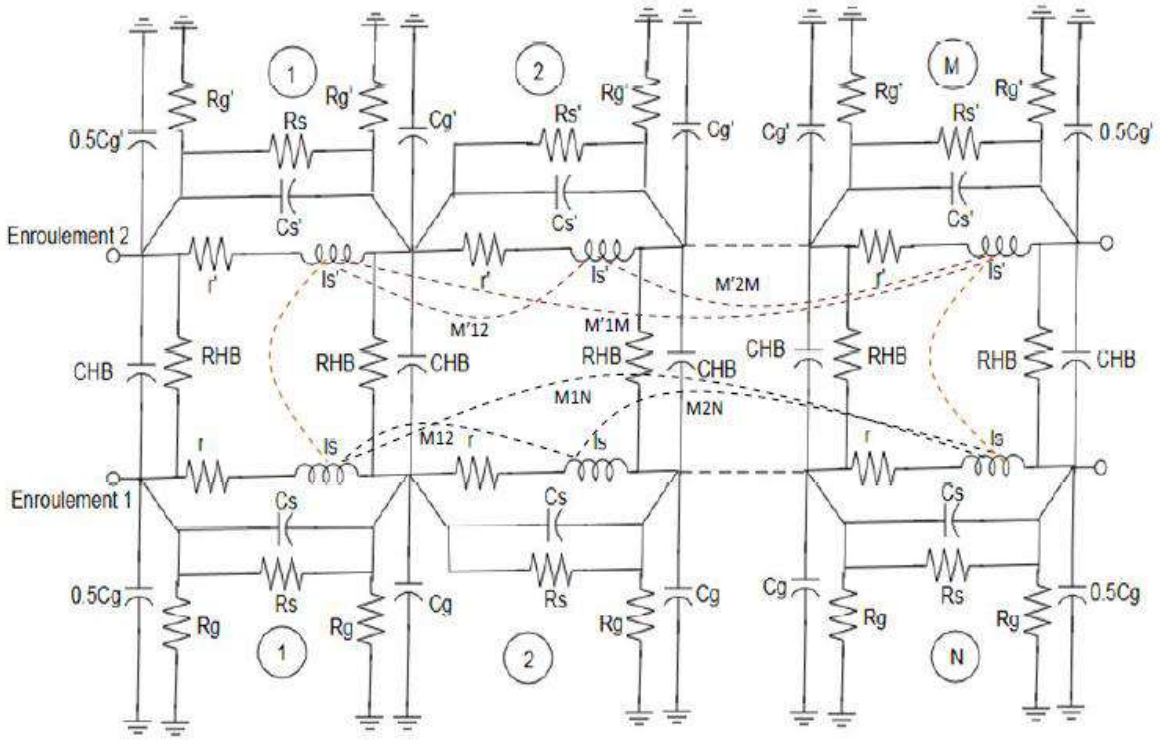


Figure II.15. Modelé mutuellement couple équivalent a deux enroulements du transformateur

II.11.Conclusion

Dans l'objectif d'un diagnostic efficace des transformateurs de puissance, il est important de connaître la meilleure technique utilisée dans ce domaine, les défauts peuvent endommager leurs composants, ainsi que le modèle capable de refléter avec précision toute forme de leurs défaillances. Par conséquent, dans ce chapitre nous avons présentés la technique de diagnostic FRA, les diverses défauts du transformateur et les différents modèles utilisés pour interpréter et analyser la méthode FRA en vue de diagnostic. Cependant, parmi les modèles actuels, le modèle mutuellement couplé est considéré comme le meilleure outil utilisé pour la simulation des comportements des bobinages des machines électriques (ex. le transformateur) afin de diagnostiquer leurs dommages, qui sera mis en évidence dans l'étude du chapitre suivant afin de fournir un outil un outil de localisation et d'évaluation de la gravité de défaillances des enroulements du transformateur.

Chapitre III

Localisation et évaluation de la gravité des défauts radiaux de l'enroulement du transformateur

III.1 Introduction

L'analyse de la Réponse en Fréquence (FRA) est un outil puissant et sensible pour évaluer l'intégrité mécanique et géométrique de base, des enroulements et du circuit magnétique dans les transformateurs de puissance, par la mesure de leurs fonctions de transfert sur une large gamme de fréquences [25].

La localisation des dommages mécaniques, à savoir le déplacement ou la déformation, et la détermination de leur gravité dans l'enroulement d'un transformateur posent des problèmes insurmontables. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est sans aucun doute le moyen le plus sensible de la détecter. Elle contient des informations intégrées sur les dommages et leur gravité, mais il n'existe pas de méthode généralisée pour les extraire ou en tirer des conclusions. Ces dommages devraient être identités à un stade très précoce, localisés et leur gravité évaluée, afin d'éviter des défaillances majeures. Un dommage mécanique de l'enroulement (généralement appelé déplacement ou déformation) est le résultat final des contraintes accumulées par les forces anormales subies par l'enroulement en raison de courts-circuits dans le réseau électrique [27].

Ce chapitre propose l'étude des caractéristiques des paramètres principaux (L'inductance équivalente et l'inverse des carrées des fréquences de résonances) de la réponse FRA de l'enroulement du transformateur et les indices mathématiques (à savoir. Coefficient de Corrélation, Max-Min, …etc.) qui peuvent être utilisées pour l'évaluation de la position et de la gravité des dommages de toute nature et être applicable à tous les types d'enroulements. Toutefois, l'approche proposée pour localiser et évaluer la gravité de déformations radiales (RD) comporte deux phases. La première phase consiste à deux étapes ; dans laquelle, la première étape vise à localiser la position de défaut radial en appliquant la méthode suggérée par P. Mukherjee en 2016, puis dans la deuxième étape, en utilisant les caractéristiques de l'inductance équivalente de l'enroulement en fonction de mouvements radiaux, l'étendue de ces défaillances est évaluée. Dans la deuxième phase, les caractéristiques de l'inverse des carrées de fréquences de résonances ont été utilisées pour établir une corrélation entre les déplacements radiaux de l'enroulement et ses changements paramétriques afin de proposer un outil permettant à la fois, la localisation et l'évaluation de la gravité de ces défaillances des disques de l'enroulement. En outre, la sensibilité de localisation et d'évaluation des défaillances de l'enroulement en utilisant les indices numériques par rapport aux paramètres (l'inductance équivalente et l'inverse des carrées des fréquences de résonances) de la réponse FRA de l'enroulement a également été mise en évidence.

Des résultats expérimentaux sur un enroulement construit pour cette étude, ont valide l'approche proposée pour localiser la position et la gravité des déplacements des disques de l'enroulement.

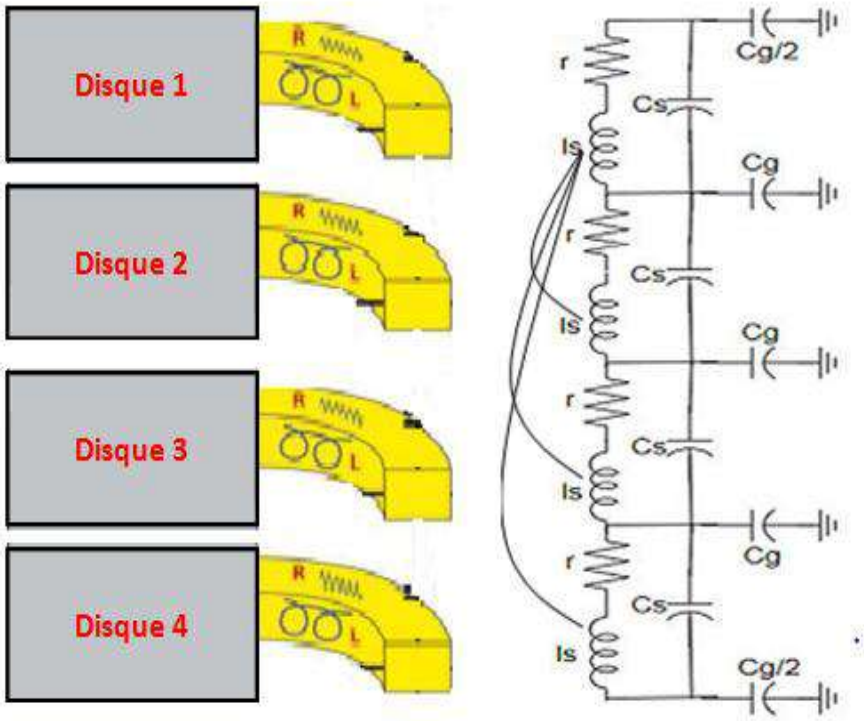
III.2 L'enroulement et ses paramètres obtenus par la technique FRA :

Dans ce chapitre des essais expérimentaux sur un enroulement ont été utilisé [26] afin de proposer une approche de diagnostique des défaillances du transformateur**.** Le bobinage utilisé dans cette étude à noyau d'air a été construit en 04 disques individuels. Ensuite, ces disques

ont été empilés sur un axe horizontal pour constituer le bobinage, comme la montre dans la Figure. III.1 (a) et (b).



(a)



(b)

Figure III.1 : Représentation schématique dans l'état sain du bobinage étudié
(a) Banc d'essai, (b) représentation de la bobine étudié avec son modèle équivalent

Le tableau III.1 suivant montre les caractéristiques géométriques du bobinage étudié. La bobine a été construite de telle manière de faciliter la réalisation des déplacements (axiaux et radiaux) de l'enroulement comme illustré dans la figure. III.1(a).

Tableau III.1. Caractéristiques géométriques du bobinage

Longueur totale de bobinage	200 mm
Nombre de spires de chaque disque	150 spires
Diamètre extérieur	160 mm
Diamètre intérieur	150 mm

III.3 Modèle utilisé pour le diagnostique des déformations des bobinages du transformateur

Le modèle mutuellement couplé est largement reconnu pour l'analyse et l'interprétation de la réponse fréquentielle des enroulements du transformateur pour diagnostiquer leurs défaillances. Ce modèle est un réseau complexe magnétiquement et électriquement couplé par des inductances et des capacités mutuelles. Ce modèle est composé par la résistance et l'inductance de l'enroulement, ainsi que des capacités des disques de l'enroulement (capacité série) et des capacités entre les disques et la masse (capacité shunt), les disques de l'enroulement sont mutuellement couplés comme le montre par la figure III.2 suivant.

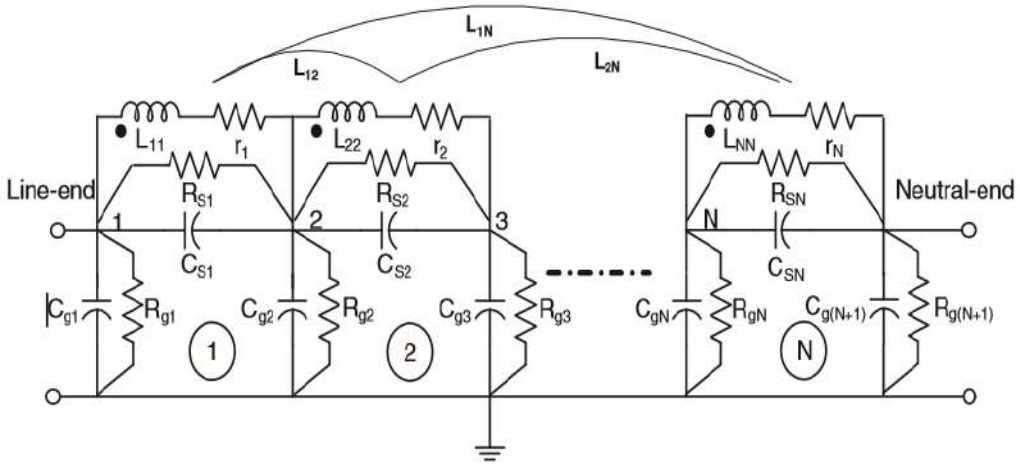


Figure. III.2. Modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur.

III.3.1 Paramètres principales du modèle mutuellement couplééquivalant à un enroulement du transformateur

III.3.1.1. Fréquences de résonances

La courbe FRA est caractérisée par des points de résonances et d'antirésonances (O_{cnfs} et S_{cnfs}) dues aux effets inductifs et capacitifs de l'enroulement comme le montre par la figure III.3. Le tableau III.2 représente les fréquences de résonances et d'antirésonances (O_{cnfs} et S_{cnfs}) obtenues de la réponse fréquentielle d'un enroulement sain.

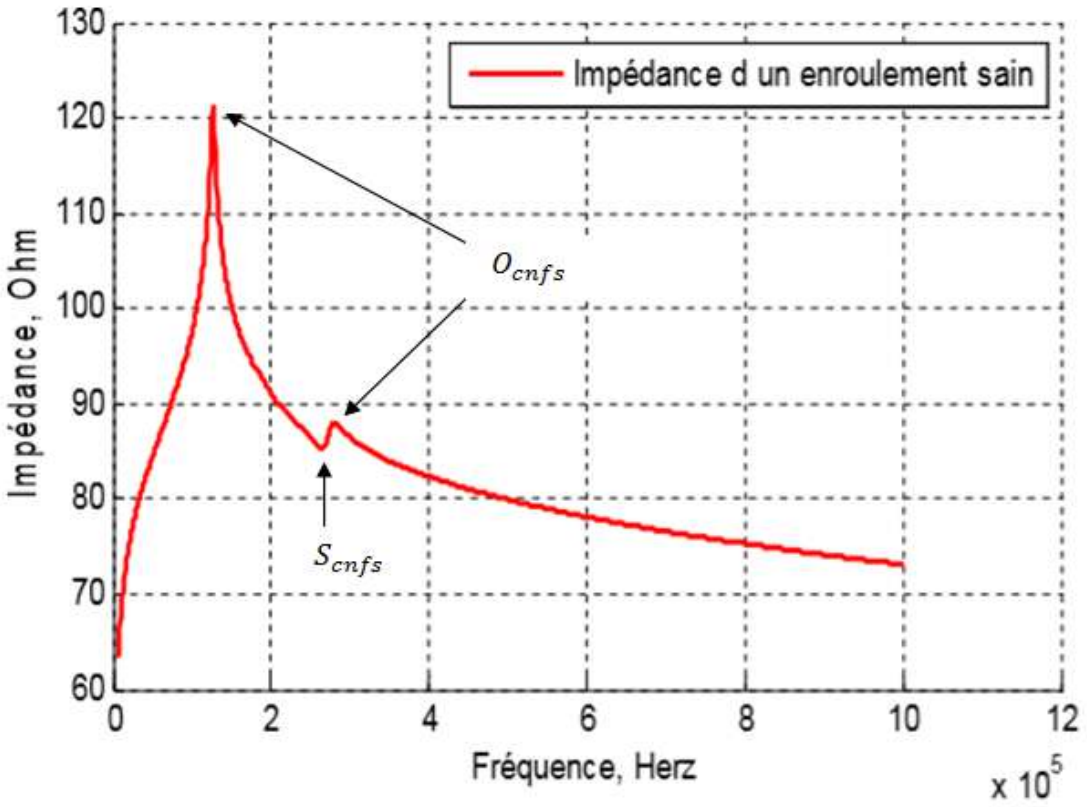


Figure III.3 : Points de résonances et d'antirésonances (O_{cnfs} et S_{cnfs}) de la réponse fréquentielle de l'enroulement

Tableau III.2. Valeurs des fréquences de résonances et d'antirésonances (O_{cnfs} et S_{cnfs})

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)		
O_{cnfs} (kHz)	125	280
S_{cnfs} (kHz)	264	/

III.3.1.2 Inductance équivalente (L_{eq}) de l'enroulement du transformateur

La valeur de l'inductance équivalente de l'enroulement correspondant à la haute fréquence peut être mesurée par l'utilisation de l'approche de K.R Shah [28] qui consiste à l'excitation à haute fréquence de l'enroulement sous test et à déterminer la valeur de la réactance en utilisant l'amplitude et la phase de la courbe FRA. Ces caractéristiques peuvent être obtenues en utilisant le LCR mètre à partir de la relation suivante. Toutefois, la valeur de L_{eq} de l'enroulement a été mesurée à 10 KHz à l'aide du LCR mètre, dans laquelle sa valeur reste presque constante dans cette gamme de fréquences, d'où$L_{eq} \approx 47{,}77\ mH$.

$$L = |\boldsymbol{Z}|sin\theta/\boldsymbol{2\pi f} \qquad \text{(III.1)}$$

III.3.1.3 Capacité shunt effective ($C_{g\,,eff}$)

A fin de mesurer la capacité shunt effective de l'enroulement, l'extrémité neutre du bobinage est isolé de la terre et les bornes de ligne et de neutre sont court-circuité. Ensuite, une excitation sinusoïdale des fréquences (f) au dessous de premier O_{cnf} doit être appliquée entre la fin de la ligne et la masse. Soit l'impédance correspondante est $Z\,L\theta$. Ensuite, pour calculer La capacité (C) l'équation (III.2) peut être utilisée [28].La valeur de $C_{g\,,eff}$ de l'enroulement sain a été mesurée à 3 KHz à l'aide du LCR mètre, dans laquelle sa valeur est obtenue$C_{g\,,eff} \approx 33.9$ pF.

$$C = \frac{\sin\theta}{2\pi f|Z|}. \qquad \text{(III.2)}$$

III.3.1.4 Capacité équivalente (C_{eq}) de l'enroulement

Il est bien connu qu'au-dessus du plus hautO_{cnf}, l'effet desinductances est négligeable. De plus, si la phase correspondante de la réponse d'impédance estplus proche de 90 °, l'effet de la résistance est aussi négligeable. La capacité équivalente de l'enroulement et par conséquent peut être identifié à partir de la réponse de l'impédance de l'enroulement dans cette gamme de fréquence. Toutefois, en utilisant l'équation (III.2), la valeur de la capacité équivalenteest obtenue approximativement $C_{eq} \approx$ 32.091 pFà 500 KHz (bien au-dessus du plus haut O_{cnf}et l'angle de phase est plusproche de –90 ° ($\theta \approx 87°$)) [26].

III.4 Etudes des déplacements radiaux des disques 1 et 2 de l'enroulement

La technique de la réponse fréquentielle FRA est un outil de diagnostic qui peut être utilisée pour interpréter les défaillances de l'enroulement du transformateur. A cet effet, des déplacements radiaux sur les différents disques de l'enroulement proposé ont été réalisés en modifiants sa géométrie.

III.4.1. Déplacement radiale du disque 01 de l'enroulement

Les courbes FRA de la Figure III.4, représentent l'impédance de défaut en fonction de la fréquence pour une plage de 20 Hz-1MHz, les déplacements du disque 01 de l'enroulement (5 mm, 10 mm et 20 mm et 30 mm).

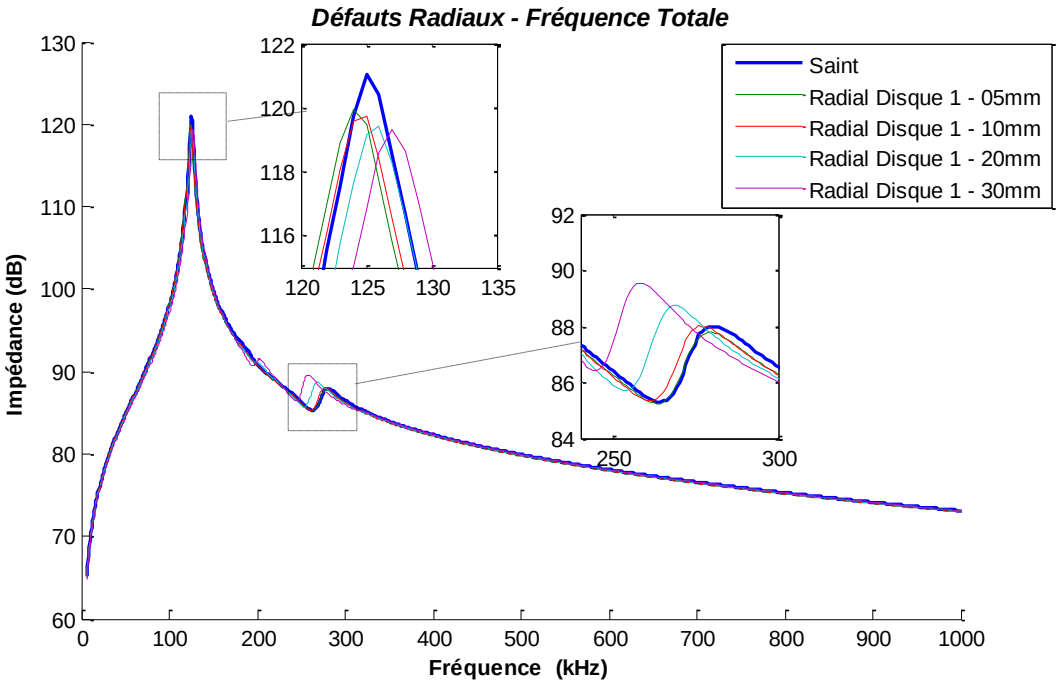


Figure III.4 : Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 01

III.4.2. Déplacement radiale du disque 02 de l'enroulement

Les courbes FRA de la Figure III.5 représentent l'impédance de défaut en fonction de la fréquence pour une plage de 20 Hz-1MHz les déplacements du disque 02 de l'enroulement (5 mm, 10 mm et 20 mm et 30 mm).

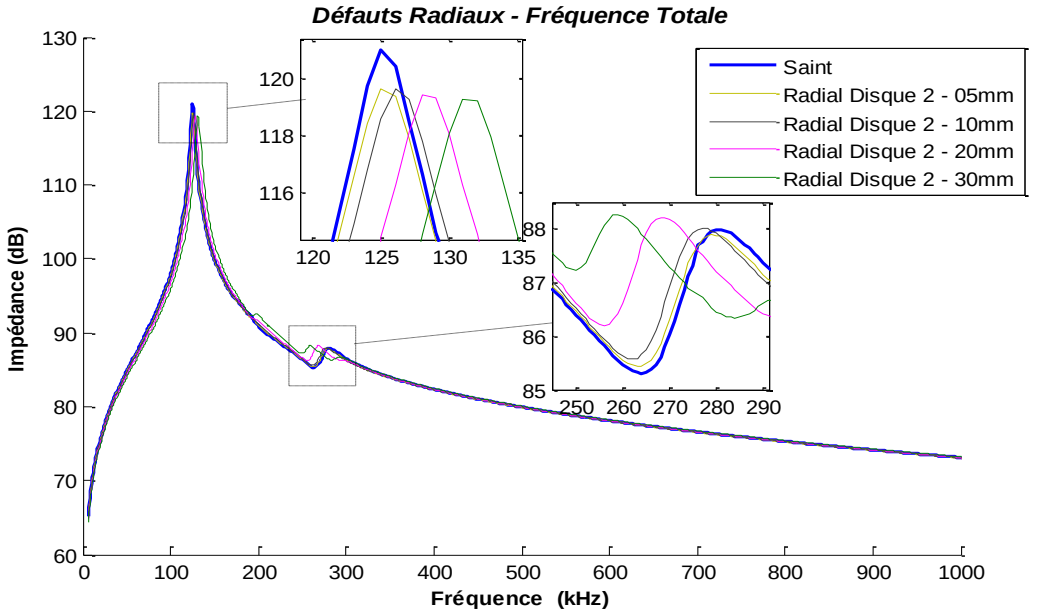


Figure III.5 : Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 02

III.4.3. Déplacement radiale des disques 01 et 02 de l'enroulement

La figure III.6 représente les déplacements radiaux du disque 01 et 02 de l'enroulement sur une plage totale de fréquence 20 Hz- 1000 kHz.

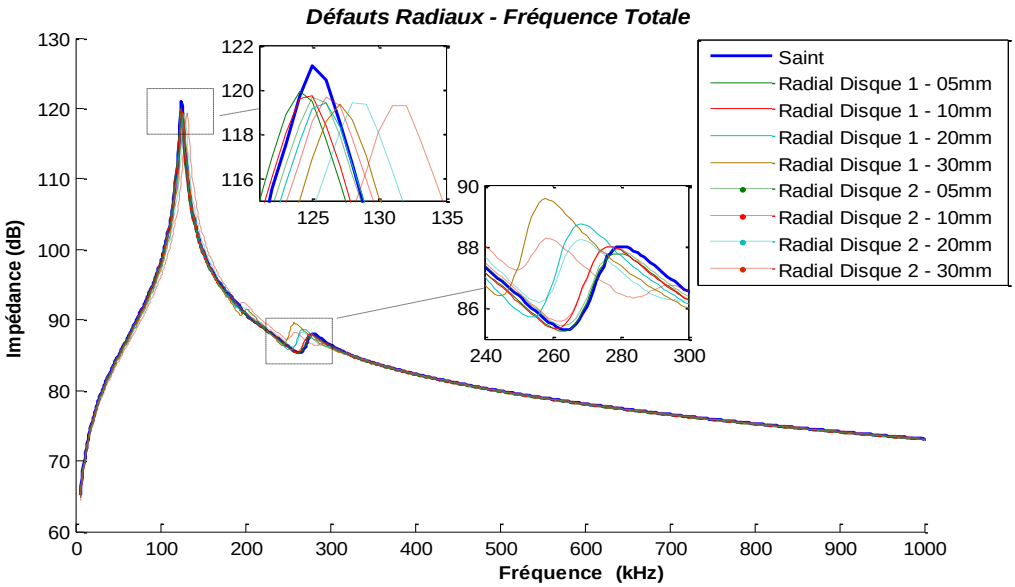


Figure III.6. : Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 01 et 02

III.5 Diagnostique des défauts des bobinages du transformateur

Dans le cas de défaut (déformation ou court-circuit) dans les enroulements du transformateur, l'enroulement devient non homogène, les paramètres du son modèle équivalent mutuellement couplé change, et le calcul de ces paramètres devient ainsi très difficile à cause de la dissymétrie de bobinage. Cependant, certains de ces paramètres peuvent être mesurés en régime fréquentielle à l'aide du LCR mètre, de sorte que ces paramètres (fréquences de résonances, inductances et capacités) peuvent être utilisés comme un outil pour analyser et interpréter les défaillances des bobinages du transformateur afin de localiser et évaluer la gravité de ces déformations.

III.5.1 Localisation des déplacements radiaux

La localisation et l'estimation de gravité des dommages mécaniques réels des enroulements du transformateur est une tâche très fastidieuse, qui a été abordé par quelques chercheurs.Afin de résoudre ce problème, une formule analytique permettant de lié la somme de l'inverse des carrés des fréquences de résonances aux paramètres du modèle mutuellement couplé a été proposée par P. Mukherjee [27].Cette relation est donnée par l'équation (III.3), qui peut être utilisée comme un outil de localisation et d'évaluation des déformations de l'enroulement. Par conséquent, dans cette

section, l'approche proposée par P.Mukherjeea été appliqué afin de localiser la position de déformations radiales des disques de l'enroulement, puis la gravité de ces déformations est évaluée à travers la courbe de l'inductance équivalente en fonction des mouvements des disques de l'enroulement.

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\omega_{oc_i}^{\ 2}} = \sum_{i=1}^{N} L_{ii} C_{si} + \sum_{i=1}^{N} M_{0i}\, C_{gi} \qquad \text{(III.3)}$$

Avec: $\Psi_{ocnf} = \sum_{I=1}^{N} \frac{1}{\omega_{oc_i}^{\ 2}}$

Ψ_{ocnf} : La somme des carrés des fréquences de résonance

L_{ii} : L'inductance du disque i

C_{si} : La capacité série du disque i

M_{0i} : Les inductances équivalentes entre les disques i et i+1 de l'enroulement

Dans le cas de déplacement radial sur l'un des disques de l'enroulement, les inductances mutuelles et la capacité shunt effective changent en fonction de ce déplacement. En revanche, aucun changement ne se produit sur les inductances propres des disques et sur la capacité série de l'enroulement comme le montre par la figure III.7. Toutefois, un déplacement radial à $\boldsymbol{x_f = x}$ entraîne une modification de la capacité shunt ***Cg*** à cette position particulière.

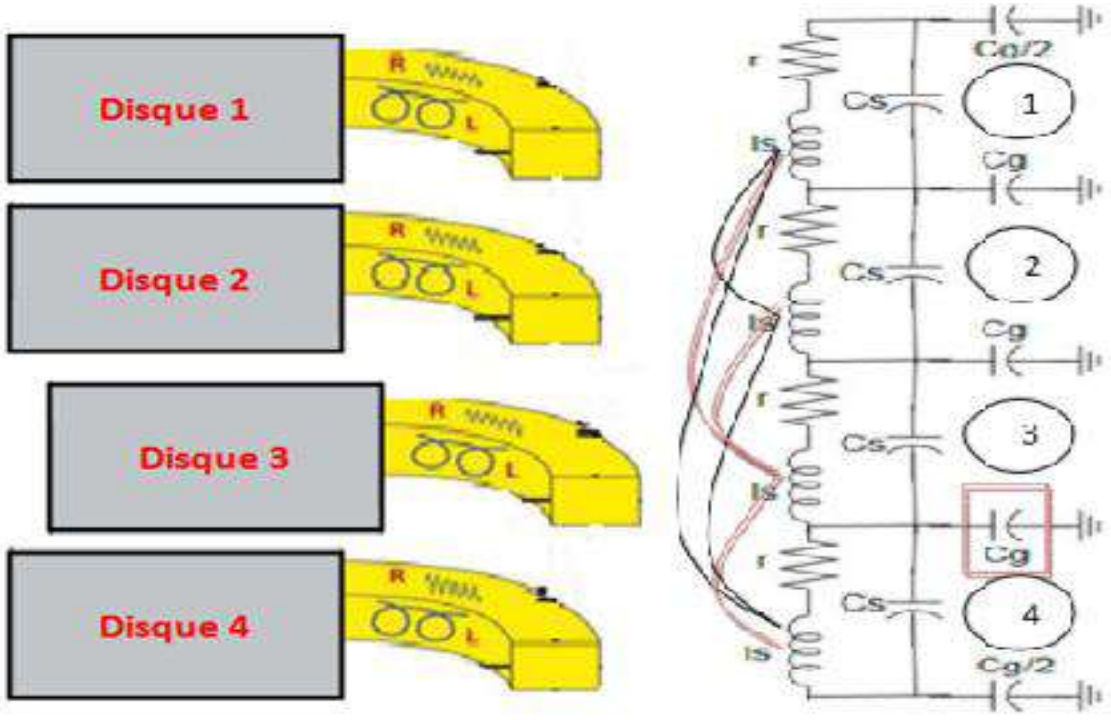


Figure III.7. L'influence de déplacement radial du disque 3 sur les paramètres du modèle équivalent.

Par conséquent, ce changement capacitif apparaît sur le modèle mutuellement couplé et le déplacement radial sur un enroulement réel peut être localisé comme suit :

❖ **Détermination de $\Delta\boldsymbol{\Psi}_{Ocnfs}$**

Soit, les fréquences des résonances (o_{cnfs}) de la courbe FRA de l'enroulement avant et après la réalisation du déplacement radial sont respectivement $\boldsymbol{\omega_{Oci}}$et $\widehat{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{Oci}}$, où i =1, 2, ..., N. $\Delta\boldsymbol{\Psi}_{Ocnfs}$ peut être calculé comme suit :

$$\Delta\boldsymbol{\Psi}_{Ocnfs} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{N}} \frac{\mathbf{1}}{\widehat{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{Oci}}{}^{\mathbf{2}}} - \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{N}} \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\omega_{Oci}}{}^{\mathbf{2}}} \qquad \text{(III.4)}$$

❖ **Détermination de $\boldsymbol{\Delta C_g}$** :

Mesure de la capacité de la terre avant ($\boldsymbol{C_g}$)et après ($\widehat{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{g}}$) le déplacement radial. $\Delta\boldsymbol{C_g}$est calculé comme suit:

$$\Delta\boldsymbol{C_g} = \widehat{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{g}} - \boldsymbol{C_g} \qquad \text{(III.5)}$$

❖ **Détermination de $\boldsymbol{M_{0f}}$:**

Soit l'inductance totale de l'extrémité de la ligne (x =0) à la position du déplacement radial ($\boldsymbol{x}$=$\boldsymbol{x_f}$) est désignée par $\boldsymbol{M_{0f}}$. L'estimation de $\boldsymbol{M_{0f}}$ et par conséquent est exprimée par:

$$M_{0f} = \frac{\Delta\boldsymbol{\Psi}_{ocnfs}}{\Delta\boldsymbol{C_g}} \qquad \text{(III.6)}$$

❖ **Localisation de la position de défaut à partir $\boldsymbol{M_{0f}}$**

A partir de la variation connue de $\boldsymbol{M_{0x}}$ en fonction de x, on trouve la position $\boldsymbol{x_f}$ correspondant à M_{0f} [27]. Toutefois, le tableau III.3 illustre les inductances équivalentes entre les disques d'un enroulement sain, dans laquelle la figure III.8 montre les caractéristiques de $\boldsymbol{M_{0x}}$en fonction du numéro de disques x.

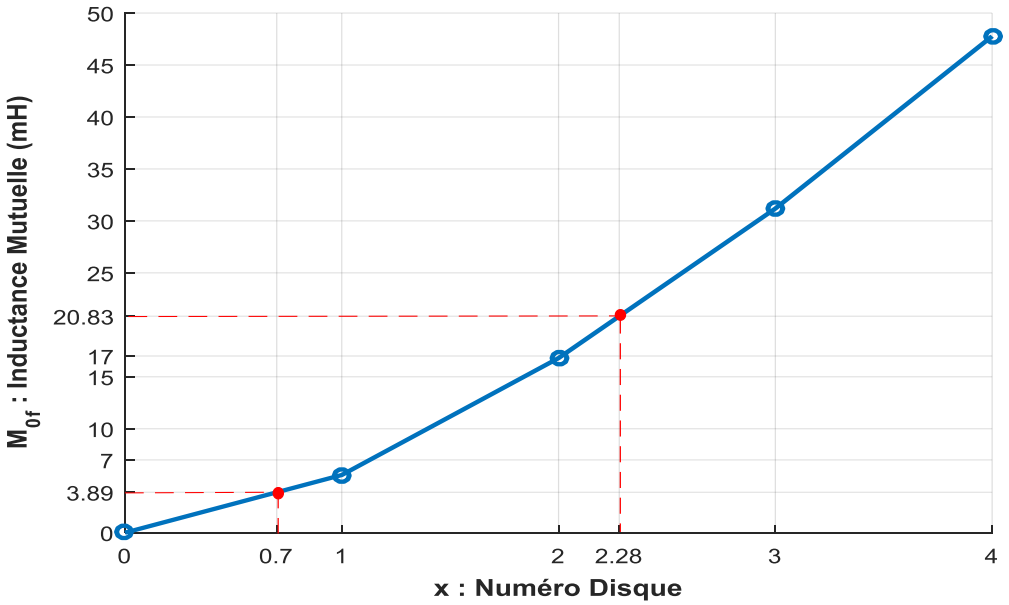


Figure III.8. Processus de localisation en utilisant M_{0x} en fonction de x

Tableau III.3. M_{0x} en fonction de x pour un enroulement nominal uniforme

M_{0x} (mH)	Numéro de Disque (x)
M_{01} = 5.55	01
M_{02} = 16.80	02
M_{03} = 31.19	03
M_{04} = 47.77	04

❖ **Exemple de Localisation des déplacements Radiaux**

➢ **Disque 1 (5mm)**

- ✓ En utilisant l'équation (III.4), $\Delta\Psi_{ocnf}$ =2.33 x 10^{-15}
- ✓ D'après l'équation (III.5), ΔC_g= 6.00 x 10^{-13} F
- ✓ $M_{0f}=\Delta\Psi_{ocnf}/\Delta C_g$ =3.89 mH
- ✓ La variation M_{0x} par rapport à x est connue en utilisant le tableau III.3.
- ✓ il a été constaté que $M=3.89$, qui correspond à x_f=0.7 ≈ 1.

➢ **Disque 2 (10mm)**

- ✓ $\Delta\Psi_{scnf}$ =2.50 x 10^{-15}
- ✓ ΔC_g= 1.2 x 10^{-13} F
- ✓ $M_{0f}=\Delta\Psi_{ocnf}/\Delta Cg$ =20.83 mH
- ✓ $M=20.83$, qui correspond à x_f=2.28 ≈ 2.

Toutefois, la méthode de localisation des disques de l'enroulement peut être résumée par le tableau III.4, où on peut observer que la localisation de la position de défaillances radiales réelles des deux exemples illustratifs est atteinte avec une précision acceptable.

Tableau III.4. Localisation des déplacements radiaux

Défauts	**O_{cnfs} (Hz)**		**ΔC_g (F)**	**M_{0f} (mH)**	**Disque localisé**
1	124000	279000	6.00×10^{-13}	3.89	$0.7 \approx 1$
2	126000	278000	1.2×10^{-13}	20.83	$2.28 \approx 2$

III.5.2. Evaluation de la gravité de défaut

- **Les caractéristiques de l'inductance équivalente en fonction de mouvements radiaux de l'enroulement**

La variation de l'inductance équivalente en fonction de mouvements radiaux de l'enroulement est illustrée sur la Figure III.9 et le tableau III.5, où on peut constater que sa valeur diminue en fonction de l'augmentions de degré de déformation des disques 01 et 02, ainsi qu'on peut constater facilement que sa variation dans le disque 02 est plus rapide par rapport à celle de disque 01. Ces caractéristiques peuvent être utilisées pour l'évaluation de la gravité de défauts. Toutefois, un déplacement radial sur le disque 01 (entre 10 mm et 20 mm) a été réalisé, où l'inductance équivalente de l'enroulement est mesurée (L_{eq} ≈ 46,9305 mH). En utilisant par exemple la courbe de L_{eq} en fonction des déplacements radiaux en mm de l'enroulement, l'étendue de défaut peut être évaluée. La valeur de L_{eq} ainsi mesurée (L_{eq} ≈ 46,9305 mH) est met sur l'axe des ordonnées afin de déterminer le degré de défaut sur l'axe des abscisses de la figure III.9, dans laquelle l'étendue du déplacement est estimée de presque 16.7 mm.

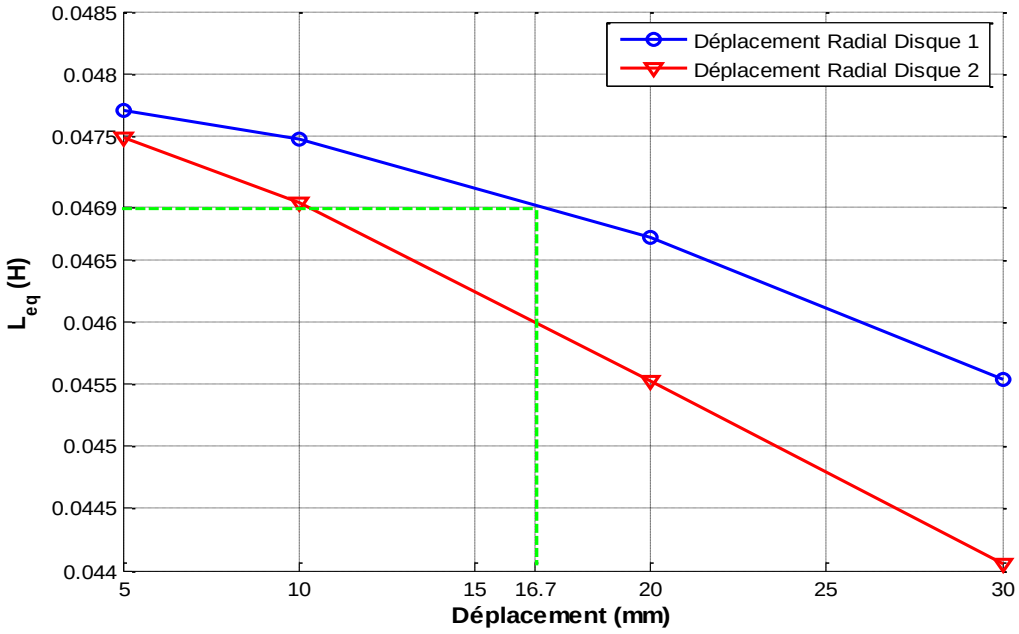


Figure III.9 : Caractéristique de$\boldsymbol{L_{eq}}$ en fonction des déplacements radiaux de l'enroulement

Tableau III.5 : Valeurs de L_{eq} pour des déplacements radiaux du disque 1 et 2

Déplacement	**Fréquence**	**Inductance Equivalente (Henry)**	
		Disque 1	**Disque 2**
05 mm	**10 kHz**	0.04770	0.04748
10 mm		0.04747	0.04696
20 mm		0.04668	0.04553
30 mm		0.04554	0.04405

III.5.3. Localisation et évaluation de la gravité des déplacements radiaux

Cette section présente l'approche proposée qui permettant à la fois, la localisation et l'évaluation de la gravité de ces défaillances des disques de l'enroulement.

❖ **Variations de l'inductance équivalente (ΔL_{eq}) en fonction des mouvements radiaux**

La Figure III.10 illustre la variation de l'inductance équivalente(ΔL_{eq}) en fonction de déplacements radiaux de l'enroulement, où on peut constater que ses caractéristiques augmentent de façon monotone en fonction de ces déplacements, qui peuvent aussi être utilisées pour l'évaluation de la gravité des déplacements radiaux de l'enroulement. D'autre part, les caractéristiques de la variation de l'inverse de la somme des carrés des fréquences de résonances

($\Delta\Psi_{ocnf}$) en fonction de ΔL_{eq}est montrée par la figure III.10 et le tableau III.6, dans laquelle on peut constater que ses caractéristiques augmentent de façon monotone en fonction des déplacements du disque de l'enroulement. Ces caractéristiques peuvent donc être proposées comme un outil efficace de localisation et d'évaluation des déformations des disques de l'enroulement.

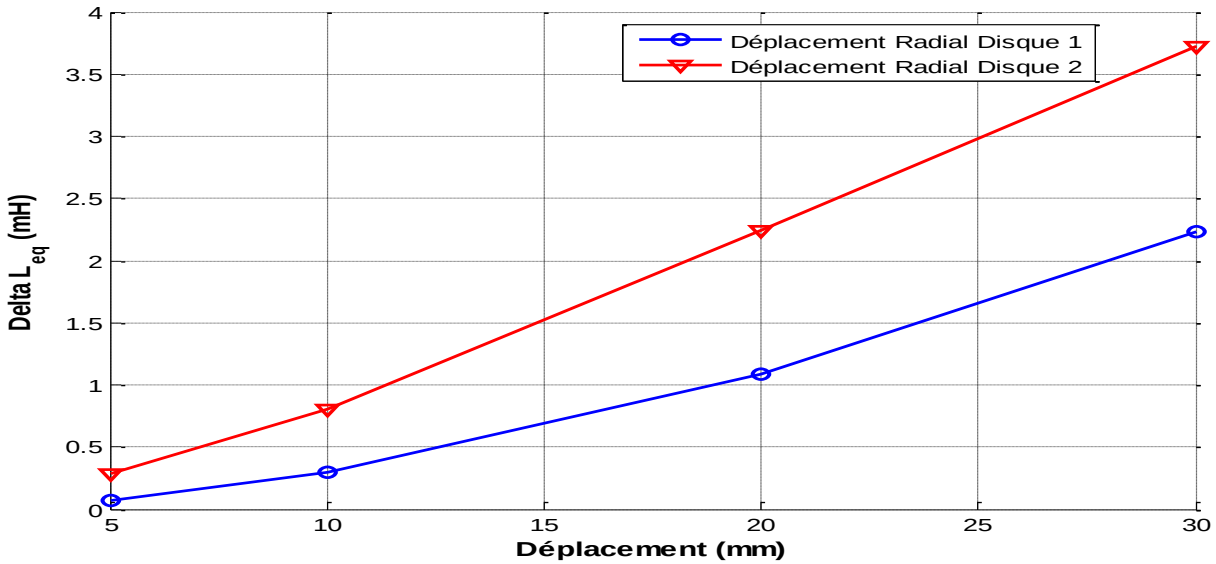


Figure III.10. Caractéristique de $\Delta \boldsymbol{L_{eq}}$ en fonction des déplacements radiaux des disques 1 et 2

Afin de tester l'efficacité de l'approche proposée pour localiser et évaluer l'étendue des déplacements radiaux de l'enroulement, un déplacement radial sur le disque 01 (entre 10 mm et 20 mm) a été réalisé, où l'inductance équivalente et l'inverse de la somme des carrés des fréquences de résonnance sont mesurées (L_{eq} ≈46,9305 mH), et (Ψ_{ocnf} ≈1.5955x10^{-12}) respectivement. En utilisant la courbe de $\Delta\Psi_{ocnf}$en fonction de$\Delta \boldsymbol{L_{eq}}$, la variation de ≈0.8395 et la variation de $\Delta\Psi_{ocnf}$ ≈ 1.55x10^{-14} sont respectivement obtenues. Les valeurs ainsi calculées de$\Delta \boldsymbol{L_{eq}}$ et $\Delta\Psi_{ocnf}$ sont mises sur les axes des abscisses et ordonnées respectivement de la Figure III.11, en traçant deux perpendiculaires à partir de ces deux points, l'intersection entre ces deux perpendiculaires indique le disque déplacé et le degré de son déplacement, où on peut constater que le défaut est localiser sur le disque 1 avec un déplacement de presque 16.5 mm.

Tableau III.6 : Variation $\Delta\boldsymbol{\Psi}_{Ocnf}$ en fonction $\Delta\mathbf{L}_{eq}$ des déplacements radiaux des disques 1 et 2

Déplacements (mm)	**Disque 1**		**Disque 2**	
	$\Delta\boldsymbol{\Psi}_{Ocnf}$	ΔL_{eq}	$\Delta\boldsymbol{\Psi}_{Ocnf}$	ΔL_{eq}
5	0.0234e-13	0.07	0.01624e-13	0.29
10	0.0653e-13	0.3	0.0251e-13	0.81
20	0.1944e-13	1.09	0.1777e-13	2.24
30	0.3692e-13	2.23	0.3129e-13	3.62

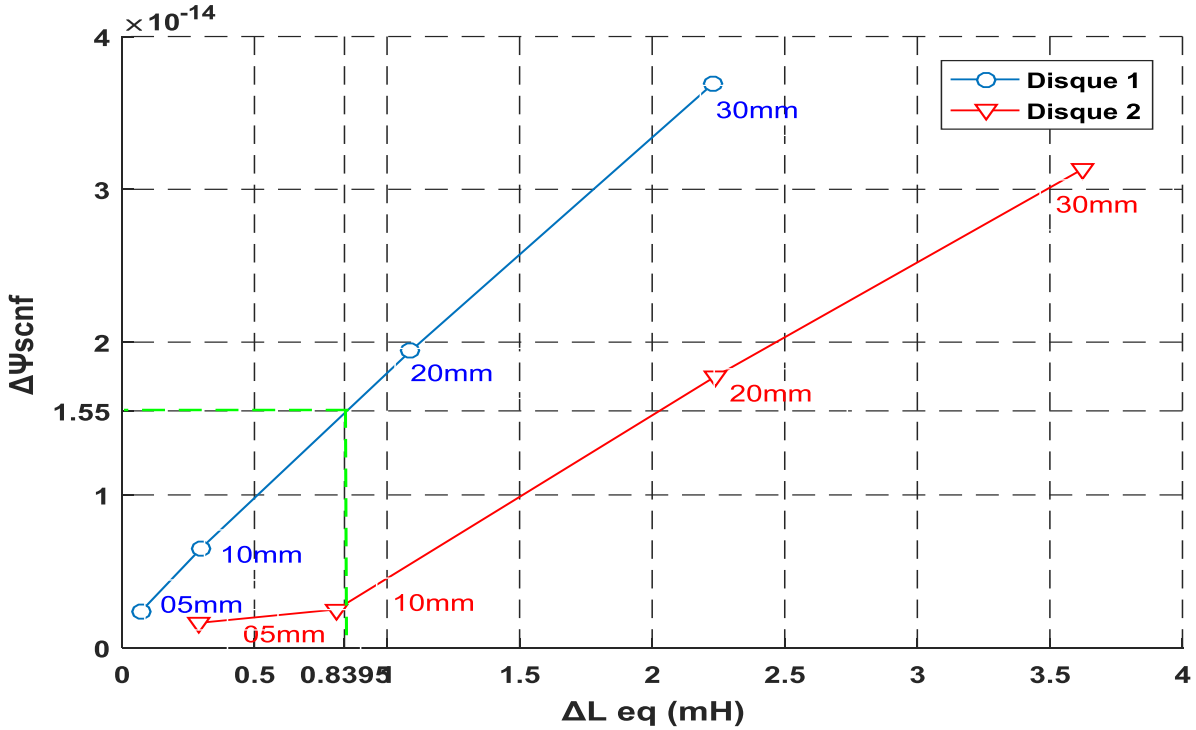


Figure III.11. Caractéristique de $\Delta\boldsymbol{\Psi}_{Ocnf}$ en fonction $\Delta\mathbf{L}_{eq}$ des déplacements radiaux des disques 1 et 2

III.5.4. L'utilisation des indices numériques pour l'analyse et l'interprétation de la FRA

L'utilisation des indices numériques est l'une des méthodes introduites pour l'interprétation de la FRA afin de détecter, localiser et évaluer l'étendue des déformations des enroulements du transformateur pour prendre une décision sur la situation du transformateur, s'il a besoin d'une réparation ou s'il peut continuer son fonctionnement normal [26]. Les indices sont extraits de deux courbes FRA; la première courbe est celle mesurée dans un état d'évaluation tandis que la seconde courbe est obtenue dans un état sain (courbe de référence) est une courbe mesurée soit à partir du même enroulement précédemment, soit d'un transformateur similaire ou d'une autre phase du même

transformateur [29].Toutefois, dans la littérature les indices CC, MM et CD, ...etc.[29], ont été utilisé pour la détection des déformations mécaniques à l'intérieur d'un transformateur et afin d'examiner la sensibilité de la FRA aux ces déformations mécaniques.

- **Le Coefficient de Corrélation (CC), L'indice Min-Max (MM) et La Distance Complexe (CD)**

Les Coefficients de Corrélation (CC), les indices Max-Min (MM) et la Distance Complexe (CD) données par les équations (III.7), (III.8) et (III.9) parmi les indices couramment utilisés dans le domaine de diagnostic des défaillances des transformateurs électriques par la méthode FRA [29].

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{k}(Z_{ei} \times Z_{mi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k} Z_{ei}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} Z_{mi}^2}} \qquad \text{(III.7)}$$

$$MM = \frac{\sum_{i=1}^{k} min(Z_{ei}, Z_{mi})}{\sum_{i=1}^{k} max(Z_{ei}, Z_{mi})} \qquad \text{(III.8)}$$

$$CD = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \begin{pmatrix} \left|Z_{ei}(i)\cos\varphi_x(i) - Z_{mi}(i)\cos\varphi_y(i)\right|^2 \\ +\left|Z_{ei}(i)\sin\varphi_x(i) - Z_{mi}(i)\sin\varphi_y(i)\right|^2 \end{pmatrix}} \qquad \text{(III.9)}$$

Tels que,

Z_{ei}et Z_{mi} : sont l'amplitude du vecteur de donnée de la réponse en fréquence de l'impédance mesurée dans un état de référence et dans un état d'évaluation.

$\varphi_x$etφ_y : sont les angles de phase du vecteur de donnée complexe de la réponse en fréquence de l'impédance mesurée dans un état de référence et dans un état d'évaluation.

k : est le nombre de points du vecteur de données des signaux considérés.

Les indices CC, MM et CD ont été déterminés en fonction des mouvements radiaux de l'enroulement pour les deux premiers disques, dans lesquelles sont illustrés dans les tableaux III.8, III.9 et III.10, où ses caractéristiques sont tracées en fonction des déplacements radiaux des disques 1 et 2 de l'enroulement comme le montre par les figures III. 12, III.13 et III.14.

Tableau III.7. Coefficient de Corrélation en fonction des déplacements radiaux des disques 1 et 2

Déplacement	**Disque 1**		**Disque 2**	
	Coefficient de Corrélation	**ΔL_{eq} (mH)**	**Coefficient de Corrélation**	**ΔL_{eq}(mH)**
05 mm	0.9847	0.07	0.9986	0.29
10 mm	0.9939	0.30	0.9847	0.81
20 mm	0.9957	1.09	0.8910	2.24
30 mm	0.9597	2.23	0.7441	3.62

Tableau III.8. L'indices Max-Min (MM) en fonction de ΔL_{eq}

Déplacement	**Disque 1**		**Disque 2**	
	Indice Max-Min	**ΔL_{eq}(mH)**	**Indice Max-Min**	**ΔL_{eq}(mH)**
05 mm	0.9165	0.07	0.9632	0.29
10 mm	0.9412	0.30	0.9206	0.81
20 mm	0.9414	1.09	0.7988	2.24
30 mm	0.8652	2.23	0.6852	3.62

Tableau III.9. CD en fonction de déplacements radiaux de disques 1 et 2

Déplacement	**Disque 1**		**Disque 2**	
	CD	**ΔL_{eq} (mH)**	**CD**	**ΔL_{eq} (mH)**
05 mm	552600,82	0.07	552600,87	0.29
10 mm	552600,71	0.30	552600,61	0.81
20 mm	552602,27	1.09	552602,87	2.24
30 mm	552603,55	2.23	552603,56	3.62

À partir les courbes des figures III.12, III.13 et III.14, on peut remarquer que les caractéristiques de ces indices peuvent être utilisées pour diagnostiquer (localisation et évaluation de la gravité) des déplacements radiaux des disques des enroulements des transformateurs électriques, mais la sensibilité de ces indices est moindre par rapport aux paramètres de l'enroulement (inductance équivalente et l'inverse des carrés des fréquences de résonance), car ses figures montrent une convergence significative des courbes de défauts radiaux mineures (entre 5 mm et 10 mm) des disques déformés de l'enroulement. Par conséquent, il est difficile de localiser et évaluer la gravité de ces types de défaillances en utilisant ces indices, alors que cela peut être facilement réalisé en utilisant l'inductance équivalente et l'inverse des carrés des fréquences de résonance (voir les figures III.8 et III.10).

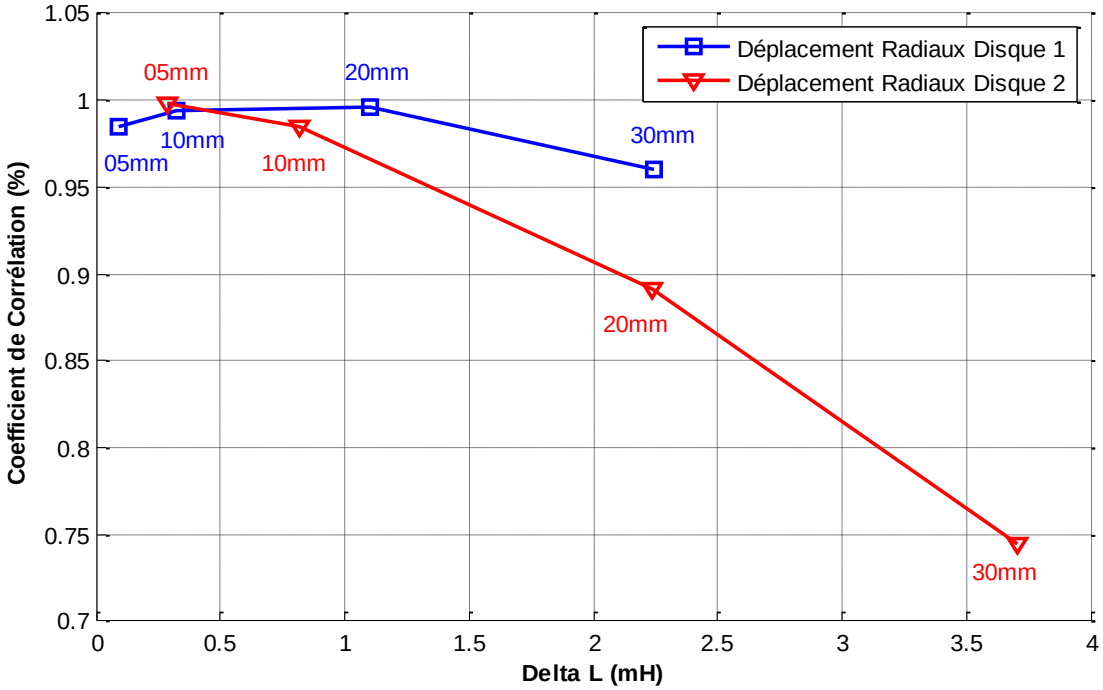


Figure III.12 : Coefficient de Corrélation en fonction de ΔL_{eq}

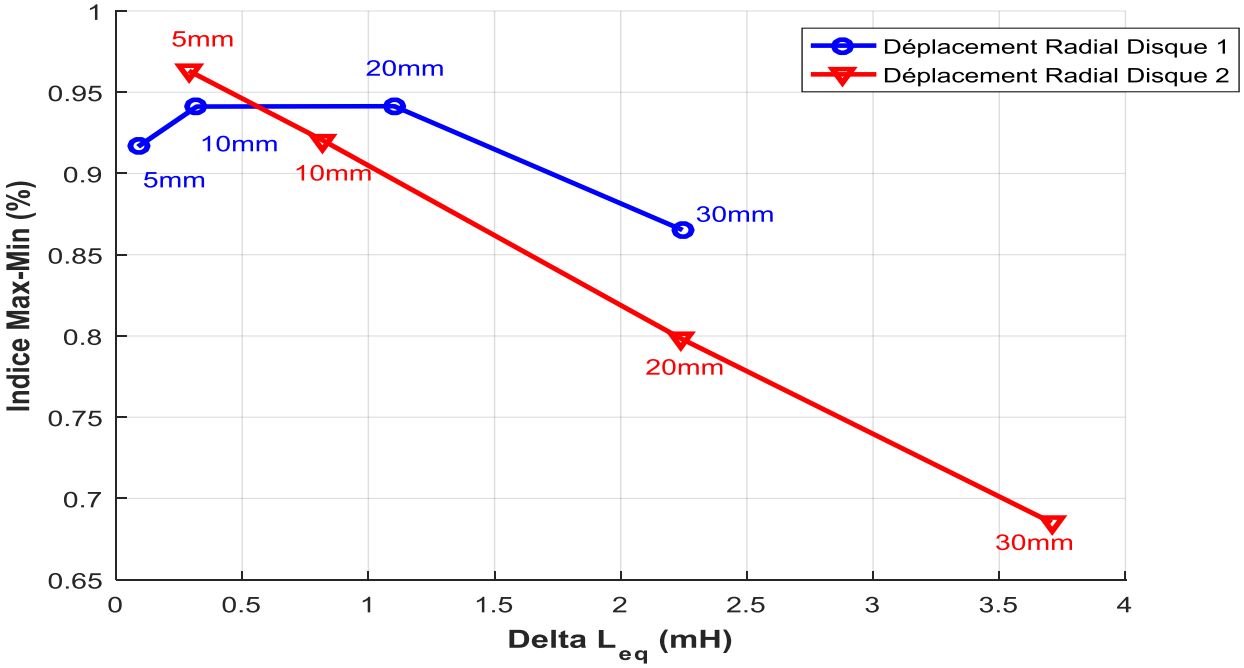


Figure III.13 : Indice Max-Min en fonction de ΔL_{eq}

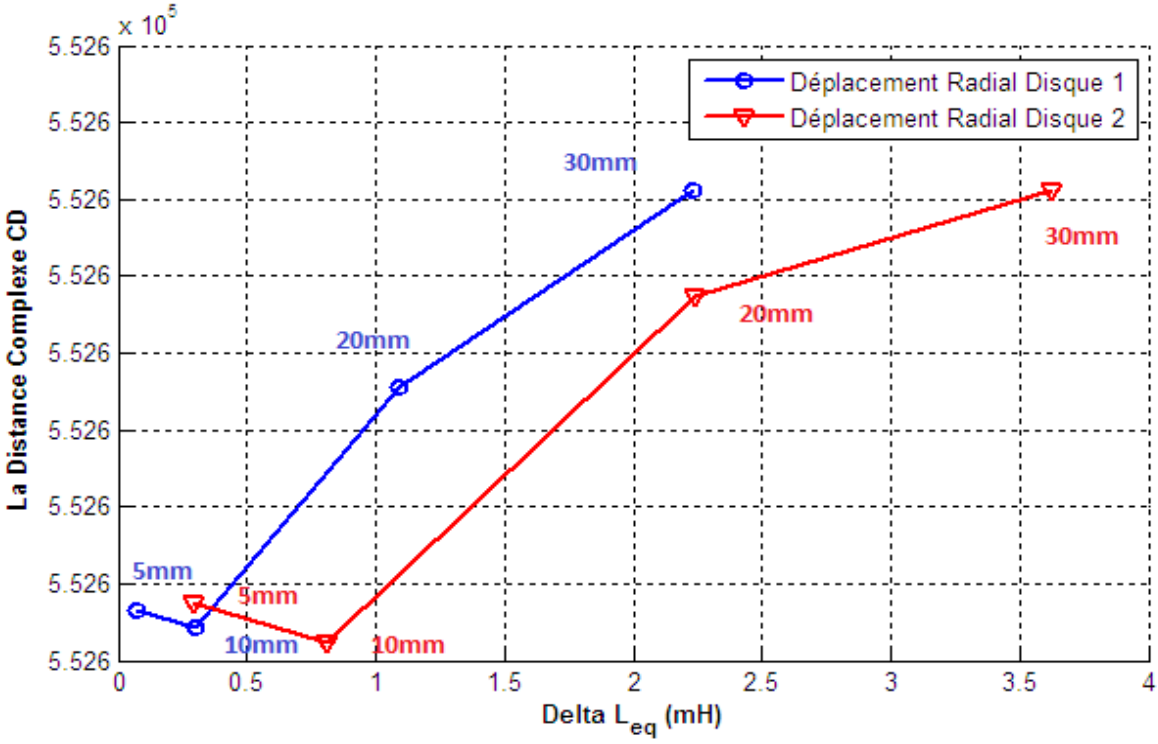


Figure III.14. CD en fonction ΔL_{eq}.

III.6. Conclusion

Certains niveaux de déformations mécaniques dans les enroulements ne gênent pas les performances normales du transformateur de puissance. Cependant, de telles déformations naissantes, si elles ne sont pas surveillées, peuvent entraîner une défaillance permanente du transformateur. Pour cela, dans ce chapitre une approche de localisation et d'évaluation de la gravité de déformations mécaniques radiales dans l'enroulement du transformateur a été proposée Toutefois, cette approche peut être résumée comme suite :

- Localisation de déformations radiales de l'enroulement en utilisant la méthode proposée Par P. Mukherjee [27].
- Evaluation de la gravité de ces déformations à partir des caractéristiques de l'inductance équivalente en fonction de mouvements des disques de l'enroulement.
- Proposition d'une méthode permettant de localiser et d'évaluer la gravité de ces défaillances simultanément, en se basant sur les caractéristiques de l'inverse des carrées des fréquences de résonances en fonction de la variation de l'inductance équivalente de l'enroulement.
- Etude comparative de la sensibilité des paramètres physiques de la réponse fréquentielle de l'enroulement par rapport aux indices numériques dans le diagnostique des défaillances de l'enroulement

Conclusion générale

Notre travail est consacré sur les méthodes de localisation et de l'évaluation de la gravité des défauts radiaux de l'enroulement du transformateur basé sur des données de réponse fréquentielle en haute fréquence du bobinage du transformateur en vue de son diagnostic. En effet, la FRA est une méthode de diagnostic relativement nouvelle pour la détection des dommages mécaniques aux enroulements du transformateur.

Nous avons présenté l'intérêt des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, en termes de réduction de la probabilité de défaillance ou de dégradation du service et d'amélioration de l'espérance de vie du transformateur. Plusieurs modèles de transformateurs sont également présentés ainsi que la méthode de diagnostic utilisée, laquelle est basée sur la technique d'analyse fréquentielle FRA.

Dans l'objectif de la détection, de localisation et de l'évaluation de la défaillance, nous avons consacré notre travail sur trois approches qui sont :

La première approche basée sur une formule analytique (celle qui est développée par P. Mukherjee [27]) permettant de lié la somme de l'inverse des carrés des fréquences de résonances aux paramètres du modèle mutuellement couplé afin de localiser un déplacement radial réel dans une bobine d'un transformateur.

La deuxième approche est basée sur l'interprétation de la variation paramétrique tels que ; la variation de l'inverse des carrées de fréquences de résonances en fonction de la variation de l'inductance équivalente de l'enroulement du transformateur. Les résultats obtenus ont montrés que cette approche peut constituer un outil simple et efficace pour le diagnostic des défaillances mécaniques radiales qui peuvent avoir lieu dans les enroulements du transformateur. A ce titre, la méthode peut être considérée comme des premiers efforts qui constituent une amélioration par rapport à des approches expérimentaux antérieures.

La troisième approche est basée sur le calcul des indices numérique qui sont couramment utilisées dans le domaine de diagnostic par la méthode FRA, l'interprétation est alors effectuée sur la base des valeurs de ces indices afin d'examiner la sensibilité de ces indices dans le diagnostic des défaillances radiales de l'enroulement par rapport aux changements paramétriques qui se reflètent sur les paramètres du modèle équivalent mutuellement couplé.

Les résultats de simulation avec ces trois approches sont concordants en vue de la localisation et de l'évaluation de l'étendue des déplacements des disques de la bobine du transformateur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **YAHIOU ABDELGHANI**, « Contribution à l étude et à l'analyse de régime transitoire dans les transformateurs de puissance cas du courant d'appel », mémoire magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE) 2012

[**2] JEAS SANCHEZ** « Aide au diagnostique de défaut des transformateurs de puissance thèse doctorat école doctoral électrotechnique électronique automatique et traitement signal » Thèse de doctorat, à Grenoble, 21juin 2011

[3] **DIDIER NILHY** le diagnostique d'état des transformateurs Electromagnétisme. 2017. dumas-01871106

[4] Transformateur des puissances partie 1 norme (IEC 60076-1, 2000) disponible à https//www.webstoriec.ch

[5]Revue technique ABB

- ✓ Transformateur de distribution de petite puissance (<= 250 kVA)
- ✓ Transformateurs de distribution de moyenne puissance (> 250 KVA ≤ 2000KVA)
- ✓ Transformateurs de distribution de forte puissance (> 2000 KVA ≤ 72 .5KVA)

[6]LAIR, William ; BERRCU, Sophie. Estimation probalistede la durée de vie des transformateurs à partir de la norme CEI 60076-7

[7] Elec international symposium édition 1998

[8] [Irving M Gottlieb P.E practial Transformer Handbook 1998]

[9] [D'utilisation et de maintenance des transformateurs de distribution immergés dans l'huile à réglage de tension hors charge ABB]

[10] Cour des hautes tensions transformateur disponible sur : www.surprises.ch.les transformateurs de puissance.CH/HT/A-Haute tension consulté le 15/05/2020

[11] [JAMES H. HARLOW. Electric Power Transformer Enginering 3erd Edition]

[12] Cour des hautes tensions transformateur disponible sur :[http://prof.guedon.org]transformateurs de puissance.CH/HT/A-Haute tension Hotmail consulté le 15/05/2020

[13] Cour des hautes tensions transformateur disponible sur :[http://library.abb.com]transformateurs de puissance.CH/HT/A-Haute tension Hotmail consulté le 15/05/2020

[14] Cour des hautes tensions transformateur disponible sur :

]http://ww2.acpoitiers.fr/electrotechnique/sites/electrotichnique/IMG/pdf/Document_technique_les_transformateurs_triphases.pdf[

[15] Cour des hautes tensions transformateur disponible sur : [http://www.cbsa-asfec.gc.ca/sima-lmsi/i12-de-fra.html]

[16] OMICRON/ Formation FRAnalyser ; Analyse de la réponse en fréquenceappliquée à l'évaluation des transformateurs de puissance. Document GRTE.

[17] OMICRON/ Tests de diagnostic et surveillance des transformateurs de puissance pdf.

[18] Cour des hautes tensions transformateur disponible sur :] http://transfo-lab.com/monitoring/]transformateurs de puissance.CH/HT/A-Haute tension Hotmail consulté le 15/05/2020

[19] Transformateur des puissances partie 1 norme la norme CEI 60076-11

[20] http/riverglennapts.com

[21] : http/electrical-engineering-portal.com.

[22] (Crédit photo: forensic.cc).

[23] BOUKIRAT Samia etSALHI Sakhria. «Modélisation et diagnostic des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé» mémoire de Master.

[24] Berracheamina et Bouzouinasiham « Modélisation numérique du comportement haute fréquence d'un transformateur de puissance » mémoire de Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2015.

[25] **MAZARI NAOUAL** « Diagnostic des transformateurs de puissance », mémoire magister université mouloud mammeri de tiziouazou 2012.

[26] **SAHNOUNE CHAOUECHE MOUSTAFA** « Application des méthodes intelligentes pour le contrôle non destructif des l'enroulement du transformateur de puissance » thèse de doctorat, université de Dr Yahia Fares 2019

[27] **P. Mukherjee and L. Satish** "Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding-an analytical approach", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY Vol.31 No 6 2016 pp. 2511-2519.

[28] **KrupaRajendraShah ,K.Ragavan** "Assessing mechanical deformations in two winding transformer unit using reduced circuit model", Electrical Power and Energy Systems 79 (2016)235-244.

[29] Mohammad Hamed Samimi, Stefan Enbohlen , Amir Abbas SHYEgani Akmal Hossein Mohseni "Improving the numerical indices proposed for the FRA interpretation by including the phase response" , Electrical Power and Energy Systems 83 (2016) 585-593