



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : électromécanique

Option : maintenance industrielle

**Détection et Diagnostic des Défauts Dans les Transformateurs
de Puissance par la Technique de L'analyse de la Réponse
Fréquentielle
(FRA)**

Par

HAMZAOUI Laid et MERAH Mohamed

Devant le jury :

ATIA Mousa	Président	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
AMARA Abd erazak	Encadreur	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
TALEB Mounia	Examineur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2023/2024

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que Je dédie ce mémoire de licence à :

*Ma tendre mère **Zohra** : pour moi vous êtes la source de la tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Vous avez fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leurs vies et leurs études.*

*A mon très cher père **Nouari** : aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

*À ma femme **Samya** bien-aimée, chère, solidaire et aimante, qui m'a accompagné sur le chemin de ma vie,*

*A mon cher petit fils **AMINE***

*A mes filles **AYA ERRAHMEN** , **ISRA** et **ILINE** les roses qui illuminent ma vie*

*A toute ma famille **Merah** et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci*

*Aux parents de ma femme **ELHABIB** – **AICHA** et ses frères et sœurs .*

*A mon encadreur **Dr AMARA Abd erazak** , votre compétence et votre encadrement ont toujours suscité mon profond respect. Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils, veuillez trouver ici, l'expression de ma gratitude et de ma grande estime.*

*A mes chers frères : **Chaouki** , **Abd elhafidh** .*

*A mes chères sœurs : **Wafa** , **HADIA** et **SIHEM** que je ne les oublierai jamais.*

A mes très chers amis.

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de les citer.

Mohamed MERAH

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que Je dédie ce mémoire de master à :

*Ma tendre mère **SABIHA** : pour moi vous êtes la source de la tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Vous avez fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leurs vies et leurs études.*

*A mon très cher père **NAÇIB** : Aucune dédicace ne peut exprimer l'amour, l'appréciation, la dévotion et le respect que j'ai toujours pour vous. Que Dieu ait pitié de toi, mon cher père.*

*A toute ma famille **HAMZAOUI** et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

*A mon encadreur **Dr AMARA Abd erazak** , votre compétence et votre encadrement ont toujours suscité mon profond respect. Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils, veuillez trouver ici, l'expression de ma gratitude et de ma grande estime.*

*A mes chers frères : **NOUR EDDINE** et **KAMMEL**.*

A mes chères sœurs que je ne les oublierai jamais.

A mes très chers amis.

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de les citer.

Laid HAMZAOUI

Remerciements

Nous tenons à remercier tout spécialement **Dr. AMARA Abderrazak** pour avoir dirigé ce travail et mis à notre disposition tous les moyens nécessaires à son bon déroulement. Ses compétences scientifiques, son expérience et l'intérêt constant qu'il a porté à ce travail ont été décisifs pour sa réalisation. Nous souhaitons remercier vivement Messieurs **ATIA.M** et **TALEB M**, docteurs à l'Université de Tébessa, pour avoir accepté d'examiner ce travail, d'en être rapporteurs et de faire partie du jury d'examen.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos enseignants **AOULMI Z, AMIRECH A, SOUDANI M, HAOUAM A, LWAFI M, MOGHRANI R, CHABBI A et CHEBAH**, qui nous ont fait partager leur savoir.

Nos sincères hommages s'adressent également à nos collègues qui ont su créer à tout moment une ambiance amicale et humoristique. Nous avons apprécié les bons moments que nous avons passés ensemble.

Enfin, nous remercions de tout notre cœur tous nos proches qui nous sont chers, amis et famille, pour leurs encouragements, tous les moments de bonheur partagés ensemble et surtout le lien indéfectible qui nous lie.

ملخص :

يتناول هذا العمل اكتشاف وتشخيص وتحديد الأعطال في المحولات بواسطة تقنية تحليل الاستجابة الترددية (FRA) المستخدمة على نطاق واسع في هذا المجال. يعتمد منهجنا على دراسة استخدام المعلمات الفيزيائية للنموذج المكافئ للمحولات، وتعتبر طريقتنا مكملة لمنهج سابق تم إجراؤه على ملف حقيقي، وذلك من أجل تشخيص وتحديد التشوهات الشعاعية في الملفات من المحولات.

الكلمات الدالة : محول, المراقبة والتشخيص, لف, التشوهات الهندسية, FRA,

Résumé :

Ce travail traite la détection, diagnostic et la localisation des défauts dans les transformateurs par la technique de l'analyse de la réponse fréquentielle (FRA), qui est largement utilisée dans ce domaine. Notre approche est basée sur l'étude de l'utilisation des paramètres physique du modèle équivalent des transformateurs, notre méthode est considérée comme un complément à une approche antérieure réalisée sur un enroulement réel, afin de diagnostiquer et localiser les déformations radiales dans les enroulements des transformateurs.

Mots clés : transformateur, surveillance et diagnostic, bobinage, déformations géométriques, FRA,

Abstract:

This work deals with the detection, diagnosis and localization of faults in transformers by the technique of frequency response analysis (FRA), which is widely used in this field. Our approach is based on the study of the use of the transformers equivalent model physical parameters, our method is considered as a complement to a previous approach carried out on a real winding, in order to diagnose and locate radial deformations in the windings of the transformers.

Keywords: transformer, monitoring and diagnostics, winding, geometric deformations, FRA.

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 : Généralités sur les transformateurs	01
Introduction	01
I.1 Définition	02
I.2 Différents types des transformateurs	02
I.2.1. Transformateurs émergés.....	02
I.2.2. Transformateurs secs.....	03
I.3. Constitutions générale de transformateur	04
I.3.1. Partie actif.....	04
I.3.2. Les enroulements.....	04
I.3.3. Isolants	05
I.3.4. La cuve.....	06
I.3.5. Traversées.....	06
I.3.6. Huile.....	07
I.4. Les équipements	08
I.4.1. Changeur de prise.....	08
I.4.1.1 Changeur de prise en charge.....	08
I.4.1.2. Changeur de prises hors tension.....	08
I.4.2. Refroidissement.....	08
I.4.3. Radiateurs.....	09
I.4.3.1. Aéroréfrigérant (s)	10
I.4.3.2. Réfrigérant (s) à eau.....	10
I.4.4. Conservateur.....	10
I.4.5. Coffret des auxiliaires.....	10
I.4.6. Coffret de commande du changeur de prises en charge (CPC).....	11
I.5. Les accessoires de surveillance	11
I.5.1. Indicateur de niveau d'huile.....	11
I.5.2. La soupape de surpression.....	12
I.5.3. Indicateur de température d'huile.....	12
I.5.4. Indicateur de température de bobinage.....	13

I.5.5. Relais BUCHLOZ.....	13
I.5.6. L'assécheur (dessiccateur d'air).....	14
I.6. Principe de fonctionnement de transformateur.....	14
I.7. Les contraintes	16
I.7.1. Surtension	16
I.7.2 Surcharge.....	16
I.7.3. Les décharges partielles.....	17
I.8. Défauts des transformateurs	18
I.8.1 Défaut d'isolement de la partie active	18
I.8.2 Amorçage diélectrique entre spires	19
I.8.3 Court-circuit entre spires	19
I.8.4 Amorçage du corps insérable du régleur en charge	19
I.8.5 Décharges Partielles	20
I.8.6 Point chaud interne au transformateur	20
I.8.7 Coupure du circuit électrique	20
I.8.8 Déformation géométrique des enroulements	20
Conclusion du chapitre	22
Chapitre 2: Maintenance et Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance	23
Introduction.....	23
II.1. Notions générales sur la maintenance industrielle.....	24
II.1.1. Définition de la maintenance	24
II.1.2. Types et organisation de la maintenance	24
II.1.2.1.La maintenance préventive	24
II.1.2.1.1. Maintenance préventive systématique	25
II.1.2.1.2. Maintenance préventive conditionnelle	25
II.1.2.1.3. Maintenance prévisionnelle	25
II.1.2.2.La maintenance corrective	25
II.1.2.2.1. Maintenance palliative	25
II.1.2.2.2. Maintenance curative	25
II.2.Surveillance industrielle	27
II.2.1 Définition	27
II.2.2 Dégradation	27

II.2.3 Défaillance	28
II.2.4 Panne	28
II.2.5. Détection	29
II.2.6. Diagnostic	29
II.2.6.1.Surveillance prédictive (dynamique)	30
II.2.6.2. Détection prédictive (dynamique)	31
II.2.6.3. Diagnostic prédictif (pronostic)	31
II.3.Classification des méthodes desurveillance	31
II.3.1. Méthodes de surveillance avec modèle	33
II.3.1.1. Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle.....	33
II.3.1.2. Méthodes de surveillance par modélisation physique.....	34
II.3.2. Méthodes de surveillance sans modèle	34
II.3.2.1. Les méthodes à base de modèles comportementaux.....	35
II.3.2.2. Les méthodes de reconnaissance de formes.....	35
II.3.3 Application de la surveillance sur les transformateurs.....	35
II.3.4 Choix de la méthode de surveillance appropriée	37
II.4.Analyse de défaillances et choix de la partie du transformateur à surveiller	37
II.4.1Analyse de l'emplacement des pannes	38
II.4.2 Analyse des modes de défaillance	38
II.4.3 Analyse des causes de défaillance	39
II.4.4 Analyse des effets externes	40
II.4.5 Choix de la partie du transformateur à surveiller	41
II.5.Méthodes de diagnostic de l'état des transformateurs	42
II.5.1 Méthodes de diagnostic et choix approprié de la méthode utilisée.....	42
II.5.1.1 Technique d'analyse des gaz dissous (DGA)	43
II.5.1.2 Analyse de Réponse en Fréquence (FRA)	43
II.5.1.3 Mesure des Courants de Polarisation et de Gé-polarisation (PDC)	44
II.5.1.4 Spectroscopie du Domaine de Fréquence (FDS)	44
II.5.1.5 Mesure de la Tension de Récupération (RVM)	45
II.5.1.6 Analyse des Furanes et Degré de Polymérisation	45
II.5.1.7 Méthode Thermographique (IRT)	46
II.5.1.8 Emissions Acoustiques (E A)	46
II.5.2 Analyse comparative des techniques de diagnostic.....	47

II.5.3 Choix de la méthode de diagnostic approprié	48
Conclusion du chapitre	49
Chapitre 3 : La Méthodes Analyse de la Réponse Fréquentielle FRA	50
Introduction	50
III.1. Définition	51
III.2.Quand faut-il faire un test FRA?	51
III.3.Détection de défaut par FRA.....	51
III.4.Principe du test FRA	52
III.4.1.Application	53
III.4.2.FRA hors-ligne, en ligne et le choix du type de test approprié	54
III.4.3. Types de connexions FRA	54
III.4.4. Circuit ouvert (End-to-End Open Circuit).....	54
III.4.5. Court-circuit (End-to-End Short Circuit).....	55
III.4.6. Choix du type de connexion approprié	55
III.4.7. Schéma de principe du test FRA	55
III.5. Stratégies de modélisation des transformateurs orientées FRA	56
III.5.1. Classification des modèles orientés FRA	59
III.5.2. Modélisation de la réponse fréquentielle FRA	60
III.5.3 Description du modèle mutuellement couplé	61
III.6. L'avantage d'analyse de la réponse en fréquence FRA	61
III.7.Modèle équivalent de l'enroulement du transformateur	62
III.8.Interprétation de la morphologie du signal FRA	64
III.8.1. Réponse en basse fréquence (sous-bande LFR)	66
III.8.2. Réponse en moyenne fréquence (sous-bande MFR)	67
III.8.3. Réponse en haute fréquence (sous-bande HFR)	68
Conclusion du chapitre	69
Chapitre 4 : Localisation de défaut dans les enroulements des transformateurs	70
Introduction	70
IV.1. Présentation du modèle simulée	72
IV.1.1. Propriété électrique du système	73
IV.2. Simulation des défauts	73
IV.2.1. Introduction des défauts dans le système	73
IV.3. Etude expérimental	78

IV.3.1. Etudes des déplacements radiaux des disques 1 et 2 de l'enroulement	79
IV.3.2. Extraction des fréquences de résonance (Ocnfs)	80
IV.4. Extraction d'inductance équivalente	82
IV.4.1. Évaluation de la gravité des défauts radiaux	82
IV.4.2. Localisation et évaluation de la gravité des déformations radiales	83
IV.5. Utilisation des indices numériques pour l'analyse et l'interprétation	85
IV.6. Extraction de la capacité équivalente	89
IV.6.1. Évaluation de la gravité des défauts radiaux.....	87
IV.6.2. Localisation et évaluation de la gravité des déformations radiales.....	90
IV.7. Comparaison des Trois Approches pour Analyser les Déplacements Radiaux	92
Conclusion Conclusion du chapitre	95

Conclusion générale

1. Liste des figures

Figure I.1 une vue intérieure d'un transformateur, type colonne.....	02
Figure I.2 enroulement en couche.....	05
Figure I.3 enroulement en galettes.....	05
Figure I.4 Radiateur.....	08
Figure I.5 Indicateur de niveau d'huile.....	10
Figure I.6 soupape de surpression.....	11
Figure I.7 Indicateur de température d'huile.....	11
Figure I.8 Indicateur de température de bobinage.....	12
Figure I.9 Relais BUCHLOZ.....	12
Figure I.10 assécheur.....	13
Figure I.11 schéma simplifié d'un transformateur.....	13
Figure I.12 décharges partielles.....	16
Figure I.13 (a) Amorçage entre enroulements, (b) Amorçage entre spires [43].....	18
Figure I.14 (a) Décharges partielles sur des cales, (b) Coupure suite à la fusion d'un conducteur, (c) Déformation mécanique d'un enroulement [43].....	20
Figure II.1 Organigramme de la Maintenance [123].....	25
Figure II.2 Composantes de la surveillance industrielle [47].....	27
Figure II.3 Approche unifiée pour la surveillance [47].....	29
Figure II.4 Surveillance classique et surveillance dynamique [47].....	30
Figure II.5 Classification des méthodes de surveillance [47].....	31
Figure II.6 Analyse de l'emplacement des pannes basée sur 112 pannes majeures [44].....	35
Figure II.7 Analyse des modes de défaillance basée sur 112 défaillances majeures [44].....	36
Figure II.8 Analyse des causes de défaillance basée sur 112 défaillances majeures [44].....	37
Figure II.9 : Analyse des effets externes des pannes majeures de 112 transformateurs [44].....	37
Figure II.10 Analyse de l'emplacement des pannes de 40 transformateurs mis au rebut [44].....	38
Figure II.11 Analyse de l'emplacement des pannes de 72 transformateurs réparés [44].....	38
Figure III.1 Réponses en fréquence mesurées avec défauts radiaux [121].....	49
Figure III.2 Type de connexion (a) Circuit ouverte, (b) Court-circuit.....	52
Figure III.3 Schéma de principe de test FRA.....	52
Figure III.4 Modèle de transformateur Vaessen (a) et Wilcox (b).....	54
Figure III.5 Alternatives pour la création d'un modèle à des fins de diagnostic par FRA	55
Figure III.6 circuit équivalent mutuellement coupler [76].....	56
Figure III.7 Réponse en fréquence mesurée [98].....	56
Figure III.8 Modèle de circuit équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur [98]....	58

Figure III.9 Décomposition de la réponse fréquentielle FRA [112].....	60
Figure IV.1: Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur.....	66
Figure IV.2 schéma équivalent du modèle d'un transformateur de puissance.....	68
Figure IV.3 La variation de l'impédance en fonction de la fréquence (état sain).....	70
Figure IV.4 Variation de l'impédance en fonction du fréquence (assemblage).....	70
Figure IV.5 Variation de l'impedance en fonction du fréquence (assemblage).....	72
Figure IV.6 Variation de l'impedance en fonction du fréquence (assemblage).....	73
Figure IV.7 Variation de l'impédance en fonction du fréquence (assemblage).....	75
Figure IV.8 Représentation du test FRA expérimentale de l'enroulement réel (Cas 01) [124].....	76
Figure IV.9 Variation de l'impedance en fonction de la fréquence (état sain)	77
Figure IV.10 Variation de l'impédance en fonction de la fréquence(Disque01).....	78
Figure IV.11 Variation de l'impédance en fonction de la fréquence (Disque 02).....	79
Figure IV.12 Caractéristique de Leq par rapport aux déplacements radiales.....	81
Figure IV.13 Caractéristique de $\Delta\Psi_{ocnf}$ par rapport à ΔLeq pour la sévérité des déplacements radiaux des disques 1 et 2.....	83
Figure IV.14 CC en fonction de ΔLeq	86
Figure IV.15 MM en fonction de ΔLeq	86
Figure IV.16 MM en fonction de ΔLeq	87
Figure IV.17 Caractéristique de Ceq par rapport aux déplacements radiales.....	88
Figure IV.18 Caractéristique de $\Delta\Psi_{ocnf}$ par rapport à ΔCeq pour la sévérité des déplacements radiaux des disques 1 et 2.....	90

Liste des tableaux

Tableau I.1 Défauts des transformateurs retenus et leurs types.....	17
Tableau IV.1 tableau récapitulatif des valeurs des pics pour le premier disque.....	79
Tableau IV.2 tableau récapitulatif des valeurs des pics pour le deuxième disque.....	80
Tableau IV.3 Variation des $\Delta\Psi_{ocnf}$ en fonction de ΔLeq des déplacements radiaux.....	83
Tableau IV.4 Coefficient de corrélation en fonction de ΔLeq	85
Tableau IV.5 Indice Min-Max en fonction de ΔLeq	85
Tableau IV.6 Distance complexe en fonction de déformation radiale.....	85
Tableau IV.7 Variation des $\Delta\Psi_{ocnf}$ en fonction de ΔCeq des déplacements radiaux.....	90

Liste des abréviations

FRA :	Frequency response analysis
SFRA :	Sweep frequency response analysis
IFRA :	Impulse frequency response analysis
FEM :	Méthode des éléments finis
U_i ou U_{in} :	La tension d'excitation d'entrée mesurée à une borne de l'enroulement
U_o :	La tension de réponse de sortie mesurée à l'autre borne de l'enroulement
I_i :	Le courant d'entrée (injectés)
I_o ou I_{out} :	Le courant de sortie mesuré à l'autre borne de l'enroulement
R_o :	La résistance du câble de mesure coaxial
Z :	L'impédance
V_p :	La tension dans l'enroulement primaire
I_p :	Le courant dans l'enroulement primaire
V_s :	La tension dans l'enroulement secondaire
I_s :	Le courant dans l'enroulement secondaire
R :	La résistance
L :	L'inductance
C :	La capacité
f :	Fréquence
ω :	Pulsation
$ Z $:	Module impédance
ω_0 :	La pulsation de résonance
B :	Bande passante
$u(x, j\omega)$:	La tension distribuée sur l'enroulement
$i(x, j\omega)$:	Le courant distribué sur l'enroulement
f_0 :	La fréquence de résonance
r_g :	Résistance interne de générateur
l_s :	L'inductance propre
M_{ij} :	L'inductance mutuelle entre les disques i et j.
C_g :	Capacité shunt
C_s :	Capacité série
R_s :	Résistance en parallèle avec la capacité série
i_{C_g} :	Courant dans la capacité shunt
i_{C_s} :	Courant dans la capacité série
U :	Vecteur de courant
I :	Vecteur de tension
[C] :	La matrice de capacités
[L] :	La matrice des inductances

$Re(Z)$:	La partie réelle de l'impédance
$Im(Z)$:	La partie imaginaire de l'impédance
z_N, z_N^* :	Paire de zéro complexe conjugué
p_{N+1}, p_{N+1}^* :	Paire de pôle complexe conjugué
BA :	L'algorithme de chauve-souris 'Bat algorithm'
O_{cnfs} :	Fréquences de résonance correspond un circuit ouvert
ΔO_{cnfs} :	Variation des fréquences de résonance correspond un circuit ouvert
S_{cnfs} :	Fréquences de résonance correspond un court-circuit
ΔS_{cnfs} :	Variation des fréquences de résonance correspond un court-circuit
R_{dc} :	Résistance mesurée en courant continu
L_{eq} :	Inductance à noyau d'air équivalente
C_{geff} :	Capacité shunt effective à la masse
CC :	Coefficient de corrélation
MM :	L'indice max-min
M_{0N} :	L'inductance mutuelle équivalente
C_{eq} :	La capacité équivalente de l'enroulement
ΔL_{eq} :	Variation de l'inductance équivalente
T :	La période
T_e :	La période d'échantillonnage
VCO :	Oscillateur contrôlé par tension
DAC :	Convertisseur numérique analogique
GSSA :	Générateur de signaux a synthèse d'amplitude
f_e :	Fréquence d'échantillonnage
f_l :	Fréquence de relecture
f_{clk} :	Fréquence de l'horloge
a :	Facteur d'accélération/ralentissement de fréquence
GND, Vcc :	Alimentation
CLK :	Horloge du compteur
Reset :	Remet le compteur forcément à « 0 »
IA	Intelligence Artificielle
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité
ADD	Arbres De Défaillances
SVM	Support Vector Machine
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
CEI	Commission électrotechnique internationale
CIGRÉ	Conseil international des grands réseaux électriques
PDC	Mesure des Courants de Polarisation Diélectrique et de Gé-polarisation
FDS	Spectroscopie du Domaine de Fréquence
RVM	Mesure de la Tension de Récupération
DP	Degré de Polymérisation
IRT	Thermographe Infrarouge

EA	Emissions Acoustiques
PNN	Réseau Neuronal Probabiliste
ANN	Réseau neuronal artificiel
DWT	Transformée en ondelettes discrète
DIP	Traitement d'image numérique
SDE	Estimation de la densité spectrale
NDRC	Commission nationale de développement et de réforme
CTN	Coefficient de Température Négatif
HTTP	HyperText Transfer Protocol
SCADA	Système de Contrôle et d'Acquisition de Données
RF	Radio-fréquence
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile
GSSA	Générateurs de Signaux à Synthèse d'Amplitude
Wi-Fi	Wireless Fidelity
FRA-SMI	Frequency Response Analysis Signal Morphology Interpretation
LFR	Low Frequency Response
MFR	Medium Frequency Response
HFR	High Frequency Response

Introduction générale

Le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883 et qu'il a eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique et plus particulièrement en courant alternatif [1] **Bernard MULTON**, « Modèles électriques du transformateur électromagnétique » ,Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan { Revue 3E1 décembre 1997}. Le transformateur de puissance est le composant le plus complexe et le plus critique du réseau électrique [2] **N.KHELIFA** « Chef Division méthodes maintenance postes HT» {Par admin12/04/2024}.<https://seniadz.net/index.php/poste-hta-bt-installation-fonctionnement-et-maintenance/>. L'apparition d'un défaut dans le réseau électrique provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des contraintes dans ce dernier. Ces contraintes se traduisent par des forces axiales et radiales appliquées sur les enroulements du transformateur.

La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à des fortes sollicitations mécaniques. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux.

La surveillance de l'état du transformateur de puissance est importante pour la fiabilité de l'alimentation électrique. Les tests classiques réalisés sur les transformateurs de puissance peuvent seulement détecter les dommages de nature permanente [3] **Muhammad Azizi Abdul Rahman; Halimatun Hashim; P.S. Ghosh** « FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS OF A POWER TRANSFORMER ». **Electrical Engineering Department, College of Engineering, University Tenaga Nasional. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2018 Vol. 3, Issue 2, ISSN No. 2455-2143, Pages 16-20 Published Online June 2018 in IJEAST (<http://www.ijeast.com>)**. Ces techniques de surveillance de l'état telles que l'analyse des gaz dissous (AGD), la mesure de la capacitance et du facteur de puissance ainsi que le test de la réactance de fuite sont incapables de détecter les déformations mécaniques les plus mineures qui se développent par la suite en défauts diélectriques ou thermiques [4] **L. Bouchaoui*, K. E. Hemsas*, S. Belahneche*, *LAS, Université Ferhat Abbas, Sétif,**« Laboratoire d'analyse Régionale - Sonelgaz-GRTE – SETIF ».« <http://dSPACE.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/2690> » - 4-oct-2018.

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) se trouve être un outil utile pour la détection fiable de défaut mécanique naissant dans un transformateur. Il existe différentes méthodes d'évaluation du spectre des fréquences pour confirmer la présence d'un défaut naissant [3] Ainsi, la technique FRA a le potentiel pour détecter des problèmes d'enroulement. C'est la technique la plus efficace actuellement disponible qui n'exige pas d'ouvrir le transformateur en raison de sa sensibilité élevée pour détecter les défauts. Cette méthode est basée sur le concept du changement géométrique dans les enroulements en raison de la déformation et des déplacements causés par une modification dans les impédances de l'enroulement du transformateur et par conséquent d'une modification de sa réponse en fréquence. L'impédance du transformateur de puissance est composée d'une

configuration complexe faite de résistances, inductances et capacités (circuit RLC).

L'application pratique de la technique FRA pour détecter les dommages mécaniques dans un transformateur dépend de sa sensibilité à tout changement dans les inductances et les capacités réparties. Le transformateur peut être modélisé par une chaîne d'inductances à la terre et réunis par leurs capacités parasites entre les enroulements. Le circuit équivalent est utile dans la modélisation de la sensibilité de la FRA au changement dans les enroulements. L'interprétation de la FRA basée sur la modélisation de circuit du transformateur a pour but de représenter avec précision le comportement d'un transformateur sur toute la gamme de fréquence.

L'objectif essentiel de cette présentation est une approche ajoutée à l'approche précédente de l'étude expérimentale d'enroulement réel de [124] **THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN AUTOMATIQUE Contribution à la conception d'une plateforme embarquée sans fils pour la détection de défauts dans les transformateurs**, Amara Abderrazak 2020/2021. Notre approche qui étudie l'élément physique C_{eq} après le test **FRA** pour localiser les défauts radiaux dans l'enroulement réel.

Pour cerner cet objectif notre mémoire est subdivisée en 04 chapitres.

Le premier chapitre concerne une étude bibliographique portant sur la généralité, les contraintes et les défauts des transformateurs de puissance.

Le deuxième chapitre a pour objet de maintenance et les méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance.

Dans le troisième, nous vous présentons la méthode de diagnostic l'analyse de la réponse fréquentielle FRA et leur application dans les transformateurs de puissance et les circuits RLC

Pour le quatrième chapitre notre étude est passée par deux phases :

Première phase : simulation dans le programme MATLAB sur un modèle de schéma équivalent pour l'enroulement à cinq disques, où nous avons créé des défauts au niveau des cinq disques, qui étaient :

- Déformation
- Isolation
- Court-circuit
- Circuit ouvert

Nous avons remarqué des changements dans les courbes de défauts (Pics et Creus) lors du changement de fréquence f par rapport à l'impédance $Z(f)$ par rapport à l'état sain.

Deuxième phase : Dans cette phase, nous sommes appuyés sur une étude antérieure de [124] **THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN AUTOMATIQUE Contribution à la conception d'une plateforme embarquée sans fils pour la détection de défauts dans les transformateurs**, Amara

Abderrazak 2020/2021 , dans laquelle il a étudié le système Embarqué (télé-surveillance) , où il a développé une approche pour déterminer l'emplacement des défauts dans un enroulement réel avec une étude expérimentale, il a utilisé deux méthodes :

La première méthode : utilise les indices mathématiques

La deuxième méthode : utilise les paramètres physiques (l'inductance équivalente ***L_{eq}***)

Par conséquent, notre étude s'ajoute à l'étude précédente en développant une approche pour le diagnostic des transformateurs par l'utilisation d'un autre paramètre physique qui est la capacité équivalente (***C_{eq}***), notre étude est consacrée à la variation des paramètres du modèle adopté et son exploitation pour une étude de diagnostic à haute fréquence, en réalisant plusieurs défauts sur l'enroulement étudié. Les résultats obtenus sont enfin discutés à la fin de chapitre. Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre I

Généralités sur les transformateurs

Introduction :

Le transformateur triphasé joue un rôle fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. En effet, les alternateurs des centrales sont triphasés et la tension qu'ils produisent est relativement basse (soit 20KV pour les centrales modernes). Si on veut que le transport de l'énergie soit économique, il faut que celui-ci soit assuré à une tension beaucoup plus élevée (soit 400KV). Cette élévation de la tension est assurée par des transformateurs triphasés [5] FRANÇOIS MILSANT, « Électrotechnique machines électriques transformateurs électriques »- 2015-2016]. Les transformateurs de puissance sont des constituants essentiels de tous les réseaux de transport et de distribution d'électricité.

L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs parasites produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Un transformateur peut aussi être soumis à des contraintes pendant son transport et son installation ainsi que par suite des variations cycliques de la température ambiante. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [6] [Omicron electronics 'FRAnalyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006].

I.1 Définition :

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables d'intensité et de tensions généralement différentes mais de même fréquence [7] [Sonelgaz DEPT GRTE formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance]. Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance, en transformant les valeurs de la tension et de l'intensité à des valeurs qui rendent abordable techniquement et économiquement le transport depuis les centres de production aux centres d'utilisation [8] [FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005].

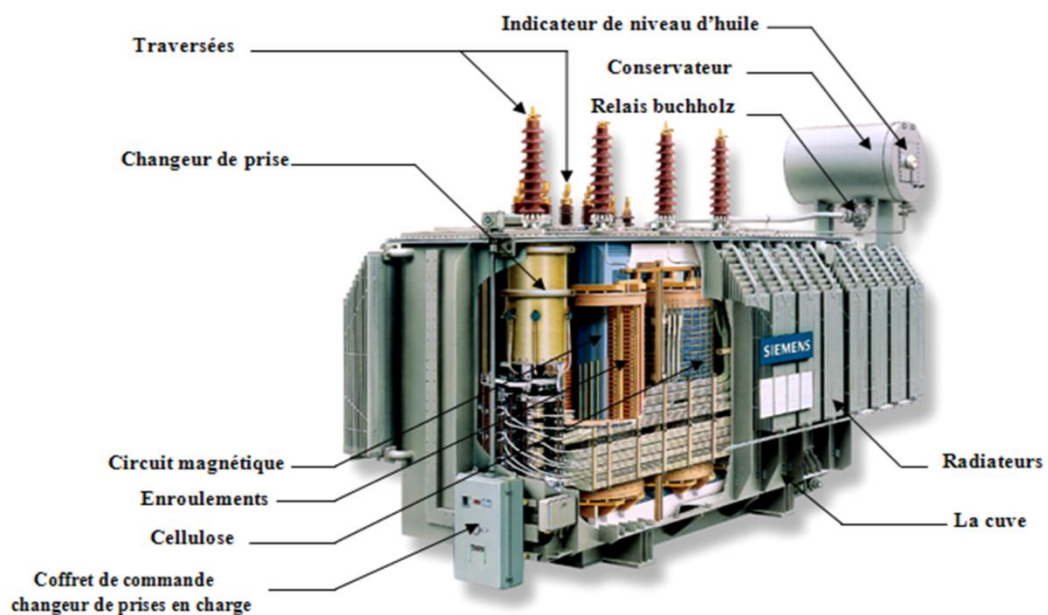


Figure (I.1) : une vue intérieure d'un transformateur, type colonne

I.2 Différents types des transformateurs :

I.2.1. Transformateurs émergés :

La partie active est placée dans une cuve remplie d'un diélectrique de l'une des familles suivantes :

- huiles minérales : produits pétroliers économiquement intéressants, mais ayant un point d'inflammabilité bas qui entraîne dans certains cas des contraintes d'installation.
- huiles silicones : diélectrique liquide difficilement inflammable.
- L.I.H.T. (Liquide Isolant Halogéné pour Transformateur) : diélectrique de synthèse ininflammable non toxique.

Il remplace les PCB(Polychlorobiphényles) dont l'usage est aujourd'hui interdit dans de nombreux pays.

Le diélectrique liquide sert également au transit des calories entre enroulement et système de refroidissement.

Le diélectrique varie donc en température, il se dilate ou se rétracte au rythme de la charge que débite l'appareil. Le transformateur doit donc être conçu pour absorber les variations de volume du diélectrique.

Deux principes sont utilisés :

- **Transformateurs dits «respirant »**: La dilatation du diélectrique se fait dans un réservoir d'expansion (conservateur) placé au dessus de la cuve.

La surface du diélectrique peut être en contact direct avec l'air ambiant ou en être séparé par une paroi étanche en matière synthétique déformable.

Dans tous les cas un dessiccateur évite l'entrée d'humidité à l'intérieur du réservoir.

- **Transformateurs hermétiques** : Pour des transformateurs de puissance <16 MVA dont la quantité de diélectrique est faible, la dilatation est absorbée par un matelas de gaz inerte intercalé entre la surface du diélectrique et le haut de la cuve ou par la déformation du système de réfrigération qui souvent fait partie intégrante de la cuve.

Cette technique évite tout contact avec l'extérieur et minimise les opérations d'entretien

I.2.2.Transformateurs secs :

Assuré par l'air ambiant sans liquide intermédiaire.

Ils appartiennent à l'une des familles suivantes :

- **Imprégnés classe H** : appareils dont les bobinages sont réalisés par imprégnation et polymérisation des vernis.

Le choix des isolants et des vernis évite la propagation de l'incendie, le dégagement de fumées et de vapeurs toxiques.

- **Enrobés** : appareils dont les bobinages sont pris dans un moulage exécuté à chaud avec une résine époxydique.

Cette résine peut être renforcée de tissus de verre et est spécialement étudiée pour éviter la propagation de l'incendie [9] [Formation transformateur « Formation transformateur de puissance » 2011].

I.3. Constitutions générale de transformateur :

Comme toutes les machines à induction, les transformateurs de puissance comportent :

I.3.1. Partie actif : celle – ci est composée de :

Circuit magnétique :

Le circuit magnétique est construit en tôle d'acier laminé à froid (de 0,3 mm d'épaisseur : carbone-siliceuse) avec environ : 0.005% de carbone et 3 à 4% de silicium. Cette tôle (Voir figure I.1) de cristaux orientée est connue par « Hi persil », se caractérise par un bas indice de pertes hystériques et par une conservation intégrale au long, des qualités magnétiques [10] [SONELGAZ-ALGÉRIE, « Documentation des accessoires » 2007.]

- **Les colonnes** : sont de section carrée, mais pour la forte puissance on utilise des sections à plusieurs gradins se rapprochant le plus de la section idéale qui est circulaire.

Elles sont porteuses de bobinage. (voir figure I.1)

- **Les culasses** : ne portent pas de bobines, elles peuvent être rectangulaires [11] [A.CAPLIEZ P.HEINY. « Technologie et schéma » tome 2. { les Editions Fourcher , 1978 , Touts Droits Réservés }].

Rôle du circuit magnétique :

Canaliser vers l'enroulement secondaire (et tertiaire) le flux magnétique produit par l'excitation de l'enroulement primarise

I.3.2. Les enroulements :

Les enroulements du transformateur sont fabriqués principalement en cuivre électrolytique recuit avec 99.9 % de pureté et sous forme de barres isolées usuellement en papier Kraft.

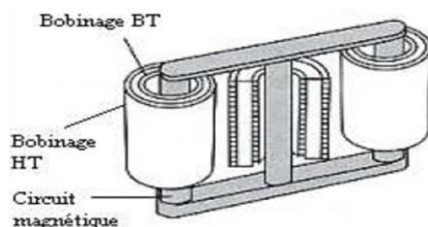
L'utilisation des barres en n'importe quel cas cuirassé-imbriqué ou concentrique est faite normalement en faisceaux (plusieurs barres en parallèles).leurs nombres et leurs dimensions dépendent de la valeur du courant [8] [FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005].

Les enroulements permettent la circulation du courant électrique dans des meilleures conditions, en utilisant des métaux bons conducteurs de l'électricité [11] [A.CAPLIEZ P.HEINY. « Technologie et schéma » tome 2. { les Editions Fourcher , 1978 , Touts Droits Réservés }].

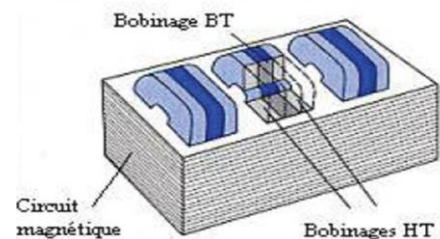
Le cuivre possède d'excellentes propriétés mécaniques, et il possède la plus haute conductivité des métaux commerciaux.

Son importance dans les transformateurs est particulièrement significative dû aux bénéfices importants sur la sauvegarde de place et de minimisation des pertes en charge par rapport à d'autres métaux [12] [Essais sur les transformateurs. (www.sitelec.com/essai_transformateur.htm). 11 octobre, 2023]

On distingue deux types de bobinages :



Figure(I.2): enroulement en couche



Figure(I.3): enroulement en galettes

Rôle des enroulements :

Permettre le transfert de la puissance du primaire vers le secondaire (tertiaire) tout en modifiant la tension, (Circulation du courant) .[11]

I.3.3. Isolants :

Les isolants peuvent être [9] [Formation transformateur « Formation transformateur de puissance» 2011]:

- Liquides : huiles minérale, huile silicone, midel, ...
- Solides : papier, carton, fibre de verre, nomex, ...
- Gazeux : SF6

Les isolants doivent assurer :

- L'isolation diélectrique

Le refroidissement Les isolants doivent avoir :

- Une tension de claquage élevée
- Un faible niveau de décharge partielle

- Une stabilité thermique
- Une longue durée de vie
- Une absence de réaction chimique avec les autres matériaux .

I.3.4. La cuve :

Les cuves sont conçues dans les types « réservoir » et « cloche », d'une façon générale, elles sont utilisées pour tout type de transformateurs, (voir figure 1)

Le matériel utilisé est l'acier carbone (acier de construction) en tôles et profil laminé, liés par électro-soudure constituant un tout résistant au vide, surpressions et étanche d'huile.

Les superficies intérieures et extérieures sont soumises à des traitements contre la corrosion [8] [FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005].

Rôle de la cuve :

- Contenir l'huile
- Permettre le traitement de l'appareil sur site (Tenue au vide)
- Supporter les accessoires.

Maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuites produit par le courant dans les enroulements [8] [FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005].

I.3.5. Traversées : ils existent deux types :

Les Traversées (condensateurs) :

Lorsque la tension devient élevée (>40 KV) la traversée nécessite des aménagements internes destinés à répartir les gradients électriques .

Elle se présente sous la forme monobloc (voir figure 1), composée d'un tube en cuivre qui constitue l'ossature de la traversée et sur lequel seront fixés le corps isolant, la porcelaine, la prise supérieure et la bride de fixation .

Le corps isolant est composé de papier roulé avec interposition d'électrodes pour répartir linéairement le champ électrique. Il est soit imprégné d'huile soit de résine.

L'espace vide entre le corps isolant et la porcelaine est rempli d'huile .

Les Traversées (porcelaines) :

La borne porcelaine est un dispositif servant à guider un conducteur à travers un couvercle métallique tout en l'isolant électriquement.

En fonction de la tension et de l'intensité, différents systèmes sont utilisés .

La fixation de ce type de traversée est assurée par clabotage et l'étanchéité par des joints appropriés .

Le conducteur traversant est assuré soit par un câble soudé sur l'embout soit une tige en cuivre .

Rôle des traversées :

Les traversées isolantes (ou bornes) qui assure les liaisons électriques entre les phases d'alimentation et les enroulements primaires et secondaires .

I.3.6.Huile :

Dans de nombreux équipements électriques différents, il est nécessaire d'isoler les uns par rapport aux autres.

Un fluide diélectrique (l'huile) est utilisé dans les transformateurs pour transformer la chaleur produite au niveau des enroulements et du circuit magnétique par un transfert de chaleur (contact direct) et d'autre part on fait le refroidissement de l'huile d'où le refroidissement du transformateur.

Rôle d'huile : le rôle de l'huile est inclus dans ces trois points :

- isolation entre différentes parties de la partie active.
- isolation entre la partie active et la masse.
- transport des calories dues aux pertes

I.4 .Les équipements :

I.4.1. Changeur de prise :

Presque tous les transformateurs permettent de réguler la tension : d'ajuster leurs rapports de transformation (automatiquement) en ajoutant, ou retranchant, quelques spires de réglage en série avec les spires de l'enroulement haute tension, à l'aide d'un système mécanique : le régleur .

Cet ajustement peut être réalisé en charge, comme c'est souvent le cas sur de gros appareils, hors charge. Ils permettent de stabiliser le réseau en maintenant une tension constante. Ils font l'objet d'une maintenance attentive car leur moindre défaillance peut endommager sérieusement le transformateur

On distingue deux types :

I.4.1.1 Changeur de prise en charge :

- Permet modifier le rapport de transformation à l'intérieur d'une plage déterminée en augmentant ou diminuant le nombre de spires de l'enroulement haut tension.
- Commande électrique .

I.4.1.2. Changeur de prises hors tension:

- Permet de modifier le rapport de transformation uniquement lorsque le transformateur est hors tension.
- Commande manuelle [8] [FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005].

I.4.2. Refroidissement :

Malgré le rendement du transformateur qui est excellent, l'évacuation produite par des pertes dans le fer et dans le cuivre doit être largement assurée pour ne pas causer une élévation dangereuse de la température.

Pour les transformateurs de petite et moyenne puissance, on utilise le refroidissement par l'air dont la circulation est soit libre, soit activée par des ventilateurs.

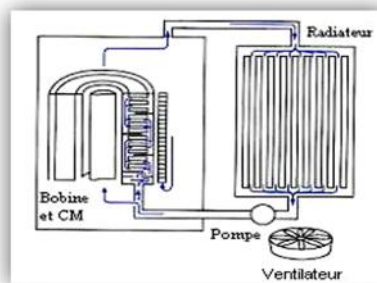
Dès que la puissance du transformateur devient élevée, on place son circuit magnétique muni de ses enroulements dans une cuve métallique remplie d'huile minérale très fluide.

L'huile circulant le long des bobinages et du circuit magnétique véhicule la chaleur dégagée, et la transmet ensuite à la cuve munie de radiateurs.

Ce procédé, dit à ventilation naturelle (par des radiateurs).

I.4.3. Radiateurs:

- ONAN : réfrigération naturelle.
- ONAF : ventilateur (s) en service.
- OFAF ou ODAF : ventilateur (s) et pompe (s)
- en service .



Figure(I.4): Radiateur

Les radiateurs constitués d'éléments emboutis et soudés entre eux, formant ainsi un certain nombre de panneaux.

Ils sont ensuite fixés sur un collecteur supérieur et inférieur.

L'adjonction de ventilateurs sur les radiateurs permet d'augmenter la surface fictive et donc d'augmenter la puissance à évacuer.

Il est également possible de mettre en place d'une motopompe pour encore augmenter la capacité d'évacuation des radiateurs.

Si le nombre de radiateur est trop important, il est possible de les monter sur un châssis séparé.

Ce procédé peut convenir jusqu'à des puissances de plusieurs KVA, mais au-delà, il faut faire appel à l'un des procédés suivants :

I.4.3.1. Aéroréfrigérant (s):

-OFAF ou ODAF: avec ventilateur (s) et pompe (s).

Ce groupe compact est constitué d'un radiateur à ailettes en cuivre ou en aluminium, de boîtes à huile, de moto ventilateurs et d'une motopompe.

Ils peuvent aussi être montés soit sur la cuve du transformateur soit sur un châssis séparé.

Des précautions doivent être prises pour éviter un recyclage de l'air et pour avoir un fonctionnement optimal .

I.4.3.2. Réfrigérant (s) à eau:

-OFWF ou ODWF: avec pompe (s) à l'huile et pompe (s) à eau

Lorsque les pertes à évacuer sont importantes et que l'espace d'installation est restreint, l'utilisation d'un hydro réfrigérant devient nécessaire.

L'hydro réfrigérant est composé d'un ensemble de tube dans lesquels une pompe force l'huile chaude du transformateur.

Ces tubes sont disposés dans une enceinte dans laquelle circule l'eau de refroidissement.

En cas de manque d'étanchéité entre le circuit eau et l'huile (perforation d'un tube), il est impératif d'éviter une entrée d'eau dans le transformateur.

- Et toujours la pression d'huile doit être supérieure à celle de l'eau. [8] [**FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005**].

I.4.4. Conservateur :

Le conservateur (réservoir d'expansion) est permet de contenir le volume d'huile supplémentaire quand la température augmente et maintenir le niveau dans la cuve du transformateur quand la température diminue .

I.4.5. Coffret des auxiliaires :

Cet équipement joue deux rôles :

- commande de la réfrigération du transformateur.

- regroupement sur un bornier pour les départs des informations nécessaires à l'exploitation de l'appareil et à l'alimentation des auxiliaires.

I.4.6.Coffret de commande du changeur de prises en charge (CPC) :

Ces équipements (voir figure 1) permettent de commander les changeurs de prise en charge qui se trouve à l'intérieur de la cuve du transformateur.

Cette armoire peut être commandée à distance ou en locale et permet également de transmettre à distance les informations de la position du régleur .

I.5.Les accessoires de surveillance :

I.5.1.Indicateur de niveau d'huile :

Cet indicateur indique la hauteur d'huile dans le conservateur. Monté sur un des côtés du conservateur, il est équipé d'un ou 2 contacts d'alarme



Figure(I.5): Indicateur de niveau d'huile

I.5.2. La soupape de surpression :

Cet équipement, placé sur le couvercle du transformateur, a pour fonction d'éliminer toute surpression interne à la cuve.

Dès que la pression dépasse 0,55 bar, la soupape s'ouvre et laisse échapper l'huile jusqu'à ce que la pression reprenne sa valeur normale



Figure(I.6): soupape de surpression

Lorsque la soupape est revenue à son point de repos, la tige indicatrice signale que la soupape a fonctionné.

Son réarmement se fait manuellement .

I.5.3. Indicateur de température d'huile :

Cet indicateur contrôle la température d'huile au sommet de la cuve du transformateur.

- Contact alarme à 100°C.
- Contact déclenchement à 110 °C .



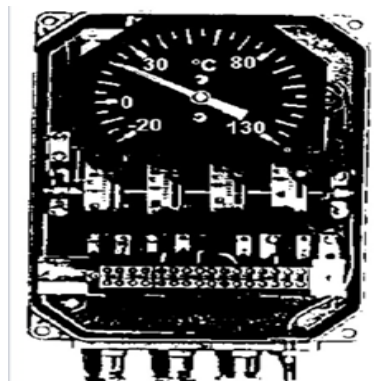
Figure(I.7): Indicateur de température d'huile

I.5.4. Indicateur de température de bobinage :

Cet indicateur contrôle la température des bobinages, commande la réfrigération et fournit un signal d'alarme et de déclenchement.

Il utilise un élément chauffant alimenté par un TC qui ajouté à la température d'huile, donne une image thermique de la température des enroulements.

- Contact alarme à 120°C.
- Contact déclenchement à 130°C .



Figure(I.8): Indicateur de température de bobinage

I.5.5. Relais BUCHHLOZ :

Ce relais doit mettre hors tension le transformateur en cas d'incident interne à l'appareil.

En cas de défaut, deux contacts peuvent fonctionner:

- Alarme : présence de gaz suite à un arc électrique ou à des décharges.



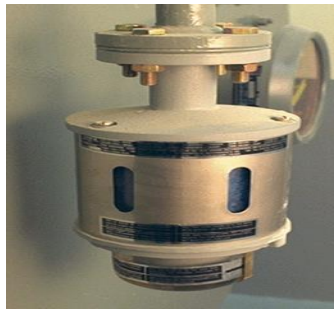
Figure(I.9): Relais BUCHHLOZ

- Déclenchement : un mouvement brutal de l'huile de la cuve de l'appareil vers le conservateur suite à un arc électrique violent ou un mouvement des enroulements

I.5.6. L'assécheur (dessiccateur d'air) :

Cet équipement réalise deux fonctions fondamentales pour la conservation des caractéristiques de l'huile :

- Absorber l'humidité de l'air aspiré par le conservateur en phase de contraction. (Quand le transformateur se refroidi)
- Interdire l'entrée d'air durant les faibles variations de charge de façon à éviter le contact permanent du produit déshydratant avec l'air atmosphérique.
- Le silicagel bleu n'est donc plus disponible sur le marché et il est remplacé par un gel de silice de couleur orange lorsqu'il est déshydraté et se transforme en couleur blanche sale translucide lorsqu'il est saturé.



Figure(I.10): assécheur

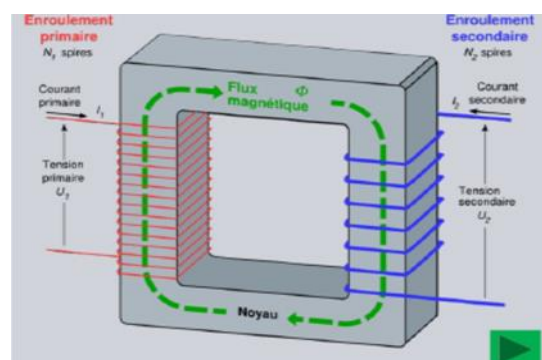
A ce jour, ce produit ne contient aucune substance qui soit considérée comme dangereuse pour la santé et pour l'environnement.

C'est le produit le plus utilisé actuellement.

I.6. Principe de fonctionnement de transformateur :

➤ Paramètres définissant un transformateur :

- Puissance assignée.
- Nombre de phases.
- Rapports de transformation.
- Fréquence.
- Groupe de couplage.
- Niveau d'isolement.



Figure(I.11): schéma simplifié d'un transformateur

- Mode de refroidissement.
- Tension de court-circuit.
- Pertes à vide ou pertes fer.
- Pertes cuivre ou pertes en charge.

➤ **Rappel théorique :**

➤ **Loi de Faraday :**

Une variation du flux à travers une spire crée une force électromotrice.

Inversement, une fréquence variable dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci.

$$e = - d\Phi/dt \quad \text{et pour N spires on aura:} \quad e = - N. d\Phi/dt$$

➤ **Lois de Lenz:**

La fréquence induite par la variation de flux est d'un sens telle qu'elle fera circuler un courant qui produira un flux magnétique s'opposant au flux qui lui a donné naissance ou, plus simplement, la direction de la fém induite est telle qu'elle s'oppose à la cause qui lui a donné naissance .

➤ **Fonctionnement :**

• Le primaire 1 reçoit l'énergie d'une source sous une tension U_1 alternatif sinusoïdale le courant primaire crée un flux variable alternatif qui va parcourir le circuit magnétique (lois de faraday).

• Ce flux variable induit une FEM dans l'enroulement primaire et une FEM dans l'enroulement secondaire.

• Le secondaire 2 raccordé à une charge fournit l'énergie au récepteur sous une tension U_2 .

• Si le transformateur est idéal (sans perte) : $U_2 = U_1 * n_2/n_1$.

• L'énergie « reçue » est égale à l'énergie « fournit ».

• La puissance secondaire est donc égale à la puissance primaire et $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

• Le courant secondaire sera opposé au courant primaire (loi de Lenz) .[14]

I.7. Les contraintes :

Un réseau électrique doit fournir une énergie avec une meilleure qualité possible.

Cette qualité se dégrade avec l'apparition des anomalies dont la durée peut conduire à des arrêts des fonctionnements prolongés.

Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs, leurs causes, leurs conséquences.

I.7.1. Surtension :

Les surtensions peuvent être causées par :

- Contact avec une ligne de plus forte tension.
- Coupure brutale d'une ligne.
- Coups de foudre directs ou indirects.
- Dans le cas où la surtension persiste, elle risque d'entraîner des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs.

• En cas de calquage de l'isolant, elles ont pour conséquence immédiate un court-circuit même s'il s'agit seulement d'un arc dans l'air, celui-ci persiste sur les réseaux de tension supérieure à quelques milliers de volts, même après disparition de la surtension.

On a alors le courant de suite qui ne coupe que par isolement de ligne ou de l'appareil atteint.

- Les surtensions de longue durée augmentent le courant magnétisant des transformateurs, d'autant plus que leur circuit magnétique est saturé [9] [Formation transformateur « Formation transformateur de puissance » 2011].

I.7.2 surcharge :

Les surcharges sont dues essentiellement à une augmentation de la demande d'énergie, mais parfois aussi à un dimensionnement incorrect de l'équipement qui compose les installations électriques.

Les surcharges se caractérisent par des courants supérieurs aux courants maximums admissibles, Si ces courants se maintiennent trop longtemps ils peuvent d'une part endommager les matières isolantes et d'autre part provoquer la rupture des conducteurs par suite de la dégradation de leur résistance mécanique.

Les conséquences des surcharges sont :

Un régime de charge d'un transformateur au-delà des valeurs de la plaque signalétique a les conséquences suivantes :

- Les températures des enroulements, des calages, des connexions, des isolants et de l'huile vont augmenter, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables.
- L'induction magnétique du flux de fuite en dehors, du circuit magnétique augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courant de Foucault dans les parties métalliques embrassées par le flux de fuite.
- Comme la température varie, les taux d'humidité et teneur en gaz dans l'isolation et dans l'huile sont modifiés.

Les traversées, les changeurs de prises, les connexions d'extrémités de câble et les transformateurs de courant sont également soumis à des contraintes plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.

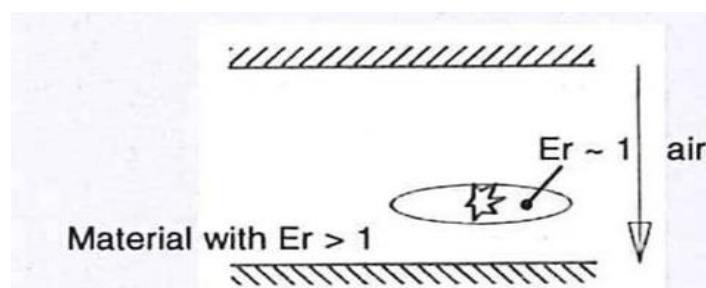
Par conséquent il ya un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures.

Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolation du transformateur sur de nombreuses années

I.7.3. Les décharges partielles :

Les décharges partielles peuvent être provoquées par :

- Une cavité non imprégnée d'huile.
- Une contamination (particule métallique).
- Une conception non optimale (choix du matériau, de sa disposition,...).



Figure(I.12): décharges partielles

- Un dommage mécanique (guipage mou, déformation d'une cornière,...).
- Une mauvaise réalisation (arêtes, effet de pointe, traitement insuffisant,...).

Le champ électrique dans la cavité est 2 à 5 fois supérieur à celui dans le matériau il se produit un micro-claquage dans la cavité.

Cette décharge peut :

- S'éteindre si les parois de la cavité se charbonne et si le matériau est sain.

Se développer en détruisant le matériau ce qui affaiblit sa tenue diélectrique et peut conduire à un claquage.

I.8. Défauts des transformateurs :

Le Tableau 1.1 ci-dessous illustre des échantillons relativement typiques des principaux défauts des transformateurs de puissance nécessitant une réparation.

De plus, ces défauts couvrent l'essentiel des défaillances qui peuvent affectés les transformateurs [42-43] [MSA Minhas. Et al., 'FAILURES IN POWER SYSTEM TRANSFORMERS AND APPROPRIATE MONITORING TECHNIQUES'. High Voltage Engineering Symposium. Conférence Publication No. 467, 0 IEE, 1999]

[Jean Sanchez et al., 'Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance'. Université de Grenoble, 2011. Français. ffNNT: 2011-GRENT031ff. fftel-01017179f.]

Catégorie de défaut	Type de défaut
Diélectrique	Isolement de la partie active
	Amorçage diélectrique entre spires, sans court-circuit
	Court-circuit entre spires
	Amorçage du corps insérable du régleur en charge
	Décharges Partielles
Electrique	Point chaud interne au transformateur
	Coupure du circuit électrique
Mécanique	Déformation géométrique des enroulements

Tableau 1.1 : Défauts des transformateurs retenus et leurs types

Les défauts diélectriques sur les régleurs en charge, les enroulements et les traversées forment environ 79 % des défauts majeurs sur les transformateurs [42-43].

I.8.1 Défaut d'isolement de la partie active :

Le défaut d'isolement de la partie active est caractérisé par la perte, ou la très forte diminution, d'isolement d'un circuit électrique par rapport à son environnement, dont il doit être normalement isolé.

Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes :

- * Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux (Figure 1.3a).
- * Amorçage entre la masse et un enroulement, une connexion ou une traversée.

I.8.2 Amorçage diélectrique entre spires :

C'est un amorçage entre spires d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux (Figure 1.3b).

L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement.

I.8.3 Court-circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles.

Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas.

I.8.4 Amorçage du corps insérable du régulateur en charge :

L'amorçage du corps insérable, ou commutateur, d'un régulateur en charge provoque généralement des courts-circuits importants dans un petit volume.



(a)

(b)

Figure (I.13) : (a) Amorçage entre enroulements, (b) Amorçage entre spires [43] [Jean Sanchez et al., 'Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance'. Université de Grenoble, 2011. Français. ffnnt: 2011 - GRENT031ff. fftel-01017179f.]

I.8.5 Décharges Partielles :

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 sur la (**Figure 1.4a**). 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.

I.8.6 Point chaud interne au transformateur

Un point chaud est caractérisé par l'échauffement local interne d'une connexion précise du transformateur.

Les points chauds peuvent classiquement former des morceaux solides de carbone, qui sont conducteurs.

Typiquement les points chauds peuvent venir de mauvais contacts du circuit électrique chauffant alors anormalement, comme sur des connexions au niveau des brasures, ou sur des contacts mobiles du régleur en charge. Ils peuvent être aussi provoqués par des courants de Foucault induits anormaux circulant dans des pièces non prévues pour cela, qui chauffent alors anormalement, comme : des tôles du circuit magnétique ou des isolants en défaut de la partie active, hors enroulements.

I.8.7 Coupure du circuit électrique :

La plupart des cas de coupure d'un circuit électrique sont le résultat d'un défaut interne, suite à :

- Un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur.
- Un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact (**Figure 1.4b**).
- Un mauvais alignement d'un régleur.

I.8.8 Déformation géométrique des enroulements :

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des courts-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés, qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes.

Il est possible de déformer un enroulement (**Figure 1.4c**), ce qui fragilise inévitablement son isolement papier se trouvant au contact des conducteurs, sans nécessairement avoir d'amorçages entre spires ou à la masse.

Un transformateur avec une telle déformation mécanique peut dans certains cas fonctionner à son régime nominal.

Il reste néanmoins fragilisé et il n'est absolument pas certain qu'il puisse ainsi tenir des perturbations de courts-circuits ou de sursensions ultérieures sans amorcer.

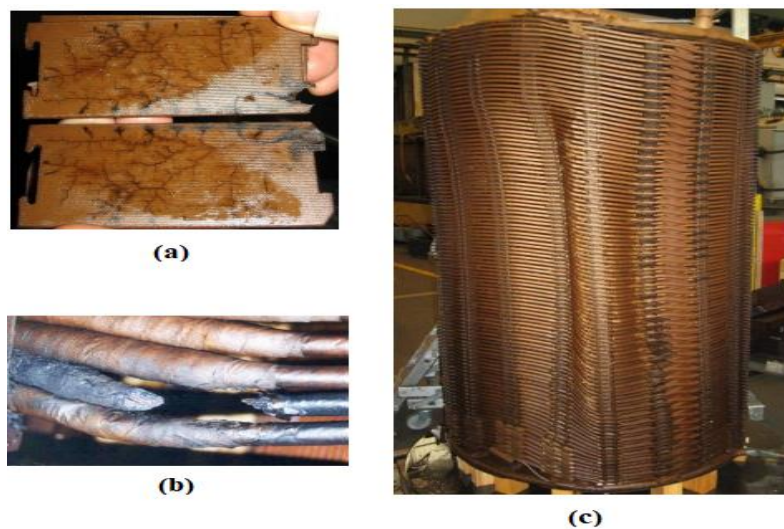


Figure (I.14) :*(a) Décharges partielles sur des cales, (b) Coupure suite à la fusion d'un conducteur, (c) Déformation mécanique d'un enroulement* [43] [Jean Sanchez et al., 'Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance'. Université de Grenoble, 2011. Français. ffNNT: 2011- GRENT031ff. fftel-01017179f.]

Conclusion :

Le transformateur de puissance est une machine électrique statique qui permet la conversion de l'énergie électrique basé sur la loi de l'induction électromagnétique. Chacun des éléments constitutifs a un rôle bien déterminé pour garantir un fonctionnement permanent avec une qualité d'alimentation correcte et un rendement optimal. Dans les réseaux d'exploitations, les transformateurs de puissance sont soumis à des nombreuses contraintes lors de leur fonctionnement. Ces contraintes perturbent le fonctionnement du transformateur et peuvent parfois s'avérer destructives. C'est la raison pour laquelle il est installé des protections pour assurer la bonne marche des transformateurs suivant un plan de protection fiable. Les techniques de diagnostic deviennent de plus en plus importantes pour évaluer au mieux l'état des transformateurs.

Chapitre II

Maintenance et Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance

Introduction :

Aujourd'hui, les transformateurs constituent une partie importante des équipements des services publics du monde entier et une alimentation électrique fiable dépend de leur fonctionnement sans défaut. Le transformateur est exposé souvent à des défauts de fonctionnement. Par conséquent, leur surveillance et leur diagnostic deviennent deux tâches essentielles pour assurer leur maintenance et la continuité de la production électrique.

La prévention des pannes et le maintien des transformateurs en bon état est un enjeu important pour les compagnies d'électricité. Par conséquent, il existe un besoin croissant d'outils de surveillance et de diagnostic non invasifs pour évaluer l'état des transformateurs. C'est une tâche complexe, en raison du grand nombre de variables à considérer. Par conséquent, il est nécessaire de connaître leur état intégral, en évaluant l'état de leur isolation, des enroulements et de l'huile diélectrique pour définir quand effectuer un certain type de maintenance et ainsi essayer de prolonger leur durée de vie. Pour réduire les coûts de maintenance, minimiser les réparations coûteuses et éviter l'arrêt de fonctionnement du transformateur, une mise en œuvre d'une stratégie de surveillance est devenue une nécessité, elle permet une détection précoce des défauts mécaniques et électriques. Cela facilitera l'intervention réparatrice qui anticipe tout arrêt définitif et minimise les temps d'arrêt.

Plusieurs recherches scientifiques ont actuellement focalisé leurs travaux sur les approches et les procédures permettant l'optimisation de la fiabilité des transformateurs. En effet, la plupart des investigations récentes ont été orientées vers le diagnostic. Utilisant plusieurs méthodes pour indiquer une défaillance existante ou naissante. La maintenance préventive permet de détecter les problèmes potentiels des transformateurs et de les corriger avant qu'ils ne deviennent graves, grâce à plusieurs méthodes de maintenance que nous présenterons dans ce chapitre.

II.1. Notions générales sur la maintenance industrielle :

II.1.1. Définition de la maintenance :

Selon la norme AFNOR (Association Française de Normalisation) : la maintenance est définie comme étant :

(NF X60-010) « Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

La maintenance vise toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise.

Ces activités sont une combinaison d'activité technique, administrative et de management.

II.1.2. Types et organisation de la maintenance :

Lorsqu'au cours d'une tâche préventive un composant interne du matériel est trouvé ou jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance corrective. S'il est trouvé non défaillant mais dégradé, même au-delà valeur de défaillance potentielle, sa réparation ou son remplacement est du domaine de la maintenance préventive.

II.1.2.1. La maintenance préventive :

AFNOR X60-010 « maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle) »

[122][Le grand livre de la maintenance Concepts, démarches, méthodes, outils et techniques Éditeur: AFNOR , Auteur: Bouami Driss , Parution : 25/04/2019]

La maintenance préventive a pour objectif :

L'augmentation de la durée de vie du matériel ;

La diminution de la probabilité des défaillances en service ;

La prévention et la prévision des interventions de maintenance corrective coûteuses ;

La prévision de bonnes conditions à la maintenance corrective ;

Eviter la consommation anormale de l'énergie ;

L'amélioration des conditions de travail du personnel de production ;

La diminution des causes d'accidents graves.

Cependant nous pouvons distinguer deux sortes de maintenance préventive, l'une systématique et l'autre conditionnelle.

II.1.2.1.1. Maintenance préventive systématique :

AFNOR X60-010 « activité déclenchée suivant un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage, les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et ce de façon périodique ». [122] [Le grand livre de la maintenance Concepts, démarches, méthodes, outils et techniques Éditeur: AFNOR , Auteur: Bouami Driss , Parution : 25/04/2019]

II.1.2.1.2. Maintenance préventive conditionnelle :

AFNOR X60-010 « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service. [122] Les remplacements ou les mises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation.

Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les mises en état nécessaires ».

II.1.2.1.3. Maintenance prévisionnelle :

Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

II.1.2.2. La maintenance corrective :

C'est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise au moins provisoirement.

Ces activités sont :

- La localisation de la défaillance ;
- Le diagnostic ;
- La remise en état ;
- Le contrôle du bon fonctionnement.

II.1.2.2.1. Maintenance palliative :

Activités de la maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise.

Appelée couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

II.1.2.2.2. Maintenance curative :

Activités de maintenance corrective ayant pour objectif de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent.

Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillance(s).

La maintenance s'organise de la manière suivante :

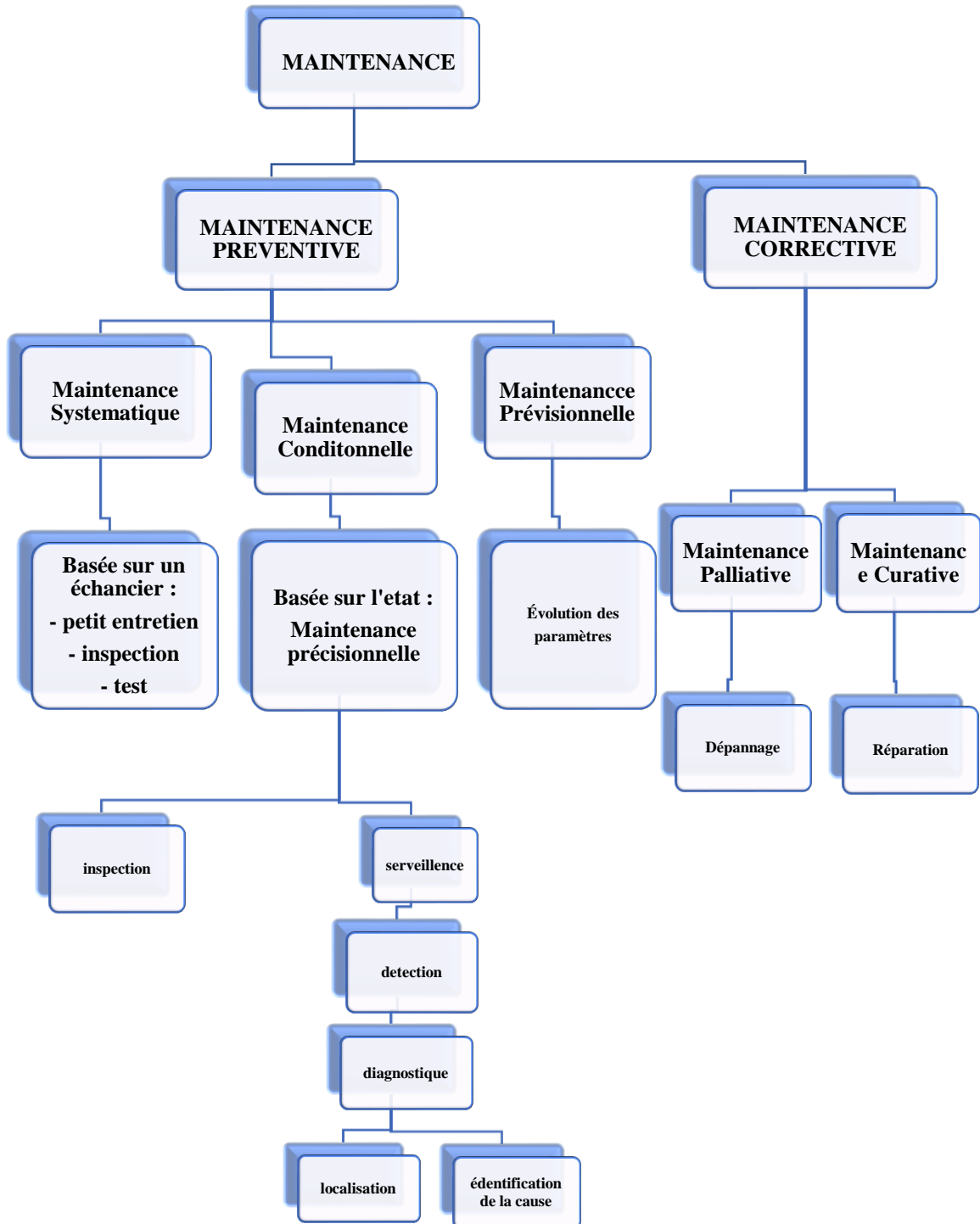


Figure. II.1 : Organigramme de la Maintenance

II.2.Surveillance industrielle :

II.2.1 Définition :

La fonction surveillance en continu de l'évolution de l'équipement à travers des données quantifiables et qualifiables permet ainsi de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive et d'écartier les fausses alarmes pour éviter de prendre de fausses décisions de maintenance.

Dans un grand nombre d'applications industrielles, une demande croissante est apparue en matière de remplacement des politiques de surveillance curative par des stratégies de surveillance préventive .

Cette mutation d'une situation où on « subit les pannes » à une situation où on « maîtrise les pannes », nécessite quelques moyens technologiques ainsi que la connaissance de techniques d'analyse appropriées [48] Basseville, M. et M-O. Cordier., 'Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques : approche complémentaire du traitement de signal et de l'intelligence artificielle'. Rapport INRIA, N°2861. 1996

[49] Wang M, et al., 'Review of condition assessment of power transformers in service'. IEEE Electr Insul Mag 18(6) :12–25 2002.

De nombreux auteurs ont abordé le domaine de la surveillance industrielle mettant ainsi en évidence l'intérêt croissant manifesté par la communauté scientifique et les industriels par rapport à cette problématique [50] Combacau, M. et al., 'Commande et Surveillance des Systèmes à Évènements Discrets Complexes : Application aux Ateliers Flexibles', Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse - 15 Nov 2005.

[53] Poulard, H. et al., 'Statistiques et réseaux de neurones pour un système de diagnostic', Application au diagnostic de pannes automobiles", Thèse de Doctorat, LAAS, Toulouse, France- 1996.

Des définitions ont été extraites à partir des références suivantes [47] Daniel Racoceanu et al., 'Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique'. Université de Franche-Comté, 2006. : [54]. Cussenot, C. et al., 'Surveillance et diagnostic de la chaîne de dépollution d'une automobile', Thèse de doctorat, Université de Rennes 1 – 1996 .

[56] Weber, P. et al., 'Diagnostic de procédés par l'analyse des estimations paramétriques de modèles de représentation à temps discret', Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble - 16 Dec 2015.

II.2.2 Dégradation :

Une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus dégradation mais défaillance.

II.2.3 Défaillance :

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

II.2.4 Panne :

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise. La défaillance correspond à un événement et la panne à un état.

Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

La surveillance est un dispositif passif, informationnel, qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières (Figure 1.11).

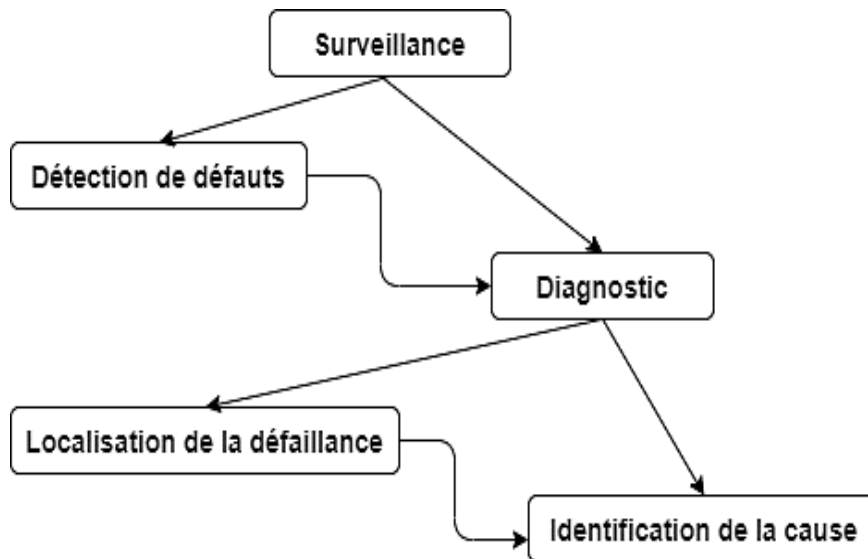


Figure. II.2 : *Composantes de la surveillance industrielle* [47] Daniel Racoceanu et al., 'Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique'. Université de Franche-Comté, 2006

En général, le terme « surveillance » couvre la mesure des paramètres de base avec des alarmes de seuil.

En d'autres termes, l'intégration et la collecte de données, avec certaines fonctions de contrôle locales et l'alerte précoce des symptômes de défaillance naissante peuvent être décrites comme une surveillance.

Elle fournit la première alerte qu'une certaine forme de dégradation du système surveillé a dépassé une valeur de seuil précédemment établie [57] Zhang, Q., et al., 'Identification et Surveillance de systèmes Dynamiques', Habilitation à diriger les recherches, Université de Rennes1, Institut de Formation Supérieure en Informatique et en Communication - 21 Novembre 2008.

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic [47] (Figure II.2).

II.2.5. Détection :

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

Étant donnée le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales.

Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

II.2.6. Diagnostic :

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière.

La fonction de diagnostic se décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification des causes.

La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant tandis que l'identification de la cause consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale.

A partir de l'observation d'un état de panne, la fonction diagnostic est chargée de retrouver la faute qui en est à l'origine.

Ce problème est difficile à résoudre.

En effet si, pour une faute donnée, il est facile de prédire la panne résultante, la démarche inverse qui consiste à identifier la faute à partir de ses effets, est beaucoup plus difficile. Une défaillance peut généralement être expliquée par plusieurs fautes. Il s'agit alors de comparer les observations pour fournir la bonne explication.

Pour surveiller en continu l'évolution d'un système et déterminer les causes des événements indésirables, il semble donc intéressant d'utiliser au mieux toutes les informations disponibles, qu'elles soient numériques (données capteurs), ou symboliques (historiques, environnements, réparations effectuées, ...).

On retrouve donc dans la littérature le terme "d'approche unifiée" pour la surveillance (Figure 1.12), qui caractérise les systèmes de surveillance prenant en compte les données numériques et symboliques :

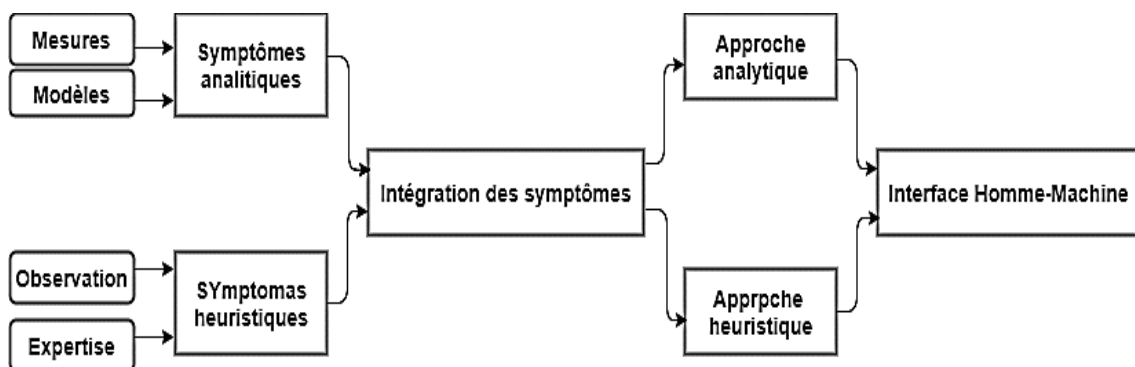


Figure. II.03 : *Approche unifiée pour la surveillance* [47] Daniel Racoceanu et al., ‘Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l’Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique’. Université de Franche-Comté, 2006

Avec l'approche analytique, on considère les informations quantifiables issues d'un modèle fournissant des symptômes analytiques.

L'approche heuristique permet de compléter la première en prenant en compte les informations qualitatives sur les systèmes surveillés tirées de l'expertise humaine [47].

II.2.6.1. Surveillance prédictive (dynamique) :

Comme pour la surveillance classique, la surveillance prédictive est un dispositif passif, informationnel, qui analyse l'état présent et passé du système et fournit des indicateurs sur les tendances d'évolution futur du système.

La surveillance prédictive se compose de : la Détection prédictive (dynamique) et du Diagnostic prédictif, appelé aussi pronostic (Figure II.04).

II.2.6.2. Détection prédictive (dynamique) :

La détection prédictive consiste à prédire une défaillance future.

En d'autres termes, le but de la détection prédictive est de détecter une dégradation au lieu d'une défaillance.

II.2.6.3. Diagnostic prédictif (pronostic) :

L'objectif du diagnostic prédictif est d'identifier les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une dégradation particulière (Figure II.04).

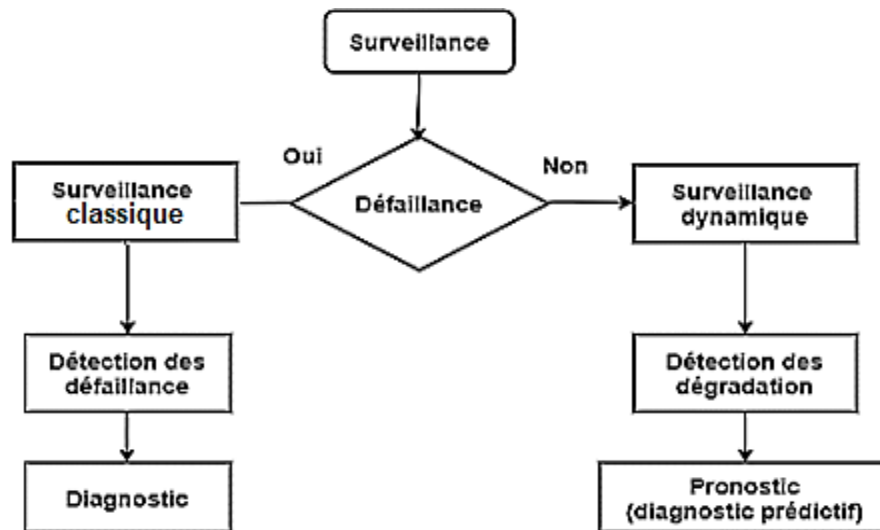


Figure. II.04 : *Surveillance classique et surveillance dynamique* [47] Daniel Racoceanu et al., 'Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique'. Université de Franche-Comté, 2006

II.3. Classification des méthodes de surveillance :

Les méthodologies de surveillance sont généralement divisées en deux groupes : méthodologies de surveillance avec modèle et sans modèle [47], [58] Combastel, C. et al., 'Méthodes d'aide à la décision pour la détection et la localisation de défauts dans les entraînements électriques', Thèse de Doctorat INPG, Grenoble - 17 Dec 2007. :

➤ Les premières se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilisent généralement des techniques de l'Automatique [49] Wang M, et al., 'Review of condition assessment of power transformers in service'. IEEE Electr Insul Mag 18(6) :12–25 2002.

➤ Les techniques de surveillance sans modèle sont divisées en deux parties :

- La première partie correspond aux outils statistiques de Traitement du Signal qui sont généralement qualifiés d'outils de traitement de bas niveau, parce qu'ils sont en contact direct avec le signal capteur, et ne servent généralement que pour la génération d'alarmes brutes, sans aucune information concernant leur signification.

- Les outils statistiques établissent des tests sur les signaux d'acquisition, tests qui ne sont capables d'assurer que la fonction détection de défaillances.

- La deuxième partie est celle des techniques dites de haut niveau et qui sont plutôt orientées vers la communication avec l'expert.

Celles-ci représentent les techniques de l'Intelligence Artificielle (IA) et servent comme outil de base pour l'aide à la décision.

Leur réponse est donc plus élaborée que celle des techniques de bas niveau et elles sont capables de détecter, interpréter (association à un mode) et diagnostiquer les défaillances (**Figure II.05**).

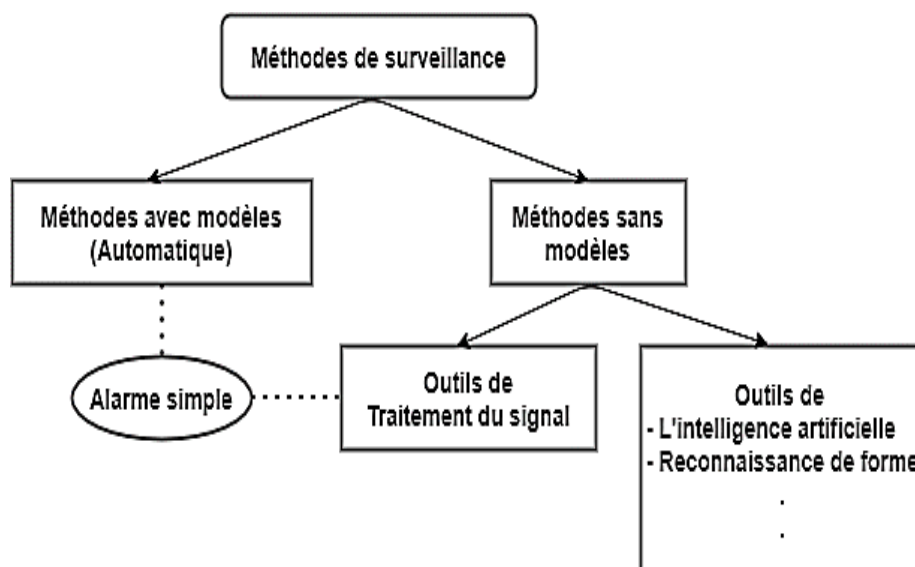


Figure II.05 : Classification des méthodes de surveillance [47]. Daniel Racoceanu et al., 'Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique'. Université de Franche-Comté, 2006

Les méthodes de l'Automatique sont par nature proches du système surveillé, puisqu'elles travaillent directement à partir des données issues des capteurs ; elles sont ainsi principalement utilisées pour la génération d'alarmes.

Les méthodes de l'Intelligence Artificielle sont, elles, plus tournées vers la communication avec l'opérateur et se focalisent sur la transformation d'un ensemble d'informations brutes et non reliées entre elles en une information interprétable directement par l'opérateur chargé de la conduite ; elles sont donc utilisées pour l'interprétation des alarmes et l'aide à la décision [48]. Basseville, M. et M-O. Cordier., 'Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques : approche complémentaire du traitement de signal et de l'intelligence artificielle'. Rapport INRIA, N°2861. 1996

D'autres réflexions sur la complémentarité entre ces deux domaines peuvent être trouvées dans [59] Lefebvre, D., et al., 'Contribution à la modélisation des systèmes dynamiques à événements discrets pour la commande et la surveillance', Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Franche Comté/ IUT Belfort – Montbéliard - 2 Mar 2006.

On peut citer également quelques travaux où les deux techniques Automatique/Intelligence Artificielle ont été conjointement utilisées : [60] Villemeur, A., et al., 'Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Edition Eyrolles', Collection DER-EDF, Volume 67 - parution le 01/09/1988 .

[62] Toguyeni, A.K.A., et al., "Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière", Thèse de doctorat, Université de Lille – 1998.

Compte tenu de la complexité de la tâche de diagnostic, de nombreuses méthodes existent pour réaliser un diagnostic faisant appel à des techniques variées.

La partie suivante s'attache à fournir une classification des méthodes de surveillance, en prenant en compte plus particulièrement les critères associés au diagnostic [47] Daniel Racoceanu et al., 'Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique'. Université de Franche-Comté, 2006.

[58] Combastel, C. et al., 'Méthodes d'aide à la décision pour la détection et la localisation de défauts dans les entraînements électriques', Thèse de Doctorat INPG, Grenoble - 17 Dec 2007.

II.3.1. Méthodes de surveillance avec modèle :

La catégorie de méthodes la plus utilisée par les industriels à l'heure actuelle est vraisemblablement celle des méthodes par modélisation fonctionnelle et matérielle.

II.3.1.1. Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle

Le principe de ces méthodes consiste à établir les liens entre les causes initiales des défaillances et leurs effets mesurables.

Les méthodes les plus couramment rencontrées sont l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité (AMDEC) et les Arbres De Défaillances (ADD).

Une autre catégorie de méthodes avec modèles est représentée par les méthodes basées sur une modélisation physique des processus surveillés.

II.3.1.2. Méthodes de surveillance par modélisation physique

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle [63] Zwingelstein, G. 'Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels'. Editions Hermès 1995.

Tout écart est alors synonyme d'une défaillance.

Les outils de la théorie de la décision sont ensuite utilisés pour déterminer si cet écart est dû à des aléas normaux, comme par exemple le bruit de mesure ou s'il traduit une défaillance du système.

Les méthodes avec modèle physique sont les méthodes les plus familières aux automaticiens. En règle générale, ces méthodes peuvent être séparées en deux techniques : techniques de redondance physique et analytique, et techniques d'estimation paramétrique, plus de détails, aux références suivantes : [53] Poulard, H. et al., 'Statistiques et réseaux de neurones pour un système de diagnostic', Application au diagnostic de pannes automobiles', Thèse de Doctorat, LAAS, Toulouse, France-1996. [64] Gertler, J.J., 'Survey of model-based failure detection and isolation in complexe systems'. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 8, N° 6, p. 3-11- January 1989 [66] Villemeur, A., et al., 'Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels'. Edition Eyrolles, Collection DER-EDF, Volume 67 – 1988.

II.3.2. Méthodes de surveillance sans modèle

Nombreuses sont les applications industrielles dont le modèle est difficile, voire impossible à obtenir suite à une complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production.

Pour ce type d'applications industrielles, les seules méthodes de surveillance opérationnelles sont celles sans modèle.

Deux solutions existent dans ce cas : surveillance avec des tests statistiques du traitement du signal et surveillance par intelligence artificielle. [67] Dash, S. et al., 'Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems'. Proceedings of the Conference on Process Systems Engineering Computing & Chemical Engineering, Keystone, Colorado, pp. 785-791 – 2000. [69] Katsillis, G., M.J. Chantler. 'Can dependency-based diagnosis cope with simultaneous equations?' Working notes of the 8th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'97, Mont-Saint-Michel, France – 1997.

On distingue donc parmi les modèles symboliques, les méthodes à base de modèles comportementaux, les méthodes de reconnaissance de formes et les méthodes à base de modèles explicatifs [47] Daniel Racoceanu et al., 'Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique'. Université de Franche-Comté, 2006.

II.3.2.1. Les méthodes à base de modèles comportementaux

Ces méthodes se caractérisent par la possibilité notamment de simuler le comportement du système, à partir d'une modélisation de son comportement.

Le plus souvent il s'agit de modèles "de bon fonctionnement" qui, contrairement aux modèles numériques, ne sont pas basés sur la physique du système mais sur une considération en termes de mode de fonctionnement.

Ces méthodes regroupent notamment des outils tels que les réseaux de Petri et les automates d'états finis et seront caractérisées par les termes modélisation/simulation.

II.3.2.2. Les méthodes de reconnaissance de formes

Ces méthodes regroupent les modèles associatifs et les méthodes de reconnaissances dans le sens où elles sont caractérisées par les termes apprentissage et reconnaissance qui s'appliquent aussi bien aux systèmes de reconnaissance de formes qu'aux systèmes à base de règles tels que les systèmes experts.

Dans ces méthodes, on retrouve principalement des outils tels que les méthodes statistiques de reconnaissance de formes, les réseaux neuronaux, la logique floue, les réseaux neuro-flous, les systèmes experts et le raisonnement à partir de cas.

II.3.3 Application de la surveillance sur les transformateurs

En raison de la nature complexe de la structure des transformateurs, la détermination de l'emplacement exact des défauts est une tâche difficile, en particulier l'identification des défauts mineurs impliquant une petite section de l'enroulement du transformateur.

Il a été rapporté dans [66] Villemeur, A., et al., 'Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels'. Edition Eyrolles, Collection DER-EDF, Volume 67 – 1988. que le modèle non stationnaire inhérent de formes d'onde de courant de transformateur dans différentes conditions de défaut peut être efficacement classifié en utilisant la fonction de sélection de fréquence de la transformée en ondelettes.

D'autres techniques comme la classification floue [67]. Dash, S. et al., 'Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems'. Proceedings of the Conference on Process Systems Engineering Computing & Chemical Engineering, Keystone, Colorado, pp. 785-791 – 2000.

[68] Dubois, D. et S. Gentil., 'Intelligence Artificielle et Automatique', Revue d'Intelligence Artificielle, Vol. 8, N°1, pp. 7-27 – 2005. et dans [69]. Katsillis, G., M.J. Chantler. 'Can dependency-based diagnosis cope with simultaneous equations?' Working notes of the 8th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'97, Mont-Saint-Michel, France – 1997, les réponses des enroulements du transformateur ont été décomposées en composants basse et haute fréquence à l'aide d'une transformée en ondelettes discrète et les caractéristiques du domaine temps-fréquence ont été extraites des composants décomposés, qui ont ensuite été analysées à l'aide de la classification de motif, à savoir Support Vector Machine (SVM), pour l'identification des défauts à moins de 10% de la longueur d'enroulement car il a une signification pratique plus élevée.

Pour rendre possible une telle analyse de défaut affinée, une nouvelle technique de modélisation basée sur le domaine temps-fréquence pour les transformateurs a également été proposée dans [70] Frank, P.M. et al., 'Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy'. *Asurvey and New Results, Automatica*, Vol. 26, pp. 459-474 - Volume 26, Issue 3, May 1990, Pages 459-474 .

Des techniques raffinées telles que l'analyse fractale assistée par SVM [71] Ploix, S. et C. Follot., 'Fault Diagnosis reasoning for set-membership approaches and application', *IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC)*, Mexico City, Mexique.2012 et l'approche granulaire grossière utilisant la transformée en ondelettes croisées [72] Tromp, L., et al., 'Surveillance et diagnostic de systèmes industriels complexes : une approche hybride numérique/symbolique', Thèse de doctorat, Université de Rennes 1 – 1997. ont également été utilisées pour l'analyse des défauts d'impulsion du transformateur.

Cependant, toutes les études susmentionnées étaient basées sur une défaillance d'isolement statique, c'est-à-dire les défauts qui n'évoluent pas avec la propagation de l'onde de tension impulsionnelle.

En raison de l'avancement des techniques de fabrication, la probabilité d'occurrence de défaillance de l'isolation statique pendant les essais d'impulsion est devenue plus faible et la majorité des défaillances qui peuvent survenir sont de nature dynamique, c'est-à-dire les défauts qui surviennent le long de l'enroulement en raison de la propagation de la tension impulsionnelle.

Dans un article récent [73] Zemouri, R., 'Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance', Thèse de Doctorat, Université de Franche Comté, Besançon -2003, le réseau d'ondelettes a été utilisé pour identifier les défauts dynamiques dans les transformateurs sous excitation impulsionnelle en utilisant les caractéristiques extraites de la séquence de corrélation croisée des courants d'enroulement.

Bien que plusieurs méthodes aient été proposées pour l'identification des défauts impulsions dans les transformateurs, l'identification précise des caractéristiques des défauts reste un problème ouvert en raison de la structure complexe du système d'isolation composite dans les transformateurs.

II.3.4 Choix de la méthode de surveillance appropriée

La première question à se poser quant au choix d'une méthode de surveillance est la suivante : que savons-nous sur le système où apparaissent des défaillances ?

Et plus exactement, possédons-nous un modèle permettant de connaître l'évolution de ce système?

En fonction de la réponse, nous pourrions nous diriger vers l'une des deux familles de surveillance : les méthodes avec modèles ou les méthodes sans modèles.

Sur la base de la classification déjà étudiée et compte tenu de l'importance accordée à la détection autonome des défaillances/dégradations, nos études se positionnent essentiellement dans le cadre de la surveillance proactive, nous avons fait le choix donc de la méthode à base de modèle physique.

Cette méthode de l'automatique est par nature proche du système surveillé, puisqu'elle travaille directement à partir des données issues des capteurs et des mesures ; elle est ainsi principalement utilisée pour la génération d'alarmes.

Avec des applications et des développements effectués en évoluant vers la création d'un système de télésurveillance embarqué.

Après avoir sélectionné la méthode de surveillance, il est essentiel de choisir une méthode de diagnostic appropriée et facile à mettre en œuvre.

II.4. Analyse de défaillances et choix de la partie du transformateur à surveiller :

Afin de sélectionner la partie du transformateur à surveiller, nous avons fait appel à un précieux travail d'analyse réalisé par Tenbohlen et al [44] S. Tenbohlen, et al., 'ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMER RELIABILITY XVII' International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.

II.4.1 Analyse de l'emplacement des pannes :

Les pannes majeures proviennent de plusieurs composants du transformateur.

Le changeur de prises et les enroulements sont avec un tiers chacun, et ce sont les principales raisons des pannes majeures. Les traversées, les sorties de plomb et le noyau sont répertoriés avec un pourcentage mineur comme raison des pannes majeures [45] A. Bossi, et al., 'An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service' – Final report of CIGRE Working Group 12.05, Electra, No.88, pp. 22 – 48,1983 (Figure II.6) .

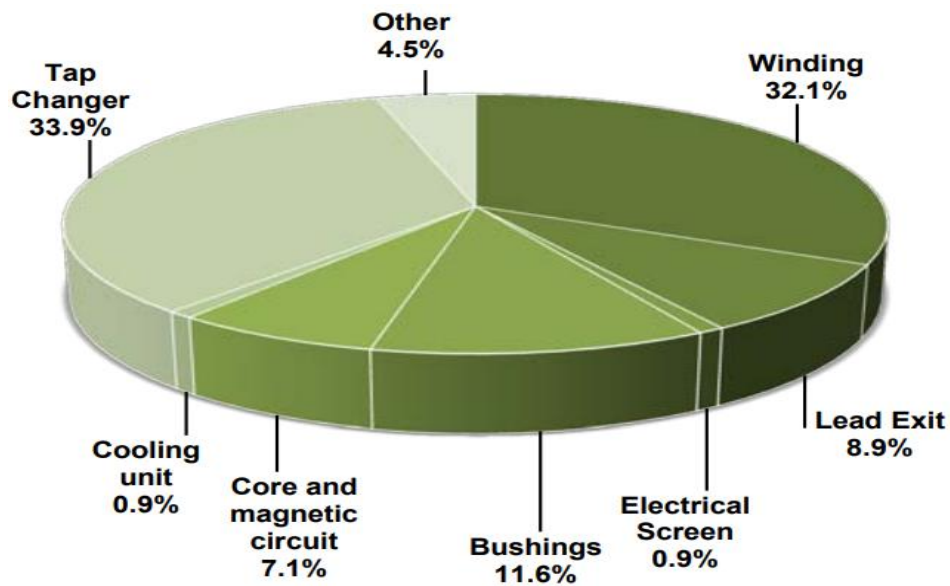


Figure II.6 : Analyse de l'emplacement des pannes basée sur 112 pannes majeures [44]

II.4.2 Analyse des modes de défaillance :

Des informations sur le mode de défaillance ont également été collectées dans le questionnaire qui décrit la nature de la défaillance illustrant ce qui s'est réellement passé lors de la défaillance.

Les définitions des modes de défaillance sont conformes à [46] CIGRÉ Brochure., 'Life Management Techniques for Power Transformers', No. 227, June 2003.

Une panne électrique signifie un circuit ouvert, un court-circuit, un mauvais contact, une détérioration de la terre, un potentiel flottant.

Il n'y a pas de mode de défaillance unique.

Les catégories diélectrique et électrique sont avec 27% chacune les plus dominantes (Figure II.7).

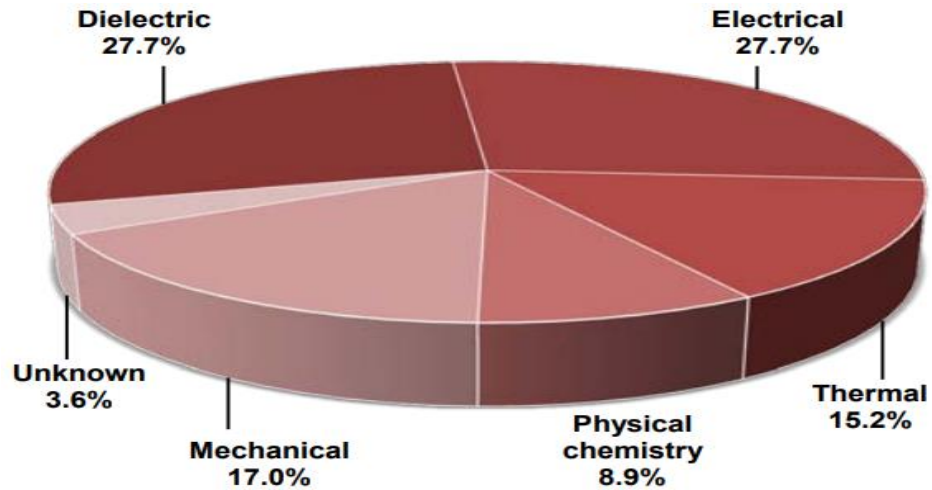


Figure II.7 : Analyse des modes de défaillance basée sur 112 défaillances majeures [44] S. Tenbohlen, et al., ‘ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMER RELIABILITY XVII’ International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011

II.4.3 Analyse des causes de défaillance :

Les circonstances de la conception, de la fabrication ou de l'exploitation qui ont conduit à l'échec sont analysées. Parce qu'il est assez difficile de déterminer la cause première d'un échec, 25% sont des causes inconnues. Parmi les différentes causes de défaillance du vieillissement du transformateur est avec une contribution de 17,9% la plus mentionnée (Figure II.8).

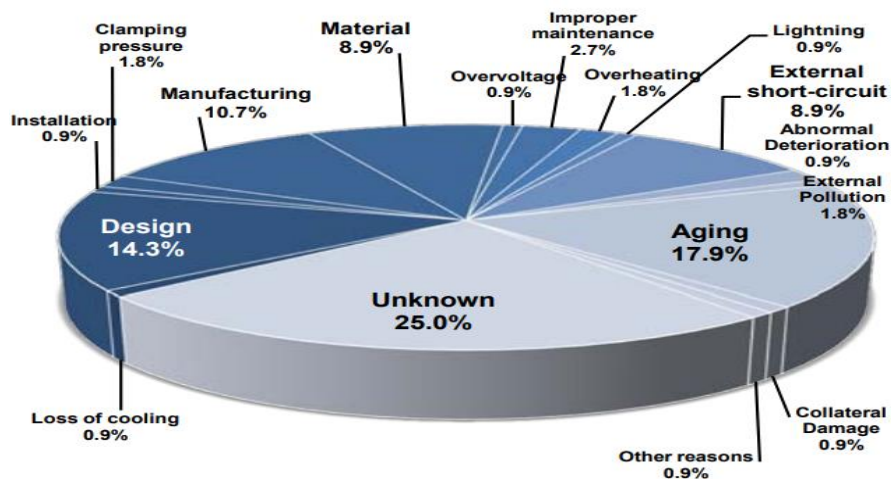


Figure II.8 : Analyse des causes de défaillance basée sur 112 défaillances majeures [44]. S. Tenbohlen, et al., ‘ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMER RELIABILITY XVII’ International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011

En remarque que la conception et la fabrication sont souvent mentionnées comme une cause de défaillance.

L'impact de cette cause n'apparaît sur le transformateur qu'après plusieurs années d'exploitation.

La foudre et la surtension sont presque négligeables comme cause de panne. Une explication est que presque tous les transformateurs sont protégés par des parafoudres.

II.4.4 Analyse des effets externes :

Les différents effets externes causons des pannes du transformateur sont indiqués sur la (Figure II.9).

La plupart des défaillances majeures n'entraînent pas d'effets externes (88,4%).

Certains autres effets externes détectés dans certains cas sont « Incendie et explosion » avec 6,3% et avec 2,7% respectivement.

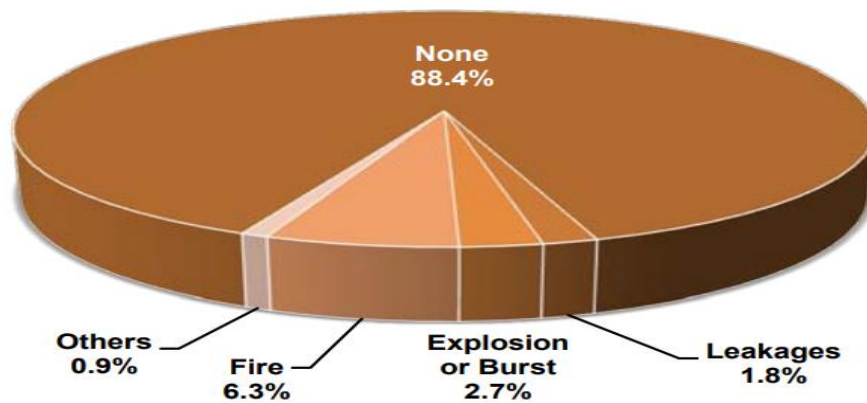


Figure II.9: Analyse des effets externes des pannes majeures de 112 transformateurs [44] S. Tenbohlen, et al., 'ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMER RELIABILITY XVII' International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011

Les (Figure II.10 et II.11) montrent l'emplacement de défaillance des transformateurs mis au rebut et réparés respectivement.

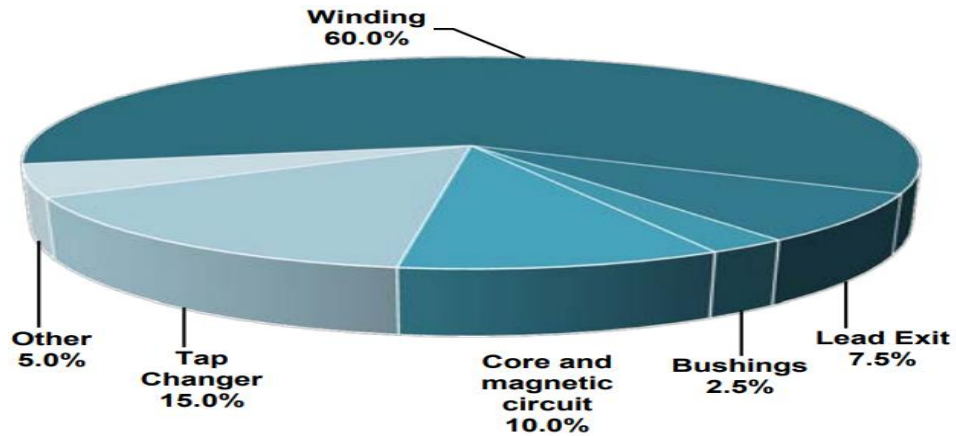


Figure II.10 : Analyse de l'emplacement des pannes de 40 transformateurs mis au rebut [44]

En raison de l'impact des défaillances d'enroulement, cela conduit normalement à une situation où le transformateur défaillant est mis au rebut.

D'autre part, les défaillances du changeur de prises et des traversées sont normalement réparées.

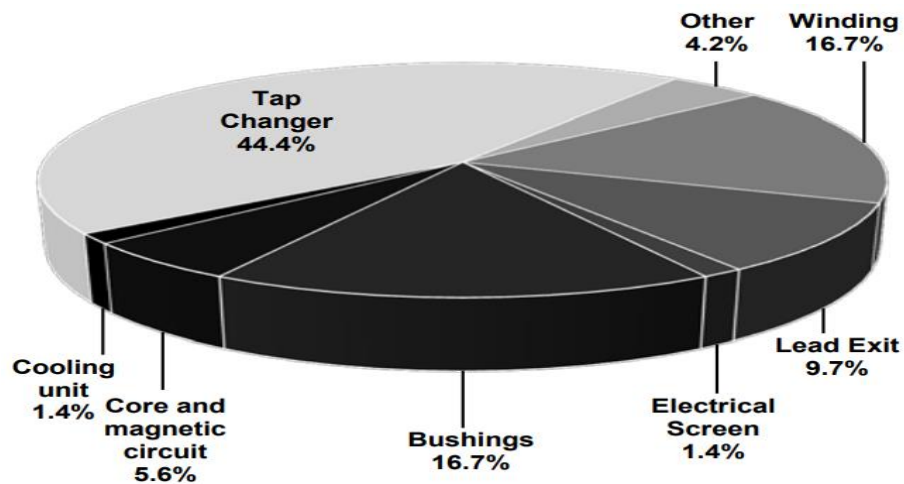


Figure II.11 : Analyse de l'emplacement des pannes de 72 transformateurs réparés [44] S.

Tenbohlen, et al., 'ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMER RELIABILITY XVII' International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011

II.4.5 Choix de la partie du transformateur à surveiller :

D'après l'analyse réalisé précédemment, les données de défaillance des transformateurs peuvent être analysées et interprétées pour divers types de transformateurs en termes de lieux de défaillance, de causes de défaillance, de modes de défaillance, d'effets externes et de taux de défaillance des transformateurs.

Les anomalies de changeur de prises et les enroulements sont les principales raisons des pannes majeures.

En plus, les pannes d'enroulement conduisent généralement à la mise au rebut du transformateur, tandis que, les pannes du changeur de prises et des traversées sont principalement réparées.

Pour cette raison, et comme le taux de défaillance des enroulements est relativement élevé, nous avons choisi de travailler sur la surveillance et le diagnostic des enroulements du transformateur.

Ces derniers relèvent de la catégorie de défaillance interne du transformateur, ils nécessitent une méthode de surveillance non invasive et non destructive, c'est l'objet principal de ce travail de recherche.

II.5.Méthodes de diagnostic de l'état des transformateurs :

La panne d'un transformateur peut entraîner l'effondrement partiel ou total d'un système électrique.

Il existe différentes techniques pour la maintenance et le diagnostic de tels équipements. Sept des principales techniques de diagnostic des transformateurs sont brièvement présentées ci-dessous.

Nous avons également décrit leurs principales caractéristiques, leur développement évolutif et en se concentrant sur les techniques à fort potentiel d'application en ligne et en télésurveillance.

II.5.1 Méthodes de diagnostic et choix approprié de la méthode utilisée

Afin de choisir la méthode de diagnostic appropriée, nous avons fait appel à un précieux examen critique réalisé en 2019 par Juan David et [74] Juan David Zorrilla Henao et al, 'Techniques de diagnostic des transformateurs de puissance : un examen critique' Université de la Vallée. Faculté d'ingénierie. Cali, Colombie <http://dx.doi.org/10.4067/S0718> - 2019.

Dans ce travail, un examen critique des principales techniques de diagnostic utilisées dans les transformateurs de puissance est effectué, décrivant leurs principales caractéristiques, leur développement évolutif, avec une analyse comparative de celles-ci.

II.5.1.1 Technique d'analyse des gaz dissous (DGA)

Le transformateur étant soumis à des contraintes électriques et mécaniques, des gaz sont générés qui sont le résultat de la décomposition des matériaux isolants, du papier et de l'huile, provoquant des changements immédiats et observables pouvant même déterminer des défauts en cours d'évolution.

La technique d'analyse des gaz dissous est une méthode qui vise à analyser les gaz générés par les pannes naissantes dans les transformateurs immergés dans l'huile.

L'analyse des gaz dissous a commencé en 1960 et est largement utilisée dans le monde pour détecter les pannes dans les transformateurs, différentes techniques d'interprétation apparaissent comme Duval Technique (1974) et Rogers (1978) [75] M. Duval. 'Un examen des défauts détectables par l'analyse du gaz dans l'huile dans les transformateurs'. Magazine d'isolation électrique IEEE. Vol.18, numéro 3, p. 8-17. 2002. DOI : 10.1109 / MEI.2002.1014963. Pour l'année 1991, l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE) publie la norme C57.104 avec sa dernière révision en 2008 .

En 1999, la Commission électrotechnique internationale (CEI) publie son guide d'interprétation des gaz dissous appelé CEI 60599 avec quelques améliorations publiées en 2007 et la dernière révision officielle en 2015.

II.5.1.2 Analyse de Réponse en Fréquence (FRA) :

La méthode d'analyse de réponse en fréquence est essentiellement utilisée pour vérifier l'intégrité mécanique des noyaux, des enroulements et des cadres de pression des transformateurs de puissance.

Il consiste à mesurer la relation entre le signal de réponse d'un transformateur à un stimulus, pour une large gamme de fréquences et la comparaison avec des mesures de référence ou d'usine [76] JR Secue, EE Mombello et CV Cardoso. 'Examen de l'analyse de réponse de fréquence de balayage SFRA pour les déplacements et la déformation d'enroulement d'évaluation dans les transformateurs de puissance'. Transaction IEEE en Amérique latine. Vol.5, numéro 5, p. 321-328. 2007. DOI : 10.1109 / TLA.2007.437852.

La mesure peut être effectuée avec 3 méthodes différentes : IFRA (Impulse Frequency Response Analysis) une impulsion de tension est injectée dans les enroulements, SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) un balayage de fréquence est effectué à l'aide d'un signal de tension sinusoïdal ou les signaux PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) avec des algorithmes déterministes et aléatoires sont utilisés pour générer les spectres de fréquence.

Ce test de réponse en fréquence a pour méthodologie, de mesurer l'amplitude de l'impédance, l'admittance et les amplitudes de courant dans les enroulements du transformateur dans une gamme de fréquences généralement comprise entre 20 Hz et 5 MHz.

La mesure des transformateurs en bon état ou de fabrication récente peut fournir une sorte d'empreinte digitale ou de schéma de référence, avec lesquels l'équipement sera comparé, après l'apparition d'un défaut ou d'un événement qui aurait pu l'endommager.

Les réglementations relatives à la FRA ont été diffusées par le biais d'institutions telles que la CEI, l'ICS 24 et le CIGRÉ 25 [74] Juan David Zorrilla Henao et al, 'Techniques de diagnostic des transformateurs de puissance : un examen critique' Université de la Vallée. Faculté d'ingénierie. Cali, Colombie <http://dx.doi.org/10.4067/S0718> - 2019.

II.5.1.3 Mesure des Courants de Polarisation et de Gé-polarisation (PDC)

L'analyse PDC est une méthode d'essai diélectrique non invasive et non destructive utilisée pour déterminer la conductivité et la teneur en humidité des matériaux isolants dans un transformateur.

La mesure PDC est effectuée en appliquant une tension continue à travers l'objet tester pendant un certain temps, dans une plage pouvant aller de 5 minutes à 3 heures selon le nombre de points de prélèvement à prélever pendant le test.

Ensuite, la source de tension continue est déconnectée et l'objet de test est court-circuité [74].

II.5.1.4 Spectroscopie du Domaine de Fréquence (FDS)

La méthode de diagnostic FDS est d'un type non invasif qui est responsable de l'évaluation de l'état de l'isolation huile-papier dans le transformateur, sur la base de l'application d'une tension sinusoïdale aux bornes de l'objet à tester, mesurant l'amplitude et la phase du courant de réponse traversant l'isolant afin de déterminer les paramètres capacitifs du système isolant.

Généralement, ce test est accompagné de PDC en raison des plages de fréquences gérées par les deux, PDC pour les basses fréquences et FDS pour les hautes fréquences et il permet de détecter les défauts tels que les pertes, la capacité et le niveau d'humidité dans l'isolant cellulosique.

Elle peut également être considérée comme une extension des mesures du facteur de dissipation ($\tan\delta$) effectuées à la fréquence nominale.

La brochure CIGRÉ 414 et d'autres manuels sont un guide qui explique l'interprétation de FDS.

De plus, cette méthode est réalisée dans les limites prévues par les normes internationales telles que la CEI 61620 [74].

II.5.1.5 Mesure de la Tension de Récupération (RVM)

En technique RVM, la fonction principale est de déterminer l'état de l'isolation huile-papier d'un transformateur.

Il s'agit généralement d'un test qui peut être complémentaire du test PDC ou FDS.

Lorsqu'une tension continue est appliquée à l'isolant, les molécules sont polarisées et orientées dans la direction du champ électrique.

L'interrupteur de source CC est ensuite ouvert et un second interrupteur est fermé, permettant un court-circuit entre les bornes de l'isolant testé pendant une courte période (généralement la moitié du temps de charge) dépolarisant partiellement les molécules.

Enfin, la troisième et dernière étape se produit lorsque le court-circuit est ouvert, où une tension apparaît aux bornes d'isolement en raison de la charge restante.

Il s'agit de la tension de récupération et dépend fortement de l'humidité du système huile-papier du transformateur [74].

II.5.1.6 Analyse des Furanes et Degré de Polymérisation

L'isolation solide du transformateur est en papier composé de fibres de cellulose.

Ce dernier est un polymère formé, à son tour, de molécules de glucose.

La chaîne polymère moyenne a une longueur de 1 000 à 1 200 molécules de glucose lorsque le papier est neuf, avant son installation dans le transformateur et son séchage en usine ; Une fois ce processus effectué, le papier déjà installé dans le transformateur contient entre 800 et 1000 molécules de glucose.

La longueur moyenne de la chaîne cellulosique est appelée degré de polymérisation du papier (DP pour son acronyme en anglais).

En vieillissant il y a une décomposition progressive de ces chaînes et donc une diminution de la rigidité mécanique du papier, cela peut provoquer des pannes à l'intérieur du transformateur.

De plus, au cours de ce processus, la molécule de glucose se modifie, formant des anneaux de furane, qui ont tendance à migrer vers l'huile et à haute température forment divers composés chimiques associés à des phénomènes thermiques, électriques ou mécaniques dans le transformateur.

Le changement de la teneur en furane est le paramètre le plus important pour déterminer s'il existe la possibilité d'une défaillance qui mérite l'attention [74].

II.5.1.7 Méthode Thermographique (IRT)

Il s'agit d'une méthode réalisée principalement par un outil appelé thermographe infrarouge (IRT-Infrared Thermograph), de nature non invasive qui permet de déterminer la condition de température, et donc de réaliser un diagnostic thermique externe (surcharge, points chauds dans les traversées ou les connexions, etc.) d'un transformateur.

Au moyen de la thermographie, les défaillances peuvent être détectées à leur stade précoce telles que l'oxydation d'interrupteurs haute tension, des connexions surchauffées, des défauts d'isolation, des points chauds dans les traversées, des surcharges, etc. la thermographie permet de localiser le problème et d'en établir la gravité [74].

II.5.1.8 Emissions Acoustiques (E A)

Le procédé consiste en la mesure des niveaux d'intensité sonore, c'est-à-dire la détection d'ondes élastiques produites par l'apparition ou la croissance d'un défaut dans un matériau et la conversion de ces ondes en signaux électriques.

Pour cela, des capteurs basés sur des transducteurs piézoélectriques sont utilisés, connectés directement au transformateur.

L'instrumentation des émissions acoustiques (EA) doit fournir une mesure de la quantité totale d'émission découverte pour effectuer des corrélations et déterminer les défauts.

Cette méthode s'applique aux mesures en usine (hors ligne) et sur le site où le transformateur est installé (en ligne).

Généralement, les émissions sonores issues des transformateurs proviennent de trois types de sources : du noyau dû à la magnétostriction, du courant circulant dans les enroulements en présence d'un champ magnétique et des équipements externes (ventilateurs, pompes de recirculation et échangeurs de chaleur).

D'autres causes peuvent également entraîner des bruits anormaux tels que des décharges statiques, des résonances, des défauts de structure ou des contraintes de court-circuit lors de pannes [74].

II.5.2 Analyse comparative des techniques de diagnostic

Afin d'analyser les techniques de diagnostic présentées précédemment, sur la base de certains critères permettant d'établir une brève analyse qualitative et quantitative en fonction des principales caractéristiques exposées.

Ces critères sont décrits ci-dessous :

- **Applicabilité** : se réfère uniquement au fait que le test est actuellement administré « en ligne » ou « hors ligne ».
- **Type de pannes détectables** : il mentionne la nature générique des pannes qui peuvent être détectées par l'application de base du test.
- **Normes techniques et standards internationaux** : il repose sur les réglementations les plus significatives autour du test en question, sans pour autant dire qu'il soit exhaustif, c'est-à-dire qu'il peut exister d'autres normes autour du test à l'étude.
- **Type d'accès à l'échantillon ou à la mesure** : il repose sur la nécessité d'ouvrir ou de désarmer le transformateur par le test à effectuer (invasif ou non invasif) et si son application se situe directement sur l'élément à analyser ou il nécessite de prélever des échantillons à analyser en laboratoire (par exemple, les tests physico-chimiques de l'huile du transformateur).
- **Temps d'exécution moyen requis** : il ne s'agit que d'un temps de référence qui découle des exemples et cas présentés dans les références bibliographiques qui décrivent chacune des techniques de diagnostic à comparer.
- **Tests complémentaires** : il se réfère à lui-même uniquement avec le test en question, il y a un résultat concluant de l'élément à analyser du transformateur, ou au contraire, il est recommandé de compléter ou de comparer le test avec d'autres techniques de diagnostic.
- **Équipement d'application de test typique** : il met en évidence, en plus des transformateurs, à quel autre équipement le test en question peut généralement être appliqué.

Chacune des techniques étudiées présente des caractéristiques spécifiques qui la conduisent à être appliquée en fonction du type d'étude requis.

Cependant, si certaines caractéristiques peuvent être trouvées entre les tests, cela peut contribuer à un facteur différentiel dans le choix de la même chose.

Par exemple, seuls quatre d'entre eux ont été appliqués avec succès « en ligne » (DGA, IRT, EA et FRA). Les autres techniques nécessitent toujours la mise hors tension du transformateur, devenant un facteur critique et obligeant les processus de production ou de transmission d'énergie à être suspendus pendant un temps considérable.

L'existence d'un modèle de l'enroulement de transformateur lorsqu'il est en bon état de fonctionnement conditionne l'approche du diagnostic à base de modèles.

II.5.3 Choix de la méthode de diagnostic approprié :

Les facteurs qui peuvent être d'un grand intérêt pour les processus de maintenance et de gestion de transformateur sont l'applicabilité, la fiabilité et le temps d'exécution.

Le choix de l'application d'une approche de diagnostic dépendra de certaines spécificités du transformateur et de la disponibilité d'un ensemble d'informations.

Il est important de noter qu'en fonction de la partie du transformateur à diagnostiquée qui est l'enroulement, ainsi que du type de panne que nous souhaitons trouver quelle est la déformation géométrique de l'enroulement, nous disposerons également la seule technique de diagnostic la plus adaptée que les autres est la FRA.

L'application de l'analyse de réponse en fréquence comme technique de diagnostic des transformateurs se justifie par des études expérimentales récentes montrent qu'elle peut détecter des changements dans l'état de l'isolation, dans les composants non actifs du transformateur tels que la traversée et le réservoir, et les changements dans les enroulements comme mentionné ci-dessus.

Pour cette raison, ces dernières années des études intensifiées sur l'analyse de la réponse en fréquence en tant que méthode de diagnostic très sensible pour détecter les changements mineurs dans les enroulements des transformateurs.

Conclusion :

La surveillance des transformateurs est généralement faite avec des paramètres externes comme la mesure de la température, du courant, de la tension et du niveau d'huile, ...etc. Notre travail est basé sur la surveillance de la partie active du transformateur qui est l'enroulement, en utilisant l'analyse de la réponse fréquentielle FRA. Ce chapitre traite et analyse :

- **Les méthodes de surveillance**, pour sélectionner le type de surveillance avec modèle physique comme la méthode appropriée.

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le transformateur aux informations fournies par le modèle.

Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, sont les méthodes les plus familières aux automaticiens.

- **Les analyses de défaillances des transformateurs**, afin de choisir les enroulements comme la partie à surveiller

- **Les méthodes de diagnostic** de l'état des transformateurs, ainsi une étude comparative est montrée dans le but de choisir la FRA pour diagnostiquer l'état des enroulements des transformateurs, à cause de sa sensibilité et de sa capacité de détecter les variations mineures dans la structure des transformateurs.

Chapitre III

La Méthodes Analyse de la Réponse Fréquentielle FRA

Introduction :

Le diagnostic efficace d'un transformateur de puissance repose sur l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) de leurs enroulements.

Le circuit équivalent de l'enroulement d'un transformateur inclut la résistance et l'inductance d'une bobine ainsi que des capacités parasites entre les bobines adjacentes et entre l'enroulement et la paroi de la cuve. La réponse en fréquence de l'enroulement est par conséquent une caractéristique propre à chaque enroulement de transformateur.

Les déformations mécaniques des enroulements provoquent des modifications du circuit équivalent [3].

En mesurant la réponse en fréquence des enroulements du transformateur sur une large plage de fréquences, il est possible de déceler les défauts présents dans l'enroulement et dans le noyau magnétique du transformateur [3] **Muhammad Azizi Abdul Rahman; Halimatun Hashim; P.S. Ghosh « FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS OF A POWER TRANSFORMER ». Electrical Engineering Department, College of Engineering, University Tenaga Nasional. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2018 Vol. 3, Issue 2, ISSN No. 2455-2143, Pages 16-20 Published Online June 2018 in IJEAST (<http://www.ijeast.com>).**

III.1.Définition :

L'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil qui peut donner une indication de mouvement de noyau ou d'enroulement dans les transformateurs. Ceci est fait en effectuant une mesure simple, tout en regardant à quel point un enroulement de transformateur peut transmettre un signal de basse tension qui varie en fréquence. Tout cela est lié à son impédance, dont les éléments capacitifs et inductifs sont intimement distribués dans la construction physique du transformateur.

Les changements de la réponse en fréquence mesurée par des techniques FRA peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être ensuite identifiée et analysée [34] Charles Sweetser, B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail, 'Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering' Version 1.0, 01/2003.

III.2.Quand faut-il faire un test FRA?

Les applications typiques de la mesure de la FRA sont [6] Omicron electronics 'FRAnalyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006 ,[35]Megger 'FRAX 101 Analyzeur de réponse de la fréquence de balayage' FRAX101_DS_fr_V01- 2023.

- contrôle du transformateur après le test en court-circuit ;
- vérification de l'intégrité des transformateurs après un transport ;
- évaluation de l'état d'un transformateur ayant été soumise à des courants de défaut transitoires élevés ;
- mesures de diagnostic de routine ;
- diagnostic consécutif à une alarme du transformateur ou un déclenchement de protection ;
- test consécutif à des changements significatifs des valeurs contrôlées en ligne (ex : gaz dissous) ;
- inspection approfondie consécutive à l'observation de résultats de tests inhabituels ;
- Après un séisme ;
- Recherches scientifiques ;

III.3.Détection de défaut par FRA:

L'approche FRA est capable de détecter un certain nombre d'état de défauts, à la fois mécanique et électrique.

Le principal rôle de FRA est de détecter des défauts mécaniques, qui ne peuvent être détectés par d'autres mesures. Les principaux défauts détectés par FRA sont :

- la Déformation d'un enroulement (axiale et radiale).
- L'Effondrement partiel d'un enroulement.
- Mouvement du circuit magnétique.
- Rupture de spires et desserrage de l'enroulement de la culasse.
- Court-circuit ou circuit ouvert d'enroulement.
- Mauvaise connexion de prise de terre de la cuve du transformateur.
- Problèmes de connexion interne.

Cependant, La mesure par FRA est souvent la seule méthode qui peut détecter les mouvements axiaux d'enroulements.

Elle détecte également les mouvements radiaux, qui peuvent être aussi vérifiés par les essais de réactance de fuite.

Il est utile de mettre en corrélation les deux méthodes pour augmenter la précision du résultat.

Cela est également vrai pour les autres défauts, notamment mécanique [36] Bergman, C. 'SFRA-an application that creates customer value?' Thesis Department Electrical Engineering Sweden, 2006.

III.4.Principe du test FRA :

Dans le cas où un enroulement subit une déformation, les paramètres de l'inductance distribuée et de la capacité de l'enroulement change inévitablement, ce qui conduit à un changement de la courbe de l'impédance (**Figure III.1**).

Pour détecter la déformation de l'enroulement du transformateur par la méthode d'analyse de la réponse en fréquence, la caractéristique de réponse en fréquence d'amplitude de l'enroulement de transformateur doit être testée, la comparaison des résultats d'essai doit être effectuée et, enfin, de juger de la déformation géométrique des enroulements en fonction des différences qui apparaissent dans la courbe de l'impédance en fonction de la fréquence (**Figure III.1**).

Le test FRA est obtenu en utilisant la méthode du balayage de fréquences. En changeant continuellement la fréquence de l'onde sinusoïdale de l'alimentation, le rapport de l'amplitude du signal de sortie par rapport au signal d'entrée pour les différentes fréquences est mesuré. La courbe de réponse en fréquence d'amplitude de l'enroulement obtenue est généralement représentée sur un graphique logarithmique comme le montre la (**Figure III.1**).

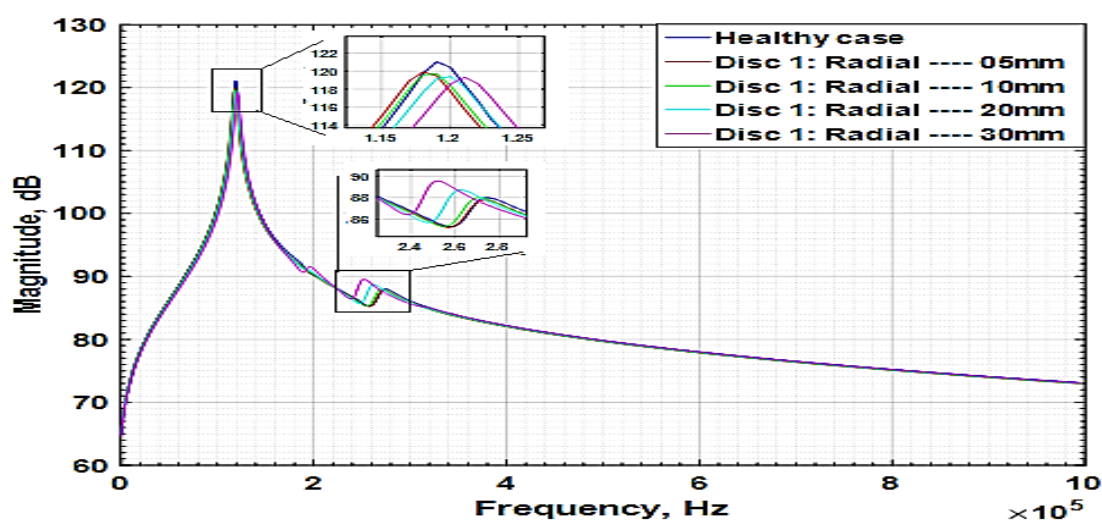


Figure III.1 : Réponses en fréquence mesurées avec défauts radiaux [121] Mukherjee, P., Satish, L., 'Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding an analytical approach'. IEEE Trans. Power Deliv. 27, 963–70 (2012).

III.4.1.Application :

Il existe deux catégories différentes pour l'application des mesures de réponse en fréquences : en usine et sur le terrain.

Dans les deux cas, les procédures et précautions pour générer une bonne mesure sont les mêmes.

Cependant, il existe une différence dans la motivation des tests dans chaque catégorie [100] MELO, Leonardo. 'Application de techniques statistiques au test d'analyse de la réponse en fréquence dans les transformateurs de puissance'. Université nationale de technologie, Argentine, 2012, p. 33-56 :

Application en usine : Il y a deux raisons pour générer des mesures de réponse en fréquence dans un environnement d'usine :

- Garantie de qualité ;
- Base de référence avant le transport ;

Application sur le terrain :

Les deux raisons différentes qui génèrent la nécessité de réaliser l'essai sur le terrain sont :

- Déménagement de l'unité (après le transport depuis l'usine ou le déménagement de l'unité) ;
- Après un incident (foudre, défauts électriques, court-circuit, événement sismique, etc.).

III.4.2.FRA hors-ligne, en ligne et le choix du type de test approprié :

La déformation des enroulements n'est pas en général un phénomène à évolution rapide. Elle ne requiert donc pas une surveillance permanente.

Ainsi, il n'est pas nécessaire que la surveillance fonctionne en temps réel « On-line ». L'analyse de la réponse en fréquence, pour déterminer un indicateur de l'état de santé des enroulements, peut être réalisée de manière périodique intégrée dans une stratégie de maintenance globale.

Donc, dans notre cas, nous avons choisies de suivre et de diagnostiquer l'enroulement de transformateur périodiquement par une surveillance hors ligne (Off-line).

III.4.3. Types de connexions FRA :

Pour effectuer une mesure FRA, une tension (fréquence variable) est fournie à une borne du transformateur. La tension mesurée à la borne d'entrée est utilisée comme référence pour le calcul FRA.

Un deuxième paramètre (signal de retour) mesuré est généralement une tension prise à travers une deuxième borne du transformateur (qui peut également être un courant mesuré à la borne d'entrée ou à une autre borne de masse).

L'amplitude de la réponse FRA sera alors le rapport en décibels entre le signal de réponse et la tension source.

Les configurations de connexion suivantes pour de mesure FRA sont :

III.4.4. Circuit ouvert (End-to-End Open Circuit):

Dans le test en circuit ouvert, le signal de référence est injecté dans l'une des bornes des enroulements et la réponse est mesurée à l'autre borne de l'enroulement alors que toutes les autres bornes sont flottantes (**Figura III.2 a**).

Les résultats de cette connexion de mesure sont principalement influencés par les caractéristiques du noyau du transformateur, en particulier dans les basses fréquences. Par conséquent, il est utilisable pour l'évaluation de base [101] Cigré WG A2.26: 'Mechanical condition assessment of transformer windings: guidance, FRA standardization, further improvements', 2008. [102] Jayasinghe, J.A.S.B.; et al., 'Winding Movement in Power Transformers: A Comparison of FRA Measurement Connection Methods'. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2006, 13, 1342–1349

III.4.5. Court-circuit (End-to-End Short Circuit):

Ce test est effectué comme en circuit ouvert, mais le second enroulement de la même phase est court-circuité (**Figura III.2 b**), et il est également possible de court-circuiter tous les enroulements adjacents dans les transformateurs triphasés qui aident à avoir une meilleure symétrie.

L'effet principal du noyau du transformateur est supprimé dans ce type de connexion.

Par conséquent, le test de court-circuit est pratique pour évaluer exclusivement les enroulements [101-102].

III.4.6. Choix du type de connexion approprié :

Le type le plus courant est le test en circuit ouvert de bout en bout.

Ce type de test fournit des informations à la fois sur l'enroulement et le noyau.

Le test de court-circuit de bout en bout est normalement effectué pour des mesures sur site dans lesquelles seuls les problèmes dans la structure de l'enroulement doivent être identifiés.

En tant que nous choisissons dans le chapitre précédant de diagnostiquer l'enroulements de transformateur, le test de court-circuit est pratique pour l'évaluer exclusivement, ce qui justifie notre choix (**Figura III.2 b**).

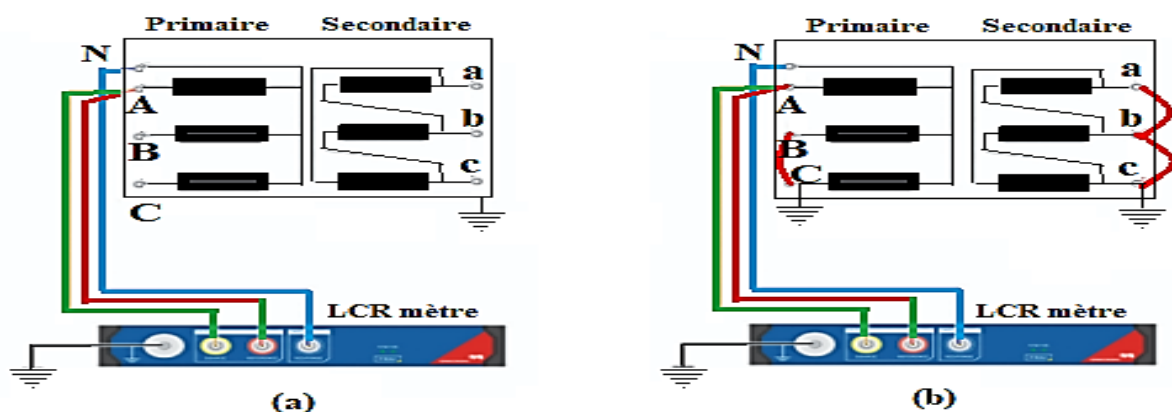


Figura III.2 : Type de connexion (a) Circuit ouverte, (b) Court-circuit

III.4.7. Schéma de principe du test FRA :

L'analyse de réponse en fréquence de balayage (FRA) se déroule en appliquant un signal sinusoïdal d'amplitude constante et de fréquence variable à une extrémité de l'enroulement testé.

La réponse variera en amplitude et en phase est mesurée à l'autre extrémité de l'enroulement (**Figura III.3**).

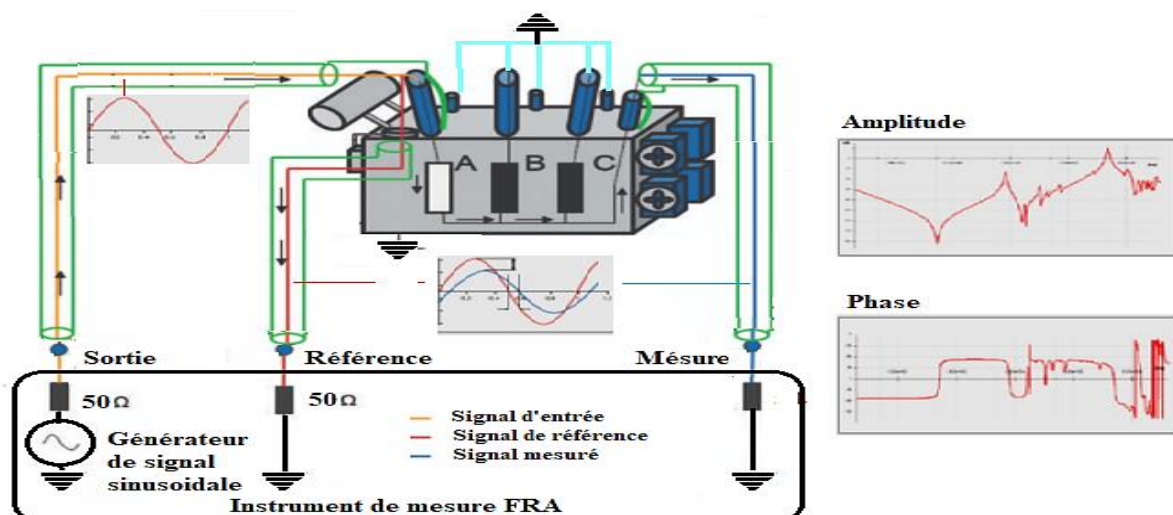


Figura III.3 : Schéma de principe de test FRA.

La configuration de mesure consiste principalement en un instrument de mesure FRA et des câbles de mesure.

Étant donné que les câbles ont également une capacité, ceux-ci doivent être mis à la terre.

De plus, l'utilisation de fils tressés simples réduira l'impact de l'effet de peau sur les résultats des tests, en particulier à très hautes fréquences.

Il existe un certain nombre de méthodes possibles pour présenter les résultats des mesures effectuées à l'aide de la méthode de réponse en fréquence.

Le plus répandu est de tracer un graphique de l'amplitude en fonction de la fréquence, utilisant des échelles linéaires et logarithmiques [103] S Ryder, S Tenbohlen: 'A comparison of the swept frequency and impulse response methods for making frequency response analysis measurements', Doble Conference, 2003.(Figure III.1 et III.7).

III.5. Stratégies de modélisation des transformateurs orientées FRA :

En 1915, la première représentation du transformateur est apparue, réalisée par Weed [77] Weed, J.M. "Abnormal Voltages in Transformers". A IEE Trans., Vol. 34, pt. II, 1915, pp. 2197 2236..

Par la suite, différents modèles avec différentes approches et applications ont été développés et présentés [78] M. Wang, et al., 'Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range'. Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, no. 3, pp. 1930–1938, 2005.

[80] Xiaozhen Zhao, et al., 'High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies' International Journal of Electrical Power & Energy Systems doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.010.

L'obtention d'un modèle de transformateur dans une large bande de fréquence est une tâche qui peut conduire à des inefficacités dans la simulation ou à des problèmes dans le calcul des paramètres dus aux complexités des données nécessaires.

Pour la modélisation des transformateurs, il existe deux principaux types de modèles [78] M. Wang, et al., 'Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range'. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 3, pp. 1930–1938, 2005, le premier consiste en un modèle de boîte noire, où les paramètres sont basés sur des mesures FRA effectuées en externe au transformateur.

Le deuxième modèle consiste en un modèle physique, dans lequel les composants du transformateur sont modélisés en détail et pour cela un réseau de paramètres équivalent de résistances, d'inductances et de capacités est utilisé [79] A. David L. Alvarez A., 'Modèle de transformateur de distribution pour l'analyse de la réponse en fréquence' Thèse Magister of science octobre 2013. (Figure III.4).

Xiaozhen Zhao a mentionné dans [83] Zhang H, et al., 'Double-ladder circuit model of transformer winding for frequency response analysis considering frequency-dependent losses'. *IEEE Trans Magn* 2015; 51:1–4. que la majorité des études sont basées sur des analyses de simulation utilisant la modélisation par éléments finis 3D (FEM) [81] Zhang ZW, et al., 'Finite-element modeling for analysis of radial deformations within transformer windings'. *IEEE Trans Power Delivery* 2014; 29:2297–305, des modèles mathématiques [82] Abu-Siada A. et al., 'High frequency transformer modelling using state space representation for FRA studies'. In: 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED); 2017. p. 422–6. et des modèles de circuits électriques équivalents [83].

Les circuits électriques équivalents comprenaient le modèle de circuit à paramètres localisés [85] Abeywickrama N, Serdyuk YV, Gubanski SM. 'High-frequency modeling of power transformers for use in frequency response analysis (FRA)'. *IEEE Trans Power Del* 2008; 23:20429 [86] Mukherjee P, Satish L. 'Construction of equivalent circuit of a single and isolated transformer winding from FRA data using the ABC algorithm'. *IEEE Trans Power Del* 2012; 27:963–70 , le modèle de circuit équivalent à un réseau en échelle [87]. Shabestary MM, et al., 'Ladder network parameters determination considering nondominant resonances of the transformer winding'. *IEEE Trans Power Del* 2014; 29:108–17, [88]. Liang et al., 'Modeling of transformer windings under very fast transient over voltages'. *IEEE Trans Electromagn C*. 2006; 48:621–7, et le modèle de ligne de transmission multi conductrice [89] Shintemirov A, et al., 'A hybrid winding model of disc-type power transformers for frequency response analysis'. *IEEE Trans Power Delivery* 2009; 24:730–9.

[90] Gustavsen B, Portillo A. 'A black-box approach to interfacing white-box transformer models with electromagnetic transients programs'. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition; 2014. p. 1-5

Parmi ces modèles, le modèle de circuit basé sur des paramètres localisés a été largement adopté dans la littérature pour les études FRA afin d'étudier les impacts de diverses déformations d'enroulement sur la signature FRA du transformateur [86] (Figure III.4 b).

Il est donc extrêmement crucial que le modèle de circuit électrique équivalent soit établi avec précision pour refléter la structure physique interne du transformateur.

La précision de ce modèle peut être évaluée en comparant la signature FRA du transformateur à celle obtenue par l'analyse de simulation du modèle.

L'impact de divers défauts sur les paramètres électriques du transformateur et la signature FRA sont rapportés dans [91] Hashemnia N, et al., 'Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics – Part 1: axial displacement simulation'. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2015; 22:556–63.

[92] Hashemnia N, Abu-Siada A, Islam S. Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics – Part 2: radial deformation simulation. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2015; 22:564–70.

La corrélation entre les défauts d'enroulement du transformateur et le changement des paramètres électriques à l'aide d'une analyse de simulation qui est validée par des mesures pratiques est étudiée dans [93] Liu S, et al., 'Diagnosis of transformer winding faults based on FEM simulation and on-site experiments'. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2016 ; 23 :3752–60.

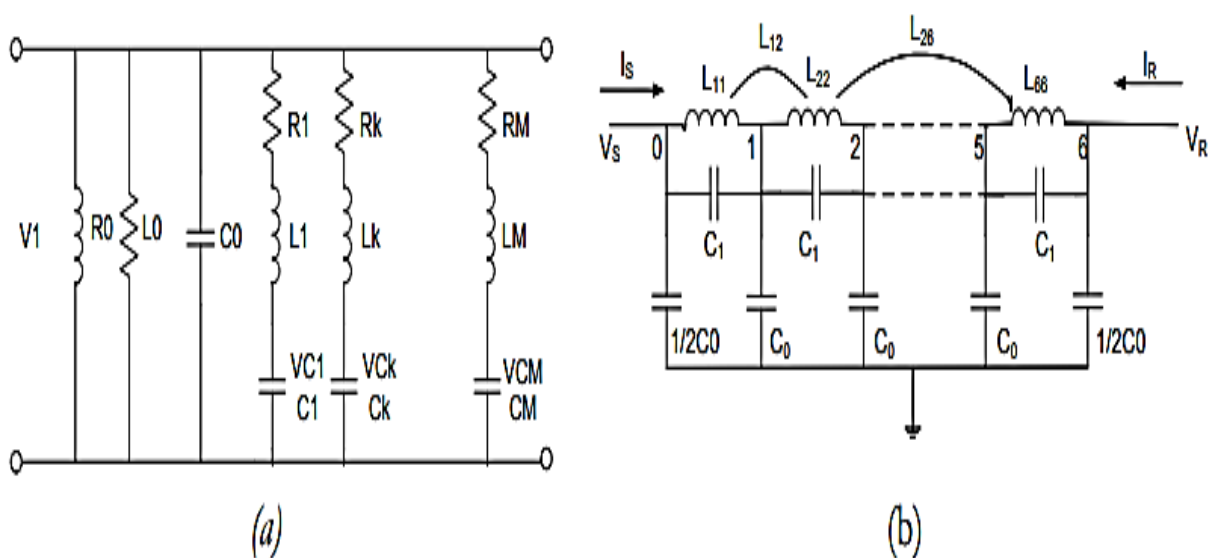


Figure III.4 : Modèle de transformateur Vaessen (a) et Wilcox (b)

III.5.1. Classification des modèles orientés FRA :

Les travaux de recherche nécessitent une étude des modèles dont le but est l'interprétation des courbes FRA.

Les différents modèles de diagnostic basés sur la technique FRA peuvent être différenciés en deux types, sur la base des deux méthodologies de modélisation prioritaires, décrites dans la

(Figure III.5).

La première méthodologie établit un modèle d'identification avec une grande capacité à ajuster la réponse réelle.

Dans ce cas, le modèle doit être complété avec la capacité d'interprétation physique à travers les paramètres constitutifs du modèle développé.

La seconde méthodologie établit dans un premier temps un modèle basé sur les principes physiques du champ électromagnétique et donc doté d'une interprétation physique.

Par conséquent, il est nécessaire, dans un deuxième temps, de concevoir une procédure de calcul garantissant des valeurs des paramètres permettant de simuler la réponse réelle avec une erreur minimale [94] Carlos González García., 'Procédure de modélisation basée sur l'analyse de la réponse en fréquence et son application dans des transformateurs de puissance triphasés pour sa caractérisation et son diagnostic'. Université Carlos III de Madrid 2012., <http://hdl.handle.net/10016/13987>.

[95] E. Rahimpour, J. et al., 'Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings' IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 2, pp. 493–505, Apr. 2003.

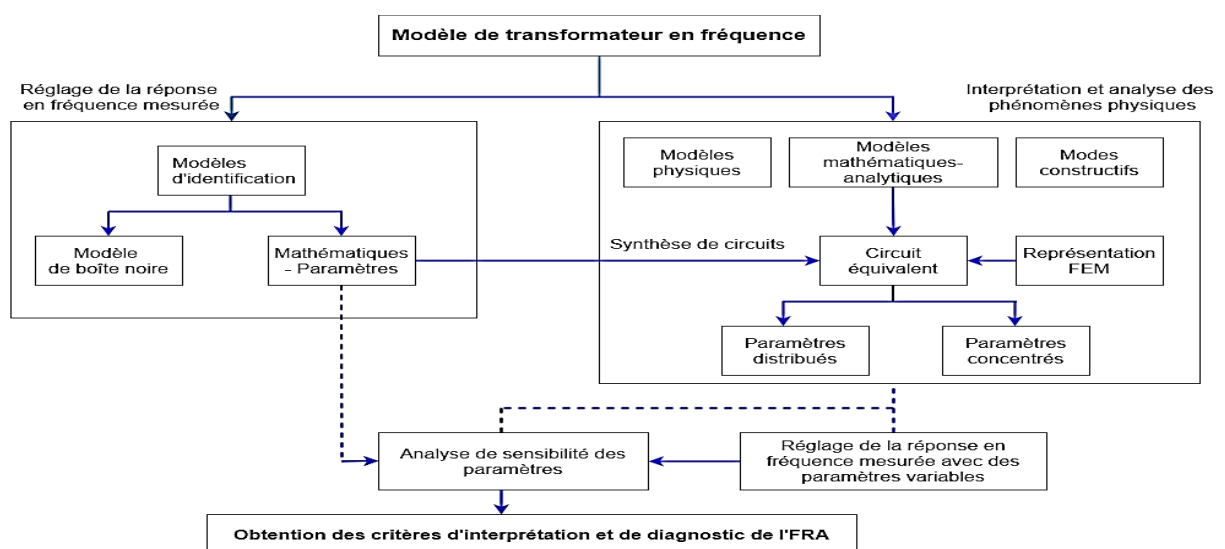


Figure III.5 : Alternatives pour la création d'un modèle à des fins de diagnostic par FRA

III.5.2. Modélisation de la réponse fréquentielle FRA :

Les caractéristiques physiques de l'enroulement du transformateur peuvent être représentées par des paramètres électriques pour construire un circuit électrique équivalent.

Ces dernières années, le modèle mutuellement couplé a été largement reconnu comme le circuit équivalent reflétant précisément le comportement de l'enroulement du transformateur dans une large gamme de fréquences [96] Ragavan, K., Satish, L.: 'Localisation of changes in a model winding based on terminal measurement'. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2007, 22, (3), pp. 1557–1565

[97] Toudji M, et al., 'Determination of Winding Lumped Parameter Equivalent Circuit by Means of Finite Element Method'. *IEE T Magn.* 2017 ; 53 :1 -4.

Le modèle mutuellement couplé se compose essentiellement d'une série de cellules, chaque cellule est composée de trois paramètres électriques, résistance (r), self inductance (L_s), et condensateurs série (C_s) et shunt (C_g) (Figure III.6).

Ce modèle permet de reproduire la courbe de réponse en fréquence obtenue lors d'un test FRA réel (Figure III.7).

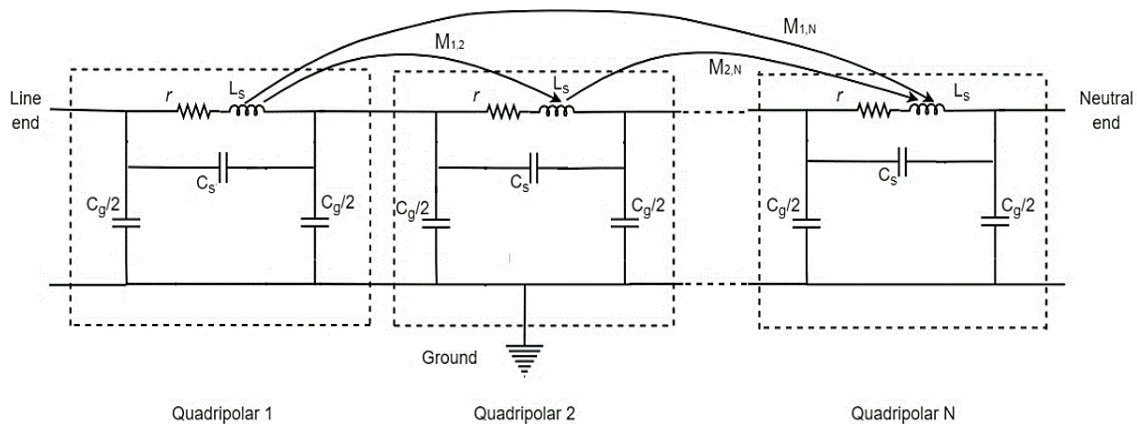


Figure III.6: circuit équivalent mutuellement couplé [76]

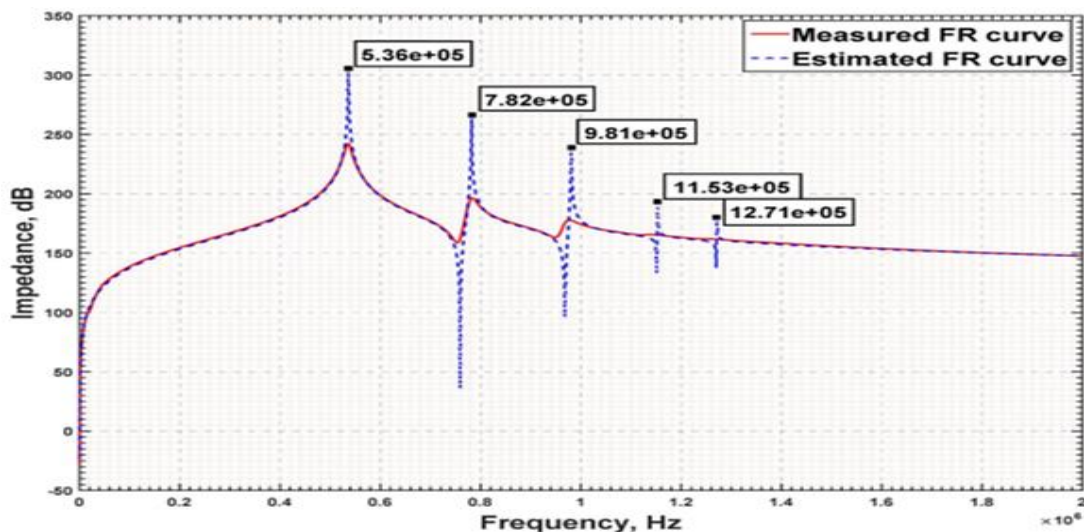


Figure III.7 : Réponse en fréquence mesurée [98]

Les cellules sont composées de trois éléments passifs de base, la résistance représente les pertes de puissance, l'inductance représente le stockage du champ magnétique, la capacité représente le stockage du champ électrique.

L'obtention des paramètres électriques, R, L, C de chaque cellule se fait à partir d'une réponse en fréquence mesurée à l'état sain, telle que celle représentée sur la (Figure III.7), dans laquelle il y a divers pics et creux sur toute la largeur de bande de fréquences.

Le modèle sélectionné vise à étudier l'impact de diverses déformations géométriques internes au sein du transformateur sur la signature FRA.

III.5.3 Description du modèle mutuellement couplé :

Pour le domaine des basses fréquences, l'enroulement du transformateur se comporte comme une simple inductance où les couplages capacitifs sont négligeables, donc le modèle RL est suffisant pour représenter l'enroulement.

Mais au fur et à mesure qu'on monte en fréquences les effets capacitifs ne seront plus négligeables et cela se traduit par une limitation du domaine fréquentiel du modèle RL.

Pour augmenter son domaine de validité il est nécessaire de prendre en compte les effets capacitifs qui se manifestent à des fréquences élevées.

III.6. L'avantage d'analyse de la réponse en fréquence FRA :

L'avantage de cette méthode est qu'elle donne une réponse obtenue expérimentalement sans nécessairement avoir une connaissance préalable de la fonction de transfert.

L'objectif est l'étude de la relation entre la tension et le courant dans un enroulement de transformateur, ce qui se traduit par une impédance de transfert.

III.7. Modèle équivalent de l'enroulement du transformateur :

Afin de surveiller et de diagnostiquer un enroulement de transformateur, il doit être représenté par un modèle de circuit équivalent physiquement réalisable.

Le circuit doit être synthétisé de manière à caractériser le comportement fréquentiel de l'enroulement du transformateur.

La complexité lors de la synthèse du circuit pourrait être simplifiée par la représentation du transformateur à enroulements multiples par un seul réseau en échelle, et tous ses paramètres sont considérés statiques dont leur dépendance en fréquence est négligeable.

L'enroulement symétrique et homogène du transformateur peut être modélisé par un nombre fini de sections N qui forment un seul réseau en échelle magnétiquement et électriquement couplé. Chaque section identique (quadripôle) est composée d'une résistance d'enroulement interne (r) en série avec inductance propre (l_s).

Des capacités shunt et série (C_g et C_s), et des inductances mutuelles entre les sections i et j ($M_{i,j}$) (**Figure III.8**).

L'effet inductif dans la bande basse fréquence peut être modélisé par une inductance équivalente en série avec une résistance équivalente, qui suit des valeurs linéairement croissantes d'impédance, et cela peut ne pas être exactement linéaire en raison de la non-linéarité du noyau dans le cas d'un enroulement avec noyau de fer.

En effet, en pratique, il est possible de limiter l'influence du noyau et l'effet des enroulements voisins en choisissant une connexion de bornes appropriée [107] Mukherjee, P., Satish, L., 'Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding – an analytical approach'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 31(6) (2016). [104] Shah, K.R., Ragavan, K., 'Assessing mechanical deformations in two winding transformer unit using reduced-order circuit model'. *Electr. Power Energy Syst.* 79, 235–244 (2016).

Le choix de la connexion de court-circuit de bout en bout (End to end Short-Circuit) a deux objectifs : le premier est de réduire significativement le modèle d'un transformateur multi-enroulements à un seul réseau en échelle (modèle réduit) [104], et le second, dans le cas où les enroulements de transformateurs doivent être vérifiés individuellement comme mentionné dans les activités de normalisation mondiales pour le test FRA et les travaux de Kulkarni et al. [108] Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A., 'Transformer Engineering: Design, Technology and Diagnostics'. 2nd ed. CRC Press (2012).

Il est indiqué dans les références [104] que si tous les enroulements voisins primaires et secondaires sont court-circuités et mis à la terre, leur influence sur l'enroulement étudié peut être minimisée.

Dans ce cas, le transformateur peut être considéré comme équivalent à un enroulement isolé, et il peut être représenté par un seul réseau en échelle.

Les auteurs dans les références [110] Miki, A., Hosoya, T., Okuyama, K., 'A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings'. *IEEE Trans. Power Syst.* PAS-97(3), 930–939 (1978). [111] Soysal, O., 'A method for wide frequency range modeling of power transformers and rotating machines'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 8(4), 1802–1810 (1993).

indiquent que le comportement terminal d'un transformateur à noyau de fer deviendrait similaire à celui d'un transformateur à noyau d'air si tous les enroulements voisins étaient court-circuités.

Ainsi, l'influence d'un enroulement sur un autre peut être ignorée en ce qui concerne l'inductance mutuelle.

Par conséquent, leur comparaison expérimentale indique que lorsque l'enroulement basse tension (BT) est court-circuité, la réponse dans l'enroulement haute tension (HT) avec un noyau de fer est similaire à celle avec un noyau d'air.

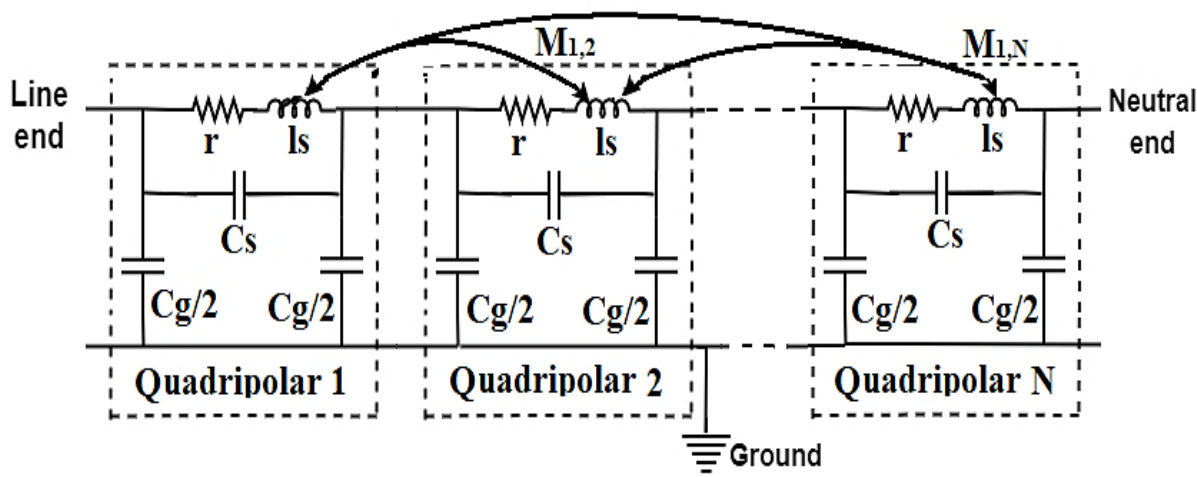


Figure III.8 : *Modèle de circuit équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur* [98] Amara A, Gacemi A, Houassine H, Chaouche MS. A novel methodology for high-frequency lumped equivalent circuit of an isolated transformer winding construction based on frequency response analysis signal morphology interpretation. *IET Electr. Power Appl.* 2021 ;1–15. <https://doi.org/10.1049/elp2.12013>.

L'enroulement testé dans un transformateur à noyau de fer peut être considéré comme une bobine isolée et sans noyau de fer, si tous les enroulements adjacents à l'enroulement testé sont court-circuités et mis à la terre [112] Pramanik, S., Satish, L., 'Estimation of series capacitance for a three-phase transformer winding from its measured frequency response'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 28(4), 2437–2444 (2013). [113] Chaouche, M.S., Houassine, H., 'BA to construction of equivalent circuit of a transformer winding from frequency response analysis measurement'. *IET Electr. Power Appl.* 12, 728–36 (2018). [104]. Shah, K.R., Ragavan, K., 'Assessing mechanical deformations in two winding transformer unit using reduced-order circuit model'. *Electr. Power Energy Syst.* 79, 235–244 (2016). [105] Shah, K., Ragavan, K., 'Estimation of transformer winding capacitances through frequency response analysis – an experimental investigation'. *Int. J. Emerg. Elec. Power Syst.* 14(6), 549–559 (2013). [114] Mahamat, H.B., Jean, J., 'Modélisation des inductances planaires intégrées'. Université Jean Monnet, Saint Etienne, Français (2014). [115] Gonzales, J., Mombello, E., 'Automatic detection of frequency ranges of power transformer transfer functions for evaluation by mathematical indicators'. In: Gonzales, J. C., Mombello, E (eds.) *IEEE 6th Power Energy Society (PES) Transmission and Distribution: Latin America- 2012*.

Par ailleurs, l'enroulement du transformateur étudié peut être représenté par un seul réseau en échelle [104].

Aux moyennes fréquences, l'impédance peut être modélisée par des circuits de résonance parallèles et série ; la capacité shunt représente le diélectrique entre l'enroulement et le noyau (terre), la capacité série représente l'effet capacitif entre les disques, et elles sont convenablement combinées afin de reproduire les pics et les creux du signal FRA.

Comme mentionné ci-dessus, la connexion de court-circuit de bout en bout néglige l'influence des enroulements adjacents et les capacités inter-enroulements.

Dans les hautes fréquences, l'impédance peut être modélisée par un réseau en échelle de capacités shunt et série ; le modèle est représenté par des capacités uniquement, et il suit des valeurs décroissantes de l'impédance en fonction de la fréquence.

III.8. Interprétation de la morphologie du signal FRA :

La méthode proposée FRA est basée sur l'analyse de la morphologie du signal FRA, qui est liée aux composants physiques du transformateur (sections des conducteurs, nombres de spires, diélectrique, etc.).

Par conséquent, il contient toutes les spécifications techniques de l'enroulement du transformateur, qui peuvent être représentées par des paramètres électriques (résistance, inductance et capacité).

Comme le montre la (Figure III.9), les paramètres du modèle peuvent être déterminés uniquement à partir des données d'entrée FRA dans les sous-bandes de fréquences : basses, moyennes et hautes fréquences.

L'analyse et l'interprétation exacte du signal FRA dans ces régions peuvent effectivement améliorer la précision de l'identification des paramètres du modèle équivalents.

Ainsi, la détermination du paramètre dominant est basée sur sa sous-bande de fréquence correspondante, alors que l'influence des autres paramètres est généralement négligeable [106] Huan, L., Ziwei, Z., 'Equivalent gradient area-based fault interpretation for transformer winding using binary morphology'. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 24(3) (2017).

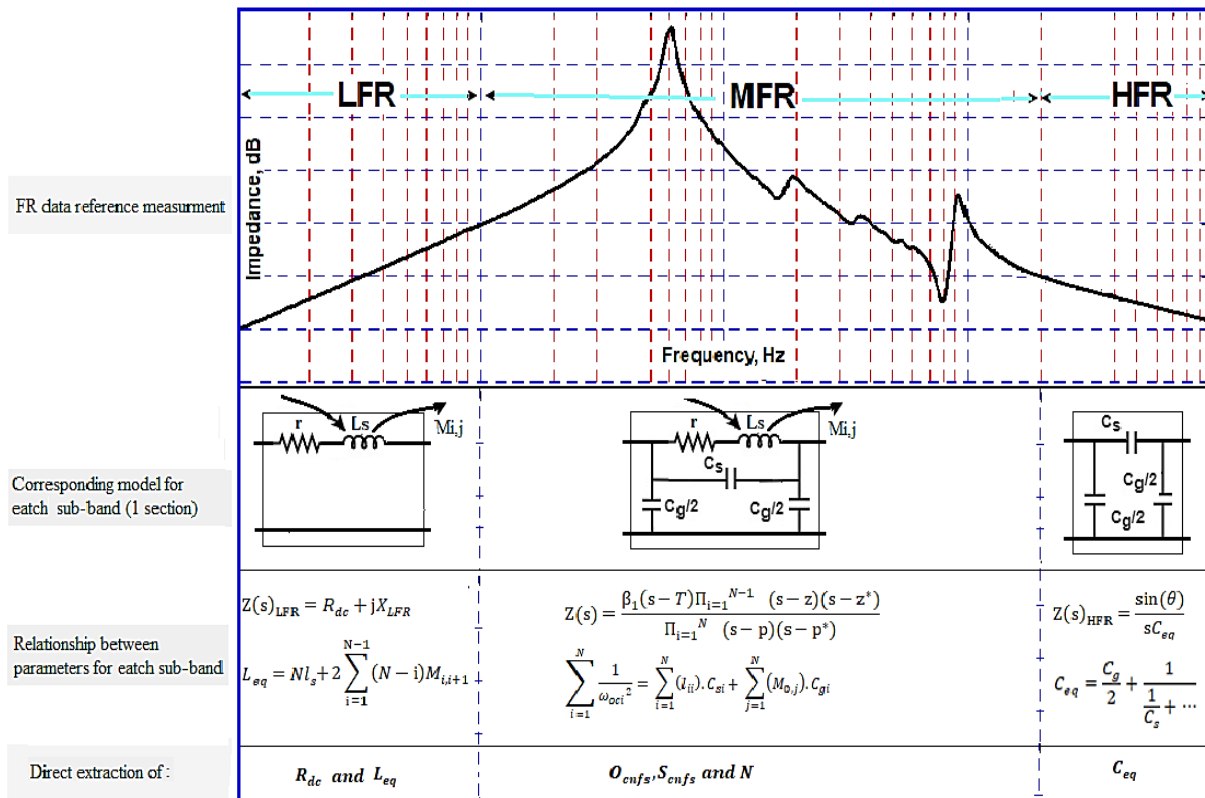


Figure III.9: Décomposition de la réponse fréquentielle FRA [112] Pramanik, S., Satish, L., 'Estimation of series capacitance for a three-phase transformer winding from its measured frequency response'. IEEE Trans. Power Deliv. 28(4), 2437–2444 (2013).

Dans le cadre de diagnostic des enroulements de transformateurs, plusieurs chercheurs ont tentés de décomposer les graphes FRA, afin de comprendre le comportement de l'enroulement dans chaque zone de fréquence.

Les auteurs de la référence [106] Huan, L., Ziwei, Z., 'Equivalent gradient area-based fault interpretation for transformer winding using binary morphology'. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 24(3) (2017). ont proposé une nouvelle méthode d'interprétation de défauts pour les enroulements de transformateurs en utilisant les caractéristiques extraites des zones de gradient équivalentes de la FRA.

D'autres recherches ont montré qu'une courbe FRA peut être divisée en plusieurs principales régions de fréquence [115] Gonzales, J., Mombello, E., 'Automatic detection of frequency ranges of power transformer transfer functions for evaluation by mathematical indicators'. In: Gonzales, J. C., Mombello, E (eds.) *IEEE 6th Power Energy Society (PES) Transmission and Distribution: Latin America- 2012.* [116]. Velasquez, J., Kolb, D., 'Identification of transformer-specific frequency sub-bands as basis for a reliable and automatic assessment of FRA results'. *Condit. Monit. Diagn. Conf. (CMD), Tokyo, 1–6 (2010).*

Dans notre étude, l'objectif est d'automatiser l'identification des paramètres du modèle équivalent qui sont situés dans chaque zone de fréquence (**Figure III.9**).

- Dans la zone de fréquence LFR, l'effet est purement inductif, les inductances propres et mutuelles sont les paramètres dominants.

- Dans la zone de fréquence MFR, l'effet est double inductif et capacitif, influencé par les capacités série (C_s), shunts (C_g) et les inductances.

- Dans la zone de fréquence HFR, l'effet est purement capacitif, influencé par la capacité globale (C_{eq}) causée par les deux paramètres dominants qui sont les capacités C_s et C_g .

Ragavan et al. [117] Ragavan, K., et al., 'Localisation of changes in a model winding based on terminal measurement'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 22(3), 1557–1565 (2007). ont montré qu'un circuit équivalent de N sections peut être représenté par une fonction de transfert donnée par l'équation (6).

Les expressions mathématiques de chaque sous-bande sont définies dans la section suivante.

III.8.1. Réponse en basse fréquence (sous-bande LFR) :

Dans cette zone, l'enroulement isolé peut être modélisé par une résistance équivalente en série avec une inductance équivalente, cette dernière représente les inductances propres et mutuelles l_s et $M_{i,j}$ comme le montre la (**Figure III.9**).

Ainsi, les paramètres présents dans cette région sont R_{dc} , L_{eq} , l_s et $M_{i,j}$.

Aux basses fréquences l'impédance est [117]

$$\lim_{s \rightarrow 0} Z(s) = R_{dc} + sL_{eq}$$

$$\text{Impédance} \quad Z(f)_{LFR} = R_{dc} + jX(f)_{LFR} \quad (1)$$

$$\text{Réactance} \quad X(f)_{LFR} = 2\pi f L_{eq} \quad (2)$$

$$\text{Inductance équivalente} \quad L_{eq} = Nl_s + 2 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)M_{i,i+1}$$

$$A : \quad M_{1,i+1} \cong \lambda^i l_s \text{ selon référence} \quad (3)$$

[118] Jafar Nosratian, A., Saeed, S., 'On the accuracy of detailed model inductance matrix estimation for air core winding'. Arch. Elect. Eng. 66(4), 787–799 (2017).

R_{dc} Résistance au courant continu.

L_{eq} Inductance équivalente.

l_s Inductance propre.

avec

N Nombre de sections.

$M_{i,i+1}$ Inductances mutuelles.

III.8.2. Réponse en moyenne fréquence (sous-bande MFR) :

L'augmentation de la fréquence a provoqué d'autres phénomènes, et l'interaction entre l'effet inductif et capacitif provoque des fréquences de résonance et antirésonance, dans lequel l'impédance est représentée par la fonction de transfert dans l'équation (6) comme le montre la (Figure III.9).

Les pôles et les zéros représentent respectivement les fréquences propres en circuit ouvert et en court-circuit O_{cnfs} , S_{cnfs} . Cette bande comprend tous les paramètres de l'enroulement (capacités et inductances) :

$$Z(s) = \frac{\beta_1 (s-T) \prod_{i=1}^{N-1} (s-z)(s-z^*)}{\prod_{i=1}^N (s-p)(s-p^*)} \quad (6)$$

β_1 Facteur d'échelle ; S zéro réel ;

z_i, z_i^* Paire zéro de conjugué complexe ;

p_i, p_i^* Paire pôles de conjugué complexe.

Cependant, Mukherjee et al. [121] Mukherjee, P., Satish, L., 'Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding an analytical approach'. IEEE Trans. Power Deliv. 27, 963–70 (2012). ont développé une relation entre les fréquences de résonance et les paramètres de modèle (capacités et inductances), qui est donné comme suit :

III.8.3. Réponse en haute fréquence (sous-bande HFR) :

À des fréquences plus élevées, l'effet capacitif peut être représenté par l'équation (8) [6] Omicron electronics 'FRAnalyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006, la courbe diminue avec l'augmentation de la fréquence comme le montre la (Figure III.9).

La capacité globale représente l'équivalent des capacités shunt et série de toutes les sections, et sa valeur doit rester considérablement constante.

Par conséquent, les paramètres existant dans cette région sont C_{eq} , C_g , et C_s .

$$Z(s)_{HFR} = \frac{\sin(\theta)}{sC_{eq}} \quad (8)$$

Avec :

$$C_{eq} = \frac{C_g}{2} + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_g + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \dots}}} \quad (9)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis en relief une technique de diagnostic efficace pour la détection des défauts dans les enroulements du transformateur en l'occurrence l'analyse de la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement à tester,

Chapitre IV

**Localisation de défaut dans les
enroulements des transformateurs**

Introduction :

Les transformateurs de puissance peuvent bénéficier d'un outil puissant et sensible appelé l'analyse de la Réponse en Fréquence (FRA), qui permet d'évaluer l'intégrité mécanique et géométrique de base, ainsi que les enroulements et le circuit magnétique, en mesure de leurs fonctions de transfert à différentes fréquences.

Les problèmes insurmontables sont la localisation des dommages mécaniques, tels que le déplacement ou la déformation, et la détermination de leur gravité dans l'enroulement d'un transformateur.

Il est indéniable que l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est le moyen le plus précis pour la repérer. Elle renferme des données intégrées concernant les dégâts et leur gravité, mais il n'y a pas de méthode universelle pour les extraire ou en tirer des conclusions. Il est important de repérer ces dommages à un stade très précoce, de les localiser et d'évaluer leur gravité, afin d'éviter des pannes importantes.

Un déplacement ou une déformation mécanique de l'enroulement est le résultat final des contraintes accumulées par les forces anormales subies par l'enroulement en raison de court-circuit dans le réseau électrique.

Dans ce chapitre, notre étude est passée par deux phases :

Première phase : simulation dans le programme matlab sur un modèle de schéma équivalent pour l'enroulement à cinq disques, où nous avons créé des défauts au niveau des cinq disques, qui étaient :

- Déformation
- Isolation
- Court-circuit
- Circuit ouvert

Nous avons remarqué des changements dans les courbes de défauts (Pics et Creus) lors du changement de fréquence f par rapport à l'état sain.

Deuxième phase :

Dans cette phase, nous sommes appuyés sur une étude antérieure de [124] THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN AUTOMATIQUE Contribution à la conception d'une plateforme embarquée sans fils pour la détection de défauts dans les transformateurs , Amara Abderrazak 2020/2021 , dans laquelle il a développé une approche de diagnostic pour détecter et localiser les déformations géométriques dans les bobines des transformateurs avec une validation expérimental, il a utilisé deux méthodes :

La première méthode utilise les paramètres physiques (L'inductance équivalente L_{eq} et les fréquences de résonances)

La deuxième méthode utilise les indices mathématiques

Par conséquent, notre contribution s'ajoute à l'étude précédente en développant une approche basée sur un autre paramètre physique (La capacité équivalente C_{eq})

IV.1. Présentation du modèle utilisé pour la simulation :

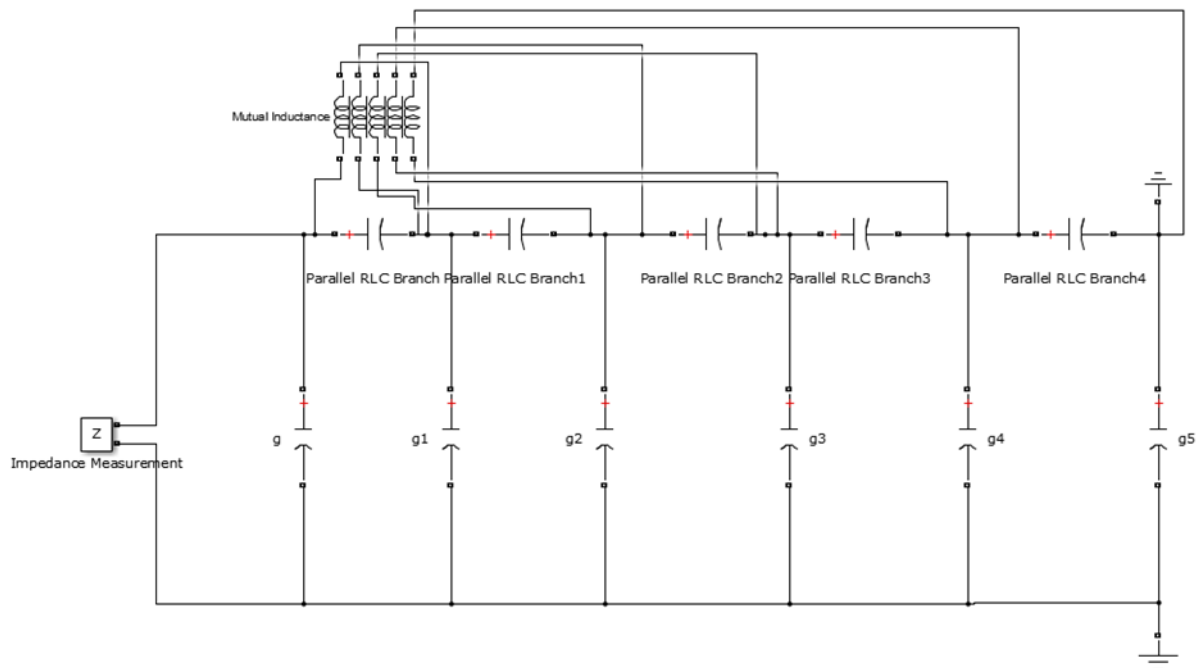


Figure IV.2 : Schéma équivalent du modèle d'un transformateur de puissance

Le schéma montre un circuit électrique complexe avec plusieurs composants connectés en parallèle et en série.

- **Composants** : Le circuit comprend un ensemble de cinq bobines avec une inductance mutuelle.
- **Cellules RLC** : Chaque cellule RLC contient une résistance, une inductance et des condensateurs.
- **Inductance Mutuelle** : Les cinq bobines sont placées côte à côte et présentent une inductance mutuelle, ce qui signifie que le champ magnétique créé par une bobine affecte les autres bobines.
- **Mesure d'Impédance** : Un élément de mesure d'impédance (représenté par la lettre "Z") est connecté au circuit pour mesurer l'impédance totale du système.

IV.1.1. Propriété électrique du système :

Matrice de résistance : (Ohm)

$$\begin{pmatrix} 0.05 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0.05 \end{pmatrix}$$

Matrice de capacité : (Farad)

$$C_g = \begin{bmatrix} 6e-11 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1.2e-11 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 6e-11 \end{bmatrix}$$

Matrice de l'inductance : (uH)

$$L = \begin{bmatrix} 182.13 & 61.189 & \dots & \dots & 1.933 \\ 61.189 & 182.13 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1.933 & 7.7054 & \dots & \dots & 182.13 \end{bmatrix}$$

IV.2. Simulation des défauts :

IV.2.1. Introduction des défauts dans le système :

On va introduire 4 types des défauts :

- **Isolation**
- **Déformation axiale**
- **Circuit ouvert**
- **court-circuit**

Nous avons commencé par les défauts d'isolation en diminuant la valeur de C_g de chaque disque. Ensuite, nous l'avons comparé à l'état sain

Etat sain

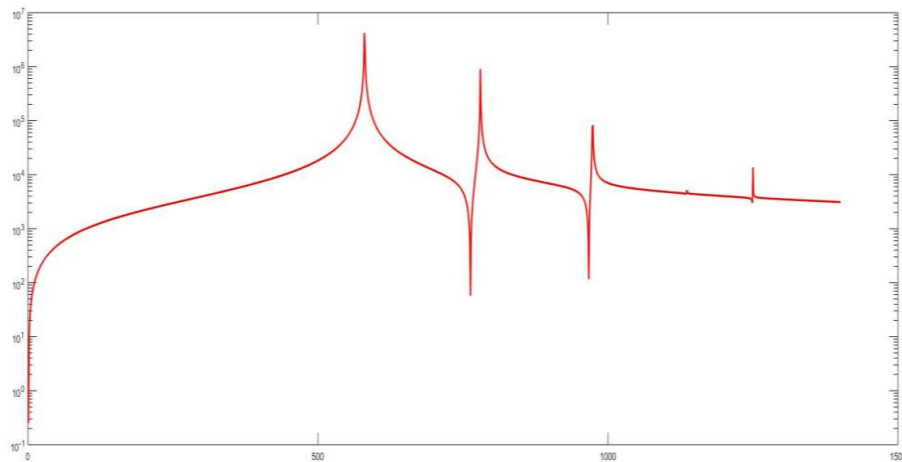


Figure (IV.3) La variation de l'impédance en fonction de la fréquence (état sain).

Défauts de L'Isolation

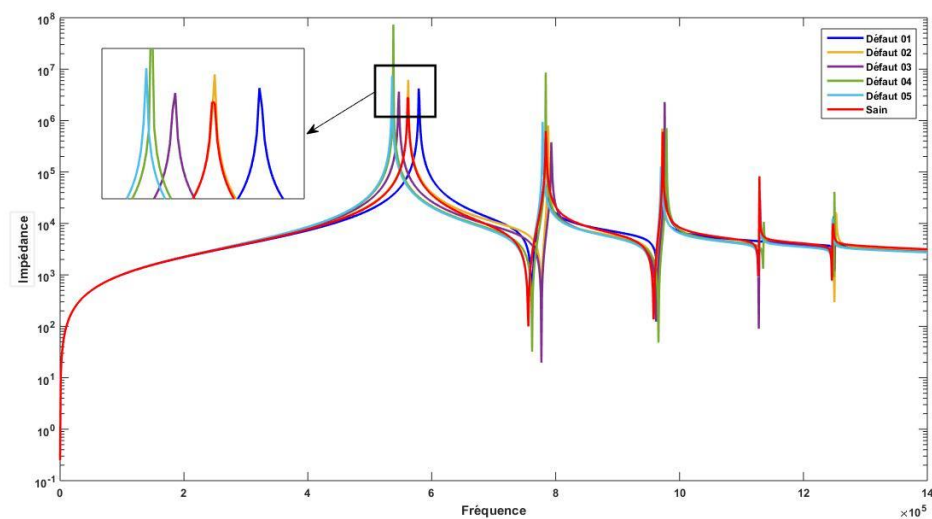


Figure IV.4 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence

Interprétation :

Ce graphique montre l'impédance en fonction de la fréquence pour plusieurs valeurs de la capacité C_g . Il présente les données de 6 essais différents : 5 essais avec des défauts (Défaut 01 à Défaut 05) et 1 essai sain.

Voici les principales observations que l'on peut tirer de ce graphique :

- **Résonance** : La courbe montre plusieurs pics correspondants à des fréquences de résonance. Par exemple la première fréquence de résonance est 10 KHz.
- **Effet des défauts** : Les courbes des essais avec des défauts présentent des différences significatives par rapport à la courbe de l'essai sain, notamment :
 - **Modification des fréquences de résonance** : Les fréquences de résonance sont généralement décalées vers la droite ou vers la gauche par rapport à l'état sain. Par exemple, le Défaut 01 fait apparaître une résonance à environ 8 KHz, tandis que le Défaut 05 fait apparaître une résonance à environ 12 KHz.
 - **Apparition de nouvelles résonances** : De nouvelles résonances peuvent apparaître. Par exemple, le Défaut 04 présente une résonance supplémentaire à environ 6 KHz.

En conclusion, ce graphique permet de visualiser les effets des défauts sur les propriétés du système. Les changements observés dans les fréquences de résonance et l'amplitude des pics de résonance peuvent être utilisés pour identifier et diagnostiquer les défauts présents.

En résumé, ce graphique montre que les défauts ont un impact significatif sur les propriétés du système, et qu'il est possible de détecter et de diagnostiquer ces défauts en analysant les changements dans les fréquences de résonance et l'amplitude des pics de résonance.

Défauts de déformation axiale :

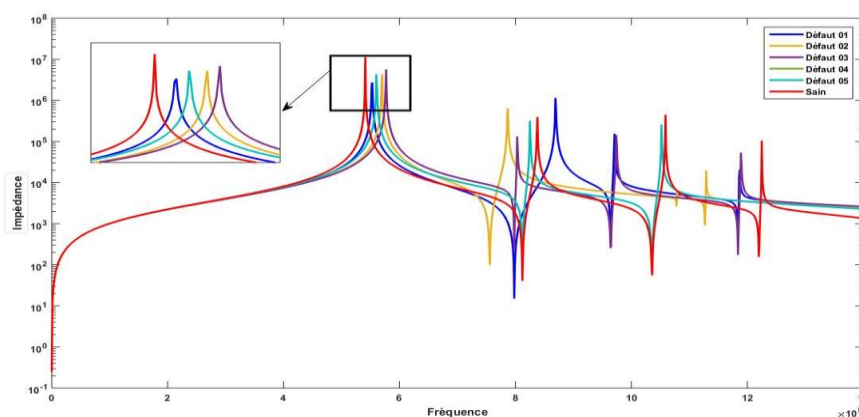


Figure IV.5 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence (assemblage)

Interprétation :

Ce graphique montre l'impédance en fonction de la fréquence pour plusieurs valeurs de la capacité Cs. Il présente les données de 6 essais différents : 5 essais avec des défauts (Défaut 01 à Défaut 05) et 1 essai de l'état sain.

Voici les principales observations que l'on peut tirer de ce graphique :

- **Résonance** : Le graphique montre plusieurs pics de résonance.
- **Effet des défauts** : Les courbes des essais avec des défauts présentent des différences significatives par rapport à la courbe de l'essai sain, notamment :
 - **Modification des fréquences de résonance** : Les fréquences de résonance sont généralement décalées vers la droite ou vers la gauche par rapport à l'état sain. Par exemple, le Défaut 01 fait apparaître une résonance à environ 8 KHz, tandis que le Défaut 05 fait apparaître une résonance à environ 12 KHz.
 - **Apparition de nouvelles résonances** : De nouvelles résonances peuvent apparaître à cause des défauts. Par exemple, le Défaut 04 présente une résonance supplémentaire à environ 6 KHz.

Défauts de court-circuit :

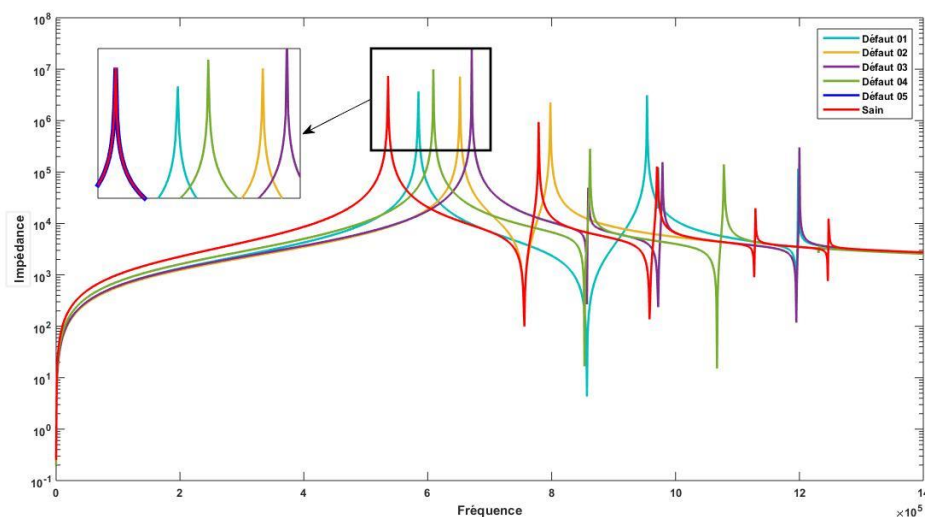


Figure IV.6 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence (assemblage)

- résonance peut être due à un défaut de masse ou à une connexion lâche dans le système.

Comparaison des résultats

En comparant les courbes des cas de défaut à celle du cas sain, on peut observer que chaque défaut a une signature fréquentielle unique.

Cela signifie que chaque défaut affecte le système de manière différente, ce qui peut être utile pour la détection et la localisation des défauts.

Défauts de circuit ouvert :

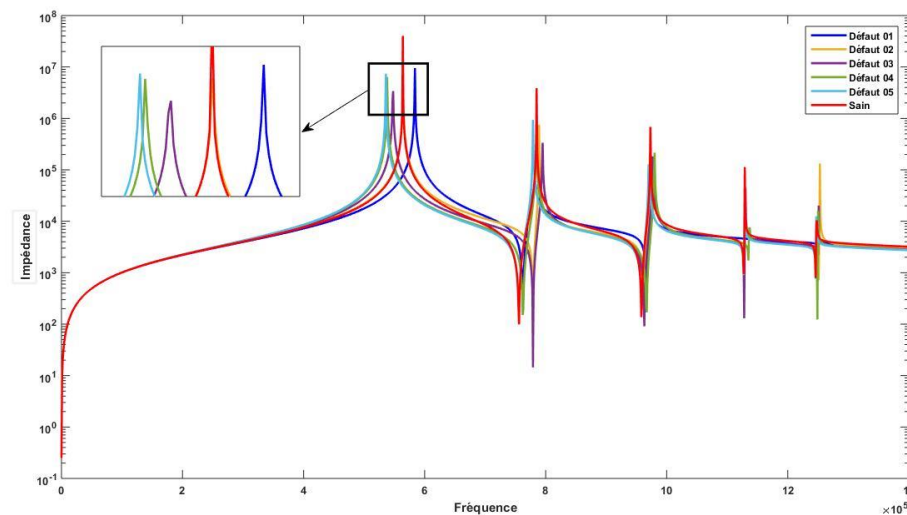


Figure IV. 7 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence (assemblage)

Interprétation :

Le graphique présente l'impédance en fonction de la fréquence (la réponse fréquentielle) de notre modèle de l'enroulement. Les courbes en bleu, jaune, vert, orange et rouge représentent les réponses du système en présence de différents défauts, tandis que la courbe en rouge représente la réponse du système à l'état sain.

Analyse:

- **Fréquences de résonance:** Le graphique montre que le système possède plusieurs fréquences de résonance. Ces fréquences correspondent aux points où l'impédance du système est maximale.
- **Amplitudes des résonances :** On remarque que les amplitudes des résonances varient significativement selon la nature du défaut.
- **Décalage des fréquences de résonance:** L'impact de chaque défaut sur les fréquences de résonance est différent. Certains défauts provoquent un décalage des fréquences de résonance vers des valeurs plus élevées, tandis que d'autres provoquent un décalage vers des valeurs plus basses.
- **Forme des spectres:** La forme des spectres d'impédance est modifiée par la présence de défauts. Certains défauts introduisent des pics supplémentaires dans le spectre.

Interprétation:

Les résultats indiquent que les défauts ont un impact significatif sur le comportement du système. La variation des amplitudes et des fréquences de résonance peut être utilisée pour détecter et identifier les différents types de défauts.

IV.3. Etude expérimental :

Dans cette partie, nous avons apporté une base de données expérimental d'un bobinage réel [124] THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN AUTOMATIQUE Contribution à la conception d'une plateforme embarquée sans fils pour la détection de défauts dans les transformateurs , Amara Abderrazak 2020/2021 ,dans lequel une approche de diagnostic qui utilise les paramètres physiques l'inductance équivalente L_{eq} et les fréquences de résonances a été étudiée. Sur la base de ces données, nous avons développé une approche utilisant un autre paramètre physique qui est la capacité équivalente C_{eq} . Une comparaison a été effectuée entre les approches de diagnostic.

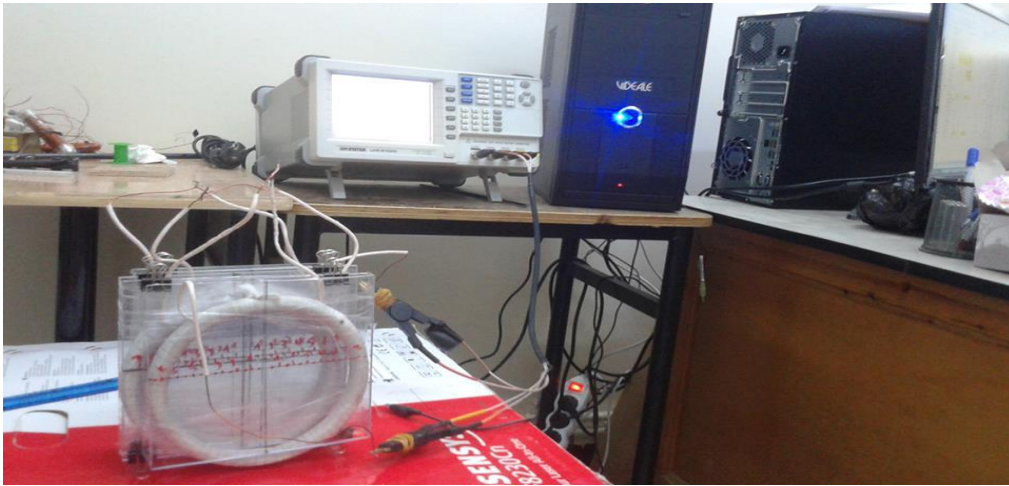


Figure IV.8 : Représentation du test FRA expérimentale de l'enroulement réel [124]

IV.3.1. Etudes des déplacements radiaux des disques 1 et 2 de l'enroulement :

Nous avons simulé des déformations radiales de 0.5 mm jusqu'à 3 mm dans le premier et le deuxième disque. [124].

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du modèle à l'état sain, obtenue par la mesure FRA, est présentée dans la (figure IV.9) :

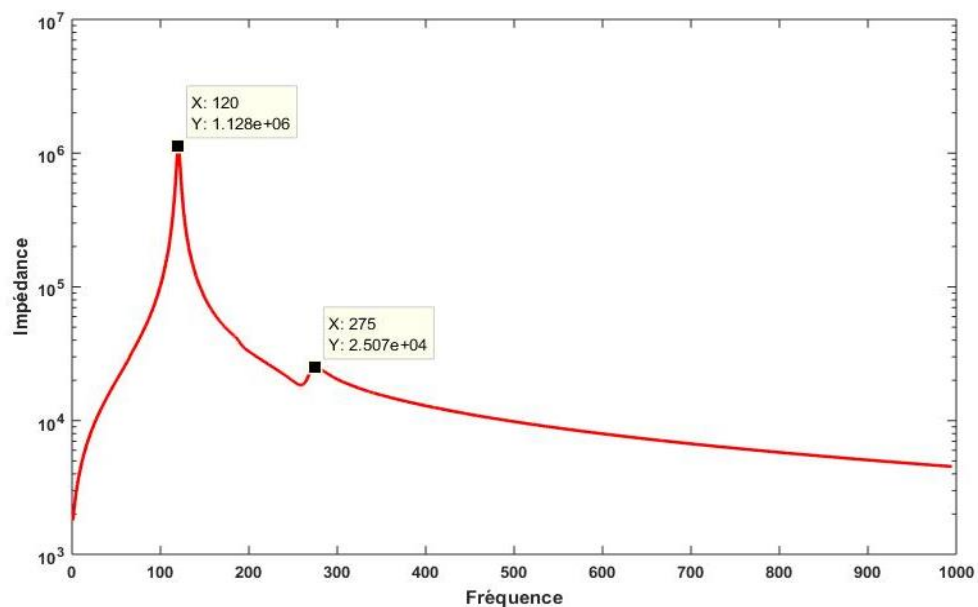


Figure IV.9 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence (état sain)

IV.3.2. Extraction des fréquences de résonance (Ocnfs) :

Les points de résonance et d'antirésonance (Ocnfs et Scnfs) sont présents dans la courbe FRA en raison des effets inductif et capacitif du bobinage.

Les fréquences de résonances obtenues à partir de la mesure FRA du modèle sont présentées dans les **Figures IV.9, IV.10 et IV.11**, où leurs valeurs peuvent être extraites de sa réponse.

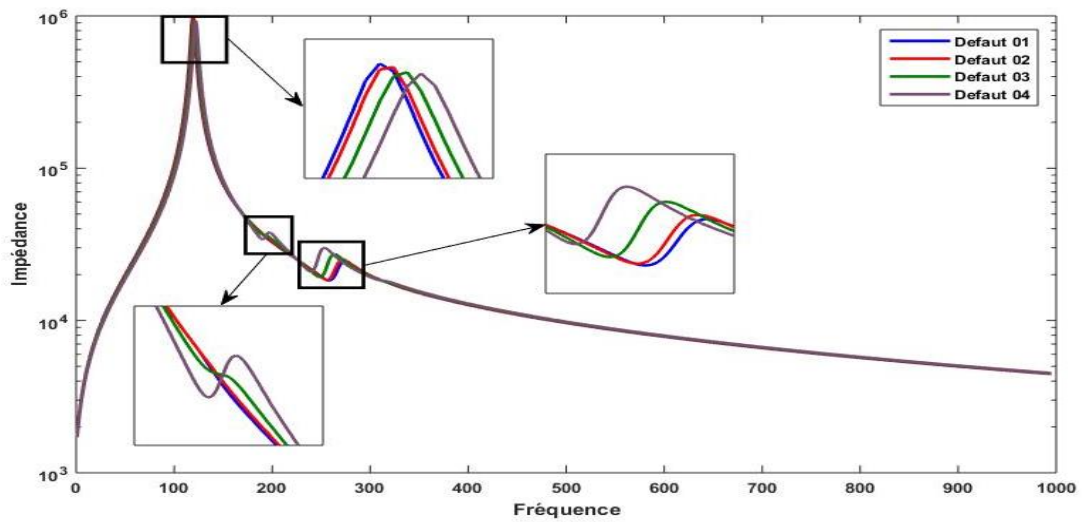


Figure IV.10 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence (Disque 01)

Le tableau IV.1 présente un récapitulatif des valeurs des pics de la (**figure IV.10**).

	Pics	01	02	03
Etat sain	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	120	275	/
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	11.28	0.251	/
Défaut 01	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	119	274	/
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.904	0.245	/
Défaut 02	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	120	271	/
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.677	0.251	/
Défaut 03	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	121	263	/
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.345	0.273	/
Défaut 04	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	122	197	253
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.26	0.379	0.300

Tableau IV.1 : tableau récapitulatif des valeurs des pics pour le premier disque.

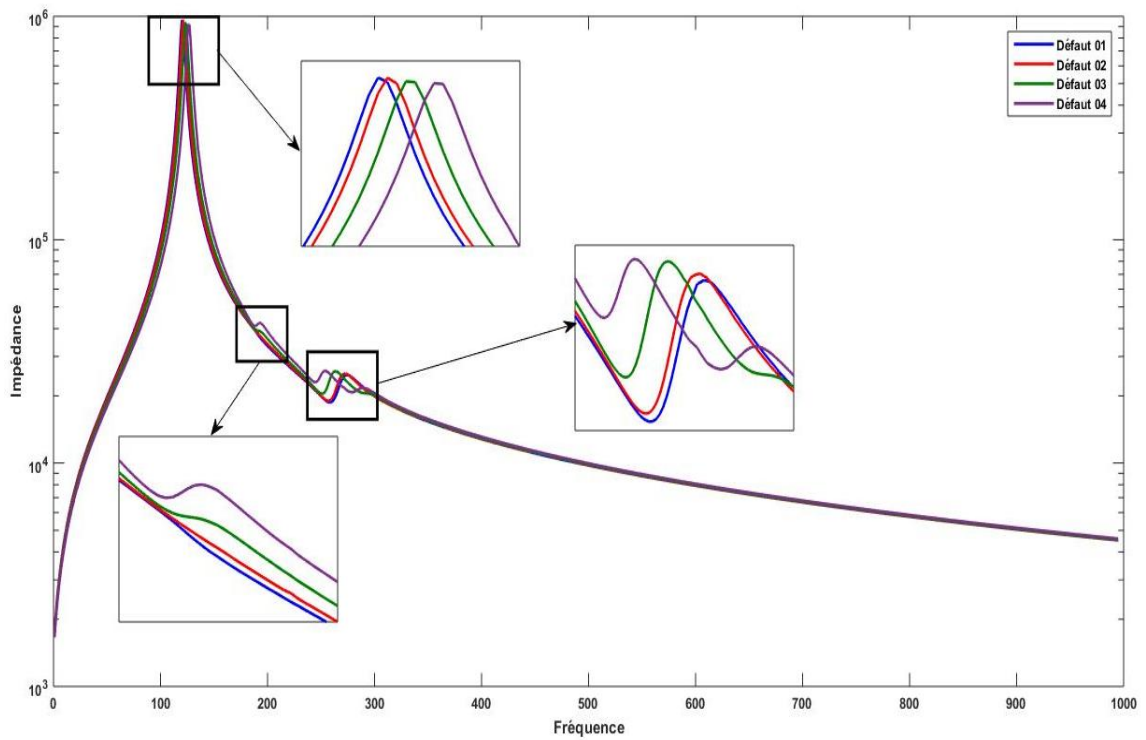


Figure IV.11 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence (Disque 02)

Le tableau IV.2 présente un récapitulatif des valeurs des pics de la (figure IV.11).

	Pics	01	02	03	04
Etat sain	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	120	275	/	
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	11.28	0.251	/	
Défaut 01	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	120	274	/	
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.636	0.248	/	
Défaut 02	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	121	273	/	
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.624	0.251	/	
Défaut 03	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	123	263	/	
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.36	0.258	/	
Défaut 04	Fréquence $\times 10^5$ (KHz)	126	193	254	289
	Impédance $\times 10^5$ (Ohm)	9.217	0.424	0.259	0.217

Tableau IV.2 : tableau récapitulatif des valeurs des pics pour le deuxième disque.

IV.4. Extraction d'inductance équivalente :

Les impédances de capacité peuvent être négligées dans la sous-bande de réponse à basse fréquence (LFR) inférieure à 1KHz en raison de leurs valeurs suffisamment élevées (considérées comme circuit ouvert). [124].

Le modèle réduit de l'enroulement peut être modélisé en utilisant une résistance interne de l'enroulement (r) en série avec une auto-inductance (l_s), ainsi que des inductances mutuelles entre les sections i et j ($M_{i,j}$). Les résistances et les inductances dans la sous-bande LFR sont en série (1), ce qui simplifie le circuit électrique équivalent en additionnant les résistances pour obtenir R_{dc} , et en additionnant les inductances propres et mutuelles pour obtenir L_{eq} . [124]

$$Z(f)_{LFR} = R_d + sL_{eq} \quad (1)$$

$$Z(f)_{LFR} = R_d + jX(f)_{LFR} \quad (2)$$

$$L_{eq} = X(f)_{LFR}/2\pi f. \quad (3)$$

La résistance au courant continu R_{dc} est représentée par la partie réelle, tandis que la réactance ($X(f)_{LFR}$) (2) est représentée par la partie imaginaire, qui suit des valeurs croissantes linéaires de l'impédance, où elle peut être directement extraite de la pente (3).

IV.4.1. Évaluation de la gravité des défauts radiaux :

La *figure IV.12* présente le changement de l'inductance équivalente en fonction des mouvements radiaux, où on observe que sa valeur diminue avec l'augmentation du degré de déformation des disques 01 et 02 et que sa changement dans le disque 02 est plus rapide que dans le disque 01. [124]

Ainsi, ces caractéristiques peuvent servir à évaluer la gravité des défauts. Le disque 01 a subi un déplacement radial (entre 10mm et 20mm), et l'inductance équivalente du bobinage est extraite dans cette situation ($L_{eq} \approx 46,9305$ mH).

Afin d'évaluer le degré de défaut sur l'axe des abscisses de la *figure IV.12*, cette valeur extraite a été positionnée sur l'axe des ordonnées.

L'ampleur du déplacement est estimée à environ 16,7 mm. [124]

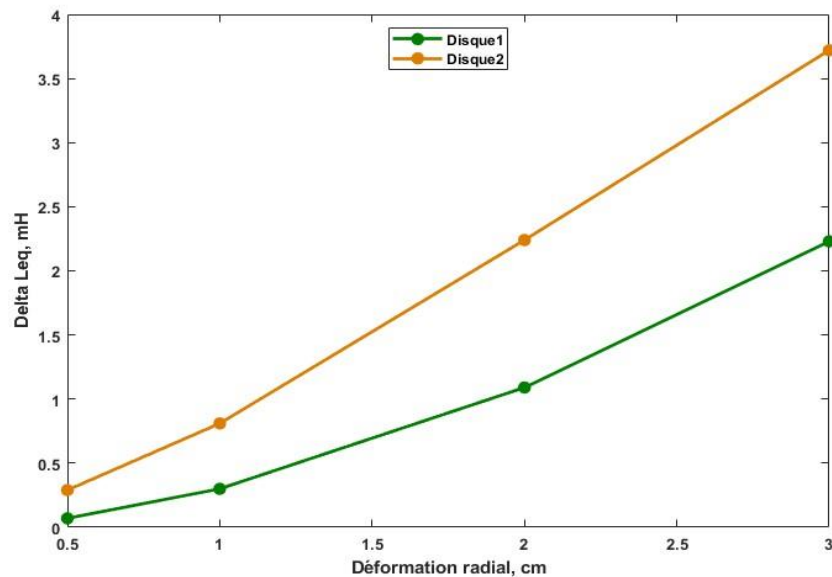


Figure IV.12 : Caractéristique de L_{eq} par rapport aux déplacements radiales.

IV.4.2. Localisation et évaluation de la gravité des déformations radiales :

Pour résoudre les problèmes de localisation des déformations radiaux dans les enroulements des transformateurs et estimer leur gravité, on commence par s'appuyer sur les propriétés de la somme de l'inverse du carré des fréquences naturelles par rapport à la variation de l'inductance équivalente. Cette méthode peut capturer efficacement la gravité des dommages de toute nature et s'appliquer à tous les types d'enroulements, mais elle n'est pas en mesure de localiser les dommages.

La signature FRA de l'enroulement sain du transformateur peut être comparée à sa nouvelle réponse FRA afin d'identifier tout changement et donc toute déformation mécanique.

Dans un premier temps, les réponses sont mesurées pour chaque changement sur les disques 1 et 2, puis les fréquences de résonance et les inductances équivalentes sont extraites, afin de calculer les indices et la variation des inductances équivalentes comme indiqué dans le **tableau IV.3**. L'extraction des paramètres du modèle rend la méthode proposée autonome.

Les caractéristiques de la variation réciproque de l'indice ($\Delta\Psi_{ocnf}$) par rapport à ΔL_{eq} sont représentées sur la **figure IV.13**. D'une part, ses propriétés augmentent de façon monotone en fonction des mouvements du disque, d'autre part, sa variation dans le disque 02 est plus rapide que dans le disque 01, ce qui en fait un outil de diagnostic efficace.

$$\Psi_{ocnf} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} \quad . \quad (4)$$

$$\Delta\Psi_{ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} \quad . \quad (5)$$

$\omega_{oci} = 2\pi O_{cnfi}$ la i -ème fréquence de résonance ;

Ψ_{ocnf} : somme des carrés inverses des fréquences naturelles;

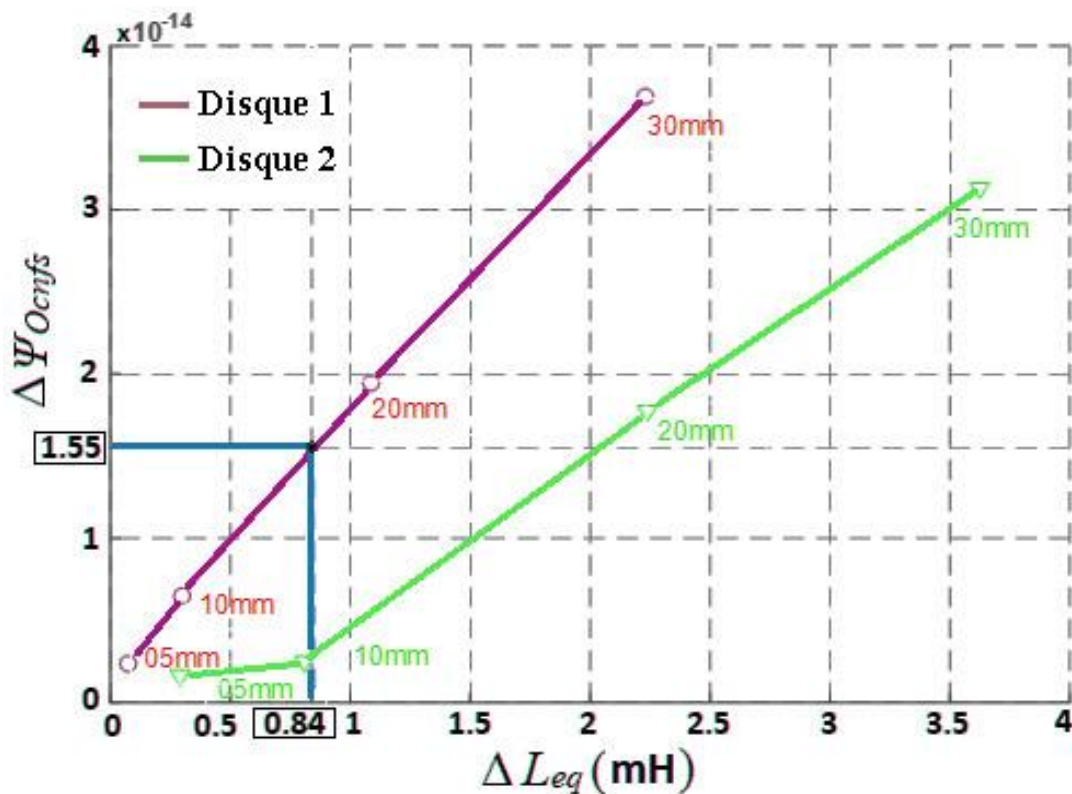


Figure IV.13 : Caractéristique de $\Delta\Psi_{ocnf}$ par rapport à ΔL_{eq} déplacements radiaux des disques 1 et 2.

Afin de tester l'efficacité de l'approche proposée pour localiser et évaluer l'ampleur des déplacements radiaux, un déplacement radial sur le disque 01 (entre 10 mm et 20 mm) a été effectué. Dans un premier temps, l'inductance équivalente et la somme des carrés inverses des fréquences naturelles sont extraites respectivement de la réponse des FRA ($L_{eq} = 46,9305$ mH, $\Psi_{ocnf} = 1,5955 \times 10^{-12}$). [124]

En utilisant les résultats obtenus dans le cas sain et dans le cas endommagé, on obtient $\Delta L_{eq} = 0,8395 \text{ mH}$ et $\Delta \Psi_{ocnf} = 1,55 \times 10^{-14}$. [124]

Ces dernières valeurs sont placées sur les axes de la **Figure IV.13**, l'intersection des deux colonnes de ces points indique le disque déplacé ainsi que le degré de son déplacement, dans ce cas, on constate que le défaut est situé sur le disque 1 avec un déplacement d'environ 16,5 mm. [124]

Déplacement (mm)	Disc 1		Disc 2	
	$\Delta \Psi_{Ocnfs}$	$\Delta L_{eq} \text{ (mH)}$	$\Delta \Psi_{Ocnfs}$	$\Delta L_{eq} \text{ (mH)}$
5	0.0234e-13	0.07	0.0162e-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

Tableau IV.3 : Variation des $\Delta \Psi_{ocnf}$ en fonction de ΔL_{eq} des déplacements radiaux.

IV.5. Utilisation des indices numériques pour l'analyse et l'interprétation :

L'utilisation d'indices numériques est l'une des méthodes introduites pour l'interprétation du FRA qui quantifie les différences dans les courbes FRA afin de détecter, localiser et/ou évaluer l'ampleur des déformations des enroulements du transformateur pour prendre une décision basée sur la valeur quantifiée de l'état d'un transformateur, à savoir s'il doit être réparé ou s'il peut continuer à fonctionner normalement. [124]

Les indices sont tirés de deux courbes FRA ; la première courbe est celle mesurée dans un état d'évaluation tandis que la seconde est obtenue dans un état sain (courbe de référence) et elle est mesurée soit à partir du même enroulement précédemment, soit à partir d'un transformateur similaire, soit à partir d'une autre phase du même transformateur [13] **Chaouche, M.S., Houassine, H., 'BA to construction of equivalent circuit of a transformer winding from frequency response analysis measurement'. IET Electr. Power Appl. 12, 728–36 (2018).** Toutefois, dans la littérature, les indices ont été utilisés pour la détection des déformations mécaniques à l'intérieur d'un transformateur et pour examiner la sensibilité du FRA à ces déformations mécaniques. Parmi les indices couramment utilisés dans le domaine du diagnostic des défauts des transformateurs électriques à l'aide de la méthode FRA : Coefficient de corrélation (CC), Indice Min-Max (MM) et Distance complexe (CD), ... etc..., présentés comme suit.

- Coefficient de corrélation (CC)

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^k (Z_{ei} \times Z_{mi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k Z_{ei}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^k Z_{mi}^2}} \quad (6)$$

- Indice Min-Max (MM)

$$MM = \frac{\sum_{i=1}^k \min(Z_{ei}, Z_{mi})}{\sum_{i=1}^k \max(Z_{ei}, Z_{mi})} \quad (7)$$

- Distance complexe (CD)

$$CD = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(|Z_{ei}(i) \cos \varphi_x(i) - Z_{mi}(i) \cos \varphi_y(i)|^2 + |Z_{ei}(i) \sin \varphi_x(i) - Z_{mi}(i) \sin \varphi_y(i)|^2 \right)} \quad (8)$$

Les indices CC , MM et CD ont été déterminés sur la base des mouvements radiaux de l'enroulement pour les deux premiers disques, qui sont illustrés dans les **tableaux IV.4, IV.5 et IV.6**, où leurs caractéristiques sont tracées par rapport à la variation de l'inductance équivalente des disques 1 et 2, comme le montre les **figures IV.14, IV.15 et IV.16**.

Déplacement (mm)	Disque 1		Disque 2	
	CC	$\Delta L_{eq} (mH)$	CC	$\Delta L_{eq} (mH)$
05	0.984	0.07	0.998	0.29
10	0.993	0.30	0.984	0.81
20	0.995	1.09	0.891	2.24
30	0.959	2.23	0.744	3.62

Tableau IV.4 : Coefficient de corrélation en fonction de ΔL_{eq}

Déplacement (mm)	Disque 1		Disque 2	
	MM	$\Delta L_{eq} (mH)$	MM	$\Delta L_{eq} (mH)$
05	0.916	0.07	0.9632	0.29
10	0.941	0.30	0.9206	0.81
20	0.941	1.09	0.7988	2.24
30	0.865	2.23	0.6852	3.62

Tableau IV.5 : Indice Min-Max en fonction de ΔL_{eq}

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

Tableau IV.6 : Distance complexe en fonction de déformation radiale.

En examinant les courbes de **les figures IV.14 , IV.15 et IV.16** on remarque que les caractéristiques de ces indices peuvent être utilisées pour diagnostiquer (localisation et évaluation de la gravité) des déplacements radiaux, mais leur sensibilité est moindre par rapport aux paramètres de l'enroulement (inductance équivalente et inverse des carrés des fréquences de résonance), car leurs courbes présentent une grande convergence, surtout dans le cas de défauts radiaux mineurs (entre 5 mm et 10 mm) des disques 1 et 2 de l'enroulement. [124]

Ce chevauchement est perceptible dans les courbes, ce qui rend difficile la localisation des déplacements radiaux à l'aide de ces indices, alors qu'elle peut être réalisée à l'aide de la méthode proposée basée sur les paramètres du modèle avec une sensibilité acceptable. [124]

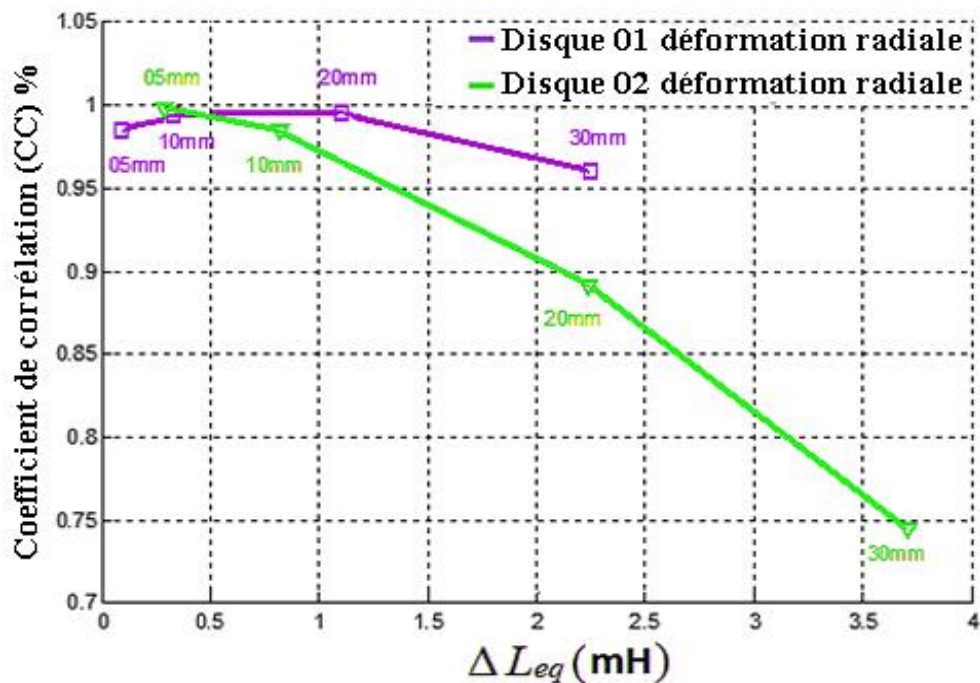


Figure IV.14 : CC en fonction de ΔL_{eq}

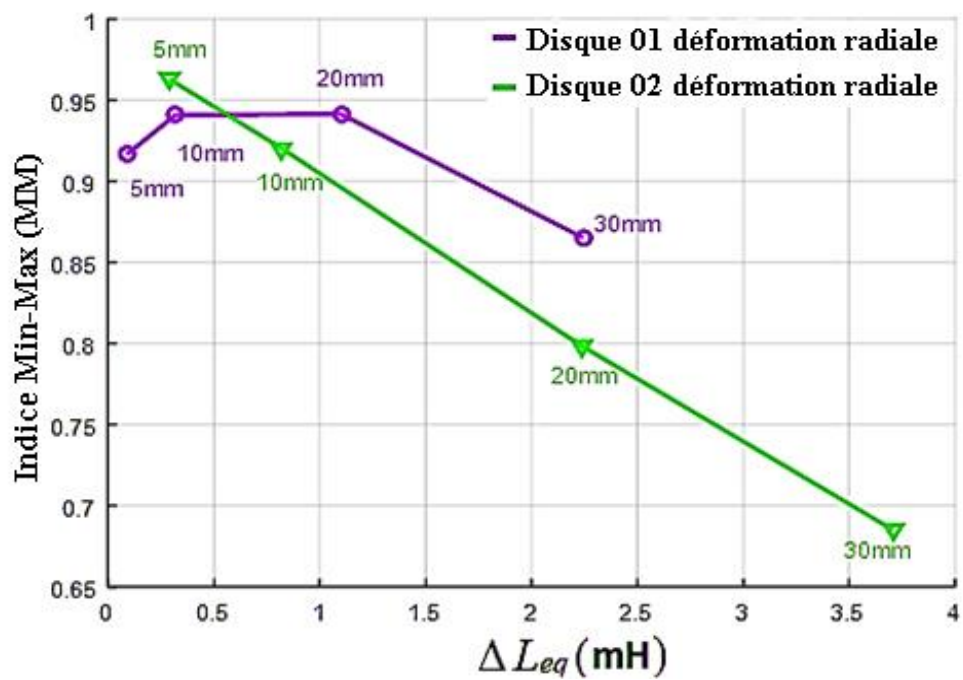


Figure IV.15 : MM en fonction de ΔL_{eq}

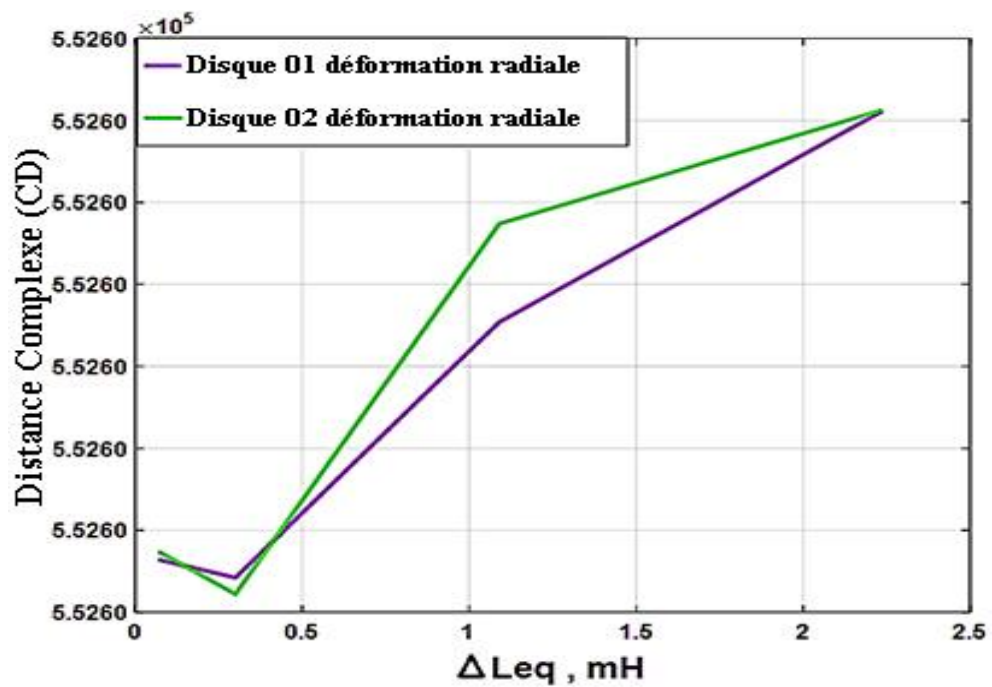


Figure IV.16 : CD en fonction de ΔL_{eq}

IV.6. Extraction de la capacité équivalente :

Dans la zone de la haute fréquence (HFR), l'effet est purement capacitif et est influencé par la capacité globale (C_{eq}) causée par les deux paramètres dominants qui sont les capacités C_s et C_g .

La capacité équivalente peut être calculer en utilisant l'équation suivante :

$$|Z| = \frac{1}{C_{eq}2\pi f} \quad (1)$$

$$C_{eq} = \frac{1}{|Z|2\pi f} \quad (2)$$

IV.6.1. Évaluation de la gravité des défauts radiaux

La **figure IV.6** montre que les capacités des deux disques diminuent lorsque la déformation radiale augmente. Les caractéristiques de la variation réciproque de l'indice ($\Delta\Psi_{ocnf}$) par rapport à ΔC_{eq} sont représentées sur la **figure IV.13**. D'une part, ses propriétés augmentent de façon monotone en fonction des mouvements du disque, d'autre part, les variations dans les deux disques sont séparées. Cependant, le taux de variation de la capacité équivalente en fonction de la déformation est différent pour les deux disques ce qui en fait un outil de diagnostic efficace.

Le Disque 1 présente une diminution plus graduelle de variation de la capacité équivalente en fonction de la déformation, tandis que le Disque 2 présente une diminution lente de 5mm jusqu'à 20mm puis il diminue rapidement.

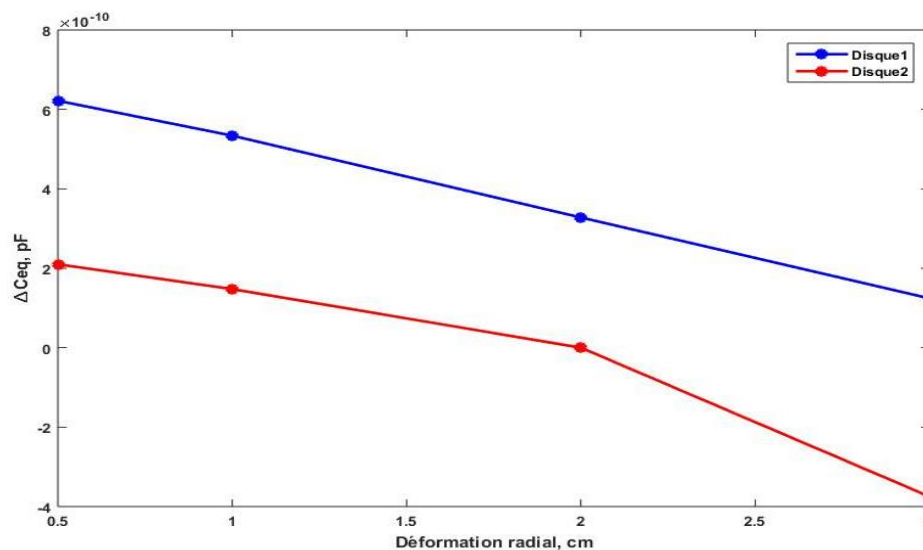


Figure IV.17 : Caractéristique de C_{eq} par rapport aux déplacements radiales.

IV.6.2. Localisation et évaluation de la gravité des déformations radiales

Afin de localiser des déformations radiales dans les enroulements des transformateurs et d'évaluer leur gravité, on commence par l'utilisation des propriétés de la somme de l'inverse du carré des fréquences naturelles par rapport à la variation de la capacité équivalente.

Cette méthode a la capacité de détecter de manière efficace la gravité des dommages. Pour chaque changement sur les disques 1 et 2, les réponses sont mesurées d'abord, puis les fréquences de résonance et les capacités équivalentes sont extraites pour calculer les indices et la variation des capacités équivalentes, comme le montre le tableau IV.3.

La méthode proposée est autonome par l'extraction directe des paramètres du modèle. Les caractéristiques de la variation réciproque de l'indice ($\Delta\Psi_{ocnf}$) par rapport à (ΔC_{eq}) sont représentées sur la **figure IV.7**. La relation entre $\Delta\Psi_{ocnf}$ et ΔC_{eq} est presque linéaire.

$$\Psi_{ocnf} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} \quad . \quad (3)$$

$$\Delta\Psi_{ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} \quad . \quad (4)$$

$\omega_{oci} = 2\pi O_{cnfi}$ la i -ème fréquence de résonance ;

Ψ_{ocnf} : somme des carrés inverses des fréquences naturelles;

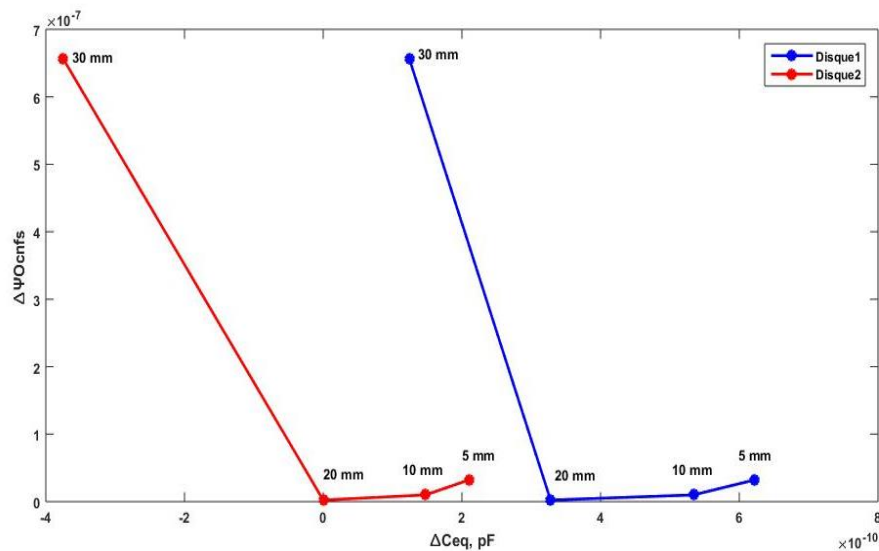


Figure IV.18 : Caractéristique de $\Delta\Psi_{ocnf}$ par rapport à ΔC_{eq} pour la sévérité des déplacements radiaux des disques 1 et 2.

Déplacement (mm)	Disc 1		Disc 2	
	$\Delta\Psi_{Ocnfs}$	ΔC_{eq} (pF)	$\Delta\Psi_{Ocnfs}$	ΔC_{eq} (pF)
5	0.0234e-13	35.792	0.0162e-13	35.380
10	0.0653e-13	35.704	0.0251e-13	35.318
20	0.1944e-13	35.498	0.1777e-13	35.170
30	0.3692e-13	35.295	0.3129e-13	34.795

Tableau IV.7 : Variation des $\Delta\Psi_{ocnfs}$ en fonction de ΔC_{eq} des déplacements radiaux.

Interprétation

Les deux graphiques représentent des analyses comparatives entre deux disques, "Disque1" (en bleu) et "Disque2" (en rouge), en fonction de différentes variables. Voici une interprétation détaillée de chaque graphique :

Premier graphique (Déformation radiale vs ΔC_{eq})

Axe des abscisses (x) : Déformation radiale (cm) Axe des ordonnées (y) : ΔC_{eq} (pF)

Ce graphique montre la variation de la capacité équivalente (ΔC_{eq}) en fonction de la déformation radiale pour les deux disques.

1. Disque1 (en bleu) :

- La capacité ΔC_{eq} diminue de manière linéaire avec l'augmentation de la déformation radiale.

2. Disque2 (en rouge) :

- La capacité ΔC_{eq} diminue également avec l'augmentation de la déformation radiale, mais le taux de diminution est plus prononcé que pour le Disque1.

Deuxième graphique (ΔC_{eq} vs $\Delta\psi_{Ocnfs}$)

Axe des abscisses (x) : ΔC_{eq} (pF) Axe des ordonnées (y) : $\Delta\psi_{Cnfs}$

Ce graphique montre la variation de $\Delta\psi_{Cnfs}$ en fonction de ΔC_{eq} pour les deux disques. Les points sont annotés avec les valeurs de déformation radiale (en mm).

Interprétation générale

- Les deux disques montrent une diminution de la capacité équivalente (ΔC_{eq}) avec l'augmentation de la déformation radiale, mais Disque2 montre une diminution plus rapide que Disque1.
- $\Delta \psi_{Cnfs}$ est fortement corrélé à ΔC_{eq} . Lorsque ΔC_{eq} est élevée, $\Delta \psi_{Cnfs}$ est également élevée pour les deux disques.
- Cependant, la relation entre ΔC_{eq} et $\Delta \psi_{Cnfs}$ est non linéaire, avec des chutes abruptes de $\Delta \psi_{Cnfs}$ pour des réductions spécifiques de ΔC_{eq} .

Ces analyses sont cruciales pour comprendre les propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés dans les disques.

IV.7. Comparaison des Trois Approches pour Analyser les Déplacements Radiaux :

Comparaison entre l'indice mathématique ; l'approche l'inductance équivalente L_{eq} et la capacité équivalente C_{eq} :

Approche 01 : Analyse Empirique et Observationnelle

Description

Afin de tester l'efficacité de l'approche proposée pour localiser et évaluer l'ampleur des déplacements radiaux, un déplacement radial sur le disque 01 (entre 10 mm et 20 mm) a été effectué. L'inductance équivalente (L_{eq}) et la somme des carrés inverses des fréquences naturelles (Ψ_{ocnf}) ont été extraites respectivement de la réponse des FRA ($L_{eq} = 46,9305$ mH, $\Psi_{ocnf} = 1,5955 \times 10^{-12}$). En utilisant les résultats obtenus dans le cas sain et dans le cas endommagé, on obtient $\Delta L_{eq} = 0,8395$ mH et $\Delta \Psi_{ocnf} = 1,55 \times 10^{-14}$.

Observations

- **Résultats préliminaires** : Les changements de L_{eq} et Ψ_{ocnf} indiquent un déplacement radial, fournissant des indicateurs précis de l'endommagement.
- **Avantages** :
 - Permet une détection, localisation et évaluation de la gravité des défauts de déplacements radiaux.
 - Utilise des paramètres facilement mesurables pour diagnostiquer l'état du disque.

Approche 02 : Analyse Basée sur les indices mathématiques

Description

En examinant les courbes des **figures IV.14, IV.15 et IV.16**, on remarque que les caractéristiques de ces indices peuvent être utilisées pour diagnostiquer (localisation et évaluation de la gravité) des déplacements radiaux, mais leur sensibilité est moindre par rapport aux paramètres de l'enroulement (inductance équivalente et inverse des carrés des fréquences de résonance). Les courbes présentent une grande convergence, surtout dans le cas de défauts radiaux mineurs (entre 5 mm et 10 mm) des disques 1 et 2 de l'enroulement.

Observations

- **Sensibilité moindre** : sensibilité réduite pour les défauts mineurs, rendant la localisation difficile.
- **Avantages** :
 - Peut fournir une vue d'ensemble des tendances globales des déplacements radiaux.
- **Limites** :
 - Difficulté à diagnostiquer des défauts mineurs.
 - Moins précis que les paramètres de l'enroulement.

Approche 03 : Analyse de la Capacité équivalente et de $\Delta\psi Cnfs$

Description

- **Variation de ΔCeq avec la déformation radiale** : Les deux disques montrent une diminution de la capacité équivalente (ΔCeq) avec l'augmentation de la déformation radiale, mais Disque2 montre une diminution plus rapide que Disque1.
- **Corrélation entre ΔCeq et $\Delta\psi Cnfs$** : $\Delta\psi Cnfs$ est fortement corrélé à ΔCeq . Lorsque ΔCeq est élevée, $\Delta\psi Cnfs$ est également élevée pour les deux disques.

Observations

- **Avantages** :
 - Permet de comprendre les propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés.
 - Utilise des paramètres électriques mesurables pour diagnostiquer l'état des disques.

- **Limites :**
 - Nécessite des mesures précises de ΔC_{eq} et $\Delta \psi_{Cnfs}$.

Comparaison Générale

1. Approche 01 :

- **Avantages :** Fournit des indicateurs précis pour localiser et évaluer les déplacements radiaux. Utilise des mesures directes des paramètres électriques.
- **Limites :** Analyse complexe des réponses des FRA.

2. Approche 02 :

- **Avantages :** Offre une vue d'ensemble des tendances et des comportements des disques.
- **Limites :** Moins sensible et précis pour diagnostiquer des défauts mineurs. Chevauchement des courbes complique l'interprétation.

3. Approche 03 :

- **Avantages :** Permet une compréhension approfondie des propriétés mécaniques et électriques des disques. Corrélation forte entre les paramètres mesurés.
- **Limites :** Nécessite des mesures précises et peut être complexe à interpréter en raison de la relation non linéaire.

Conclusion de la comparaison Générale

Chacune des trois approches présente des avantages et des inconvénients distincts.

L'**Approche 01** est idéale pour des analyses précises afin de détecter, localiser et évaluer la gravité des défauts radiaux des enroulements des transformateurs, bien qu'elle soit complexe.

L'**Approche 02** fournit une vue d'ensemble mais manque de sensibilité pour localiser les défauts mineurs.

L'**Approche 03** offre une compréhension détaillée des propriétés électriques et mécaniques, nécessitant toutefois des mesures précises pour la localisation de défauts dans les enroulements des transformateurs.

Conclusion :

Ce chapitre présente trois méthodes de diagnostic de défauts radiales des enroulements des transformateurs qui utilisent les paramètres physiques de l'enroulement l'inductance équivalente L_{eq} , la capacité équivalente C_{eq} et les indices mathématiques pour détecter, localiser et évaluer la gravité de défauts radiales.

Dans la méthode des indices mathématique, un ensemble des indices ont été calculés, représentés par le coefficient de corrélation, l'indice maximum-minimum et la distance complexe

Dans l'approche dans laquelle l'élément physique L_{eq} dans l'enroulement a été étudié en fonction des déplacements radiales, sur les disques 1 et 2 de l'enroulement.

Ce chapitre présente notre contribution avec une méthode pour détecter et évaluer simultanément la gravité des déformations géométriques radiales dans les enroulements de transformateur. Cette méthode utilise les caractéristiques de la somme inverse du carré des fréquences naturelles en fonction de la variation de la capacité équivalente pour localiser et évaluer la gravité des dommages dus aux déplacements radiaux. Cette méthode est automatisée grâce à l'extraction directe des paramètres de réponse en fréquence.

L'analyse de la sensibilité aux dommages a été réalisée en comparant l'utilisation des paramètres du modèle physique à celle des indices mathématiques. Les résultats montrent que la détection et l'évaluation des défauts radiaux sont plus précises et plus sensibles lorsqu'elles reposent sur les paramètres du modèle plutôt que sur les indices mathématiques.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est de développer une approche de diagnostic non invasive et non destructive pour la détection, la localisation et l'évaluation de la gravité des défauts des enroulements des transformateurs. Pour cerner cet objectif notre mémoire est subdivisé en 04 chapitres, le premier chapitre concerne une étude bibliographique portant sur la généralité, les contraintes et les défauts des transformateurs de puissance. Le deuxième chapitre a pour objet de maintenance et les méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance. Dans le troisième, nous vous présentons la méthode de diagnostic l'analyse de la réponse fréquentielle FRA et leur application dans les transformateurs de puissance et les circuits RLC. Pour le quatrième chapitre notre étude est passée par deux phases, la première phase est une simulation dans le programme MATLAB et la deuxième phase, nous sommes appuyés sur une étude antérieure de [124] THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN AUTOMATIQUE Contribution à la conception d'une plateforme embarquée sans fils pour la détection de défauts dans les transformateurs, Amara Abderrazak 2020/2021, pour développer une approche de localisation des défauts dans un enroulement réel avec une étude expérimental,

Par conséquent, notre étude est basée sur l'utilisation d'un autre paramètre physique qui est la capacité équivalente (*C_{eq}*). Chacune des trois approches présente des avantages et des inconvénients distincts.

L'**Approche 01** est idéale pour des analyses précises afin de détecter, localiser et évaluer la gravité des défauts radiales des enroulements des transformateurs, bien qu'elle soit complexe.

L'**Approche 02** fournit une vue d'ensemble mais manque de sensibilité pour localiser les défauts mineurs.

L'**Approche 03** offre une compréhension détaillée des propriétés électriques et mécaniques, nécessitant toutefois des mesures précises pour la localisation de défauts dans les enroulements des transformateurs.

L'analyse de la sensibilité aux dommages a été réalisée en comparant l'utilisation des paramètres du modèle physique à celle des indices mathématiques. Les résultats montrent que la détection et l'évaluation des défauts radiaux sont plus précises et plus sensibles lorsqu'elles reposent sur les paramètres du modèle plutôt que sur les indices mathématiques.

- [1]. Bernard MULTON, « Modèles électriques du transformateur électromagnétique »
Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan { Revue 3EI décembre 1997 }.
- [2]. N.KHELIFA « Chef Division méthodes maintenance postes HT» {Par admin 12/04/2024 }.
<https://seniadz.net/index.php/poste-hta-bt-installation-fonctionnement-et-maintenance/>.
- [3]. Muhammad Azizi Abdul Rahman; Halimatun Hashim; P.S. Ghosh «
FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS OF A POWER TRANSFORMER ». Electrical Engineering Department, College of Engineering, University Tenaga Nasional.
International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2018 Vol. 3, Issue 2, ISSN No. 2455-2143, Pages 16-20 Published Online June 2018 in IJEAST (<http://www.ijeast.com>).
- [4].L. Bouchaoui*, K. E. Hemsas*, S. Belahneche*, *LAS, Université Ferhat Abbas, Sétif,
« Laboratoire d'analyse Régionale - Sonelgaz- GRTE – SETIF ».
« <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/2690> » - 4-oct-2018.
- [5]. FRANÇOIS MILSANT, « Électrotechnique machines électriques transformateurs électriques » - 2015-2016.
- [6]. Omicron electronics 'FRAnalyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662
Version du manuel : FRA.FR, 2006.
- [7]. Sonelgaz DEPT GRTE formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance
« Méthodes de diagnostic de transformateur E.cottens janvier 2008 ».
- [8]. FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005.
- [9]. Formation transformateur « Formation transformateur de puissance» 2011 .
- [10] .SONELGAZ-ALGÉRIE, « Documentation des accessoires » 2007.
- [11] .A.CAPLIEZ P.HEINY. « Technologie et schéma » tome 2. { les Editions Fourcher , 1978 , Tous Droits Réservés }.
- [12] . Essais sur les transformateurs. (www.sitelec.com/essai_transformateur.htm). 11 octobre, 2023.
- [13] .SONELGAZ DIRECTION DE L'ÉNERGIE [GEC ALSTHOM].
<https://www.sonelgaz.dz/fr/category/nos-contacts> .
- [14] . support de cours, «TECHNOLOGIES DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES HTB DES POSTES ». Présenté par Samir BERKANE - 23 / 09 / 2017
- [15] . N.BERGER. « liquides isolantes en électrotechnique caractéristiques des propriétés » [D 2 471] - 10 mai 2002 .
- [16] . T.O.ROUSE. « Mineral isolating oil in transformers »IEEE Electrical insulation. Magazine, vol. 14, n3, may/June – 24/09/2020 .
- [17] . Christophe Ferrier. « Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissances-recherche d'un mélange optimal ». Thèse de doctorat. L'école centrale de Lyon (Année 2005).
- [18] . BENAMAR Rabah, « Influence du nombre de claquages sur les propriétés de l'huile de transformateur » Mémoire de Magister Soutenu publiquement le 26 juin 2008.

- [19] . N. BERGER, M. RANDOUX, G. OTTMANN et P. VUARCHEX, « Revue des isolants liquides », Electra(F), n 171, Avril 1997, pp. 32-57.
- [20] . A.BONDEAU , « Contribution à l'étude de la viscosité des milieux denses désordonnés dans la zone de transition vitreuse. Critique de la relation de Vogel-Fulcher » Thèse de doctorat, université de Lyon, 1985.
- [21] . S. Abdi. « Influence du vieillissement thermique sur des propriétés de l'huile de transformateur », mémoire de Magistère, ENP, Alger, 2002.
- [22] . N.BERGER. « Liquide isolant en électrotechnique-présentation générale» Technique de l'ingénieur », traité D2470.MAI 2002.
- [23] . Norme ISO 3016, Produits pétroliers – Détermination du point d'écoulement, Aout 1994.
- [24] . N.Aouchar, C.Bekhaled. « Application des systèmes hybrides neuro-flou au diagnostic des huiles de transformateur », projet de fin d'études, Département Electrotechnique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, 2009.
- [25] . NYNAS. Guide des huiles isolantes. (www.nynas.com/naphtenics) - December 2013.
- [26] . B.P. KANG.«Thermal dependency of viscosity, power factor and ion content of electrical insulating oil», IEEE transactions on power apparatus and Systems, (USA) 9, September 1965.
- [27] . B. FALLOU, « Quelques notion relative à l'humidification des huiles isolantes usagées », Bulletin LCIE, n 35, Avril 1963, pp. 330-335.
- [28] . B.Gustavsen, A. Semlyen. « Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients' ». IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.
- [29] . Solutions de diagnostic et de test pour les transformateurs de puissance «www.omicron.at ou www.omicronusa.com» <https://www.omicronenergy.com/fr/application/tests-hors-ligne/transformateur-de-puissance/2022>.
- [30] . Ahmad AHMAD, «Contribution a la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence » Thèse de doctorat, L'ECOLE CENTRALE DE LYON, 1992.
- [31] .Otmane-Cherif T, N.Mufidzada, N.Benamrouche «Influence of the Number of the nodes in the Windings Equivalent circuit o the Surge voltages in transformers», international Review on Modeling and simulation, Italy, vol.1, N°2, pp 78-84, October 2008.
- [32] . A. LEFEVRE –« Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires » -2006.
- [33] . Andrianirina RAKOTOMALALA, « contribution a la modélisation des transformateurs de puissance en régime haute fréquence » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Le 27 octobre 2006.
- [34] . Charles Sweetser, B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail, 'Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering' Version 1.0, 01/2003.
- [35] . Megger 'FRAX 101 Analyzeur de réponse de la fréquence de balayage' FRAX101_DS_fr_V01- 2023.
- [36] . Bergman, C. 'SFRA- an application that creats cutomer value?'Thesis Department Electrical Enginnering Sweden, 2006.

- [37] .DICK,E.P.EVEN,C.C. «transformer diagnostic testing by frequency response analysis». IEEE Transactions On Power Apparatus and systems, Toronto, v.97,n.6.1978.
- [38] . BIRLASEKARAN Megger 'FRAX 101 Analyzeur de réponse de la fréquence de balayage' FRAX101_DS_fr_V01 - 2023
- [39] . PLEITE, J. et al. «Modeling the transformer frequency response to develop advanced maintenance techniques». In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE (PSCC'02), 2002, Sevilla, España. Proceedings... [S. 1], 2002.
- [40] . Gueller.B, Veverka.A, «Processus impulsionnelles dans les machines électriques», Energy, Moscou, 1973.
- [41] .K.Ragavan and L.Satish, «Localization of changes in a model Winding Based on Terminal Measurement », IEEE transaction on power delivery, vol.22.3, July 2007.
- [42]. MSA Minhas. Et al., 'FAILURES IN POWER SYSTEM TRANSFORMERS AND APPROPRIATE MONITORING TECHNIQUES'. High Voltage Engineering Symposium. Conférence Publication No. 467, 0 IEE, 1999.
- [43]. Jean Sanchez et al., 'Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance'. Université de Grenoble, 2011. Français. ffnnt: 2011- GRENT031ff. fftel-01017179f.
- [44]. S. Tenbohlen, et al., 'ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMER RELIABILITY XVII' International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [45]. A. Bossi, et al., 'An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service' – Final report of CIGRE Working Group 12.05, Electra, No.88, pp. 22 – 48,1983.
- [46]. CIGRÉ Brochure., 'Life Management Techniques for Power Transformers', No. 227, June 2003.
- [47]. Daniel Racoceanu et al., 'Contribution à la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant.l'Intelligence Artificielle. Automatique / Robotique'. Université de Franche-Comté, 2006.
- [48]. Basseville, M. et M-O. Cordier., 'Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques : approche complémentaire du traitement de signal et de l'intelligence artificielle'. Rapport INRIA, N°2861. 1996
- [49]. Wang M, et al., 'Review of condition assessment of power transformers in service'. IEEE Electr Insul Mag 18(6) :12–25 2002.
- [50]. Combacau, M. et al., 'Commande et Surveillance des Systèmes a Évènements Discrets Complexes : Application aux Ateliers Flexibles', Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse - 15 Nov 2005.
- [51]. Devauchelle, G. et al., 'Diagnostic mécanique des fatigues sur les structures soumises à des vibrations en ambiance de travail'. Thèse de Doctorat, Université de Paris IX Dauphine - 8novembre 1999.
- [52]. Toguyeni, A.K.A. et al., 'Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière'. Thèse de doctorat, Université de Lille – 29 sep 1993.
- [53]. Poulard, H. et al., 'Statistiques et réseaux de neurones pour un système de diagnostic', Application au diagnostic de pannes automobiles“, Thèse de Doctorat, LAAS, Toulouse, France-1996.
- [54]. Cussenot, C. et al., 'Surveillance et diagnostic de la chaîne de dépollution d'une automobile', Thèse de doctorat, Université de Rennes 1 – 1996 .

- [55]. Evsukoff, A. et al., 'Raisonnement approché pour la surveillance des procédés', Thèse de Doctorat 1998, INPG, Grenoble.
- [56]. Weber, P. et al., 'Diagnostic de procédés par l'analyse des estimations paramétriques de modèles de représentation à temps discret', Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble - 16 Dec 2015.
- [57]. Zhang, Q., et al., 'Identification et Surveillance de systèmes Dynamiques', Habilitation à diriger les recherches, Université de Rennes1, Institut de Formation Supérieure en Informatique et en Communication - 21 Novembre 2008.
- [58]. Combastel, C. et al., 'Méthodes d'aide à la décision pour la détection et la localisation de défauts dans les entraînements électriques', Thèse de Doctorat INPG, Grenoble - 17 Dec 2007.
- [59]. Lefebvre, D., et al., 'Contribution à la modélisation des systèmes dynamiques à événements discrets pour la commande et la surveillance', Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Franche Comté/ IUT Belfort – Montbéliard - 2 Mar 2006.
- [60]. Villemeur, A., et al., 'Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Edition Eyrolles', Collection DER-EDF, Volume 67 - parution le 01/09/1988 .
- [61]. Dubuisson, B., et al., 'Diagnostic et reconnaissance des formes', Paris, Edition Hermès. Dubuisson, 2001.
- [62]. Toguyeni, A.K.A., et al., "Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière", Thèse de doctorat, Université de Lille – 1998.
- [63]. Zwingelstein, G. 'Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels'. Editions Hermès 1995.
- [64]. Gertler, J.J., 'Survey of model-based failure detection and isolation in complexe systems'. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 8, N° 6, p. 3-11- January 1989
- [65]. Sparling BD. et al., 'Moving forward from monitoring to diagnostics'. IEEE-PES transmission and distribution conference and exposition, Atlanta, pp 960–963 - December 2002.
- [66]. Villemeur, A., et al., 'Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels'. Edition Eyrolles, Collection DER-EDF, Volume 67 – 1988.
- [67]. Dash, S. et al., 'Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems'. Proceedings of the Conference on Process Systems Engineering Computing & Chemical Engineering, Keystone, Colorado, pp. 785-791 – 2000.
- [68]. Dubois, D. et S. Gentil., 'Intelligence Artificielle et Automatique', Revue d'Intelligence Artificielle, Vol. 8, N°1, pp. 7-27 – 2005.
- [69]. Katsillis, G., M.J. Chantler. 'Can dependency-based diagnosis cope with simultaneous equations?' Working notes of the 8th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'97, Mont-Saint-Michel, France – 1997.
- [70]. Frank, P.M. et al., 'Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy'. A survey and New Results, *Automatica*, Vol. 26, pp. 459-474 - Volume 26, Issue 3, May 1990, Pages 459-474 .
- [71]. Ploix, S. et C. Follot., 'Fault Diagnosis reasoning for set-membership approaches and application', *IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC)*, Mexico City, Mexique.2012

- [72]. Tromp, L., et al., ‘*Surveillance et diagnostic de systèmes industriels complexes : une approche hybride numérique/symbolique*’, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1 – 1997.
- [73]. Zemouri, R., ‘*Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance*’, Thèse de Doctorat, Université de Franche Comté, Besançon -2003.
- [74]. Juan David Zorrilla Henao et al, ‘Techniques de diagnostic des transformateurs de puissance : un examen critique’ Université de la Vallée. Faculté d'ingénierie. Cali, Colombie <http://dx.doi.org/10.4067/S0718> - 2019.
- [75]. M. Duval. ‘Un examen des défauts détectables par l'analyse du gaz dans l'huile dans les transformateurs’. Magazine d'isolation électrique IEEE. Vol.18, numéro 3, p. 8-17. 2002. DOI : 10.1109 / MEI.2002.1014963.
- [76]. JR Secue, EE Mombello et CV Cardoso. ‘Examen de l'analyse de réponse de fréquence de balayage SFRA pour les déplacements et la déformation d'enroulement d'évaluation dans les transformateurs de puissance’. Transaction IEEE en Amérique latine. Vol.5, numéro 5, p. 321-328. 2007. DOI : 10.1109 / TLA.2007.437852.
- [77]. Weed, J.M. “Abnormal Voltages in Transformers”. A IEE Trans., Vol. 34, pt. II, 1915, pp. 2197 2236.
- [78]. M. Wang, et al., ‘Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range’. Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, no. 3, pp. 1930–1938, 2005.
- [79]. A. David L. Alvarez A., ‘Modèle de transformateur de distribution pour l'analyse de la réponse en fréquence’ Thèse Magister of science octobre 2013.
- [80]. Xiaozhen Zhao, et al., ‘High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies’ [International Journal of Electrical Power & Energy Systems doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.010](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.010).
- [81]. Zhang ZW, et al., ‘Finite-element modeling for analysis of radial deformations within transformer windings’. IEEE Trans Power Delivery 2014; 29:2297–305.
- [82]. Abu-Siada A. et al., ‘High frequency transformer modelling using state space representation for FRA studies’. In: 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED); 2017. p. 422–6.
- [83]. Zhang H, et al., ‘Double-ladder circuit model of transformer winding for frequency response analysis considering frequency-dependent losses’. IEEE Trans Magn 2015; 51:1–4.
- [84]. Pham DAK, Gockenbach E. ‘Analysis of physical transformer circuits for frequency response interpretation and mechanical failure diagnosis’. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2016; 23:1491–9.
- [85]. Abeywickrama N, Serdyuk YV, Gubanski SM. ‘High-frequency modeling of power transformers for use in frequency response analysis (FRA)’. IEEE Trans Power Del 2008; 23:20429.
- [86]. Mukherjee P, Satish L. ‘Construction of equivalent circuit of a single and isolated transformer winding from FRA data using the ABC algorithm’. IEEE Trans Power Del 2012; 27:963–70.
- [87]. Shabestary MM, et al., ‘Ladder network parameters determination considering nondominant resonances of the transformer winding’. IEEE Trans Power Del 2014; 29:108–17.

- [88]. Liang et al., 'Modeling of transformer windings under very fast transient over voltages'. IEEE Trans Electromagn C. 2006; 48:621–7.
- [89]. Shintemirov A, et al., 'A hybrid winding model of disc-type power transformers for frequency response analysis'. IEEE Trans Power Delivery 2009; 24:730–9.
- [90]. Gustavsen B, Portillo A. 'A black-box approach to interfacing white-box transformer models with electromagnetic transients programs'. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition; 2014. p. 1-5
- [91]. Hashemnia N, et al., 'Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics – Part 1: axial displacement simulation'. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2015; 22:556–63.
- [92]. Hashemnia N, Abu-Siada A, Islam S. Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics – Part 2: radial deformation simulation. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2015; 22:564–70.
- [93]. Liu S, et al., 'Diagnosis of transformer winding faults based on FEM simulation and on-site experiments'. IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2016 ; 23 :3752–60.
- [94]. Carlos González García., 'Procédure de modélisation basée sur l'analyse de la réponse en fréquence et son application dans des transformateurs de puissance triphasés pour sa caractérisation et son diagnostic'. Université Carlos III de Madrid 2012., <http://hdl.handle.net/10016/13987>.
- [95]. E. Rahimpour, J. et al., 'Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings' IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 2, pp. 493–505, Apr. 2003.
- [96]. Ragavan, K., Satish, L.: 'Localisation of changes in a model winding based on terminal measurement'. IEEE Trans. Power Deliv., 2007, 22, (3), pp. 1557–1565
- [97]. Toudji M, et al., 'Determination of Winding Lumped Parameter Equivalent Circuit by Means of Finite Element Method'. IEE T Magn. 2017 ; 53 :1 -4.
- [98]. Amara A, Gacemi A, Houassine H, Chaouche MS. A novel methodology for high-frequency lumped equivalent circuit of an isolated transformer winding construction based on frequency response analysis signal morphology interpretation. IET Electr. Power Appl. 2021 ;1–15. <https://doi.org/10.1049/elp2.12013>.
- [99]. A. Amara et al 'Autonomous Diagnosis of Radial Displacements for Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA), 2nd International Conference on Electronics and Electrical Engineering (IC3E 2020) Bouira, ALGERIA.
- [100]. MELO, Leonardo. 'Application de techniques statistiques au test d'analyse de la réponse en fréquence dans les transformateurs de puissance'. Université nationale de technologie, Argentine, 2012, p. 33-56.
- [101]. Cigré WG A2.26: 'Mechanical condition assessment of transformer windings: guidance, FRA standardization, further improvements', 2008.
- [102]. Jayasinghe, J.A.S.B.; et al., 'Winding Movement in Power Transformers: A Comparison of FRA Measurement Connection Methods'. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2006, 13, 1342–1349
- [103]. S Ryder, S Tenbohlen: '*A comparison of the swept frequency and impulse response methods for making frequency response analysis measurements*', Doble Conference, 2003.

- [104]. Shah, K.R., Ragavan, K., 'Assessing mechanical deformations in two winding transformer unit using reduced-order circuit model'. *Electr. Power Energy Syst.* 79, 235–244 (2016).
- [105]. Shah, K., Ragavan, K., 'Estimation of transformer winding capacitances through frequency response analysis – an experimental investigation'. *Int. J. Emerg. Elec. Power Syst.* 14(6), 549–559 (2013).
- [106]. Huan, L., Ziwei, Z., 'Equivalent gradient area-based fault interpretation for transformer winding using binary morphology'. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 24(3) (2017).
- [107]. Mukherjee, P., Satish, L., 'Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding – an analytical approach'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 31(6) (2016).
- [108]. Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A., 'Transformer Engineering: Design, Technology and Diagnostics'. 2nd ed. CRC Press (2012).
- [109]. Dent, B.M., Hartil, E.R., Miles, J.G., 'A method of analysis of transformer impulse voltage distribution using a digital computer'. *Proc. IEEE A.* 105(23), 445–459 (1958).
- [110]. Miki, A., Hosoya, T., Okuyama, K., 'A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings'. *IEEE Trans. Power Syst. PAS-97(3)*, 930–939 (1978).
- [111]. Soysal, O., 'A method for wide frequency range modeling of power transformers and rotating machines'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 8(4), 1802–1810 (1993).
- [112]. Pramanik, S., Satish, L., 'Estimation of series capacitance for a three-phase transformer winding from its measured frequency response'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 28(4), 2437–2444 (2013).
- [113]. Chaouche, M.S., Houassine, H., 'BA to construction of equivalent circuit of a transformer winding from frequency response analysis measurement'. *IET Electr. Power Appl.* 12, 728–36 (2018).
- [114]. Mahamat, H.B., Jean, J., 'Modélisation des inductances planaires intégrées'. Université Jean Monnet, Saint Etienne, Français (2014).
- [115]. Gonzales, J., Mombello, E., 'Automatic detection of frequency ranges of power transformer transfer functions for evaluation by mathematical indicators'. In: Gonzales, J. C., Mombello, E (eds.) *IEEE 6th Power Energy Society (PES) Transmission and Distribution: Latin America- 2012*
- [116]. Velasquez, J., Kolb, D., 'Identification of transformer-specific frequency sub-bands as basis for a reliable and automatic assessment of FRA results'. *Condit. Monit. Diagn. Conf. (CMD)*, Tokyo, 1–6 (2010).
- [117]. Ragavan, K., et al., 'Localisation of changes in a model winding based on terminal measurement'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 22(3), 1557–1565 (2007).
- [118]. Jafar Nosratian, A., Saeed, S., 'On the accuracy of detailed model inductance matrix estimation for air core winding'. *Arch. Elect. Eng.* 66(4), 787–799 (2017).
- [119]. Zhongdong, W., Jie, Li., 'Interpretation of transformer FRA responses: Part I: influence of winding structure'. *IEEE Trans. Power Deliv.* 24(2) (2009).
- [120]. Ahour, N.J., Seyedtabaai, S.: Modified transformer winding ladder network model to assess non-dominant frequencies. *IET Electr. Power Appl.* 11(4), 578–585 (2017).

[121]. Mukherjee, P., Satish, L., 'Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding an analytical approach'. IEEE Trans. Power Deliv. 27, 963–70 (2012).

[122]. Le grand livre de la maintenance Concepts, démarches, méthodes, outils et techniques
Éditeur: AFNOR , Auteur: Bouami Driss , Parution : 25/04/2019

[123]. La Maintenance Industrielle, une fonction en mutation et des compétences en évolution
Abdelhafid RACHIDI (1) - Abdennebi TALBI(2) et Abdellah KHATORY(2) Thème : ingénierie de la maintenance industrielle : doctorant au Laboratoire de Productique, Energétique et Développement Durable (LPE2D) ; Hafid_rachidi@live.fr (2) : Professeur à l'Ecole Supérieure de Technologie de Fès, Route d'Imouzzer – BP2427, Fès Abdennebi_talbi@yahoo.fr ;
Abdel.khatory@gmail.com - 17 mai 2020.

[124]. THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN AUTOMATIQUE Contribution à la conception d'une plateforme embarquée sans fils pour la détection de défauts dans les transformateurs , Amara Abderrazak 2020/2021.