الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
et de l'Informatique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Option : Réseau Électrique

Thème

Analyse et diagnostic de la déformation des enroulements du transformateur par la technique d'analyse de la réponse fréquentielle FRA.

Proposé et dirigé par :

⇨ *Dr. Houassine Hamza*

Préparé et présenté par :

⇨ *LARIS MOHAMED*

⇨ *MEGATELI AHMED AMINE*

Année-Universitaire 2014-2015

Remerciement

Tout d’abord, Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m’avoir appris ce que J’ignorais, de m’avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l’accomplissement de cette thèse.

J’adresse de chaleureux remerciements au directeur de thèse monsieur M. HOUASSINE Hamza, Docteur à l’université Yahia Fares de Médéa pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail.

J’adresse de sincères remerciements aux membres de l’aboratoire LREA ; de l’université de Médéa ; les docteurs : D.Boudana, S.Moulahoum, N.Kabache, O.Bouchida, A.Abbadi, etS.Boulekhrachef et les doctorants au laboratires LREA,Mr.Ben yamina, M.Sahnoune, A.Chanane.

Je voudrais remercie les membres du jury pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l’amélioration de la qualité du manuscrit et l’essor vers de nouvelles perspectives.

Je remercie également tous les enseignants de département d’électrotechnique de l’université Yahia Fares de Médéa qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

Enfin, je ne peux oublier de remercier nos familles pour leur soutien au cours de ces Cinq années et sans lesquels nous n'en serais pas là aujourd'hui.

Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents:

Grâce à ses tendres encouragements et ses grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mon cher frère et mes très chères belles sœurs.

A mon cher oncle : el hadje, saada.

A la famille LARIS.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues.

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

LARIS MOHAMED.

Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A maman:

Grâce à ses tendres encouragements et sa grands sacrifices, elle a pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers elle.

Je prie le bon Dieu de la bénir, de veiller sur elle, en espérant qu'elle serait toujours fiers de moi.

A mon papa: Que le bon dieu t'accueillera au sein de son paradis eternel, nous prions pour toi tous les jours.

A mon cher frère : Ayoub, Zouhir, Rafik.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect, de l'amour et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont pas cessé de me porter.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond
Amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et
Vous accorder santé, longue vie et bonheur.

Je présente mes sincères dédicaces à ma famille proche : notamment ma tente Khadîdja et ma cousine Fatima pour ses soutenance de toute l'année et toute ma famille MEGATELI ET MADANI.

A tous mes amis et mes collègues

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

MEGATELI AHMED AMINE

الملخص

هذا العمل هو دراسة ونمذجة للفات محولات الكهرباء لتشخيصه. حيث تم اعتماد لف، تم تقسيمه إلى5 اقراص كل قرص يحتوي على 30 حلقة ذو قطر متوسط 178ملم.

بعد التحقق من صحة النموذج المعتمد،، عملنا دراسة تشخيصية للف المحولات لدراسة الأعطال المختلفة في لفائفه يعتمد على تقنيات تحليل تردد ، وتناقش النتائج التي تم الحصول عليها. تستخدم هذه النتائج كقاعدة البيانات للتطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية ، والتي استعملنها من خلال البرامج باستخدام مطلاب لتشخيص و تحديد مكان الخطأ في لف المحول

وتم دراسة تطور العطب في خلية واحدة تحتوي(200 حلقة) وضع برنامج باستعمال مطلاب لتحديد نسبة العطب.

مفتاح الكلمات: المحولات، التشخيص، تحليل التردد، الشبكات العصبية الاصطناعية.

Résumé

Ce travail est une étude et modélisation des enroulements du transformateur en vue de son diagnostic. Et cette enroulement discrétise en 5 disque chaque disque 30 tour de 178 mm.

Apres avoir validé le modèle adopté, nous avons présenté une étude de diagnostic de l'enroulement du transformateur. Pour étudier les différentes défaillances de l'enroulement en se basant sur les techniques d'analyse de la réponse fréquentielle (FRA), les résultats obtenus sont discutés. Ces résultats sont utilisés comme base de données pour l'application de réseaux de neurones artificiels (RNA) que nous avons développé via des programmes sous MATLAB pour le diagnostic et la localisation de défaut dans un enroulement de transformateur.

A étudié l'évolution des défauts dans une seule cellule contient (200 spires) à partir d'un programme matlab pour détecter le type et pourcentage et degré de défaut.

Mot clés : Transformateur, Diagnostic, Analyse fréquentielle, Réseaux de neurones artificiels.

Abstract

This work is a study and modeling of the transformer windings for diagnosis. And the winding was divided into 5 disks each disk contains 30 episodes with an diameter average of 178 mm.

After the validation of model adopted, we presented a study of diagnosis of the winding transformer. To study the different failures of the winding is based on the techniques of

analysis frequency (FRA), the results are discussed. These results are used as a data base for the application of artificial neural networks (RNA) that we have developed through programs of the MATLAB for the diagnosis and localization of fault in a winding the transformer.

He studied the evolution of defects in a single cell Contains(200 episodes)from a matlab program to detect the type and percentage and degree of fault.

Key word: transformer, Diagnosis, analysis frequency, Artificial neural networks.

Sommaire

LISTES DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ABRIVIATION.

INTRODUCTION GENERALE…….. 1

Chapitre I : Transformateur, défaut et diagnostic.

I.1. Introduction……. 4

I.2. Transformateur de puissance……. 4

I.3. Constitution générale d'un transformateur……. 4

I.3.1. Circuit magnétique……. 5

I.3.1.a). Type cuirassé……... 5

I.3.2.b). type à colonnes…… 6

I.3.2. Les enroulements…… 6

I.4. L'isolation dans les transformateurs de puissance……. 7

I.4.1. Isolation cellulosique……. 7

I.4.2. Isolation liquide…… 7

I.5. Principe de fonctionnement…… 8

I.6. Régimes de fonctionnement…….. 9

I.6.1. Régime de surcharge……... 9

I.6.2. Régime déséquilibre…… 9

I.6.3. Régime transitoire…….. 9

I.7. Défauts fréquents dans les transformateurs…… 9

I.7.1. Défaut d'isolement de la partie active……. 9

Sommaire

I.7.2. Amorçage diélectrique entre spires…….. 10

I.7.3. Court-circuit entre spires…….. 11

I.7.4. Décharges Partielles…… 11

I.7.5. Coupure du circuit électrique…….. 12

I.7.6. Déformation géométrique des enroulements……... 12

I.8. Techniques de diagnostic défauts dans les transformateurs…… 13

I.8.1. Analyse d'huile……... 13

I.8.2. Mesures diélectriques…….. 14

I.8.3. Analyse des furanes…… 14

I.8.4. Mesures électriques…… 14

I.8.4.1. Mesure du courant d'excitation…… 14

I.8.4.2. Mesure de rapport de transformation…….. 15

I.8.4.3. Mesure de la résistance d'enroulements…….. 15

I.8.4.4. Mesure de la réactance de fuite…… 15

I.9. Conclusion……... 15

Chapitre II : Modélisation fréquentielle du transformateur et analyse FRA.

II.1. Introduction…… 16

II.2 Définition …….. 16

II.3. Buts de la FRA……. 17

II.4. Utilisation des tests FRA……. 17

II.5. Détection de défaut par FRA……..... 18

II.6. Principe de la méthode……. 19

II.7. Les Modèles fréquentielles du transformateur…… 20

II.7.1. Le modèle universel EMTP ……..... 20

II.7. 2. Le modèle de RESEL…….. 22

II.7.3. Modèle de LEON……..... 23

II.7.4. Modélisation par l'analyse modale……. 25

II.7.5. Modélisation par la théorie de lignes…… 26

II.7.6. Méthodes utilisant des transformées ou des circuits……... 27

II.8.Modèle adopté pour le transformateur sans la prise en compte du noyau……. 28

II.9. Conclusion…… 30

Chapitre III: Généralité sur les réseaux de neurones.

III.1. Introduction…… 31

III.2. Historique sur les réseaux de neurones …… 31

III.3. Quelques domaines d'applications ……... 32

III.4. Le neurone artificiel. ……. 33

III.4.1. Le neurone biologique ……... 33

III.4.2. Le neurone formel ……. 34

III.5. Différents types de réseaux de neurones ……..... 35

III.6. Les réseaux de neurones artificiels ……... 36

III.6.1. La structure des connexions ……... 36

III.6.2. La dynamique des connexions ……... 38

III.7. Algorithme d'apprentissage…….. 38

III.7. Algorithme d'apprentissage…….. 39

III.8. Conclusion…… 42

Chapitre IV: Etude de défaillance dans un bobinage de transformateur.

IV.1. Introduction ……..... 43

IV.2. calcul de paramètre du modèle adopté …… …… 43

IV.2.1. calcul la capacité série ……..... 43

IV.2.2. calcul de l'inductance ……..... 45

IV.2.3. Calcul de Capacité avec la terre ……..……. 46

IV.3. Essais expérimentaux, simulation du modèle et validation 49

IV.3.1. Essai expérimentaux……..... 50

IV.3.2. Validation de modèle ……..... 51

IV.3.2.1. simulation du schéma équivalent ……..... 51

Sommaire

IV.3.2.2. Simulation les différents défauts étudiés ……..... 53

IV.3.2.2.a. Court-circuit entre spires……..... 54

IV.3.2.2.b. Déformation propres de l'enroulement…….. 55

IV.3.2.2.c. Ouverture des spires…….. 58

IV.4 Application de RNA dans le diagnostic et la localisation des défauts naissant 58

IV.4.1. Organigramme de classification par RNA ……..... 59

IV.4.2. Explication de l'organigramme ……... 60

IV.4.2.1. Entrées du réseau RNA ……..... 60

IV.4.2.2. Sorties du réseau RNA ……..... 60

IV.4.2.3. Couche cachée ……..... 60

IV.4.2.4. Affichage des résultats de classification ……..... 61

IV.5. Méthode proposée pour la classification, détection et estimation

du défaut ……. 62

IV.5.1. Essais expérimentaux et simulation du modèle de la bobine ……. 63

IV.5.1.1. Essais expérimentaux…….. ……. 63

IV.5.1.2. Validation du modèle ……..... 64

IV.5.1.2.1. simulation de modèle……..... 64

IV.6. Les différents défauts étudiés ……..... 65

Sommaire

IV.7. Organigramme de la méthode proposée …… 67

IV.7.1. Explication de l'organigramme……..... 68

IV.8. Conclusion……..... 69

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

Listes des figures

N°=figure	Intitulé	Page
Figure(I.1):	Transformateur de puissance.	4
Figure(I.2):	transformateur cuirassé.	5
Figure(I.3):	transformateur à colonnes.	6
Figure(I.4):	circuits magnétiques et électriques liés.	8
Figure(I.5):	Amorçage entre enroulements.	10
Figure(I.6):	Amorçage entre spires, sans court-circuit.	10
Figure(I.7):	Court-circuit entre spires.	11
Figure(I.8):	Décharges partielles sur des cales.	12
Figure(I.9):	Coupure suite à la fusion d'un Conducteur.	12
Figure(I.10):	Déformation mécanique d'un Enroulement.	13
Figure(II.1):	Modèle d'un enroulement de transformateur.	19
Figure(II.2):	Principe de la FRA.	20
Figure(II.3):	Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP. a) Coupe transversale du transformateur b) Circuit équivalent	21
Figure(II.4):	Modélisation d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP. a) Le transformateur b) Modèle EMTP	21
Figure(II.5):	Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL. a) Coupe transversale d'un transformateur à 2 enroulements b) Le circuit électrique correspondant	23
Figure(II.6):	Circuit de FOSTER en série.	24

Figure(II.7):	Modèle de CAUER pour le noyau de fer.	24
Figure(II.8):	Schéma équivalent modal.	25
Figure(II.9):	Schéma équivalent d'un enroulement.	26
Figure(II.10):	Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique, T temps de propagation, D facteur d'amortissement	27
Figure(II.11):	Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section de longueur ΔX.	27
Figure(II.12):	Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert Du transformateur ayant une seule fréquence de résonance.	28
Figure(II.13):	Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur.	29
Figure(III.1):	Le neurone biologique.	33
Figure(III.2):	Neurone Formel.	34
Figure(III.3):	Fonctions de transfert.	35
Figure(III.4):	Architecture générale d'un réseau entièrement connecté	37
Figure(III.5):	Architecture générale d'un réseau multicouche.	37
Figure(III.6):	Perceptron à une couche cachée.	39
Figure(IV.1):	Schéma équivalent du transformateur sans l'influence du noyau.	43
Figure(IV.2):	une paire d'enroulement de disque continu	44
Figure(IV.3):	Configuration de C_{dd}.	44
Figure(IV.4):	la méthode de calcul de Lyle inductance pour bobine de section rectangulaire.	45
Figure(IV.5):	Représentation du noyau BT et HT.	46
Figure(IV.6):	configuration de calcul C_g.	47

Figure(IV.7): représentation des entretoises. 48

Figure(IV.8): le schéma équivalent de l'enroulement étudié. 50

Figure(IV.9): banc d'essai. 51

Figure(IV.10): Réponse FRA Expérimentale. 51

Figure(IV.11): réponse en fréquence mesurée de l'impédance 51
a- Echelle linéaire b- Echelle logarithmique

Figure(IV.12): réponse en fréquence simulée de l'impédance 52
1-Echelle linéaire 2-Echelle logarithmique

Figure(IV.13): Comparaison entre la réponse en fréquence mesuré et simulée de L'impédance. 52
1-Echelle linéaire 2-Echelle logarithmique

Figure(IV.14): Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre les éléments (1-2) et (3-4) et un enroulement sain. 54

Figure(IV.15): Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité série (Cs) dans les deux cellules. 55

Figure(IV.16): Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité transversale (C_g) dans les deux disques. 56

Figure(IV.17): Les différentes impédances pour différents changement capacitifs et celle de l'enroulement sain. 57

Figure(IV.18): Les différentes impédances pour l'ouverture entre les éléments (1) et (2) et celle de l'enroulement sain. 58

Figure(IV.19): Fonction de transfert log- Sigmoïde. 60

Figure(IV.20): L'erreur d'apprentissage du réseau de neurones. 61

Figure(IV.21): Panneau de contrôle. 62

Figure(IV.22): schéma équivalant d'une bobine. 63

Figure(IV.23): banc d'essai(2). 63

Figure(IV.24): Réponse FRA Expérimentale(b). 63

Figure(IV.25): réponse en fréquence dans : 64
a) Echelle linéaire.
b) Echelle logarithmique.

Figure(IV.26): représentation du test FRA par : 64
1) Simulation linéaire.
2) Simulation logarithmique.

Figure(IV.27): présente la comparaison. 65
A. Echelle Logarithmique.
B. Echelle Linéaire.

Figure(IV.28): signatures de l'impédance pour la variation de défaut de court-circuit. 66

Figure(IV.29): signatures de l'impédance pour la variation de défaut de diminution C_g. 66

Figure(IV.30): développement de f_c en fonction de pourcentage de défaut. 67

Figure(IV.31): développement de Z en fonction de pourcentage de défaut. 67

Figure(IV.32): Organigramme de méthode de classification proposée. 68

Liste des tableaux

N°=Tableau	Intitulé	Page
Tableau(IV.1) :	résultat de simulation.	49
Tableau (IV.2) :	Valeur des fréquences de coupures obtenues des deux réponses.	53
Tableau(IV.3) :	comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre les éléments (1-2) et(3-4) et un enroulement sain.	55
Tableau(IV.4) :	comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut d'augmentation de capacité série (C_s) et un enroulement sain dans les deux.	56
Tableau(IV.5) :	comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut d'augmentation de capacité shunt (C_g) et un enroulement sain.	57
Tableau (IV.6) :	comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut d'Ouverture de circuit entre les cellules et un enroulement sain.	58
Tableau (IV.7) :	Valeur des fréquences de coupures obtenues des deux réponses.	65

A : La surface latérale d'une spire.

A : La surface en coupe transversale du disque.

BT : basse tension.

C : Capacité.

C_{dd}: La Capacité entre les disques.

C_g: Capacité shunt.

C_s: Capacité série.

C_{tt}: La Capacité entre les spires.

e : Force électromotrice.

EMTP: Electromagnetic Transients Program.

FRA: Frequency Response Analysis.

GMD : rayon moyen géométrique.

h: Hauteur de galette.

Hz : Hertz.

HT : haut tension.

Hz : Hertz.

KHz : Kilo Hertz.

L : L'inductance propre.

LC : Inductance-Capacité.

l : est la longueur du chemin magnétique.

MHz: Méga Hertz.

N : nombre de spires.

N_d : Le nombre de spire d'un disque.

N_{dw} : Le nombre de disques de l'enroulement.

$N_d - 1$: Le nombre de capacité entre spire dans chaque disque.

Ni_1 Et Ni_2: forces magnétomotrices.

R : réluctance du circuit magnétique.

RLC: Resistance-Inductance-Capacité.

R_{f1} : Réluctances de fuites.

R_{f2} : Réluctances de fuites.

R_{12} : Réluctance principale.

R_m : Rayon moyen.

w: L'épaisseur de l'inductance.

Z : impédance.

ε_{air} : Permittivité relative de l'aire.

ε_r : Permittivité relative de l'isolation entre les spires.

ε_0 : Permittivité de l'espace libre.

μ_0 : Perméabilité de l'espace libre.

μ : est la perméabilité de l'espace libre.

Ø : Flux magnétique.

Le transformateur de puissance est le composant le plus complexe et le plus critique du réseau électrique.

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 entrainer des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux.

La surveillance de la santé 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. 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.

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) se trouve être un outil utile pour la détection fiable de défaut mécanique naissante dans un transformateur. Il existe différentes méthodes d'évaluation du spectre des fréquences pour confirmer la présence d'un défaut naissant

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 à pour but de représenter avec précision le comportement d'un transformateur sur toute la gamme de fréquence.

La modélisation du transformateur basée sur la variété de types des modèles, utilisent des paramètres de réseau équivalent (RLC) et se concentrent sur la gamme de fréquence d'intérêt.

Ce travail est une suite d'un travail antérieur réalisé au Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et en Automatique de l'université de Médéa.

L'objectif essentiel de cette présente est de proposer un modèle d'un transformateur traduisant son comportement en régime fréquentiel afin de l'utiliser comme un outil de simulation des défauts le long de l'enroulement du transformateur d'une part et d'une autre part un outil d'analyse et de maintenance de ce type de machine très importante dans les systèmes d'énergie électrique.

Pour cerner cet objectif, notre mémoire est subdivisé en 04 chapitres.

Le premier chapitre concerne une étude bibliographique portant des généralités sur le transformateur, les défaillances et les différentes méthodes de diagnostic du transformateur de puissance.

Le second chapitre a pour objet de présenter les principaux modèles de transformateurs existant dans la littérature qui semble plus adéquat à la problématique posée et également une présentation sommaire sur la technique de l'analyse fréquentielle (FRA).

La théorie sur les réseaux de neurones a été abordée dans le troisième chapitre.

La validation du modèle de l'enroulement par des essais expérimentaux sur deux bobines différentes et des simulations de défaillances et ainsi que leur détection et classification par deux méthodes différentes, ont fait l'objet du quatrième chapitre. La méthode utilisée pour la classification est basée sur réseaux de neurones artificiels, une autre méthode a été proposée non seulement pour la classification mais aussi pour la détection et l'estimation du taux de défaillance, cette méthode est basée sur l'évolution de la fréquence de

coupure en fonction du défaut.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus.

I.1. Introduction :

Le transformateur est un dispositif électrique très comportant dans les réseaux électriques d'où sa maintenance périodique est impérative.

Dans ce chapitre, une présentation générale du transformateur et des défauts qui peuvent y avoir lieu dans ces enroulements et les différentes méthodes de diagnostique sont mises en relief

I.2. Transformateur de puissance :

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation.

Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence, nombre de phases.) de l'énergie électrique à courant alternatif.

I.3. Constitution générale d'un transformateur :

Le transformateur de puissance figure (I.1), se compose essentiellement d'un circuit magnétique et circuit électrique



Figure (I.1): transformateur de puissance .

I.3.1. Circuit magnétique :

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques haute perméabilité et à cristaux orientés, isolées électriquement entre elle. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique.

- Emploi d'acier magnétiquement doux ayant une petite surface du cycle d'hystérésis et de faible perte par hystérésis ;
- Emploi d'aciers spéciaux présentant. grâce à des additifs. Une résistivité élevée ;
- Emploi de tôles dont l'épaisseur est choisie tel que les courants de Foucault soient pratiquement sans effet.

  Suivant la forme du circuit magnétique. On distingue deux dispositions principales qui sont :

I.3.1.a. Type cuirassé (figure I.2) :

Pour ce type de transformateur .le circuit magnétique entour complètement l'enroulement des deux cotés. La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité.ces transformateur sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions transitoires sont fréquents. Pour cela des écrans sont utilisé, a fin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

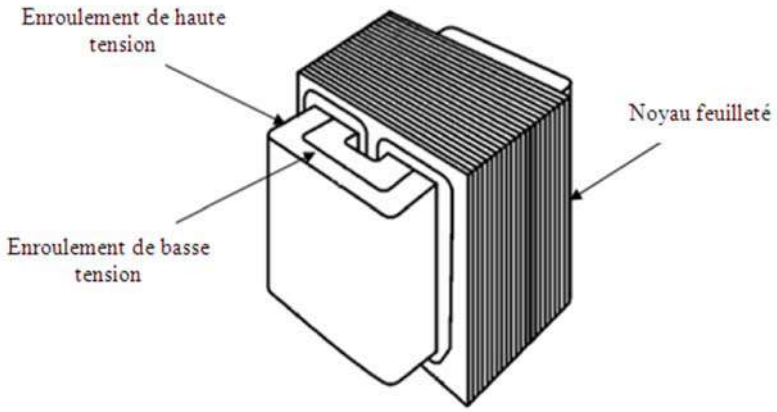


Figure (I.2) : transformateur cuirassé.

I.3.1.b. Type à colonnes (figure I.3) : [1], [2].

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase.ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses a fin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.

Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux.

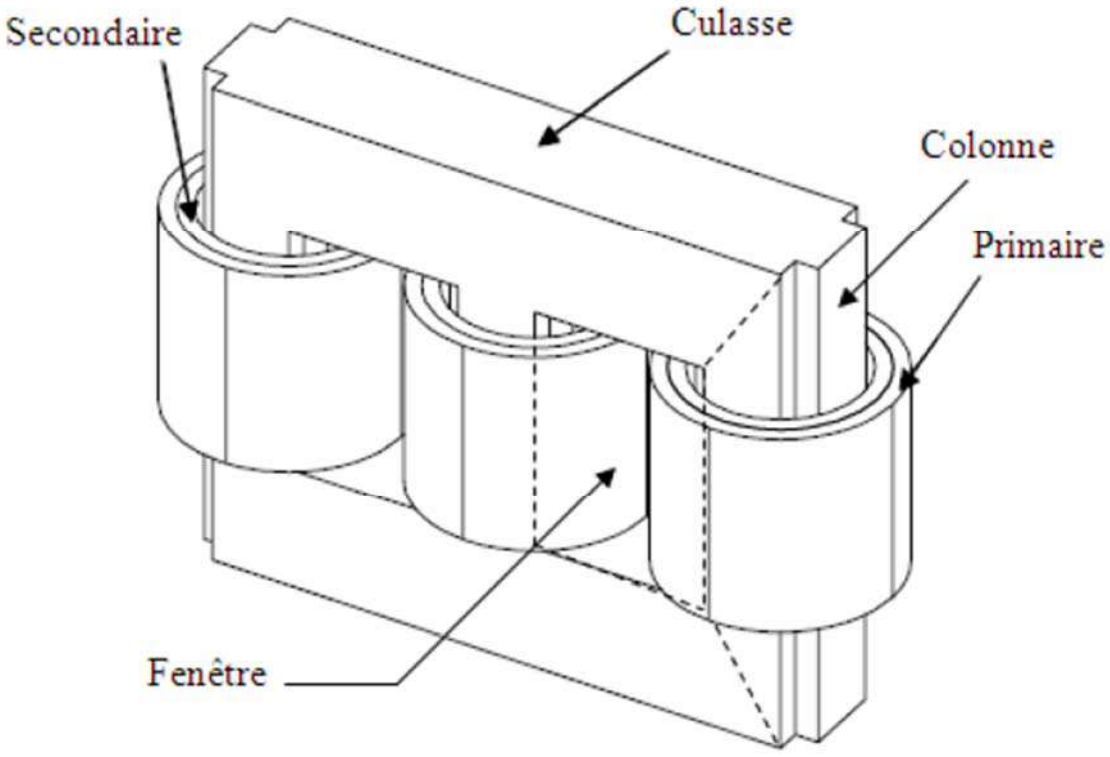


Figure (I.3) : transformateur à colonnes.

I.3.2. Les enroulements :

Ils sont constitués de fils conducteurs en cuivre isolés entre eux par du papier Kraft, dénommé papier d'enrubannage ou de guipage. Les enroulements du primaire et du secondaire sont rassemblés autour du même noyau pour limiter les fuites magnétiques. Chaque

enroulement du primaire doit être correctement isolé des enroulements du secondaire. De ce fait, des écrans protecteurs (généralement en carton) sont disposés entre les enroulements.

Des cales, en bois ou en bois lamellé bakélisé, sont disposées entre chaque enroulement ainsi qu'entre les bobines et le circuit magnétique, de manière a obtenir un ensemble très rigide et ainsi limiter les contraintes mécaniques. Des canaux verticaux sont aménagés entre les cales pour permettre un bon refroidissement par circulation du liquide caloporteur à travers la bobine.

I.4. L'isolation dans les transformateurs de puissance :

I.4.1. Isolation cellulosique : [3].

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, le papier compressé, le cylindre isolant et le carton sont faits à partir des matériaux cellulosiques qui constituent le meilleur compromis technico-économique de l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance.

Dans la plupart des applications industrielles, les isolations cellulosiques sont rarement utilisées en dehors de l'imprégnation avec un autre matériel isolant.

Le but principal de l'imprégnation est de protéger l'isolation diélectrique de la cellulose contre les effets diélectriques de l'humidité absorbée et d'augmenter son BIL (Basic Impulse Level). Pour l'utilisation en basse tension comme dans le cas du fonctionnement de certains moteurs électriques et condensateurs, les papiers isolants sont souvent imprégnés avec de la cire et le vernis.

Quand ils sont utilisés pour l'équipement à haute tension, ils seront imprégnés avec des isolants liquides tels que les huiles diélectriques.

I.4.2. Isolation liquide : [4].

L'huile de transformateur est souvent une huile minérale qui est faite d'un mélange d'alcanes, de naphtènes, et des hydrocarbures aromatiques, raffinés à partir du pétrole brut.

Les processus de raffinage pourraient inclure le traitement par l'acide, l'extraction par solvants, l'hydrotraitement, ou la combinaison de ces méthodes lorsqu'elle est parfaitement achevée, peut rapporter les caractéristiques de l'huile minérale aux spécifications exigées. Son rôle fondamental est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement du transformateur.

Les huiles modernes procurent plus de stabilité à la dégradation, et elles sont dépourvues du soufre corrosif**.** Au plus, elles devraient avoir les caractéristiques suivantes :

- Point d'inflammabilité élevée.
- Point de congélation basse.
- Rigidité diélectrique élevée.
- Basse viscosité.
- Bonne résistance à l'électrification statique.

I.5. Principe de fonctionnement :

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable (Ø) circule dans le circuit magnétiques, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($\frac{d\emptyset}{dt}$) et au nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spire du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

$$e = -d\Phi/dt \qquad \text{(I.1).}$$

Et pour N spires on aura

$$e = -Nd\Phi/dt \qquad \text{(I.2).}$$

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure (I.4).

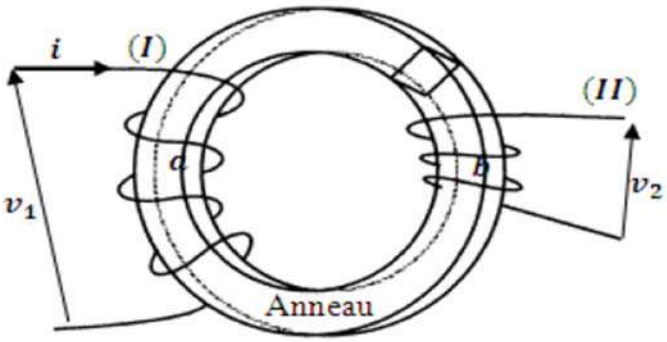


Figure (I.4) : circuits magnétiques et électriques liés.

I.6. Régimes de fonctionnement : [5].

Les régimes de fonctionnement des transformateurs sont les régimes de surcharge, les régimes déséquilibrés et les régimes transitoires.

I.6.1. Régime de surcharge :

Les transformateurs d'interconnexion de grandes puissances de réseau électrique doivent supporter les variations de la charge du réseau électrique. Ils sont soumis à des surcharges plus ou moins fortes et sur des durées plus ou moins longues.

L'élévation des courants de lignes lors des régimes de surcharge induisent un accroissement du flux de fuite, encore amplifié par la saturation du circuit magnétique. Les pertes dans les éléments principaux : les bobinages, la cuve et les shunts sont accrues. Ces pertes contribuent à un accroissement de la température globale ou locale (points chauds) des éléments constitutifs et de l'huile de refroidissement de l'isolation Ainsi, la réaction de décomposition des isolants cartonnés baignés par l'huile se trouve accélérée. Ce qui peut diminuer sa durée de vie et provoquer sa destruction à terme.

I.6.2. Régime déséquilibre :

Le régime déséquilibré correspond à un incident sur l'une des trois phases du réseau. La composante homopolaire du courant dans les bobines devient importante, entrainant un déséquilibre des ampères-tours du circuit magnétiques par conséquent une augmentation des pertes supplémentaires dans le fer et le cuivre provoquant des surchauffes locales consididérables.

I.6.3. Régime transitoire :

Les phénomènes transitoires dans le transformateur sont causés d'une part par les enclenchements d'autre part par les courts-circuits.

Les enclenchements engendrent des surtensions, qui peuvent détériorer l'isolation. Les courts-circuits créent des surintensités qui engendrent des échauffements et des efforts électrodynamiques importants au niveau des enroulements.

I.7. Défauts fréquents dans les transformateurs :

I.7.1. 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 (I.5).
- ✓ Amorçage entre la masse (la cuve ou le circuit-magnétique typiquement) et un enroulement, une connexion ou une traversée.

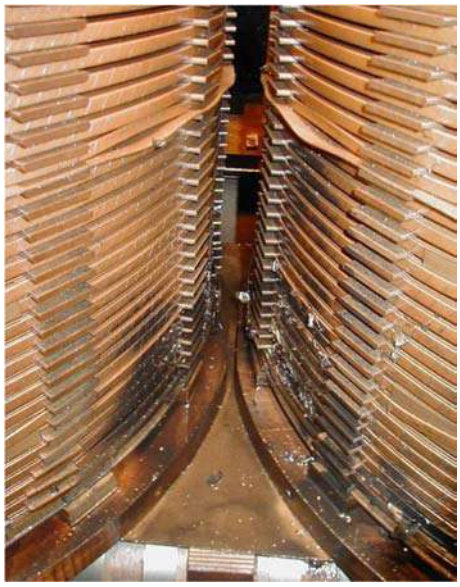


Figure (I.5) : Amorçage entre enroulements.

I.7.2. 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 (I.6). L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement.



Figure (I.6) : Amorçage entre spires, sans court-circuit.

I.7.3. 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 Figure (I.7).

Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements. Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas.



Figure (I.7) : Court-circuit entre spires

I.7.4. 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 (I.8).

Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage.

Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs.



Figure (I.8) : Décharges partielles sur des cales.

I.7.5. 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 (I.9).
- un mauvais alignement d'un régleur.



Figure (I.9) : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur.

I.7.6. 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 Figure (I.10), à noter sans amorçages entre spires, ni courts-circuits internes).

Il est possible de déformer un enroulement, 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 fonctionné 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 surtensions ultérieures sans amorcer.



Figure (I.10) : Déformation mécanique d'un Enroulement.

I.8. Techniques de diagnostic défauts dans les transformateurs :

L'utilisation des techniques de diagnostic, a une grande utilité car elle permet d'évaluer l'état des composants du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter la programmation des travaux et réduire les temps d'indisponibilité.

Dans ce cadre, les actions de diagnostic effectuées SONELGAZ-GRTE sur les transformateurs de puissances sont :

I.8.1. Analyse d'huile : [6], [7].

Le fonctionnement dans de bonnes conditions des transformateurs, dépend dans une large mesure de la qualité des huiles minérales isolantes utilisées. Les caractéristiques des huiles se dégradent par l'effet de la contamination, de l'humidité et du vieillissement.

L'huile isolante est l'un des élément les plus importants dans un transformateur qui nécessite une surveillance et un entretien car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci.

L'huile est un fluide qui pénètre dans toutes les parties internes du transformateur, sa circulation permet l'évacuation de la chaleur produite par les enroulements, par convection à travers la cuve du transformateur.

La connaissance de l'état de l'huile et des gaz qui peuvent être dilués dans ce dernier est d'une importance fondamentale pour assurer un bon fonctionnement des transformateurs, il est par conséquent nécessaire d'effectuer une vérification régulière de l'état de l'huile.

I.8.2. Mesures diélectriques : [8].

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

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

La condition d'isolement est un facteur essentiel de la fiabilité opérationnelle des transformateurs.

I.8.3. Analyse des furanes : [2].

La dégradation des matériaux cellulosiques constituant l'isolation solide des enroulements du transformateur conduit à la des dérivées furaniques, leurs présence dans les huiles du transformateur est un bon outil de diagnostic de l'état de l'isolation de ce dernier.

Les composés furaniques sont générés quand la cellulose est décomposée thermiquement, par conséquent un contenu élevé de composés furaniques indique un haute degré de dégradation du papier isolant.

I.8.4. Mesures électriques :

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont:

I.8.4.1. Mesure du courant d'excitation : [6].

La technique d'essai consiste à injecter une tension alternative de valeur réduite (jusqu'à 12KV), De différents niveaux, et réaliser une mesure du courant de magnétisation, en observant s'ils existent une non linéarité dans les valeurs observées qui identifient des problèmes potentiels dans le noyau.

I.8.4.2. Mesure de rapport de transformation : [2], [6].

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures.

Des déviations indiquent des courts-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régleur.

Les mesures sont effectuées :

- A la mise en service
- Lors d'un entretien détaillé.
- En cas d'une défaillance.
- Après une réparation.

La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haut tension, en mesurant les tensions résultantes dans les autres.

I.8.4.3. Mesure de la résistance d'enroulements : [2].

La mesure de la résistance a pour objectif de déterminer l'existante des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinages. Entre autre cette mesure détermine les pertes par effet joule dans les enroulements et les connexions. La mesure est effectuée par l'application du courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements afin de pouvoir ramener les valeurs mesurées vers des valeurs à la température référence.

I.8.4.4. Mesure de la réactance de fuite :

La mesure de la réactance de fuite ou impédance de court-circuit, permet par comparaison aux valeurs des mesures lors des essais en usine du transformateur de détecter des changements très importants (›±50%) qui devrait amenée à des investigations plus importantes ; un circuit ouvert ou des courts-circuits entre spires, ou entre enroulement et cuve.

I.9. Conclusion :

Le transformateur est un organe très sensible aux déférentes conditions d'exploitations, dans ce chapitre nous avons donné une vue générale sur la constitution du transformateur et les différentes avaries qui peuvent l'affecter ainsi que les déférentes méthodes de diagnostique ou panne dans les transformateur.

II.1. Introduction:

Le transformateur de puissance comporte des bobines sous forme de galettes. Enroulées autour d'un noyau de fer et placées dans un liquide diélectrique. La tâche- principale des constructeurs de ces transformateurs de puissance consiste à placer dans un volume le plus réduit possible des enroulements capables de supporter sans défaillance les surtensions dues aux ondes de chocs rapides ou aux oscillations internes entretenues

Le diagnostic efficace d'un transformateur de puissance repose sur l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) des enroulements du transformateur, en mesurant la réponse en fréquence des enroulements du transformateur sur une large plage de fréquences.

Nous présentons dans ce chapitre les principaux modèles des transformateurs de puissance qui existent dans la littérature, dans le but de choisir le modèle le mieux adapté à notre étude et nous avons également introduit un résumé complet sur l'analyse de la réponse fréquentielle.

II.2. Définition : [10].

L'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil qui peut donner une indication du mouvement du noyau ou d'enroulement dans les transformateurs. Ceci est fait en effectuant une mesure simple, tout en regardant a 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 mesuré par des techniques FRA peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être en suite identifiée et analysé.

La FRA est généralement appliquée à un réseau complexe d'éléments passifs. Un transformateur est considéré comme un réseau complexe de composants RLC, qui est représenté par trois types d'éléments, des résistances, d'inducteurs et des condensateurs. Comme un réseau de distribution contient un nombre infini de petits composants RLC, Les trois éléments sont utilisés pour représenter la résistance des enroulements de cuivre, l'inductance des bobines d'enroulement et la capacité des couches d'isolation entre les bobines, entre un enroulement et un noyau, entre un noyau et la cuve, et encore entre la cuve et un enroulement, etc.

L'objectif principal de la FRA est de déterminer comment l'impédance d'un transformateur d'essai se comporte sur une gamme de fréquences appliquées. Les propriétés réactives d'un transformateur d'essai dépendent des changements de fréquence.

La plupart des transformateurs produisent une résonance très distincte dans une plage de fréquence spécifiée. Dans le cas des transformateurs, les fonctions de transfert sont utilisées pour la modélisation d'enroulement et des études transitoires.

La fonction de transfert d'un réseau RLC est le rapport de sortie et d'entrée de la réponse en fréquence, lorsque les états initiaux d'un tel réseau sont égaux à zéro. La relation entre phase et l'amplitude peut être extraite à partir des sorties de la fonction de transfert.

L'idée de l'application de la FRA pour l'évaluation de l'état d'enroulement du transformateur est basée sur le fait que le déplacement ou la déformation d'enroulement change les propriétés géométriques, qui sont liées à ses paramètres capacitives et inductives internes. Les changements de ces paramètres modifient par conséquent les réponses de fréquence d'enroulement, qui peuvent être observées par la mesure de la fonction de transfert.

II.3. Buts de la FRA :

Détection de:

- Déformations de la géométrie des enroulements
  (Axiales et radiales)
- Connexions internes interrompues.
- Enroulements déformés "Buckling".
- Enroulements ouverts ou en court-circuit.
- Défaut sur le circuit magnétique (tôles en court-circuit).
- Défaut de mise à terre du noyau.
- Défaut de connexions des barrières.

II.4. Utilisation des tests FRA : [9], [11].

Les applications typiques de la mesure de l'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) sont:

- Contrôle du transformateur après le test en court-circuit.
- Vérification de l'intégrité des transformateurs après un transport.

- Evaluation 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.

II.5. Détection de défaut par FRA: [13].

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).
- Le mouvement et déplacement d'enroulement haute et basse tension.
- 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.

II.6. Principe de la méthode : [10], [11], [12].

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductance et de résistances donc un circuit très complexe comme schématisé dans la figure(II.1) qui génère une empreinte digitale ou une signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe.

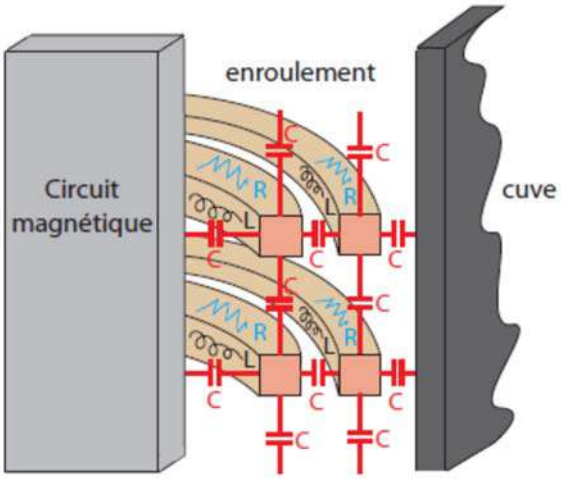


Figure (II.1): Modèle d'un enroulement de transformateur.

Il existe une relation directe entre la configuration géométrique des enroulements et le circuit magnétique à l'intérieur du transformateur de puissance et la distribution des éléments qui le composent tels que : résistances, inductances et capacitances. Ce réseau RLC peut être identifié par des fonctions de transfert dépendant de la fréquence. Or le changement dans la configuration géométrique engendre la variation de l'impédance du réseau et de ce fait déplace la fonction de transfert. Les changements dans la fonction de transfert vont révéler un grand rang de modes de défaillance.

Donc, l'approche FRA permet la détection des changements dans la fonction de transfert d'un enroulement individuel à l'intérieur du transformateur de puissance et par conséquent, indique un mouvement ou une distorsion dans le circuit magnétique et les enroulements de ce dernier. La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs.

Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances et modifieront ainsi la forme de la courbe.

Le principe de fonctionnement est d'injecter un signal d'excitation électrique sur l'un des enroulements et de mesurer le signal de réponse sur une large plage de fréquence

(Méthode de balayage en fréquence). Le rapport de ces deux signaux donne la réponse exigée. Ce rapport s'appelle la fonction de transfert du transformateur à partir du quel la grandeur et la phase peuvent être obtenues Figure (II.2).

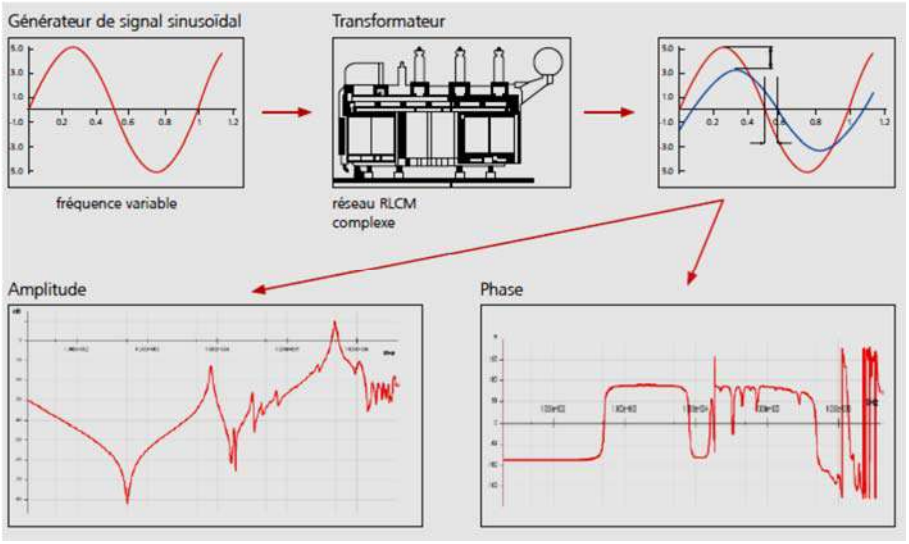


Figure (II.2): Principe de la FRA.

II.7. Les Modèles fréquentielles du transformateur : [15].

La modélisation des transformateurs de puissance, en régimes Hautes Fréquences (HF), et sous onde de choc, par un procédé expérimental (mesures), quoique précis, est relativement longue à mettre en œuvre et coûteux. C'est pourquoi on lui préfère le second modèle, plus souple, qui utilise un schéma électrique équivalent, avec des paramètres concentrés ou repartis. La précision des résultats et le coût de la modélisation sont liés au modèle choisi, ainsi qu'au degré de raffinement du schéma équivalent. Ce paragraphe décrit les différents types de modèles mathématiques existants dans la littérature.

II.7.1. Le modèle universel EMTP : [15], [20].

Le code de calcul universel EMTP (Electromagnetic Transients Program) est utilisé pour étudier les comportements des réseaux électriques, en régime transitoire. Il est utilisé comme un standard dans les études temporelles et fréquentielles. L'utilisation de ce code de calcul, pour modéliser un transformateur consiste à représenter ce dernier par un schéma électrique équivalent, comprenant:

- des transformateurs parfaits;
- une branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer.
- des inductances de fuite des groupes (galettes, couches, ou bobines).

- et enfin, des résistances des enroulements, et des capacités de couplage.

La figure (II.3) illustre un exemple de schéma équivalent d'un transformateur de type cuirassé, avec trois galettes, en vue de traitement par le code de calcul EMTP.

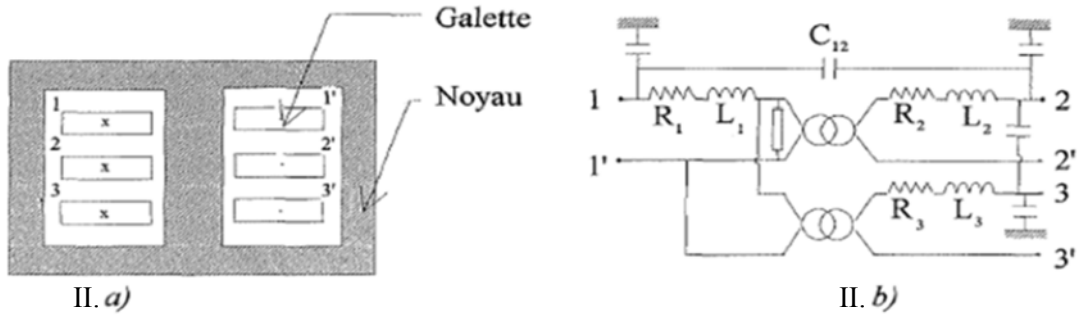


Figure (II.3): Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

a) Coupe transversale du transformateur.

b) Circuit équivalent.

Les différents paramètres du schéma équivalent représenté sur la Figure (II.3) (R = résistance de la galette1) sont déterminés, soit par calcul numérique ou analytique, à partir de la géométrie du transformateur, et en faisant des hypothèses simplificatrices (symétrie, perméabilité du noyau magnétique constante,….), soit par mesure (essais à vide, essais en court-circuit,...).

Mais, dans certains cas, l'utilisation du code de calcul EMTP, pour modéliser un transformateur, ne représente pas la réalité. En effet, par exemple pour un transformateur monophasé à deux enroulements égaux (haute tension et basse tension), le modèle EMTP n'est pas symétrique, et l'inductance de court-circuit n'est pas la même, vue du primaire et du secondaire figure (II.5).

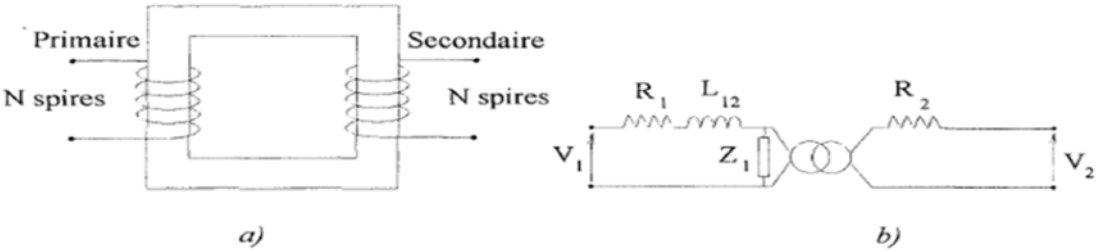


Figure (II.4): Modélisation d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP [15].

a) Le transformateur.

b) Modèle EMTP.

II.7. 2. Le modèle de RESEL : [15].

RESEL est un code de calcul développé par des Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité de France (EDF), et a comme but principal d'étudier les phénomènes transitoires dans les réseaux électriques, en particulier dans les transformateurs, dans le domaine temporel [16]. Son utilisation, pour modéliser un transformateur nécessite deux types de schémas, couplés entres eux :

Un schéma (figure II.b) qui traduit le comportement électrique du transformateur, composé de forces électromotrices, et de plusieurs cellules RL (l'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateurs), et un schéma (Figure II.c) qui traduit son comportement magnétique, composé d'un réseau de réluctances (R_{f1} et R_{f2} : réluctances de fuites, et R_{12} : réluctance principale) et de forces magnétomotrices (Ni_1et Ni_2)

Le couplage entre ces deux schémas se fait de la manière suivante: les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique, et les sources du circuit magnétique liées aux courants dans les enroulements.

La prise en compte des effets de la fréquence se fait par une décomposition du circuit magnétique en éléments de géométries simples, pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement aisée. Les réluctances ainsi calculées se composent de cellules RL.

La Figure (II.5) illustre le principe du modèle RESEL.

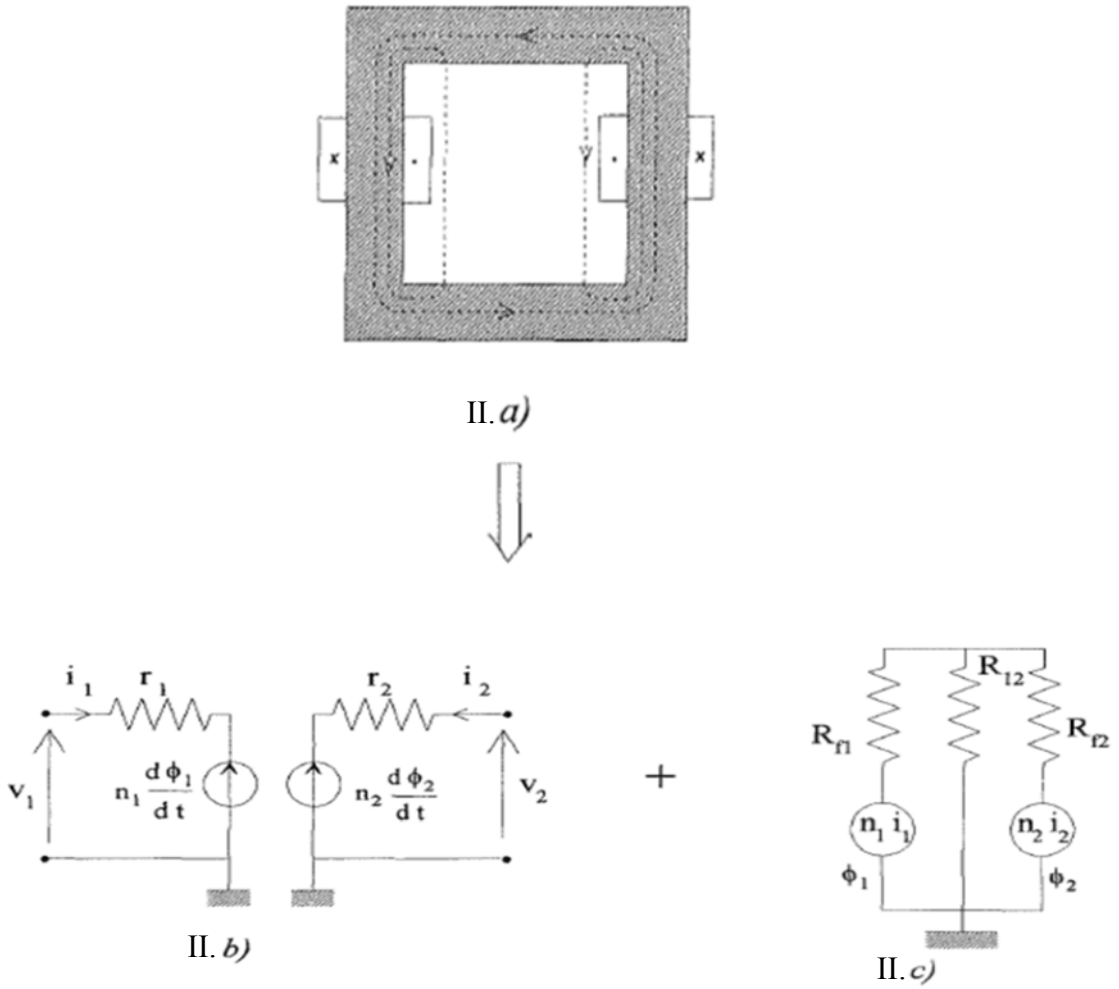


Figure (II.5): Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL

a) Coupe transversale d'un transformateur à 2 enroulements.

b) Le circuit électrique correspondant.

c) Le circuit magnétique correspondant.

II.7.3. Modèle de LEON : [17]**,** [10].

Dans leurs travaux, LEON et SEMLYEH, ont présenté le développement d'un modèle du transformateur de puissance en haute fréquence. Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés :

- Une matrice d'inductances de fuite entre les paires de spires (ou sections/galettes).
- Une matrice de capacités entre spires (ou sections/galettes) et entre les spires et la masse
- Une matrice de résistance, qui dépend de la fréquence et qui tient compte de courant de Foucault

Pour chaque colonne du circuit magnétique du transformateur, un système de trois matrices est calculé et puis transformé sous forme d'une équation d'état. Ensuite un circuit de Foster en série figure (II.6) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

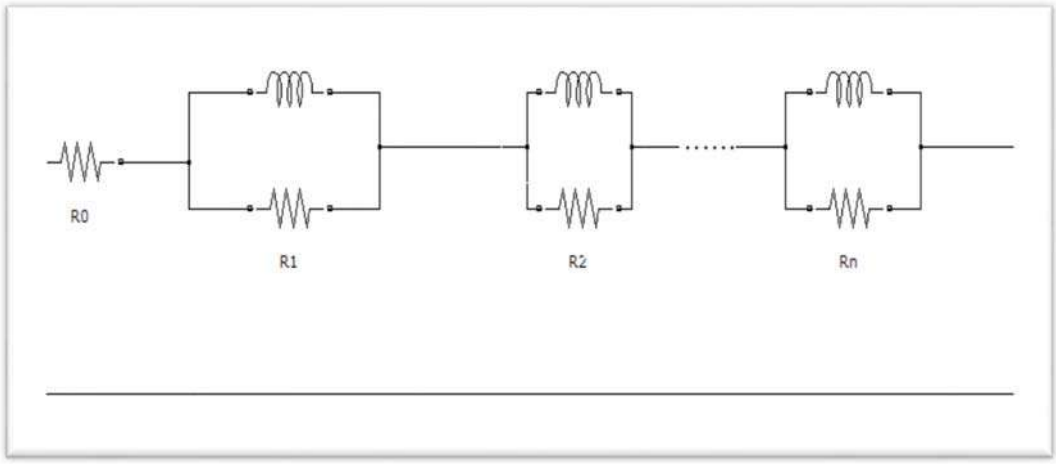


Figure (II.6): Circuit de FOSTER en série.

Pour le noyau, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de CAUER, figure (II.7)

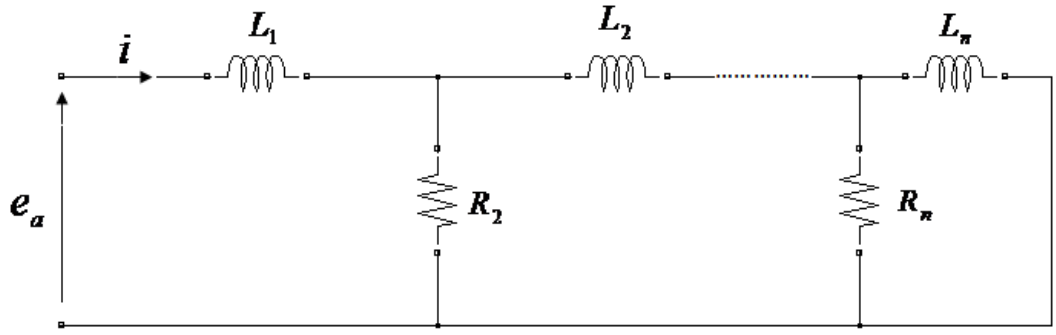


Figure (II.7): Modèle de CAUER pour le noyau de fer.

Ce modèle, qui ne tient pas compte de l'inductance mutuelle dans l'air entre les enroulements, permet quand même de modéliser le transformateur par un circuit équivalent. Pourtant, il est encore assez compliqué en raison des calculs analytiques et des transformations en circuit équivalent.

II.7.4. Modélisation par l'analyse modale :

Dans le cas des études où nous nous intéressons aux formes d'onde aux extrémités du transformateur (entrée, sortie), nous pouvons considérer ce dernier comme une boîte noire. Le signal de sortie est lié au signal d'entrée par la fonction de transfert.

Lorsqu'une tension excitatrice (coups de foudre, ou des manœuvres) contient une des fréquences propres du transformateur, il en résulte une excitation à la résonance et le transformateur devient le siège d'oscillations. L'analyse modale est une méthode utilisée pour décrire un système pouvant osciller par des paramètres modaux, à partir des mesures.

Le circuit équivalent modal du transformateur est composé des circuits oscillants simples RLC et des éléments R, L et C, figure (II.8).

A partir des mesures sur l'admittance d'entrée, rapport entre le courant d'entrée et la tension d'entrée, nous déterminons les éléments du circuit équivalent et les fréquences propres de résonance du transformateur. A l'aide de l'analyse modale, une étude approfondie du comportement oscillatoire de transformateurs de grande puissance a été réalisée.

Des modèles plus développés pour le calcul des tensions transmises, montrent l'intérêt de la méthode pour les études de réseaux et que le calcul de surtensions transmises, par le modèle, reste un problème délicat au niveau de leurs amplitudes. Le modèle permet d'une part le calcul de fréquences de résonance avec une bonne précision et d'autre part il sert de schéma équivalent pour la prise en compte de la réaction sur le réseau d'un transformateur lors de calcul de réseaux [18].

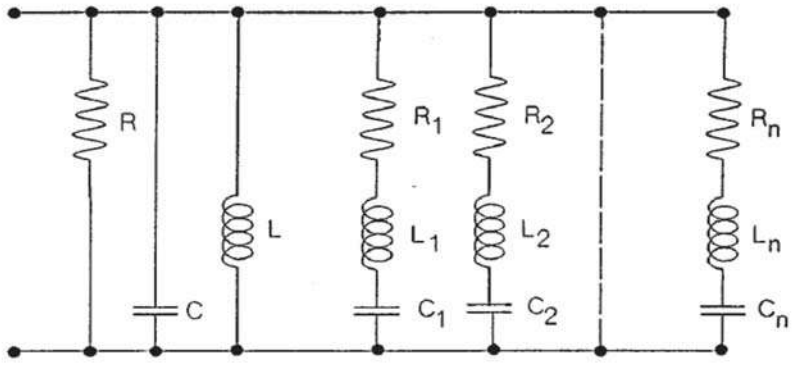


Figure (II.8): Schéma équivalent modal.

II.7.5. Modélisation par la théorie de lignes : [20].

En même temps que l'évolution de la théorie et l'analyse modale de lignes de transmission, des modèles, basés sur la même théorie, sont développés, pour modéliser les transformateurs figure (II.9).

Pour cela, l'enroulement d'un transformateur est décomposé en spires élémentaires, en considérant que le flux magnétique ne pénètre pas dans le noyau magnétique, et que la vitesse de la propagation est constante dans l'enroulement. La mise en équation de ce système donne une relation linéaire, entre la matrice d'inductance et la matrice de capacité.

Les résultats donnés par cette méthode ne sont valables que pendant plusieurs centaines de nanosecondes. L'application de cette méthode donne de bons résultats avec la mesure, dans le cas d'un transformateur avec un nombre de spires limité (inférieur à 12).

L'application de cette méthode dans le cas d'un transformateur de puissance n'a jamais été abordée. Mais, vu les hypothèses (le flux magnétique ne pénètre pas dans le noyau magnétique, et que la vitesse de la propagation est constante dans l'enroulement), un tel modèle donnerait des résultats erronés.

Cette méthode a été ensuite généralisée au cas de N enroulements, afin de tenir compte du noyau magnétique, sur le calcul des impédances, Pour cela, les enroulements sont considérés avec des épaisseurs suffisamment fines. La précision de cette méthode est liée directement au degré de la discrétisation du transformateur. Musil a utilisé la même approche, afin de comprendre les résonances internes du transformateur, dans le cas d'un court circuit de la ligne.

A l'issue de cette étude, il s'est intéressé aux réflexions des ondes au point d'interconnexion du transformateur et de la ligne, toujours en modélisant le transformateur par une ligne de transmission.

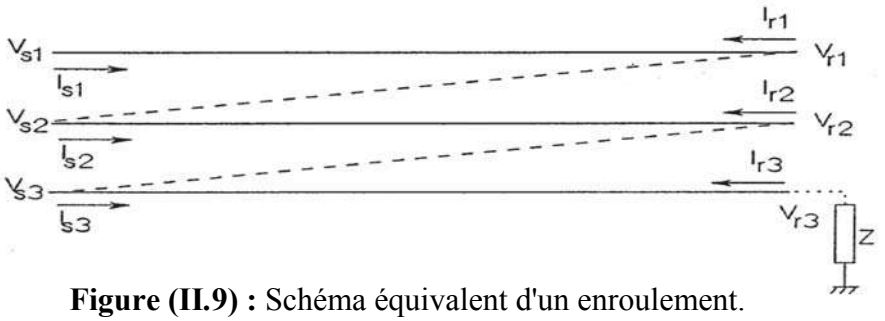


Figure (II.9) : Schéma équivalent d'un enroulement.

Malgré les conclusions positives de ces diverses études, la modélisation par la théorie de lignes semble avoir un domaine d'application spécifique et restreint: elle est limitée pour les études d'interaction entre transformateur et ligne Figure (II.10). la détermination des paramètres n'est pas aisée (impédance caractéristique de la ligne équivalente au transformateur,...).

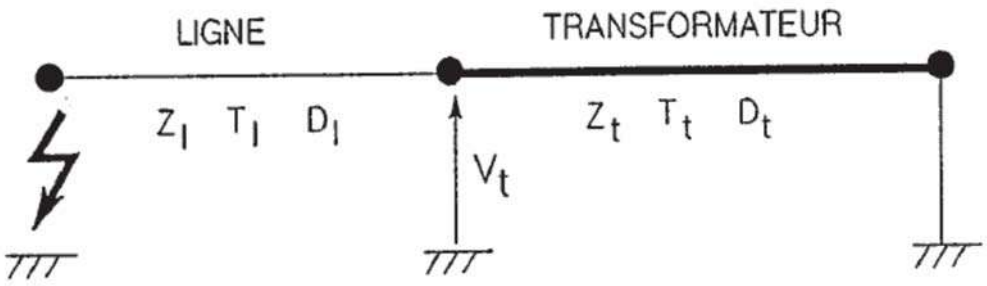


Figure (II.10): Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique,

II.7.6. Méthodes utilisant des transformées ou des circuits :[18].

Des travaux ont combiné l'approche des ondes mobiles pour simuler la ligne avec un circuit équivalent du transformateur, par unité de longueur, pour l'étude des interactions ligne-transformateur. Ils ont utilisé une inversion numérique de la transformée de Laplace, en identifiant la fonction de Laplace à inverser. Leur application reste restreinte par les hypothèses prises pour modéliser le transformateur et la ligne. La modélisation de la ligne est faite sans tenir compte de l'effet de peau, de l'effet du sol, et de la variation fréquentielle des paramètres.

La modélisation du transformateur est très simplifiée : distribution constante des capacités par rapport à la masse, valeurs constantes pour les résistances et inductances, et les mutuelles sont omises, figure (II.11). L'application est faite sans comparaison avec la mesure.

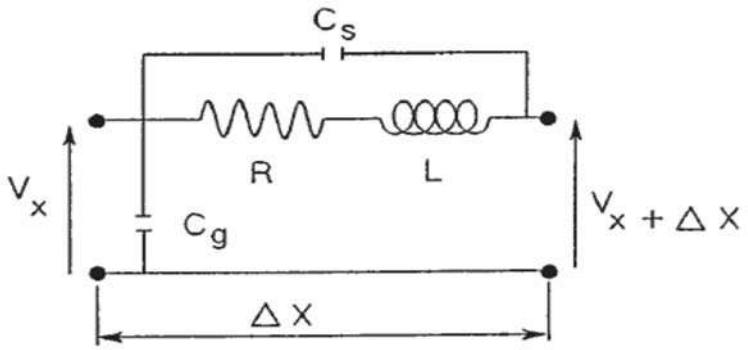


Figure (II.11) : Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section de longueur ΔX.

Un autre modèle de transformateur est développé en transformée en Z, qui tient compte de la variation fréquentielle du transformateur. La méthode est basée sur la mesure de la fonction de transfert entre deux points du transformateur (en général l'entrée et la sortie). On passe par deux formulations tout d'abord en plans, afin d'effectuer une deuxième formulation en Z. Ce qui implique, de plus, des erreurs de transformations. L'application de la méthode reste limitée, avec des difficultés dans certains cas pour la détermination du gain de la fonction de transfert.

On constate des désaccords avec la mesure à partir de 100 KHz, et il n'y pas une adaptation de la méthode aux études générales par EMTP.

Les chercheurs ont développé un modèle de transformateur en étudiant la distribution du champ électromagnétique à l'intérieur des tôles du transformateur. Le modèle prend en compte

les pertes par courants de Foucault dans le noyau magnétique, et la non-linéarité (comme la saturation), en négligeant les pertes dans le cuivre et les pertes diélectriques. Le modèle équivalent est constitué uniquement par des éléments R, L.

Dans certains cas, on peut étudier deux parties du transformateur en le considérant comme un quadripôle. Si la réponse fréquentielle du transformateur est identifiée par une fonction de transfert comportant une seule ou deux fréquences de résonance, nous pouvons modéliser le comportement du transformateur par un circuit RLC équivalent, figure (II.12).Il est évident que le calcul des paramètres de ce modèle se fait par la voie de mesure de la fonction de transfert.

L'application de ces modèles simplifiés donne de bons résultats jusqu'à 100 KHz.

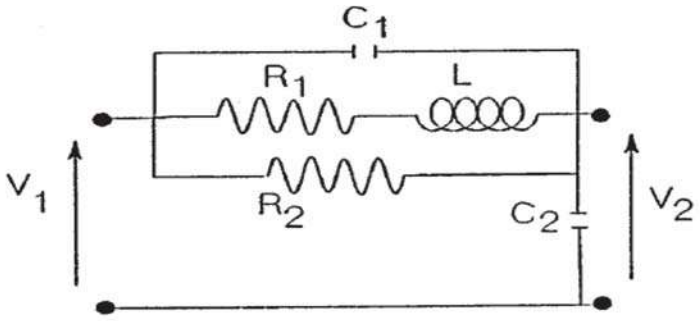


Figure (II.12) : Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert du transformateur ayant une seule fréquence de résonance.

II.8. Modèle adopté pour le transformateur sans la prise en compte du noyau : [14].

Heller et Veverka [13], ont assimilé le comportement d'un enroulement de transformateur soumis à une onde de choc à celui d'un système de condensateurs et d'inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent , d'inductances et de capacités. Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulation mises en œuvre.

On discrétise l'enroulement par un ensemble fini de spires ou galettes ou par des bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément est représenté par son inductance propre.

Quel que soit le type de représentation, les éléments sont calculés en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage.

En HF, même si nous négligeons l'effet non linéaire du noyau, la modélisation du transformateur reste plus complexe par rapport à celle à [20 Hz jusqu'à 1MHz]. De nombreux travaux ont été réalisés pour essayer de trouver un modèle unique du transformateur, mais cet objectif est loin d'être atteint en raison de plusieurs phénomènes à savoir:

- Actions des capacités apparaissant entre les spires et entre les spires et la masse.
- Possibilités de phénomènes de résonances.

La (figure II.13) représente le schéma équivalent à un enroulement de transformateur.

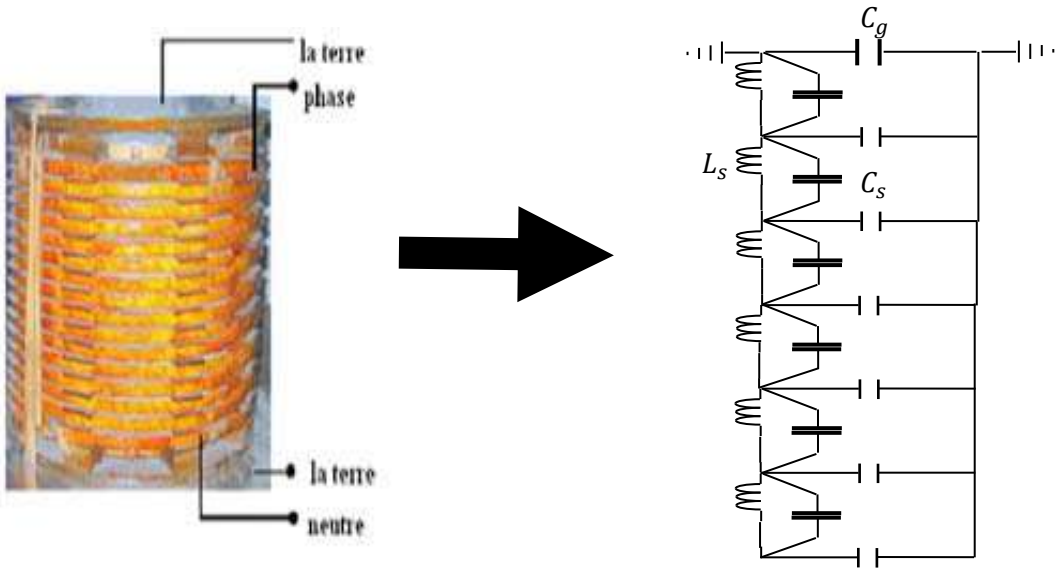


Figure (II.13) : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur.

Avec :

$\boldsymbol{C_s}$: Capacité série.

$\boldsymbol{C_g}$: Capacité shunt.

L : l'inductance propre.

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la technique d'analyse fréquentielle des enroulements du transformateur d'une part, et d'autre part nous avons à tes certains modèles fréquentiels de l'enroulement.

le modèle que nous avons jugé plus approprié à notre étude est celui représentant l'enroulement par une cascade de cellules LC traduisant le comportement électromagnétique du l'enroulement. Dans ce qui suit, on la méthode.

III.1. Introduction :

Dans un premier temps, nous rappellerons les définitions et notations de base relatives aux réseaux de neurones. Par la suite les types et la méthodologie d'apprentissage sont donnes, nous présenterons également les étapes de conception d'un réseau de neurones : le choix des entrées et sorties, l'élaboration de la base de données, de la structure du réseau.

III.2. Historique sur les réseaux de neurones :

Les recherches menées dans le domaine du connexionnisme ont démarré avec la présentation en 1943 par W. MCCulloch et W. Pitts d'un modèle simplifié de neurone biologique communément appelé neurone formel. Ils montrèrent également théoriquement que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes.

En 1949, D. Hebb initie, dans son ouvrage "The Organization of Behavior", la notion d'apprentissage. Deux neurones entrant en activité simultanément vont être associés (c'est-à-dire que leurs contacts synaptiques vont être renforcés). On parle de loi de Hebb et d'associationnisme.

En 1958, F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. C'est un réseau de neurones inspiré du système visuel. Il possède deux couches de neurones : une couche de perception (sert à recueillir les entrées) et une couche de décision. C'est le premier modèle pour lequel un processus d'apprentissage a pu être défini.

S'inspirant du perceptron, Widrow et Hoff, développent, dans la même période, le modèle de l'Adaline (Adaptive Linear Element). Ce dernier sera, par la suite, le modèle de base des réseaux de neurones multi-couches.

En 1969, Les recherches sur les réseaux de neurones ont été pratiquement abandonnées lorsque M. Minsky et S. Papert ont publié leur livre « Perceptrons » (1969) et démontré les limites théoriques du perceptron, en particulier, l'impossibilité de traiter les problèmes non linéaires par ce modèle.

En 1982, Hopfield développe un modèle qui utilise des réseaux totalement connectés basés sur la règle de Hebb pour définir les notions d'attracteurs et de mémoire associative. En 1984 c'est la découverte des cartes de Kohonen avec un algorithme non supervisé basé sur l'auto-organisation et suivi une année plus tard par la machine de Boltzman (1985).

De nos jours, l'utilisation des réseaux de neurones dans divers domaines ne cesse de croître. Les applications en sont multiples et variées.

III.3. Quelques domaines d'applications : [21].

Les RNA sont utilisés dans des domaines aussi divers que variés. On peut classer les réseaux de neurone artificiels suivant leurs applications en trois grandes catégories :

- Réseaux de neurones pour la classification ou la discrimination. Ces réseaux sont utilisés pour séparer un ensemble de données entrées/sorties et les classées en catégories suivant un critère donné. Ils trouvent leurs applications en robotique pour la reconnaissance de trajectoires, en instrumentation électronique pour la classification de signaux de capteurs, en traitement du signal ou de l'image pour la reconnaissance de caractères ou la reconnaissance d'objets par exemple.

Ils sont aussi utilisés en médecine pour le diagnostic de maladies, ou bien encore en pharmaco chimie pour la synthèse de nouvelles molécules à effets thérapeutiques et la conception de nouveaux médicaments, etc.

- Réseaux de neurones pour la modélisation et l'approximation. Si la fonction que doit réaliser le réseau est connue analytiquement, il réalise alors une approximation de fonction en trouvant la meilleure fonction non linéaire qui la représente.

Des études ont montré qu'un réseau multicouche avec une seule couche caché de neurones sigmoïdes et une couche de sortie linéaire permet d'approximer n'importe quelle fonction d'intérêt avec une précision à condition de disposer de suffisamment de neurones sur la couche cachée.

Si la fonction que doit réaliser le réseau est inconnue analytiquement, mais que l'on dispose de valeurs de cette fonction qui proviennent de mesures chimiques, physiques etc., le réseau réalise une modélisation ou une régression. C'est essentiellement dans ce type d'application que sont utilisés les réseaux de neurones non bouclés à apprentissage supervisé.

- Réseaux de neurones pour l'optimisation combinatoire. Ici, les RNA sont utilisés sans entrainement préalable, on laisse le réseau évoluer de manière aléatoire pour trouver une solution optimale. On les utilise pour répondre à des problèmes l'optimisation tels que : comment minimiser le coût de production à travers un

ordonnancement des tâches et une utilisation optimale des ressources humaines et matérielles ? Comment accroitre la productivité ? etc.

III.4. Le neurone artificiel :

La structure des neurones artificiels est inspirée du modèle du neurone biologique.

III.4.1. Le neurone biologique : [22].

Les neurones ou les cellules nerveuses sont les éléments de base du système nerveux. Ils possèdent de nombreux points communs avec les autres cellules du corps humain et présentent des caractéristiques spécifiques qui leur permettent de recevoir des signaux en provenance des autres neurones, de les intégrer, d'engendrer un influx nerveux, de le conduire et de le transmettre. Le cerveau possède environ cent milliards de neurones reliés les uns aux autres dans des endroits appelés synapses. Leur interconnexion est dénommée réseau de neurones.

Un neurone est constitué de trois parties : le corps cellulaire, l'axone et les dendrites Figure (III.1). Le rôle des dendrites est de capter l'information provenant des autres neurones. Cette information se présente sous la forme de médiateurs chimiques dits *neurotransmetteurs* libérés dans les synapses. La capture de ces substances par les dendrites donne naissance à un signal électrique appelé potentiel d'action qui est acheminé vers le corps cellulaire.

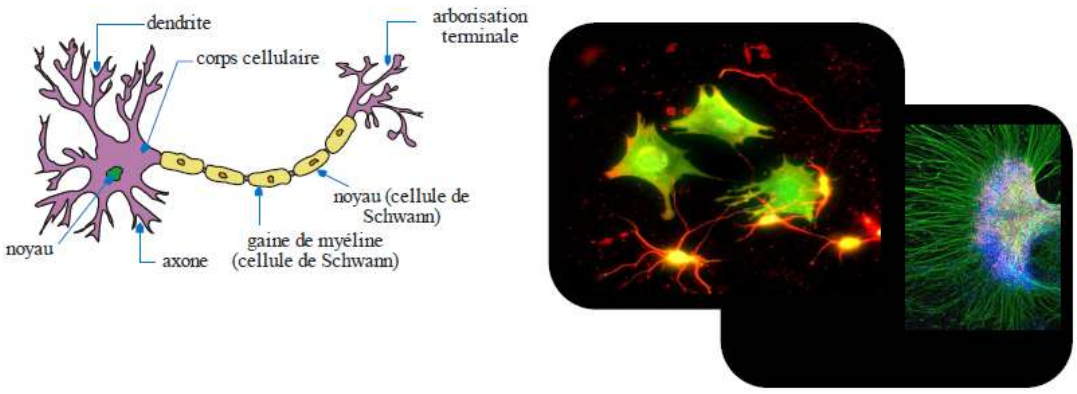


Figure (III.1) : Le neurone biologique.

III.4.2. Le neurone formel : [23].

C'est un opérateur mathématique très simple qui possède une sortie et plusieurs entrées pouvant être les sorties d'autres neurones, ou des entrées de signaux extérieurs. Il est défini par les cinq éléments suivants Figure (III.2):

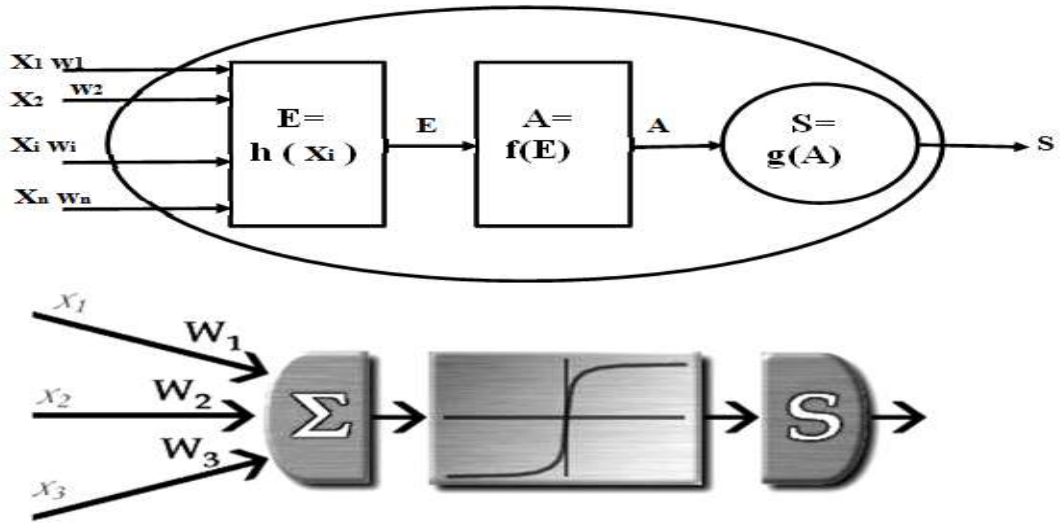


Figure (III.2) : Neurone Formel.

- ***La nature des entrées :***

Elles peuvent être binaires ou réelles. Le vecteur d'entrée de chaque neurone possède une entrée spéciale appelée le *biais* (en anglais *bias*). Sa valeur est généralement égale à l'unité. Elle permet de déplacer la fonction d'activation sur l'axe (s) Figure (III.3). Ce déplacement ne dépend que du poids attribué à cette entrée.

- ***La fonction d'entrée totale :***

Elle définit le pré-traitement des entrées. Elle peut être :

a. booléenne ;

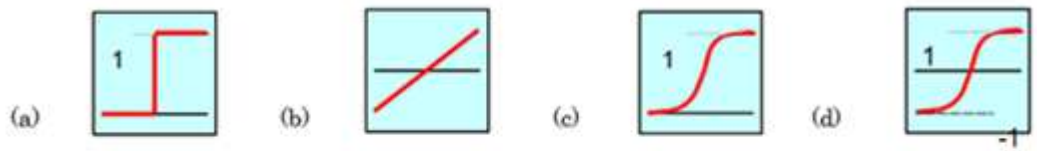
b. linéaire : $E = h\left(e_1 ..e_n\right) = \sum_{i=1}^{n} W_i e_i$;

c. affine : $E = h\left(e_1 ..e_n\right) = \sum_{i=1}^{n} W_i e_i - a$;

d. polynomiale de degré supérieur à deux.

- ***La fonction d'activation :***

C'est une fonction non-linéaire qui définit l'état interne (A) du neurone en fonction de son entrée totale (E). Elle peut être une fonction binaire à seuil, linéaire à seuil ou multi-seuil,sigmoïde, stochastique ou une autre fonction généralement choisie croissante et impaire (Figure III.3).



a. fonction seuil
b. fonction linéaire
c. fonction sigmoïde
d. fonction tangente hyperbolique

Figure (III.3) : Fonctions de transfert

- ***La fonction de sortie :***

Elle calcule la sortie (S) du neurone en fonction de son état d'activation (A). Elle est généralement considérée comme la fonction identité : S = g (A) = A = f (E).

- ***La nature de la sortie du neurone :***

Elle peut être binaire ou réelle.

III.5. Différents types de réseaux de neurones : [21].

On peut classer les réseaux de neurones artificiels suivant la direction dans laquelle évoluent les signaux à travers le réseau. Dans ce cas, on distingue deux catégories de réseaux. Les réseaux bouclés et les réseaux non bouclés.

Dans un réseau non bouclé, l'information circule des entrées vers la sortie sans retour vers les entrées. Le signal, en se déplaçant dans le réseau suivant le sens des connexions ne peut pas repasser deux fois par le même neurone.

Le réseau non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonction non linéaire par composition de toutes les fonctions réalisées par les neurones des couches cachées.

Dans un réseau bouclé, lorsqu'on se déplace dans le réseau suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient en arrière (un cycle).

Ce type d'architecteur est utilisé pour modéliser des processus dynamiques. En effet, lorsque l'état du système à un moment donné dépend non seulement de l'entrée mais aussi de l'état précédent u système, on reboucle alors les sorties correspondantes dans le réseau à

ces variables d'état vers l'entrée du réseau.

III.6. Les réseaux de neurones artificiels : [24].

Le réseau de neurones artificiels est un ensemble de neurones formels connectés suivant une architecture bien définie afin de réaliser des taches différentes. Ces réseaux sont introduits en s'inspirant du réseau biologique que constitue le cerveau humain.

Les huit composants principaux d'un réseau de neurones sont:

- un ensemble de neurones ;
- un état d'activation pour chaque neurone (actif, inactif) ;
- une fonction de sortie pour chaque neurone (f(S)) ;
- un modèle de connectivité entre les neurones (chaque neurone est connecté à tous les autres, par exemple). C'est ce qu'on appelle la structure du connexionnisme ;
- une règle de propagation pour propager les valeurs d'entrée à travers le réseau vers les sorties ;
- une règle d'activation pour combiner les entrées d'un neurone (très souvent une somme pondérée) ;
- une règle d'apprentissage ;
- un environnement d'opération (le système d'exploitation, par exemple).

Ces huit composants ont un rôle décisif dans le comportement des réseaux neuronaux. La variation d'un des paramètres change radicalement sa réponse.

III.6.1. La structure des connexions :

Les réseaux de neurones naturels sont organisés en couches et présentent un grand nombre de connexions. Les neurones d'une même couche sont reliés les uns aux autres ainsi qu'aux neurones des autres couches. Leur architecture est d'une très grande complexité et leur modélisation est difficile.

Les structures utilisées dans les réseaux formels sont très variées. Elles peuvent aller d'une connectivité totale où tous les neurones sont reliés les uns aux autres à une connectivité partielle où les neurones ne sont reliés qu'à leurs plus proches voisins :

- ***Les réseaux entièrement connectés :*** [24], [26].

Chaque neurone a tous les bouclages possibles. Il est relié à tous les autres neurones et

possède un retour sur lui-même Figure (III.4).



Figure (III.4) : Architecture générale d'un réseau entièrement connecté.

- ***Les réseaux en couches :***

Ces réseaux sont organisés en couches. Les neurones d'une même couche ne sont pas reliés entre eux. Ils reçoivent leurs entrées de la couche précédente et transmettent le résultat des traitements à la couche suivante Figure (III.5). Les couches situées entre la couche d'entrée et la couche de sortie sont appelées couches cachées. Leur nombre est variable.

La modélisation multicouche des RNA permet de traiter des problèmes très complexes.

Elle est apparue suite à l'impuissance marquée par le perceptron dans le domaine de la génération des sorties non linéaires (exemple de la fonction XOR).

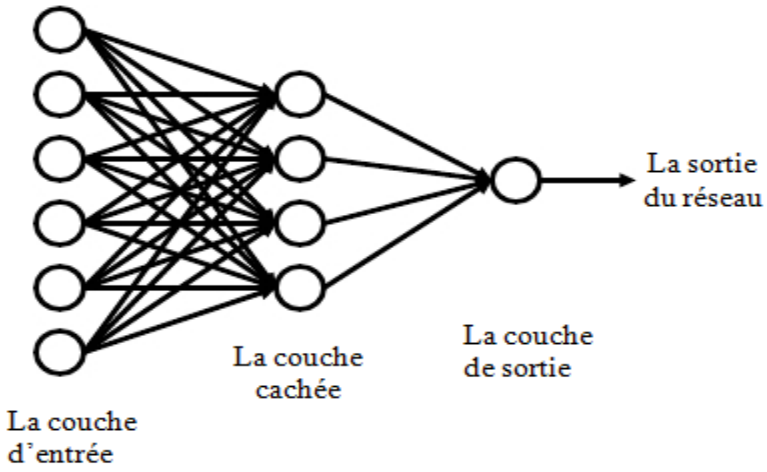


Figure (III.5) : Architecture générale d'un réseau multicouche.

III.6.2. La dynamique des connexions :

Les signaux transmis entre deux neurones sont pondérés en affectant à chaque connexion un coefficient dit *poids de la connexion* ou *poids synaptique* que le réseau

modifie au fur et à mesure que de nouveaux exemples lui sont présentés afin de s'adapter aux situations désirées : c'est la phase d'apprentissage. L'apprentissage neuronal est la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Deux types existent : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

- ***L'apprentissage supervisé :***

L'apprentissage supervisé se fait en introduisant des couples d'entrées et leurs sorties désirées. Les performances du réseau sont déterminées par la suite, par l'intermédiaire d'un critère à optimiser.

L'intérêt de cet apprentissage est de trouver des poids synaptiques optimaux afin de ramener au réseau un comportement désiré.

- ***L'apprentissage non-supervisé :***

Ces réseaux sont souvent nommés *auto-organisateurs* ou bien *à* apprentissage compétitif. Certaines architectures de ces modèles sont basées sur les principes des structures vivantes : tels que la théorie de l'évolution et de la génétique. Les travaux ont débuté, depuis les années soixante (60), mais les travaux restaient limités en raison de l'absence d'un modèle mathématique exacte de ces réseaux. Leur comportement mathématique fut déterminé à partir des années quatre-vingts (80) grâce aux travaux de Hopfield, de M. Cohen et de S. Grosberg. Ces résultats ont donné un grand élan à la recherche dans ce domaine [25].

III.7. Algorithme d'apprentissage :

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. L'apprentissage est une méthode d'identification paramétrique qui permet d'optimiser les valeurs des poids du réseau.

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note : l'algorithme de rétropropagation, la Méthode Quasi-Newton, Algorithme de BFGS etc.…

- ***Algorithme de rétropropagation :*** [26].

L'algorithme de rétro-propagation (back-propagation) est l'un des algorithmes d'apprentissage supervisé les plus utilisés pour l'apprentissage des réseaux de neurones.

L'objectif de cet algorithme est de modifier les poids du réseau dans le sens contraire du gradient du critère de performance.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les équations constituant l'algorithme en utilisant un réseau multicouches figure (III.6).

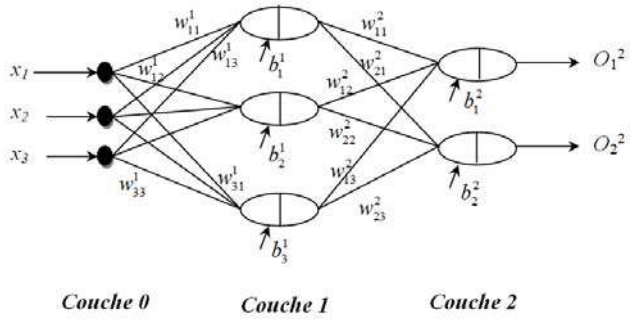


Figure (III.6) : Perceptron à une couche cachée.

Suivant la figure (IV.6), les termes b_i^l et ω_{ij}^l désignent respectivement le biais du neurone *i* de la couche *l* et le poids de connexion entre le neurone *j* de la couche (*l* – 1) et le neurone *i* de la couche *l*.

Tenant compte de ces notations, la sortie du neurone *i* dans la couche *l* est telle que :

$$U_i^l = \sum_j^{N_{l-1}} w_{ij}^l \times O_j^{l-1} + b_i^l \qquad l = 1,2$$
$$O_i^l = g^l\left(U_i^l\right) \qquad \text{(III.1).}$$

Où $g^l(.)$ est la fonction d'activation des neurones de la couche *l*.

Nous pouvons réécrire les équations ci-dessus sous forme matricielle comme suit :

$$\boldsymbol{U}^l = \boldsymbol{w}^l \times \boldsymbol{O}^{l-1} + \boldsymbol{b}^l$$
$$\boldsymbol{O}^l = \boldsymbol{g}^l\left(\boldsymbol{U}^l\right) \qquad \text{(III.2).}$$

Avec : $\boldsymbol{U}^l = \left(U_1^l, U_2^l, ..., U_{N_l}^l\right)^T$, $\boldsymbol{O}^l = \left(O_1^l, O_2^l, ..., O_{N_l}^l\right)^T$, $\boldsymbol{b}^l = \left(b_1^l, b_2^l, ..., b_{N_l}^l\right)^T$

$$\boldsymbol{w}^l = \begin{pmatrix} w_{11}^l & w_{12}^l & \cdots & w_{1N_{l-1}}^l \\ w_{21}^l & w_{22}^l & \cdots & w_{2N_{l-1}}^l \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ w_{N_l 1}^l & w_{N_l 2}^l & \cdots & w_{N_l N_{l-1}}^l \end{pmatrix}$$

Le perceptron multicouche présente une alternative prometteuse pour la modélisation des systèmes complexes. En effet avec une seule couche cachée, il constitue un approximateur.

universel. Les études menées en montrent qu'il peut être entrainé de manière à approximer n'importe quelle fonction sous réserve de mettre suffisamment de neurones dans la couche cachée et d'utiliser des sigmoïdes comme fonctions d'activation.

Nous supposons que l'apprentissage se fait à chaque présentation d'un couple entrée/sortie de l'ensemble d'apprentissage. Le critère de performance à minimiser peut être alors exprimé par :

$$J(t) = 0.5 \times \sum_{i=1}^{N_L} \left(O_i^L(t) - d_i(t) \right)^2 \qquad \text{(III.3).}$$

Avec:

$J(t)$ est la valeur du critère à l'instant t,

$d_i(t)$ est la $i^{\text{ème}}$ sortie désirée à l'instant t.

Les paramètres du réseau sont modifiés suivant la règle du gradient comme suit:

$$w_{ij}^l(t+1) = w_{ij}^l(t) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} \qquad \text{(III.4).}$$

$$b_i^l(t+1) = b_i^l(t) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial b_i^l(t)} \qquad \text{(III.5).}$$

Avec η est une constante positive appelée taux d'apprentissage.

Le calcul des quantités $\frac{\partial J}{\partial w}$ et $\frac{\partial J}{\partial b}$ fait intervenir les décompositions ci-dessous:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} = \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^l(t)} \times \frac{\partial U_i^l(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} \qquad \text{(III.6).}$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial b_i^l(t)} = \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^l(t)} \times \frac{\partial U_i^l(t)}{\partial b_i^l(t)} \quad \text{(III.7).}$$

De l'équation (IV.3) nous en déduisant que:

$$\frac{\partial U_i^l(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} = O_j^{l-1} \quad \text{(III.8).}$$

$$\frac{\partial U_i^l(t)}{\partial b_i^l(t)} = 1 \quad \text{(III.9).}$$

En posant, $\alpha_i^l(t) = \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^l(t)}$ nous obtenons:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} = \alpha_i^l(t) \times O_j^{l-1} \quad \text{(III.10).}$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial b_i^l(t)} = \alpha_i^l(t) \quad \text{(III.11).}$$

La quantité α_i^l exprime la sensibilité du critère de performance aux changements du *potentiel* U_i^l du neurone *i* de la couche *l*. Dans le cas où *i* est l'indice d'un neurone de sortie (*l* = *L*), nous obtenons :

$$\alpha_i^L(t) = \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^L} = \frac{\partial J(t)}{\partial O_i^L} \times \frac{\partial O_i^L}{\partial U_i^L} = \left(O_i^L(t) - d_i(t)\right) \times \dot{g}^L\left(U_i^L(t)\right) \quad \text{(III.12).}$$

Avec

$$\dot{g}^L\left(U_i^L(t)\right) = \frac{dg^L\left(U_i^L(t)\right)}{dU_i^L(t)} \quad \text{(III.13).}$$

Dans le cas où *i* est l'indice d'un neurone caché ($1 < l < L - 1$), nous pouvons vérifier aisément que les fonctions de sensibilité satisfont la relation récurrente ci-dessous [27].

$$\boldsymbol{\alpha}^l = \dot{G}^l\left(\boldsymbol{U}^l\right) \times \left(\boldsymbol{w}^{l+1}\right)^T \times \boldsymbol{\alpha}^{l+1} \quad \text{(III.14).}$$

Où

$$\begin{pmatrix} \dot{g}^l\left(U_1^l(t)\right) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \dot{g}^l\left(U_2^l(t)\right) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \dot{g}^l\left(U_{N_l}^l(t)\right) \end{pmatrix}$$

Pour résumer, l'algorithme de mise à jour des paramètres du réseau se déroule comme suit : premièrement le vecteur d'entrée $\boldsymbol{U}^0 = \left(x_1, x_1, ..., x_{N_0}\right)^T$ est propagé vers la sortie en utilisant l'équation (IV.3). Ensuite, nous calculons les fonctions de sensibilités par rétro-propagation de l'erreur de sortie à l'aide des équations (III.12) et (III.14). Finalement nous modifions les poids et les biais en utilisant les équations (III.10), (III.11), (III.4) et (III.5).

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a donnée des généralités on les réseaux de neurones artificiels, et la méthode d'apprentissage.

Dans le prochain chapitre, nous utilisant la méthode RNA pour le diagnostic de défauts dans le bobinage, en se référant aux données recueillies à partir des tests FRA.

IV.1. Introduction :

Dans première partie de ce chapitre on abordera, le calcul de paramètres du schéma équivalent du transformateur, et en suite la validation du modèle adoptés par des essais expérimentaux.

Dans la seconde partie, on étudiera les différents qui peuvent avoir lieu dans le bobinage, afin de construire une base de données par la classification par les RNA. Et en fin on propose une méthode permettant, la classification, la détection et l'estimation du degré de défaut dans le l'enroulement.

IV.2. calcul de paramètres du modèle adopté :

Le calcule de paramètres du modèle du transformateur constitué d'une cascade de cellule LC, est basé sur des formules analytique faisant intervenir les dimensions géométrique et les propriétés physique du bobinage.

Le bobinage est représenté pour un schéma équivalent traduisant son comportement électromagnétique figure (IV.1).

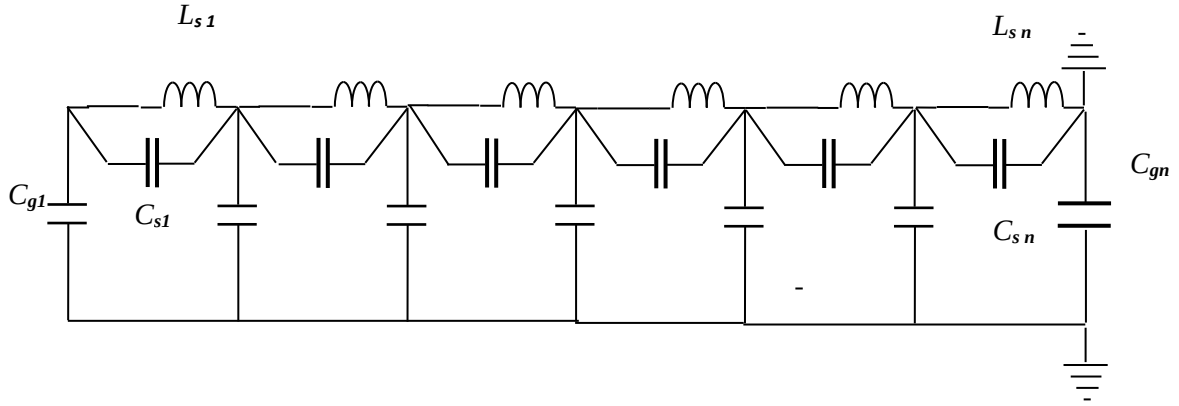


Figure (IV.1) : Schéma équivalent du transformateur sans l'influence du noyau.

IV.2.1. calcul la capacité série : [29].

La capacité série d'un système physique est défini par sa géométrie et la permittivité relative du matériau diélectrique. La capacité série est représentée par deux composantes :

- Capacité entre les spires et son symbolisé (C_{tt}).
- Capacité entre les disques et son symbolisé (C_{dd}).

La (C_{tt}) est déterminée en utilisant la formule de condensateur à plan parallèles.

$$C_{tt} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{2\tau} \qquad \text{(IV.1).}$$

Où ε_r est la permittivité relative de l'isolation entre spire, ε_0 est permittivité de l'espace libre (de l'air), A est la surface latérale d'une spire (armateur).

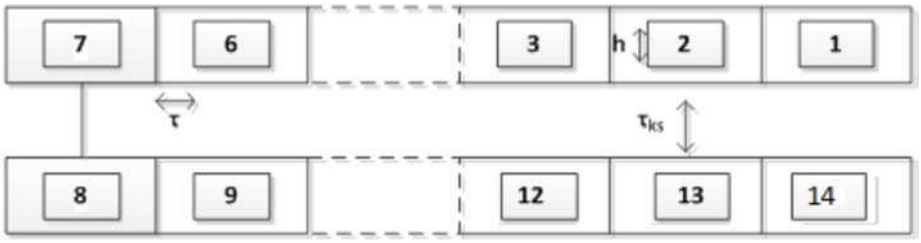


Figure (IV.2): une paire d'enroulement de disque continu.

De même, la détermination de la capacité entre disque est basée sur le considération des deux disques comme plan (capacité plan-plan) séparés par diélectrique (air).

La capacité des disques peut être définie par la somme de la capacité élémentaire (C_1) et (C_2) qui sont respectivement les capacités entre spires, la capacité entre deux disque.

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{2\tau} \qquad \text{(IV.2).}$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{air} A}{\mathrm{d}} \qquad \text{(IV.3).}$$

Le paramètre localisée pour C_{dd} est alors donnée par:

$$C_{dd} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1} \qquad \text{(IV.4).}$$

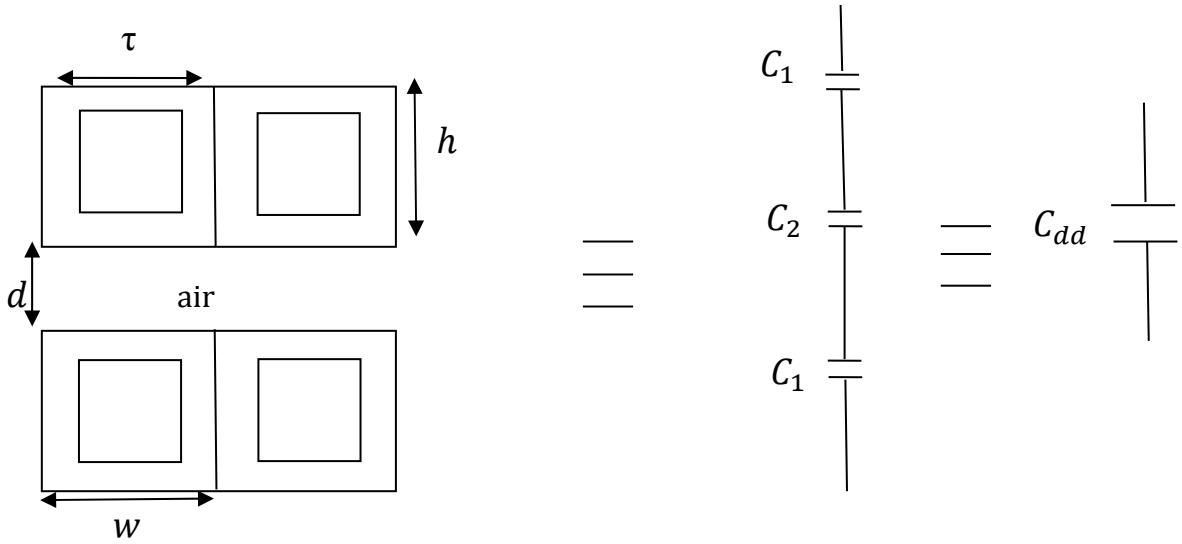


Figure (IV.3) : Configuration de C_{dd}.

Une fois que les deux composante C_{dd} et C_{tt} sont définie, la capacité totale série d'un enroulement continu peut être déterminée en supposant que la distribution de tension est non linéaire à l'intérieur du disque d'enroulement. Si N_d est le nombre de spire d'un disque, puis le nombre de capacité entre spire dans chaque disque est $(N_d - 1)$. La capacité de la série pour l'ensemble de bobinage peut être calculée comme [29]:

$$C_s = \frac{2}{N_{dw}} + \frac{(N_d-1)}{2N_d^2} C_{tt} + 4\frac{(N_{dw}-1)}{N_{dw}^2} \frac{(N_d-1)(N_d-1)}{6N_d} C_{dd} \qquad \text{(IV.5).}$$

IV.2.2. calcul de l'inductance :

Dans l'évaluation de l'inductance, il est supposé que la pénétration du flux magnétique dans le fer feuilleté est négligeable à des fréquences supérieures à 1 MHz [27].pour cette raison, on se limite au calcul de l'inductance propre l_s .

L'inductance peut être calculée comme sont [28] :

$$l_s = \frac{N^2}{R} \qquad \text{(IV.6).}$$

Où N est le nombre de spires de l'enroulement, R est la réluctance du circuit magnétique (là où $R = \frac{l}{\mu A}$), l est la longueur du chemin magnétique. Pour les deux disques, A est la surface en coupe transversale du disque et μ est la perméabilité de l'espace libre.

Toutefois, selon [28] une méthode plus précise de la modélisation inductance est faite en utilisant la méthode de Lyle. Pour le calcul de l'inductance Figure (IV.4).

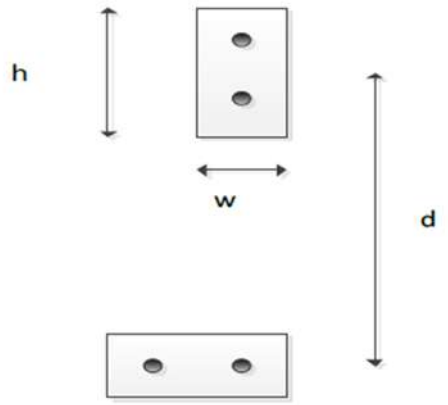


Figure (IV.4): la méthode de calcul de Lyle inductance pour bobine de section rectangulaire.

L'expression suivante peut être utilisée pour calculer l'inductance de la bobine de section rectangulaire:

$$l_s = \mu_0 R_m \, Nd^2 \, (\ln\frac{8R_m}{\mathrm{GMD}} - 2) \qquad \text{(IV.7).}$$

Où R_m est le rayon moyen de les enroulements HT et les enrolements BT pour les deux disques, N_d est le nombre de spire par disque. La deuxième partie de l'équation nécessite dimension du tour conducteur tourner donnée par (w×h) qui est la section transversale rectangulaire et GMD est le rayon moyen géométrique donnée par :

$$\ln(GMD) = \frac{1}{2}\ln(h^2 + w^2) + \frac{2w}{3h} tan^{-1}\frac{h}{w} + \frac{2h}{3w} tan^{-1}\frac{w}{h} - \frac{w^2}{12h^2}\ln\left(1 + \frac{w^2}{h^2}\right) - \frac{h^2}{12w^2}\ln\left(1 + \frac{w^2}{h^2}\right) - \frac{25}{12}$$

(IV.8).

IV.2.3. Calcul de Capacité avec la terre : [30], [31].

Les enroulements faut une partie essentiel du transformateur, que ce soit en BT ou bien en HT, la configuration de ces paramétres (BT ou HT) sont présenter en figure (IV.5). le calcul de la capacité de terre (capacité shunt). Se base sur les dimensions de ces enroulements qui sont considérer comme des cylindrics centrale. Un facteur nécéssaire est très important aussi dans ces calculs comme la figure (IV.6) le montre.

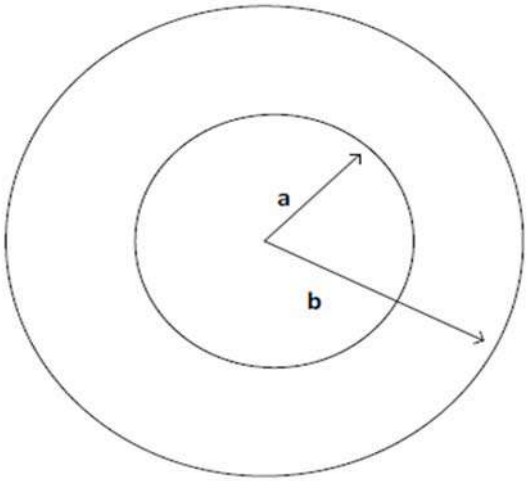


Figure (IV.5): Représentation du noyau BT et HT.

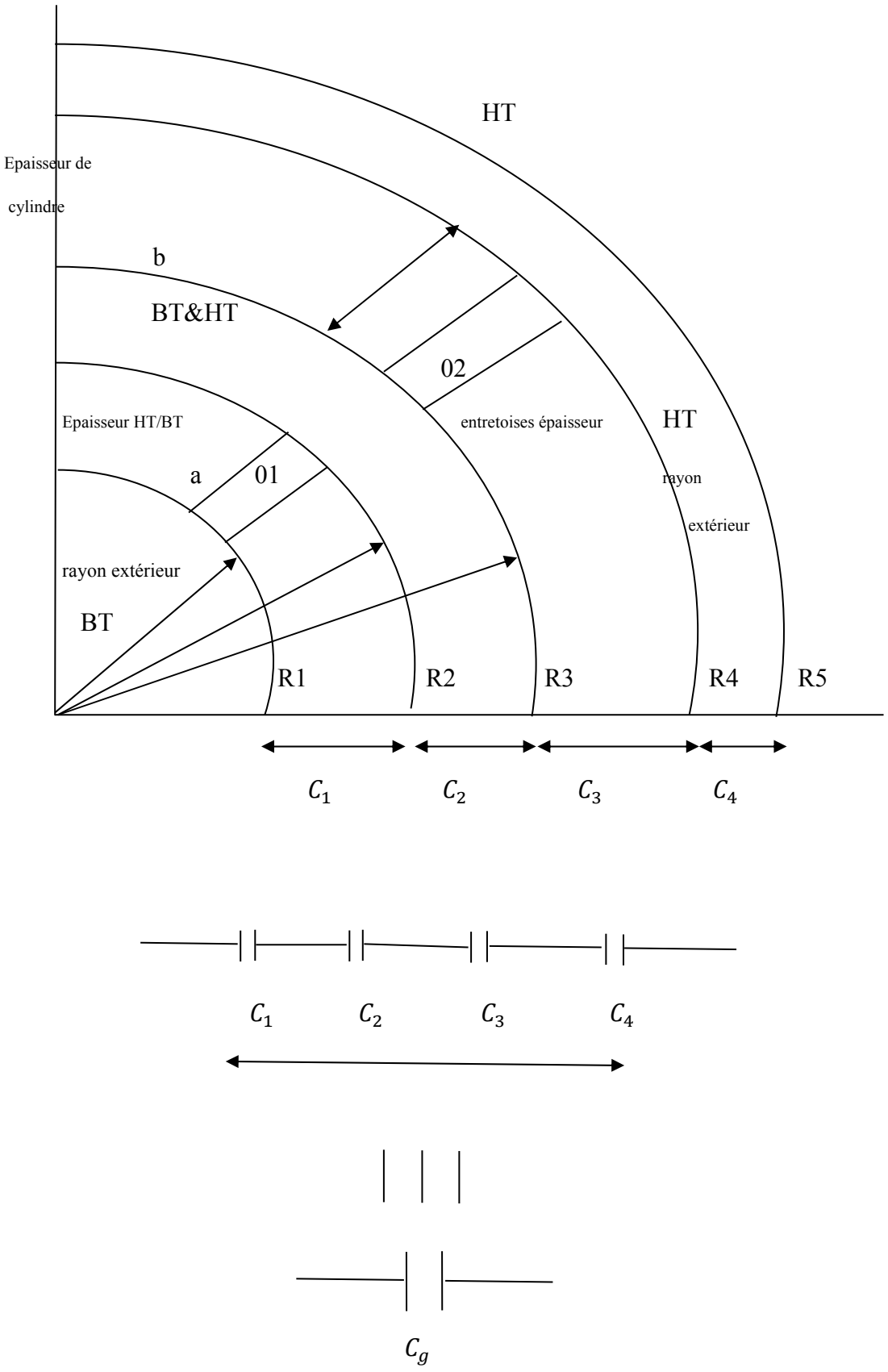


Figure (IV.6) : configuration de calculC_g.

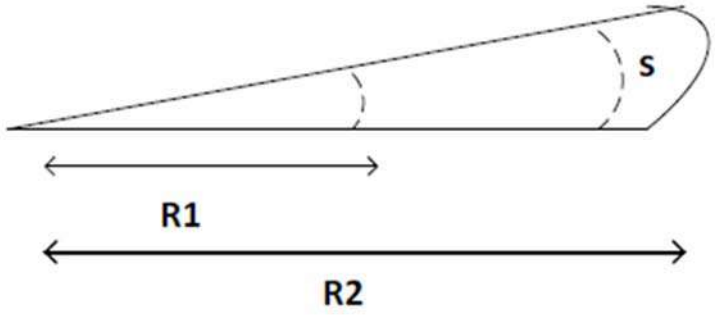


Figure (IV.7): représentation des entretoises.

Les capacités entre spires dans le bobinage haute tension sont calculées en considérant une configuration de cylindres concentriques à l'aide de l'équation (IV.9), Et la capacité individuelle peut être élaborée avec les formules suivantes:

$$C_s = \frac{\mathcal{E}_0(2\pi - N\Theta 1) + \mathcal{E}_0\mathcal{E}_1 N_{\Theta 1}}{\ln\frac{R_2}{R_1}} \qquad \text{(IV.9).}$$

Où $\mathcal{E}_0$ est la permittivité de l'espace libre, N est le nombre d'éléments d'espacement inter-disque, Θ_1 est l'angle sous-tendu par entretoise au centre (donné par $\Theta_1 = \frac{S}{r} = \frac{\text{largeur d'espaceurs}}{\text{rayon moyen}}$) , $\mathcal{E}_1$ est la permittivité relative de cylindre et l'entretoise respective. $R1$ est le rayon extérieur de l'enroulement BT comme illustré sur la Figure (IV.5) R_2 égal R_1 plus l'épaisseur des entretoises BT / HT. De même R_3 égal R_2 plus l'épaisseur du cylindre entre les enroulements basse et haute tension et la formulation peut être étendue pour tenir compte de l'épaisseur des entretoises en queue d'aronde pour HT($R_4. R_5$) Est le rayon extérieur de l'enroulement haute tension.

Le calcul de C_2 est plus simple puisque l'effet d'écartement est négligée.

$$C_2 = \frac{\mathcal{E}_0\mathcal{E}_1}{\ln\frac{R_3}{R_2}} \qquad \text{(IV.10)}$$

Le processus pourrait être vérifié pour C_3 et C_4 en utilisent les formules précédents, finalement le la capacité équivalente C_g vaut :

$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} \qquad \text{(IV.11).}$$

Les valeurs finales de la capacité série, la capacité shunt et l'inductance sont indiquées dans le tableau (IV.1).

Symbole du paramètre	Description	Valeurs de la première bobine	Valeurs de la deuxième bobine
Cs	Capacité Série	2.807670e-010 F	8.981220e-010 F
Cg	la capacité shunt	1.078463e-010 F	4.363148e-009 F
Ls	Self-inductance	1.532250e-004 H	1.310548e-002 H

Tableau(IV.1) : résultat de simulation.

IV.3. Essais expérimentaux, simulation du modèle et validation :

Le modèle proposé est basé sur la caractéristique électro-géométrique de l'enroulement considère.

La validation consiste à comparer les données obtenues par le procédé de la réponse en fréquence de l'impédance et de celles obtenues par le modèle proposé. Les impédances sont évaluées en fonction de la fréquence, la réponse générée par le modèle comportant une cascade de cellules LC.

La Méthode suivante représente les différentes étapes utilisées pour déterminer les paramètres du schéma équivalent d'un enroulement étudié.

Le modèle proposé est constitué d'une cascade de cellules LC, dont nombre est déterminé en fonction du nombre de disques composant l'enroulement de Figure (IV.1).

Le calcul des paramètres $C_s, L_s \; et \; C_g$ associés à chaque cellule sont obtenus en utilisant les équations développées dans le paragraphe précédent et programme sous *Matlab* (voir l'annexe 1).

Les paramètres physiques et géométriques du bobinage considérés sont :

- Nombre de disques ($05=N_{dw}$).
- Nombre de Tour par disque 30 Tours sur trois couches.
- Chaque couche ($N=10$) Tours.
- Section du conducteur ($2mm*5mm$).

- La distance entre les disques (D_{dd}=0.0236).
- La distance entre les Tours (D_{tt}= 0.000015 m).
- La hauteur de galette (h=10*5 mm).
- Le Rayon moyen ($(r+R)/2$)= R_m) = 0.0890).
- Permittivité relative (papier sec=2.5/aire=1).
- Perméabilité absolue du vide (μ_0=4*π*10^{-7}).
- L'épaisseur de l'inductance (w= 3*2mm).

Les paramètres calculés sont :

C_s=2.807670^{-10} F.

L_s =1.532250^{-4} H.

C_g=1.078463^{-10} F.

IV.3.1. Essai expérimentaux :

La figure (IV.8), représente le schéma du montage utilisé (a) et le schéma de simulation équivalent (b).

La figure suivante représente la structure du test FRA sur la bobine.

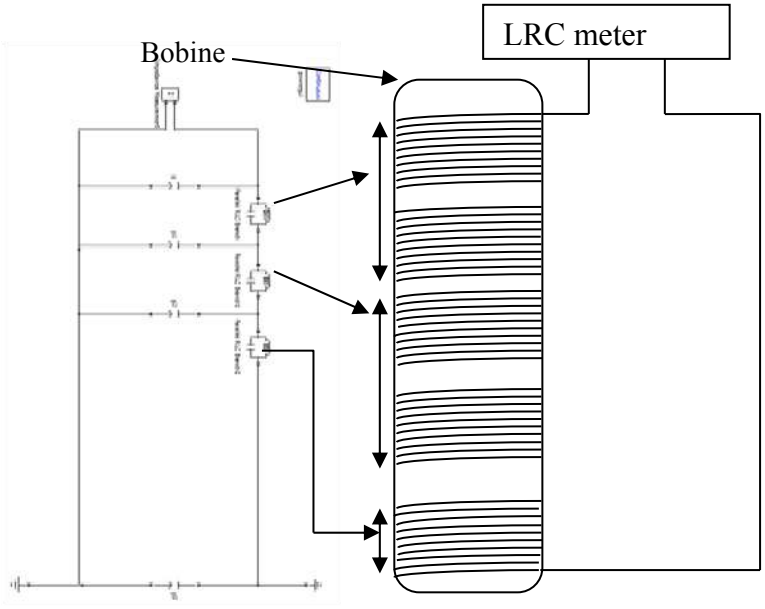


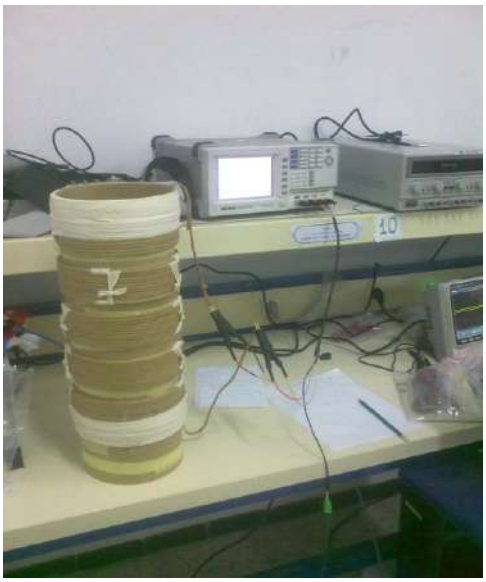
Figure (IV.8): le schéma équivalent de l'enroulement étudié.

La mesure de la réponse en fréquence (FRA) a été réalisée sur un enroulement réel à l'aide de la méthode de balayage en utilisant l'équipement suivant :

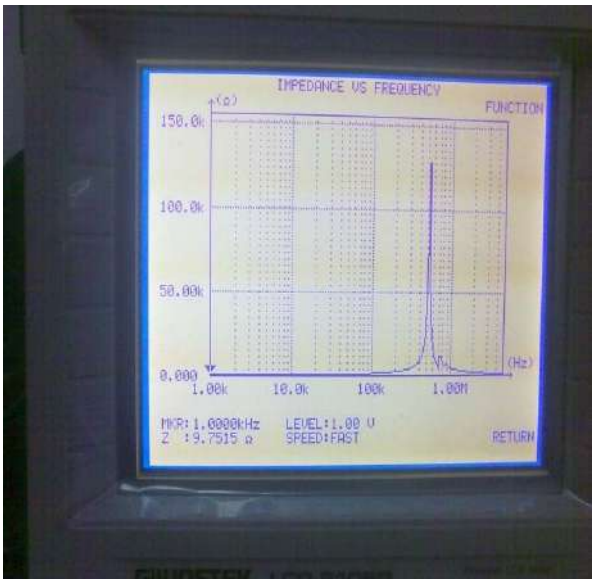
-Précision LRC meter DC [20Hz-5MHz].

-Un enroulement dont les paramètres sont présentés précédemment.

La figure suivante représente la réponse en fréquence de l'enroulement testé, cette dernière est obtenu point-par point avec un pas de 1KHz.

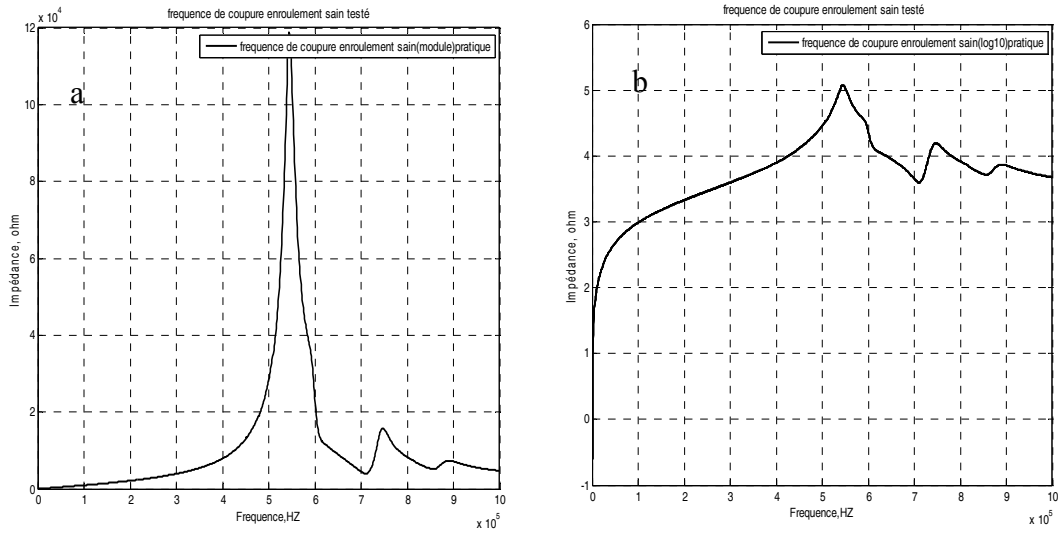


Figure(IV.9) : banc d'essai.



Figure(IV.10) : Réponse FRA Expérimentale.

La réponse en fréquence dans l'échelle linéaire est donnée par la figure (a) et dans le échelle logarithmique par la figure (b).



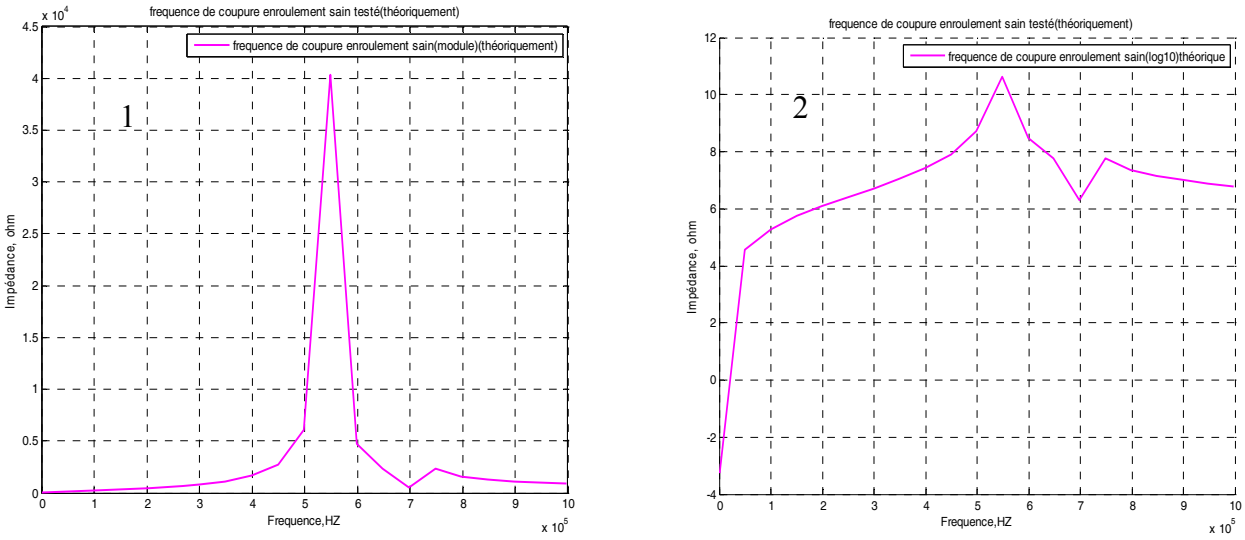
Figure(IV.11) : réponse en fréquence mesurée de l'impédance

a- Echelle linéaire b-Echelle logarithmique

IV.3.2. Validation de modèle :

IV.3.2.1. simulation du schéma équivalent :

La réponse en fréquence obtenus à partir du schéma équivalent proposé est donnée par la figure suivante :

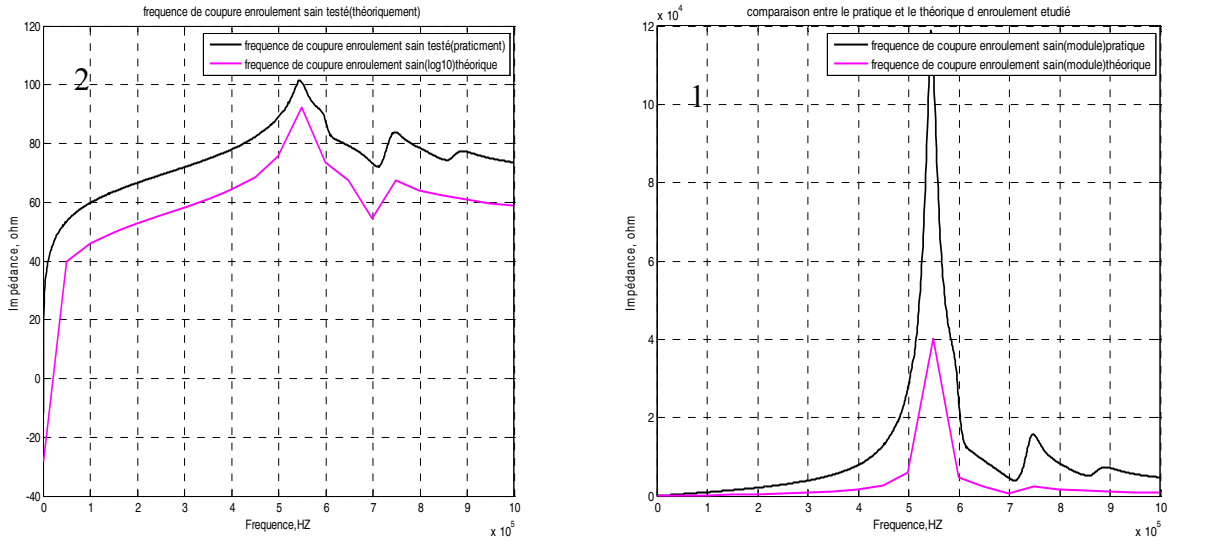


Figure(IV.12) : réponse en fréquence simulée de l'impédance

1-Echelle linéaire 2-Echelle logarithmique

Dans le but de validation le modèle proposé, les deux réponses expérimentale et simulé sont comparées.

La figure suivant (IV.13), représente la comparaison entre ces deux réponses.



Figure(IV.13) : Comparaison entre la réponse en fréquence mesuré et simulée de L'impédance.

1-Echelle linéaire 2-Echelle logarithmique

Le tableau suivant représente les valeurs des fréquences de coupures obtenues à partir des deux réponses.

Fréquence de coupure de simulation	Fréquence de coupure expérimentale	Pourcentage de taux de décalage
$5.48*10^5$	$5.41*10^5$	1.3 %
$7.47*10^5$	$7.47*10^5$	0 %

Tableau (IV.2) : Valeur des fréquences de coupures obtenues des deux réponses.

On voit bien que d'après les valeurs des fréquences de coupure obtenues expérimentalement et celles obtenues par la simulation du modèle que l'écart entre ces fréquences ne de passe pas 1.3%, ce qui valide le modèle proposé.

Il est à noter que différence enregistrée sur la valeur de l'impédance est due à non prise en compte des mutuelles et des résistances est également certaines imprécisions dans la mesure des dimensions du bobinage.

IV.3.2.2. Simulation les différents défauts étudiés :

Apres avoir validé le modèle adopté nous allons l'exploité pour une étude de diagnostic de l'enroulement du transformateur. Pour étudier les différentes défaillances de l'enroulement avec la technique d'analyse fréquentielle, on a fait varier les paramètres du modèle d'un enroulement supposé sain. Les modifications des valeurs de ces paramètres dépendent du défaut à analyser.

Les défauts simulés sont les suivants :

- Augmentation de L_s :
  a) Ouverture de circuit entre le deuxième et troisième disque
  b) Ouverture de circuit entre le quatrième et cinquième disque.
- Diminution de L_s (Défaut de Court-circuit):
  a) Diminution de 50% L_s (cc dans le premier disque qui contient 2 galettes ($1^{ér}$ et $2^{éme}$)).
  b) Diminution de 50% L_s (cc dans le deuxième disque qui contient la $3^{éme}$ et la $4^{éme}$ galette.

- défaut de C_s (série) :

a) Diminution de 50% C_s (Augmentation de distance ou dégradation d'isolement dans le $1^{ér}$ disque qui contient la $1^{ér}$ et la $2^{éme}$ galette).

b) Diminution de 50% C_s (Augmentation de distance ou dégradation d'isolement dans le $2^{éme}$ disque qui contient la $3^{éme}$ et la $4^{éme}$ galette).

c) Augmentation 50% C_s (Diminution de distance dans le $1^{ér}$ disque qui contient la $1^{ér}$ et la $2^{éme}$ galette).

d) Augmentation de 50% C_s (Diminution de distance dans $2^{éme}$ le disque qui contient la $3^{éme}$ et la $4^{éme}$ galette).

- défaut de C_g (parallèle) :

a) Diminution de 50% C_g (Augmentation de distance ou dégradation d'isolement dans le $1^{ér}$ disque qui contient la $1^{ér}$ et la $2^{éme}$ galette).

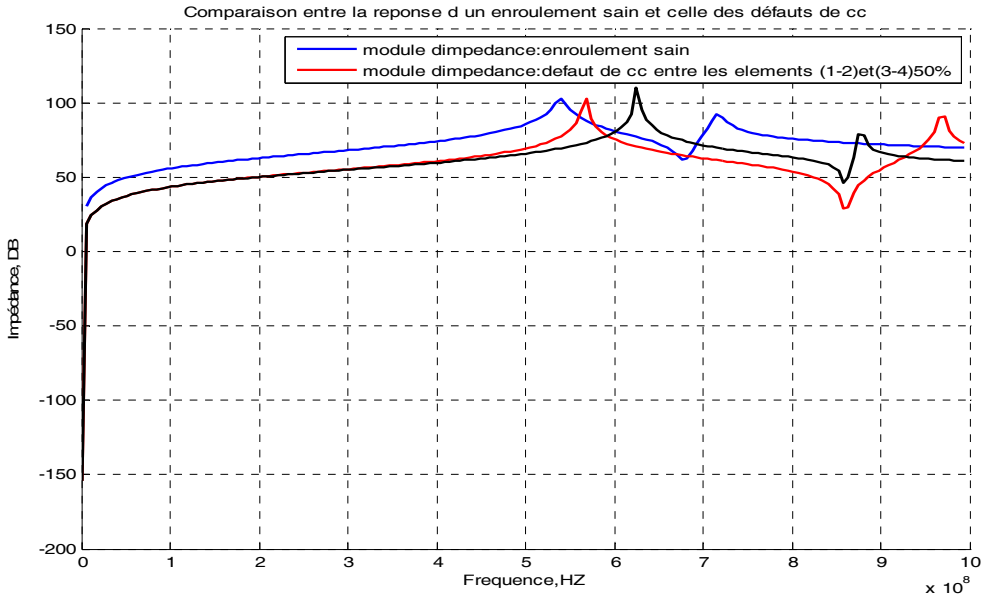
b) Diminution de 50%C_g (Augmentation de distance ou dégradation d'isolement dans le $2^{éme}$ disque qui contient la $3^{éme}$ et la $4^{éme}$ galette).

c) Augmentation 50% C_g (Diminution de distance dans le $1^{ér}$ disque qui contient la $1^{ér}$et la $2^{éme}$ galette).

d) Augmentation de 50% C_g (Diminution de distance dans le $2^{éme}$ disque qui contient la $3^{éme}$ et la $4^{éme}$ galette).

IV.3.2.2.a. Court-circuit entre spires :

- **Court-circuit entre les éléments (1-2) et (3-4):**



Figure(IV.14) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre les éléments (1-2) et (3-4) et un enroulement sain.

Les fréquences de coupures obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.3).

enroulement sain	C-C entre les éléments (1 – 2)	C-C entre les éléments (3 – 4)	Taux de Comparaison (%) (Sain – C-C (1-2))	Taux de comparaison (%) (Sain – C-C (3-4))
$5.39*10^5$	$5.68*10^5$	$6.25*10^5$	5.38 %	15.95 %
$7.16*10^5$	$9.65*10^5$	$8.75*10^5$	34.77 %	22.21 %

Tableau (IV.3) : comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre les éléments (1-2) et(3-4) et un enroulement sain.

Observation : A partir de la comparaison entre l'empreinte de la fréquence de coupure issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un court-circuit entres les éléments voisins (1-2) et (3-4), nous avons observés que les fréquences de coupures se décalent vers la droite.

IV.3.2.2.b. Déformation propres de l'enroulement :

- **Augmentation de la capacité série (C_s) (dégradation de l'isolant), changement capacitifs :**

Dans cet exemple, les changements capacitifs sont introduits dans le modèle de bobine. La réponse $z = f\ (f\ )$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.

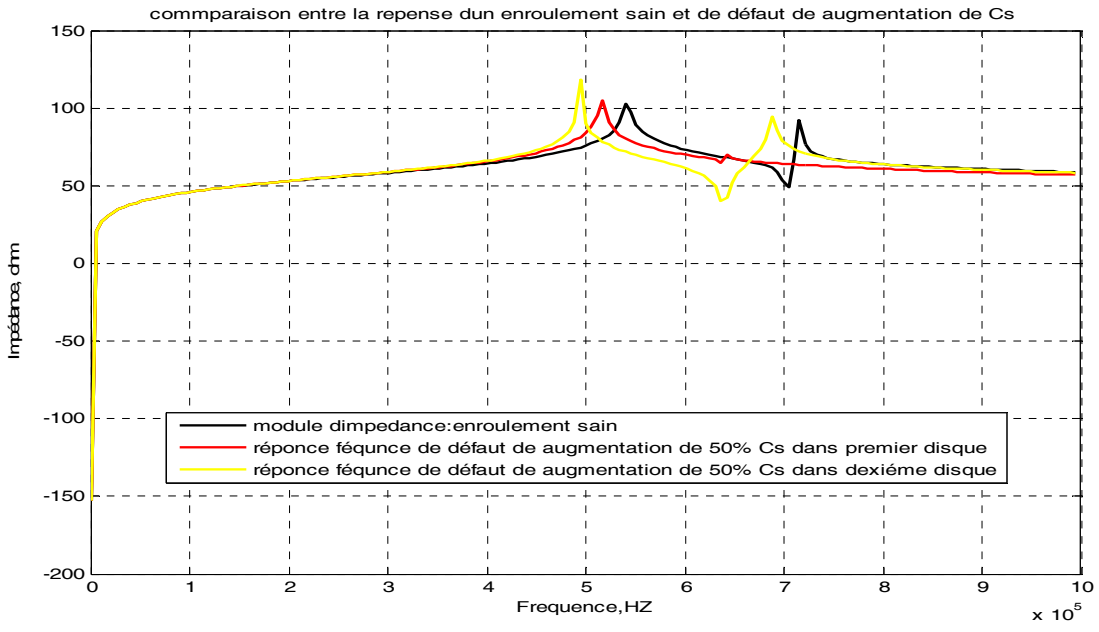


Figure (IV.15) : Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité série (Cs) dans les deux cellules.

Les fréquences de coupures obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.4).

enroulement sain	Augmentation de C_s entre les éléments (1 – 2)	Augmentation de C_s entre les éléments (3 – 4)	Taux de décalage (%) (Sain – Augmentation de C_s (1-2))	Taux de décalage (%) (Sain – Augmentation de C_s (3-4))
$5.39*10^5$	$5.17*10^5$	$4.94*10^5$	4.08 %	8.35 %
$7.16*10^5$	$6.42*10^5$	$6.87*10^5$	10.36 %	4.05 %

Tableau(IV.4) : comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut d'augmentation de capacité série (C_s) et un enroulement sain dans les deux cellules (1-2) et (3-4).

Observation : D'après la signature de l'impédance de l'enroulement présentant une variation de la capacité série en remarque que les fréquences de coupure se décalent vers la gauche.

- **Augmentation de la capacité shunt (C_g) (déplacement de l'enroulement):**

Dans cet exemple, les changements capacitifs sont introduits dans le modèle de la bobine. La réponse $z = f(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.

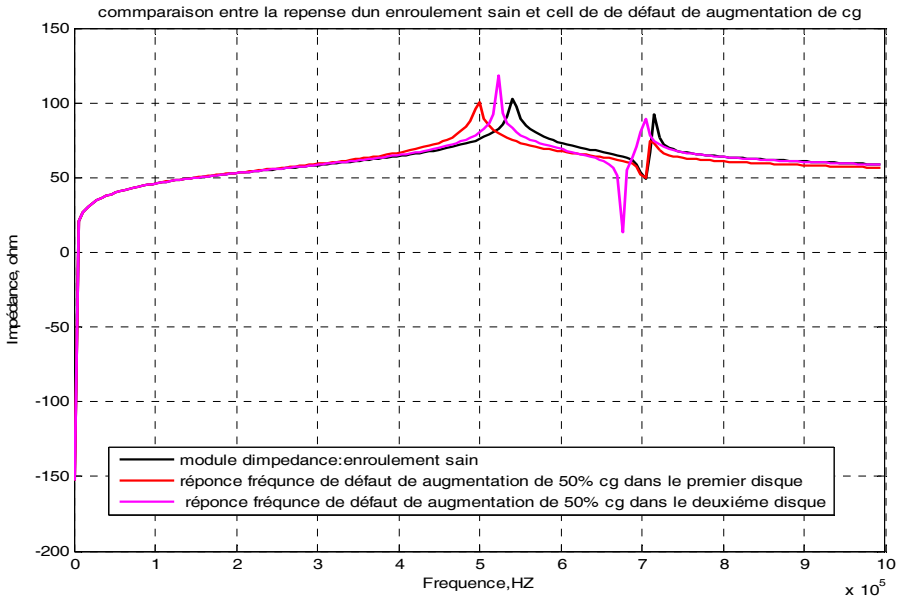


Figure (IV.16): Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité transversale (C_g) dans les deux disques.

Les fréquences de coupures obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.5).

enroulement sain	Augmentation de C_g entre les éléments (1-2)	Augmentation de C_g entre les éléments (3-4)	Taux de décalage (%) entre (Sain – Augmentation de C_g (1-2))	Taux de décalage entre (Sain – Augmentation de C_g (3-4))
$5.39*10^5$	$5.00*10^5$	$5.22*10^5$	7.24 %	3.15 %
$7.16*10^5$	$7.15*10^5$	$7.06*10^5$	0.14 %	1.4 %

Tableau(IV.5) : comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut d'augmentation de capacité shunt (C_g) et un enroulement sain dans les deux cellules.

Observation : D'après la signature de l'impédance de l'enroulement présentant une variation de la capacité transversale, on remarque que les fréquences de coupure se décalent vers la gauche.

- **Comparaison entre les défauts capacitifs série et un enroulement sain :**

La figure suivante représente les différentes impédances pour chacun des points de déplacement axial ou radial de l'enroulement.

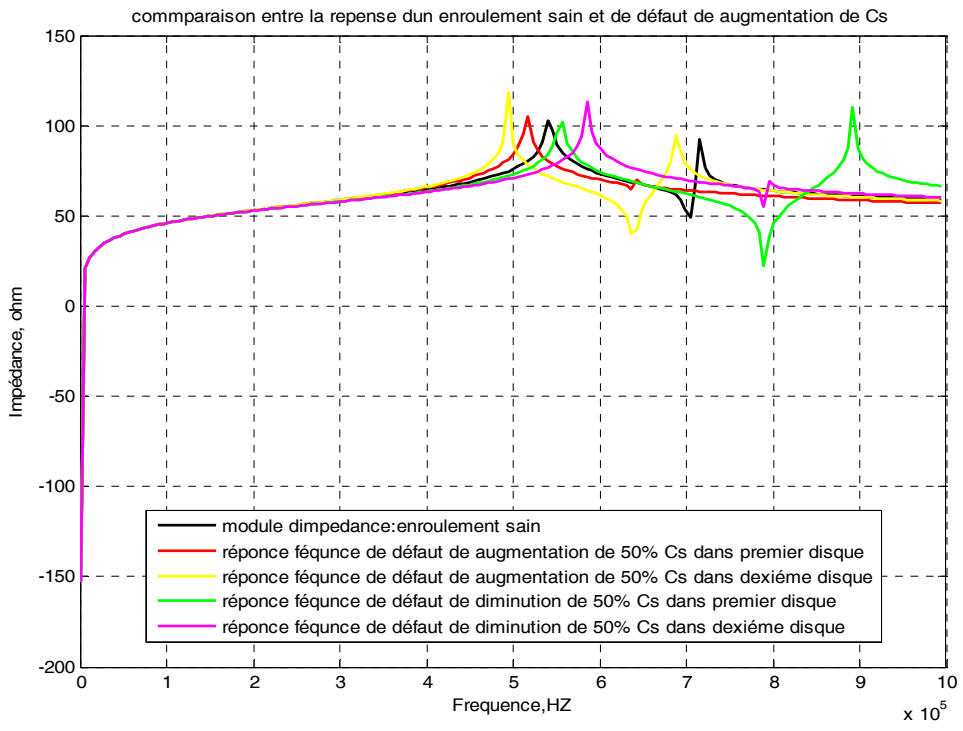
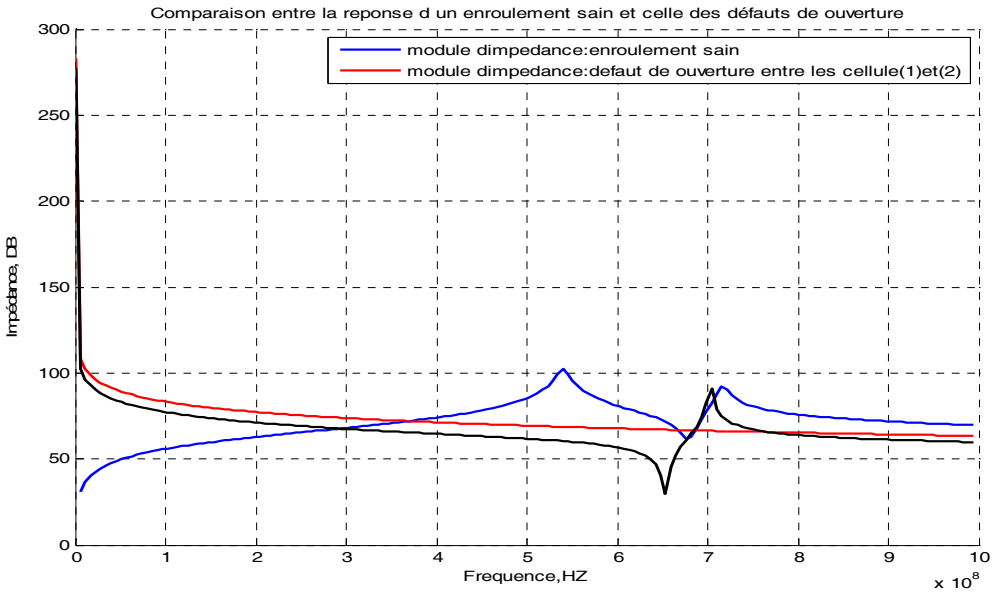


Figure (IV.17): Les différentes impédances pour différents changement capacitifs et celle de l'enroulement sain.

IV.3.2.2.c. Ouverture des spires :

- **Défaut d'ouverture entre les éléments (1) et (2) :**



Figure(IV.18) : Les différentes impédances pour l'ouverture entre les éléments (1) et (2) et celle de l'enroulement sain.

Les fréquences de coupures obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.6).

enroulement sain	Ouverture de circuit entre la $1^{ér}$ cellule et $2^{éme}$ cellule	Ouverture de circuit entre la $4^{éme}$ cellule et $5^{éme}$ cellule	Taux de décalage (%) entre (Sain – Ouverture de circuit entre la $1^{ér}$ cellule et $2^{éme}$ cellule)	Taux de décalage (%) entre (Sain – Ouverture de circuit entre la $4^{éme}$ cellule et $5^{éme}$ cellule)
5.39*10^5	-	7.04*10^5	-	30.61 %
7.16*10^5	-	-	-	-

Tableau (IV.6) : comparaison de la fréquence de coupure entre un enroulement présentant un défaut d'Ouverture de circuit entre les cellules et un enroulement sain.

IV.4. Application de RNA dans le diagnostic et la localisation des défauts naissant :

Les réseaux de neurones sont des êtres mathématiques, capables de générer des modèles comportementaux à partir des données entrées-sorties des systèmes dynamique.

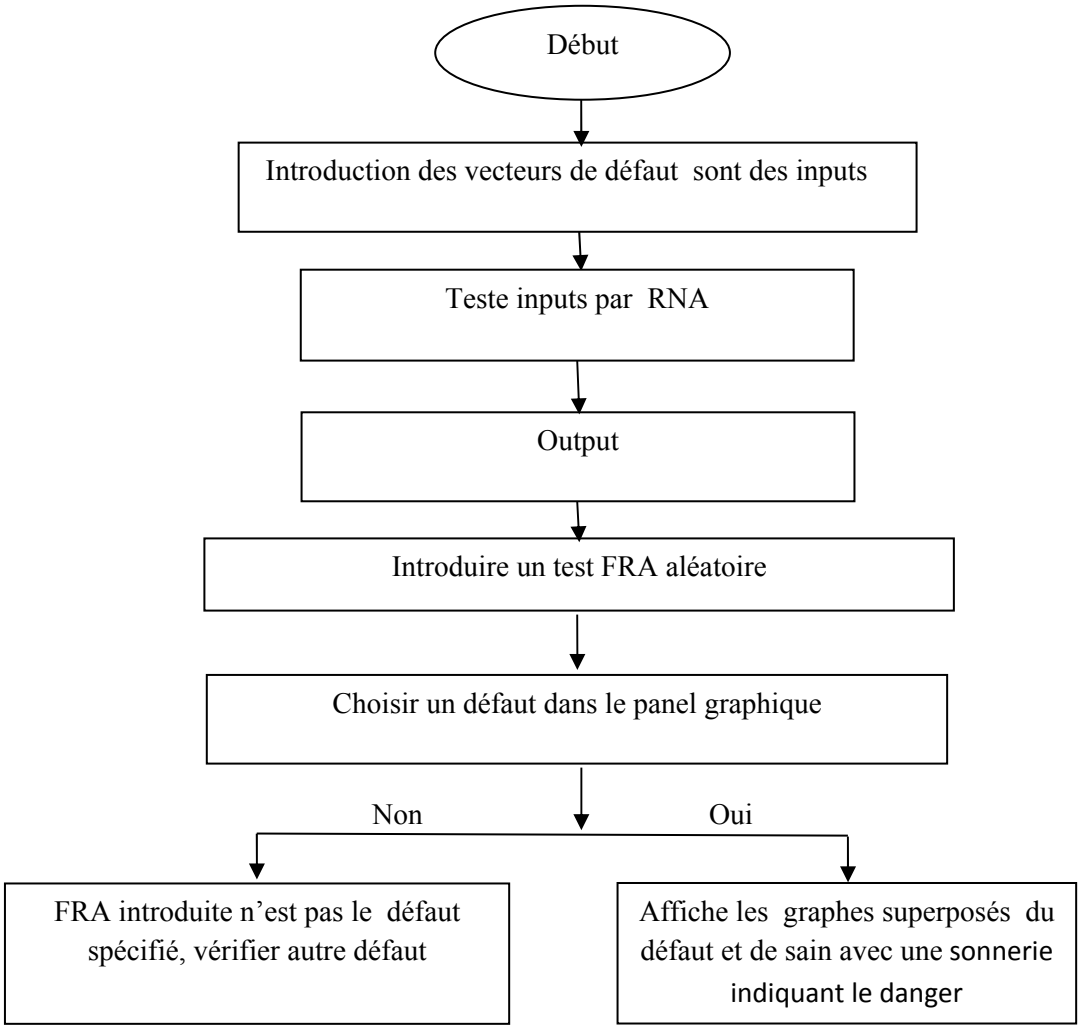
Dernièrement, les réseaux de neurones ont connu une large utilisation en ce qui concerne la modélisation, la commande et la surveillance des systèmes industriels.

L'utilisation des modèles neuronaux pour les mesures, l'observation, le diagnostic et localisation vient mettre fin à beaucoup de problèmes rencontrés lors de la modélisation classique.

Le réseau de neurone adopté pour le diagnostique est un réseau multicouches à apprentissage supervisé, entraînés par l'algorithme de Back propagation (cette algorithme reste de l'on le plus utilisé) [32].

L'architecture du RNA (nombre de couches cachées, nombre de neurones) est un facteur important décidant de la qualité de l'apprentissage plus que les paramètres d'apprentissage.

IV.4.1. Organigramme de classification par RNA :



Organigramme de classification par RNA

IV.4.2. Explication de l'organigramme :

IV.4.2.1. Entrées du réseau RNA :

La base de données utilisées comme entrées au réseau de neurones est obtenue à partir des tests de la réponse en fréquence (FRA) appliqués aux des enroulements du transformateur de puissance :

- Transformateur enroulement sain
- Défaut d'ouverture de circuit
- Court-circuit entre enroulement
- Défaut de la capacité série (C_s) (dégradation de l'isolant)
- Défaut de la capacité shunt (C_g) (déplacement de l'enroulement)

IV.4.2.2. Sorties du réseau RNA :

Les sorties sont les types de défaut qui surviennent : court-circuit entre les spires ou élément, déformation propres de l'enroulement, ouverture d'une partie de l'enroulement ou le cas normal.

IV.4.2.3. Couche cachée :

L'utilisation d'un grand nombre de couches cachées est non recommandée. La grande majorité des problèmes de normes de classification utilise seulement un ou au plus deux couches cachées. Le nombre de neurones dans la couche cachée est généralement défini de façon empirique.

Le réseau de neurones utilisé comporte trois couches : une couche d'entrée de treize neurones, deux couches cachées, quinze dans la première couche cachée et treize dans la deuxième couche cachée, une couche de sortie de treize neurones.

La fonction d'activation utilisée est type logsig.

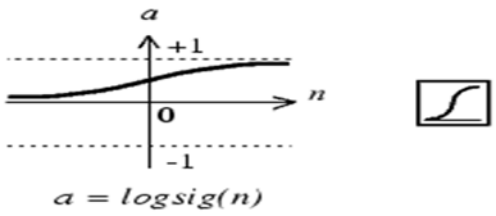
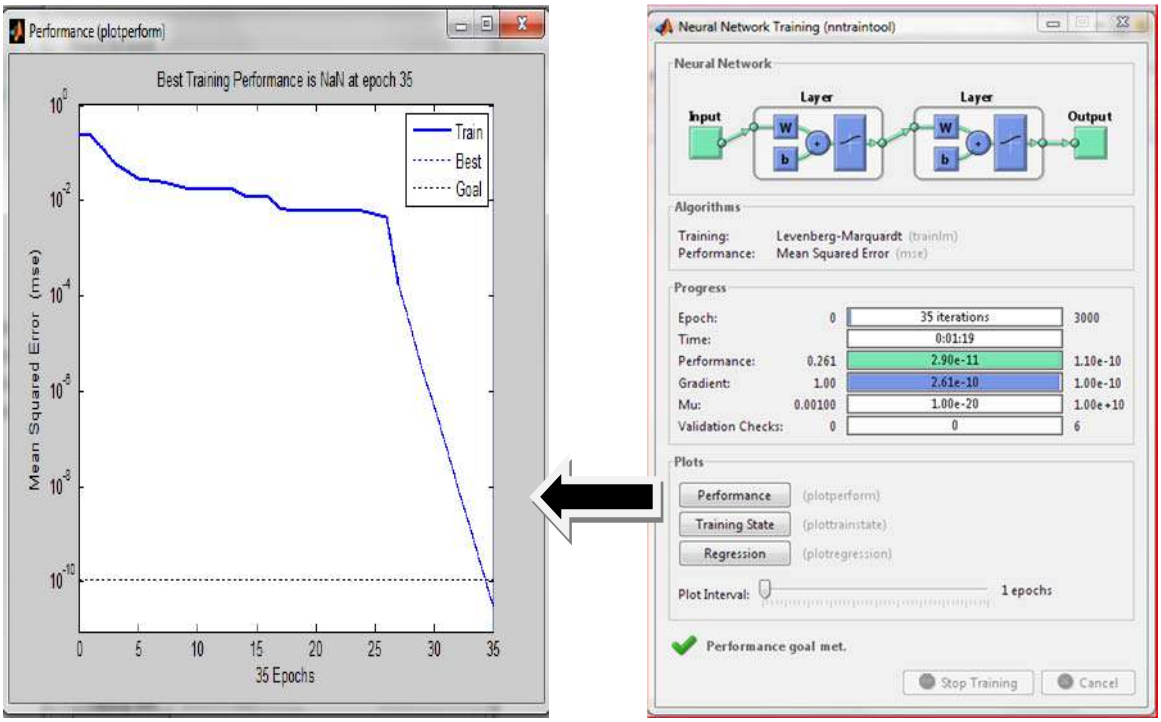


Figure (IV.19) : Fonction de transfert log- Sigmoïde.



Deux couches cachées (15 et 13 neurones)

Figure (IV.20) : L'erreur d'apprentissage du réseau de neurones.

- **Commentaire :** [28].

Une fois que le réseau de neurone est construit et que leur apprentissage a atteint des performances satisfaisantes, on passe à l'étape de comparaison entre les résultats de simulation et la sortie de réseau de neurone, ceci nous permet d'observer les erreurs correspondantes.

Cela peut être expliqué par les résultats obtenus dans la phase d'apprentissage de réseaux de neurone à deux couches cachées, quinze dans la première couche cachée et treize dans la deuxième couche cachée comme le montrent le figure (IV.20).

IV.4.2.4. Affichage des résultats de classification :

Une fois le RNA est validé, un défaut est injecté à l'entrée de réseau, ce défaut est traduit en code binaire :

- la valeur (0) représente un neurone inactif, pas d'existence de défaut.
- la valeur (1) un neurone actif, probabilité d'existence de défaut.

Afin de faciliter la détection de défaut, un menu d'affichage est crée sous le nom « panneau de contrôle ».Ce menu s'affiche sur une boîte de dialogue comme le montrent le figure (IV.21).



Figure (IV.21) : Panneau de contrôle.

En appuyant sur l'une des commandes boîte de dialogue, cette dernière se ferme, un message vient s'afficher sur la fenêtre commande window sur MATLAB.

- Si l'entrée n'ait pas un défaut, un message suivant s'affiche « enroulement sain », si l'operateur appuis sur le bouton « l'enroulement du transformateur sain », si par erreur il appui l'un « Défaut de Court-circuit », « Défaut d'ouverture de circuit », « Défaut capacitifs » autres du message affiche est « pas cette défaut ».
- Si l'entrée ait un défaut quelconque, l'operateur appui sur l'un des boutons, deux situations présentée :

    1) Le bouton sélectionné ne corresponde au défaut injecté : un message « pas ce type de défaut, vérifier autre défaut ».

    2) Le bouton sélectionné correspond au défaut injecté : une alarme suivie du message « type de défaut » avec un graphe superposant la réponse d'un enroulement sain avec celle d'un enroulement d'afficher apparaît.

IV.5. Méthode proposée pour la classification, détection et estimation du défaut :

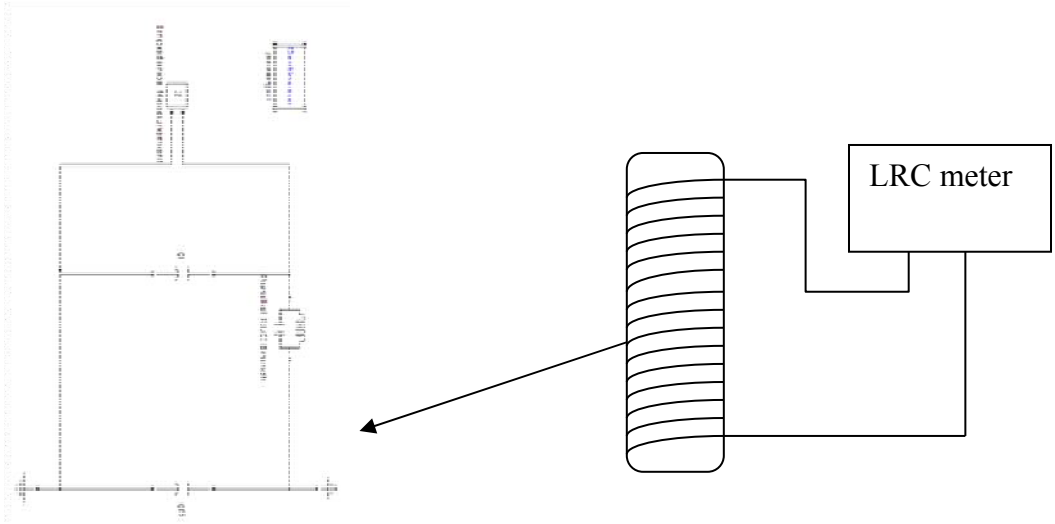
Afin de classer, détecter et estimer le taux de défaillance de l'enroulement considéré, on a proposé une méthode basé sur la réponse de l'enroulement.

La bobine testée contient 200 spires de section($0.785mm^2$).

IV.5.1 Essais expérimentaux et simulation du modèle de la bobine :

IV.5.1.1. Essai expérimentaux :

La figure (III.21), représente le schéma du montage utilisé (a) et le schéma de simulation équivalent (b).



(b) (a)

Figure(IV.22) : schéma équivalant d'une bobine.

La mesure de la réponse en fréquence (FRA) a été réalisée sur un enroulement réel à l'aide de la méthode de balayage en utilisant l'équipement suivant :

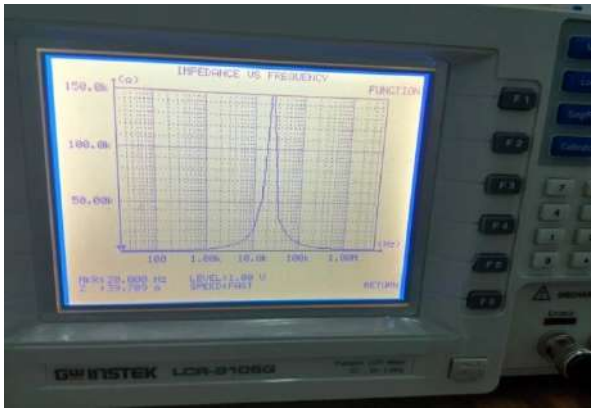
-Précision LRC meter DC [20Hz-5MHz].

-Un enroulement dont les paramètres sont présentés précédemment.

La figure suivante représente la réponse en fréquence de l'enroulement testé, cette dernière est obtenu point-par point avec un pas de 1kHz.

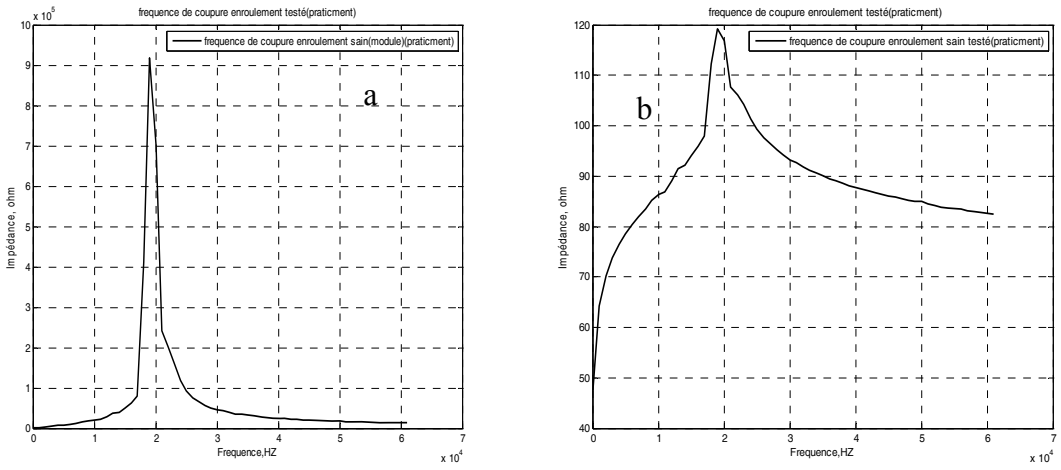


Figure(IV.23) : banc d'essai(2).



Figure(IV.24) : Réponse FRA.

La réponse en fréquence dans le échelle linéaire est données par la figure (a) et dans le échelle logarithmique par la figure (b).



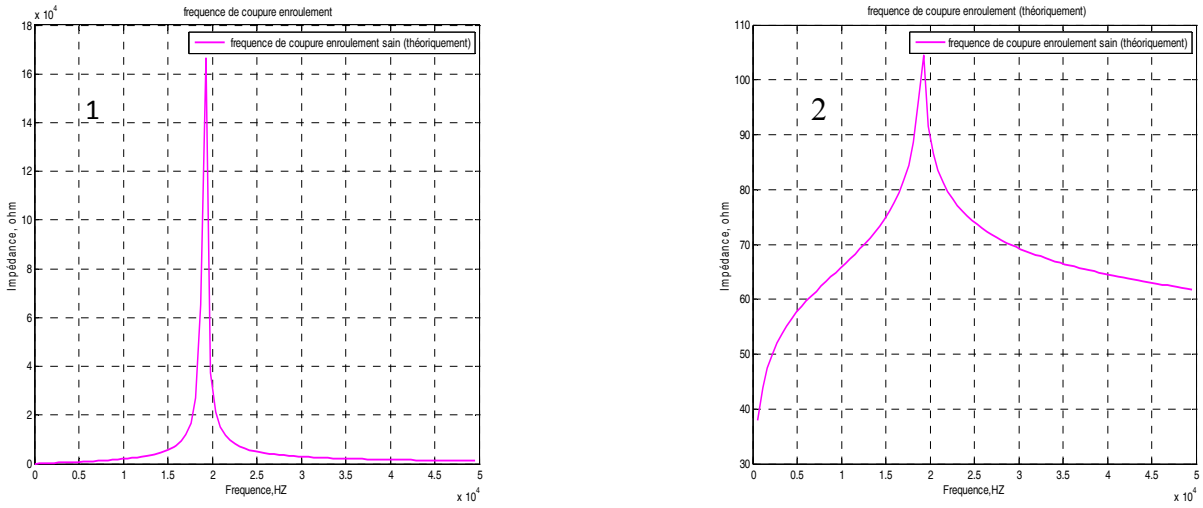
Figure(IV.25) : réponse en fréquence dans :

a) Echelle linéaire.
b) Echelle logarithmique.

IV.5.1.2. Validation du modèle :

IV.5.1.2.1. simulation de modèle :

La réponse en fréquence obtenue à partir du schéma équivalent proposé est donnée par la figure suivante :



Figure(IV.26) : représentation du test FRA par :

1) Echelle linéaire.
2) Echelle logarithmique.

Dans le but de validation du modèle de la bobine, les deux réponses expérimentale et simulée sont comparées.

La figure (IV.27) suivante, représente la comparaison entre ces deux réponses.

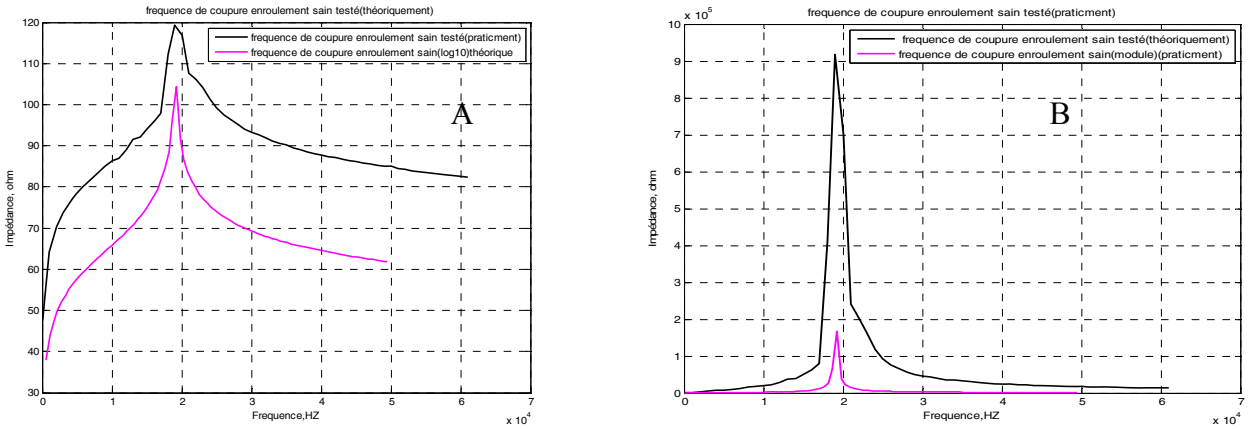


Figure (IV.27) : présente la comparaison.

A. Echelle Logarithmique.
B. Echelle Linéaire.

Le tableau suivant représente les valeurs des fréquences de coupures et les valeurs de l'impédance obtenues des deux réponses.

	Fréquence de coupure de simulation	Fréquence de coupure expérimentale	Taux de décalage (%)
fréquence	$1.92*10^4$	$1.90*10^4$	1.01 %
impédance	104.4 (ohm)	119.2 (ohm)	12.42 %

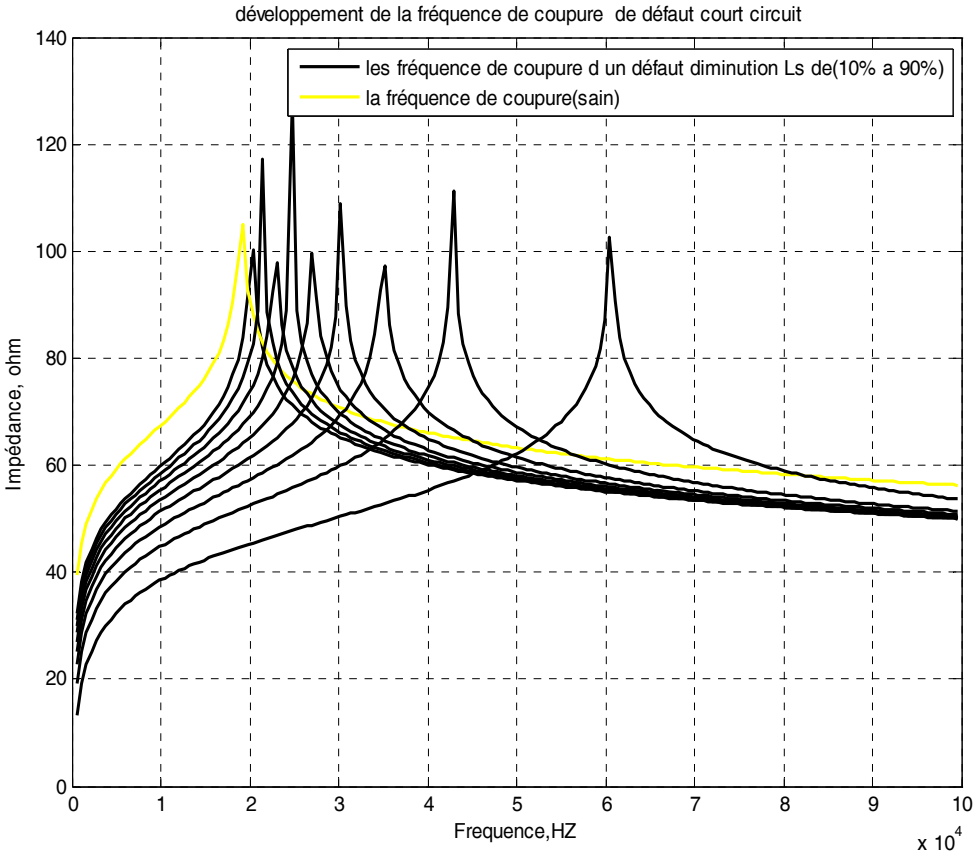
Tableau (IV.7) : Valeur des fréquences de coupures obtenues des deux réponses.

IV.6. Les différents défauts étudiés :

Les défauts simulés sont identique à ceux présentés précédemment.

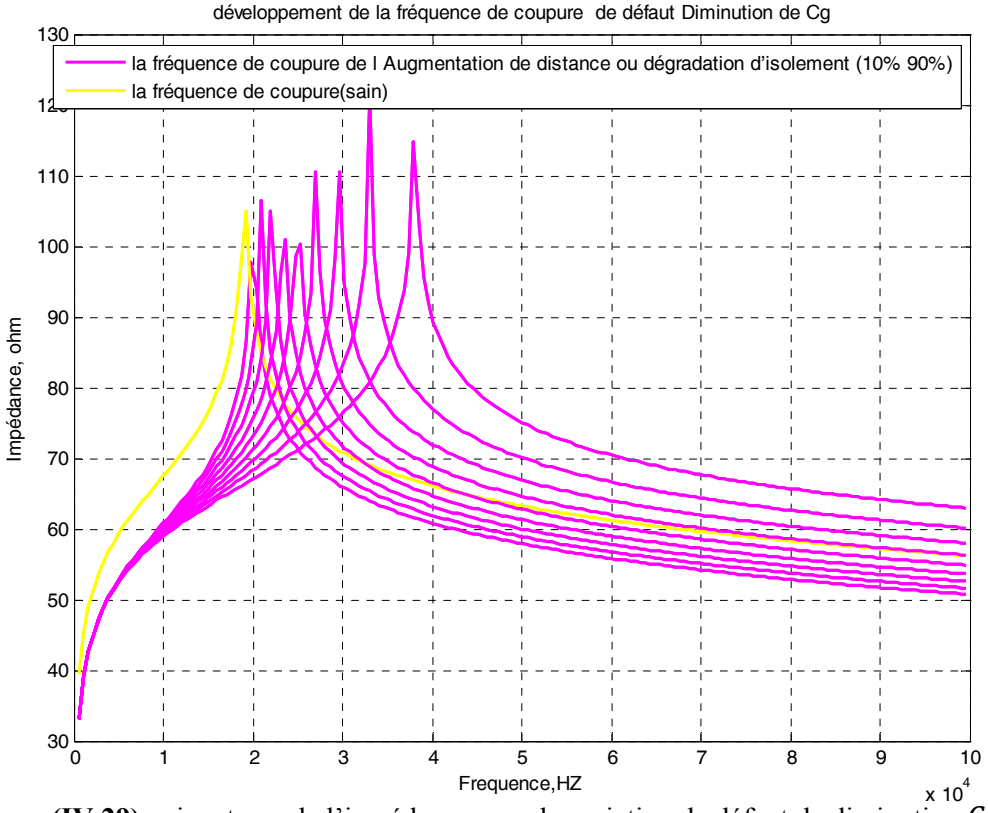
Comme exemple Les figures (IV.28) et (IV.29) représentent la réponse en fréquence de la bobine pour les défauts L_s et C_g respectivement avec la réponse de l'enroulement.

❖ **Diminution de L_s (Défaut de Court-circuit) :**



Figure(IV.28) : signatures de l'impédance pour la variation de défaut de court-circuit.

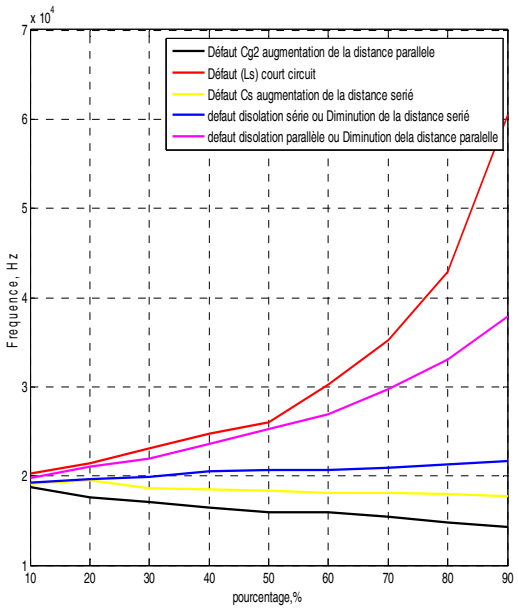
Diminution C_g (Augmentation de distance (de 10% à 90%)) :



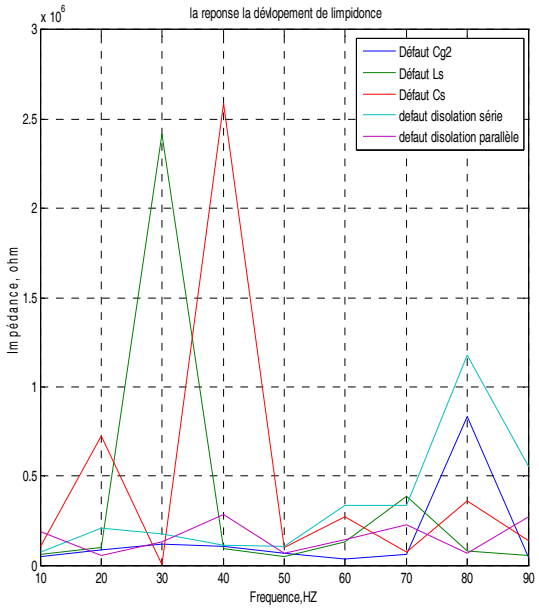
Figure(IV.29) : signatures de l'impédance pour la variation de défaut de diminution C_g .

Il a noté que tous les défauts énumérés précédemment sont simulés afin de déterminer les lois de variation de l'impédance et de la fréquence de coupure en fonction du pourcentage du défaut injecté.

Les figures suivantes représentent la variation de l'impédance et de la fréquence pour chaque défaut simulé en fonction du pourcentage de défaut crée.



Figure(IV.30): développement de f_c en fonction de pourcentage de défaut



Figure(IV.31): développement de Z en fonction de pourcentage de défaut

D'après ces deux figures, on a conclu que la variation de l'impédance a un aspect aléatoire, ce qui rend le diagnostique (détection, classification) du bobinage très difficile, cependant nous avons observé que la variation de la fréquence suit une loi mathématique qui peut être facilement exploitée pour une étude de diagnostic en fonction des fréquences de coupure.

IV.7. Organigramme de la méthode proposée :

Après avoir constaté que les fréquences de coupure peuvent être un outil efficace pour la détection, classification et l'estimation du taux de défaillance, On a proposé une méthode résumée dans organigramme suivant:

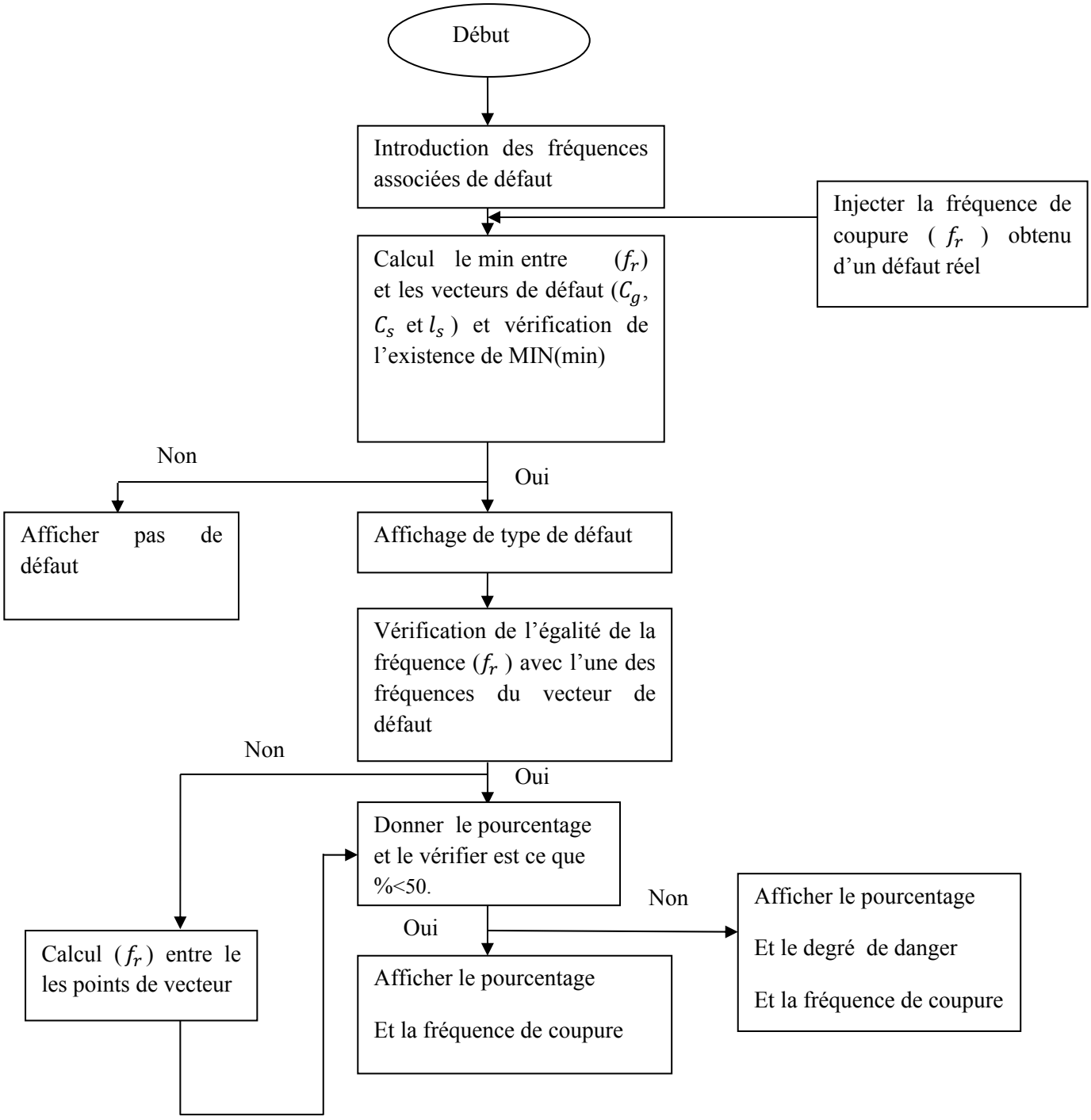


Figure (IV.32) : Organigramme de méthode de classification proposée.

IV.7.1. Explication de l'organigramme :

La première étape consiste à l'introduction des données sous forme de vecteur, dont les composantes sont les fréquences de coupure qui associées.

Pour la détection et la classification, il suffit d'introduire une valeur de fréquence de coupure, cette dernière sera traitée par l'algorithme proposé afin de la classer, en la rapprochant d'un

défaut présent dans la base de données et le résultat affiché type de défaut, pourcentage de défaut et le degré de danger.

On a constaté que l'algorithme proposé a une limite lorsqu'un introduit une fréquence de coupure éloignés de celle présente dans le base de données, l'algorithme peut seulement classer le défaut sans donnée en son pourcentage et son degrés de danger.

IV.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a validé le modèle proposé expérimentalement sur deux bobines différentes, ensuite on a simulé une variété de défauts afin de construire une base de données nécessaires pour les deux méthodes de classification utilisées pour le diagnostic de défaillance de l'enroulement.

D'après l'étude menée les points suivants sont retenus :

- L'enroulement du transformateur peut être représenté en haute fréquence par une cascade de cellule LC.
- Tout défaut apparu dans l'enroulement est traduit par la variation de son impédance en fonction de la fréquence.
- La fréquence de coupure déduite de la réponse fréquentielle de l'impédance pout être un outil important pour la détection et la classification des défaillances.
- L'utilisation des réseaux de neurones dans cette application est limitée à la classification des défauts.
- La méthode proposée est basée sur l'évolution du défaut en fonction de la fréquence de coupure, cette méthode a permis d'une part de classer les défauts et d'autre d'estimer le degré de la défaillance.

Dans le cadre de ce travail, nous avons cité les modèles du transformateur les plus pertinents dans littérature.

Afin de cerner notre problématique nous avons opté pour le modèle basé sur la discrétisation de l'enroulement par une cascade de cellules LC, ce modèle a été validé expérimentalement sur deux bobinage différents.

Une variété de défaut, qui peuvent avoir lien dans un enroulement du transformateur ont été mis en évidence et modélisés.

Ensuite, les résultats, obtenus ont constitué une base de donnée pour l'application des réseaux de neurones et aussi pour la méthode que nous avons proposée dans le cadre de diagnostic et localisation de défauts dans les enroulements du transformateur.

Par ailleurs, ces deux applications ont permis d'obtenir une rapidité et la fiabilité dans la détection de défauts. Ces deux méthode peuvent constituées une base pour une meilleure planification de la maintenance des transformateurs, et par conséquent une minimisation des coûts et la prolongation de la durée de vie du transformateur.

Comme perspectives pour ce travail :

- Etudes expérimentales des défauts est nécessaire pour tester les deux méthodes développées dans ce travail.
- Elargissement de la base de données afin de pouvoir optimiser l'opération de détection et de classification des défaillances.

Référence bibliographique

[1] : MARTIN.J ,HEATHCOTE,C ENG,FIEEE, «The J and P Transformer book ,A Partial Technology of Power transformer», Twelfth edition Newnes, 1998.

[2] : LEFEVRE.A, «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs », Ecole Polytechnique de Nantes, 1998.

[3] : Tai Chee Kheng «Impact of Moisture on the Strength of Paper- Insulated Conductor» Department of Computer Science & Electrical Engineering The University of Queensland, St. Lucia, Brisbane, Queensland 4072 Australia, 20 October 2000.

[4] : SHIH -HUA (Patrick) Kuo « Diagnostics of Transformer Condition by Polarization Current and Oil Conductivity Measurements » Undergraguate Thesis, School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queesland, October 2002

.

[5] : Christophe Guérin « Détermination des pertes par courant de Foucault dans les cuves des transformateurs-modélisation des régions minces et prise en compte de la saturation des matériaux magnétique en régime harmonique » Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994.

[6]: 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.

[7] : N.Aouchar , C.Bekhaled « Application des systems hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur », Projet de fin d'études , Département Génie électrique, Ecole National Polytechnique, Alger ,2005.

[8]: Xose M. L.F and Casimiro A.M. « Computation method for transients in power transformer with lossy windings » IEEE Transactions on Magnetics, Vol. N.3, March 2009, pp 1863-1866.

[9] : Omicron électronique 'FRA Analyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.

[10]: Charles Sweeter, B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail, 'Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering' Version 1.0, 01/2003.

[11] : Megger 'FRAX 101 Analyzeur de réponse de la fréquence de balayage' FRAX101_DS_fr_V01.

[12]: Bergman, C. 'SFRA- an application that creats cutomer value?' Thesis Département Electrical Enginnering Sweden, 2006.

[13] : Gueller.B, Veverka.A, «Processus impultionnelles dans les machines électriques», Energya, Moscou, 1973.

[14] : 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.

[15] : ANDRIANIRINA RAKOTOMALALA « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences », Thèse de Doctorat, L'école centrale de Lyon, 1992.

[16] : E. Cottens « Introduction à la FRA » SONELGAZ, DEPT GRTE Formation sue la diagnostic des transformateurs de puissance, Janvier 2008.

[17] : 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.

[18]: 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.

[19] : Ahmad AHMAD, «Contribution a la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence » Thèse de doctorat, L'ECOLE CENTRAL DE LYON, 1992.

[20] : 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.

[21] : Dreyfus G., *Neural Networks Methodology and Applications*, Springer, Germany, ISBN-10 3-540-22980-9, 2005.

[22] : Nathalie Rolland, Philippe Magnier : 'Explosions et Incendies de Transformateurs : Méthode d'Evaluation des Couts', 2002 : www.sergi_France.com/html/documents/fTPoa03f.pdf

[23]: Eric Davalo et Patrick Naïm : 'Des Réseaux de Neurones', Edition Eyrolles, 1990.

[24]: Kary Främling : 'Les Réseaux de Neurones Comme Outil d'Aide à la Décision Floue', Rapport de D.E.A (Ingénierie Informatique), INSA Lyon, Juillet 1992.

[25]: Leïla Mokhnache : 'Application des Réseaux de Neurones dans le Diagnostique et la Prédiction des Isolations de Haute Tension'. Thèse de Doctorat d'Etat, ENP, Décembre 2003.

[26]: Arbib M.A., *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, The MIT press, USA, ISBN: 0-262-01197-2, 2003.

[27]: M'hamed Yaddou : 'Etude de Synthèse sur les Réseaux de Neurones et leurs Applications', Thèse de Magistère, ENP, 1998

[28] : Khorasani, Pourrai G, and Ali Deihimi. 2009. A new modeling of Matlab transformer for accurate simulation of ferroresonance. Paper read at Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. POWERENG'09. International Conférence on.

[29]: Popov, Marjan, Bjorn Gustavsen, and Juan A Martinez-Velasco. 2013. "Transformer Modelling for Impulse Voltage Distribution and Terminal Transient Analysis." *Electromagnetic Transients in Transformer and Rotating Machine Windings*: 239.

[30]: Eslamian, M, B Vahidi, and SH Hosseinian. 2011. "Analytical calculation of detailed model parameters of cast resin dry-type transformers." *Energy Conversion and Management* no. 52 (7):2565-2574.

[31]: T. M. Layadi « Diagnostic de défauts des machines asynchrones à l'aide d'algorithmes intelligents ». Thèse Magistère, Université Farhat Abbes Sétif, 4 février 2007.

[32]: Venegas, V., J. L. Guardado, S. G. Maximov, and E. Melgoza. 2009. A computer model for surge distribution studies in transformer windings. Paper read at EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE, 18-23 May 2009.

Basse tension

```
clc

U0=pi*4e-7;RM=0.0935;
N=200;w=0.0009;
h=0.05;
%d=0.0236;
%l=h*2+d;
%A=0.032;
%r=l*A/U0;

%lself=((N)^(2))/r;
GMD=1/2*log(h^2+w^2)+(2*w/3*h)*(atan(h/w))+(2*h/3*w)*(atan(w/h))-
((w^2/12*h^2)*log(1+h^2/w^2))-((h^2/12*w^2)*log(1+w^2/h^2))-(25/12);

A=U0*RM*(N^2);
B=log(8*RM)-GMD;
C=B-2;
ls=A*C;
LS=ls;
fprintf('\n Inductance = %d H\n',LS)


r1=0.168/2;
r2=(0.168+0.019*2)/2;
l=0.05;
p0=2*8.85*10^(-12);

cg2=4*pi*p0*l/log(r2/r1);

fprintf('\n ground capacitance = %d f\n',cg2)


pair=1;D=1;
p0=8.85*10^(-12);
pr=2.5;
dtt=0.0000018;
ndw=1;
nd=200;
%d=0.02266;
h=0.05;h1=0.0009;
r=0.168/2;
R=(0.168+0.019*2)/2;

rm=(r+R)/2;
A=2*pi*(rm*h)*D;
ctt=(pr*p0*A)/(2*dtt);
A1=2*pi*(rm*h1)*D;
c1=(pr*p0)*A1/dtt;
%c2=(pair*p0)*A1/d;
cdd=1/((1/c1)+(1/c1));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% cs %%%%%%%%%%%%%%%
d=(2/ndw);
b=(nd-1)*ctt/(2*nd^2);
s=4*(ndw-1)/(ndw^2);
s1=(nd-1)*(2*nd-1)*cdd/(6*nd);
```

```
cs=(d*b+(s*s1));
fprintf('\n Series capacitance = %d f\n',cs)
x=nd^2;

z=1/U0;
q=r1^2*pi;
A=x*q/(z*0.042);
```

Haut tension

```
U0=4*pi*10^(-7);RM=2*0.0890;
N=10;w=0.006;
h=0.05;
d=0.0236;
l=h*2+d;
A=0.032;
r=l*A/U0;

lself=((N)^(2))/r;
GMD=1/2*log(h^2+w^2)+(2*w/3*h)*(atan(h/w))+(2*h/3*w)*(atan(w/h))-
((w^2/12*h^2)*log(1+h^2/w^2))-((h^2/12*w^2)*log(1+w^2/h^2))-(25/12);

A=U0*RM*(N^2);
B=log(8*RM)-GMD;
C=B-2;
ls=A*C;
LS=2*ls;
fprintf('\n Inductance = %d H\n',LS)



r1=0.086;
r2=0.092;
l=0.0554*2+0.02;
p0=8.85*10^(-12);

cg2=2*pi*p0*l/log(r2/r1);

fprintf('\n ground capacitance = %d f\n',cg2)


pair=1;D=1;
p0=8.85*10^(-12);
pr=2.5;
dtt=0.00002;
ndw=5;
nd=10;
d=0.02266;
h=0.05;h1=0.006;
r=0.092;
R=0.086;

rm=(r+R)/2;
```

```
A=2*pi*(rm*h)*D;
ctt=(pr*p0*A)/(2*dtt);
A1=2*pi*(rm*h1)*D;
c1=(pr*p0)*A1/dtt;
c2=(pair*p0)*A1/d;
cdd=1/((1/c1)+(1/c2)+(1/c1));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% cs %%%%%%%%%%%%%%%
d=(2/ndw);
b=(nd-1)*ctt/(2*nd^2);
s=4*(ndw-1)/(ndw^2);
s1=(nd-1)*(2*nd-1)*cdd/(6*nd);
cs=d*b+(s*s1);
fprintf('\n Series capacitance = %d f\n',cs)
```