الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE DOCTEUR .YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Electrique et de L'informatique

☆ *Mémoire* ☆

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

Option : Réseaux électriques

Préparé et présenté par :

Mr. BOUDROUAYA SOFIANE
&
Mr. GUELLAB ABD EL HAKIM

THEME

CONTROLE NON DESTRUCTIF DES ENROULEMENT D'UN TRANSFORMATEUR PAR RESEAUX DE NEURONES

Proposé et dirigé par:

Mr. HOUASSINE HAMZA

Mme. ABBADI AMEL

Promotion

Juin 2014, Médéa

Remerciements

الحمد لله رب العالمين

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Tout d'abord je tiens à remercier mon promoteur Monsieur ***HAMZA. HOUASSINE*** *pour l'encadrement qu'il m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance profonde.*

Je ne peux oublier à exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à Mme ***ABBADI AMEL*** *pour sa patience et ses conseils précieux qui m'ont été très utiles.*

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants de l'université.

Mes remerciements sont destinés aussi à toute ma famille, et tous mes amis pour leur aide et leur soutien.

Et finalement, nous remercions tous nos amis, particulièrement les étudiants des départements de Génie Electrique et d'Electronique ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de prés ou de loin à ce modeste travail.

BOUBROUAA Sofiane

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes mon père, mère, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.

- *Mahboulti , khawla , SOUMAIA ,BLIYA.*
- *Mes sœurs.*
- *Toute la famille "BOUDROUAYA".*
- *Tous mes amis.*
- *Mes très chers amis : KARIM TITIONI, ABDELLAH GORFA, BELKHEIR HAMZA.*
- *A tous ceux qui me sont chers.*

Sans Oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire à ce jour, en particulier :

Monsieur HOUASSINE HAMZA et Mme ABBADI AMEL et Monsieur Sif-eddine Abdi .

BOUDROUAYA- Sofiane

Dédicaces

وليس بجهد مني ولا علم ولكن ببركة منك سبحانك و فضل

Je dédie ce travail

A mes chers parents,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

… A tous ceux qui
veulent savoir …

Guellab abd el hakim

Sommaire

Résumé……..i
Liste des figures……...ii
Liste des tableaux……....vi
Liste des acronymes et abréviations…….....viii
Introduction générale……01

Chapitre I Généralités et méthodes de diagnostic des transformateurs

I.1.Introduction…….…….....05
I.2.Définition…….…….....05
I.3.Différents types des transformateurs……06
I.3.1.Transformateurs émergés……06
I.3.2.Transformateurs secs……..07
I.4.Constitutions générale……...07
I.4.1.Partie actif.....07
I.4.2.Isolants……..09
I.4.3.La cuve.....….…...10
I.4.4.Traversées.....10
I.4.5.Huile.....11
I.5.Les équipements.....….…...11
I.5.1.Changeur de prise.....11
I.5.2.Refroidissement.....12
I.5.3.Radiateurs.....12
I.5.4.Conservateur.....14
I.5.5.Coffret des auxiliaires.....14
I.5.6.Coffret de commande du changeur de prises en charge (CPC)……..……...14
I.6.Les accessoires de surveillance…….…15
I.6.1.Indicateur de niveau d'huile……...15
I.6.2.La soupape de surpression……..15
I.6.3.Indicateur de température d'huile.....15
I.6.4.Indicateur de température de bobinage.....15
I.6.5.Relais BUCHHLOZ…….....16
I.6.6.L'assécheur (dessiccateur d'air)…….....16

I.7.Principe de fonctionnement de transformateur……17

I.7.1.Paramètres définissant un transformateur…….17

I.7.2.Rappel théorique……..17

I.8.Les pertes dans les transformateurs……...18

I.8.1.Les pertes a' vide……18

I.8.2.Les pertes dues à la charge……20

I.9.les contraintes……....22

I.9.1.Surtension……....22

I.9.2.surcharge…….....23

I.9.3.Les décharges partielles……..23

I.9.4.Court circuit……24

I.10.Méthodes de diagnostic des transformateurs……...25

I.10.1.Analyse d'huile……..25

I.10.2.Mesure de la capacité et de la tg δ du transformateur……..36

I.10.3.Mesure du changeur de prises en charge …….….38

I.10.4.Mesures des résistances des enroulements…….....38

I.10.5.Mesure du rapport de transformation……...39

I.10.6.Mesure de l'impédance de court-circuit…….39

I.11.Conclusion ……40

Chapitre II Modélisation de transformateurs en vue de diagnostic

II.1.Introduction ……42

II.2.les modèles usuelles des transformateurs……..42

II.2.1.Le modèle Resel ……42

II.2.2.Modèle de Leon…….....43

II.2.3.Modèle EMTP …….…….....44

II.2.4.Méthode des Circuits Couplés…….…….45

II.2.5.Méthodes utilisant des transformées ou des circuits ……..……..47

II.2.6.Modélisation par l'analyse modale ……...……48

II.2.7.Modélisation par la théorie de lignes …….....49

II.2.8.Modèle issu du principe de la dualité magnétique-électrique……....51

II.2.9.Modélisation par inductances propres et mutuelles (modèle adopte)……..52
II.3.Conclusion ……...54

Chapitre III Analyse de la réponse en fréquence (FRA)

III.1.Introduction ……57
III.2.Définition ……..57
III.3.Utilisation des tests FRA…….....……...57
III.4.Détection de défaut par FRA……..58
III.5.Fonction de transfert d'un transformateur de puissance…….59
III.6.Principe de la méthode…….……59
III.7.Objectif générale ……..61
III.8.Méthodologie…...……..61
III.9.Modèle adopté pour le transformateur sans la prise en compte du noyau…….62
III.10.Equations du schéma équivalent adopté…….....63
III.10.1.Equations des tensions…….....64
III.10.2.Equations des courants…….…..64
III.10.3.Représentation matricielle des équations du modèle..…….....65
III.11.Caractéristiques électriques et géométriques de l'enroulement étudié…...….....66
III.12.Synthétisation du circuit de référence ……67
III.13.Calcul des paramètres du modèle adopté ……..68
III.13.1.Détermination des paramètres de schéma équivalant ……...….68
III.14.Calcule des paramètres par les algorithmes génétiques…….……70
III.15.Validation du modèle proposé ……..……..……71
III.16.Conclusion…….……74

Chapitre IV Diagnostic et localisation des défauts dans enroulement du transformateur de puissance par réseaux de neurones

IV.1.Introduction……76
IV.2.Historique sur les réseaux de neurones…….……...76

IV.3.Quelques domaines d'applications……...77
IV.4.Le neurone artificiel……..78

IV.4.1.Le neurone biologique……..….78
IV.4.2.Le neurone formel…….…….....….79
IV.5.Différents types de réseaux de neurones.....81
IV.6.Les principaux composants des réseaux de neurones artificiels.....81
IV.6.1.La structure des connexions……...82
IV.6.2.La dynamique des connexions……83
IV.7.Algorithme d'apprentissage.....84
IV.8.Localisation des défauts le long de l'enroulement par test FRA.....88
IV.9.Simulation les différents défauts étudiés.....88
IV.9.1.Court-circuit entre spires……..…….90
IV.9.2.Les changements capacitifs……...……..95
IV.9.3.Défauts entre la partie active et la masse.....98
IV.9.4.Ouverture des spires……..102
IV.10.Application de RNA pour le diagnostic et la localisation de défaut ….……..106
IV.10.1.Entrées du réseau RNA……...107
IV.10.2.Sorties du réseau RNA.....107
IV.10.3.Couche caché.....108
IV.11.Affichage des résultats de classification……...110
IV.12.Conclusion……..111

Conclusion générale……...…..113
Références bibliographiques…….……..115

Liste des tableaux

Chapitre I Généralités et méthodes de diagnostic des transformateurs

Tableau I.1 : Définition des rapports utilisés dans les méthodes de diagnostic…….32
Tableau I.2 : Méthode des gaz clés…….…32
Tableau I.3 : Gamme de valeur typique des gaz ……33
Tableau I.4 : Étude des rapports par CEI 60599……..33
Tableau I.5 : Méthode des rapports de Doernenburg ……35
Tableau I.6: Table de correspondance des codes, méthode DOERNENBURG……...35
Tableau I.7: Diagnostic de la méthode des rapports de Rogers…….…36
Tableau I.8: Définition des codes de la méthode affinée des rapports de Rogers…….....36

Chapitre II Modélisation de transformateurs en vue de diagnostic

Tableau(II.1) : Règles de passage pour la dualité magnétique-électrique…….…….52

Chapitre III Analyse de la réponse en fréquence (FRA)

Tableau(III.1) : l'inductance propre et mutuelle de référence, Les valeurs en mH. …….67
Tableau (III.2) : fréquences normale en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit (scnf) …..……68
Tableau (III.3) : l'inductance propre et mutuelle calculées, Les valeurs en mH. …….…….69
Tableau (III.4) : l'inductance propre et mutuelle obtenir par AG, Les valeurs en mH. ……72
Tableau(III.5) : Cellules RLC analysées pour l'enroulement étudié. ……73
Tableau (III.6) : la comparaison des fréquences normale en circuit ouvert (Ocnf) et celles en court-circuit (Scnf) de modèle de référence, mesuré et de modèle calculé et de L'AG……..74

Chapitre IV Diagnostic et localisation des défauts dans enroulement du transformateur de puissance par réseaux de neurones

Tableau(IV.1): Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit dans les deux éléments 5 et 6 et un enroulement sain. ……91
Tableau (IV.2) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 3^{ieme} et le 4^{ieme} élément un enroulement sain …..……92

Liste des tableaux

Tableau (IV.3) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 4^{ieme} et le 5^{ieme} éléments et un enroulement sain …….....….94

Tableau (IV.4) : Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité longitudinale (Cs). …..……..…96

Tableau(IV.5): comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité transversale (Cg). ……...……..98

Tableau (IV.6) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut entre la partie actif et la masse entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments et un enroulement sain. ……..99

Tableau (IV.7) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de entre la partie actif et la masse entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments et un enroulement sain……..... 101

Tableau(IV.8): comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 1^{iere} élément et un enroulement sain. ……...103

Tableau(IV.9): comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 6^{ieme} élément et un enroulement sain. …….105

Liste des figures

Chapitre I Généralités et méthodes de diagnostic des transformateurs

Figure(I.1): une vue intérieure d'un transformateur, type colonne……..06
Figure(I.2):enroulement en couche.....09
Figure(I.3): enroulement en galettes.....09
Figure(I.4): Radiateur……..……...….13
Figure(I.5): Indicateur de niveau d'huile…….15
Figure(I.6): soupape de surpression…….15
Figure(I.7): Indicateur de température d'huile……15
Figure(I.8): Indicateur de température de bobinage……16
Figure(I.9) : Relais BUCHHLOZ……...16
Figure(I.10): assécheur…...…….16
Figure(I.11): schéma simplifié d'un transformateur……...17
Figure(I.12): limitation les pertes par courant de Foucault…….19
Figure(I.13): courbe de cycle d'hystérésis……..20
Figure(I.14): flux de fuite courant de Foucault……...21
Figure(I.15):décharges partielles…….24
Figure(I.16): représentation schématique de l'angle de perte tg δ……..30
Figure(I.17): Triangle de Duval.....34
Figure(I.18): schémas de pertes par conduction et par polarisation……....37
Figure(I.19): représentation schématique de la tg δ et de la capacité……38
Figure(I.20):schéma de mesure du changeur de prise en charge par CPC100.....38
Figure(I.21): schéma de mesure de la résistance des enroulements par CPC100…….39
Figure(I.22):schéma de mesure de rapport de transformation par CPC100……...39
Figure(I.23): schéma de représentation des forces de court-circuit et flux de fuite CPC100……...40

Chapitre II Modélisation de transformateurs en vue de diagnostic

Figure(II.1): Circuit de Foster en série…….44
Figure(II.2): Modèle de Cauer pour le noyau de fer……44
Figure(II.3): Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP……..45

Liste des figures

Figure(II.4): Principe de la M2C : découpage en éléments inducteurs……...46

Figure(II.5): Schéma électrique équivalent de la M2C. ……..…46

Figure(II.6): Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section de longueur AX……47

Figure(II.7): Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert du transformateur ayant une seule fréquence de résonance……...48

Figure(II.8): Schéma équivalent modal……49

Figure(II.9): Schéma équivalent d'un enroulement……..…50

Figure(II.10) : Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique, T temps de propagation, D facteur d'amortissement…….51

Figure (II.11): Modèle d'un transformateur basé sur la dualité magnétique –électrique…….52

a) Transformateur à deux enroulements (circuit magnétique).

b) Le circuit électrique dual.

Figure(II.*12)*: modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié. …….53

Chapitre III Analyse de la réponse en fréquence (FRA)

Figure(III.1): Modèle d'un enroulement de transformateur…….60

Figure(III.2): Principe de la FRA……...61

Figure(III.3): Module de comportement de l'impédance d'un circuit RLC parallèle en fonction de la fréquence……....62

Figure (III.4) : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur……..... 63

Figure(III.5) : Schéma de référence……67

Figure(III.6): La variation de l'impédance en fonction de la fréquence.....67

Figure(III.7) : Calcul des inductances propres et mutuelles.....68

Figure (III.8) : schéma de l'enroulement obtenu par calcul……70

Figure(III.9): L'organigramme des algorithmes génétiques. ……..…...71

Figure (III.10) : Schéma de l'enroulement identifié par L'AG.…….72

Figure(III.11) : Réponse en fréquence obtenu par L'AG. …….73

Chapitre IV Diagnostic et localisation des défauts dans enroulement du transformateur de puissance par réseaux de neurones

Figure(IV.1) : Le neurone biologique…….79

Figure(IV.2) : Neurone Formel……..……....79

Liste des figures

Figure(IV.3) : Fonction de transfert……..……..80
Figure(IV.4) : Architecture générale d'un réseau entièrement connecté……..……..…82
Figure(IV.5) : Architecture générale d'un réseau multicouche……..…….83
Figure(IV.6) : Perceptron à une couche cachée……..…….85
Figure(IV.7) : schéma de la réponse en fréquence (FRA)……..89
Figure(IV.8) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit dans les deux éléments 5 et 6 et un enroulement sain. ……90
Figure(IV.9) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 3^{ieme} et le 4^{ieme} élément et un enroulement sain. …… 92
Figure(IV.10) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 4^{ieme} et le 5^{ieme} éléments et un enroulement sain……..…93
Figure (IV.11): les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit entre élément et celle de l'enroulement sain. ……..……95
Figure(IV.12) : Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité longitudinale (Cs)……..….96
Figure(IV.13) : comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité transversale (Cg). ……..……97
Figure(IV.14) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut entre la partie actif et la masse entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments et un enroulement…….. Sain…….…...99
Figure(IV.15) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de entre la partie actif et la masse entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments et un enroulement sain.....…...100
Figure (IV.16): les différentes impédances pour différents changement capacitifs et celle de l'enroulement sain. ……..…102
Figure (IV.17) : comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 1^{iere} élément et un enroulement sain. ……...103
Figure (IV.18) : comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 6^{ieme} élément et un enroulement sain……104
Figure (IV.19) : les différentes impédances pour chacun des points de circuit ouvert et celle de l'enroulement sain. ……105
Figure (IV.20) : Fonction de transfert log- Sigmoïde……....109
Figure (IV.21) : L'erreur d'apprentissage du réseau de neurones……109

Liste des figures

Figure (IV.22) : panneau de contrôle…….....110

Acronymes & Abréviations

A	Ampère
a	rapport de transformation
C	capacité
	La capacité équivalente
	La capacité au sol
	Capacité longitudinale
	Capacité transversale
[C]	Matrice des capacités
f	Fréquence
	Courant d'entrée
	Courant dans l'enroulement primaire
	Courant dans l'enroulement secondaire
	Le courant applique à l'entré
L	Inductance
[L]	Matrice des inductances
	L'inductance équivalente
Lm	Inductance de magnétisation de transformateur
L	Inductance de perte dans l'enroulement primaire
	Les inductances propres
M	Les inductances mutuelles
N	Nombre des cellules
	Constant de distribution initiale de la tension
Q	facteur de qualité
R	résistance électrique
	Résistance mesure au continue
	La résistance interne de générateur
	Résistance de magnétisation
	Résistance électrique de l'enroulement primaire
	Résistance électrique de l'enroulement secondaire
S	Siemens
	La tension applique à l'entré

Acronymes & Abréviations

	Tension de sortie
	Tension de l'enroulement primaire
	Tension de l'enroulement secondaire
	Réactance de magnétisation
	Réactance de perte de l'enroulement primaire
	Réactance de perte de l'enroulement secondaire
Y	admittance
Z	Impédance
	Impédance primaire
	La pulsation
	Pulsation de demi-puissance inferieure
	Pulsation de demi-puissance supérieure
	Pulsation de résonance
CH4	Méthane
C2H6	Ethane
C2H4	Ethylène
C2H2	Acétylène
CO	Monoxyde de Carbone
CO2	Dioxyde de Carbone
DC	Dégradation de Cellulose
H2	Hydrogène
PCB	polychlorobiphényles
AG	Algorithme génétique
RNA	Réseaux de neurone artificiel (Artificial Neural Network)
CEI	Commission électrotechnique internationale (International electrotechnical commission)
AGD	Analyse des gaz dissous (Dissolved Gas-in oil Analysis)
FRA	Frequency Response Analysis
Scnf	Fréquence de coupure en court-circuit
Ocnf	Fréquence de coupure en circuit-ouvert
RLC	Resistance-Inductance-Capacité

Acronymes & Abréviations

B	Bande passante
EMTP	Electromagnetic Trient Program

Résume

Par le biais de ce travail, on s'intéresse au diagnostic de dysfonctionnements des transformateurs. Elle concerne la mise en ouvre d'une approche neuronale pour la détection et l'aide au diagnostic de différents défauts qui peuvent subvenir lors du fonctionnement du transformateur. Pour ce faire, des bases de données ont été établies en se basant sur la technique d'analyse fréquentielle. Ces bases de données prennent en compte les défauts de court-circuit, de déformation, défaut entre partie active et la masse et ouverture d'une partie de l'enroulement.

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

Abstract

Through this work, we are interested in the diagnosis of failures of transformers. It concerns the implementation of a neural approach for the detection and diagnosis assistance of various defects that may occur during the operation of the transformer. To this end, databases have been established based on the frequency analysis techniques. These databases take into account the short-circuit faults, deformation, failure between the active part and the ground and opening of part of the winding.

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

الملخص

من خلال هذا العمل، نحن مهتمون في تشخيص أعطال المحولات. يتعلق الأمر بتنفيذ الشبكات العصبية للمساعدة الكشف وتشخيص العيوب المختلفة التي قد تحدث أثناء تشغيل المحول. للقيام بذلك، تم إنشاء قواعد بيانات على أساس تقنيات تحليل التردد. هذه قواعد البيانات تأخذ في الاعتبار أخطاء دارة قصيرة، وتشوه، والفشل بين الجزء النشط والأرض وفتح جزء من اللفات.

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

Introduction générale

Le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883 et qu'il a eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique et plus particulièrement en courant alternatif.

Son essor fut immédiat, les puissances réalisées augmentèrent très rapidement (quelques 100 kVA en 1900 et quelques MVA en 1910) [1].

Le transformateur de puissance est le composant le plus complexe et le plus critique du réseau électrique [2].

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 l'état du transformateur de puissance est importante pour la fiabilité de l'alimentation électrique.

Les tests classiques réalisés sur les transformateurs de puissance peuvent seulement détecter les dommages de nature permanente [3]. Ces techniques de surveillance de l'état telles que l'analyse des gaz dissous (AGD), la mesure de la capacitance et du facteur de puissance ainsi que le test de la réactance de fuite sont incapables de détecter les déformations mécaniques les plus mineures qui se développent par la suite en défauts diélectriques ou thermiques [4].

L'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 [3].

Ainsi, la technique FRA a le potentiel pour détecter des problèmes d'enroulement. C'est la technique, 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 est l'une des techniques les plus efficaces pour surveiller l'état des transformateurs 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 [4].

Nous avons mis en relief une technique moderne basée sur l'intelligence artificielle et les plus utilisées actuellement par les chercheurs dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des systèmes industriels. Ce qui nous a incités à les introduire dans les systèmes de diagnostic et localisation des défauts dans enroulement du transformateur, cette technique appelé réseaux de neurones artificielle (RNA).Ce qui fournit une bonne détection plus appropriée et précise que les méthodes traditionnelles basées sur la FRA.

Ce travail est une suite d'un travail antérieur réalisé au département d'électronique de l'université de Blida.

L'objectif essentiel de ce projet de fin d'études, consiste a utilisé la technique des réseaux de neurones pour le diagnostic et la localisation des défauts dans les enroulements d'un transformateur de puissance.

Pour cerner cet objectif notre mémoire est subdivisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre concerne une étude bibliographique portant sur des généralités les contraintes et les différentes méthodes de diagnostic de 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.

Le troisième chapitre traité le test FRA et présente le modèle du transformateur de puissance adopté en tenant compte des équations mathématiques du schéma équivalent, Puis on présente la procédure de calcul des paramètres des enroulements du transformateur de puissance.

Ensuite on présente la méthode du réseau des cellules RLC passifs pour estimer la fonction de transfert de l'enroulement du transformateur en vue d'une étude du comportement de ce dernier en régime fréquentiel. Et en fin nous avons validé le modèle adopté.

Le quatrième chapitre traite des réseaux de neurones artificiels. Il comporte une brève introduction aux neurones biologiques, à leur modélisation et à leur connexion ainsi que l'algorithme détaillé de l'apprentissage. Après cela, Simulation tout défaut naissant dans un enroulement de transformateur de puissance étudiés par deux techniques :

- L'analyse de la réponse en fréquence (FRA).
- Application de réseaux de neurones artificiels (RNA).

Les résultats obtenus sont discutés.

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

Chapitre I

Généralités et méthodes de diagnostique des transformateurs

I.1. Introduction :

Le transformateur triphasé joue un rôle fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique.

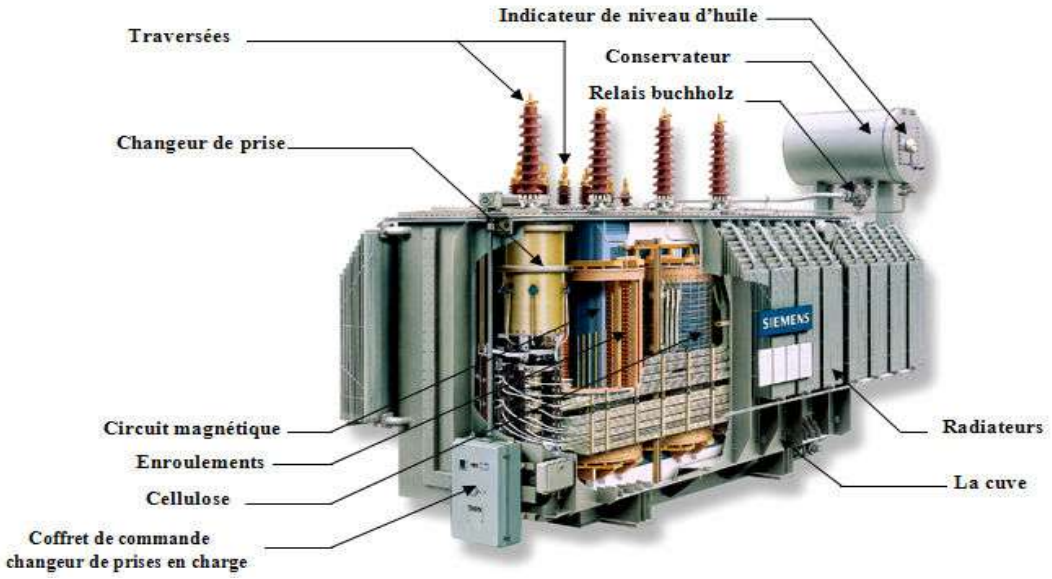
En effet, les alternateurs des centrales sont triphasés et la tension qu'ils produisent est relativement basse (soit 20 kV pour les centrales moderne). Si on veut que le transport de l'énergie soit économique, il faut que celui-ci soit assuré à une tension beaucoup plus élevée (soit 400 kV pour le réseau Algérien). Cette élévation de la tension est assurée par des transformateurs triphasés [5].

Les transformateurs de puissance sont des constituants essentiels à tous les réseaux de transport et de distribution d'électricité. L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs parasites produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Un transformateur peut aussi être soumis à des contraintes pendant son transport et son installation ainsi que par des variations cycliques de la température ambiante. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [6].

I.2. Définition :

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables d'intensité et de tensions généralement différentes mais de même fréquence [7].

Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance, en transformant les valeurs de la tension et de l'intensité à des valeurs qui rendent abordable techniquement et économiquement le transport depuis les centres de production aux centres d'utilisation [8].



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

I.3. Différents types des transformateurs :

I.3.1. Transformateurs émergés :

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

- huiles minérales : produits pétroliers économiquement intéressants, mais ayant un point d'inflammabilité bas qui entraîne dans certains cas des contraintes d'installation.
- huiles silicones : diélectrique liquide difficilement inflammable.
- L.I.H.T. (Liquide Isolant Halogéné pour Transformateur) : diélectrique de synthèse ininflammable non toxique. Il remplace les PCB (Polychlorobiphényles) dont l'usage est aujourd'hui interdit dans de nombreux pays.

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

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

Deux principes sont utilisés :

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

  La surface du diélectrique peut être en contact direct avec l'air ambiant ou en être séparé par une paroi étanche en matière synthétique déformable. Dans tous les cas un dessiccateur évite l'entrée d'humidité à l'intérieur du réservoir.

- Transformateurs hermétiques : Pour des transformateurs de puissance <16 MVA dont la quantité de diélectrique est faible, la dilatation est absorbée par un matelas de gaz inerte intercalé entre la surface du diélectrique et le haut de la cuve ou par la déformation du système de réfrigération qui souvent fait partie intégrante de la cuve. Cette technique évite tout contact avec l'extérieur et minimise les opérations d'entretien.

I.3.2. Transformateurs secs :

Assuré par l'air ambiant sans liquide intermédiaire. Ils appartiennent à l'une des familles suivantes :

- Imprégnés classe H : appareils dont les bobinages sont réalisés par imprégnation et polymérisation des vernis. Le choix des isolants et des vernis évite la propagation de l'incendie, le dégagement de fumées et de vapeurs toxiques.
- Enrobés : appareils dont les bobinages sont pris dans un moulage exécuté à chaud avec une résine époxydique. Cette résine peut être renforcée de tissus de verre et est spécialement étudiée pour éviter la propagation de l'incendie [9].

I.4. Constitution générale :

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

I.4.1. Partie active :

Cette partie est composée de :

- ***Circuit magnétique :***

Le circuit magnétique est construit en tôle d'acier laminé à froid (de 0,3 mm d'épaisseur : carbone-siliceuse) avec environ : 0.005% de carbone et 3 à 4% de silicium,

cette tôle (Voir figure I.1) de cristaux orientés est connue par « Hi persil », se caractérise par un bas indice de pertes par hystérésis et par une conservation intégrale au long, des qualités magnétiques [10].

- **Les colonnes :** sont de section carrée, mais pour la forte puissance on utilise des sections à plusieurs gradins se rapprochant le plus de la section idéale qui est circulaire. Elles sont porteuses de bobinage. (voir figure I.1)
- **Les culasses :** ne portent pas de bobines, elles peuvent être rectangulaires [11].

- ***Rôle du circuit magnétique :***

Canaliser vers l'enroulement secondaire (et tertiaire) le flux magnétique produit par l'excitation de l'enroulement primarise [11].

- **Les enroulements :**

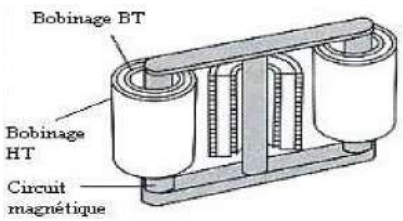
Les enroulements du transformateur sont fabriqués principalement en cuivre électrolytique recuit avec 99.9 % de pureté et sous forme de barres isolées usuellement en papier Kraft.

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

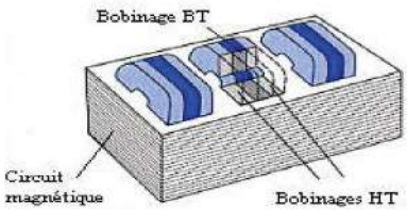
Les enroulements permettent la circulation du courant électrique dans des meilleures conditions, en utilisant des métaux bons conducteurs de l'électricité [11].

Le cuivre possède d'excellentes propriétés mécaniques, et il possède la plus haute conductivité des métaux commerciaux. Son importance dans les transformateurs est particulièrement significative due aux bénéfices importants sur la sauvegarde de place et de minimisation des pertes en charge par rapport à d'autres métaux [12].

On distingue deux types de bobinages :



Figure(I.2): Enroulement en couche.



Figure(I.3): Enroulement en galettes.

- ***Rôle des enroulements :***

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

I.4.2. Isolants :

Les isolants peuvent être [9] :

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

Les isolants doivent assurer :

- L'isolation diélectrique
- Le refroidissement

Les isolants doivent avoir :

- Une tension de claquage élevée
- Un faible niveau de décharge partielle
- Une stabilité thermique
- Une longue durée de vie
- Une absence de réaction chimique avec les autres matériaux.

I.4.3. La cuve :

La constitution de la cuve du transformateur est liée aux calculs thermiques du transformateur. D'une façon générale, elles sont utilisées pour tout type de transformateurs (voir figure I.1).

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

Les superficies intérieures et extérieures sont soumises à des traitements contre la corrosion [8].

- ***Rôle de la cuve** [10] **:***

  - Contenir l'huile.
  - Permettre le traitement de l'appareil.
  - Supporter les accessoires.
  - Maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuites produit par le courant dans les enroulements [8].

I.4.4. Traversées :

Ils existent deux types :

- ***Les Traversées (condensateurs) :***

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

Elle se présente sous la forme monobloc (voir figure I.1), composée d'un tube en cuivre qui constitue l'ossature de la traversée et sur lequel seront fixés le corp isolant, la porcelaine, la prise supérieure et la bride de fixation [13].

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

L'espace vide entre le corps isolant et la porcelaine est rempli d'huile [10].

- ***Les Traversées (porcelaines) :***

La borne porcelaine est un dispositif servant à guider un conducteur à travers un couvercle métallique tout en l'isolant électriquement. En fonction de la tension et de l'intensité, différents systèmes sont utilisés [10].

La fixation de ce type de traversée est assurée par clabotage et l'étanchéité par des joints appropriés [13]. Il existe également des systèmes de raccordement direct des transformateurs de puissance sur poste électrique sous enveloppe métallique, ainsi que des liaisons transformateur - câbles

Rôle des traversées :

Les traversées isolantes (ou bornes) assure les liaisons électriques entre les phases d'alimentation et les enroulements primaires et secondaires [14].

I.4.5. Huile :

Dans de nombreux et différents équipements électriques, il est nécessaire d'isoler les uns par rapport aux autres. Un fluide diélectrique (l'huile) est utilisé dans les transformateurs pour diminuer la chaleur produite au niveau des enroulements et du circuit magnétique par un transfert de chaleur (contact direct).

Rôle d'huile :

Le rôle de l'huile est inclus dans ces trois points:

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

I.5. Les équipements :

I.5.1. Changeur de prise :

Presque tous les transformateurs permettent de réguler la tension : d'ajuster leurs rapports de transformation (automatiquement) en ajoutant, ou retranchant, quelques spires de

réglage en série avec les spires de l'enroulement haute tension, à l'aide d'un système mécanique : le régleur [12].

Cet ajustement peut être réalisé en charge, comme c'est souvent le cas sur de gros appareils ou hors charge. Ils permettent de stabiliser le réseau en maintenant une tension constante. Ils font l'objet d'une maintenance attentive car leur moindre défaillance peut endommager sérieusement le transformateur [8].

On distingue deux types :

- ***Changeur de prise en charge :***

Permet de modifie le rapport de transformation à l'intérieur d'une plage déterminée en augmentant ou diminuant le nombre de spires de l'enroulement haut tension. La commande est assurée par un dispositif électrique [8].

- ***Changeur de prises hors tension:***

Permet de modifier le rapport de transformation uniquement lorsque le transformateur est hors tension. La commande dans ce type de changeur de prise s'effectue manuellement [8].

I.5.2. Refroidissement :

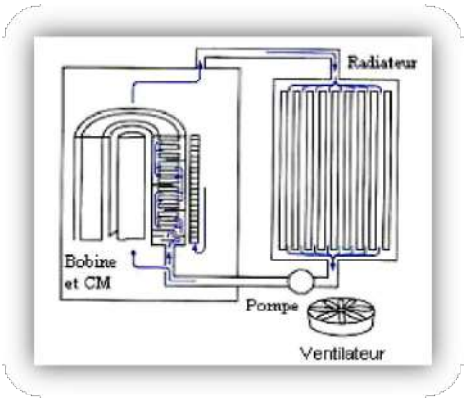
Malgré le rendement du transformateur qui est excellent, l'évacuation produite par des pertes dans le fer et dans le cuivre doit être largement assurée pour ne pas causer une élévation dangereuse de la température.

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

Dés que la puissance du transformateur devient élevée, on place son circuit magnétique muni de ses enroulements dans une cuve métallique remplie d'huile minérale très fluide. L'huile circulant le long des bobinages et du circuit magnétique véhicule la chaleur dégagée, et la transmet ensuite à la cuve munie de radiateurs. Ce procédé, dit à ventilation naturelle (par des radiateurs).

I.5.3. Radiateurs:

- ONAN : réfrigération naturelle.
- ONAF : ventilateur (s) en service.
- OFAF ou ODAF : ventilateur (s) et pompe (s) en service [14].



Figure(I.4): Radiateur.

Les radiateurs (Figure I.4) constitués d'éléments emboutis et soudés entre eux, forment un certain nombre de panneaux. Ils sont en suite fixés sur deux collecteurs supérieur et inférieur.

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

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

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

Ce procédé peut convenir jusqu'à des puissances de plusieurs kVa, mais au-delà, il faut faire appel à l'un des procédés suivants [8] :

- ***Aéroréfrigérant (s):***

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

Ce groupe compact est constitué d'un radiateur à ailettes en cuivre ou en aluminium, de boites à huile, de moto ventilateurs et d'une motopompe. Ils peuvent aussi être montés soit sur la cuve du transformateur soit sur un châssis séparé.

Des précautions doivent être prises pour éviter un recyclage de l'air et pour avoir un fonctionnement optimal [8].

- ***Réfrigérant (s) à eau:***

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

Lorsque des pertes importantes pour l'évacuation de l'espace d'installation est limité, l'utilisation des pesticides, hydrocarbures devient nécessaire. Se compose de l'assemblage refroidi à tubes d'eau, qui est appliquée à la pompe huiles de transformateurs qui sont chauffés. Ces tubes sont disposés dans le boîtier qui tourne eau de refroidissement.

En cas de manque d'étanchéité entre le circuit eau et l'huile (perforation d'un tube), il est impératif d'éviter une entrée d'eau dans le transformateur. La pression d'huile doit être toujours supérieure à celle de l'eau [8].

I.5.4. Conservateur :

Le conservateur (réservoir d'expansion) permet de contenir le volume d'huile supplémentaire quand la température augmente et de maintenir le niveau dans la cuve du transformateur quand la température diminue [9].

I.5.5. Coffret des auxiliaires :

Cet équipement joue deux rôles:

- Commande de la réfrigération du transformateur.
- Regroupement sur un borner pour les départs des informations nécessaires à l'exploitation de l'appareil et à l'alimentation des auxiliaires.

I.5.6. Coffret de commande du changeur de prises en charge (CPC) :

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

Cette armoire peut être commandée à distance ou en locale et permet également de transmettre à distance les informations de la position du régleur [8].

I.6. Les accessoires de surveillance :

I.6.1. Indicateur de niveau d'huile :



Cet indicateur indique la hauteur d'huile dans le conservateur. Monté sur un des côtés du conservateur, il est équipé d'un ou 2 contacts d'alarme [9].

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

I.6.2. La soupape de surpression :



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

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

Figure(I.6): Soupape de surpression.

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

Son réarmement se fait manuellement [9].

I.6.3. Indicateur de température d'huile :



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

- Contact alarme à 100°C.
- Contact déclenchement à 110 °C [9].

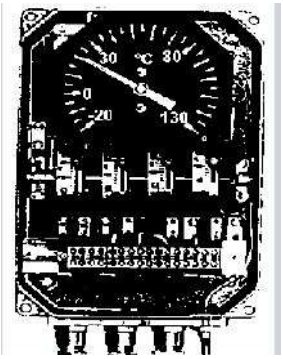
Figure(I.7): Indicateur de température d'huile.

I.6.4. Indicateur de température de bobinage :

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

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

- Contact alarme à 120°C.
- Contact déclenchement à 130°C [9].



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

I.6.5. Relais BUCHHLOZ :

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

En cas de défaut, deux contacts peuvent fonctionner:

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



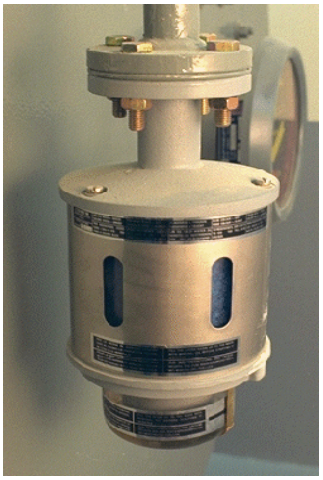
Figure(I.9): Relais BUCHHLOZ.

- Déclenchement : un mouvement brutal de l'huile de la cuve de l'appareil vers le conservateur suite à un arc électrique violent ou un mouvement des enroulements [8].

I.6.6. L'assécheur (dessiccateur d'air) :

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

- Absorbe l'humidité de l'air aspiré par le conservateur en phase de contraction. (Quand le transformateur se refroidi).
- Interdie l'entrée d'air durant les faibles variations de charge de façon à éviter le contact permanent du produit déshydratant avec l'air atmosphérique.



Figure(I.10): Assécheur.

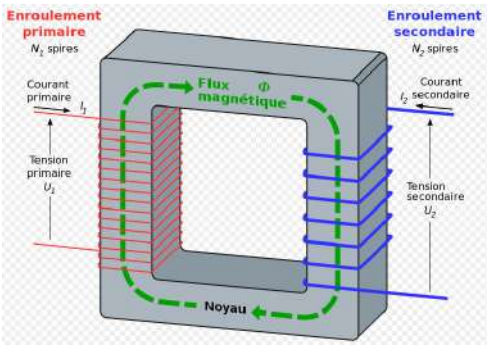
- Le silicagel bleu n'est donc plus disponible sur le marché et il est remplacé par un gel de silice de couleur orange lorsqu'il est déshydraté et se transforme en couleur blanche sale translucide lorsqu'il est saturé.

A ce jour, ce produit ne contient aucune substance qui soit considérée comme dangereuse pour la santé et pour l'environnement. C'est le produit le plus utilisé actuellement.

I.7. Principe de fonctionnement de transformateur :

I.7.1. Paramètres définissant un transformateur :

- Puissance assignée.
- Nombre de phases.
- Rapports de transformation.
- Fréquence.
- Groupe de couplage.
- Niveau d'isolement.
- Mode de refroidissement.
- Tension de court-circuit.
- Pertes à vide ou pertes fer.
- Pertes cuivre ou pertes en charge [8].



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

I.7.2. Rappel théorique :

- ***Loi de Faraday :***

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

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

Et pour N spires on aura:

$$e = -N * d\Phi / dt \quad \text{(I.2).}$$

- ***Lois de Lenz:***

La fréquence induite par la variation du flux est d'un sens telle qu'elle fera circuler un courant qui produira un flux magnétique s'opposant au flux qui lui a donné naissance ou, plus simplement, la direction de la fém induite est telle qu'elle s'oppose à la cause qui lui a donné naissance [11].

- ***Fonctionnement :***

  - Le primaire reçoit l'énergie d'une source sous une tension U_1 alternatif sinusoïdale le courant primaire crée un flux variable alternatif qui va parcourir le circuit magnétique (lois de faraday).
  - Ce flux variable induit une FEM dans l'enroulement primaire et une FEM dans l'enroulement secondaire.
  - Le secondaire raccordé à une charge fournit l'énergie au récepteur sous une tension U_2
  - Si le transformateur est idéal (sans perte) :

$$U_2 = U_1 * n_2 / n_1 \quad \text{(I.3).}$$

  - L'énergie « reçue» est égale à l'énergie «fournit».
  - La puissance secondaire est donc égale à la puissance primaire :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad \text{(I.4).}$$

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

I.8. Les pertes dans les transformateurs :

I.8.1. Les pertes à vide:

Ces pertes sont provoquées dans le circuit magnétique par le flux magnétique alternatif.

On dit donc perte à vide ou «perte fer».

Ces pertes se décomposent:

- En pertes par courants de Foucault.
- En pertes par hystérésis.

▪ ***Pertes par courant de Foucault :***

Le flux magnétique variable induit, dans la masse du fer, des forces électromotrices parasites de la forme :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \qquad \text{(I.5).}$$

e : la force électromotrice en V ;

ϕ : le flux magnétique en Wb .

Ces f.e.m. génèrent des courants parasites: ce sont les courant de Foucault.

On montre que, pour une induction donnée, les pertes Foucault varient comme le carrée de l'épaisseur x. Elles diminuent par ailleurs quand la résistivité augmente.

Pour réduire les pertes, on a donc intérêt à prendre des tôles d'épaisseur faible.

En pratique, les circuits magnétiques sont constitués d'empilage de tôles de faible épaisseur (3.~). Les tôles sont isolées les une des autres par une pellicule isolante (Carlitte : silicate de magnésium).



Figure(I.12): Limitation les pertes par courant de Foucault.

Il est nécessaire de maitriser les bavures lors des découpes. Ces bavures risquent en effet de court-circuiter l'isolation Carlitte en bordure de toles.il y aurait alors une augmentation considérable des courants parasites.

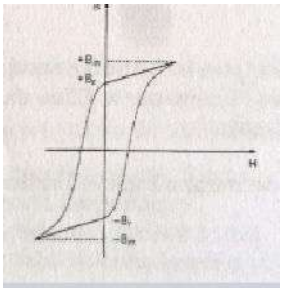
On augmente par ailleurs la résistivité en utilisant des aciers avec 3% de silicium (tôle Hyper sil) [9].

- ***Pertes par Hystérésis :***

Ces pertes sont liées au phénomène d'aimantation rémanente du fer soumis à un champ magnétique.

En courant alternatif, on aimante le fer dans un sens pendant une demi-période puis dans l'autre sens pendant la demi-période suivante.

Ceci se traduit par une dépense d'énergie et donc des pertes, qui se transforme en chaleur.



Figure(I.13): Courbe de cycle d'hystérésis.

I.8.2. Les pertes dues à la charge :

Ce sont les pertes dues au passage des courants dans les bobines. Ces pertes sont essentiellement localisées dans les bobines en cuivre, on dit souvent «pertes cuivre».

Ces pertes comprennent :

- ***Pertes par effet Joule :***

Dégagement de chaleur lié au passage du courant dans les bobinages.

$$P_J = RI^2 \qquad \text{(I.6).}$$

P_J : puissance en watt (W) ;

R : Résistance (Ω) ;

I : intensité (A).

Avec la résistance R (en ohms) d'une pièce rectiligne d'un matériau de résistivité $\rho\,(\Omega \cdot m)$, de longueur L (en mètres) et de section droite d'aire S (en mètres carrés) vaut donc :

$$R = \frac{\rho L}{S} \qquad \text{(I.7).}$$

- ***Pertes par effet Foucault :***

Ce sont les pertes créées par les courants induits par le flux de fuite dans les conducteurs.

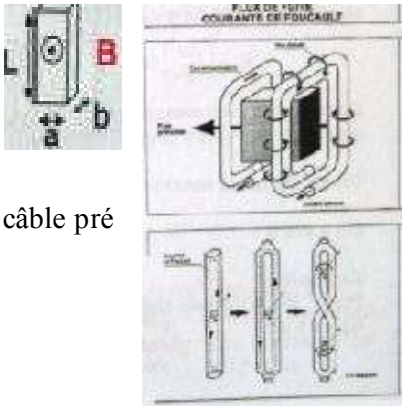
$$P_F = KB^2 f^2 a^2 bL \qquad \text{(I.8).}$$

f : fréquence en KHZ,

B : champ d'induction magnétique en tesla T ;

Remarque : les pertes par unité de volume sont égales à $KB^2 f^2 a^2$ .Ces pertes sont proportionnelles aux carrés de B et de a .

Pour limiter ces pertes Foucault, on est conduit à subdiviser le cuivre d'une spire en méplats de quelques millimètres. Chaque méplats est isolé du suivant par 2 ou 3 couches de papier (ou par de l'émail dans le cas de câble pré permuté).



Figure(I.14): Flux de fuite courant de Foucault.

Ces méplats doivent de plus être «permutés» par rapport à la direction du champ magnétique de fuite [9].

Pour les fortes intensités, on utilise souvent du câble pré permuté.

Les valeurs de pertes sont données par le constructeur et sont garanties [9].

- ***pertes supplémentaires :***

Ce sont les pertes provoquées par le flux de fuite dans le circuit de retour de ce flux (shunts magnétiques, cuve….).

Les pertes par courant de Foucault (+supplémentaires) représentent 10 à 20% des pertes dues à la charge.

Remarque : Si les pertes totales sont élevées, la part relative de la réfrigération augmente. Le niveau des pertes doit tenir compte du mode réfrigération (radiateurs, aéroréfrigérants, hydroréfrigirants) [9].

I.9. Les contraintes :

Un réseau électrique doit fournir une énergie avec une meilleure qualité possible. Cette qualité se dégrade avec l'apparition des anomalies dont la durée peut conduire à des arrêts de fonctionnement prolongés.

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

I.9.1. Surtension :

Les surtensions sont dangereuses dans un réseau de distribution car elles soumettent les isolants à des contraintes qui risquent de les détruire ou des moins de les vieillir.

Les surtensions peut être causées par :

- Contact avec une ligne de plus forte tension.
- Coupure brutale d'une ligne.
- Coups de foudre directs ou indirects.
- Dans le cas ou la surtension persiste, elle risque d'entrainer des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs.
- En cas de claquage de l'isolant, elles ont pour conséquence immédiate un court-circuit même s'il s'agit seulement d'un arc dans l'air, celui-ci persiste sur les réseaux de tension supérieure à quelques milliers de Volts, même après la disparition de la surtension.

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

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

I.9.2. Surcharge :

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

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

Les conséquences des surcharges sont :

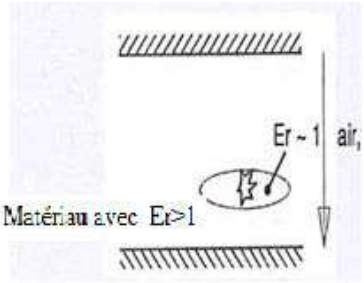
- Un régime de charge d'un transformateur au-delà des valeurs de la plaque signalétique a les conséquences suivantes :
  - Les températures des enroulements, des calages, des connexions, des isolants et de l'hile vont augmenter, et peuvent atteindre des nivaux inacceptables.
  - L'induction magnétique du flux de fuite, en dehors du circuit magnétique, augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courant de Foucault dans les parties métalliques embrassées par le flux de fuite.
  - Comme la température varie, les taux d'humidité et teneur en gaz dans l'isolation et dans l'huile sont modifiés.
- Les traversées, les changeurs de prises, les connexions d'extrémités de câble et les transformateurs de courant sont également soumis à des contraintes plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.

Par conséquence il ya un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolation du transformateur sur de nombreuses années [9].

I.9.3. Les décharges partielles :

Les décharges partielles peuvent être provoquées par :

- Une cavité non imprégnée d'huile.
- Une contamination (particule métallique).
- Une conception non optimale (choix du matériau, de sa disposition,...).
- Un dommage mécanique (guipage mou, déformation d'une cornière,…).



Figure(I.15): Décharges partielles.

- Une mauvaise réalisation (arêtes, effet de pointe, traitement insuffisant,…).

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

Cette décharge peut :

- S'éteindre si les parois de la cavité ce charbonne et si le matériau est sain.
- Se développer en détruisant le matériau ce qui affaiblit sa tenue diélectrique et peut conduire à un claquage [9].

I.9.4. Court circuit :

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolement relatif de deux conducteurs de tensions différents à la même source, sans interposition d'une impédance convenable.

Le court-circuit peut être causé par :

- Installations intérieurs : frottement – écrasement – rupture de conducteur contact avec le conducteur voisin…
- Lignes aériennes : coup de foudre – balancement de conducteur chutés du branches…
- Lignes souterraines : mouvement de terrain – infiltration d'humidité – coup de pioche…
- Postes : avarie d'un appareil – vieillissement, détérioration ou claquage des isolants.

Les conséquences des surintensités sont :

- La chaleur de l'arc ou celle dépensée dans le contact imprévu, peut faire fondre les métaux environnants, carboniser les isolants et même déclencher de court-circuit très dangereux, les enroulements des transformateurs sont véritablement secoués. Ils peuvent même causer un décalage de galettes.

- L'échauffement de tous les conducteurs traversés par le courant de court-circuit est très important, il concentre ses effets sur les points faibles : bornes des transformateurs.

- Les effets de la chute de tension, s'ils font courir moins de danger au matériel, n'en sont pas moins gênants, la tension devient quasi-mille au voisinage du court-circuit [9].

I.10. Méthodes de diagnostic des transformateurs :

I.10.1. Analyse d'huile :

Des liquides isolants ont été employés dés le tout début du développement de la construction des équipements électriques haute tension. En général, les liquides sont associés à des isolants solides pour améliorer la tenue aux décharges partielles et au claquage de l'isolation. Dans certain cas, notamment dans les transformateurs et quelques câbles de puissance, le liquide isolant est avant tout un fluide de transfert thermique qui sert à évacuer les calories produites au cœur de l'appareil [15].

Les transformateurs de puissances sont des composants essentiels des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils constituent l'un des éléments les plus chers et il est donc fondamental qu'ils fonctionnent correctement durant de nombreuses années. La plupart des transformateurs de puissances à travers le monde sont remplis de liquides isolants. Ces liquides isolants permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique (par imprégnation des isolants solides, cellulosique en particulier), que le transfert de chaleur.

En effet en plus de leurs propriétés diélectriques, ils ont de bonnes propriétés de dissipation de chaleur comparés aux isolants solides et gazeux [16].

L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût. En revanche, cette dernière présente une faible résistance au feu et c'est pourquoi entre les années 1930 et le milieu des années 1970 des liquides ininflammables comme les polychlorobiphényles (PCB) étaient utilisés comme isolants dans les

transformateurs, cependant ces derniers ont été reconnus comme dangereux pour les populations, les animaux et l'environnement, notamment par le fait qu'ils pouvaient dégager des dioxines lors d'une combustion incomplète [17]. Et la découverte d'une pollution mondiale par les polychlorobiphényles (PCB) a montrée du doigt la famille des liquides isolants dans son ensemble, et elle est devenue la cible des médias. Il en résulte une suspicion de plus en plus grande à leur égard, leur emploi est de plus en plus restreint et soumis à des réglementations par les autorités nationales. C'est cette phobie qui a entrainé des recherches pour essayer de trouver des substituts verts [15].

- ***Propriétés des huiles minérales :***

Le choix d'une huile isolante repose sur un nombre important de propriétés qu'on regroupe en trois [18]:

- Les propriétés physiques ;
- Les propriétés électriques ;
- Les propriétés chimiques.

- ***Propriétés physiques :***

  - **Viscosité :**

La viscosité d'un fluide est définit comme la propriété qui caractérise sa résistance à l'écoulement. Plus précisément, la viscosité résulte de la résistance qu'oppose les molécules du fluide à des efforts qui tendent à les déplacer par glissement relatif [19].

  - **Point d'éclair-point de feu et auto-inflammation :**

Le chauffage progressif d'une huile provoque le dégagement de vapeur. Dés que la concentration de ces vapeurs dans l'atmosphère surmontant l'huile devient suffisante pour former un mélange inflammable, elles brulent à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée point d'éclair de l'huile.

Dans la mesure, où le chauffage a été poursuivi, une combustion permanente s'établit en présence d'une flamme, à partir d'une certaine température qui corresponde au point de feu de l'huile. Pour que le risque d'inflammation devient négligeable, il faut que la température

reste inferieure de : 25°C à 30°C au point d'éclair [20]. Les liquides ininflammables n'ont pas de point de feu.

La température d'auto-inflammation d'un liquide est la température minimale à laquelle se produit une combustion instantanée, elle très supérieure à celle du point d'éclair. Cette température correspond au comportement d'un liquide dans un incendie, alors que le point de feu caractérise des limites thermiques de service [21].

- **Point d'écoulement :**

Le point d'écoulement est également un paramètre important dans le choix d'une huile destinée à évacuer les calories. Il est défini comme la température au dessous de laquelle le liquide ne coule plus. Deux phénomènes peuvent être responsables de la perte d'écoulement :

- L'augmentation de viscosité à basse température.
- La cristallisation de certains composants (notamment les paraffines dans l'huile minérale) [22].

La connaissance de cette caractéristique est primordiale pour l'utilisation de transformateurs dans les pays froids.

Les liquides isolants en électrotechniques se figent généralement à des températures allant de (-60°C à -30°C) [23].

- **Aspect couleur :**

L'aspect couleur est un test visuel nous permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, humidité) et d'évaluer sa couleur et la viscosité. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide.

La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve, elle a une relation avec les hydrocarbures qui la constitue. Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller leur acidité en service. Elle nous renseigne également sur son vieillissement.

L'aspect couleur et l'odeur, nous renseignent sur l'état général de l'huile, en effet ; une mauvaise odeur avertit sur la présence d'amorçages d'arcs électriques dans l'huile, une

couleur sombre indique une dégradation de l'huile et l'aspect trouble signifie la présence d'eau et d'impuretés [24].

- **Densité :**

Dans les climats froids, il est important de spécifier la densité de l'huile pour éviter la création de glace flottant dans l'huile à basse température.

Ce phénomène peut se produire lorsqu'il y'a présence d'eau libre dans des transformateurs hors tension pouvant provoquer des pannes lors de la mise en route. Les huiles à haute teneur aromatiques ont une densité plus élevée que les huiles contenant plus de molécules naphténiques et paraffiniques.

La densité décroit lorsque la température croit et le coefficient standard 0.00065/°C est utilisé pour calculer la densité à d'autres températures que celles mesurées. Ce coefficient varie légèrement selon les huiles en fonction de la structure et du degré de raffinage [25].

- ***Propriétés chimiques :***

- **Teneure en eau :**

Au départ, lorsque l'huile est neuve et traitée, elle a une faible teneur en eau (<10 ppm pour l'huile minérale). Cette teneur va augmenter au cours de la vie du transformateur suite à la pénétration d'humidité provenant de l'atmosphère mais aussi avec la dégradation du papier. Cette mesure est un outil indispensable pour juger l'état de vieillissement d'une huile et d'un transformateur, d'autant plus que l'humidité est un facteur qui diminue les propriétés diélectriques d'un isolant [26].

L'absorption de l'eau par l'huile dépend de la température et de la quantité de molécules polaires [25].

- **Indice de neutralisation :**

L'indice de neutralisation indique si l'huile contient une matière acide. Une valeur élevée ou croissante indique que l'huile a commencé à s'oxyder. Une valeur élevée peut provoquer des problèmes de corrosion, l'acide peut former des savons dans l'huile contenant des ions et affecte ses propriétés électriques. Ces acides augmentent également la solubilité de

l'eau dans le papier du fait de leur structure polaire. Ils peuvent en outre favoriser la dégradation du papier [25].

- ***Propriétés électriques :***

Les propriétés électriques des liquides dépendent de leur formation. L'étude des propriétés électriques est un domaine qui se caractérise par sa pluridisciplinarité et touchant à la chimie, à l'électronique et à la mécanique des fluides [18].

- **Permittivité :**

La permittivité relative ε_r d'un produit est définie comme le rapport entre la capacité d'un condensateur rempli de ce produit et la capacité du même condensateur vide :

$$\varepsilon_r = C_P / C_0 \qquad \text{(I.9).}$$

C_P : la capacité du condensateur plein en farads.

C_0 : la capacité du condensateur dans l'air en farads.

Dans la pratique, ε_r est obtenu en comparant le condensateur plein au condensateur dans l'air. L'erreur commise sur la détermination de ε_r est faible, puisque la permittivité relative de l'air (à 25°C et sous pression atmosphérique) vaut 1,0005.

La permittivité absolue ε est le produit de la permittivité relative ε_r par la permittivité du vide : ε_0=8,85.10^{-12} F/m

Avec :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 . \varepsilon_r \qquad \text{(I.10).}$$

La permittivité intervient dans la force électrostatique entre charges électriques q et q'

$$F = K\, q\, q' / \varepsilon\, d^2 \qquad \text{(I.11).}$$

Avec :

K : la constante de gravitation qui vaut environ : $K = 6.67 \cdot 10^{-11} Nm^2 / Kg^2$

d : distance entre les charges [22].

- **Résistivité, Conductivité :**

Une huile pour être isolante électrique, doit conduire le moins possible d'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité σ doit donc être la plus faible possible ou inversement, sa résistivité $\rho\,(\Omega.m)$ doit être la plus forte possible $\rho = 1/\sigma$.

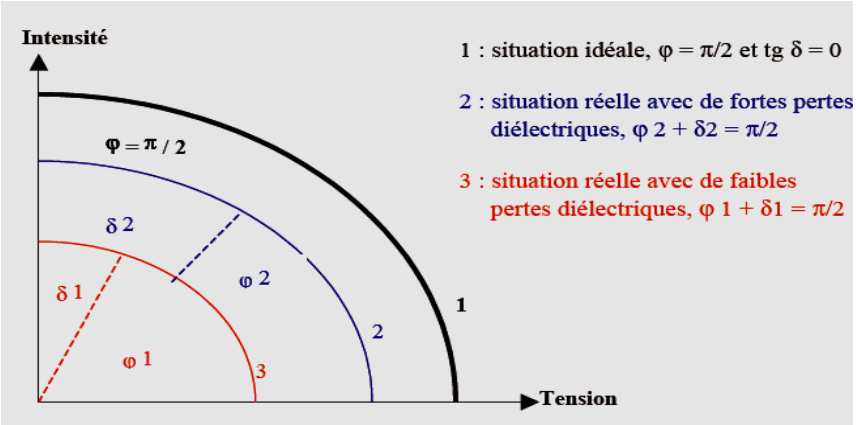
La conductivité d'une huile isolante est due à la présence de charges libres positives et négatives (des ions), en quantités égales. Sous l'effet d'un champ électrique, ces charges se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction.

La résistivité d'une huile est influencée par la présence de substances étrangères, considérées comme impuretés (poussières, particules, gaz, humidité), qui même en quantité aussi faible que quelques ppm a une influence sur les valeurs mesurées. Plus la température est élevée, plus la viscosité de l'huile est faible et plus la mobilité des ions est grande, et par conséquent plus la conductivité est élevée [22].

- **Facteur de dissipation (tgδ) :**

Le facteur de dissipation ou facteur de perte $(tg\delta)$, est directement lié à la résistivité et la permittivité en tension alternative, $tg\delta = 1/R*C*\omega$.

R : résistance électrique (Ω).
C : la capacité du condensateur en farads.



Figure(I.16): Représentation schématique de l'angle de perte tg δ.

Le facteur de dissipation se définit comme la tangente de l'angle de perte, c'est-à-dire l'angle pour lequel la différence de phase entre la tension appliquée et le courant qui en

résulte de vide est π/2. Ici le diélectrique du condensateur se compose exclusivement de l'huile isolante considérée comme parfait. En effet, en situant réelle, **δ+φ=** π/2, ou **δ** est appelé angle de perte **(δ** est complémentaire de l'angle de déphasage entre le courant et la tension). Plus ce dernier est élevé, plus les pertes diélectriques seront élevées [26].

- **Rigidité et tension de claquage :**

La rigidité diélectrique moyenne E_c, d'une l'huile est la valeur maximale du champ électrique qu'on peut lui appliquer sans décharges, entre deux électrodes, elle est donnée par la relation suivante :

$$E_C = U_C / \mathrm{e} \qquad \text{(I.12).}$$

E_C : est la rigidité en kV /mm ;

U_C : est la tension de claquage en kV;

e : est la distance entre les deux électrodes en mm ;

Dans les huiles, le claquage est le résultat de l'initiation, puis de la propagation d'un streamer (canal gazeux ionisé provoquant une décharge lumineuse), d'une électrode à l'autre.

Dans l'industrie on parle surtout de la tension de claquage d'un matériau pour définir sa tenue diélectrique. Ces solides ont une tension de claquage supérieure à celle des liquides, ces derniers ont une tension supérieure à celle des gaz. Pour cette raison on évite la présence de gaz dans les transformateurs [27].

- ***Analyse des gaz dissous dans l'huile :***

Au cours de la vie d'un appareil, les surtensions du réseau peuvent provoquer l'apparition de décharges partielles conduisant à la génération de gaz et autres sous-produits solubles ou insolubles. De même, un échauffement local prolongé peut provoquer la dégradation de l'imprégnant avec également production de sous-produits. Le vieillissement d'un appareil peut être suivi par l'analyse régulière de l'état du liquide.

L'analyse des gaz dissous ou libres est surtout utilisée pour les transformateurs de puissance. Dans ce cas particulier, des guides ont été rédigés pour l'interprétation de ces analyses. Cependant, l'interprétation des résultats de l'analyse des gaz dissous (AGD) est

souvent complexe et il convient qu'elle soit toujours faite avec prudence, en s'entourant de personnel expérimenté en maintenance d'isolation.

Les techniques principales de diagnostic utilisent six rapports caractéristiques des gaz dissous (tableau I.1).

Tableau(I.1): Définition des rapports utilisés dans les méthodes de diagnostic.

Rapport	CH_4/ H_2	C_2H_2/ C_2H_4	C_2H_2/CH_4	C_2H_4/ C_2H_6	C_2H_6/CH_4	C_2H_6/ C_2H_2
Abréviation	R1	R2	R3	R4	R5	R6

- **Méthode des gaz clés :**

Cette méthode associe un gaz particulier à un type de défaut .Cette règle est le fruit de la composition d'une grande quantité de cas .Il a été observé que dans tel ou tel cas de défaut, les mêmes gaz étaient produits. La formation de ces gaz est aussi explicable du point de vue des conditions chimiques nécessaires à leur formation. Ainsi la formation d'acétylène en présence d'arc est explicable au sens chimique en raison de l'énergie nécessaire supérieur pour produire l'acétylène par rapport aux autres gaz combustibles [28].

Tableau(I.2): Méthode des gaz clés [28].

Gaz clé	Défaut probable
Acétylène (C_2H_2)	Arc électrique
Hydrogène (H_2)	Décharge partielle
Éthylène (C_2H_4)	Dégradation thermique de l'huile
Monoxyde de carbone (CO)	Vieillissement thermique de la cellulose

Tableau(I.3): Gamme de valeur typique des gaz [28].

Catégorie de transformateur	C_2H_2	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Sans CPC	2-20	50-150	30-130	60-280	20-90	400-900	3800-14000
CPC non étanche	60-280						

- **Méthode par CEI 60599 :**

La méthode CEI (Commission électrotechnique internationale), utilise un rapport de moins que les autres méthodes. IL y a donc un nombre significatif de codes des rapports des gaz dissous dans l'huile qui tombent en dehors de la table de correspondances des codes [28].

Tableau(I.4): Étude des rapports par CEI 60599 [28].

Type de défauts	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Décharges partielles (DP)	NS(1)	<0 .1	<0.2
Arcs électriques (D1)	> 1	0.1- 0.5	> 1
Arcs électriques (D2)	0.6 – 2 .5	0.1- 1	> 2
Défaut thermique de basse température	NS(1)	>1mais NS(1)	< 1
Défaut thermique de moyenne température	< 0.1	>1	1 – 4
Défaut thermique de haute température	< 0.2(2)	> 1	>4

NS(1) : Non significatif quelque soit la valeur.

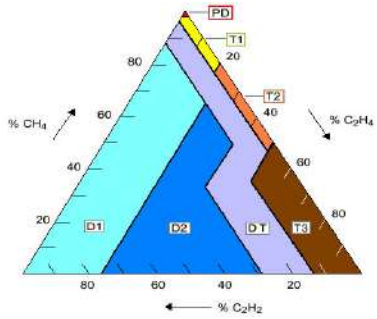
(2) : Une valeur cotisante de C2H2 peut indiquer que le point chaud est à une température > 1000°C.

- **Méthode DUVAL :**

Cette méthode a été mise au point par un chercheur d'Hydro-Québec dont les études ont portés les données de transformateurs de puissance supérieure à 100 MVA.

Cette méthode permet d'établir un diagnostic peu importe la combinaison de gaz dissous. Celle-ci n'utilise pas l'hydrogène [28].

PD : Décharge partielle
D1 : Décharge de basse énergie
D2 : Décharge de haute énergie
T1 : Faute thermique, T<300°C
T2 : Faute thermique, 300°C<T<700°C
T : Faute thermique, T>700°C
DT : Mélange de fautes thermiques et électriques



Figure(I.17): Triangle de Duval.

- **Méthode de DOERNENBURG:**

DOERNENBURG utilise dans son diagnostic 4 rapports et cinq gaz caractéristiques (tableau I.5). Il a pu séparer les défauts thermiques des défauts électriques et établi des valeurs limites des gaz clés (tableau I.3) [28].

Tableau(I.5): Méthode des rapports de DOERNENBURG [28].

Rapports de gaz	Critères	Codes
CH_4/H_2	< 0.1	0
	0.1 < < 1	1
	> 1	2
C_2H_2/C_2H_4	< 0.75	0
	> 0.75	1
C_2H_6/C_2H_2	< 0.4	0
	> 0.4	1
C_2H_2/CH_4	< 0.3	0
	> 0.3	1

Tableau(I.6): Table de correspondance des codes, méthode DOERNENBURG [28].

CH_4/H_2	C_2H_2/C_2H_4	C_2H_6/C_2H_2	C_2H_2/CH_4	Diagnostic
2	0	1	0	Décomposition thermique (points chauds)
1	1	0	0	Arc électrique
0	0	1	0	Décharges partielles
0	1	0	0	Décharges partielles

- **Méthode de Rogers :**

Elle représente la première méthode dans le domaine. Proposée en 1973, affinée en 1975 et ensuite en 1977, elle utilise principalement quatre rapports de gaz caractéristiques. Le

diagnostic a été amélioré avec la proposition de deux tableaux : l'un pour la définition des codes (tableau I.8) et l'autre pour le diagnostic proprement dit (tableau I.7) [28].

Tableau(I.7): Diagnostic de la méthode des rapports de Rogers [28].

Rapport des gaz	Grandeurs	Code
CH_4/H_2	<0.1	5
	Entre 0.1 et 1.0	0
	Entre 1.0 et 3.0	1
	>3.0	2
C_2H_6/CH_4	<1.0	0
	>1.0	1
C_2H_4/C_2H_6	<1.0	0
	Entre 1.0 et 3.0	1
	>3.0	2
C_2H_2/C_2H_4	<0.5	0
	Entre 0.5 et 3.0	1
	>0.3	2

Tableau(I.8): Définition des codes de la méthode affinée des rapports de Rogers [28].

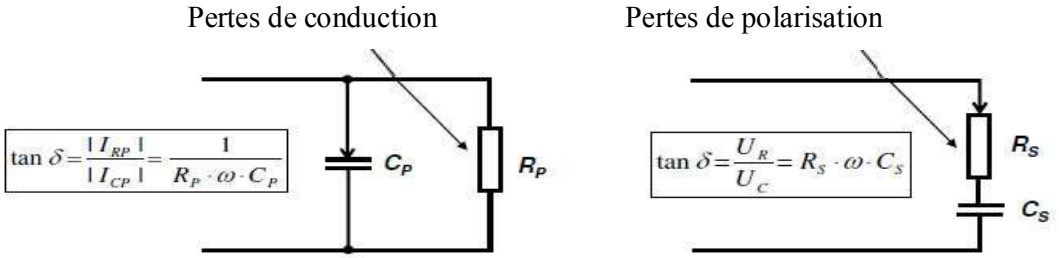
R1	R5	R4	R2	Diagnostic
0	0	0	0	Détérioration normale
5	0	0	0	Décharges partielles
1 ou 2	0	0	0	Faible échauffement : inférieur à 150°C
1 ou 2	1	0	0	Faible échauffement : 150°C-200°C
0	1	0	0	Faible échauffement : 200°C-300°C
0	0	1	0	Surchauffe générale des conducteurs
1	0	1	0	Courants de circulation des enroulements
1	0	2	0	Circulation de courant dans le noyau ou la cuve, ou mauvaise connexion électrique
0	0	0	0	Arc, faible énergie, contournement sans écoulement de courant de puissance
0	0	1 ou 2	1 ou 2	Arc, haute énergie, contournement avec écoulement de courant de puissance
0	0	2	2	Arc, faible énergie, étincelage à un potentiel flottant
5	0	0	1 ou 2	Décharges partielles avec cheminement

I.10.2. Mesure de la capacité et de la tg δ du transformateur :

Les mesures de la capacité et du facteur de dissipation sont effectuées dans le but d'étudier l'état des traversées ainsi que celui de l'isolation globale du transformateur. Le vieillissement et la décomposition de l'isolation, ou la pénétration d'eau, augmentent la

quantité d'énergie sous forme de chaleur dans l'isolation. Le niveau de ces pertes est mesuré par le facteur de dissipation.

Les valeurs de capacité des traversées indiquent la présence de claquages partiels entre les couches capacitives. Pour les traversées à papier enduit de résine, les fissures par lesquelles l'huile a fui peuvent aussi modifier la valeur de la capacité. Une augmentation de la capacité de plus de 10 % est normalement considérée dangereuse, car elle indique qu'une partie de l'isolement est déjà dégradée et que la contrainte diélectrique s'exerçant sur l'isolation restante est trop élevée [29].

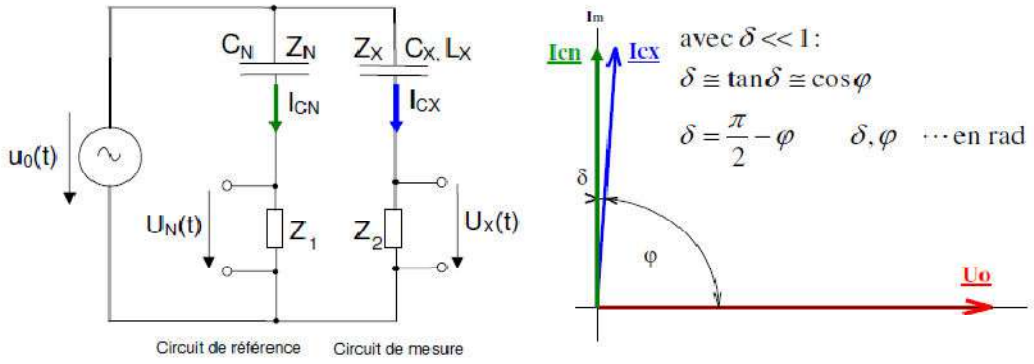


Figure(I.18): Schémas de pertes par conduction et par polarisation.

- ***Principe de mesure avec équipement de test universel pour les diagnostics électriques CPC100 / CP TD1 :***

Le CPC 100 est utilisé pour piloter le test, c'est-à-dire :

- Saisir les valeurs de tension et de fréquence lorsque C et cos ϕ / tan δ doivent être mesurés
- Démarrer et arrêter le test
- Superviser l'avancement des mesures et les résultats intermédiaires
- Stocker les résultats sur mémoire interne et clé USB
  - Le CP TD1 Mesure de la capacité et du facteur (tan delta) de dissipation, isolation diagnostic) comprend
    - Un transformateur élévateur haute tension
    - Un condensateur de référence (type à gaz sous pression)
    - L'unité destinée à mesurer et comparer les amplitudes et les phases des courants [29].



Figure(I.19): Représentation schématique de la tg δ et de la capacité [7].

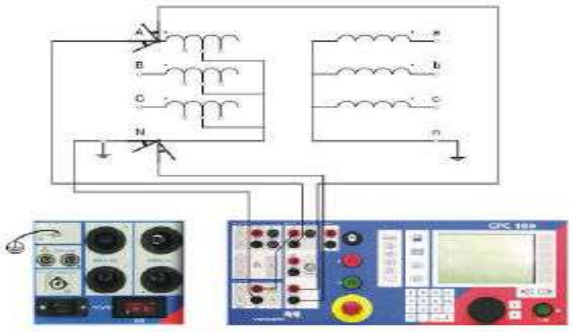
I.10.3. Mesure du changeur de prises en charge :

- ***Buts:***

Déceler :

- Mauvais contacts (oxydation, serrages des connexions).
- Comportement du courant au passage des prises (courte interruption de courant, vibration de contact) [7].

- ***Exemple de schéma de mesure avec le CPC100:***



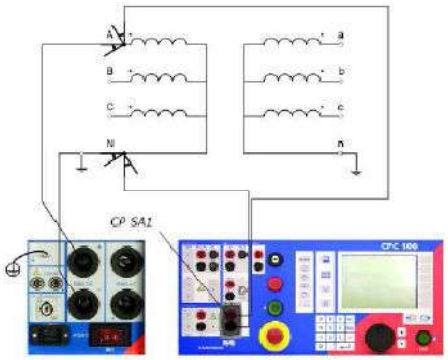
Figure(I.20): Schéma de mesure du changeur de prise en charge par CPC100.

I.10.4. Mesures des résistances des enroulements :

Les mesures de résistance d'enroulement sont effectuées pour évaluer la détérioration possible des enroulements. Ces mesures permettent également de contrôler l'état du changeur de prise en charge CPEC/OLTC (Central Pennsylvania Employment Consortium/On-load tap-changer Transformer)- savoir quand nettoyer ou remplacer les contacts du CPEC (Central Pennsylvania Employment Consortium), ou savoir quand remplacer ou remettre en état le

CPEC même, dont la durée de vie est plus courte que celle de la partie active du transformateur [29].

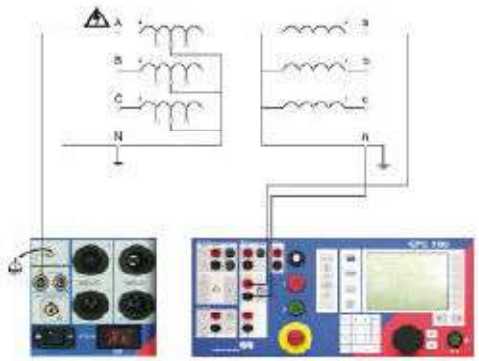
- ***Schéma de mesure avec le CPC100 :***



Figure(I.21): Schéma de mesure de la résistance des enroulements par CPC100.

I.10.5. Mesure du rapport de transformation :

- ***Buts:***
  - Déceler la présence de court-circuit entre enroulements bobinés en parallèle ou entre le circuit magnétique [7].
- ***Schéma de mesure avec le CPC100 :***

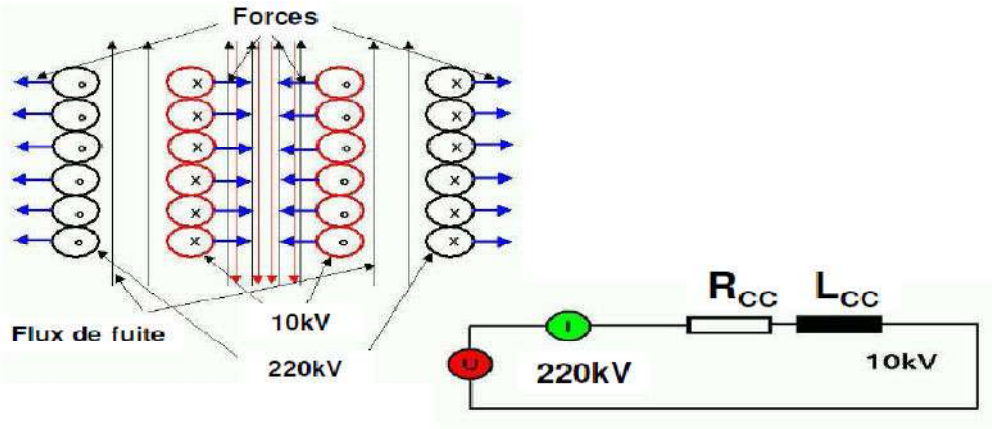


Figure(I.22): Schéma de mesure de rapport de transformation par CPC100.

I.10.6. Mesure de l'impédance de court-circuit :

Les mesures sont effectuées pour évaluer la détérioration/le déplacement éventuel des enroulements. Les mesures sont comparées dans le temps ou entre les phases. Dans le cas d'un

court-circuit, les forces agissent en direction du circuit magnétique pour l'enroulement interne et en s'éloignant pour l'enroulement externe. Le flux de fuite va varier si cette force influente sur la distance entre les enroulements. On peut notamment détecter les courts-circuits entre les conducteurs en parallèle ainsi que l'échauffement local suite aux pertes importantes par courants de Foucault liées aux courants supplémentaires [29].



Figure(I.23): Schéma de représentation des forces de court-circuit et flux de fuite CPC100 [7].

I.11. Conclusion :

Le transformateur de puissance est une machine électrique statique qui permet la conversion de l'énergie électrique basé sur la loi de l'induction électromagnétique.

Chacun des éléments constitutifs a un rôle bien déterminé pour garantir un fonctionnement permanent avec une qualité d'alimentation correcte et un rendement optimal.

Dans les réseaux d'exploitations, les transformateurs de puissance sont soumis à des nombreuses contraintes lors de leur fonctionnement. Ces contraintes perturbent le fonctionnement du transformateur et peuvent parfois s'avérer destructives. C'est la raison pour laquelle il est installé des protections pour sauvegarder la bonne marche des transformateurs suivant un plan de protection fiable.

Les techniques de diagnostic deviennent de plus en plus importantes pour évaluer au mieux l'état des transformateurs. On se base essentiellement des mesures électriques et chimiques dans le but d'améliorer la fiabilité des diagnostics relatifs aux transformateurs de puissance.

Chapitre II

Modélisation de transformateur en vue de diagnostic

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. Ainsi un transformateur relié à un réseau très haute tension est soumis à différents types de tension dont la connaissance est importante pour établir les contraintes auxquelles sont soumis les diélectriques [30].

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.

II.2. Les modèles usuelles des transformateurs :

En vue d'étudier les phénomènes physiques dans les transformateurs, nous présentons les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature.

II.2.1. Le modèle RESEL :

RESEL est un programme conversationnel pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques**,** son premier objectif était l'étude des phénomènes transitoires dans les transformateurs. II nécessite la modélisation du transformateur à l'aide de deux schémas couplés.

L'un traduit le comportement électrique du transformateur, l'autre exprime son comportement magnétique. Le circuit électrique est composé de plusieurs cellules de : résistances, capacités et forces électromotrices.

L'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateur. Le circuit magnétique est composé d'un réseau de réluctances et de forces électromotrices. Les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique. Les sources du circuit magnétique sont liées au courant dans les enroulements. Pour prendre en compte les effets de la fréquence, le circuit magnétique est décomposé en éléments de géométrie simple pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement simple. Les réluctances complexes ainsi calculées se composent de cellules résistances - inductances.

De même, pour tenir compte de l'effet de peau, on introduit des éléments complexes qui traduisent les pertes dans les conducteurs. Le programme ne traite que des éléments de réseau à constantes localisées, et ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur [30].

II.2.2. Modèle de LEON :

Dans leurs travaux, LEON et SEMLYEH [28], 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 les masses.
- 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.1) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

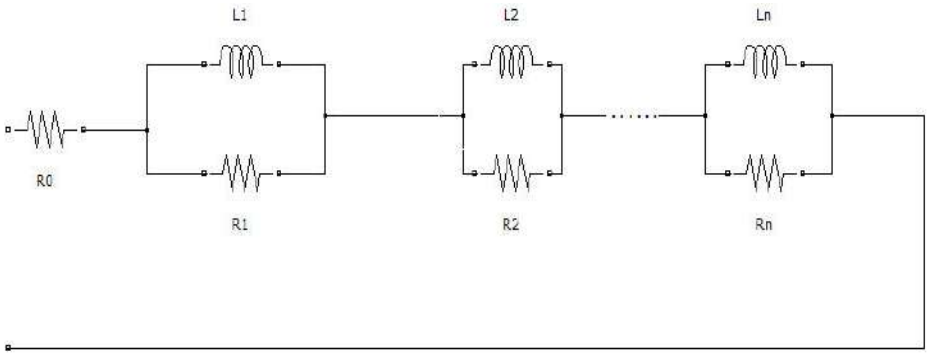
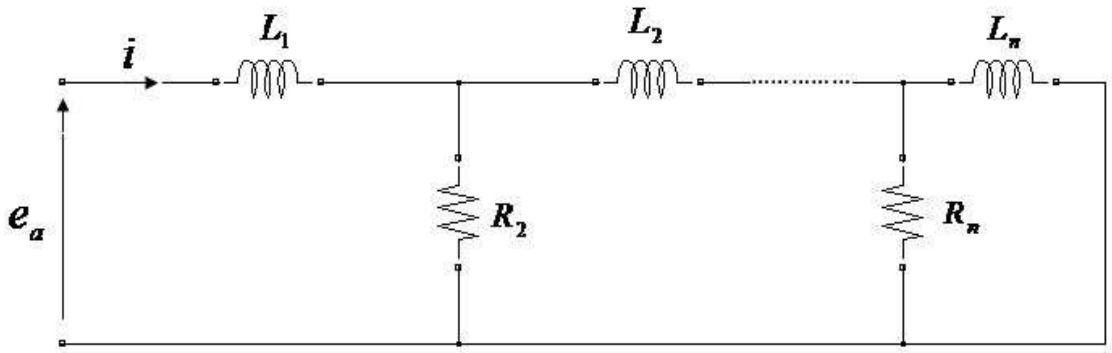


Figure (II.1): Circuit de FOSTER en série.

Pour le noyau, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de CAUER, fig. (II.2) [34].



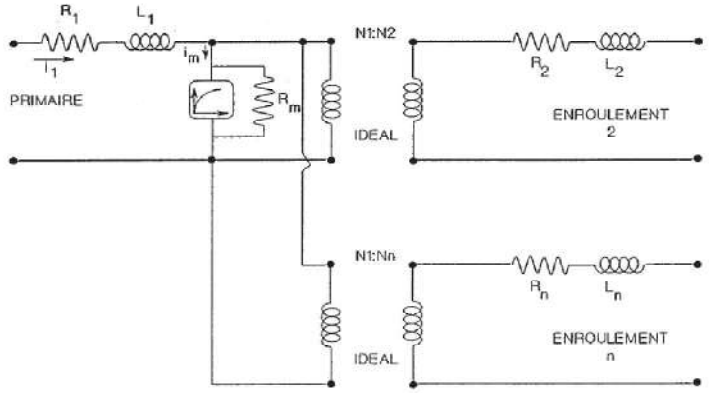
Figure(II.2): Modèle de CAUER pour le noyau de fer.

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.2.3. Modèle EMTP :

EMTP (Electro Magnetic Transients Program) est le programme de simulation, des régimes transitoires et permanents des réseaux électriques, qui sont considéré comme un standard dans les études temporelles et fréquentielles**.** La modélisation du transformateur est faite par des transformateurs parfaits auquel on ajoute les inductances de fuites primaire et secondaire ainsi qu'une branche magnétisante, les résistances des enroulements, et les capacités de couplage. Une

résistance linéaire est connectée en parallèle avec la réactance de magnétisation en vue de simuler les pertes dans le circuit magnétique, figure(II.3) [30].



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

Les paramètres sont déterminés soit par la mesure (essai à vide, essai en court-circuit), soit par le calcul direct de la géométrie. L'intérêt du modèle est son utilisation dans EMTP permettant d'intégrer des schémas non-linéaires (parafoudres, ...), des lignes à constantes réparties, et d'effectuer des études d'interaction du transformateur avec le réseau dans des configurations réelles.

Le modèle est bien adapté pour les études des réseaux, mais il ne convient pas aux études internes du transformateur. Le modèle EMTP présente pour certains cas, une inadaptation du transformateur réel, par exemple un transformateur monophasé à deux enroulements égaux haute tension et basse tension, dont le modèle n'est pas symétrique et l'inductance de court-circuit n'est pas la même vue du primaire et du secondaire [30].

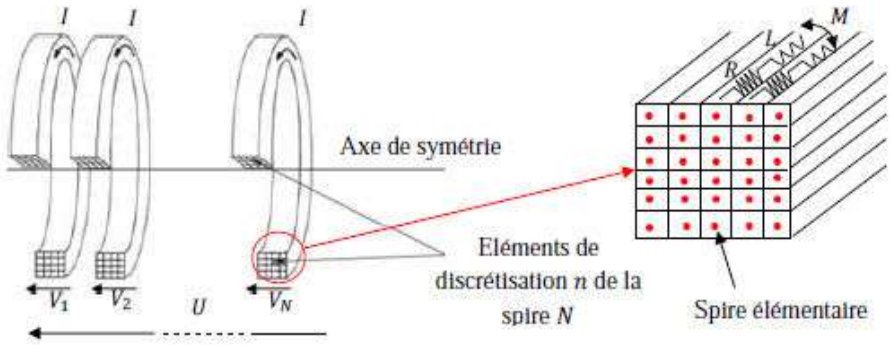
II.2.4. Méthode des Circuits Couplés :

Cette méthode est très proche des considérations physiques et consiste à exprimer les effets inductifs propres et mutuelles entre de multiples spires et éventuellement le circuit magnétique. Pour des spires de géométrie simple, ces inductances sont calculées par des expressions analytiques.

- ***Théorie Générale des Circuits Couplés :***

Le principe de la méthode des circuits couplés consiste à fractionner chaque conducteur d'une bobine de *N* spires (et/ou une charge) en *n* éléments distincts, à l'intérieur desquels la densité de courant est supposée constante. La discrétisation peut être régulière ou non, selon le

type de conducteur, ses dimensions et l'épaisseur de peau dans celui-ci. De manière générale, pour des spires de section quelconque, composées de conducteurs de section arbitraire, cette méthode se traduit par la figure (II.4) :



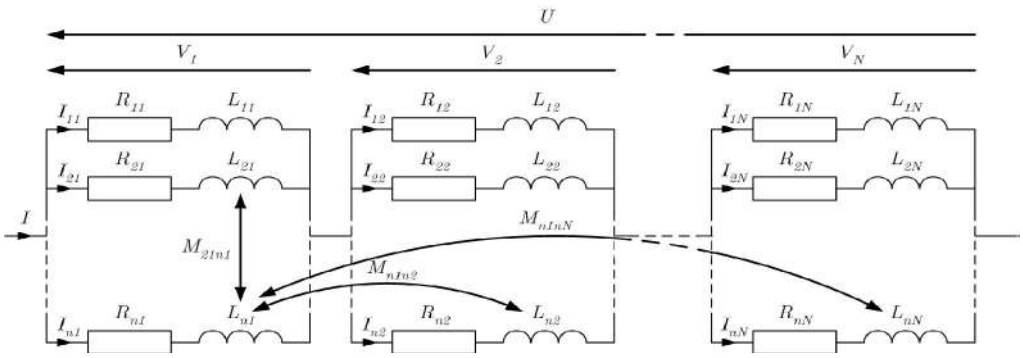
Figure(II.4): Principe de la M2C : découpage en éléments inducteurs.

La globalité des spires élémentaires ainsi obtenues forme alors un système mutuellement couplé modélisable par un schéma électrique équivalent.

- ***Interaction entre les Eléments de Circuits :***

Chaque élément du circuit électrique est représenté par sa résistance électrique et son inductance, ces éléments forment entre eux un système de circuits mutuellement couplés.

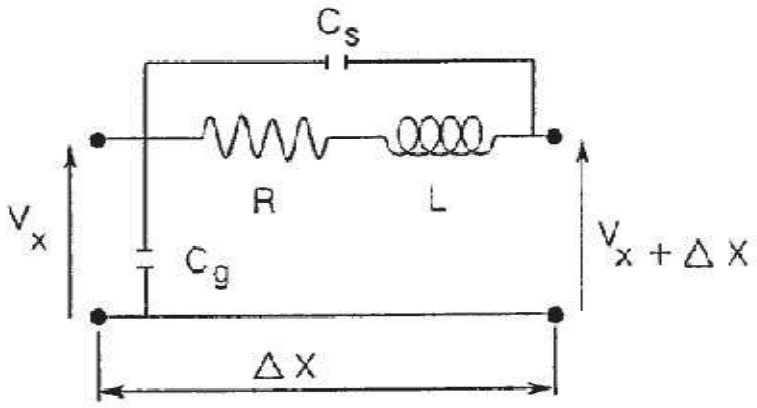
La discrétisation par la méthode des circuits couplés est représentée dans la (Figure II.5), où tout conducteur d'une bobine est formé de «N » spires principales en série et chacune de ces spires est constituées de « n » spires élémentaires en parallèles [32].



Figure(II.5): Schéma électrique équivalent de la M2C [32].

II.2.5. Méthodes utilisant des transformées ou des circuits :

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.6). L'application est faite sans comparaison avec la mesure.



Figure(II.6) : 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.

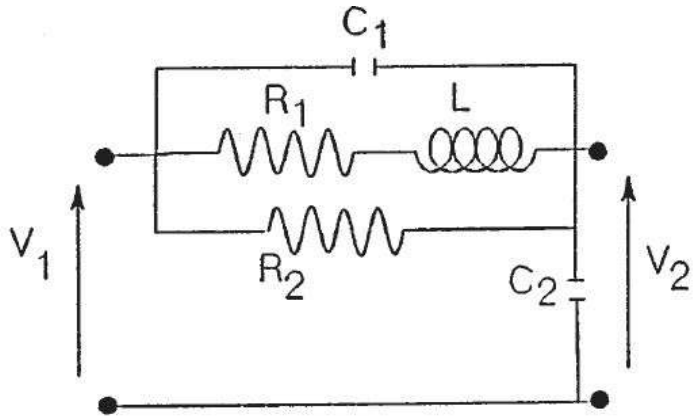
On constate des désaccords avec la mesure à partir de 100 KHz, et il n'y pas une adaptation de la méthode aux études générales par EMTP.

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.7).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 [30].



Figure(II.7) : Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert du transformateur ayant une seule fréquence de résonance.

II.2.6. Modélisation par l'analyse modale :

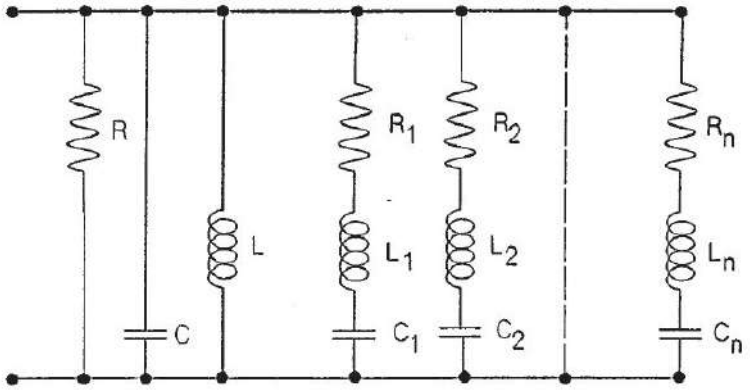
Dans le cas des études où nous nous intéressons aux formes d'onde aux extrémités du transformateur (entrée, sortie), nous pouvons considérer ce dernier comme une boîte noire. Le signal de sortie est lié au signal d'entrée par la fonction de transfert.

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 [30].



Figure(II.8): Schéma équivalent modal.

II.2.7. Modélisation par la théorie de lignes :

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).

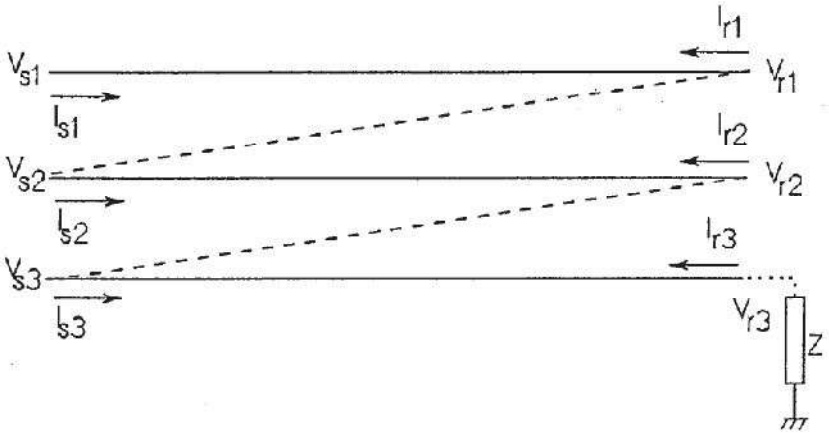
Pour cela, l'enroulement d'un transformateur est décomposé en spires élémentaires, en considérant que le flux magnétique ne pénètre pas dans le noyau magnétique, et que la vitesse de la propagation est constante dans l'enroulement. La mise en équation de ce système donne une relation linéaire, entre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

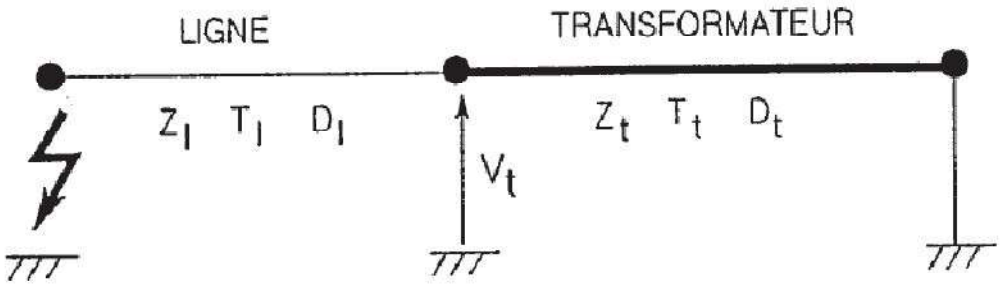
Cette méthode a été ensuite généralisée au cas de N enroulements, afin de tenir compte du noyau magnétique, sur le calcul des impédances, Pour cela, les enroulements sont considérés avec des épaisseurs suffisamment fines. La précision de cette méthode est liée directement au degré de la discrétisation 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 [33].

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,...) [33].



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

T temps de propagation, D facteur d'amortissement [33].

II.2.8. Modèle issu du principe de la dualité magnétique-électrique :

- ***Principe de la méthode :***

La théorie de la dualité permet de passer d'un problème scientifique à un autre, et surtout peut simplifier considérablement son étude. Prenons par exemple le cas d'un problème thermique, où les équations qui régissent le phénomène sont souvent complexes et difficiles à résoudre. La dualité thermique-électrique permet, dans certains cas, de représenter le même problème, par un circuit électrique dual. On traite le problème, en résolvant ce dernier, puis, sachant qu'à un paramètre électrique correspond un paramètre thermique dual, on revient au problème thermique initial, par dualité.

La théorie de la dualité permet donc d'établir des propositions nouvelles, à partir des propositions déjà connues: elle facilite l'étude de certains problèmes scientifiques présentant une contexture donnée, et qu'il est plus commode d'aborder le dual que le problème lui même.

La dualité simplifie les calculs relatifs à certains circuits, en se basant sur l'identité de forme d'un certain nombre de relations, On appelle circuits correspondants par dualité, ou circuits duaux, deux circuits qui constituent deux représentations physiques différentes d'un même système d'équations différentielles. Les équations de nœuds de l'un sont les équations de mailles de l'autre, et inversement.

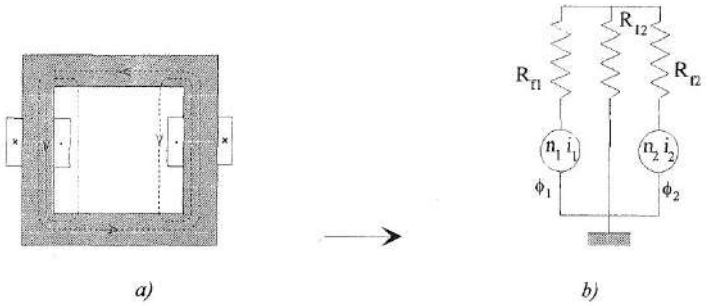
C'est le même principe que ton utilise, pour la dualité magnétique-électrique.

On établit d'abord un schéma magnétique équivalent du transformateur, et on en déduit un schéma équivalent électrique, en utilisant les règles de passage (appelé aussi analogie de Hopkinson) résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau(II.1): Règles de passage pour la dualité magnétique-électrique.

Magnétique	*Electrique*
Force magnétique	Tension électrique
Dérivée du flux	Courant électrique
Réluctance	Inductance
Nœud magnétique	Maille électrique
Ampère tour	Transformateur parfait

Figure (II.11) illustre la modélisation d'un transformateur, par cette approche, où R_{f1}, R_{f2} et R_{12} représentent respectivement les réluctances de fuite primaire, secondaire, et la réluctance principale. De même, n_1i_1 et n_2i_2 sont des forces magnétomotrices [33].



Figure(II.11): Modèle d'un transformateur basé sur la dualité magnétique-électrique.
a) Transformateur à deux enroulements (circuit magnétique).
b) Le circuit électrique dual.

II.2.9. Modélisation par inductances propres et mutuelles (modèle adopté) :

- ***Principe de la méthode :***

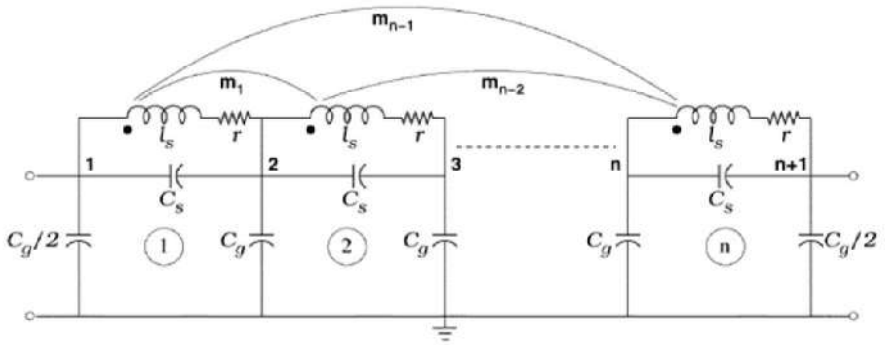
Heller et Veverka [40] ont montré que le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc est assimilable à celui d'un système de condensateurs, de résistances, et d'inductances. C'est le principe du modèle de transformateur de puissance basé sur les inductances propres et mutuelles. Selon l'étude envisagée, c'est-à-dire selon qu'on s'intéresse au phénomène de propagation, ou aux modes de résonance du transformateur, ces paramètres peuvent être répartis ou concentrés.

Cette approche peut être plus ou moins précise, et plus ou moins coûteuse en temps de calcul, suivant le degré de raffinement atteint dans la représentation des enroulements.

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes (Figure II.12).

Au point de vue inductif, chaque élément est représenté par son inductance propre. Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et chaque élément est représenté par son inductance propre. Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément, une capacité par rapport à la masse.

Ces éléments sont calculés, en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau magnétique [33].



Figure(II.12): Modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié.

Avec :

Cs : capacité série.

Cg : capacité shunt.

r : résistance.

L : l'inductance propre.

M_{1N} : représenté les inductances mutuelles.

- ***Intérêt de ce modèle :***

Ce modèle est le plus répandu et le plus utilisé, pour modéliser un transformateur, dans le passé, et à l'heure actuelle. Pour cela, on détermine les éléments du schéma équivalent, soit par calcul (numérique ou analytique), soit par mesure (essais en court-circuit,...).

Le principal intérêt de ce modèle, une fois que l'on a les éléments du schéma équivalent, est qu'il peut être traité par n'importe quel logiciel pouvant résoudre des réseaux électriques de type RLC (EMTP, ...). De plus, il est bien adapté pour le calcul de la réponse temporelle consécutive à une excitation par une onde de choc rapide [33].

- ***Inconvénients de ce modèle :***

Les principaux inconvénients de ce modèle peuvent être résumés en quatre points:

- Les travaux ont montré que l'évaluation exacte de la matrice inductance ne signifie pas que la caractéristique de la fonction de transfert du transformateur, ou les effets de fuite (inductances de fuite) soient corrects. En effet, à cause de la grande valeur de la perméabilité du noyau magnétique qui augmente le couplage entre les bobinages, le calcul de l'inductance de fuite à partir des inductances propres et mutuelles ne sera pas précis, du fait que ces valeurs sont très proches. Ceci donnera l'avantage à un modèle basé sur l'inductance de fuite.
- Le nombre de paramètres à déterminer est important.
- On ne peut pas calculer d'une manière précise les paramètres du schéma équivalent, à cause de la présence du noyau magnétique, ou encore de la forme particulière des bobines.

En fait, en ce qui concerne le noyau magnétique, on fait souvent l'hypothèse qu'il n'influence pas les régimes transitoire du transformateur (noyau blindé en haute fréquence).

- Enfin, la validité du modèle, en HF, est liée au degré de raffinement adapté, pour la représentation des enroulements, et au nombre de paramètres dont on tient compte dans le calcul [33].

II.3. Conclusion:

Nous avons vus dans cette étude bibliographique les divers modèles de transformateur de puissance en Haute Fréquence, existants dans la littérature. Le modèle R, L, C basé sur les

inductances propres et mutuelles est le plus adapté à notre travail, et donc retenu pour étudier le comportement des transformateurs de puissance, en régime transitoire (calcul des fréquences de résonance).

Jusqu'ici, des phénomènes tels que les pertes supplémentaires par courants de Foucault, le comportement du noyau magnétique et les pertes diélectriques, sont approximés, ou tout simplement négligés, du fait que leurs calculs, en utilisant des méthodes numériques, sont coûteux en temps de calcul.

Pour notre étude, nous adoptons l'approche fréquentielle qui peut nous donner les fréquences de résonance.

Chapitre III
Analyse de la réponse en fréquence (FRA)

III.1. Introduction :

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

Dans ce chapitre on présente le modèle du transformateur de puissance adopté en tenant compte des équations mathématiques du schéma équivalent dit traditionnel du transformateur sans tenir compte du noyau magnétique. Puis on présente la procédure de calcul des paramètres des enroulements du transformateur de puissance. Ensuite on présente la méthode du réseau des cellules RLC passifs pour estimer la fonction de transfert de l'enroulement du transformateur en vue d'une étude du comportement de ce dernier en régime fréquentiel.

En mesurant la réponse en fréquence des enroulements du transformateur sur une large plage de fréquences, il est possible de déceler les défauts présents dans l'enroulement et dans le noyau magnétique du transformateur [3].

III.2. Définition :

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 mesurée par des techniques FRA peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être en suite identifiée et analysée [34].

III.3. Utilisation des tests FRA :

Les applications typiques de la mesure de l'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) sont [6], [35] :

- 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 ;

III.4. Détection de défaut par FRA:

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

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

- La déformation d'un enroulement (axiale et radiale).
- 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 [36].

III.5. Fonction de transfert d'un transformateur de puissance

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. [34].

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.

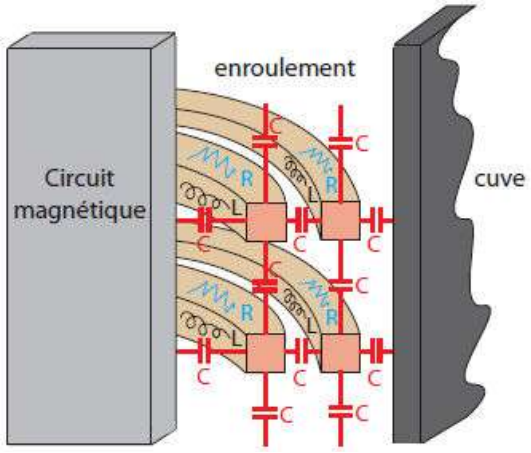
La plupart des transformateurs produisent une résonance très distincte dans une plage de fréquence spécifiée. Dans le cas des transformateurs, les fonctions de transfert sont utilisées pour la modélisation d'enroulement et des études transitoires.

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. [34].

III.6. Principe de la méthode :

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductance et de résistances donc un circuit très complexe (comme schématisé dans la figure(III.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 [35].



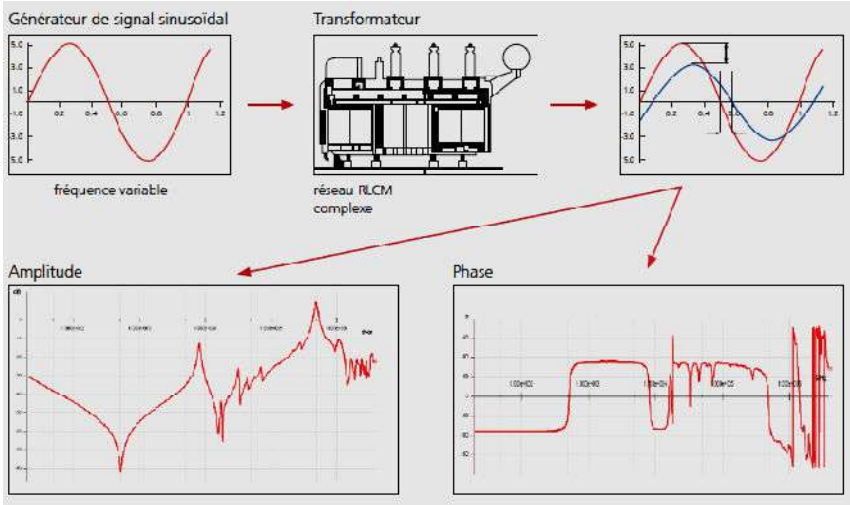
Figure(III.1): Modèle d'un enroulement de transformateur.

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 III.2). [34], [35], [36].



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

III.7. Objectif générale:

L'objectif de ce chapitre est de développer un modèle électrique équivalent d'un transformateur composé d'une cascade de cellule RLC. Ce modèle est obtenu à partir du comportement fréquentiel du transformateur.

Dans le cadre du modèle proposé, nous obtenons les paramètres qui seront simulés et comparés par rapport aux données d'essais réalisés par la méthode de la réponse en fréquence de l'impédance, en vue d'une interprétation rapide et fiable.

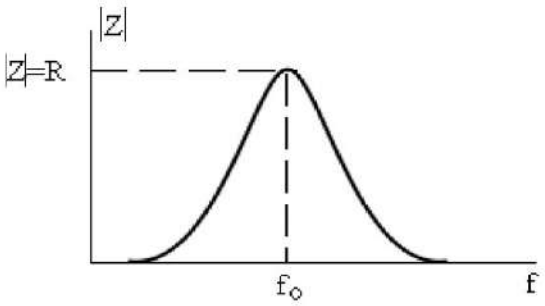
III.8. Méthodologie :

Le modèle proposé est basé sur des mesures obtenues dans les transformateurs électriques en exploitation neuf.

La technique 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.

Un circuit RLC parallèle produit un pic de résonance correspondant à la fréquence de coupure du circuit de la figure(III.3).

Dans le modèle proposé, les cellules composées des éléments RLC parallèle sont arrangées en fonction du nombre de points de résonance de la réponse en fréquence de l'impédance.



Figure(III.3): Module de comportement de l'impédance d'un circuit RLC parallèle en fonction de la fréquence.

Les données obtenues vérifier l'ajustement du modèle proposé par rapport aux valeurs réelles mesurées et rendre ainsi possible le stockage des données et des simulations.

III .9. Modèle adopté pour le transformateur sans la prise en compte du noyau :

Heller et Veverka [37], 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 de résistances, 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 sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres inductances.

La Figure (III.4) représente le schéma équivalent à un enroulement de transformateur.

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

En HF, même si nous négligeons l'effet non linéaire du noyau, la modélisation du transformateur reste plus complexe par rapport à celle à 50 Hz. 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 [31] :

- Effets des courants de Foucault dans le noyau et dans les conducteurs de l'enroulement.

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

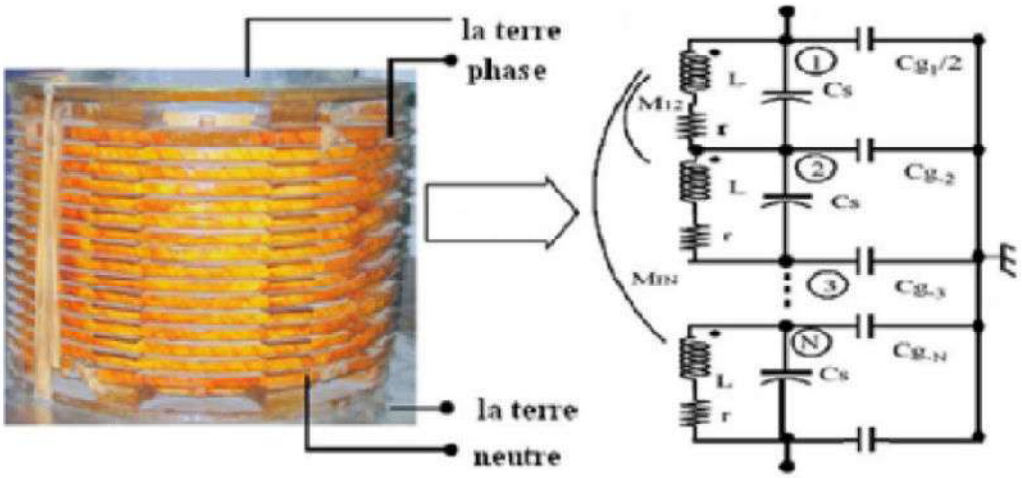


Figure (III.4) : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur

Avec :

: Capacité série.

: Capacité shunt.

r: résistance.

L : l'inductance propre.

M_{IN} : représenté les inductances mutuelles.

III .10. Equations du schéma équivalent adopté :

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la figure nous permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courants de l'enroulement, dans ce qui suit on donnera un exemple d'un enroulement discrétise en 6 éléments et le raisonnement serait le même pour une discrétisation en n éléments, cependant le choix est limité à 6 puisque après ce nombre la précision de calcul reste sensiblement constante [31].

III.10.1. Equations des tensions:

$u_0$et i_0 sont respectivement la tension appliquée et le courant à l'entrée de l'enroulement soumis à cette dernière :

$$u_0(t) = U_{\max} \sin \omega t = r_g i_0 \qquad \text{(III.1).}$$

Avec :

r_g : la résistance interne de générateur.

Les équations différentielles des tensions pour l'enroulement du transformateur subdivisé en 6 éléments, sont:

$$u_1 - u_2 - ri_1 = l_S \frac{di1}{dt} + M_{12} \frac{di2}{dt} + M_{13} \frac{di3}{dt} + M_{14} \frac{di4}{dt} + M_{15} \frac{di5}{dt} + M_{16} \frac{di6}{dt} \qquad \text{(III.2).}$$

$$u_2 - u_3 - ri_2 = l_S \frac{di2}{dt} + M_{21} \frac{di1}{dt} + M_{23} \frac{di3}{dt} + M_{24} \frac{di4}{dt} + M_{25} \frac{di5}{dt} + M_{26} \frac{di6}{dt} \qquad \text{(III.3).}$$

- ***Généralisation :***

Pour 1 k 6

$$u_k - u_{k+1} - ri_k = l_s \frac{di_k}{dt} + \sum_{m=1}^{6} M_{km} \frac{di_m}{dt} \quad \text{avec} \quad m \neq k \qquad \text{(III.4).}$$

III.10.2. Equations des courants :

Au nœud (1) à l'entrée du transformateur on a :

$$i_0 = i_1 + i_{cs} + i_{cg/2} \qquad \text{(III.5).}$$

$$i_0 - i_1 = i_{cs} + i_{cg/2} \qquad \text{(III.6).}$$

Avec

$$i_{cs} = C_s \frac{d(v_0 - v_1)}{dt} \qquad \text{(III.7).}$$

$$i_{cg/2} = C_{cg/2} \frac{dv_0}{dt} \qquad \text{(III.8).}$$

En introduisant (III.7) et (III.8) dans (III.5) et (III.6) on obtient :

$$i_0 - i_1 = \left(C_s + C_{g/2}\right)\frac{dv_0}{dt} - C_s\frac{dv_1}{dt} \quad \text{(III.9).}$$

Au nœud (2) correspondant à la tension on a :

$$i_1 - i_2 = -C_s\frac{dv_0}{dt} + \left(2C_s + C_g\right)\frac{dv_1}{dt} - C_s\frac{dv_2}{dt} \quad \text{(III.10).}$$

- ***Généralisation*** *:*

Pour $1 \le k \le 6$

$$i_k - i_{k+1} = -C_s\frac{du_{k-1}}{dt} + \left(2C_s + C_g\right)\frac{du_k}{dt} - C_s\frac{du_{k+1}}{dt} \quad \text{(III.11).}$$

III.10.3. Représentation matricielle des équations du modèle :

Après avoir établi les équations régissant le schéma équivalent d'une phase du transformateur, et après l'intégration des équations (III.4) et (III.11) on obtient :

$$\int_0^t \left(u_k - u_{k+1}\right)dt = \sum_{j=1}^{2n} M_{kj} i_j + R_k \int_0^t i_k dt \quad \text{(III.12).}$$

Pour les courants :

$$\int_0^t \left(i_k - i_{k+1}\right)dt = C_s u_{k-1} + \left(2C_s + c_g\right)u_k - C_s u_{k+1} \quad \text{(III.13).}$$

Les deux équations ainsi obtenues peuvent se mettre sous la forme condensée suivante :

$$U = C^{-1}\int_0^t \Delta I dt \quad \text{(III.14).}$$

$$I = L^{-1}\int_0^t (\Delta U - RI)dt \quad \text{(III.15).}$$

Dont :

$$\Delta I = \left(I_k - I_{k+1}\right) \text{et} \Delta U = \left(U_k - U_{k+1}\right) \quad \text{(III.16).}$$

U et I sont les vecteurs des tensions et des courants :

$$U \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \quad \text{et} \quad I \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \qquad \text{(III.17).}$$

[C] et [L] sont respectivement les matrices des capacités et des inductances des enroulements.

$$C \begin{matrix} C_g & C_{g1}/2 & C_s & \dots & \dots & 0 \\ C_s & 2C_s & C_{g2} & & & \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \\ 0 & 0 & & \dots\dots & 2C_s & C_{gN} \end{matrix} \qquad \text{(III.18).}$$

$$L \begin{matrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{12} & L_2 & \dots & M_{1N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{1N} & M_{2N} & \dots & L_N \end{matrix} \qquad \text{(III.19).}$$

III.11. Caractéristiques électriques et géométriques de l'enroulement étudié :

Dans le cadre de cette étude, on s'est intéressé à un enroulement d'un transformateur étudié par K. Ragavan et L. Satish [38]. L'enroulement étudier comporte 10 disques, chaque disque contient 20 tours de diamètre moyen 200 mm.

La capacité au sol (, 5.6 nF) a été mesurée par un pont de tension résiduelle à 1kHz, alors que la résistance ($_k$ = 8Ω) a été mesuré par un multimètre numérique, et l'inductance équivalant mesuré est égale 6.98mH.

L'algorithme d'identification conçu par les auteurs a convergé pour un nombre de cellule de discrétisation égale à (06) et une constante de distribution initiale de tension α égale à 7.4833.

III.12. Synthétise du circuit de référence :

Les mesures des inductances propres et mutuelles sont données par [38].sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau (III.1) : L'inductance propre et mutuelle de référence, Les valeurs en mH [38].

0.4310	0.2392	0.1435	0.0947	0.0612	0.0496

Les valeurs mesurées des inductances propres, mutuelles, les résistances et les capacités shunt- série, sont représentées dans le schéma de référence [38]:

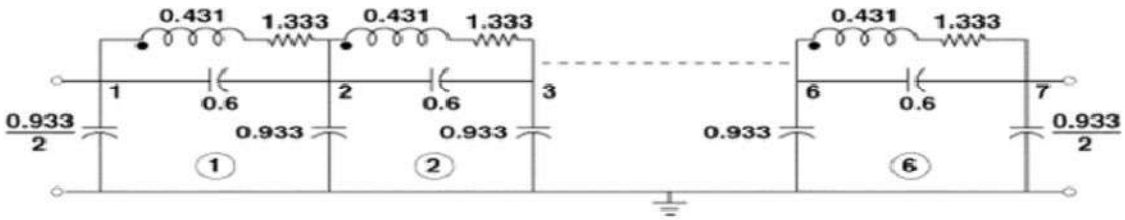


Figure (III.5) : Schéma de référence [38].

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence est illustrée dans la fig. (III.6).

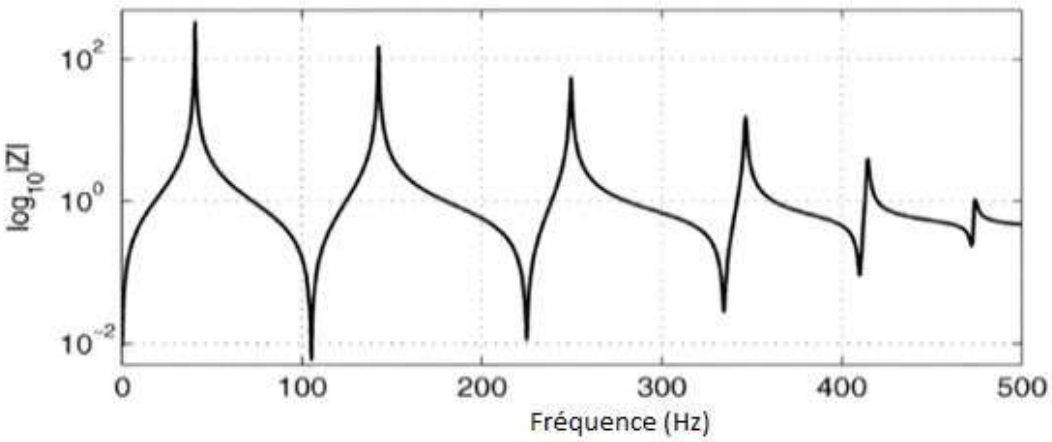


Figure (III.6) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence [38].

Les fréquences normale en circuit ouvert (Ocnf) et celles en court-circuit (Scnf) sont illustrées dans le tableau (III.2).

Tableau (III.2) : Fréquences normale en circuit ouvert (Ocnf) et celles en court-circuit (Scnf) [38].

Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.3	105
143	223
250.6	336
346	-

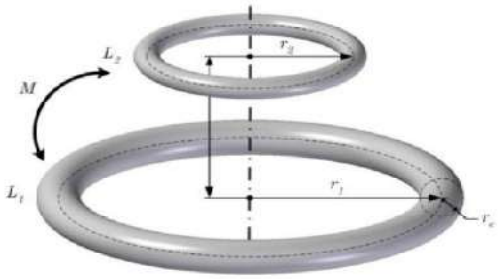
III.13. Calcul des paramètres du modèle adopté :

III.13.1. Détermination analytique des paramètres du schéma équivalent :

- ***Calcul les inductances propres et mutuelles :***

Le calcul des inductances propres et mutuelles d'un enroulement quelconque représente schématiquement par 02 spires de rayon respectivement, la distance entre ces 2spirest. La formule III.20 dite de Newman nous permet de calcule les différentes inductances existent entre ces deux spires [32].

$$M_{1.2} = \frac{u_0}{4\pi} \iint \frac{dl_1 dl_2}{r} \qquad \text{(III.20).}$$



Figure(III.7) : Calcul des inductances propres et mutuelles [32].

, : Longueur de spire, , : rayon, : mutuelle, u_0 : perméabilité.

$u_0 = 4\pi.10^{-7} H/m$

Pour notre cas l'enroulement est discrétisé en 6 éléments, d'après la formule III.20, les valeurs des inductances propres et mutuelles sont regroupées dans le tableau (III.3) :

Tableau (III.3) : L'inductance propre et mutuelle calculées, Les valeurs en mH [32].

0.4407	0.2203	0.1469	0.1102	0.0881	0.0734

L'inductance totale équivalente de l'enroulement s'écrit comme suit :

$$L_{eq}\left(calculé\right) = NL_i + 2\sum_{i=1}^{N-1}\left(N-1\right)M_{i,i+1} \qquad \text{(III.21).}$$

N étant le nombre d'élément de discrétisation (N=6).

Donc $L_{eq} = 7.18\,[\text{mH}]$.

- ***Calcul des capacités shunt , séries et la capacité équivalente :***

Les capacités shunt et séries , qui sont déterminées à partir de la valeur de la capacité au sol mesurée et les valeurs de nombre d'éléments et de la constante de distribution initiale de la tension déduite par l'algorithme d'identification [38].

$$C_g = \frac{C_{g,eff}}{N} = 0.9333\,[\quad] \qquad \text{(III.22).}$$

$$C_s = \frac{NC_{g,eff}}{\alpha^2} = 0.6\,[\quad] \qquad \text{(III.23).}$$

$$C_{eq} = \frac{C_g}{2} + \frac{1}{\dfrac{1}{C_s} + \dfrac{1}{C_g + \dfrac{1}{\dfrac{1}{C_s} + ...}}} = 0.8829\,[\quad] \qquad \text{(III.24).}$$

- ***Calcul de la résistance r :***

Les résistances , sont déterminées à partir de la valeur de la résistance mesurée et les valeurs de nombre d'éléments de discrétisation, déduite par identification

$$r = \frac{R_{dc}}{N}[\Omega] \qquad \text{(III.25).}$$

: Résistance mesure au continue.

Le schéma suivant représente l'enroulement du transformateur dont les paramètres sont calculés par la méthode présentée ci-dessus :

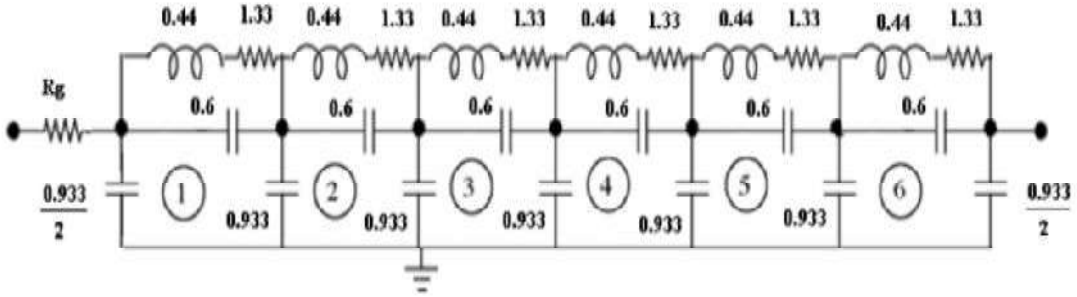
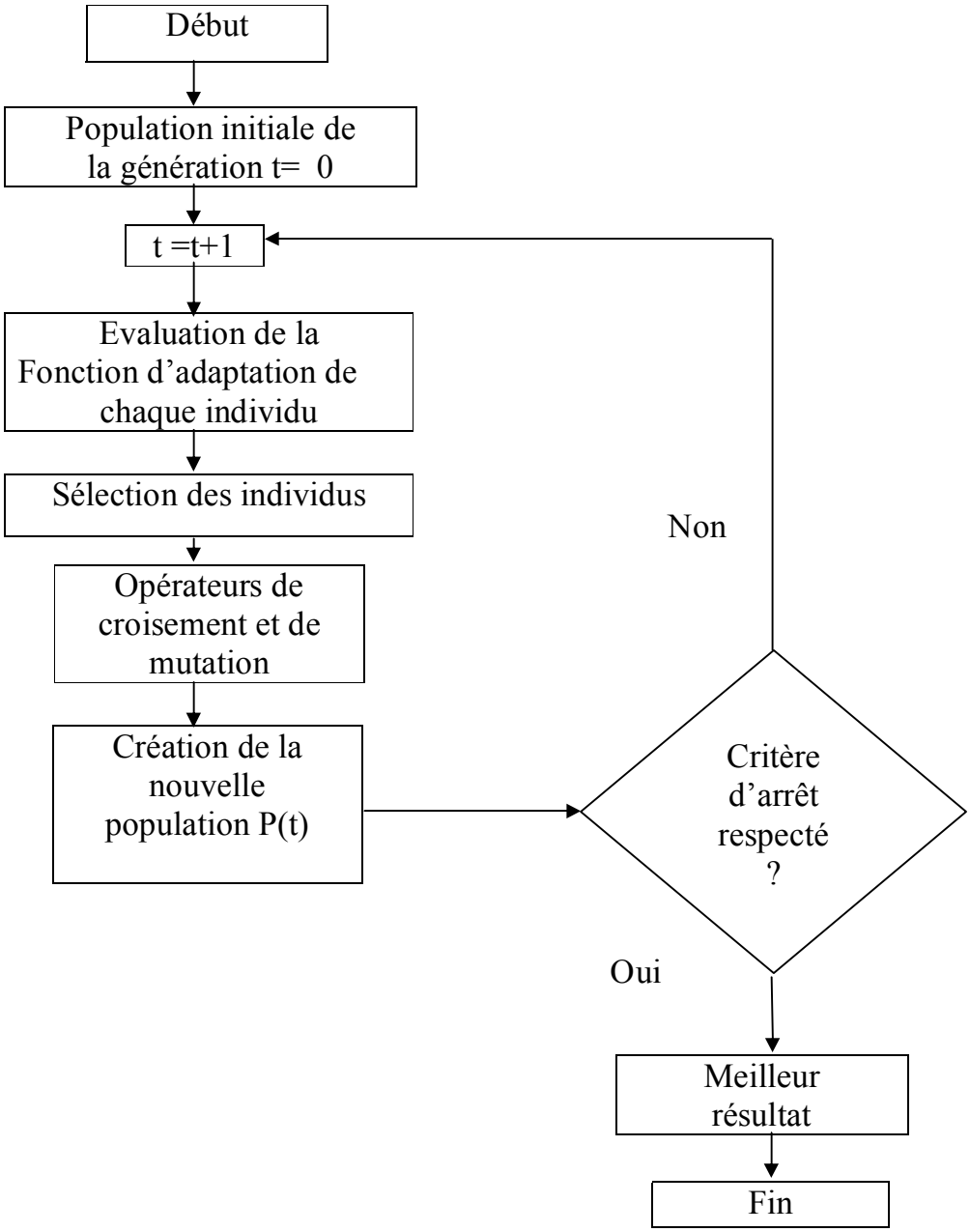


Figure (III.8) : Schéma de l'enroulement obtenu par calcul [30].

III.14. Calcul des paramètres par les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques sont classés dans la famille des algorithmes méthaheuristiques. Ils ont pour but, l'obtention d'une solution convenable dans un temps acceptable.

L'organigramme suivant représente les différents étapes suives dans un code des AG [39].



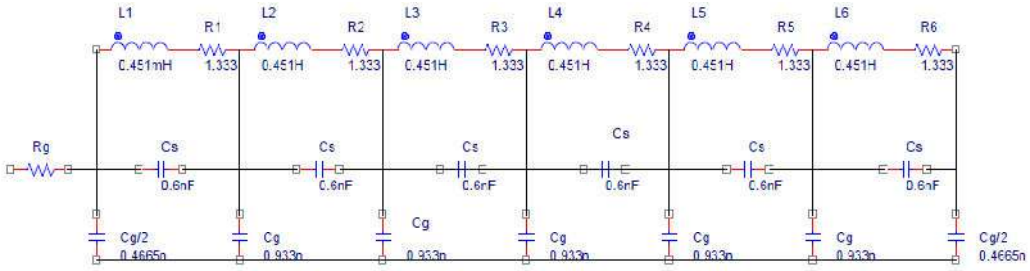
Figure(III.9): L'organigramme des algorithmes génétiques [39].

Apres avoir utilisé l'algorithme génétique, les valeurs des inductances propres et les mutuelles obtenues sont regroupées dans le tableau(III.4) :

Tableau (III.4) : L'inductance propre et mutuelle obtenir par AG, Les valeurs en mH [39].

0.451	0.243	0.154	0.114	0.088	0.079

Le schéma suivant représente l'enroulement du transformateur dont les paramètres sont identifiés en utilisant les AG :



Figure(III.10) : Schéma de l'enroulement identifié par l'algorithme génétique [39].

III.15. Validation du modèle proposé :

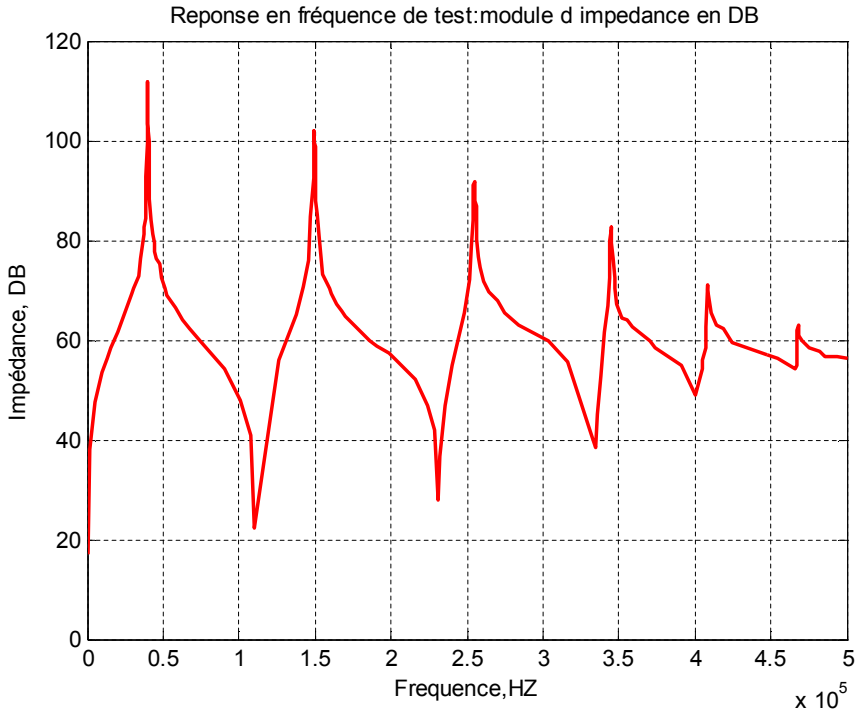
Le modèle proposé est basé sur des mesures obtenues dans les transformateurs électriques dans les stations ou par les fabricants.

La technique 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 et les admittances sont évaluées en fonction de la fréquence générée par le modèle d'un ensemble équivalent de résistances, des condensateurs et des inductances. Chacun de ces sommets est associée à une cellule correspondante RLC et la fréquence à laquelle se produisent ces pics.

Pour le modèle ils ne seront considérées que les pulsations de résonance qui présentent des valeurs de demi-puissance inferieures et de demi puissance supérieures significatives.

Ainsi, le balayage de fréquence, de nombreuses cellules peuvent évoluer avec le circuit RLC parallèle. Les données obtenues vérifier l'ajustement du modèle proposé par rapport aux valeurs réelles mesurées et rend ainsi possible le stockage des données et des simulations.

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence obtenue par la méthode de l'algorithme génétique (AG) est illustrée dans la figure (III.11).



Figure(III.11) : Réponse en fréquence obtenu par L'AG [39].

L'organigramme suivant représente les différentes étapes utilisées pour déterminer les paramètres du schéma équivalent d'un enroulement de transformateurs.

Tableau(III.5) : Cellules RLC analysées pour l'enroulement étudié.

Cellules	Fréquence de résonance , rad/s	Resistance en (Ohm)	Inductance (Henry)	Capacité (Farad)
1	251900	390410	10.09 10	1.56 10
2	940100	127280	0.588 10	1.92 10
3	1604000	39230	0.137 10	2.82 10
4	2168600	13680	28.69 10	7.41 10
5	2565900	3560	10.5 10	14.47 10
6	2939000	1420	3.646 10	31.65 10

Afin de valider le modèle proposé on a comparé les fréquences de coupure obtenues par les deux méthodes utilisées à savoir : modèle à paramètre calcul analytique et modèle à paramètre calcul par L'AG. L'ensemble de ces résultats sont comparés à ceux obtenues par la mesure [38].

Tableau (III.6) : La comparaison des fréquences normale en circuit ouvert (Ocnf) et celles en court-circuit (Scnf) de la mesure, de modèle calculé et de L'AG.

Les valeurs mesurées		Les valeurs calculées		Les valeurs de l'AG		Erreur*
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)	Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)	Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)	
40.48	105.19	40.087	110.408	39.903	109.144	
142.58	224.79	149.624	230.675	149.194	229.435	
249.42	334.44	255.27	334.195	253.226	333.065	<5%
346.41	410.09	345.144	404.675	344.350	403.629	
414.34	472.42	408.319	465.586	408.468	454.589	

On remarque que d'après les comparaisons effectuées que l'erreur n'excède pas 5% par rapport à la mesure.

III.16. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis en relief une méthode récente et efficace pour la détection et la localisation des défauts dans un enroulement du transformateur. Cette méthode est basée sur l'étude de la réponse en fréquence de l'enroulement à diagnostique.

Nous avons également présenté le modèle du transformateur qui permet l'analyse en fréquence de l'enroulement. Ce modèle est composé de cascade de cellule RLC, traduisant le comportement électromagnétique du transformateur.

Chapitre IV

Diagnostic et localisation des défauts dans enroulement du transformateur de puissance par réseaux de neurones

IV.1. Introduction :

L'objectif principal de ce chapitre est de présent l'application des réseaux de neurones dans le diagnostic et la localisation des défauts dans les transformateurs.

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 seront donnés, 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 pour une éventuel diagnostique des différents défauts obtenues par l'analyse de la réponse en fréquence (FRA).

IV.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). Nous parlons de la 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.

IV.3. Quelques domaines d'applications :

Les Réseaux de Neurones Artificiels (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 [40].

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 d'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.

IV.4. Le neurone artificiel :

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

IV.4.1. Le neurone biologique :

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 IV.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.

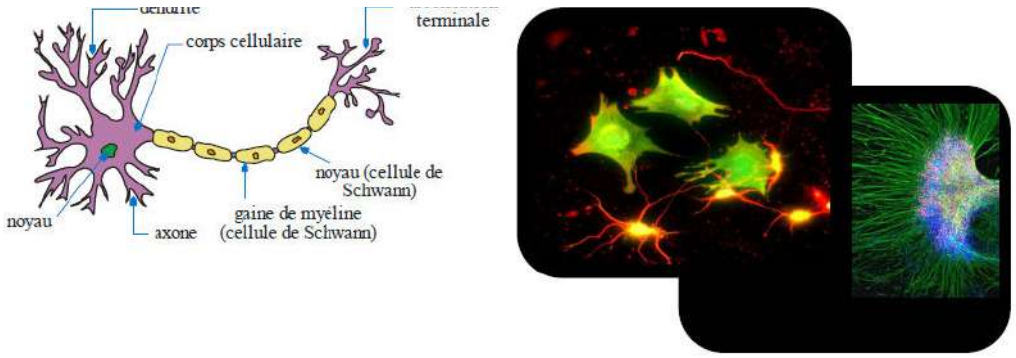


Figure (IV.1) : Le neurone biologique [41].

IV.4.2. Le neurone formel :

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 IV.2) [42] :

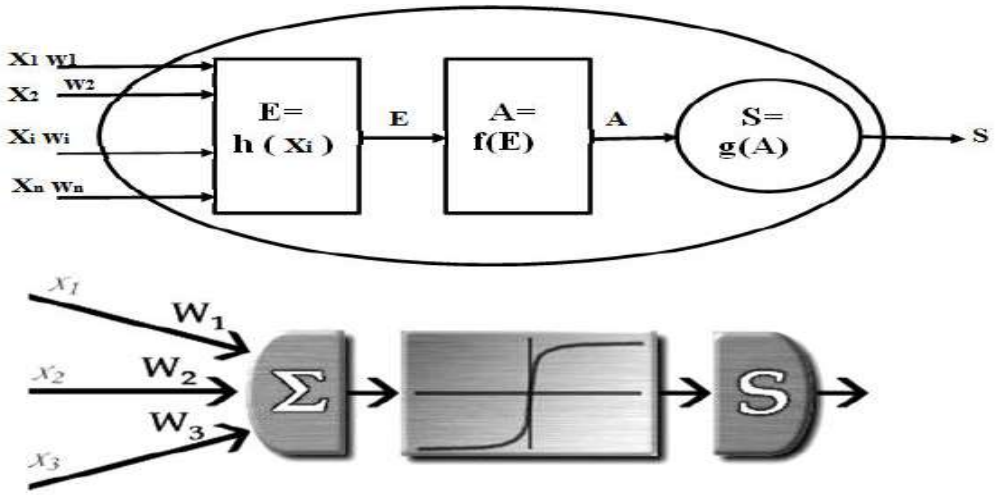


Figure (IV.2) : Neurone Formel.

- ***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 (Figure IV.3) sur l'axe (s). 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 ;

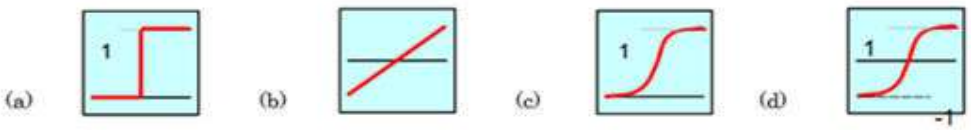
b. linéaire : $E = h\left(e_1..e_n\right) = \sum_{i=1}^{n} W_i e_i$; (IV.1).

c. affine : $E = h\left(e_1..e_n\right) = \sum_{i=1}^{n} W_i e_i - a$; (IV.2).

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 IV.3).[42].



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

Figure(IV.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.

IV.5. Différents types de réseaux de neurones :

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 multicouche, 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 multicouche 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 [40].

IV.6. Les principaux composants des réseaux de neurones artificiels :

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 ;
- 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.

IV.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 :***

Chaque neurone a tous les bouclages possibles. Il est relié à tous les autres neurones et possède un retour sur lui-même (Figure IV.4).

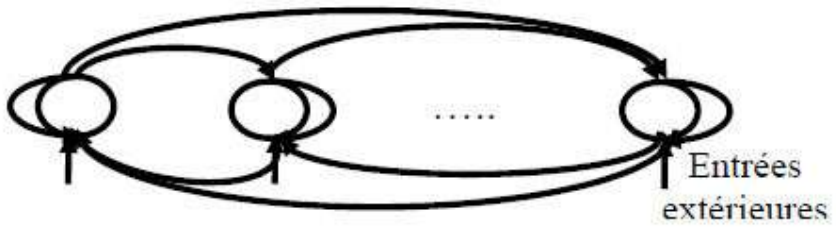


Figure (IV.4) : Architecture générale d'un réseau entièrement connecté [44].

- ***Les réseaux en MLP :***

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 IV.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) [44].

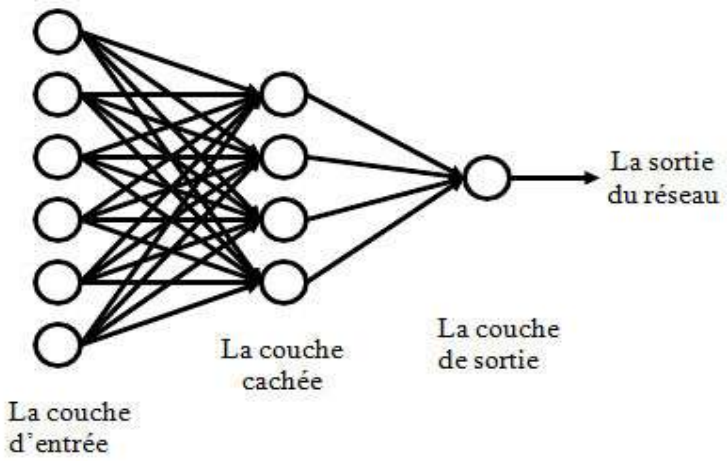


Figure (IV.5) : Architecture générale d'un réseau multicouche.

IV.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 [44].

IV.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 :***

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 (IV.6)) [45].

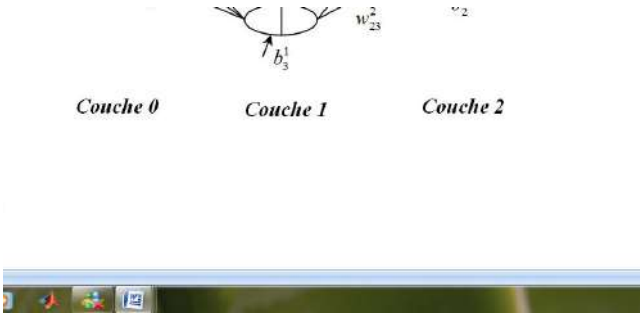


Figure (IV.6) : Perceptron à une couche cachée.

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 :

$$\begin{aligned} U_i^l &= \sum_j^{N_{l-1}} w_{ij}^l \times O_j^{l-1} + b_i^l \\ O_i^l &= \mathsf{g}^l\left(U_i^l\right) \end{aligned} \qquad l = 1, 2 \qquad \text{(IV.3).}$$

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

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

$$\begin{aligned} \boldsymbol{U}^l &= \boldsymbol{w}^l \times \boldsymbol{O}^{l-1} + \boldsymbol{b}^l \\ \boldsymbol{O}^l &= \mathbf{g}^l\left(\boldsymbol{U}^l\right) \end{aligned} \qquad \text{(IV.4).}$$

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 dans [45] 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 :

$$J(t) = 0.5 \times \sum_{i=1}^{N_L} \left(O_i^L(t) - d_i(t) \right)^2 \qquad \text{(IV.5).}$$

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:

$$w_{ij}^l(t+1) = w_{ij}^l(t) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} \qquad \text{(IV.6).}$$

$$b_i^l(t+1) = b_i^l(t) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial b_i^l(t)} \qquad \text{(IV.7).}$$

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:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} = \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^l(t)} \times \frac{\partial U_i^l(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} \qquad \text{(IV.8).}$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial b_i^l(t)} = \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^l(t)} \times \frac{\partial U_i^l(t)}{\partial b_i^l(t)} \qquad \text{(IV.9).}$$

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

$$\frac{\partial U_i^l(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} = O_j^{l-1} \tag{IV.10}.$$

$$\frac{\partial U_i^l(t)}{\partial b_i^l(t)} = 1 \tag{IV.11}.$$

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

$$\frac{\partial J(t)}{\partial w_{ij}^l(t)} = \alpha_i^l(t) \times O_j^{l-1} \tag{IV.12}.$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial b_i^l(t)} = \alpha_i^l(t) \tag{IV.13}.$$

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 :

$$\alpha_i^L(t) = \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^L} = \frac{\partial J(t)}{\partial O_i^L} \times \frac{\partial O_i^L}{\partial U_i^L} = \left(O_i^L(t) - d_i(t)\right) \times \dot{g}^L\left(U_i^L(t)\right) \tag{IV.14}.$$

Avec

$$\dot{g}^L\left(U_i^L(t)\right) = \frac{dg^L\left(U_i^L(t)\right)}{dU_i^L(t)} \tag{IV.15}.$$

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 [46].

$$\alpha^l = \dot{G}^l\left(\boldsymbol{U}^l\right) \times \left(\boldsymbol{w}^{l+1}\right)^T \times \alpha^{l+1} \tag{IV.16}.$$

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 (IV.14) et (IV.16). Finalement nous modifions les poids et les biais en utilisant les équations (IV.12), (IV.13), (IV.6) et (IV.7).

IV.8. Localisation des défauts le long de l'enroulement par test FRA :

La réponse en fréquence d'un transformateur est très sensible à la géométrie d'enroulement, la distribution des capacités et des inductances d'enroulement.

Tout changement physique de l'enroulement ou une partie de ce dernier induit une modification de sa réponse en fréquence. La détection de tout écart ou décalage vers la gauche ou vers la droite des fréquences de coupures comparativement à la signature d'un enroulement sain implique d'une apparition du défaut dans l'enroulement.

L'objectif de cette étude et de détecter et localiser le défaut à l'intérieure de l'enroulement, afin de construire la base données qui nous permettra de détecté automatique un défaut en utilisant un R.N.A.

IV.9. Simulation les différents défauts étudiés :

Apres avoir validé le modèle adopté nous allons l'exploiter pour une étude de diagnostic de l'enroulement du transformateur. Pour étudier les différentes défaillances de l'enroulement avec la technique d'analyse fréquentielle, nous avons 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 :

- Court-circuit entre les spires ou élément.
- Déformation propres de l'enroulement.
- Défaut entre partie active et la masse.
- Ouverture d'une partie de l'enroulement.

L'enroulement étudié est celui présente au paragraphe III.6, étudié par [38].

La figure suivante présente le principe adopté pour construire la base de données pour la détection et la localisation du défaut dans un enroulement de transformateur.

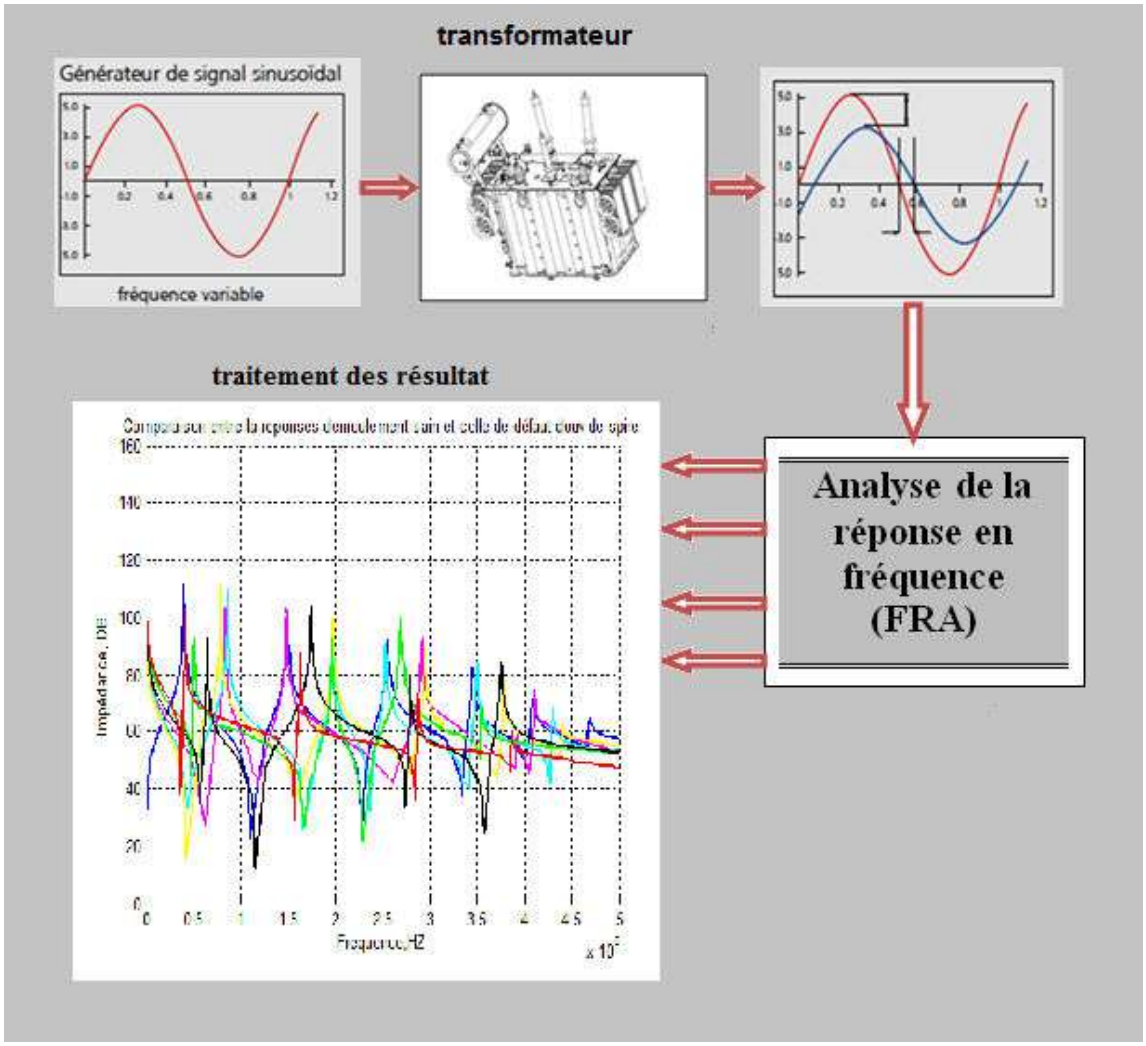
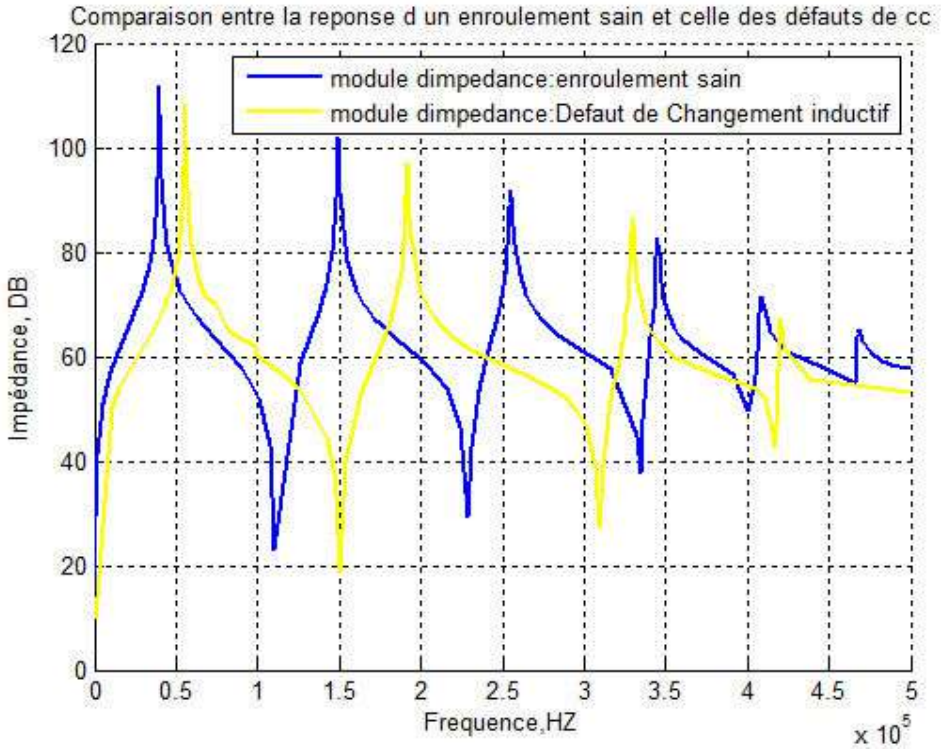


Figure (IV.7) : Schéma de la réponse en fréquence (FRA).

IV.9.1. Court-circuit entre spires :

- **Les changements inductifs aux fins de ligne**

Cet exemple se rapporte à un état dans lequel l'inductance est modifiée principalement. La figure suivante représente la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement présentant un défaut obtenu en court-circuitant les tours ultrapériphériques des éléments 5 et 6. L'inductance de cet élément a été diminuée de 400 H tandis que les capacités sont restées inchangées. La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.8) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit dans les deux éléments 5 et 6 et un enroulement sain.

Les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.1).

Tableau(IV.1): Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit dans les deux éléments 5 et 6 et un enroulement sain.

enroulement sain		enroulement a un changement inductif dans les éléments 5et 6		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	56	150.079	15.89	39.458
149.69	231.815	191.974	309.506	42.284	77.691
255.41	334.363	330.541	417.102	75.131	82.739
345.318	400.175	420.589	_	75.271	_
408.582	465.748	_	_	_	_
467.99	_	_	_	_	_

Interprétation des résultats :

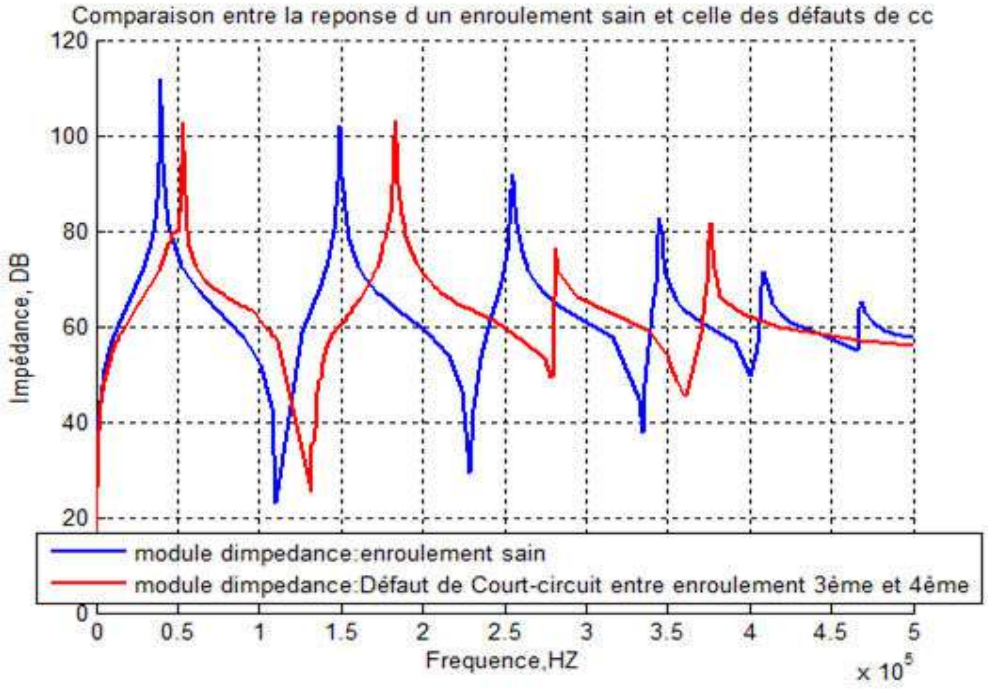
A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et celle d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit dans les deux éléments 5 et 6 nous avons observés un déplacement des fréquences (Ocnf) et de (Scnf) d'environ 50et65khz respectivement. La déformation de l'impédance commence à apparaitre à partir de 3 kHz.

Dans le but de localiser le point de défaut de court-circuit dans les différents éléments de la bobine. Nous avons simulé le déplacement du point de court-circuit.

On remarque également après l'application du défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de deux dernières cellules observées dans le cas d'un enroulement sain.Ces deux fréquences sont d'ordre supérieur à 400khz.

- **Court-circuit entre le 3^{ieme} et le 4^{ieme} éléments :**

Dans cette exemple, on monte une résistance très petite on parallèle avec la résistance et l'inductance entre le 3^{ieme} et le 4^{ieme} éléments et les autres éléments sont restées inchangées. La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.9) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 3^{ieme} et le 4^{ieme} élément et un enroulement sain.

Les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.2).

Tableau (IV.2) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 3^{ieme} et le 4^{ieme} élément un enroulement sain.

enroulement sain		Enroulement en c-circuit entre le 3^{ieme} et le 4^{ieme} élément		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	53.471	131.624	13.361	21.003
149.69	231.815	183.742	278.805	34.052	46.99
255.41	334.363	281.99	361.592	26.58	27.229
345.318	400.175	376.847	_	31.529	_
408.582	465.748	_	_	_	_
467.99	_	_	_	_	_

Interprétation des résultats :

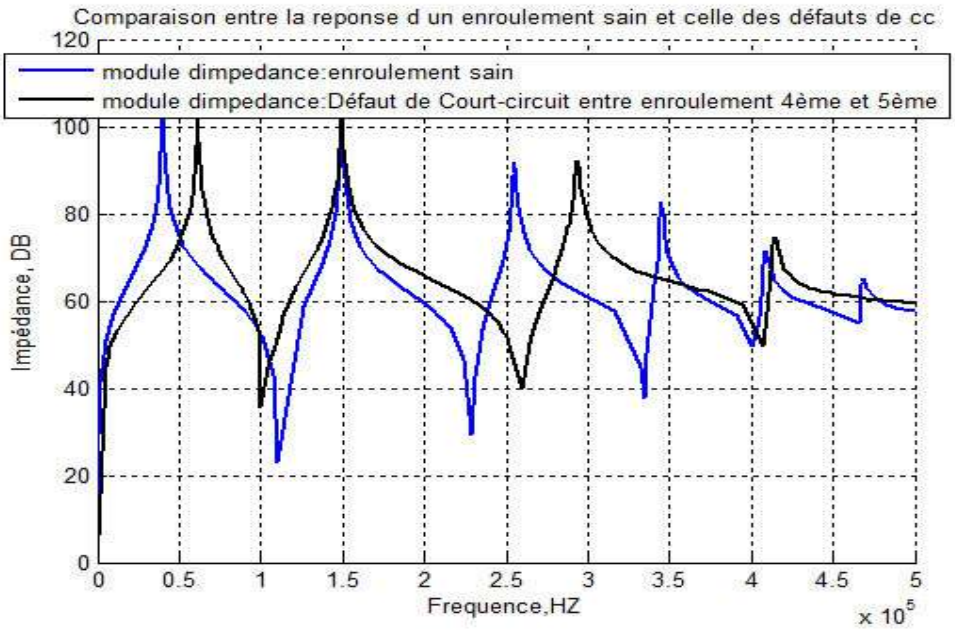
A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un court-circuit entres les éléments voisins 3 et 4, nous avons observés un déplacement des fréquences (Ocnf) et de (Scnf) d'environ 25 et 30khz respectivement. La déformation de l'impédance commence à apparaitre à partir de 15khz.

Dans le but de localiser le point de défaut de court-circuit entre élément adjacent nous avons simulé le déplacement du point de court-circuit.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de deux dernières cellules observées dans le cas d'un enroulement sain.Ces deux fréquences sont d'ordre supérieur à 370khz.

- **Court-circuit entre le 4^{ieme} et le 5^{ieme} éléments :**

Dans cette exemple, on monte une résistance très petite on parallèle avec la résistance et l'inductance entre le 4^{ieme} et le 5^{ieme} éléments et les autres éléments sont restées inchangées. La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.10) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 4^{ieme} et le 5^{ieme} éléments et un enroulement sain.

Les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements sont présentés dans le Tableau (IV.3).

Tableau (IV.3) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 4^{ieme} et le 5^{ieme} éléments et un enroulement sain.

enroulement sain		Enroulement en c-circuit entre le 4^{ieme} et le 5^{ieme} éléments		Décalage	
Ocnf (kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	61.544	100.175	21.434	10.446
149.69	231.815	149.697	259.856	0.007	28.041
255.41	334.363	293.646	407.595	38.236	73.232
345.318	400.175	414.203	_	68.885	_
408.582	465.748	_	_	_	_
467.99	_	_	_	_	_

Interprétation des résultats :

A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et celle d'un enroulement présentant un court-circuit entres les 2 éléments voisins 4 et 5, nous avons observés un déplacement des fréquences (Ocnf) et de (Scnf) d'environ 30 et 40khz respectivement. La déformation de l'impédance commence à apparaitre à partir de 10khz.

Dans le but de localiser le point de défaut de court-circuit entre élément adjacent, nous avons simulé le déplacement du point de court-circuit.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de deux dernières cellules observées dans le cas d'un enroulement sain.Ces deux fréquences sont d'ordre supérieur à 410khz.

- **Comparaison entre les défauts de court-circuit et un enroulement sain :**

La figure suivante représente les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit.

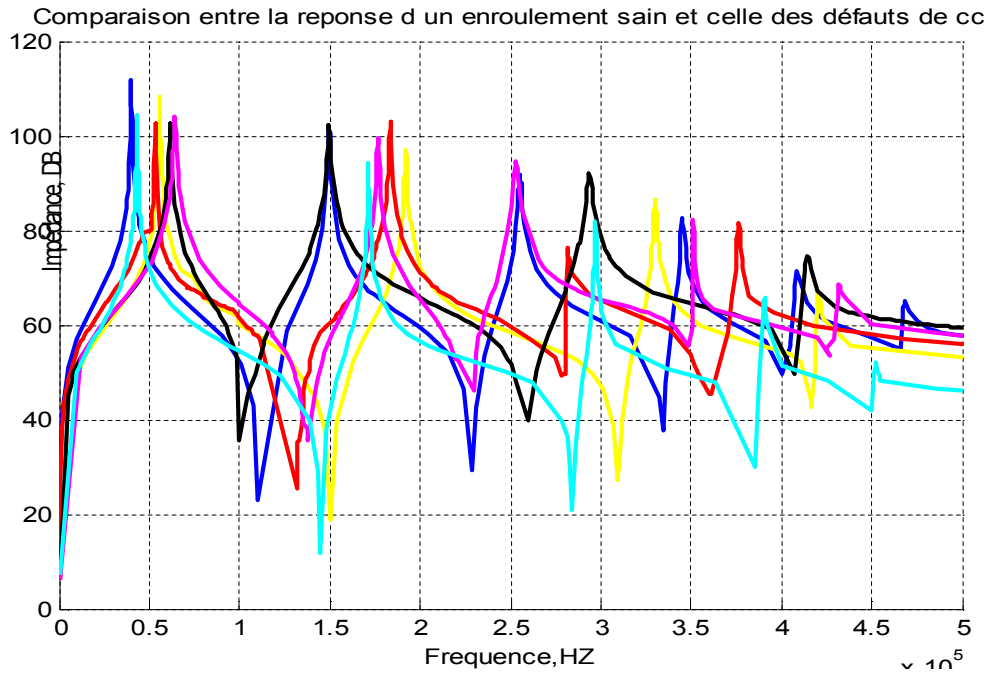


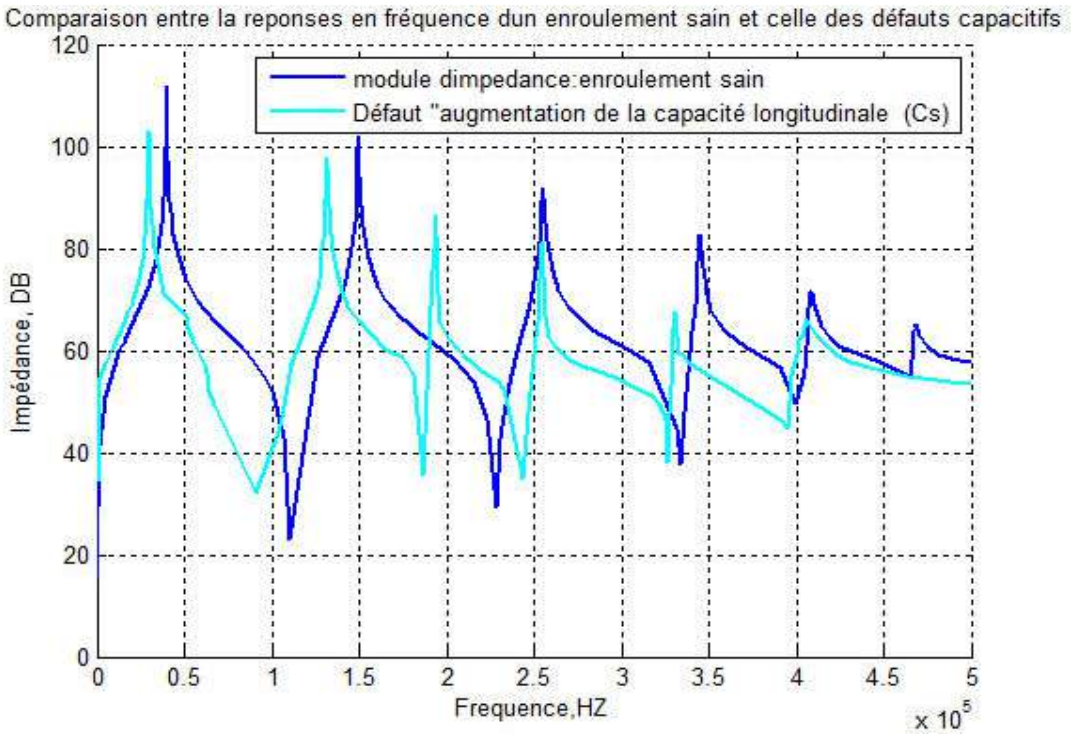
Figure (IV .11): Les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit entre élément et spires et celle de l'enroulement sain.

- Enroulement sain
- Enroulement en c-circuit (1-2)
- Changement inductif
- Enroulement en c-circuit (3-4)
- Enroulement en c-circuit (4-5)
- Enroulement c-circuit (5-6)

IV.9.2. Les changements capacitifs :

- **Augmentation de la capacité série ( ) (dégradation de l'isolant) :**

Dans cet exemple, les changements capacitifs sont introduits dans le modèle de bobine. Par exemple, les capacités séries ( ) sont augmentés de 0.6 à 1,2 et les autres paramètres sont restées inchangées. La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.12) : Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité longitudinale (Cs).

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

Tableau (IV.4) : Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité longitudinale (Cs).

enroulement sain		enroulement en augmentation des capacités (Cs)		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	29.88	90.98	10.23	19.64
149.69	231.815	132.03	187.18	17.66	44.63
255.41	334.363	193.98	243.94	61.43	90.42
345.318	400.175	255.12	326.56	90.19	73.61
408.582	465.748	330.450	395.2	78.13	70.54
467.99	_	405.73	_	62.26	_

Interprétation des résultats :

D'après la signature de l'impédance de l'enroulement qui a une variation de la capacité longitudinale en remarque que les Ocnfs et Scnfs se décalent vers la gauche d'environ 55 kHz.

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

Dans cet exemple, les changements capacitifs sont introduits dans le modèle de la bobine. Par exemple, les capacités shunts ( ) sont augmentés de 0.933 à 2 et les autres paramètres sont restées inchangées. La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.

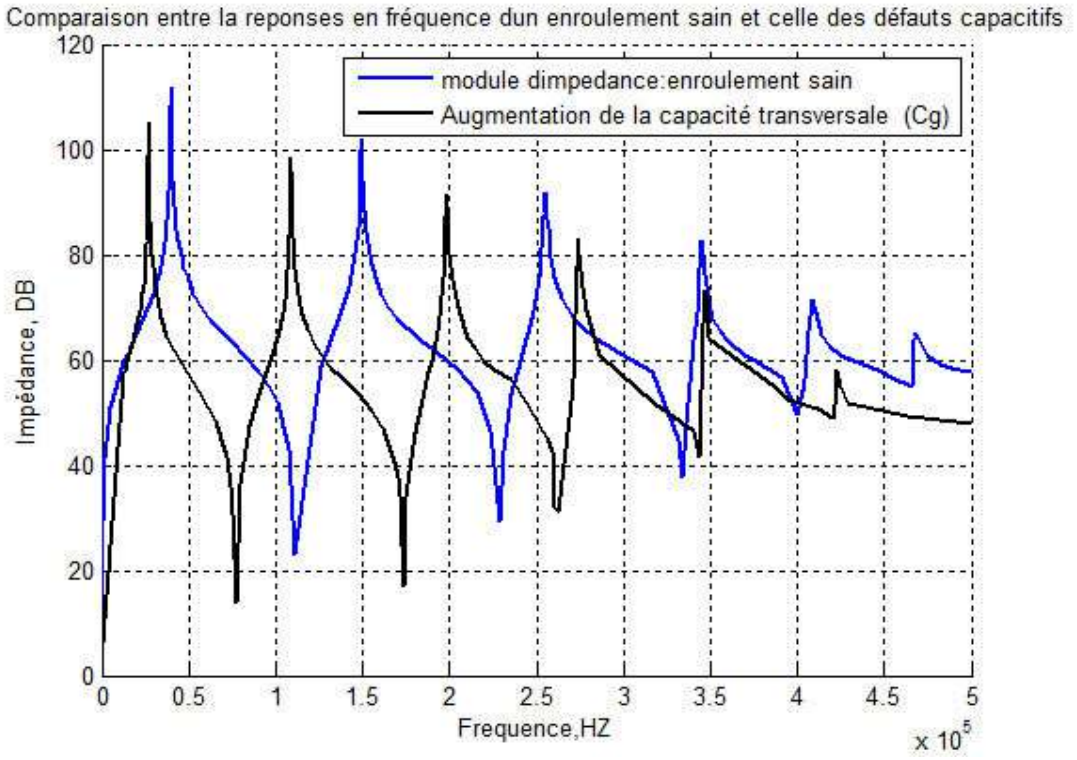


Figure (IV.13): Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité transversale (Cg)**.**

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

Tableau(IV.5): Comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et celle d'une augmentation de capacité transversale (Cg).

enroulement sain		enroulement en défaut d'augmentation de		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	27.245	77.149	12.865	33.472
149.69	231.815	109.187	174.06	40.503	57.755
255.41	334.363	198.710	262.325	56.7	72.038
345.318	400.175	274.522	344.061	70.796	56.114
408.582	465.748	347.468	420.876	61.114	12.294
467.99	_	422.898	_	45.092	_

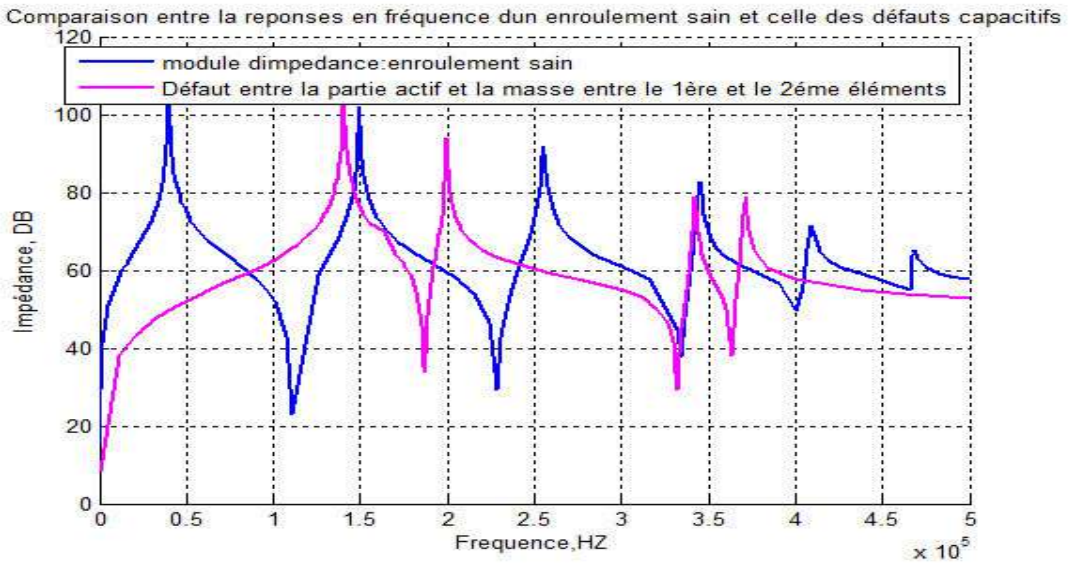
Interprétation des résultats :

D'après la signature de l'impédance de l'enroulement qui a une variation de la capacité transversale en remarque que les Ocnf et Scnf se décalent vers la gauche d'environ 50KHZ.

IV.9.3. Défauts entre la partie active et la masse :

- **Diminution de la capacité Cg (défaut entre la partie actif et la masse entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments) :**

Dans cet exemple, on monte une résistance très petit en parallèle avec la capacité shunt entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments et les autres éléments sont restés inchangées. Les résultats suivants ont été obtenus et comparé avec celle d'un enroulement sain. La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.14) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut entre la partie actif et la masse entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments et un enroulement sain.

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

Tableau (IV.6) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut entre la partie actif et la masse entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments et un enroulement sain.

enroulement sain		enroulement présentant un défaut entre la partie actif et la masse entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	135.27	144.585	95.16	33.964
149.69	231.815	248.439	284.601	98.749	52.786
255.41	334.363	307.054	385.78	51.641	51.417
345.318	400.175	389.235	450.015	43.917	49.84
408.582	465.748	452.085	_	43.503	_
467.99	_	_	_	_	_

Interprétation des résultats :

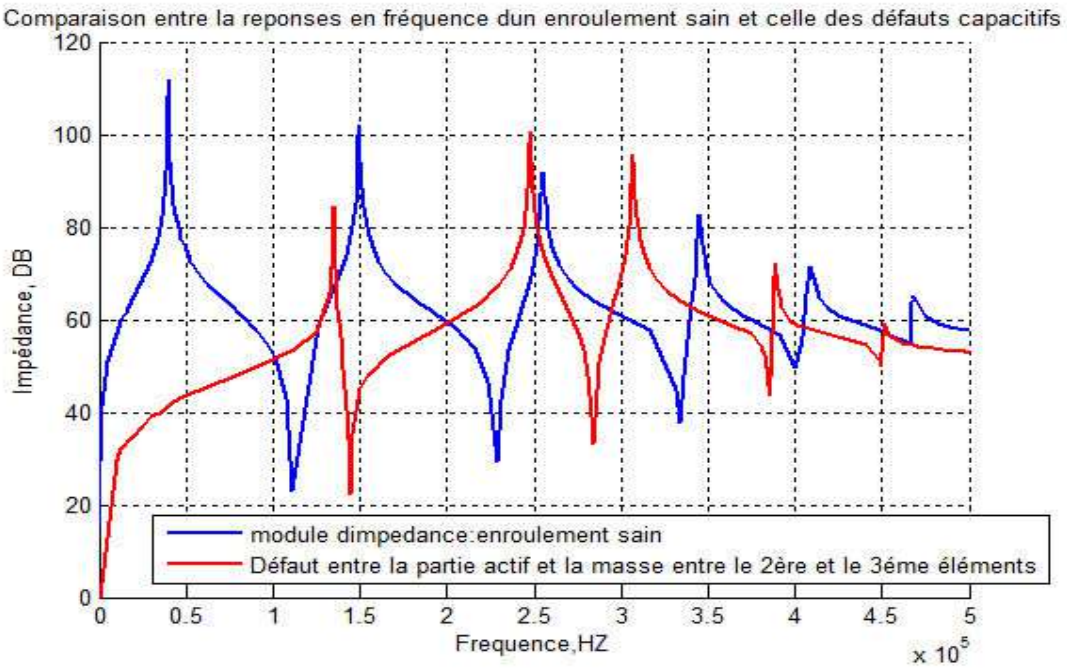
D'après la signature de l'impédance de l'enroulement (ou en a une diminution de la capacité transversale entre les éléments 1 et 2) on remarque que les Ocnf et Scnf se décalent vers la droite d'environ 65 et 50 kHz respectivement.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de la dernière cellule observées dans le cas d'un enroulement sain. Cette fréquence est de l'ordre supérieur à 450khz.

- **Diminution de la capacité Cg (défaut entre la partie actif et la masse entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments) :**

Dans cet exemple, on monte une résistance très petit en parallèle avec la capacité shunt entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments et les autres éléments sont restées inchangées.

La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.15) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de entre la partie actif et la masse entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments et un enroulement sain.

Les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.7).

Tableau (IV.7) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de entre la partie actif et la masse entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments et un enroulement sain.

enroulement sain		enroulement présentant un défaut de entre la partie actif et la masse entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	140.66	187.16	100.55	76.54
149.69	231.815	199.60	332.05	49.91	100.23
255.41	334.363	342.19	364.07	86.78	29.70
345.318	400.175	371.71	_	26.39	_
408.582	465.748	_	_	_	_
467.99	_	_	_	_	_

Interprétation des résultats :

D'après la signature de l'impédance de l'enroulement qui a une diminution de la capacité transversale entre les éléments 2 et 3 de la capacité transversale en remarque que les Ocnf et Scnf se décalent vers la droite d'environ 65 et 70 kHz respectivement.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de deux dernières cellules observées dans le cas d'un enroulement sain.ces deux fréquences est de l'ordre supérieur à 370khz.

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

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

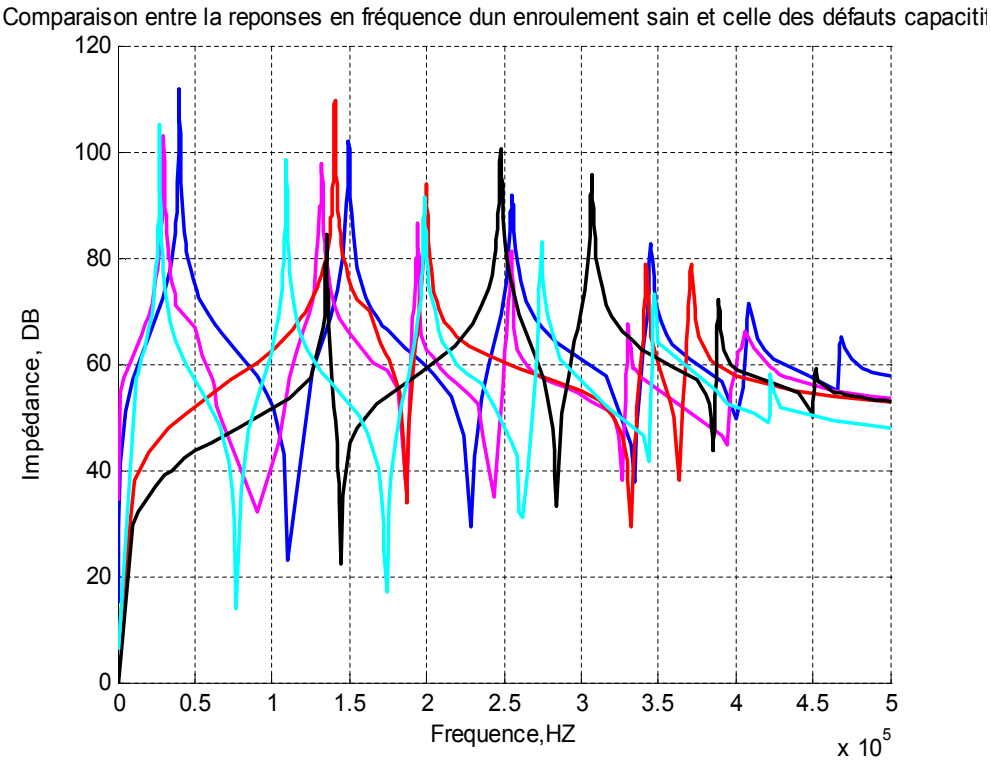


Figure (IV.16): Les différentes impédances pour différents changement capacitifs et celle de l'enroulement sain.

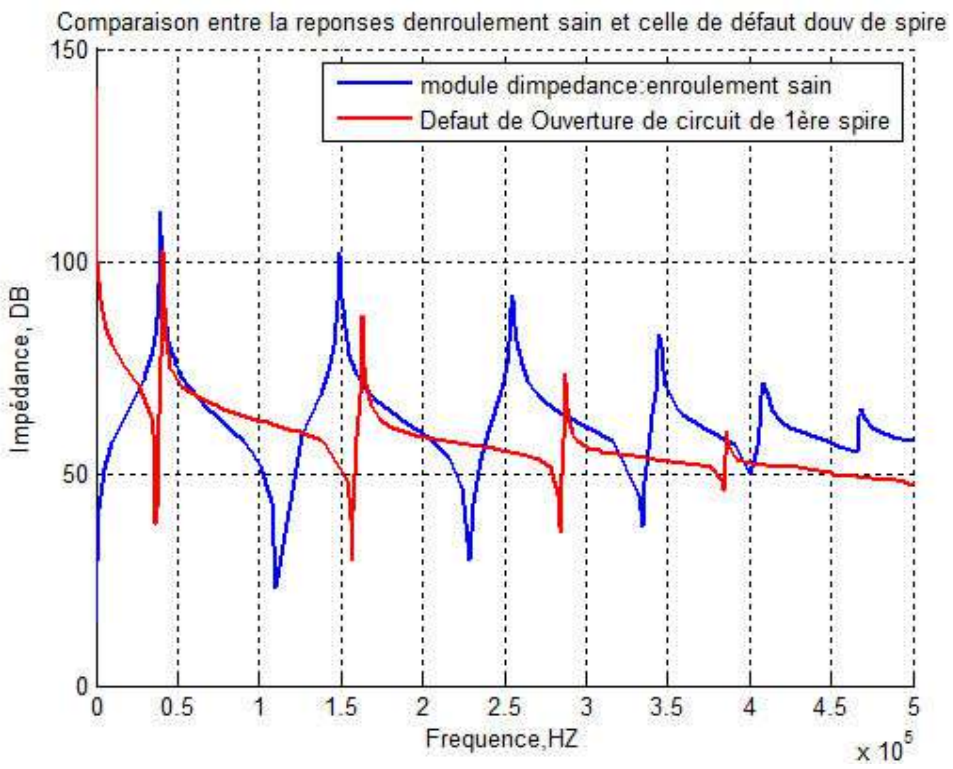
- Enroulement sain
- Augmentation de la capacité longitudinale ( ).
- Augmentation de la capacité transversale ( ).
- Défaut entre la partie actif et la masse entre le 1^{iere} et le 2^{ieme} éléments
- Défaut entre la partie actif et la masse entre le 2^{ieme} et le 3^{ieme} éléments

IV.9.4. Ouverture des spires :

- **Ouverture de la $1^{ière}$ spires :**

Dans cet exemple, la résistance dans le premier élément est augmentée à une valeur très grande et les autres paramètres restées inchangées.

La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.17) : Comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 1^{iere} élément et un enroulement sain**.**

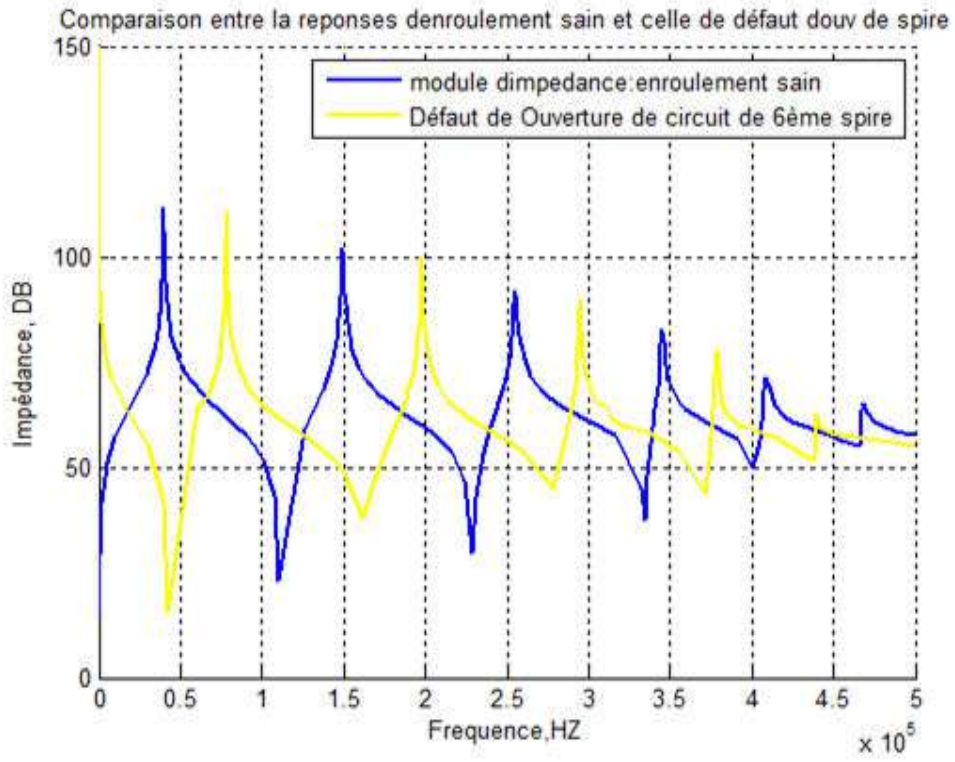
Les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.8).

Tableau(IV.8) : Comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 1^{iere} élément et un enroulement sain**.**

enroulement sain		enroulement en ouverture de spire au 1 ^{é} élément		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	0.0000	36.81	40.11	73.81
149.69	231.815	41.41	156.76	108.28	75.05
255.41	334.363	163.37	284.77	92.04	49.59
345.318	400.175	287.86	384.79	57.45	15.38
408.582	465.748	386.56	_	22.02	_
467.99	_	_	_	_	_

- **Ouverture de 6^{ième} spires :**

Dans cet exemple, la résistance dans le sixième élément est augmentée à une valeur très grande et les autres paramètres restées inchangées. La réponse $Z = F(f)$ est comparée à celle obtenue par un enroulement sain.



Figure(IV.18): Comparaison de la réponse en fréquence de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 6^{ieme} élément et un enroulement sain**.**

Les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.9).

Tableau(IV.9) : Comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 6^{ieme} élément et un enroulement sain**.**

enroulement sain		enroulement en ouverture de spire au 6^{é} élément		Décalage	
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.11	110.621	0	42.57	40.11	68.05
149.69	231.815	78.56	162.07	71.13	69.74
255.41	334.363	197.8	278.24	57.61	56.12
345.318	400.175	295.27	371.67	50.04	28.5
408.582	465.748	378.64	437.78	29.94	27.96
467.99	–	439.85	–	–	–

- **Comparaison entre les défauts d'ouverture des spires et un enroulement sain :**

La figure suivante représente les différentes impédances pour chacun des points de circuit ouvert.

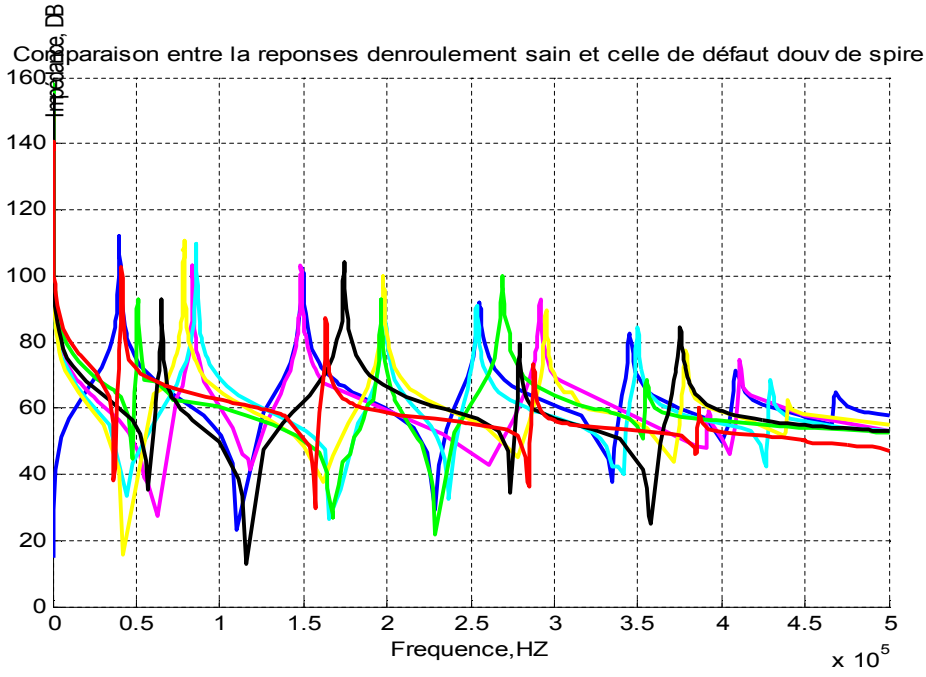


Figure (IV.19): Les différentes impédances pour chacun des points de circuit ouvert et celle de l'enroulement sain.

- Enroulement sain.
- Ouverture de 1è spire.
- Ouverture de 2è spire.
- Ouverture de 3è spire.
- Ouverture de 4è spire.
- Ouverture de 5è spire.
- Ouverture de 6è spire.

Interprétation des résultats :

Lorsque le défaut est une ouverture du circuit ou on a la coupure de spire de l'enroulement, la FRA nous indique l'apparition de pic de résonance Ocnf à 0Hz.

Les figures IV.17 et IV.18 représentent la comparaison entre Ocnf et Scnf des enroulements sains et présentent une ouverture au niveau du la 1 è et de la 6 è éléments respectivement. Ces figures montrent que les Ocnfs et Scnfs associée à l'enroulement défectueux se décalent vers la droite par rapport à celle d'un enroulement sain.

IV.10. Application de RNA pour le diagnostic et la localisation des défauts :

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) [47].

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.10.1. Entrées du réseau RNA :

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

- Transformateur enroulement sain
- Changements inductifs aux fins de ligne
- Court-circuit entre enroulement $1^{ère}$ et $2^{ème}$
- Court-circuit entre enroulement 3^{ieme} et 4^{ieme}
- Court-circuit entre enroulement 4^{ieme} et 5^{ieme}
- Court-circuit entre enroulement 5^{ieme} et 6^{ieme}
- Augmentation de la capacité longitudinale ( ) (dégradation de l'isolant)
- Augmentation de la capacité série ( )
- Augmentation de la capacité shunt ( ) (déplacement de l'enroulement)
- Diminution de la capacité Cg (défaut entre la partie actif et la masse entre enroulement 1^{iere} et 2^{ieme} éléments)
- Diminution de la capacité Cg (défaut entre la partie actif et la masse entre enroulement 2^{ieme} et 3^{ieme})
- Ouverture de la $1^{è}$ spire
- Ouverture de la $2^{è}$ spire
- Ouverture de la $3^{è}$ spire
- Ouverture de la $4^{è}$ spire
- Ouverture de la $5^{è}$ spire
- Ouverture de la $6^{è}$ spire

IV.10.2. 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, défaut entre partie active et la masse, ouverture d'une partie de l'enroulement ou le cas normal.

1°/ Court-circuit entre les spires ou élément :

- ✓ Défauts des changements inductifs aux fins de ligne
- ✓ Défaut de Court-circuit entre enroulement $1^{ère}$ et $2^{ème}$
- ✓ Défaut de Court-circuit entre enroulement 3^{ieme} et 4^{ieme}
- ✓ Défaut de Court-circuit entre enroulement 4^{ieme} et 5^{ieme}
- ✓ Défaut de Court-circuit entre enroulement 5^{ieme} et 6^{ieme}

2°/ Déformation propres de l'enroulement :

- ✓ Augmentation de la capacité longitudinale série ( ) (dégradation de l'isolant)
- ✓ Augmentation de la capacité shunt ( ) (déplacement de l'enroulement)
- ✓ Augmentation de la capacité série ( )

3°/ Défaut entre partie active et la masse :

- ✓ Diminution de la capacité Cg (défaut entre la partie actif et la masse entre enroulement 1^{iere} et 2^{ieme} éléments)
- ✓ Diminution de la capacité Cg (défaut entre la partie actif et la masse entre enroulement 2^{ieme} et 3^{ieme})

4°/ Ouverture d'une partie de l'enroulement :

- ✓ Défaut d'ouverture de la $1^{è}$ spire
- ✓ Défaut d'ouverture de la $2^{è}$ spire
- ✓ Défaut d'ouverture de la $3^{è}$ spire
- ✓ Défaut d'ouverture de la $4^{è}$ spire
- ✓ Défaut d'ouverture de la $5^{è}$ spire
- ✓ Défaut d'ouverture de la $6^{è}$ spire

IV.10.3. 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 dix-sept neurones, deux couches cachées, quinze dans la première couche cachée et dix-sept dans la

deuxième couche cachée, une couche de sortie de dix-sept neurones.

La fonction d'activation utilisée est type logsig.

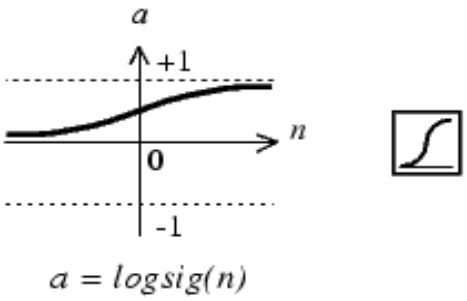
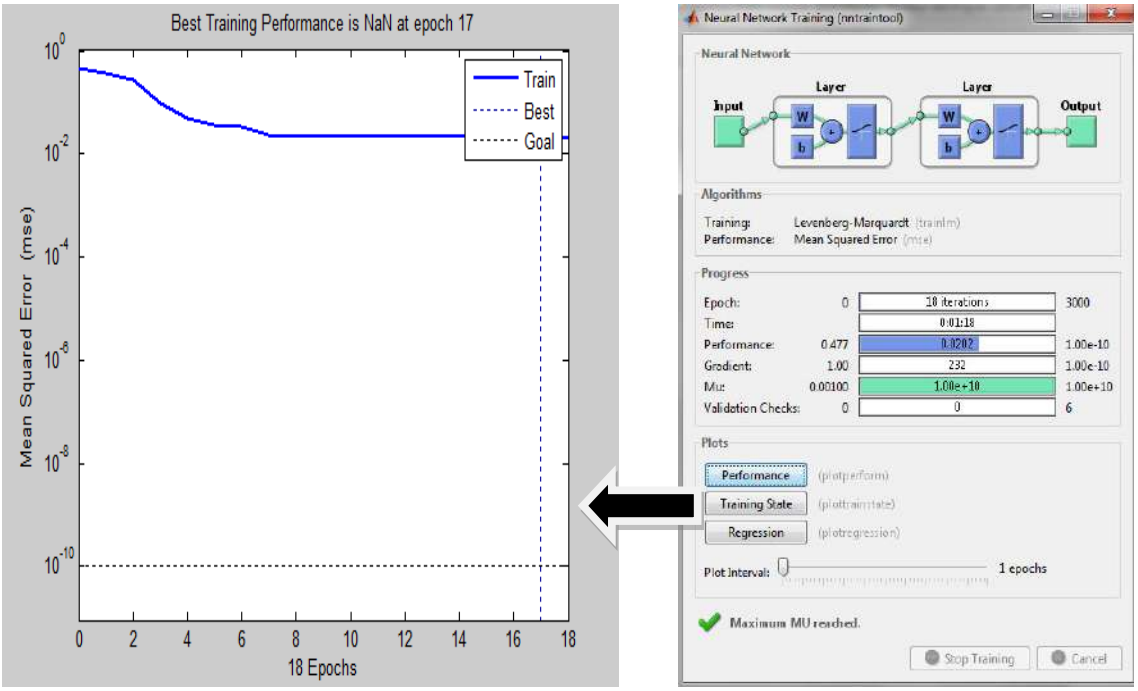


Figure (IV.20) : Fonction de transfert log- Sigmoïde.



a) L'erreur d'apprentissage du réseau de neurones. b) structure du réseau de neurones.

Figure (IV.21) : Réseau de neurones adopté pour le diagnostic.

- **Commentaire :**

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 comme le montrent la figure (IV.21) [48].

IV.11. 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) : absence de défaut.
- la valeur (1) : 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 boîte de dialogue comme le montré le (figure IV.22) sous forme d'une les défauts dont on veut détecter sont :

- L'enroulement du transformateur sain.
- Défaut de court-circuit.
- Défaut de ouverture de circuit.
- Défaut capacitif.



Figure (IV.22) : 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'est pas un défaut, le message suivante s'affiche « enroulement sain », si l'operateur appuis sur le bouton « l'enroulement du transformateur sain », si par erreur il appuis sur lien « Défaut de Court-circuit », « Défaut d'ouverture de circuit », « Défaut capacitifs » autres message affiche est « pas ce défaut ».
- Si l'entrée est un défaut quelconque, l'operateur appuis sur l'un des boutons, deux situations présenté :

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

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

IV.12. Conclusion :

Basé sur des données recueillies à partir des tests de la réponse en fréquence (FRA) appliqués sur un enroulement de transformateur réel, nous avons mis en relief une méthode de diagnostic de défaut dans un enroulement de transformateur basée sur les RNA.

D'après la simulation effectuée, nous avons constaté que l'application des réseaux de neurones peut être un outil très efficace pour la détection de la nature du défaut ainsi que pour la localisation de ce dernier. La méthode développée dans cette étude, peut constituer un outil per formant dans la maintenance du transformateur qui est un dispositif à la fois important et cher.

Conclusion générale

La maintenance des équipements industriels est une tâche primordiale pour l'augmentation de leur durée de vie. Afin de réaliser une maintenance fiable et précise le diagnostic du défaut et ses origines est impérative.

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 RLC, ce modèle nous a servi de référence pour la validation d'un autre modèle que nous avons proposé, ce dernier est basé sur la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement.

Au cours de cette étude nous avons validé le modèle basé sur les inductances propres et mutuelles en le comparant à un test sur un transformateur réel, ce qui nous a permis de l'utiliser comme une référence pour notre approche proposée faute de bon expérimental.

Une variété de défaut, qui peuvent avoir lien dans un enroulement du transformateur sont été mis en évidence et modélisés à savoir court-circuit entre les spires ou élément, déformation propres de l'enroulement,….

Les résultats obtenus sont constitué une base de donnée pour l'application des réseaux de neurones, dans le cadre de diagnostic et localisation de défauts dans les enroulements du transformateur.

Par ailleurs, cette application a permis d'obtenir une rapidité et la précision pour le diagnostic et la localisation des défauts dans les transformateurs, ce qui permet de réaliser une meilleure maintenance, une minimisation des défauts pour prolonger la vie utile du transformateur qui est un dispositif à la fois important et cher.

Références bibliographiques

[1] : Bernard MULTON., 'Modèles électriques du transformateur électromagnétique', Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan.

[2] : N KHELIFA., 'Chef Division méthodes maintenance postes HT'.

[3]: Muhammad Azizi Abdul Rahman., Halimatun Hashim., P.S Ghosh., 'FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS OF A POWER TRANSFORMER', Electrical Engineering Department, College of Engineering, University Tenaga Nasional.

[4] : L Bouchaoui., K. E Hemsas., S. Belahneche., 'Laboratoire d'analyse Régionale - Sonelgaz- GRTE – SETIF', LAS, Université Ferhat Abbas, Sétif.

[5] : FRANÇOIS MILSANT., 'Électrotechnique machines électriques transformateurs Electriques'.

[6] : Omicron electronics.,'FRAnalyzer Manuel d'utilisation',Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.

[7] : Sonelgaz DEPT GRTE formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance 'Méthodes de diagnostic de transformateur', Ecôtes , janvier 2008.

[8] : FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005.

[9] : Formation transformateur., 'Formation transformateur de puissance'.

[10] : SONELGAZ-ALGÉRIE., 'Documentation des accessoires'.

[11] : A CAPLIEZ P.HEINY., 'Technologie et schéma', tome 2.

[12] : Essais sur les transformateurs., www.sitelec.com/essai_transformateur.htm.

[13] : SONELGAZ DIRECTION DE L'ÉNERGIE. , 'GEC ALSTHOM'.

[14] : support de cours., 'TECHNOLOGIES DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES HTB DES POSTES'.

[15] : N BERGER., 'liquides isolantes en électrotechnique caractéristiques des propriétés', D2 471.

[16]: T.O ROUSE., 'Mineral isolating oil in transformers', IEEE Electrical insulation Magazine, vol. 14, n3, may/June.

[17] : Christophe Ferrier., 'Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissances-recherche d'un mélange optimal', Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon ,Année 2005.

[18] : BENAMAR Rabah., 'Influence du nombre de claquages sur les propriétés de l'huile de transformateur', Mémoire de Magister Soutenu publiquement, 26 juin 2008.

[19] : N BERGER., M RANDOUX., G OTTMANN et P. VUARCHEX., 'Revue des isolants liquides', Electra (F), n 171, Avril 1997, pp. 32-57.

[20] : A BONDEAU., 'Contribution à l'étude de la viscosité des milieux denses désordonnés dans la zone de transition vitreuse. Critique de la relation de Vogel-Fulcher ', Thèse de doctorat, université de Loyon, 1985.

[21] : S Abdi., 'Influence du vieillissement thermique sur des propriétés de l'huile de transformateur', mémoire de Magistère, ENP, Alger, 2002.

[22] : N BERGER., 'Liquide isolant en électrotechnique-présentation générale» Technique de l'ingénieur', traité D2470.MAI 2002.

[23] : Norme ISO 3016., 'Produits pétroliers – Détermination du point d'écoulement', Aout 1994.

[24] : N Aouchar., C Bekhaled., 'Application des systèmes hybrides neuro-flou au diagnostic des huiles de transformateur', projet de fin d'études, Département Electrotechnique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, 2009.

[25] : NYNAS., 'Guide des huiles isolantes',www.nynas.com/naphtenics.

[26] : B.P. KANG., 'Thermal dependency of viscosity, power factor and ion content of electrical insulating oil', IEEE transactions on power apparatus and Systems, (USA) 9, September 1965.

[27] : B FALLOU., 'Quelques notion relative à l'humidification des huiles isolantes usagées ', Bulletin LCIE, n 35, Avril 1963, pp. 330-335.

[28]: B Gustavsen., A Semlyen., 'Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients', IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.

[29] : Solutions de diagnostic et de test pour les transformateurs de puissance, www.omicron.at ou www.omicronusa.com

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

[31] : Otmane Cherif T., N.Mufidzada., N.Benamrouche., 'Influence of the Number of the nodes in the Windings Equivalent circuit o the Surge voltages in transformers', international Review on Modeling and simulation, Italy, vol.1, N°2, pp 78-84, October 2008.

[32] : A LEFEVRE., 'Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires'.

[33] : Andrianirina RAKOTOMALALA., 'contribution a la modélisation des transformateurs de puissance en régime haute fréquence', Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Le 27 octobre 2006.

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

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

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

[37] : Gueller B., Veverka A., 'Processus impultionnelles dans les machines électriques', Energya, Moscou, 1973.

[38]: K Ragavan and L Satish., 'Localization of changes in a model Winding Based on Terminal Measurement ', IEEE transaction on power delivery, vol.22.3, July 2007.

[39]: F Metalbi et H Bouhallab., 'Diagnostic et localisation des défauts dans les enroulements du Transformateur ',Thèse de master de l'Université de Blida, juin 2012.

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

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

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

[43]: 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.

[44]: 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.

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

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

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

[48]: Modules complémentaires à MATLAB - ryounes.net.