REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE.

Département de génie électrique.



Projet de Fin d'Etude

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en électrotechnique
Spécialité :

Réseaux Electriques

THEME :

Diagnostic des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime HF : en utilisant la technique d'optimisation de colonie d'abeilles artificielles

Proposé et dirigé par :

Dr. ABBADI.A.
Mme. BOUKIRAT.S.

Préparé et présenté par :

Mlle. BOUKHIT KHAOULA.
Mlle. TALEB ROMAISSA.

Année Universitaire

2022/2023

Remerciements

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

Nous adressons nos remerciements particuliers à notre promotrice : ***Dr. Abbadi Amel****.*

Nous remercions sincèrement co_promotrice Madame : ***Samia Boukirat*** *enseignante à l'université yahya farés de Médéa, pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce travail et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et ses directives, et d'avoir aussi au la gentillesse de lire et corriger ce travail. Nous remercions également tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail. Nous remercions tous les enseignants du département génie électrique d'université yahya farés de Médéa A cette occasion, Nous remercions également toux ceux qui nous ont soutenus de prés ou de loin durant ces dernières années. Enfin, un remercîment éternel à nos parents et nos frères et sœurs, ainsi qu'a toute nos amis.*

En fin de compte, nous espérons que ce résumé a été utile à tout le monde Futurs étudiants et leur permettre de progresser en Leur vie éducative et professionnelle.

Merci

Dédicace

A ma Mère,
« Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l amour et la reconnaissance que je te porte .En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l affection dont tu m'as toujours entourée.»
A mon Père,
«L'épaule solide, loeil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu te préserve et te procure santé et longue vie »
Amon très cher frère EL Hadj, mes aimables sœurs Akila, Aicha, Khadidja et Nour pour leurs soutiens infinis et leurs aides incessantes, à qui je souhaite un meilleur avenir.
A mes chers amis surtout ma chère binôme Taleb Romaissa Qu'ils trouvent ici L'expression de toute ma reconnaissance.
Et à tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin pour que ce projet soit possible, sans oublier tous mes collègues de la promotion d'Electrotechnique 2022/2023.
Je vous dis merci.

Boukhit Khaoula

Dédicace

A ma très chère mère
je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de ma mère disparu trop tôt, que Dieu te fasse miséricorde, tu as toujours m'encouragé été a mes côté Si Dieu le veut, je serai heureux de votre ce succès.
A ma très chère père
qu'il trouve à moi la source du ça fierté, pour son soutien, son affectionet la confiance qu'il m'accordé
À ma sœur Sarah et mes frères
A mes chers amis surtout ma chère binôme Boukhit Khaoula
Qu'ils trouvent ici L'expression de toute ma reconnaissance.
Et à tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin pour que ce projet soit possible, sans oublier tous mes collègues de la promotion d'Electrotechnique 2022/2023.
Je vous dis merci.

Taleb Romaissa

Introduction générale :.....1

CHAPITRE I :

Notions de base du transformateur triphasé

I.1 Introduction :.....3
I.2 Définition :.....3
I.3 Symboles électriques du transformateur.....4
I.4 Constitution d'un transformateur triphasé 4
I.4.1 Partie active.....4
I.4.1.1 Le noyau 4
I.4.1.2 Bobinage :.....6
I.4.2 La partie constructive :.....7
I.4.3 Isolation : 9
I.5 Principe de fonctionnement.....10
I.6 Construction du transformateur 10
I.6.1 Les transformateurs à diélectrique liquide 11
I.6.2 Les transformateurs Sec 11
I.7 Couplage d'un transformateur 12
I.7.1 Mode de couplage 12
I.7.2 Choix du couplage 13
I.8 Différents types de transformateur 14
I.9 Défauts fréquents dans les transformateurs.....15
I.9.1 Défaut d'isolement de la partie active.....15
I.9.2 Amorçage diélectrique entre spires.....15
I.9.3 Court-circuit entre spires.....16
I.9.4 Décharges Partielles.....16
I.9.5 Coupure du circuit électrique.....17

I.9.6 Déformation géométrique des enroulements.....18
I.10 Techniques de diagnostic des défauts dans les transformateurs.....19
I.10.1 Analyse d'huile 19
I.10.2 Mesures diélectrique 20
I.10.3 Analyse des furanes 20
I.10.4 Mesure électrique 20
I.10.4.1 Mesure du courant d'excitation.....20
I.10.4.2 Mesure de rapport de transformation 21
I.10.4.3 Mesure de la résistance d'enroulement.....21
I.10.4.4 Mesure de la réactance de fuite 21
I.11 Conclusion 21

CHAPITRE II :

Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle

II.1 Introduction..... 22
II.2 L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) 22
II.2.1Définition 22
II.2.2 principe de la méthode 22
II.2.3 Objectifs des mesures par FRA.....23
II.2.4 Quand faut –il faire un test FRA ? 23
II.2.5Type d'essais par FRA.....23
II.2.5.1 Essais entre extrémités 23
II.2.5.2 Essais en court-circuit 24
II.2.5.3 Essais capacitif entre enroulements.....25
II.2.5.4 Essais inductif entre enroulements 25
II.2.6 L'équipement de mesure 26
II.2.6.1 Le FR Analyzer 26
II.2.6.2 Connecteurs et commandes 26

II.2.6.3 Câbles pour les essais 27
II.2.6.4 Le logiciel d'analyse et d'interprétation 28
II.2.7 Procédure d'essai 29
II.2.7.1 Consignation du transformateur 29
II.2.7.2 Mise en service du FR Analyzer 30
II.2.7.3 Paramétrage des mesures grâce au logiciel FR Analyzer..... 31
II.2.7.4 Raccordement du FR Analyzer à un transformateur de puissance 32
II.2.8 Méthodes d'interprétation 34
II.2.8.1 Interprétation Méthodologique 34
II.2.8.2 Domaine de fréquence pour les interprétations 34
II.3 Modélisation de transformateur de puissance triphasé 35
II.3.1 Modélisation en haute fréquence 35
II.3.2 Les modèles usuels des transformateurs 36
II.3.2.1 Modélisation par la théorie de lignes 36
II.3.2.2 Modélisation par des circuits ou des transformées..... 37
II.3.2.3 Modélisation par inductances propres et mutuelles 39
II.3.2.4 Modèle de RESEL 40
II.3.2.5 Modèle d'EMTP 41
II.3.2.6 Modèle équivalent en π du transformateur en HF..... 42
II.4 Conclusion 43

CHAPITRE III :

Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF

III.1 Introduction..... 45
III.2 Objectifs..... 45
III.3 Simulation 45
III.3.1 Logiciel utilisé..... 45
III.3.1.1 Ecran de base.....46

III.3.1.2 Simulink 46
III.3.2 Version utilisé..... 46
III.4 Description du modèle approuvé 46
III.4 .1Modéle simplifié en π du transformateur en HF..... 46
III.4.2 Paramètres de simulation 48
III.4.3Simulation de l'impédance Zsiml1 49
III.4.4 Simulation de l'impédance Zsiml2..... 49
III.4.5 Simulation de l'impédance Zsiml3 50
III.4.6 Estimation des paramètres du modèle RLC pour chaque phase 51
III.4.6.A Calcul de la fonction objective 52
III.4.7 Estimation de l'impédance Zestm1 52
III.4.8 Estimation de l'impédance Zestm2 53
III.4.9 Estimation de l'impédance Zestm3 54
III.4.10 Interprétation des résultats 57
III.5 Localisation des défauts dans les phases de transformateur 58
III.5.1 Défaut résistif 58
III.5.2 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut résistif 58
III.5.3 Résultats et discussions 62
III.5.4 Interprétation des résultats 63
III.6 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeille artificielle (ABC) 64
III.6.1 Définition 64
III.6.2 Résultats de simulation de l'algorithme d'ABC 66
III.6.3 Interprétation des résultats 68
III.7 Conclusion 68
Conclusion générale :.....69

CHAPITRE I :
Notions de base du transformateur triphasé

Liste des figures :

Figure I. 1 : Transformateur Triphasé. 3
Figure I. 2 : Symboles du transformateur triphasé 4
Figure I. 3 : Partie active d'un transformateur triphasé 5
Figure I. 4 : Transformateur cuirassé 5
Figure I. 5 : Transformateur à colonnes. 6
Figure I. 6 : Bobines primaire et secondaire d'un transformateur.....7
Figure I. 7 : Cuve d'un transformateur de puissance 8
Figure I. 8 : Conservateur d'huile.....8
Figure I. 9 : Isolateur de moyenne tension. 9
Figure I. 10 : Traversées des transformateurs. 9
Figure I. 11 : Schéma de principe d'un transformateur 10
Figure I. 12 : Transformateur immergé 11
Figure I. 13 : Transformateur Sec.....12
Figure I. 14 : Couplage de primaire 12
Figure I. 15 : Couplage de secondaire 13
Figure I. 16 : Représentation symbolique.....13
Figure I. 17 : Amorçage entre enroulements. 15
Figure I. 18 : Amorçage entre spires, sans court-circuit. 16
Figure I. 19 : Court-circuit entre spires. 16
Figure I. 20 : Décharges partielles sur des cales.....17
Figure I. 21 : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur 18
Figure I. 22 : Déformation mécanique d'un Enroulement 19

CHAPITRE II :
Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle

Liste des figures :

Figure II. 1: Modèle d'un enroulement de transformateur.....22
Figure II. 2 : Essai entre extrémités 24

Figure II. 3 : Essai en court-circuit.....24
Figure II. 4 : Essai capacitif entre enroulements 25
Figure II. 5 : Essai inductif entre enroulements.....25
Figure II. 6: Vue de la face avant du FR Analyzer.....26
Figure II. 7 : Vue de la face arrière du FR Analyzer 27
Figure II. 8 : Bon raccordement à la terre.....28
Figure II. 9 : Mauvais raccordement à la terre.....28
Figure II. 10 : Fenêtre principale du logiciel Le logiciel FR Analyzer analyse les résultats du test en calculant la différence de deux traces de test comparables 29
Figure II. 11: Connexion des câbles coaxiaux…….....30
Figure II.12 : Raccordement à la terre du FR Analyzer.....31
Figure II.13 : Raccordement de la pince pour borne de traversée aux câbles coaxiaux jaunets rouge.....32
Figure II.14 : Serrage de la pince à visser.....33
Figure II.15 : Raccordement de la pince pour borne de traversée au câble coaxial bleu.....33
Figure II.16 : Schéma équivalent d'un enroulement.....37
Figure II.17 : Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique....37
Figure II.18 : Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section de longueur ΔX.....38
Figure II.19 : Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert du transformateur ayant une seul fréquence de résonance 39
Figure II.20 : Représentation d'un enroulement.....40
Figure II.21 : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.....41
Figure II.22 : Modèle EMTP pour un transformateur monophasé à n enroulements.....42
Figure II.23 : Structure de modèle d'un quadripôle.....43
Figure II.24 Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases.....43

Liste des tableaux :

Tableau II. 1 : Domaines typiques d'interprétation de FRA.....35

CHAPITRE III :

Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF

Liste des figures :

Figure III. 1: Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé 47
Figure III. 2 : Le circuit équivalent de chaque phase 47
Figure III. 3 : Module d'impédance Zsiml 1en fonction de la fréquence 49
Figure III. 4 : Module d'impédance Zsiml 2en fonction de la fréquence.....50
Figure III. 5 : Module d'impédance Zsiml 3en fonction de la fréquence.....51
Figure III. 6: Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur 51
Figure III. 7 : Module d'impédance Zestm 1en fonction de la fréquence.....53
Figure III. 8 : Module d'impédance Zestm 2en fonction de la fréquence.....54
Figure III. 9 : Module d'impédance Zestm 3en fonction de la fréquence.....55
Figure III. 10: La courbe des réponses Zmodl 1 et Zestm 1 en fonction de la fréquence 56
Figure III. 11 : La courbe des réponses Zmodl 2 et Zestm 2 en fonction de la fréquence 56
Figure III. 12 : La courbe des réponses Zmodl 3 et Zestm 3 en fonction de la fréquence 57
Figure III. 13 : Comparaison des réponses fréquentielle d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 1 et d'un enroulement sain 59
Figure III. 14 : Comparaison des réponses fréquentielle d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 2 et d'un enroulement sain 60
Figure III. 15: Comparaison des réponses fréquentielle d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 3 et d'un enroulement sain 61
Figure III. 16 : Organigramme pour la procédure ABC de calcul des paramètres du modèle étudié.....65
Figure III. 17 : La courbe de la réponse (Zsiml1) simulée et la réponse (Zoptim1) optimisée par l'algorithme d'ABC en fonction de la fréquence 66
Figure III. 18 : La courbe de la réponse (Zsiml2) simulée et la réponse (Zoptim2) optimisée par l'algorithme d'ABC en fonction de la fréquence.....67
Figure III. 19 : La courbe de la réponse (Zsiml3) simulée et la réponse (Zoptim3) optimisée par l'algorithme d'ABC en fonction de la fréquence.....67

Liste des tableaux :

Tableau III. 1 : Paramètres de simulation. 48

Tableau III. 2 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une plage de 20%Rsain.....62
Tableau III. 3 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une plage de 30%Rsain.....62
Tableau III. 4 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une plage de 40%Rsain.....63
Tableau III. 5 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une plage de 50%Rsain.....63

BT : Basse tension.

MT : Moyenne tension.

HT : Haute tension.

THT : Très haute tension.

HF: Haut frequence.

KV : Kilo-Volt.

FRA : Technique d'analyse de la réponse en fréquence.

EMTP: Programme des transitoires électromagnétiques (Electromagnetic Transients program).

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

KHz: Kilo Hertz.

Hz : Hertz.

RT: Résistance en fonction de la température [Ω]

R0: Résistance sain [Ω]

α: Facteur de dilatation thermique [K -1]

ΔT: Variation de la température [°C]

ABC : Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle (Artificiel Bee Colony).

Esprech : Espace de recherche.

GMval: Gamme de valeur utilisée.

Rand : Choix aléatoire (Randomly).

Sorc Norr : Source de nourriture.

D: La longueur du vecteur (Dimension).

Repmat : Répétition (Replicate).

Bornes sup : Bornes supérieures.

Bornes inf : Bornes inférieures.

ez : Erreur entre les impédances.

N1,N2 : Nombres des spires.

Ø : Flux magnétique.

t : Temps.

V : Volt.

f: Fréquence.

RLC: Résistance-Inductance-Capacité.

R : Résistance.

L : Inductance.

C : Capacité.

Z : Impédance .

π: Modèle d'un transformateur.

ملخص :

يصف العمل المقدم في هذه الأطروحة منهجية لتحديد معلمات نموذج أساسي للف محول ثلاثي الطور بتردد عال في نطاق تردد: [0-200000 هرتز] بطريقتين مختلفتين (تقدير الاستجابة الترددية ، خوارزمية ABC).

النموذج الأنسب لدراستنا هو النموذج القائم على نظرية رباعي الأقطاب (نموذج مكافئ في π للمحول في الترددات العالية.) يعتمد على فرع RLC متوازي ، لبساطته من ناحية ومن ناحية أخرى لأنه يحتوي تماما على دراسة في ترددات عالية ، مستغلة لدراسة الفشل المختلفة لملفات هذا المحول.

الكلمات المفتاحية :

محول ثلاثي الطور, تردد عالي ,نطاق التردد, استجابة التردد, خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية (ABC) ,رباعي القطب ,نموذج π , فرع RLC, حالات الفشل.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire décrit une méthodologie d'identification des paramètres d'un modèle de base de l'enroulement d'un transformateur triphasé en haute fréquence dans une gamme de fréquences : [0-200000 Hz] par deux méthodes différentes (Estimation de la réponse fréquentielle, Algorithme d'ABC).

Le modèle le plus approprié à notre étude est celui basé sur la théorie du quadripôle (modèle équivalent en π du transformateur en HF) à base d'une branche RLC parallèle, pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

Mots clés:

transformateur triphasé, haute fréquence, gamme de fréquences, réponse fréquentielle, Algorithme d'ABC, quadripôle, modèle en π, branche RLC, défaillances.

Abstract:

The work presented in This thesis describes a methodology for identifying the parameters of a basic model of the winding of a three-phase transformer in high frequency in a frequency range: [0-200000 Hz] by two different methods (Frequency Response Estimation, ABC Algorithm).

The most appropriate model for our study is the one based on the theory of the quadrupole (equivalent model in π of the transformer in HF) based on a parallel RLC branch, for its simplicity on the one hand and on the other hand for it contains perfectly to a study in high frequencies, exploited for the study of the different failures of the windings of this transformer.

Keywords :

three-phase transformer, High frequency, Frequency range, Frequency response, ABC algorithm, quadrupole, π model, RLC branch, Failures.

Introduction générale

Les transformateurs de puissance constituent le cœur de la production, transport, distribution d'électricité, ainsi que dans beaucoup d'autres secteurs fonctionnant avec l'énergie électrique [1].

Le transformateur est une machine électrique statique qui permet de modifier la tension et le courant dans un réseau électrique afin de les rendre plus adaptables à l'utilisation. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les différents points de consommation. L'étude du transformateur nous aidera également à comprendre le fonctionnement d'un grand nombre des machines telles que moteurs d'induction, alternateurs, compensateurs synchrones, etc. ., car ces machines utilisent aussi le principe de l'induction électromagnétique [1].

La maintenance prédictive de la machine s'effectue à partir de l'inspection et du diagnostic basé sur les différents tests qu'elle subit tout au long de son cycle de vie. Le but est d'obtenir des informations sur l'état des différents composants des condensateurs, résistances et bobines qui composent le transformateur. Nous pouvons mettre en évidence l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) [2].

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) se trouve être un outil utile pour la détection fiable de défauts mécaniques et électriques naissant dans un transformateur, cette méthode n'exige pas d'ouvrir le transformateur en raison de sa sensibilité élevée pour détecter les défauts, dont on l'utilise sur un transformateur considéré comme une boite noire [2].

La FRA se base sur la réponse en fréquence de l'impédance , donc elle permet de calculer et déterminer les paramètres de transformateur pour établir un modèle construit par des cellule RLC parallèle en cascade visé à détecter les défauts [1].

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.

Pour atteindre notre objectif, nous avons subdivisé notre mémoire en trois chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

Le premier chapitre contient une présentation générale de transformateur (constitution, principe de fonctionnement, ….etc.), ainsi que les contraintes et les defaults les plus connues ainsi que les méthodes de diagnostique usuelles.

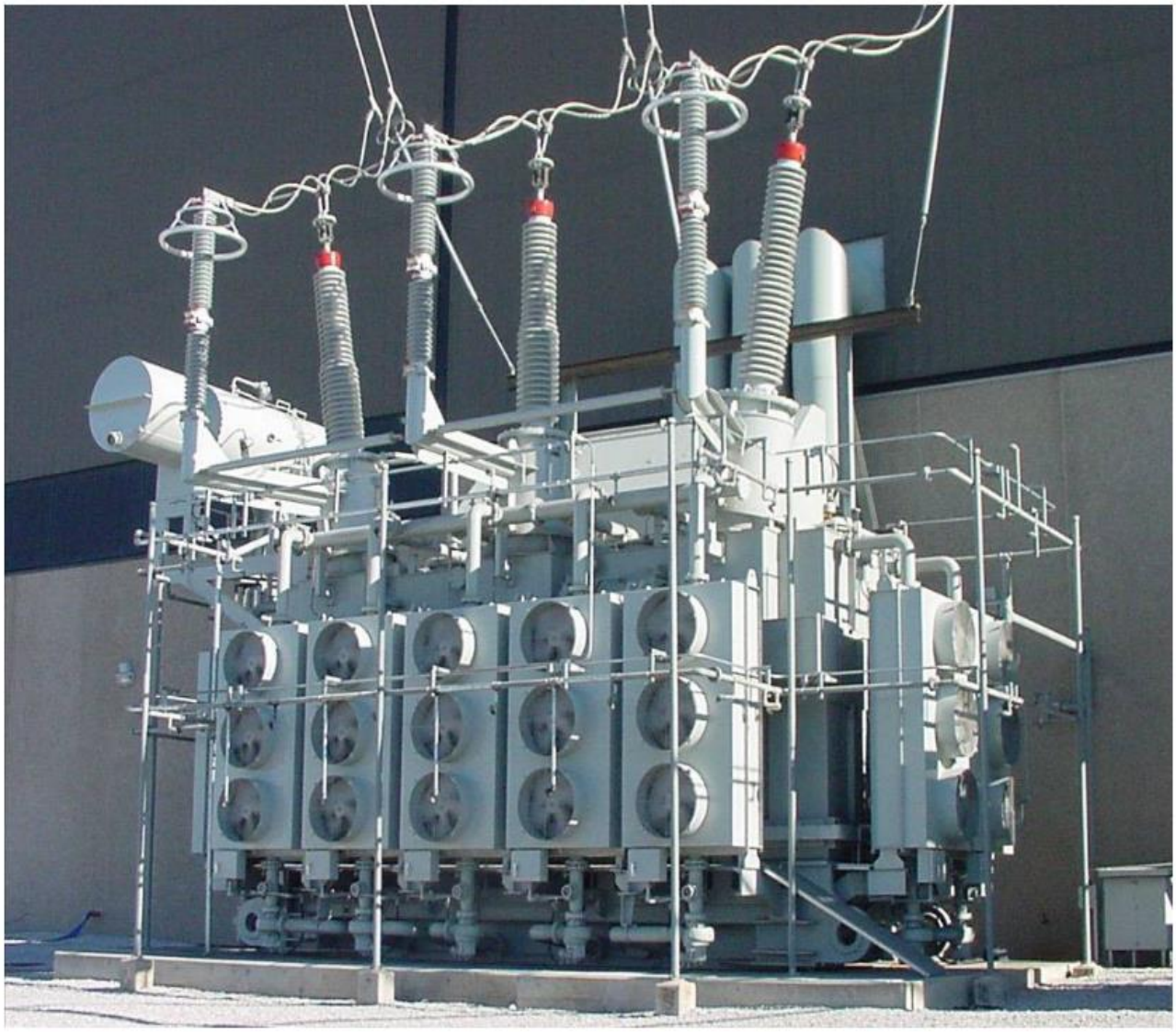
Pour le deuxième chapitre on a présenté les principaux modèles de transformateurs existant dans la littérature qui semble plus adéquat à la problématique posée et également une présentation bibliographique sur la technique de l'analyse fréquentielle (FRA).

Nous aborderons dans le troisième chapitre la validation du modèle adopté et son exploitation pour une étude de diagnostic de défaut dans le transformateur en haute fréquence d'une part et d'autre part la modélisation et l'analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime HF par l'utilisation de l'algorithme Artificial Bee Colony(ABC).

Enfin, on terminera par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre I

Notions de base du transformateur triphasé



I.1 Introduction :

Les transformateurs de puissance font partie intégrante de tous les réseaux de transmission et de distribution d'énergie. L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, provoquant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs parasites créent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. Par conséquent, la structure mécanique et les enroulements du transformateur sont exposés a de fortes contraintes mécaniques. De plus, le transformateur peut être exposé à des tensions pendant le transport et l'installation et en raison des fluctuations cyclique de la température ambiante. Les tensions appliquées aux transformateurs de puissance peuvent provoquer des déformations mécaniques ou des défauts de leurs bobinages et noyaux magnétiques.

Dans ce chapitre, nous avons donné une étude théorique portant sur le fonctionnement, la construction, les composants de base du transformateur, les défauts fréquents dans les transformateurs ainsi que leurs techniques de diagnostic sont présentées.

I.2 Définition du transformateur :

Le transformateur (figure I.1) est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation [1].



Figure I.1 : Transformateur triphasé [1].

I.3 Symboles électriques du transformateur :

Le transformateur peut être représenté par l'un des symboles reportés sur la figure I.2.

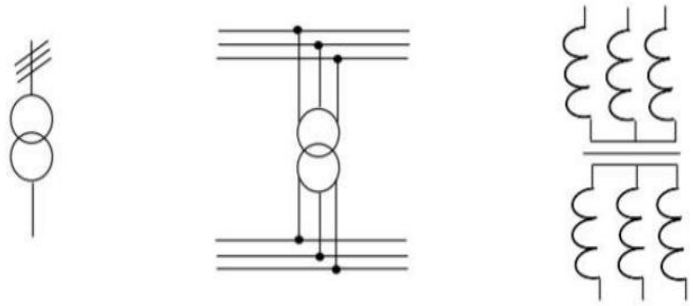


Figure I.2 : Symboles du transformateur triphasé [2].

I.4 Constitution d'un transformateur :

Le transformateur est une machine statique d'induction qui est composé de deux parties principales qui sont [2] :

- **Partie active** : Constituée essentiellement du circuit magnétique, électrique. Elle est destinée à conversion d'énergie éclectique.
- **Partie constructive :** destinée à assurer l'isolement et la fixation de la partie active.

I.4.1. Partie active :

I.4.1.1. Le noyau (circuit magnétique) :

Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôle d'acier de bonne qualité, de plus pour minimiser les pertes dans le fer, les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique, les tôles utilisées sont en acier doux et ont une faible épaisseur et sont isolées entre elles avec du vernis. Le circuit se présente sous forme de trois colonnes et deux culasses, son rôle essentiel est de canaliser le flux et de présenter le minimum de pertes hystérésis et courant de Foucault [2].

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux dispositions principales qui sont :

- Transformateur à colonnes ;
- Transformateur cuirassé ;



Figure I.3: Partie active d'un transformateur triphasé [2].

- **Transformateur cuirassé :**

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés. La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobines [2].

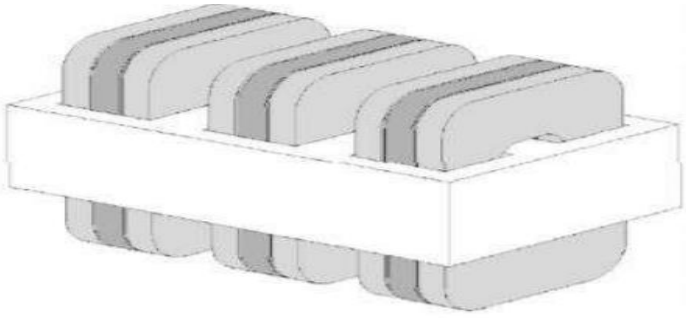


Figure I.4: Transformateur cuirassé [3].

- **Transformateur à colonnes :**

Le transformateur à colonne est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme

à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé. Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux [2].

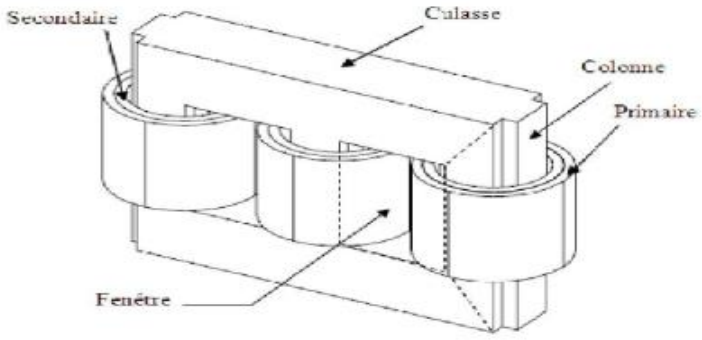


Figure I.5: Transformateur à colonnes [3].

I.4.1.2. Bobinage (Les enroulements) :

Le transformateur est constitué d'un primaire et d'un secondaire constitué chacun de trois enroulements identiques. Ces enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire [2].

Les enroulements sont réalisés soit en cuivre soit en aluminium. Les bobinages sont effectués avec du fil rectangulaire isolé en papier en multicouches, en disque ou hélicoïdal. Il y en a deux par colonne, l'un forme l'enroulement primaire et l'autre le secondaire tous deux électriquement distincts. On désigne par les grandes lettres (A. B. C) les bornes d'enroulement haute tension et par les petites lettre (a. b. c) les bornes de la basse tension. Les enroulements prennent différentes dispositions : En couche concentriques, et bi concentriques et à galettes. Les bobinages concentriques : Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques. Les bobinages en galettes : Les enroulements sont constitués de galettes superposées et alternées appartenant successivement au primaire et au secondaire, et séparées les unes des autres par une rondelle isolante [2].

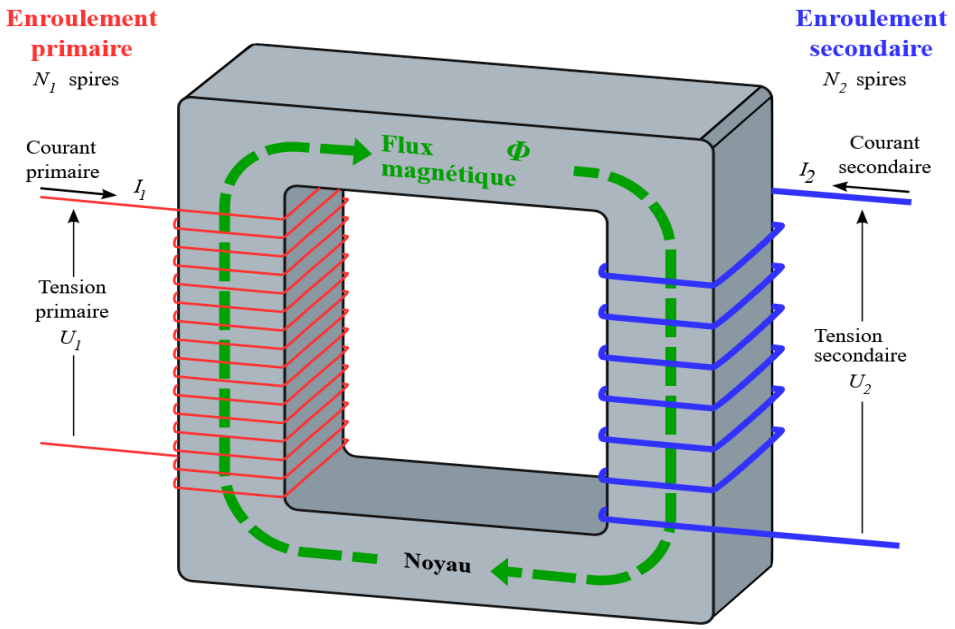


Figure I.6: Bobines primaire et secondaire d'un transformateur [2].

➢ **Représentation des enroulements :**

- Enroulement primaire : Le courant circulant dans l'enroulement primaire est faible d'intensité mais la tension très élevée à laquelle il est soumis impose une section de conducteurs plus faible et l'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement haut tension [2].
- Enroulement secondaire : Le courant circulant dans cet enroulement est d'intensité très grande. Pour la réalisation de cette caractéristique, on impose un nombre de spires limité, et une section des conducteurs relativement importante [2].

I.4.2. La partie constructive :

Les pièces constructives du transformateur sont :

1. **La cuve :** Elle est destinée à contenir la partie active baignant dans l'huile, et assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Dans le fond de la cuve se trouve un dispositif d'écoulement du liquide de refroidissement et d'isolement pour favoriser le refroidissement des bobinages [2].



Figure I.7: Cuve d'un Transformateur de Puissance [1].

2. **Le couvercle** : Il sert à couvrir la cuve et aussi de support aux accessoires, tels que : les isolateurs, le conservateur d'huile, etc.……

3. **Le conservateur d'huile** : permet le remplissage de la cuve et réduit la surface de l'huile en contact avec l'aire extérieure humide [2].

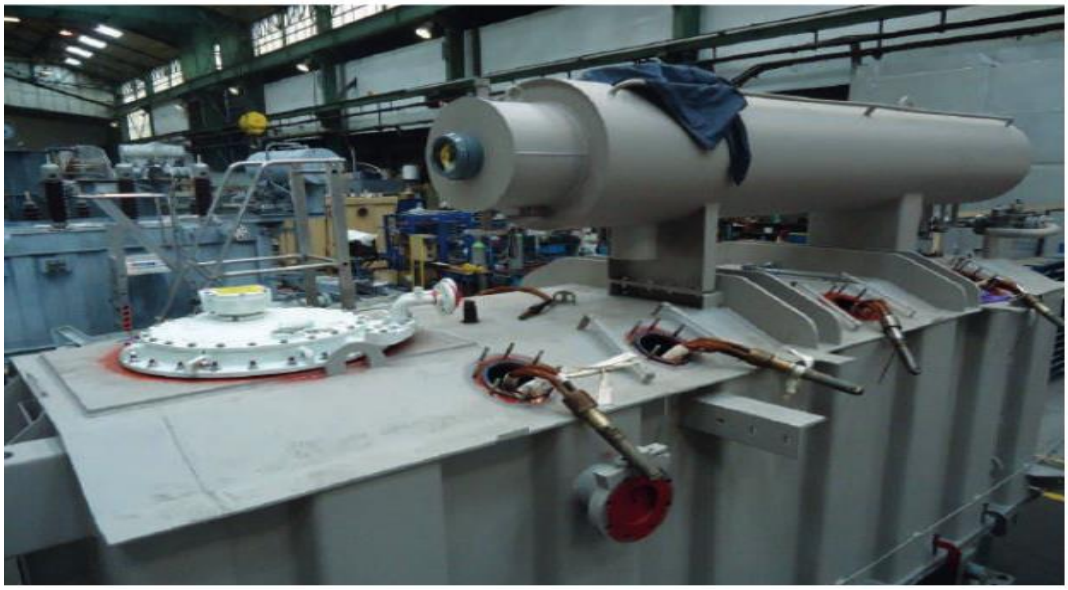


Figure I.8: Conservateur d'huile [2].

4. **Les isolateurs (MT)** : sont au nombre de trois et ont pour rôle d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire (HT) et les lignes d'arrivées [2].



Figure I.9: Isolateur de moyenne tension [2].

5. **Les traversées (BT)** : sont au nombre de quatre et sont formés de deux parties placées de part et d'autre du couvercle reliées par une tige entre les extrémités du secondaire (BT) et les lignes de départ [2].



Figure I.10: Traversées des Transformateurs [1].

I.4.3. Isolation :

L'isolation des transformateurs de puissance est constituée d'huile et d'isolants cellulosiques (papiers). Ces matériaux ont des propriétés qui se complètent, pour permettre de réaliser l'isolement entre spires, entre bobinages, ou entre bobinages et masse, et de conférer à

l'ensemble une cohésion suffisante, pour supporter les efforts mécaniques, tout en assurant l'évacuation des pertes dissipées dans les enroulements (cuivre). L'isolation diélectrique qu'elle soit solide ou liquide doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour se faire, elle doit homogénéiser le champ électrique dans le transformateur [2].

I.5 Principe de fonctionnement :

En vertu la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement (dφ/dt) et au nombre de spire due comporte cet enroulement. Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spire du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spire de secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire [1].

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure suivante :

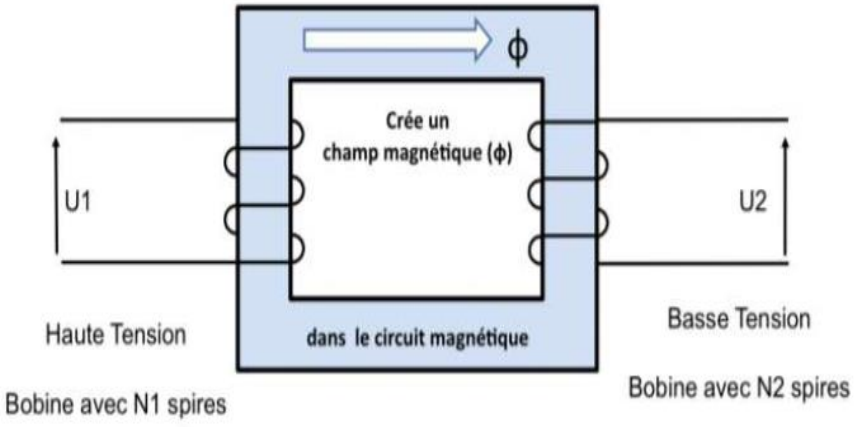


Figure I.11 : Schéma de principe d'un transformateur [4].

I.6 Construction du transformateur :

On distingue deux technologies, les transformateurs à diélectrique liquide (ou immergés) et les transformateurs dits "secs".

I.6.1 Les transformateurs à diélectrique liquide :

Le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans un diélectrique liquide qui assure l'isolation et l'évacuation des pertes caloriques du transformateur [1]. Ils sont utilisés pour :

- Les postes non surveillés car ils ne nécessitent pas d'entretien.
- Les ambiances sévères si le revêtement de la cuve est adapté.

On distingue deux possibilités de stockage de l'huile [1] :

1) Transformateurs respirant avec conservateur :

Ce sont des transformateurs avec réservoir d'huile à pression atmosphérique. Cela permet la dilatation thermique de l'huile.

2) Transformateurs totalement étanches :

L'huile est contenue dans une cuve scellée sans échange d'air. Le volume de gaz se situe alors en haut de la cuve.

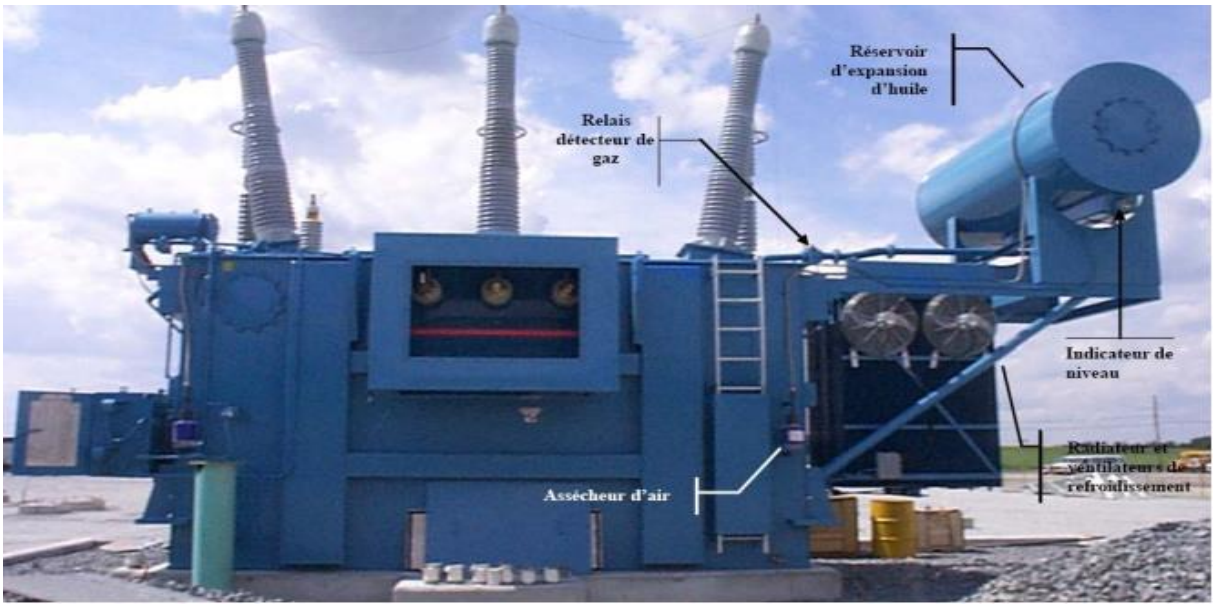


Figure I.12 : Transformateur immerge [5].

I.6.2 Les Transformateurs sec :

Le circuit magnétique est isolé dans une matière isolante sèche. Le refroidissement est assuré par l'air ambiant. Ils sont utilisés dans des locaux où les conditions de poussière,

d'humidité et de température sont maîtrisées. Ils sont notamment utilisés pour les grands bâtiments car ils présentent peu de risque en cas d'incendie [1].



Figure I.13 : Transformateur Sec [5].

I.7 Couplages d'un transformateur :

I.7.1 Mode de couplage :

Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle(D)[6].

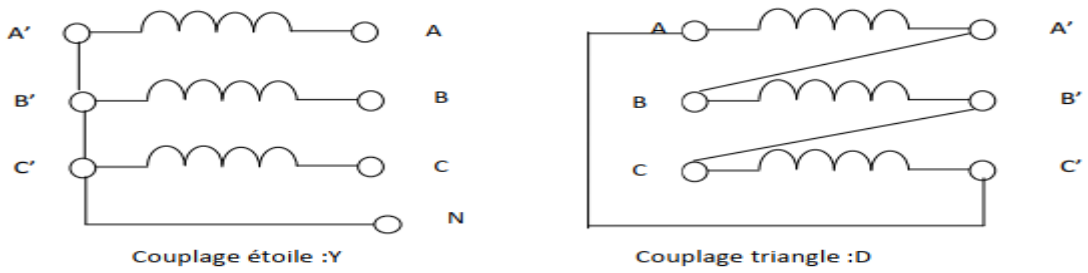


Figure I.14 : Couplage de primaire [6].

Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle(d) et zigzag(z)[6].

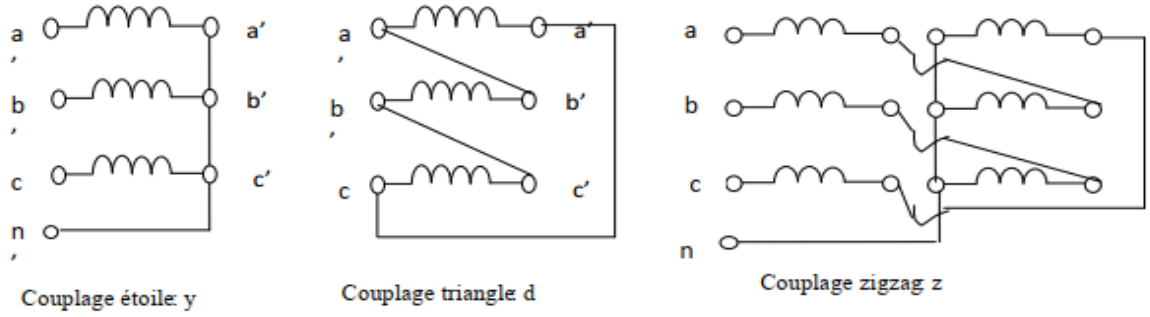


Figure I.15: Couplage de secondaire [6].

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire [6] :

Y-y : étoile –étoile

Y-d : étoile-triangle

Y-z : étoile-zigzag

D-y : triangle- étoile

D-d : triangle –triangle

D-z : triangle-zigzag

On donne ci-dessous les représentations symboliques des couplages normalisés :

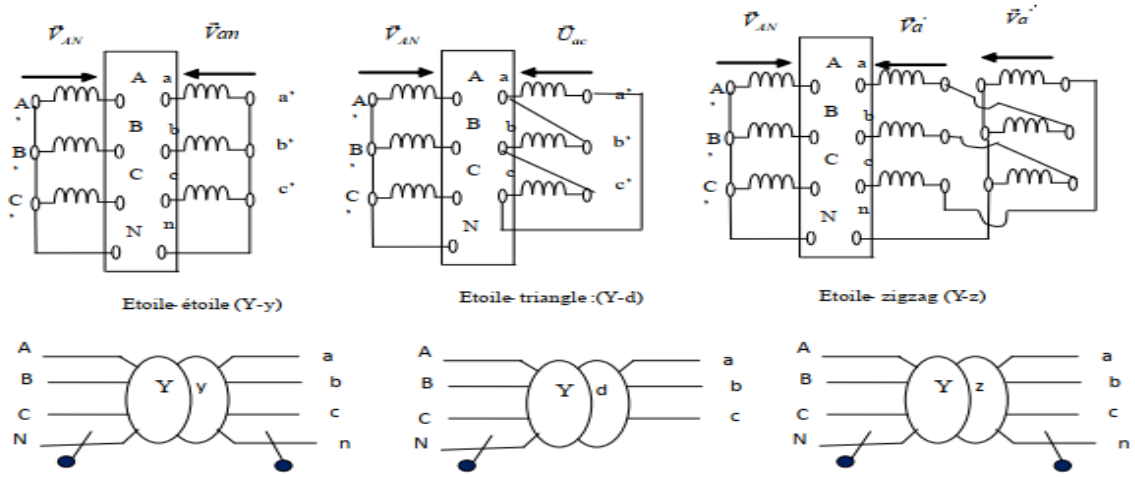


Figure I.16 : Représentation symboliques [6].

I.7.2 Choix du couplage [7] :

On a intérêt à choisir :

- Un couplage étoile : aux très hautes tensions. Chaque enroulement supporte une tension :

$$V = U/\sqrt{3} \quad \text{(I.1)}$$

- Un couplage triangle : aux forts courants. L'intensité par enroulement est :

$$J = I/\sqrt{3} \quad \text{(I.2)}$$

Si on souhaite disposer de deux tensions :

- ✓ Une tension basse pour l'éclairage et une tension élevée pour le chauffage d'un moteur, on adopte un couplage étoile au secondaire : cas du transformateur de distribution.
  - Couplage étoile-étoile Yy : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs abaisseurs de tension qui assurent la liaison entre réseau haute tension/moyenne tension.
  - Couplage triangle-étoile Dy : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution, utilisés comme élévateur de tension, à la sortie des centrales de distribution.
  - Couplage étoile-zig-zag Yz : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution pour compenser le déséquilibre.

I.8 Différents types de transformateur [8] :

Il y a plusieurs types de transformateurs :

- Les transformateurs de puissance destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.
- L'autotransformateur destiné au réglage de la tension et à mettre en marche des moteurs alternatifs.
- Les transformateurs de mesure de tension et de courant.
- Les transformateurs de phase destinés à alimenter les installations à convertisseurs statiques (redresseurs…).
- Les transformateurs d'essais HT, THT.
- Les transformateurs de puissance spéciaux pour l'alimentation de fours, postes de soudage.

I.9 Défauts fréquents dans les transformateurs :

I.9.1 Défaut d'isolement de la partie active :

Le défaut d'isolement de la partie active est caractérisé par la perte, ou la très forte diminution, d'isolement d'un circuit électrique par rapport à son environnement, dont il doit être normalement isolé [2].

Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes [2] :

- Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux figure (I.17)
- Amorçage entre la masse (la cuve ou le circuit-magnétique typiquement) et un enroulement, une connexion ou une traversée.



Figure I.17 : Amorçage entre enroulements [4].

I.9.2 Amorçage diélectrique entre spires :

C'est un amorçage entre spires d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux figure (I.18). L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement [2],[9].



Figure I.18 : Amorçage entre spires, sans court-circuit [2].

I.9.3 court-circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles Figure (I.19). Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements. Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas [2].



Figure I.19 : Court-circuit entre spires [2].

I.9.4 Décharges Partielles :

Les décharges partielles, sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l'isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible sur la Figure (I.20). Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la

tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage [4].

Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs [10].



Figure I.20 : Décharges partielles sur des cales [4].

I.9.5 Coupure du circuit électrique :

La plupart des cas de coupure d'un circuit électrique sont le résultat d'un défaut interne, suite à [2], [9] :

- Un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur
- Un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact figure (I.21).
- Un mauvais alignement d'un régleur.



Figure I.21: Coupure suite à la fusion d'un Conducteur [2].

I.9.6 Déformation géométrique des enroulements :

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des court-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés, qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes Figure (I.22), à noter sans amorçages entre spires, ni court-circuit internes) [11].

Il est possible de déformer un enroulement, ce qui fragilise inévitablement son isolement papier se trouvant au contact des conducteurs, sans nécessairement avoir d'amorçages entre spires ou à la masse. Un transformateur avec une telle déformation mécanique peut dans certain cas fonctionné à son régime nominal. Il reste néanmoins fragilisé et il n'est absolument pas certain qu'il puisse ainsi tenir des perturbations de court-circuit ou de surtensions ultérieures sans amorcer [2],[11].



Figure I.22:Déformation mécanique d'un Enroulement [2].

I.10 Techniques de diagnostic des défauts dans les transformateurs :

L'utilisation des techniques de diagnostic, a une grande utilité car elle permet d'évaluer l'état des composants du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter la programmation des travaux et réduire les temps d'indisponibilité. Dans ce cadre, les actions de diagnostic effectuées SONELGAZ-GRTE sur les transformateurs de puissances sont [12] :

I.10.1 Analyse d'huile :

Le fonctionnement dans de bonnes conditions des transformateurs, dépend dans une large mesure de la qualité des huiles minérales isolantes utilisées. Les caractéristiques des huiles se dégradent par l'effet de la contamination, de l'humidité et du vieillissement. L'huile isolante est l'un des éléments les plus importants dans un transformateur qui nécessite une surveillance et un entretien car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci [12].

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

La connaissance de l'état de l'huile et des gaz qui peuvent être dilués dans ce dernier est d'une importance fondamentale pour assurer un bon fonctionnement des transformateurs, il est par conséquent nécessaire d'effectuer une vérification régulière de l'état de l'huile [13].

I.10.2 Mesures diélectriques :

Les isolants électriques des équipements sont soumis à un vieillissement donnant lieu à une perte progressive de leurs caractéristiques diélectriques pouvant être la cause des défauts du transformateur [14].

L'objectif des mesures diélectriques est de décaler d'éventuelle dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenu d'un incident due à une avarie. La condition d'isolement est un facteur essentiel de la fiabilité opérationnelle des transformateurs [12].

I.10.3 Analyse des furanes :

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

Les composés francs sont générés quand la cellulose est décomposée thermiquement, par conséquent un contenu élevé de composés franques indique un haut degré de dégradation du papier isolant[15].

I.10.4 Mesures électriques :

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont :

I.10.4.1 Mesure du courant d'excitation :

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

I.10.4.2 Mesure de rapport de transformation :

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures. Des déviations indiquent des court-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régleur. Les mesures sont effectuées : - A la mise en service - Lors d'un entretien détaillé. - En cas d'une défaillance. - Après une réparation. La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haut tension, en mesurant les tensions résultantes dans les autres [12].

I.10.4.3 Mesure de la résistance d'enroulements :

La mesure de la résistance a pour objectif de déterminer l'existante des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinage. Entre autres cette mesure détermine les pertes par effet joule dans les enroulements et les connexions.

La mesure est effectuée par l'application du courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements afin de pouvoir ramener les valeurs mesurées vers des valeurs à la température référence [12],[16].

I.10.4.4 Mesure de la réactance de fuite :

La mesure de la réactance de fuite ou impédance de court-circuit, permet par comparaison aux valeurs des mesures lors des essais en usine du transformateur de détecter des changements très importants (>±50%) qui devrait amenée à des investigations plus importantes ; un circuit ouvert ou des court-circuits entre spires, ou entre enroulement et cuve [12].

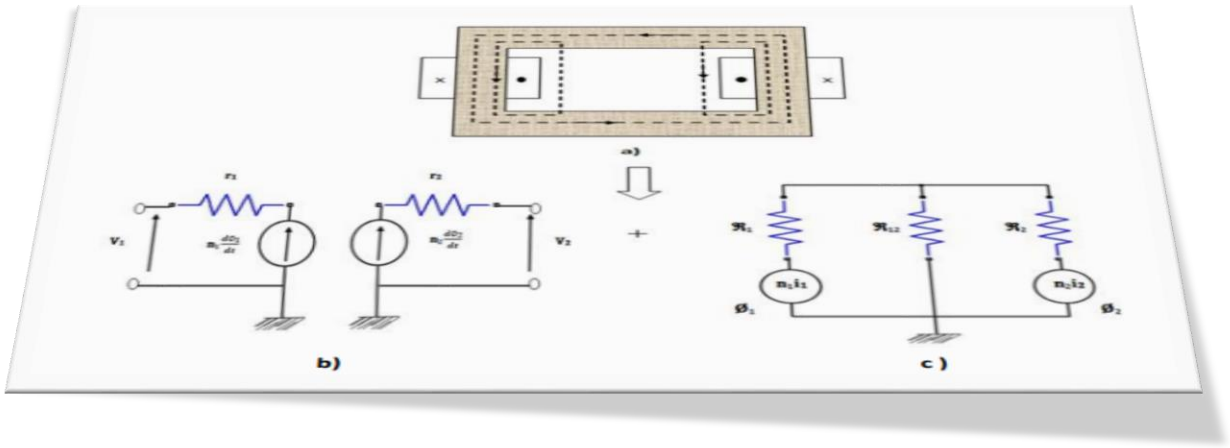
I.11 Conclusion :

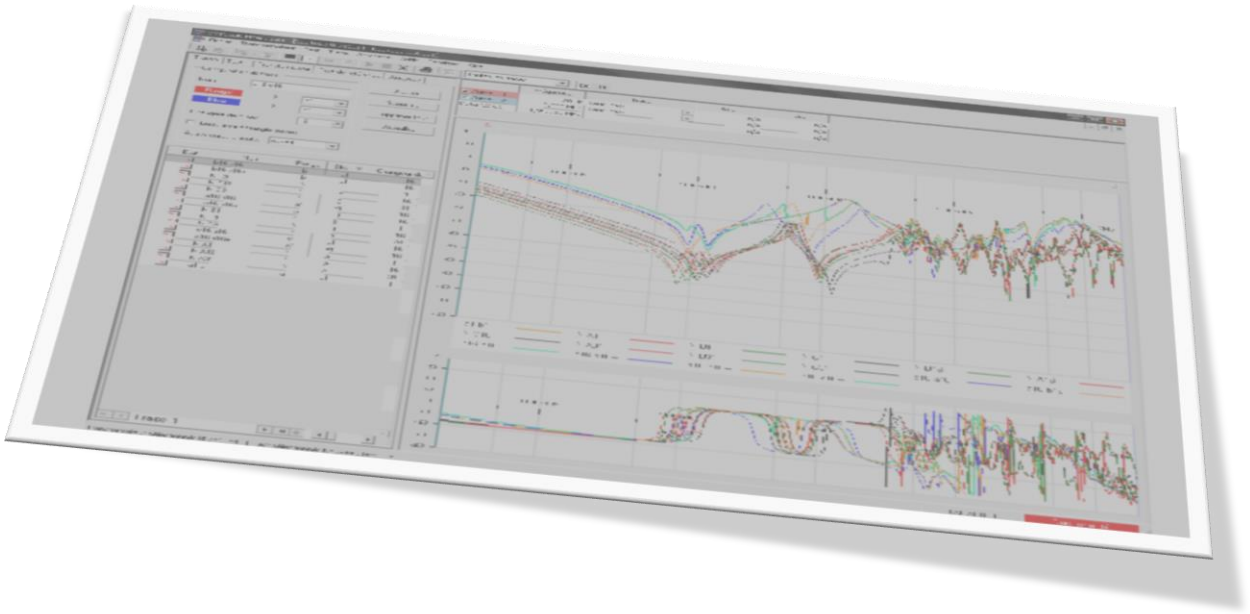
Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs de puissance, nous avons également donné un aperçu général des principaux éléments qui les composent et de leur importance dans cette machine statique.

À la fin de ce chapitre, nous avons mentionné les différentes techniques de diagnostic qui permettent de détecter les défauts des transformateurs de puissance.

Chapitre II

Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle





II.1 Introduction :

Ce chapitre est consacrée d'une part, à la présentation de la technique d'analyse fréquentielle comme outil pertinent dans le domaine de diagnostic de défaillances dans les enroulements des machines électrique particulièrement le transformateur, et d'autre part, à la présentation des principaux modèles de transformateur de puissance rencontrés dans la littérature dans l'objectif de choisir le modèle le plus approprié à notre étude.

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

II.2.1 Définition :

L'analyse de la réponse en fréquence est un outil puissant et sensible pour évaluer l'intégrité mécanique et géométrique de base, des enroulements et du circuit magnétique dans les transformateurs de puissance, par la mesure de leurs fonctions de transfert sur une large gamme de fréquences [17].

II.2.2 Principe de la méthode :

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductances et de résistances; un circuit très complexe (figure II.1) qui génère une empreinte digitale ou signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe [18].

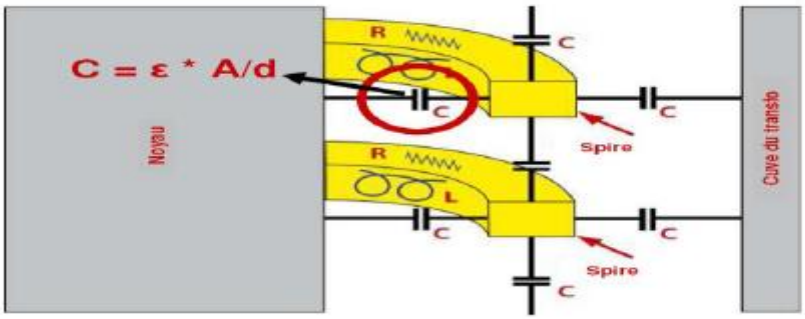


Figure II. 1 : Modèle d'un enroulement de transformateur [18].

La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs. Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances [18].

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 duquel la grandeur et la phase peuvent être obtenues[18].

II.2.3 Objectifs des mesures par FRA :

Le principal intérêt des mesures par FRA sur les transformateurs est de détecter des déformations des enroulements qui peuvent résulter des forces électromagnétiques très importantes qui s'exercent du fait des surintensités apparaissant au moment de défauts directs, de défauts dans le régleur, de mauvaises synchronisations [19].

II.2.4 Quand faut-il faire un test FRA ?

Généralement les mesures sur les transformateurs sont recommandées [20],[21]:

- Avant et après chaque transport
- Après chaque défaut à forte énergie, soit à l'intérieur du transfo ou traversant (défaut réseau proche)
- Si l'analyse des gaz dissous indique un défaut de haute température (défaut en relation avec le noyau magnétique)
- Après un séisme
- Suite à des court-circuits élevés survenant sur le réseau électrique
- Après l'installation et de réinstallation
- Après avoir connu des pannes électriques
- Essai d'usine

II.2.5 Type d'essais par FRA :

Les principaux types d'essais par FRA [22] sont :

II.2.5.1 Essais entre extrémités :

On injecte le signal tour à tour à une extrémité de chaque enroulement et l'on mesure le signal à l'autre extrémité (figure II.2) [18].

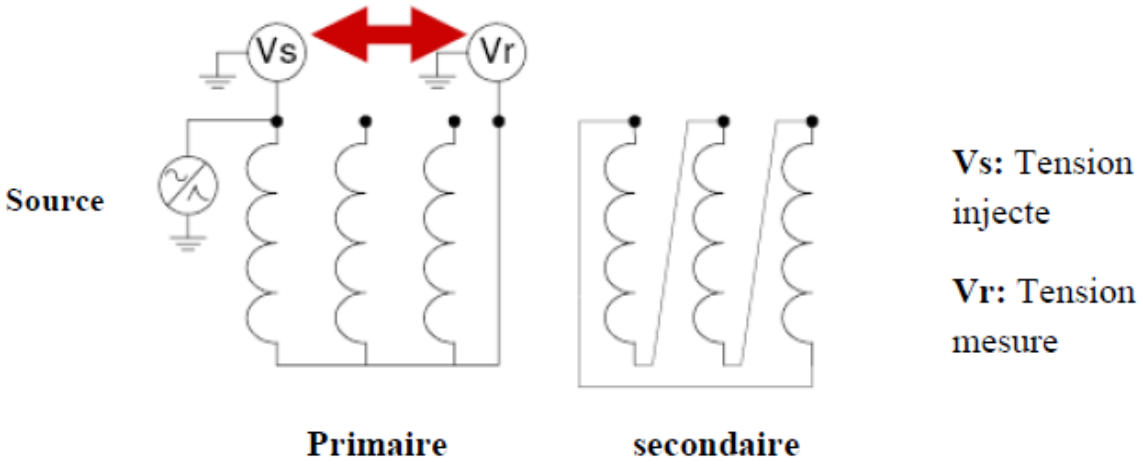


Figure II.2: Essai entre extrémités [18].

L'impédance de magnétisation du transformateur est le principal paramètre caractérisant la réponse en fréquence basse (en-dessus du premier point de résonance) quand on utilise cette configuration [18].

Cet essai est celui que l'on utilise le plus communément pour sa simplicité et la possibilité qu'il offre d'examiner séparément chaque enroulement.

II.2.5.2 Essais en court-circuit :

Cet essai ressemble à la mesure entre extrémités mais avec un enroulement court-circuite sur la même phase voir (figure II.3), de telles mesures permettent d'éliminer l'influence du noyau en dessus de 10-20 KHz environ du fait que la réponse en fréquence basse est caractérisée par l'inductance de fuite au lieu de l'inductance de magnétisation. La réponse pour des fréquences plus élèves est similaires à celle que l'on obtient en utilisant la mesure entre extrémité [18].

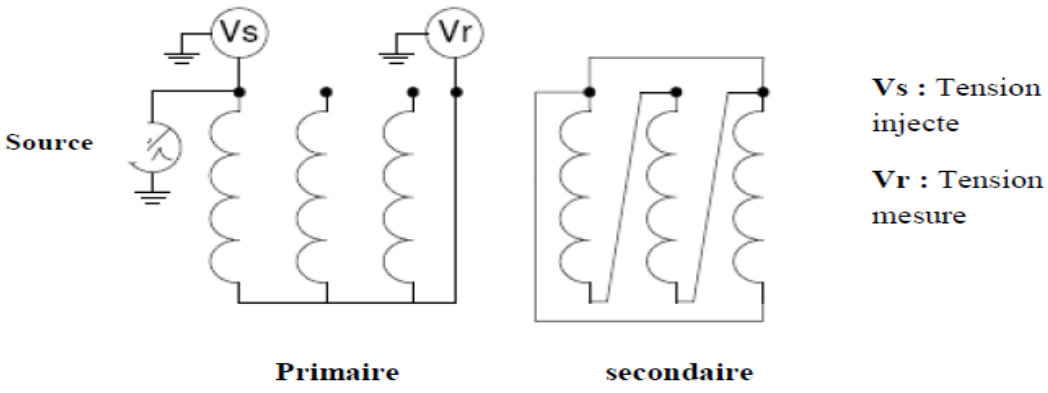


Figure II.3 : Essai en court-circuit [18].

II.2.5.3 Essai capacitif entre enroulements :

On applique le signal à une extrémité d'un enroulement et l'on mesure la réponse à une extrémité d'un autre enroulement de la même phase (non relie au premier) (figure II.4) [18],[23].

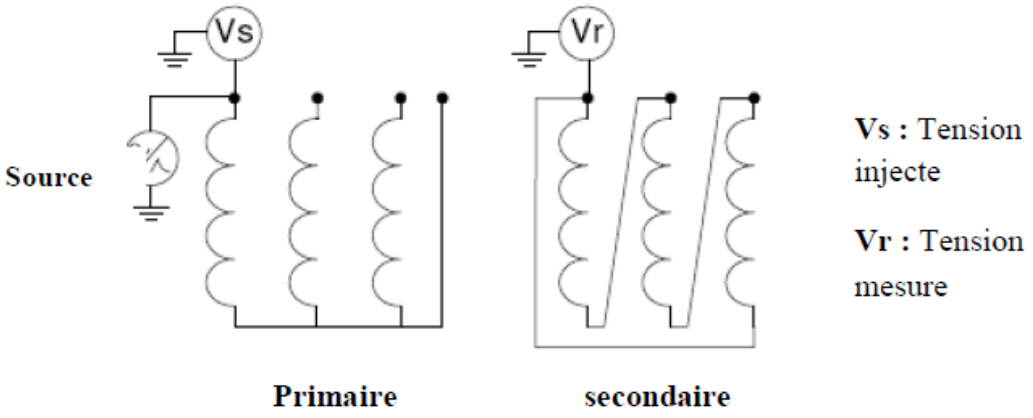


Figure II.4: Essai capacitif entre enroulements [18].

II.2.5.4 Essai inductif entre enroulements :

On injecte le signal sur une borne coté HT, et l'on mesure la réponse sur la borne correspondante coté BT, les autres extrémités des deux enroulements étant reliées à la terre (figure II.5).

Pour cette mesure, la plage en basse fréquence est déterminée par le rapport des nombres de spires des enroulements [23].

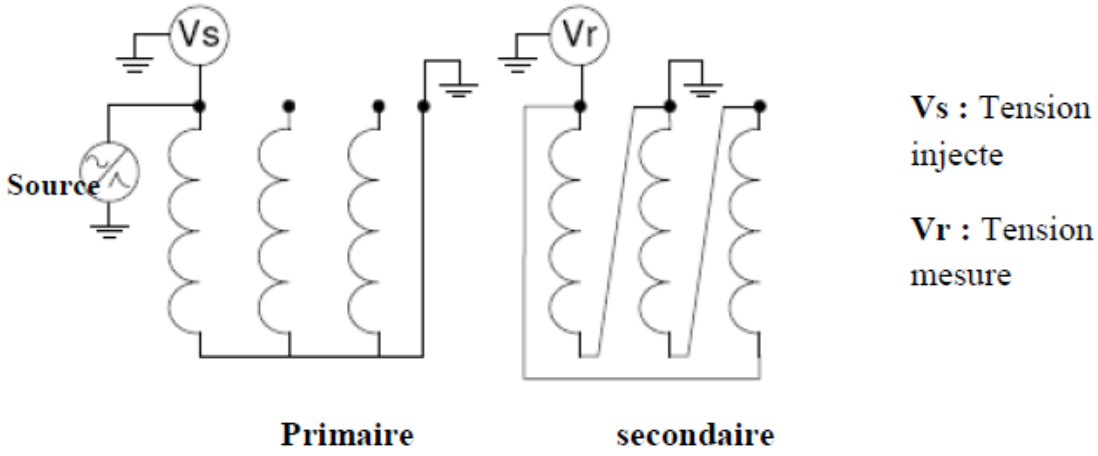


Figure II.5 : Essai inductif entre enroulements [24].

II.2.6 L'équipement de mesure :

Le matériel nécessaire pour mener une bonne mesure de l'analyse de la réponse en fréquence se compose des éléments suivants:

II.2.6.1 Le FR Analyzer :

Le FR Analyzer est un analyseur de réponse au balayage en fréquence pour le diagnostic des enroulements de transformateur de puissance. Son concept matériel universel commandé par un logiciel opérant sur un PC fait du FR Analyzer un outil efficace et d'une grande souplesse d'emploi pour le diagnostic des enroulements et des noyaux magnétiques des transformateurs de puissance [25].

Le FR Analyzer mesure la réponse en fréquence des enroulements d'un transformateur sur une large plage de fréquences et compare cette réponse à celle qu'on obtiendrait pour un enroulement en bon état. Les écarts de la réponse en fréquence permettent de révéler de nombreux types de défauts différents sur les enroulements et les noyaux magnétiques des transformateurs [25].

II.2.6.2 Connecteurs et commandes :

Le FR Analyzer présente les connecteurs et les commandes suivants [25]:

- En face avant (figure II.6):

  • Connecteur OUTPUT (sortie du signal source)

  • Connecteur REFERENCE (CH 1) (entrée du canal de référence)

  • Connecteur MEASUREMENT (CH 2) (entrée du canal de mesure)



Figure II.6 : Vue de la face avant du FR Analyzer [24].

- En face arrière (figure II.7):
  - Interrupteur d'alimentation
  - Entrée d'alimentation en courant continu
  - Borne de terre équipotentielle
  - Sortie de courant continu 5 V
  - Connecteur USB

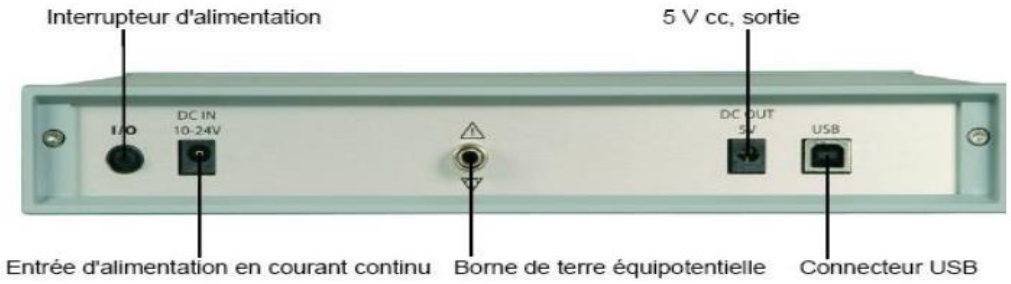


Figure II.7 : Vue de la face arrière du FR Analyzer [24].

II.2.6.3 Câbles pour les essais :

L'approche recommandée consiste à utiliser trois câbles blindes haute fréquence (ayant une impédance caractéristique connue et constante) pour les mesures de FRA : un pour l'injection de tension, un pour la mesure de la tension de référence sur la borne d'entrée et un pour la mesure de la tension de réponse. La longueur des câbles haute fréquence doit être suffisante pour atteindre les bornes alors que l'équipement d'essai est installé au pied du transformateur. Il est nécessaire d'adapter l'impédance des câbles à haute fréquence afin d'éviter les réflexions [26].

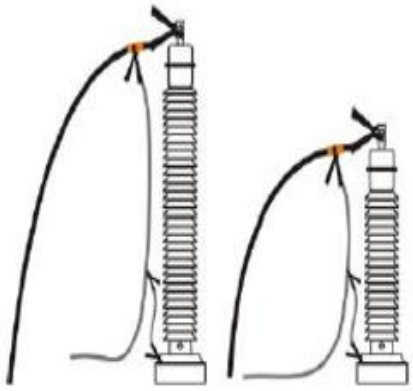


Figure II.8 : Bon raccordement à la terre [24].

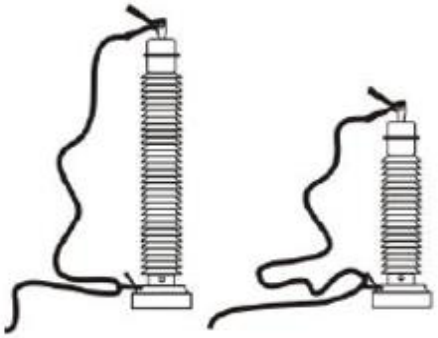


Figure II.9 : Mauvais raccordement à la terre [24].

II.2.6.4 Le logiciel d'analyse et d'interprétation :

Le logiciel de commande opère sur un PC est connecté au FR Analyzer via une interface USB, après avoir lance le logiciel la fenêtre principale se présente comme suit Figure II.10 [26].

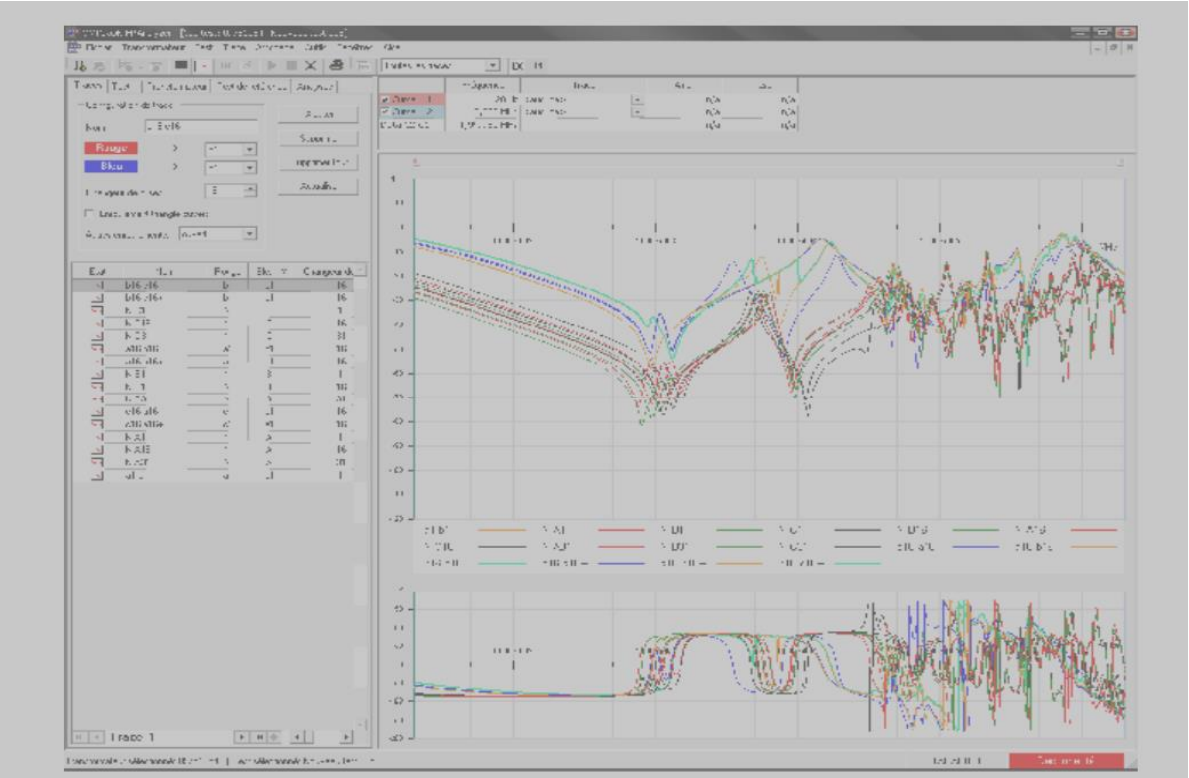


Figure II.10: Fenêtre principale du logiciel Le logiciel FR Analyzer analyse les résultats du test en calculant la différence de deux traces de test comparables [26].

II.2.7 Procédure d'essai :

L'analyse de la réponse de balayage de la fréquence des enroulements des transformateurs de puissance ne doit être entrepris que par du personnel qualifié et formé à cette tâche. La procédure se déroulera de la façon suivante [18]:

II.2.7.1 Consignation du transformateur :

Avant de raccorder un câble de test quelconque au transformateur à tester, observez toujours les règles de sécurité suivantes :

- Le transformateur à examiner doit être déconnecté du réseau électrique associé à toutes les bornes (ligne et neutre), sauf les services auxiliaires pour les changeurs, les pompes, les ventilateurs.

- Le transformateur à examiner devrait être dans son état normal de service, c'est-à-dire entièrement monté et rempli d'huile.

- De préférence le noyau de transformateur devrait être exempt de magnétisme résiduel, car le magnétisme résiduel influe sur les résultats d'essai de FRA à de basses

fréquences. Si le magnétisme résiduel est extrême, il sera nécessaire de démagnétiser le noyau avant l'essai de FRA.

- Les essais à courant continu, par exemple mesure de la résistance d'enroulement, peuvent causer le magnétisme résiduel ; par conséquent des essais de FRA devraient être réalisés avant tous les essais à courant continu.
- Ouverture des sectionneurs de barres.
- Condamnation des sectionneurs de barres en position ouverte.
- Vérification d'absence de tension.
- Mise à terre des liaisons (cordes ou câbles).
- Déconnexion des liaisons sur les bornes de traversées.
- Ne touchez aucune borne qui n'est pas visiblement connectée à la terre.
- N'ouvrez pas le boîtier du FR Analyzer.
- Ne réparez pas, ne modifiez pas et n'adaptez pas le FR Analyzer, ou les accessoires.

II.2.7.2 Mise en service du FR Analyzer :

La procédure de mise en service du FR Analyzer se déroule comme suit [25] :

- Raccordez respectivement les câbles coaxiaux jaune, rouge et bleu aux connecteurs OUTPUT, REFERENCE et MEASUREMENT du FR Analyzer (figure II.11).



Figure II.11 : Connexion des câbles coaxiaux [24].

- Raccordez le câble de terre à la borne de terre équipotentielle en face arrière du FR Analyzer, et pincez son autre extrémité à la cuve du transformateur (figure II.12).



Figure II.12 : Raccordement à la terre du FR Analyzer [24].

- Mise sous tension du FR Analyzer : Le FR Analyzer est alimenté soit par un adaptateur de courant alternatif soit par le bloc batterie.

II.2.7.3 Paramétrage des mesures grâce au logiciel FR Analyzer

Le paramétrage du FR Analyzer consiste à définir le transformateur ainsi que la mesure. Il permet aussi d'avoir une base de données pouvant contenir toutes les mesures effectuées. La préparation des mesures doit passer par les étapes suivantes [25] :

- Connexion du FR Analyzer au PC : Grâce au câble USB et au cordon d'alimentation du convertisseur USB optique.
- Démarrage du logiciel FR Analyzer.
- Ajout d'un nouveau transformateur et introduction des données :
- Constructeur
- Année de fabrication
- Puissance nominale
- Tension
- Couplage
- Emplacement physique
- Numéro de série
- Ajout d'un nouveau test et introduction des détails du test :
- Nom du test
- Testeur
- Température de l'huile
- Date et heure de l'essai
- Ajout de toutes les traces que l'on souhaite enregistrer (Une trace de test est la réponse en fréquence d'un enroulement de transformateur soumis au test).

II.2.7.4 Raccordement du FR Analyzer à un transformateur de puissance

Le raccordement du FR Analyzer au transformateur de puissance à l'essai se fait comme suit [25] :

1. Fixer une pince de mesure sur la borne de référence de traversée du transformateur.

Le choix de la borne de référence se fait comme suit :

- couplage étoile : injection sur la borne neutre **N** à travers les deux câbles (rouge et jaune).
- couplage triangle : injection sur une phase à travers les deux câbles (rouge et jaune).

2. Raccorder les câbles coaxiaux jaune et rouge via un adaptateur BNC livré au connecteur BNC de la pince (figure II.13).



Figure II.13 :.Raccordement de la pince pour borne de traversée aux câbles coaxiaux jaunets rouge [24].

3. Raccorder les tresses en aluminium à la pince pour borne de traversée à l'aide des visse trouvant sur la pince et serrer les vis à fond (figure II.14).

Si nécessaire, utiliser la gaine isolante livrée pour éviter tout contact électrique entre la tresse en aluminium et le transformateur.



Figure II.14 : Serrage de la pince à visser [24].

4. Raccorder les tresses en aluminium à la cuve de transformateur en utilisant les pinces à vis.

Assurez-vous que toutes les pinces et les tresses sont vissé à fond et qu'il existe un contact électrique entre les pinces et la cuve du transformateur. En cas de doute, décapez la couche de vernis à l'aide de la lime livrée.

5. Fixer une autre pince sur la borne de mesure de traversée du transformateur.

6. Raccorder le câble coaxial bleu au connecteur BNC sur la pince pour borne de traversée (figure. II.15)



Figure II.15 : Raccordement de la pince pour borne de traversée au câble coaxial bleu [24].

7. Pour mettre à la terre la pince pour borne de traversée de mesure, répéter les étapes 3 et 4.

II.2.8 Méthodes d'interprétation :

II.2.8.1 Interprétation Méthodologique :

La FRA est une méthode comparative pour évaluer l'état des transformateurs de puissance. Pour évaluer les résultats de FRA, on compare, généralement par une simple observation visuelle des courbes, les informations actuelles avec les informations de référence [27].

Il ya trois approches pour obtenir des informations de références :

- Mesures préalables sur le même transformateur (Empreinte digitale)
- Mesures sur des transformateurs identiques (Jumeaux)
- Mesures sur des phases d'un même transformateur testes séparément

II.2.8.2 Domaine de fréquence pour les interprétations :

Le Tableau II-1 montre le domaine d'interprétation de FRA compte tenu des limites venant de la géométrie des installations d'essai et de certaines conditions d'incertitude liées à des flux rémanents [19],[27].

En règle générale, les spires court-circuitées, l'aimantation et d'autres défauts reliés au noyau magnétique altèrent la forme de la courbe aux basses fréquences. Les moyennes fréquences quant à elles représentent des mouvements axiaux ou radiaux de l'enroulement, et les hautes fréquences indiquent des défauts quant aux câbles qui relient les enroulements aux traversées et aux changeurs de prise [19].

Tableau. II-1 : Domaines typiques d'interprétation de FRA [19].

f < 2000 Hz	Déformations du noyau, magnétisme résiduel
2000 Hz < f < 20 kHz	Court-circuit entre spires, circuits ouverts.
20kHz < f < 200 kHz	Déplacements relatifs entre les enroulements.
200kHz < f < 2 MHz	Deformations propres d'enroulment.
2 MHz < f < 10 MHz	Disposition de couplages et câbles de mesure.

II.3 Modélisation de transformateur de puissance triphasé:

II.3.1 Modélisation en haute fréquence :

En HF, on néglige l'effet non linéaire du noyau de fer, mais la modélisation du transformateur reste plus complexe par rapport à celle de 50 Hz. En raison de plusieurs phénomènes à savoir [28] :

- 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.

II.3.2 Les modèles usuels des transformateurs :

Dans ce chapitre on va représenter les modèles et les méthodes les plus fréquents dans le domaine haut fréquence.

II.3.2.1 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 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 [29].

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 [30].

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 [30].

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.

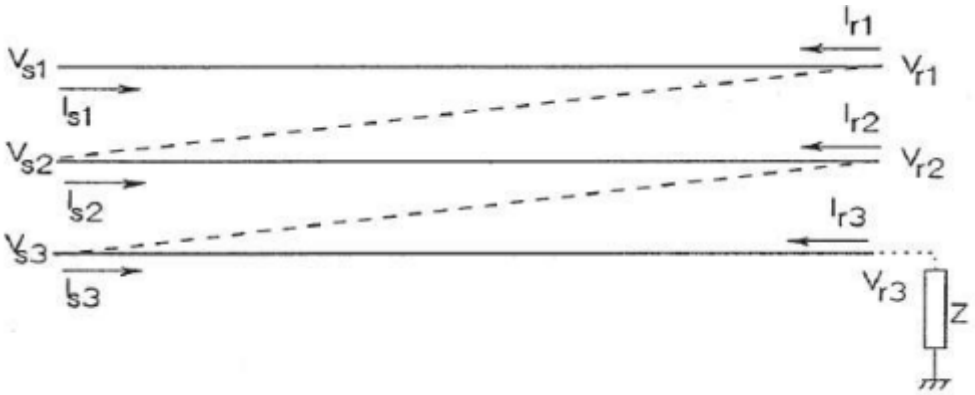


Figure II.16 : Schéma équivalent d'un enroulement [29].

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.17). La détermination des paramètres n'est pas aisée (impédance caractéristique de la ligne équivalente au transformateur,...) [30].

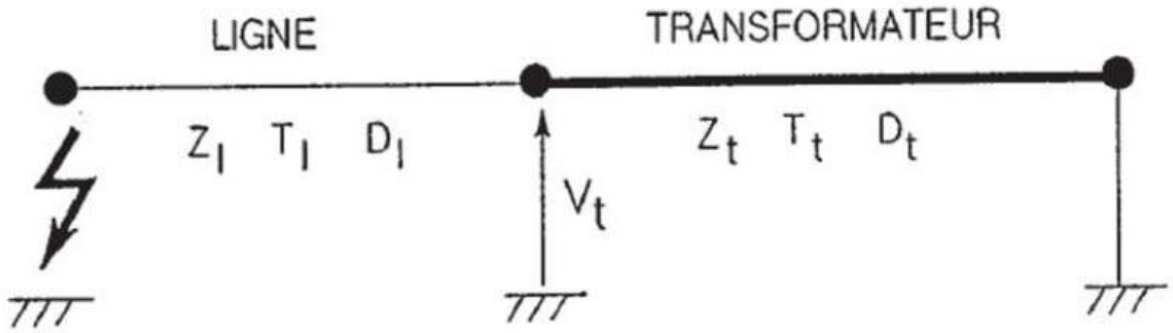


Figure II.17: Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique [29].

II.3.2.2 Modélisation par des circuits ou des transformées :

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 [31].

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

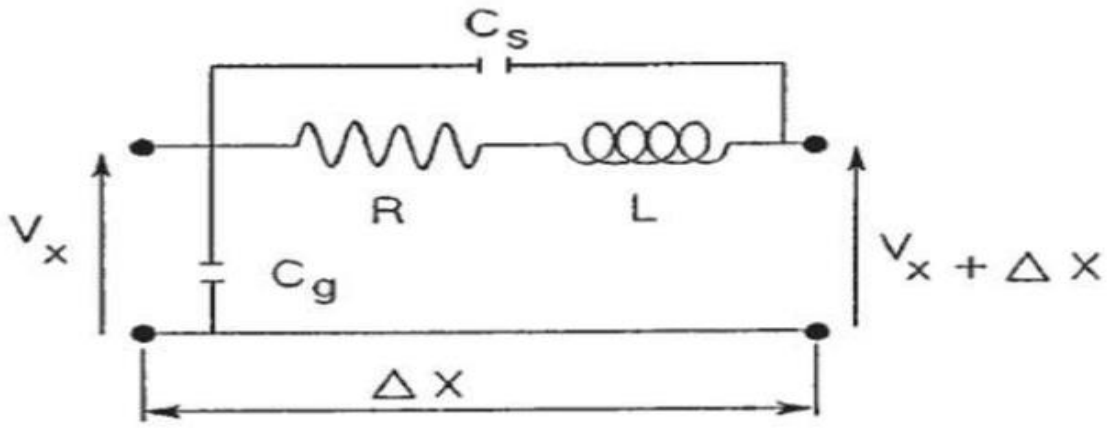


Figure II.18 : Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section de longueur ΔX [29].

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 [31].

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), 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.19).Il est évident que le calcul des paramètres de ce modèle se fait par la voie de mesure de la fonction de transfert [31].

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

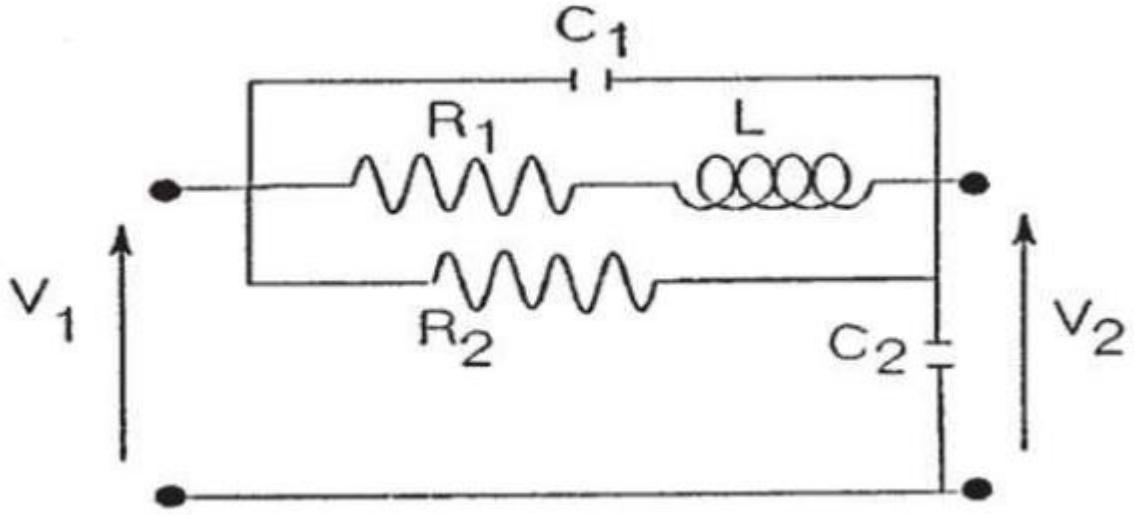


Figure II.19: Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert du transformateur ayant une seule fréquence de résonance [31].

II.3.2.3 Modélisation par inductances propres et mutuelles :

On peut assimiler le comportement de l‘enroulement soumis à une onde de choc à celui d‘un système de condensateurs et d‘inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances inductances et condensateurs (paramètres concentrés ou répartis), selon l‘étude envisagée. Le cout et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement atteint dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques des simulations mises en œuvre. On discrétise le transformateur par spires ou galettes ou par des bobinages que l‘on appellera élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres inductances. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse [31].

L‘avantage de ce modèle réside dans la simplicité de sa mise en ouvre puisqu‘il peut être traité d‘une manière simple grâce à la théorie des réseaux électriques. Son inconvénient est le nombre important des paramètres à calculer. C‘est ce modèle qu‘est dans la mesure de notre possible afin d‘étudier le transformateur à HF [32].

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

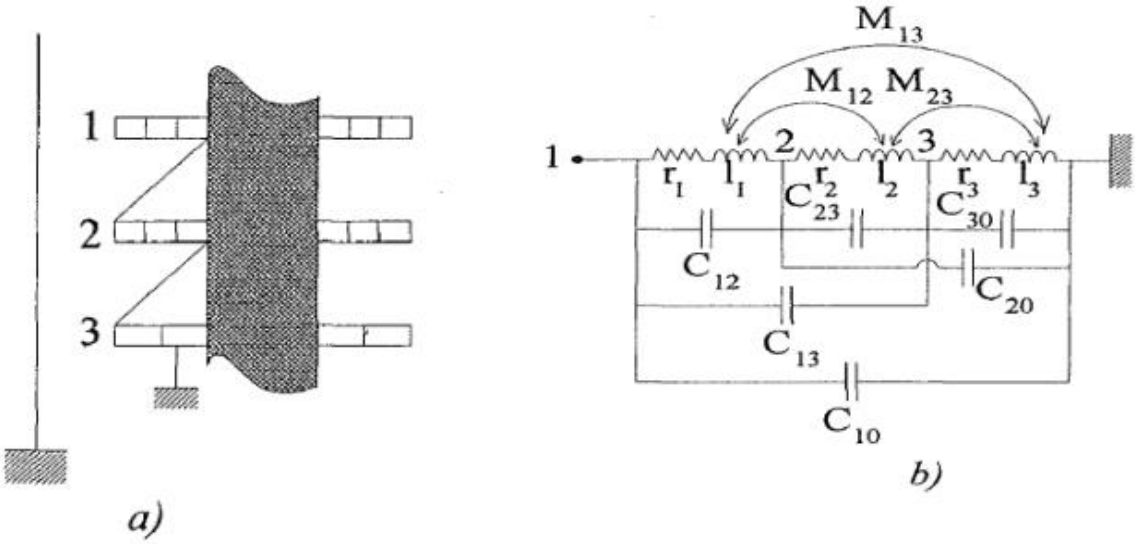


Figure II.20 : Représentation d'un enroulement [32].

II.3.2.4 Modèle de 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 résistances, capacités et forces électromotrices [33].

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 [33].

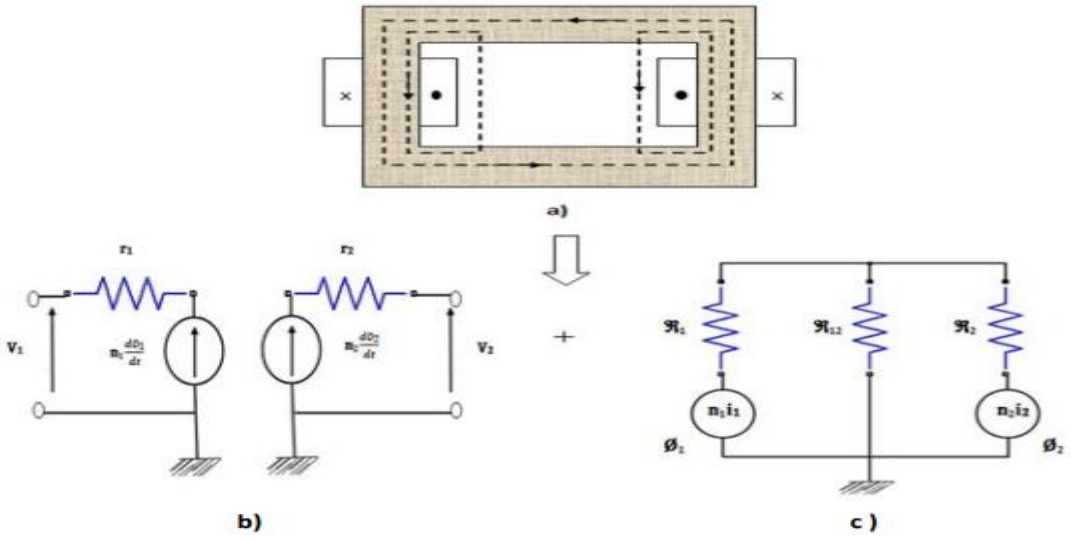


Figure II. 21 : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL [1].

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

b) Le circuit électrique correspondant.

c) Le circuit magnétique correspondant.

II.3.2.5 Modèle d'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 [34].

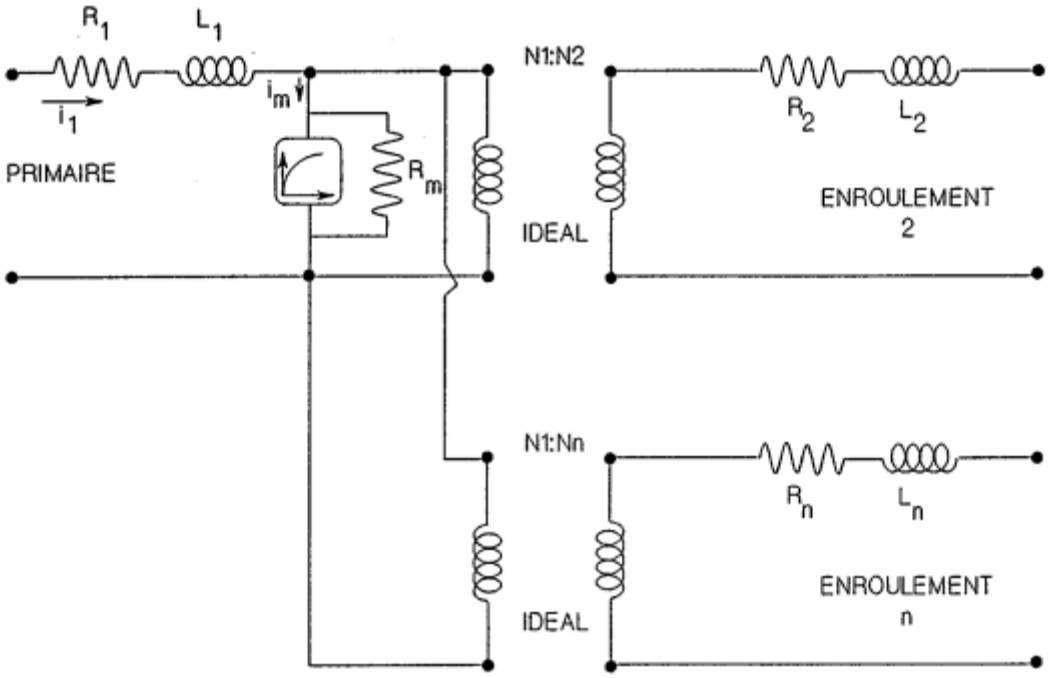


Figure II.22 : Modèle EMTP pour un transformateur monophasé à n enroulements [34].

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 [34].

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 [34].

II.3.2.6 Modèle équivalent en ɪɪ du transformateur en HF :

La structure de ce modèle est basée sur la théorie du quadripôle en π. Elle établit la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes d'entrée et de la sortie d'une phase du transformateur, les impédances obtenues sont exploitées pour construire un modèle en du transformateur [1], [35].

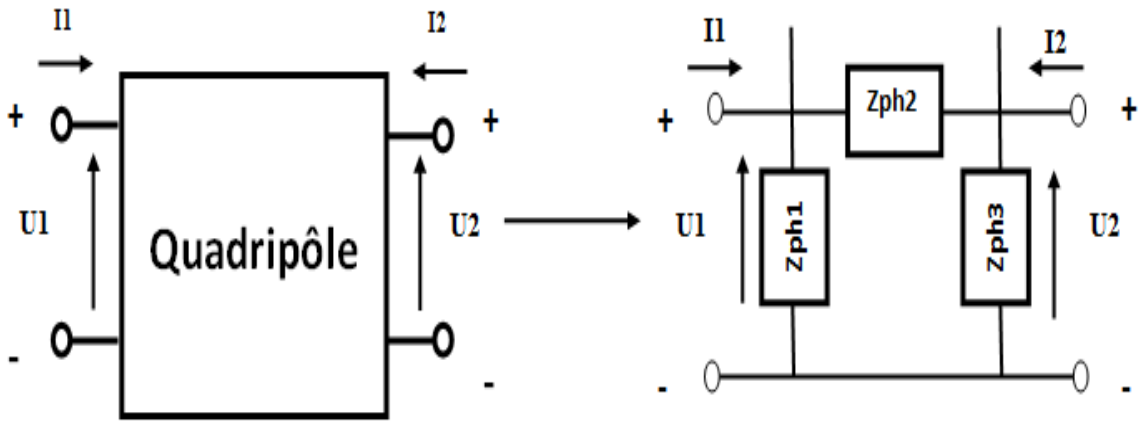


Figure II.23 : Structure de modèle d'un quadripôle [1].

Le circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases est montré dans la figure. II.24.

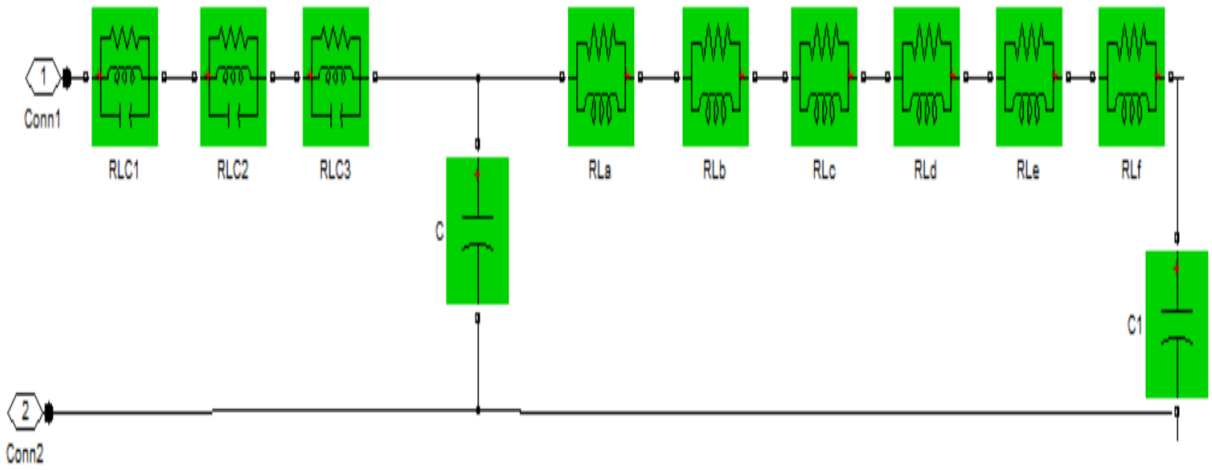


Figure II.24 : Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases.

II.4 Conclusion :

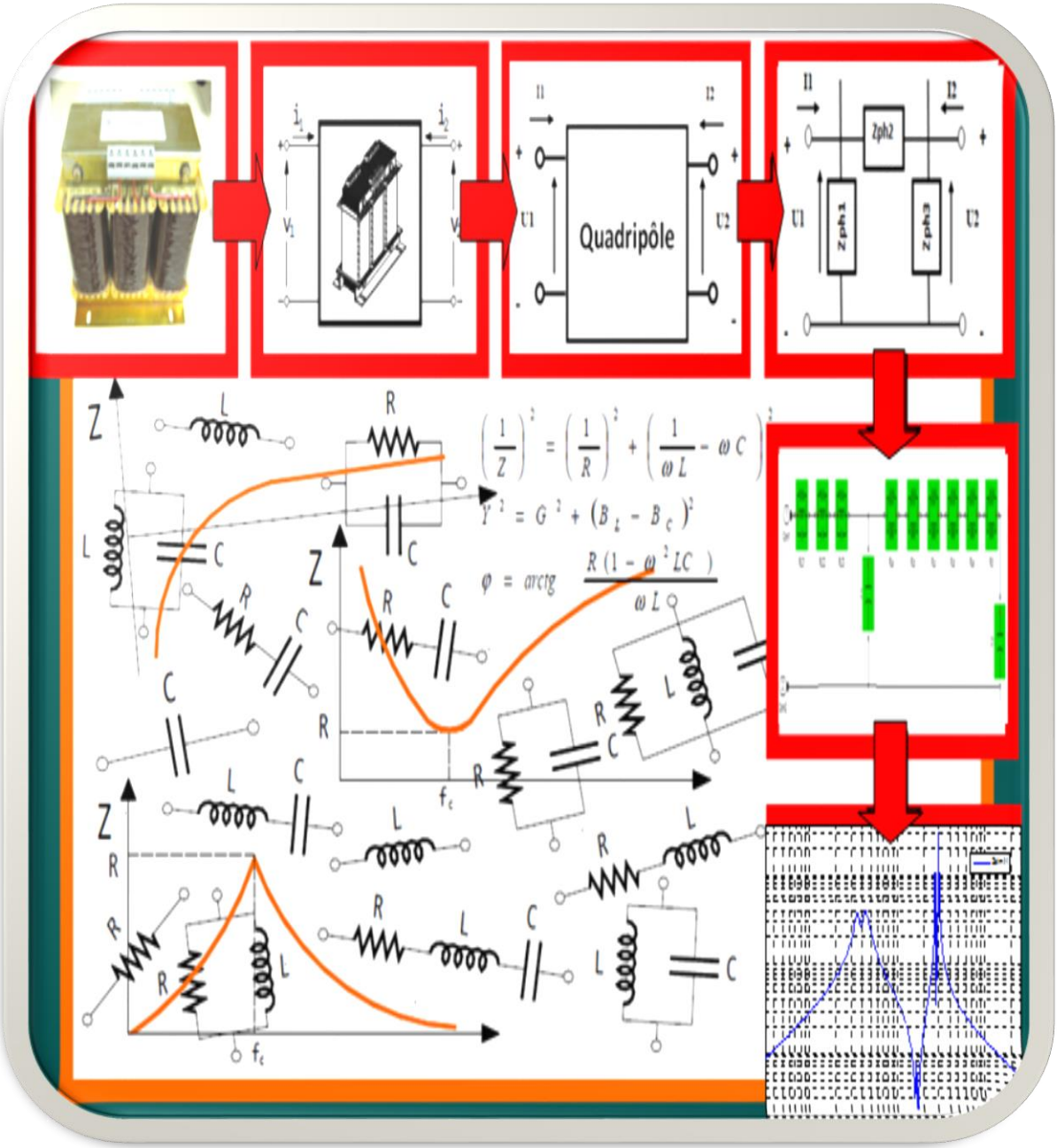
Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général de la modélisation des transformateurs de puissance, en régimes hautes fréquences (HF).

Le modèle que nous avons jugé plus approprié à notre étude est celui basé sur la théorie du quadripôle, car il permet d'établir la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes d'entrée et la sortie d'une phase du transformateur, et les impédances constituant un quadripolaire de type π.

Dans le chapitre suivant on s'intéressera à la méthodologie d'identification et de calcul des paramètres du modèle adopté, ainsi que son exploitation pour le diagnostic de défaillance dans les enroulements du transformateur.

Chapitre III

Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF



III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéressera à la modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF, elle est basée sur le calcul des impédances de chacune des phases dans une gamme de fréquences 0-200000 Hz, afin d'identifier les paramètres du modèle proposé.

Le modèle le plus approprié pour notre étude est le modèle équivalent en π du transformateur en HF à base d'une branche RLC parallèle, pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

III.2 Objectifs :

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- Présenter le modèle équivalent en π du transformateur en HF adopté en tenant compte des équations mathématiques du schéma équivalent.
- Détecter, classifier et localiser des défauts résistifs dans un enroulement de transformateur triphasé par l'observation de la variation entre les grandeurs simulées par rapport à une signature de référence d'un enroulement sain.
- Optimiser l'allure de la réponse en fréquence des différentes phases en haute fréquence (HF), en utilisant l'algorithme d'ABC.

III.3 Simulation :

III.3.1 Logiciel utilisé :

La simulation a été réalisée par le logiciel « Matlab-Simulink » avec Power Système Toolbox [15].

MATLAB (Matrix Laboratory) , est une application qui a été conçue afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et portable, permettant la mise en œuvre des algorithmes développes dans le cadre des projets linpack et eispack.

MATLAB est constitué d'un noyau relativement réduit, capable d'interpréter puis d'évaluer les expressions numériques matricielles.

Simulink est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes [15].

III.3.1.1 Ecran de base :

L'écran de base comprend l'écran (fenêtre) de contrôle ainsi que des fenêtres complémentaires permettant de suivre le fonctionnement général d'une application [15].

III.3.1.2 Simulink :

Le Toolbox Simulink est une fonction lancée depuis Matlab qui donne accès à une description graphique des problèmes avec application au traitement du signal, l'automatique classique, la logique floue. ..Etc. [15].

III.3.2 Version utilisée :

Matlab R2012a (7.14.0.739).

III.4 Description du modèle approuvé :

Cette partie présente une étude de la configuration proposée, ainsi que la détermination des valeurs des paramètres pour chaque branche. Cette dernière est réalisée sous MATLAB Simulink avec des fréquences allant de 0Hz à 200000Hz.

Le modèle équivalent en π du transformateur en HF contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur (Dans notre cas on va injecter un défaut résistif).

III.4.1 Modèle simplifié en π du transformateur en HF :

Le schéma bloc de notre modèle réalisé par le logiciel Matlab. Le modèle décrit dans la figure (III.1) est destiné à fournir un outil pour la simulation et l'analyse du comportement des transformateurs. Le modèle est basé sur la réponse en fréquence de l'impédance du transformateur.

Le circuit équivalent de chaque phase est présenté dans la figure (III.2).

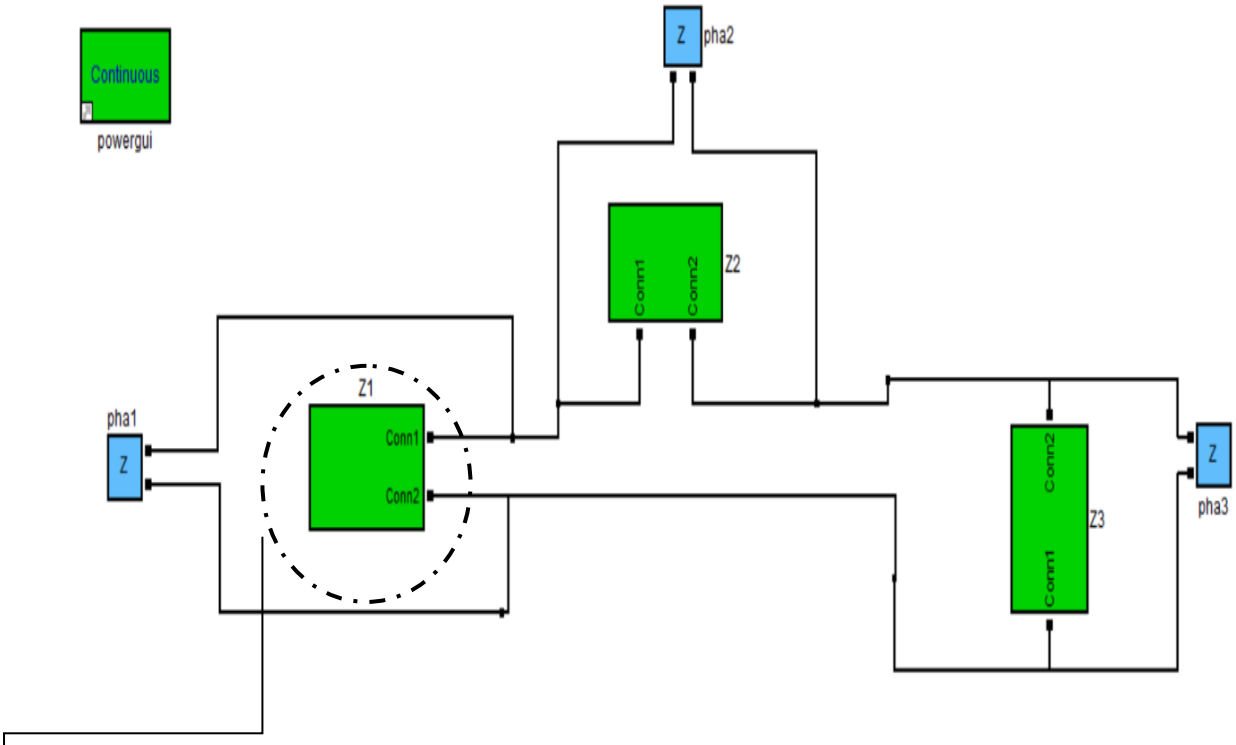


Figure III.1 : Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé.

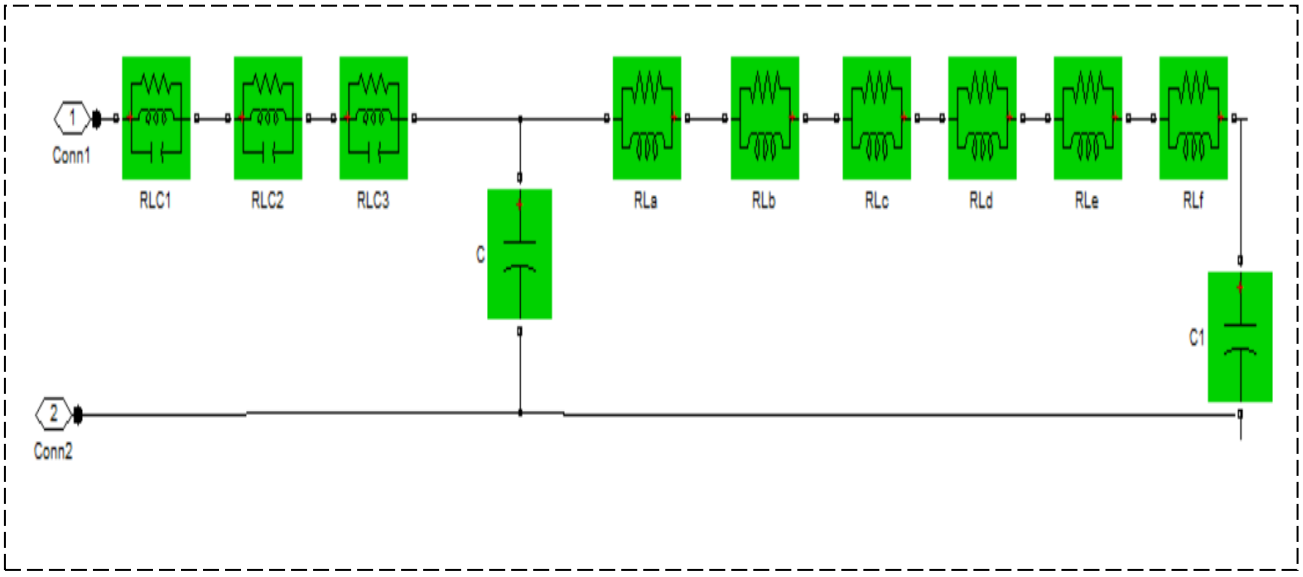


Figure III.2 : Le circuit équivalent de chaque phase.

III.4.2 Paramètres de simulation :

Le tableau.III.1 indique les paramètres de simulation de chaque phase.

Tableau III.1 : Paramètres de simulation.

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase3**
Fréquence (Hz)	[0 200000]	[0 200000]	[0 200000]
Le pas	10	10	10
R1 (ohm)	$2.4*10^{6}$	$12.124*10^{6}$	$2.4*10^{6}$
L1 (H)	183.1504	399.8045	183.1504
C1 (F)	$0.7452*10^{-9}$	$0.6648*10^{-9}$	$0.7452*10^{-9}$
R2 (ohm)	$2.4*10^{6}$	$12.124*10^{6}$	$2.4*10^{6}$
L2 (H)	183.1504	399.8045	183.1504
C2 (F)	$0.7452*10^{-9}$	$0.6648*10^{-9}$	$0.7452*10^{-9}$
R3 (ohm)	$2.4*10^{6}$	$12.124*10^{6}$	$2.4*10^{6}$
L3 (H)	183.1504	399.8045	183.1504
C3 (F)	$0.7452*10^{-9}$	$0.6648*10^{-9}$	$0.7452*10^{-9}$
C (F)	$0.1186*10^{-9}$	$0.1170*10^{-9}$	$0.1186*10^{-9}$
Ra (ohm)	$11.69*10^{6}$	$10.154*10^{6}$	$11.69*10^{6}$
La (H)	4.0227	5.5128	4.0227
Rb (ohm)	$11.69*10^{6}$	$10.154*10^{6}$	$11.69*10^{6}$
Lb (H)	4.0227	5.5128	4.0227
Rc (ohm)	$11.69*10^{6}$	$10.154*10^{6}$	$11.69*10^{6}$
Lc (H)	4.0227	5.5128	4.0227
Rd (ohm)	$11.69*10^{6}$	$10.154*10^{6}$	$11.69*10^{6}$
Ld (H)	4.0227	5.5128	4.0227
Re (ohm)	$11.69*10^{6}$	$10.154*10^{6}$	$11.69*10^{6}$
Le (H)	4.0227	5.5128	4.0227
Rf (ohm)	$11.69*10^{6}$	$10.154*10^{6}$	$11.69*10^{6}$
Lf (H)	4.0227	5.5128	4.0227
C1 (F)	$0.1186*10^{-3}$	$0.1170*10^{-3}$	$0.1186*10^{-3}$

III.4.3 Simulation de l'impédance Zsiml1:

L'impédance Zsiml1 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.3.

$$Z_{siml1} = Z_{ph1} \| (Z_{ph2} + Z_{ph3}) = \frac{Z_{ph1} * (Z_{ph2} + Z_{ph3})}{Z_{ph1} + Z_{ph2} + Z_{ph3}} \quad \text{(III.1).}$$

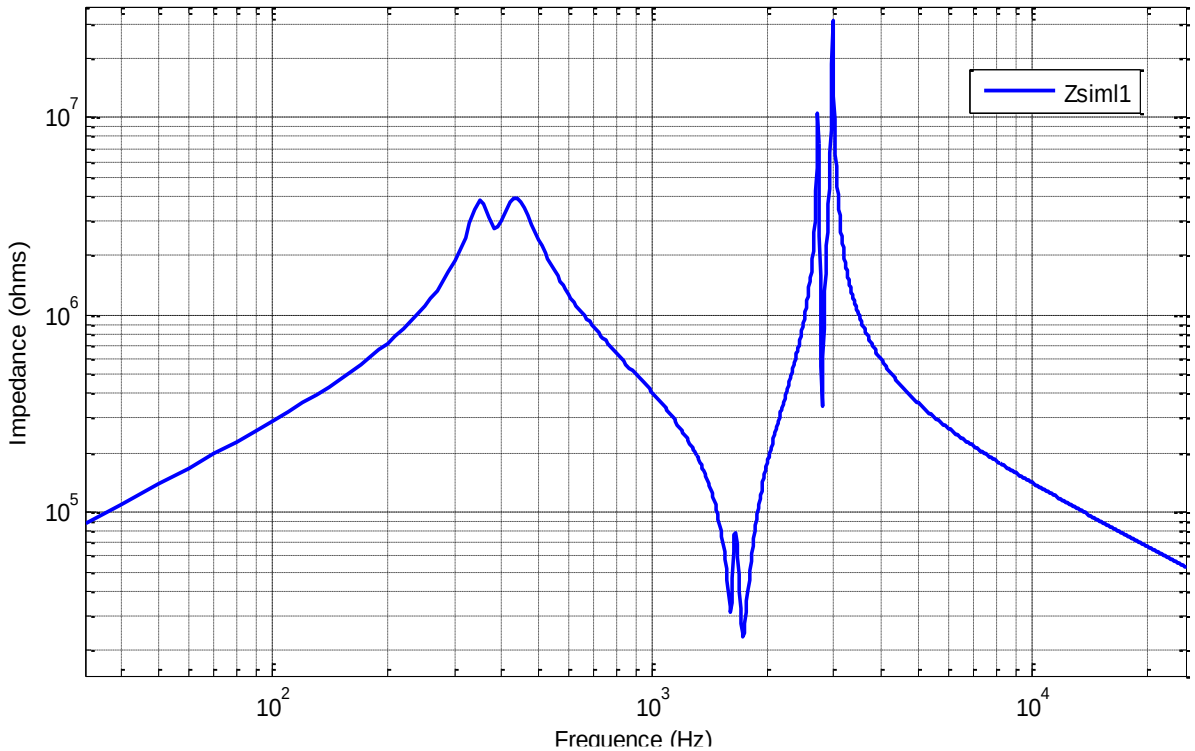


Figure III.3 : Module d'impédance Zsiml1 en fonction de la fréquence.

III.4.4 Simulation de l'impédance Zsiml2 :

L'impédance Zsiml2 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.4.

$$Z_{siml2} = Z_{ph2} \| (Z_{ph1} + Z_{ph3}) = \frac{Z_{ph2} * (Z_{ph1} + Z_{ph3})}{Z_{ph1} + Z_{ph2} + Z_{ph3}} \quad \text{(III.2).}$$

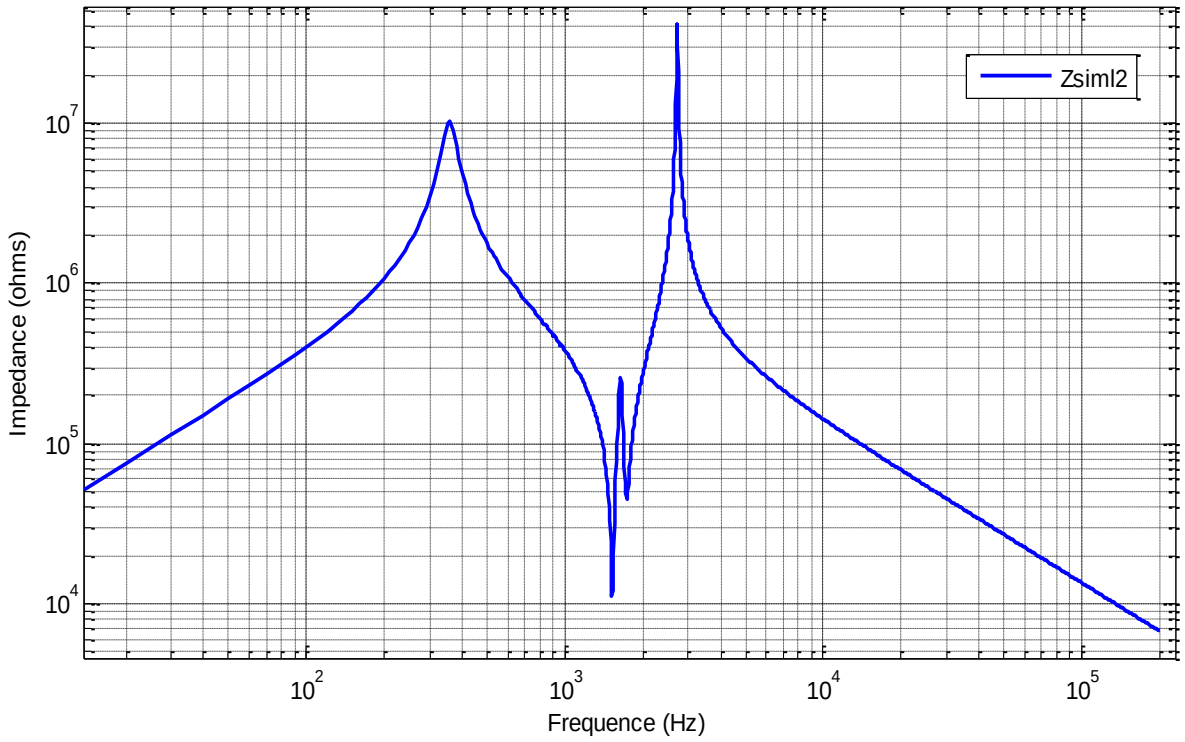


Figure III.4 : Module d'impédance Zsiml2 en fonction de la fréquence.

III.4.5 Simulation de l'impédance Zsiml3 :

L'impédance Zsiml3 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.5.

$$Z_{siml3} = Z_{ph3} \| \left(Z_{ph1} + Z_{ph2}\right) = \frac{Z_{ph3} * (Z_{ph1} + Z_{ph2})}{Z_{ph1} + Z_{ph2} + Z_{ph3}} \qquad \text{(III.3).}$$

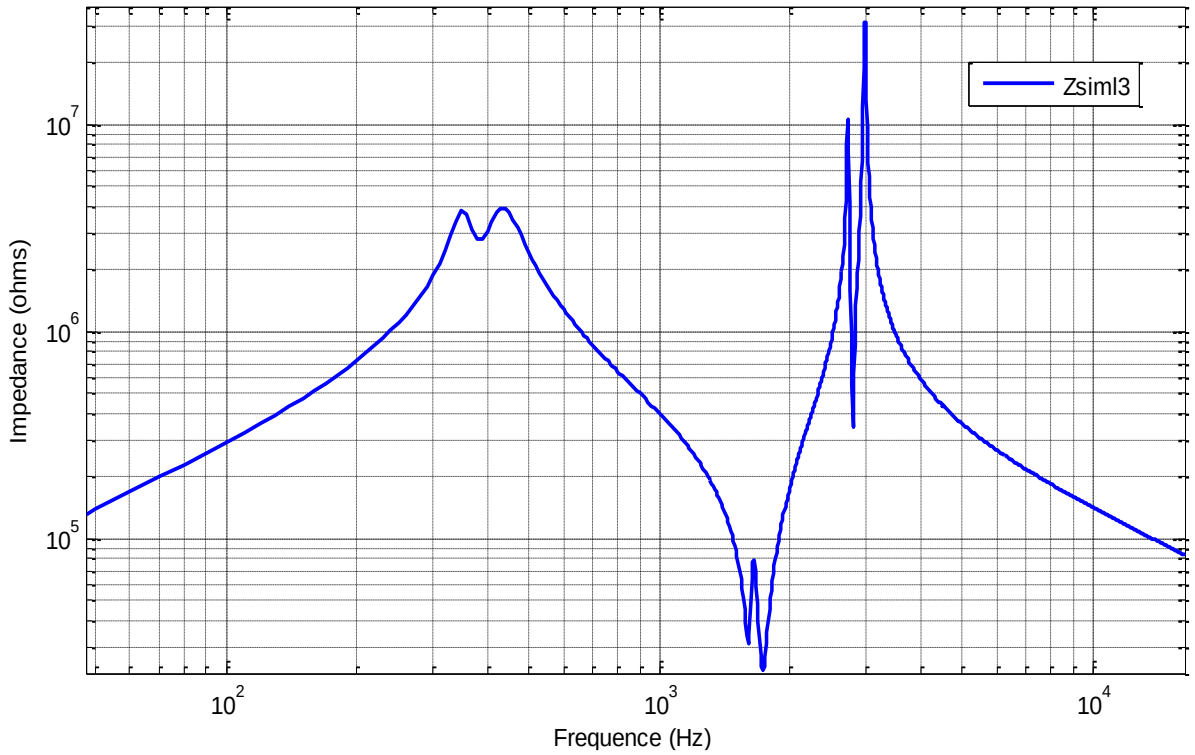


Figure III.5 : Module d'impédance Zsiml3 en fonction de la fréquence.

III.4.6 Estimation des paramètres du modèle RLC pour chaque phase *:*

Le pic de résonance de l'impédance du modèle est simulé par une seule branche RLC parallèle dans une bande passante donnée [1], [13].

La courbe de résonance [25] est simulée par une branche RLC parallèle, où la pente positive est montrée par le comportement inductif de L, la pente négative est principalement représentée par le comportement capacitif C et le pic de résonance est la valeur du paramètre R, représenté sur la figure III.6.

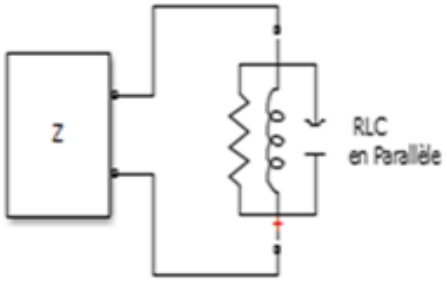


Figure III.6 1 : Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur.

Les paramètres RLC sont déterminés en utilisant les équations (III.4 - III.6).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y_{(\omega_i)}|^2}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{G_X(\omega_i)}{|Y(\omega_i)|^2}} \quad \text{(III.4).}$$

$$L = \frac{(\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2})^2 - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2})}{(\sum_{i=1}^{m} \frac{B_X}{\omega * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2}) - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{B_X * \omega}{|Y|^2})} \quad \text{(III.5).}$$

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^{m} \frac{-B_X * \omega}{|Y|^2} * (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2}) + (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{B_X}{\omega * |Y|^2})}{(\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2})^2 - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2})} \quad \text{(III.6).}$$

III.4.6.A Calcul de La fonction objective (l'admittance de chaque cellule RLC parallèle) :

La méthode d'estimation analytique commence à établir l'admittance caractéristique de chaque phase.

La fonction objective est alors définie par (III.7).

$$\frac{1}{Z_{ph_x}} = Y_{ph_x} = G_x + j * (\omega_x * C_x - \frac{B_{Lx}}{\omega_x}) \quad \text{(III.7).}$$

Avec:

$$G_x = \frac{1}{R_{ph_x}}; \quad B_{L_x} = \frac{1}{L_{ph_x}}; B_x = (\omega_x * C_x - \frac{B_{Lx}}{\omega_x})$$

Où : G_x et B_x sont les parties réelle et imaginaire de la courbe d'admittance à chaque point de fréquence respectivement.

III.4.7 Estimation de l'impédance Zestm1 :

L'impédance Zestm1 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.7.

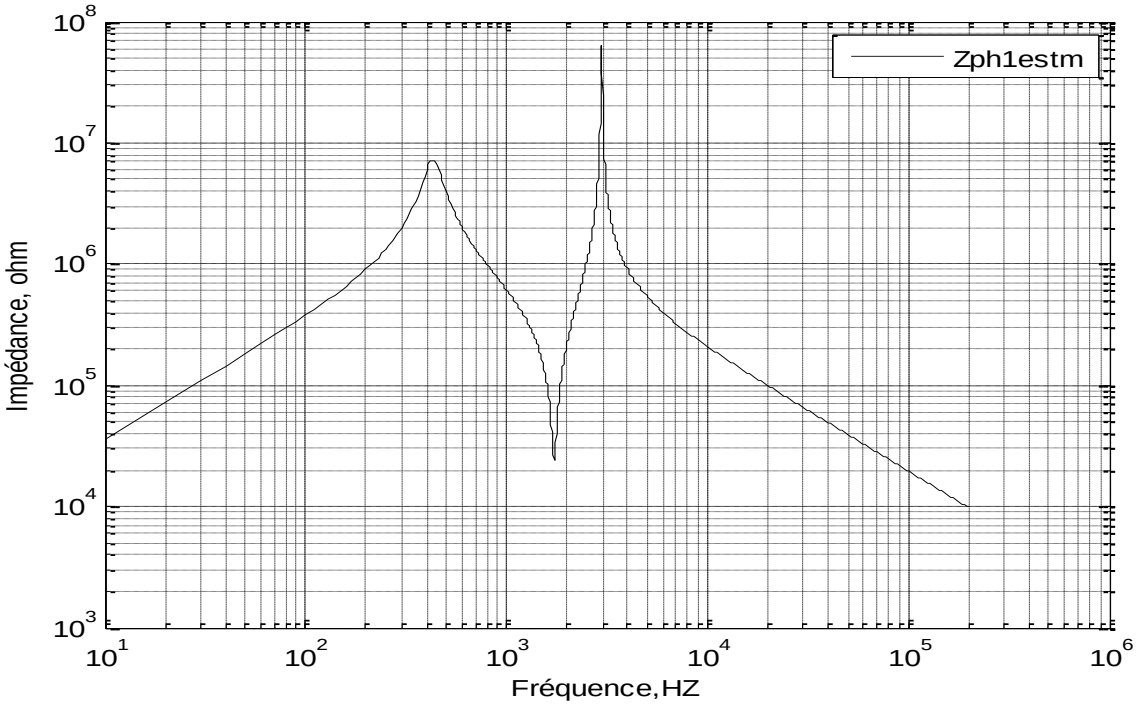


Figure III.7 : Module d'impédance Zestm1 en fonction de la fréquence.

Le système d'équation de l'impédance Zestm1 est donné par l'équation (III.8) [42].

$$Z_{estm1}=\frac{Z_{siml1}^2+Z_{siml2}^2+Z_{siml3}^2-2*(Z_{siml1}*Z_{siml2}+Z_{siml1}*Z_{siml3}+Z_{siml2}*Z_{siml3})}{2*(Z_{siml1}-Z_{siml2}-Z_{siml3})} \quad \text{(III.8).}$$

III.4.8 Estimation de l'impédance Zestm2 :

L'impédance Zestm2 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.8.

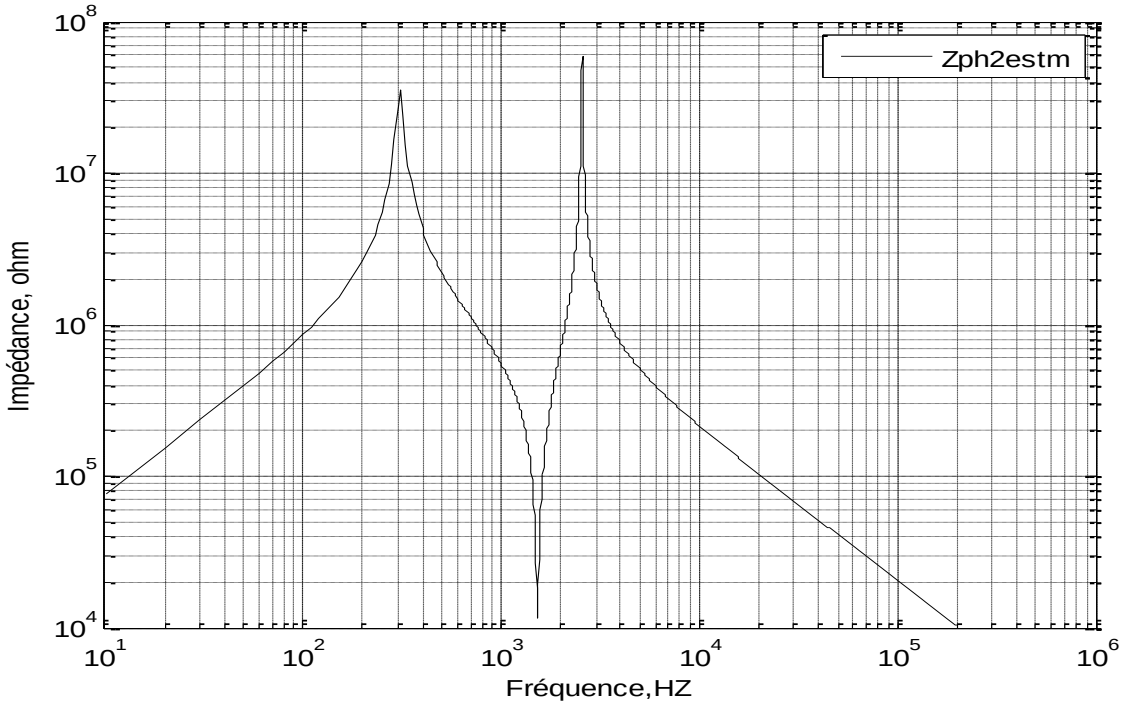


Figure III.8 : Module d'impédance Zestm2 en fonction de la fréquence.

Le système d'équation de l'impédance Zestm1 est donné par l'équation (III.9) [42].

$$Z_{estm2} = \frac{Z_{siml1}^2 + Z_{siml2}^2 + Z_{siml3}^2 - 2*(Z_{siml1}*Z_{siml2} + Z_{siml1}*Z_{siml3} + Z_{siml2}*Z_{siml3})}{2*(Z_{siml2} - Z_{siml1} - Z_{siml3})} \quad \text{(III.9).}$$

III.4.9 Estimation de l'impédance Zestm3 :

L'impédance Zestm3 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.9.

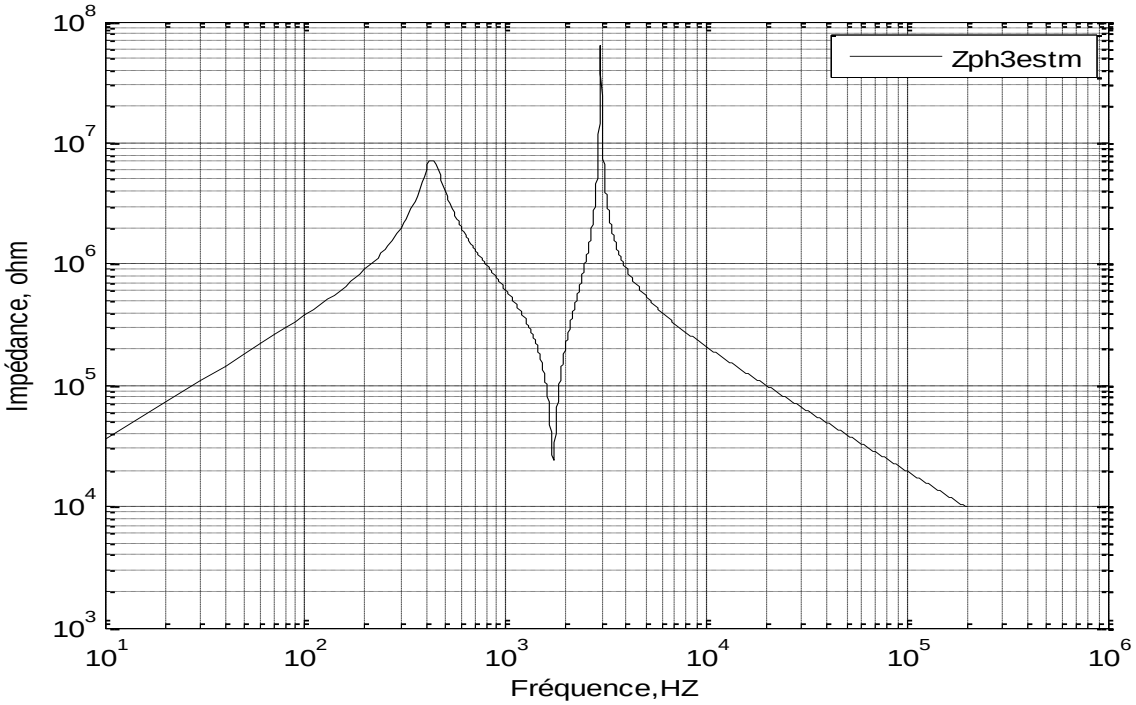


Figure III.9 : Module d'impédance Zestm3 en fonction de la fréquence.

Le système d'équation de l'impédance Zestm1 est donné par l'équation (III.10) [42].

$$Z_{estm3}=\frac{Z_{siml1}^2+Z_{siml2}^2+Z_{siml3}^2-2*(Z_{siml1}*Z_{siml2}+Z_{siml1}*Z_{siml3}+Z_{siml2}*Z_{siml3})}{2*(Z_{siml3}-Z_{siml1}-Z_{siml2})} \quad \text{(III.10).}$$

Les résultats des réponses (Zmodl) simulées et les réponses (Zestm) estimées en fonction des fréquences obtenues sont représentés sur les figures (III.10– III.12).

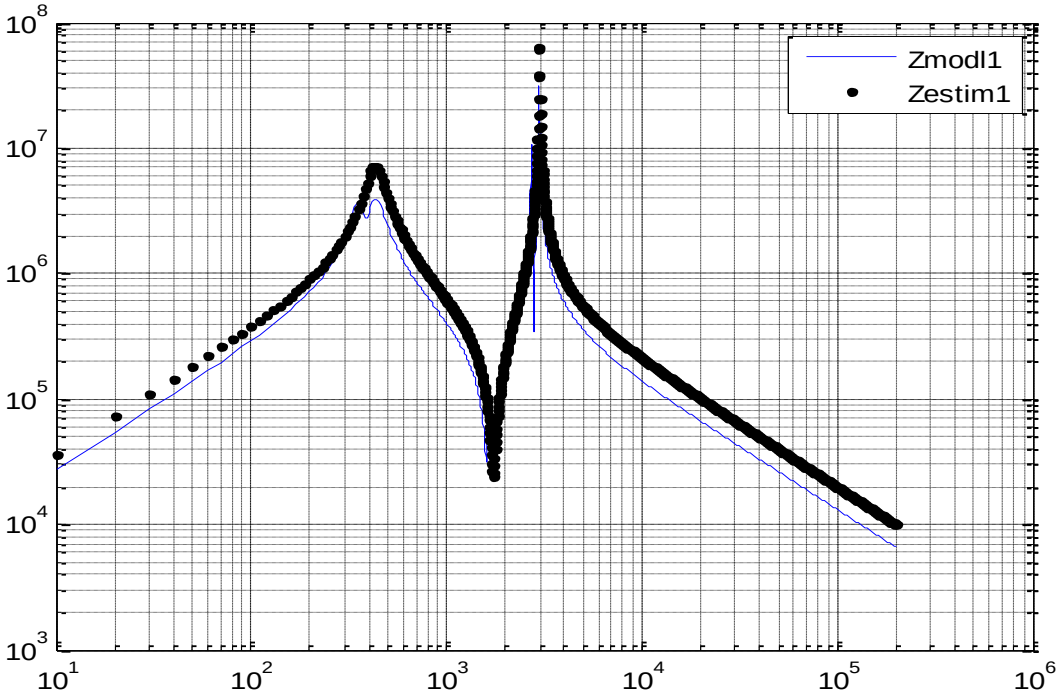


Figure III.10 : La courbe des réponses Zmodl1 et Zestm1 en fonction de la fréquence.

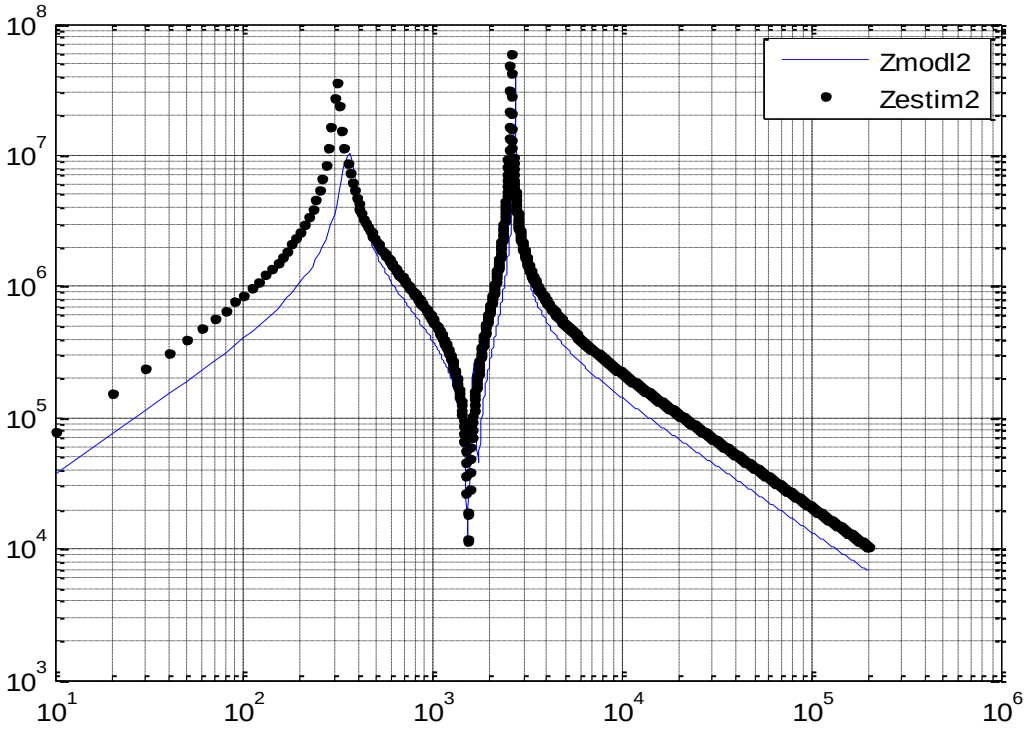


Figure III.11 : La courbe des réponses Zmodl2 et Zestm2 en fonction de la fréquence

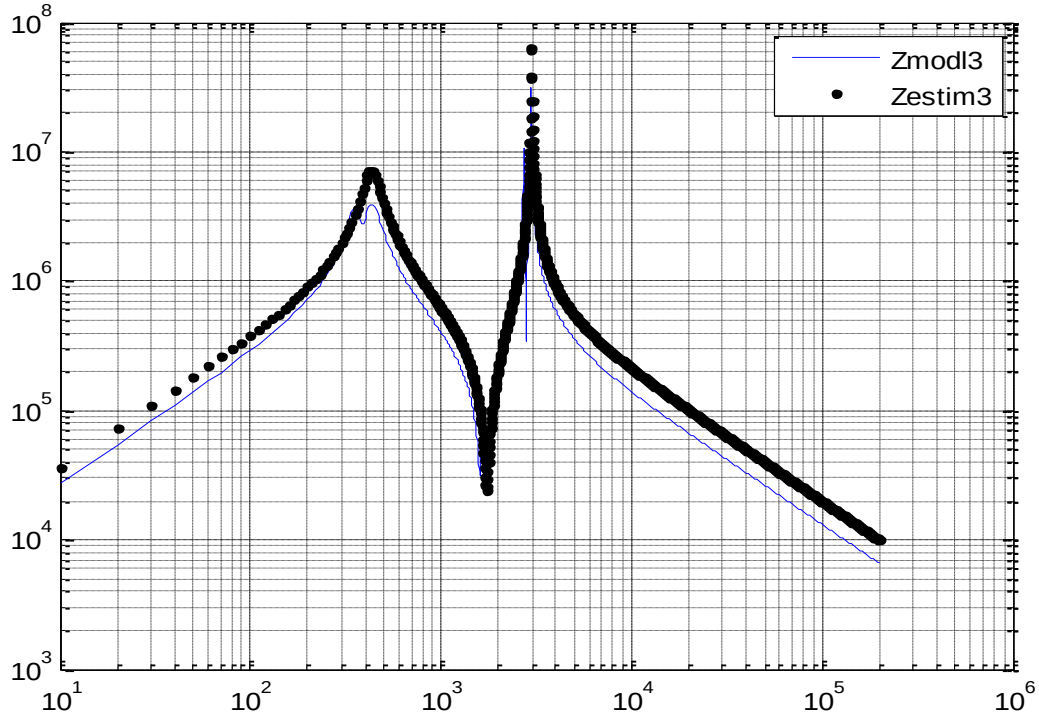


Figure III.12 : La courbe de la réponse Zmodl3 et la réponse Zestm3 en fonction de la fréquence.

III.4.10 Interprétation des résultats :

D'après la comparaison graphique entre les réponses en fréquence estimées et simulées montrées sur les figures (III.10 – III.12) on peut citer les points suivants:

- ✓ Les résultats obtenus par la simulation sont concordants avec ceux obtenus par estimation.
- ✓ Annulation complète du premier pic et ceci pour les résultats obtenus par estimation (Zestm1 et Zestm3).
- ✓ Les deux réponses Zmodl2 simulées et la réponse Zestm2 ont la même forme de résonance, mais la réponse Zmodl2 à un plus petit dépassement maximal au temps du démarrage.

III.5 Localisation des défauts dans les phases de transformateur :

Après avoir validé notre modèle approuvé de l'enroulement par une comparaison entre les réponses simulées et estimée, dans ce qui suit-on procédera à l'introduction de variations paramétriques dans le modèle afin de simuler des différents défauts résistifs.

D'une manière générale, la localisation d'un défaut consiste en la détermination de sa position géographique. Ce mot peut aussi faire référence à l'adaptation d'un défaut pour une région particulière [37].

III.5.1 Défaut résistif :

Un défaut résistif est traduit par des augmentations ou des diminutions de la résistance du noyau de chacune des phases, l'augmentation de cette résistance peut être expliquée par l'augmentation de température du noyau magnétique suite à une surcharge ou/et à la circulation des courants harmoniques dans les phases du transformateur. La diminution de cette résistance peut être interprétée physique par la détérioration des caractéristiques magnétique du noyau telle la diminution de la perméabilité magnétique du circuit magnétique ou à l'augmentation des pertes fer [37].

$$R_T = R_0 + \alpha * \Delta T \qquad \text{(III.11).}$$

R_T : Résistance en fonction de la température [Ω].R_0 : Résistance sain [Ω].

α : Facteur de dilatation thermique [K^{-1}].

ΔT : Variation de la température [C].

III.5.2 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut résistif :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts résistifs injectés sur le côté primaire du transformateur étudié est illustrée sur les figures (III.13-III.15).

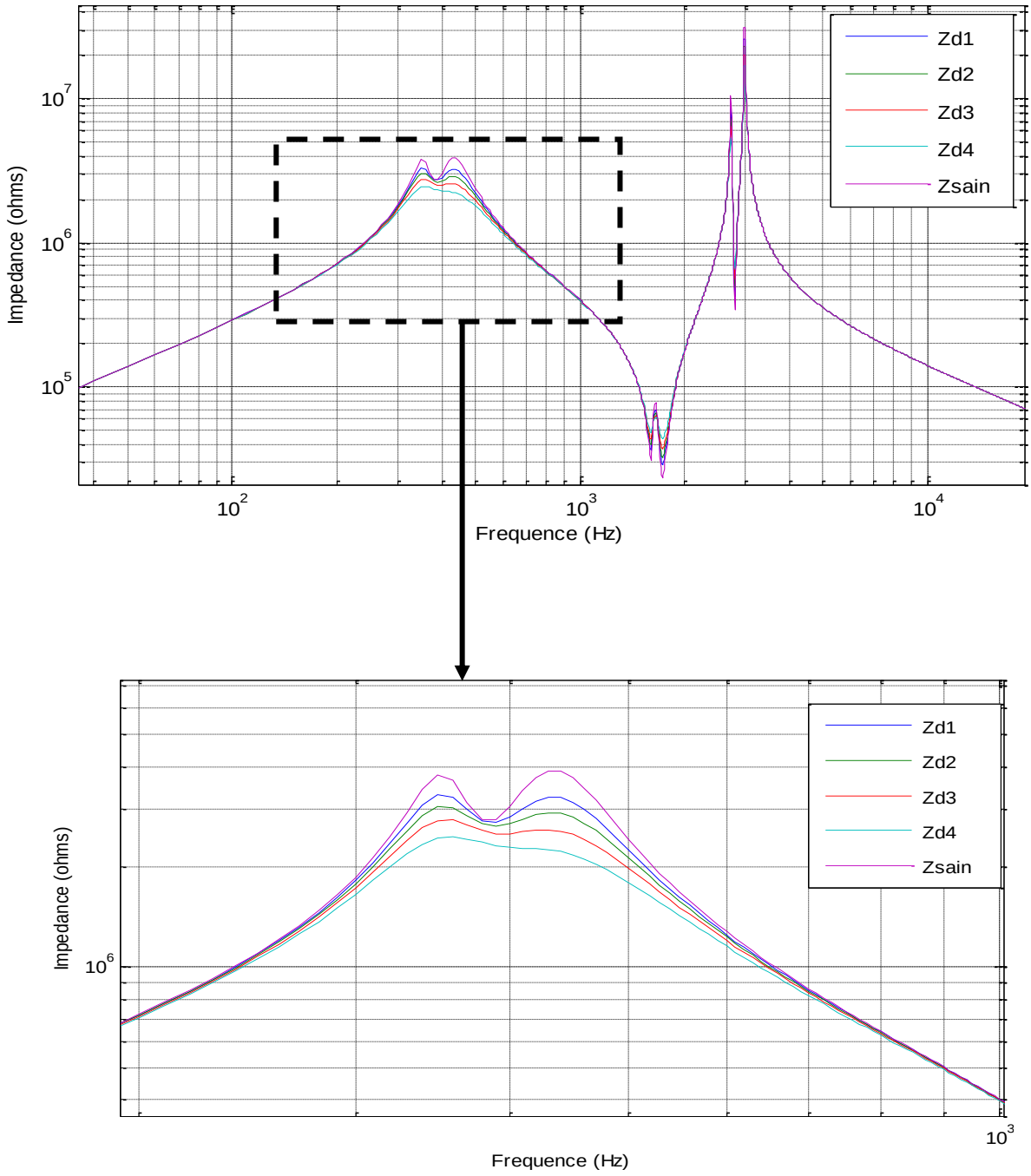


Figure III. 13 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 1 et d'un enroulement sain.

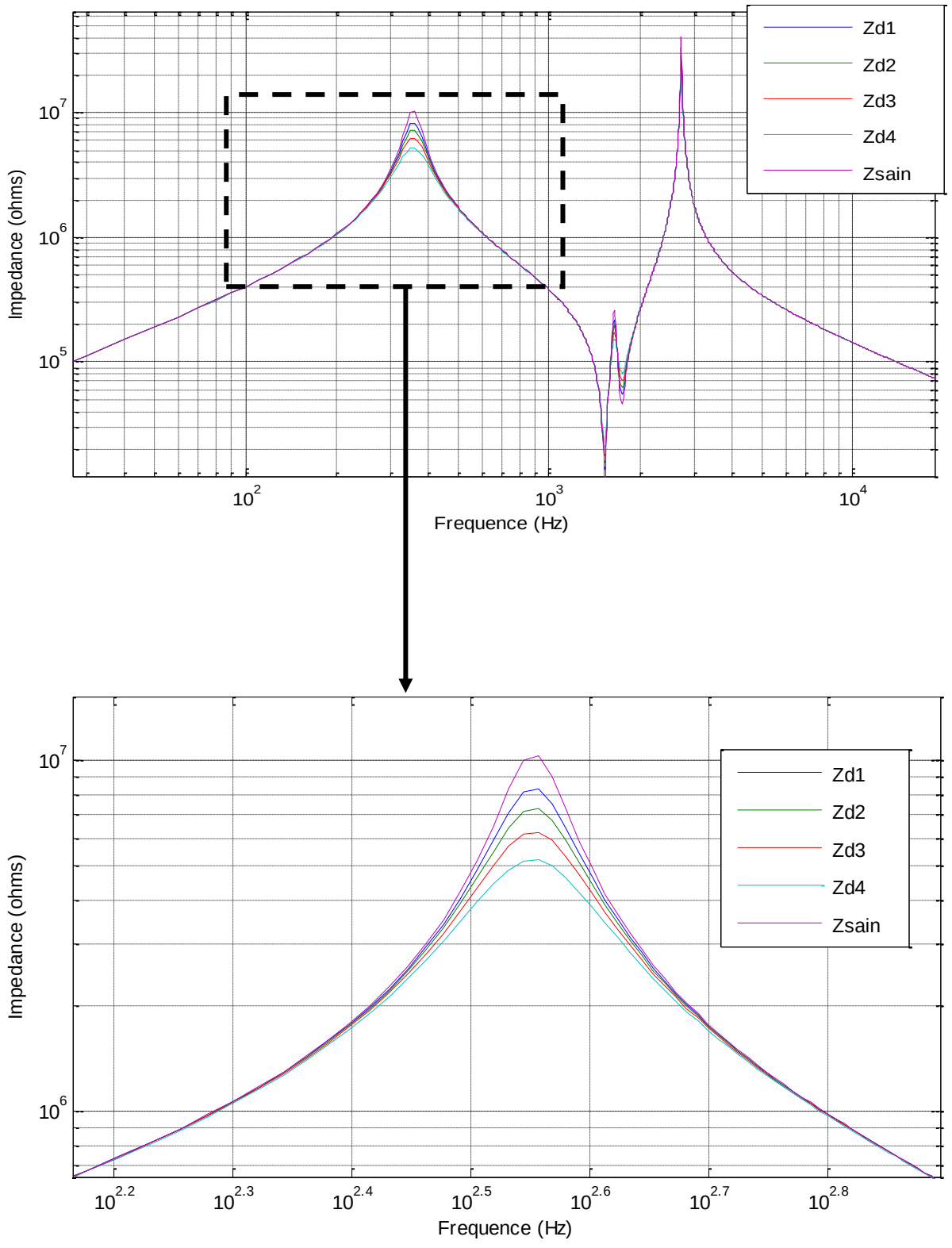


Figure III. 14 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 2 et d'un enroulement sain.

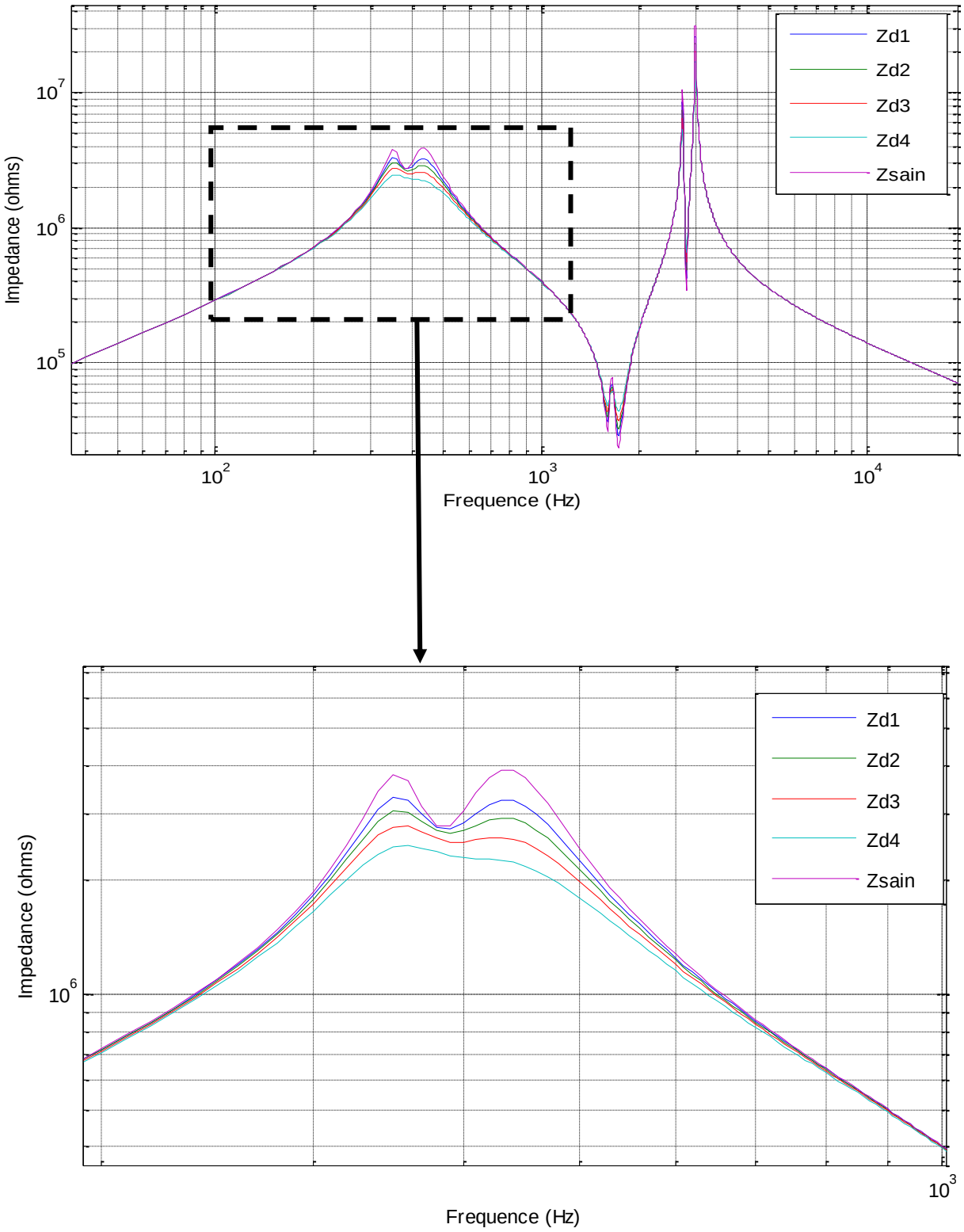


Figure III. 15 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 3 et d'un enroulement sain.

III.5.3 Résultats et discussions :

Les tableaux (III.2- III.5) indiquent le degré des défauts résistifs en injectant un défaut résistif sur le côté primaire du transformateur triphasé étudié.

Les défauts résistifs sont simulés par une diminution de la résistance dans une plage de 20% Rsain, 30% Rsain ,40% Rsain et 50%Rsain.

Tableau III.2 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une plage de 20%Rsain.

	Phase1	Phase2	Phase3
Rd1 (ohm)	$1.92*10^6$	$9.6992*10^6$	$1.92*10^6$
Rd2 (ohm)	$1.92*10^6$	$9.6992*10^6$	$1.92*10^6$
Rd3 (ohm)	$1.92*10^6$	$9.6992*10^6$	$1.92*10^6$
Rd4 (ohm)	$9.352*10^6$	$8.1232*10^6$	$9.352*10^6$
Rd5 (ohm)	$9.352*10^6$	$8.1232*10^6$	$9.352*10^6$
Rd6 (ohm)	$9.352*10^6$	$8.1232*10^6$	$9.352*10^6$
Rd7 (ohm)	$9.352*10^6$	$8.1232*10^6$	$9.352*10^6$
Rd8 (ohm)	$9.352*10^6$	$8.1232*10^6$	$9.352*10^6$
Rd9 (ohm)	$9.352*10^6$	$8.1232*10^6$	$9.352*10^6$

Tableau III.3 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une plage de 30%Rsain.

	Phase1	Phase2	Phase3
Rd1 (ohm)	$1.68*10^6$	$8.4868*10^6$	$1.68*10^6$
Rd2 (ohm)	$1.68*10^6$	$8.4868*10^6$	$1.68*10^6$
Rd3 (ohm)	$1.68*10^6$	$8.4868*10^6$	$1.68*10^6$
Rd4 (ohm)	$8.183*10^6$	$7.1078*10^6$	$8.183*10^6$
Rd5 (ohm)	$8.183*10^6$	$7.1078*10^6$	$8.183*10^6$
Rd6 (ohm)	$8.183*10^6$	$7.1078*10^6$	$8.183*10^6$
Rd7 (ohm)	$8.183*10^6$	$7.1078*10^6$	$8.183*10^6$
Rd8 (ohm)	$8.183*10^6$	$7.1078*10^6$	$8.183*10^6$
Rd9 (ohm)	$8.183*10^6$	$7.1078*10^6$	$8.183*10^6$

Tableau III.4 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une Plage de 40%Rsain.

	Phase1	Phase2	Phase3
Rd1 (ohm)	$1.44*10^6$	$7.2744*10^6$	$1.44*10^6$
Rd2 (ohm)	$1.44*10^6$	$7.2744*10^6$	$1.44*10^6$
Rd3 (ohm)	$1.44*10^6$	$7.2744*10^6$	$1.44*10^6$
Rd4 (ohm)	$7.014*10^6$	$6.0924*10^6$	$7.014*10^6$
Rd5 (ohm)	$7.014*10^6$	$6.0924*10^6$	$7.014*10^6$
Rd6 (ohm)	$7.014*10^6$	$6.0924*10^6$	$7.014*10^6$
Rd7 (ohm)	$7.014*10^6$	$6.0924*10^6$	$7.014*10^6$
Rd8 (ohm)	$7.014*10^6$	$6.0924*10^6$	$7.014*10^6$
Rd9 (ohm)	$7.014*10^6$	$6.0924*10^6$	$7.014*10^6$

Tableau III.5 : Degré des défauts résistifs par une diminution d'une résistance dans une plage de 50%Rsain.

	Phase1	Phase2	Phase3
Rd1 (ohm)	$1.2*10^6$	$6.062*10^6$	$1.2*10^6$
Rd2 (ohm)	$1.2*10^6$	$6.062*10^6$	$1.2*10^6$
Rd3 (ohm)	$1.2*10^6$	$6.062*10^6$	$1.2*10^6$
Rd4 (ohm)	$5.845*10^6$	$5.077*10^6$	$5.845*10^6$
Rd5 (ohm)	$5.845*10^6$	$5.077*10^6$	$5.845*10^6$
Rd6 (ohm)	$5.845*10^6$	$5.077*10^6$	$5.845*10^6$
Rd7 (ohm)	$5.845*10^6$	$5.077*10^6$	$5.845*10^6$
Rd8 (ohm)	$5.845*10^6$	$5.077*10^6$	$5.845*10^6$
Rd9 (ohm)	$5.845*10^6$	$5.077*10^6$	$5.845*10^6$

III.5.4 Interprétation des résultats :

D'après l'étude menée le point suivant est retenu :

- Touts les défauts résistifs apparu dans l'enroulement sont traduit par une variation de sa réponse fréquentielle ce qui rend cette dernier un outil important pour le diagnostic.

III.6 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeille artificielle (ABC) :

III.6.1 Définition :

L'algorithme d'optimisation d'ABC (Artificiel Bee Colony) est développé par Karaboga et Basturk en 2005, en inspectant les comportements des abeilles réelles pour trouver la source de nourriture, qui s'appelle le nectar, et partager l'information des sources de nourriture aux autres abeilles dans le nid [38].

Est une méthode approchée, qui nous permet de résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire, et de trouver une solution de l'optimum en un temps raisonnable [39].

Dans cet algorithme, les abeilles artificielle sont définies et classifiées en trois groupes à savoir [39], [40] :

1) Abeilles employeuses (abeilles qui recherche la nourriture) ;

2) Spectatrices (abeilles d'observation) ;

3) Scouts (éclaireuses) sont chargés de trouver de nouvelles nourritures, (le nectar de nouvelle source).

Si l'abeille employeuse d'un site ne réussit pas de trouver la source de nourriture, elle doit être forcément devenir un scout pour rechercher aléatoirement de nouvelles sources de nourriture. Les abeilles employeuses partagent l'information avec les abeilles spectatrices dans une ruche de sorte que les abeilles spectatrices puissent choisir une source de nourriture pour l'explorer [39], [41].

La procédure de calcul des paramètres R, L et C du modèle étudié par l'ABC est décrite dans l'organigramme suivant:

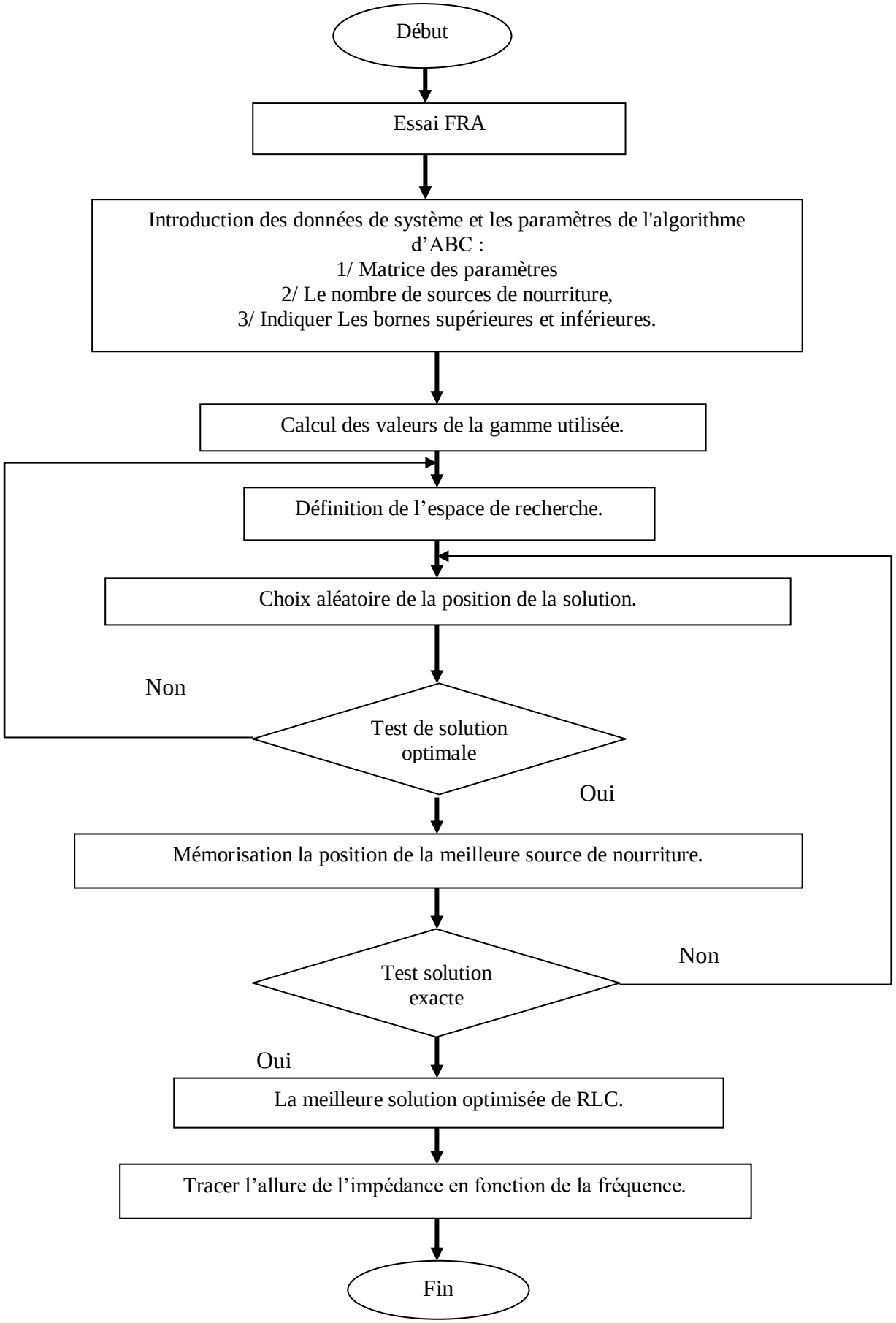


Figure III.16 : Organigramme pour la procédure ABC de calcul des paramètres du modèle étudié [1].

L'espace de recherche est exprimé par l'équation (III.12) ci-dessous:

$$Esp_{rech} = \text{rand}(\text{Sorc}_{\text{Norr}},\text{D}) * \text{GM}_{\text{Val}} + \text{bornes}_{\text{inf}} \quad \text{(III.12).}$$

Avec :

$$GM_{Val} = \text{repmat}((\text{bornes}_{\text{sup}} - \text{bornes}_{\text{inf}}), [\text{Sorc}_{\text{Norr}}1])$$

Et :

$$\text{bornes}_{\text{inf}} = \text{repmat}(\text{bornes}_{\text{inf},}[\text{Sorc}_{\text{Norr}}1])$$

L'équation (III.13) ci-dessous utilisé pour optimiser la meilleure solution des paramètres R, L et C.

$$\text{Sol}_{\text{RLC}}=(\text{bornes}_{\text{sup}} - \text{bornes}_{\text{inf}})* \text{rand (1, D)} + \text{bornes}_{\text{inf}} \quad \text{(III.13).}$$

III.6.2 Résultats de simulation de l'algorithme d'ABC :

Les résultats obtenus par l'algorithme d'ABC sont représentés sur les figures suivantes :

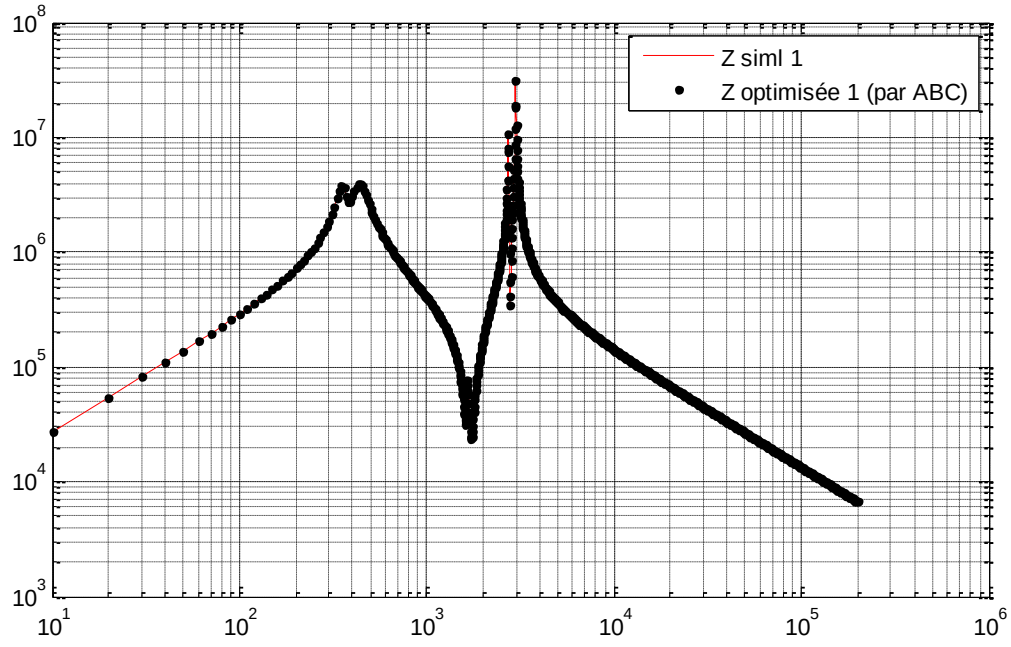


Figure III.17 2 : La courbe de la réponse (Zsiml1) simulée et la réponse (Zoptim1) optimisée par l'algorithme d'ABC en fonction de la fréquence.

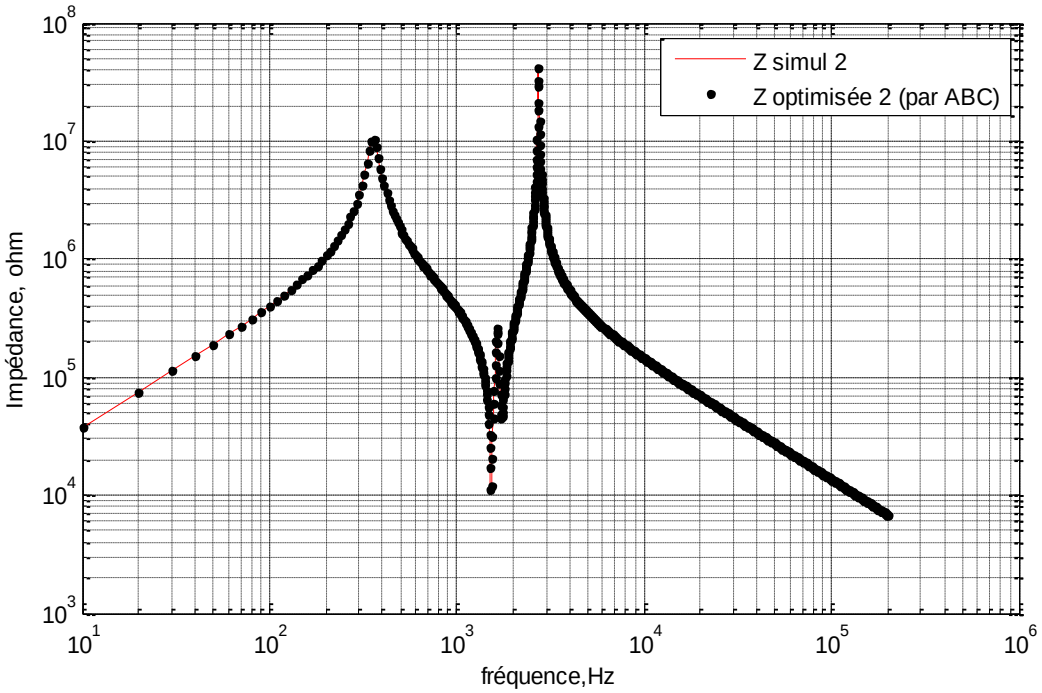


Figure III.18 : La courbe de la réponse (Zsiml2) simulée et la réponse (Zoptim2) optimisée par l'algorithme d'ABC en fonction de la fréquence.

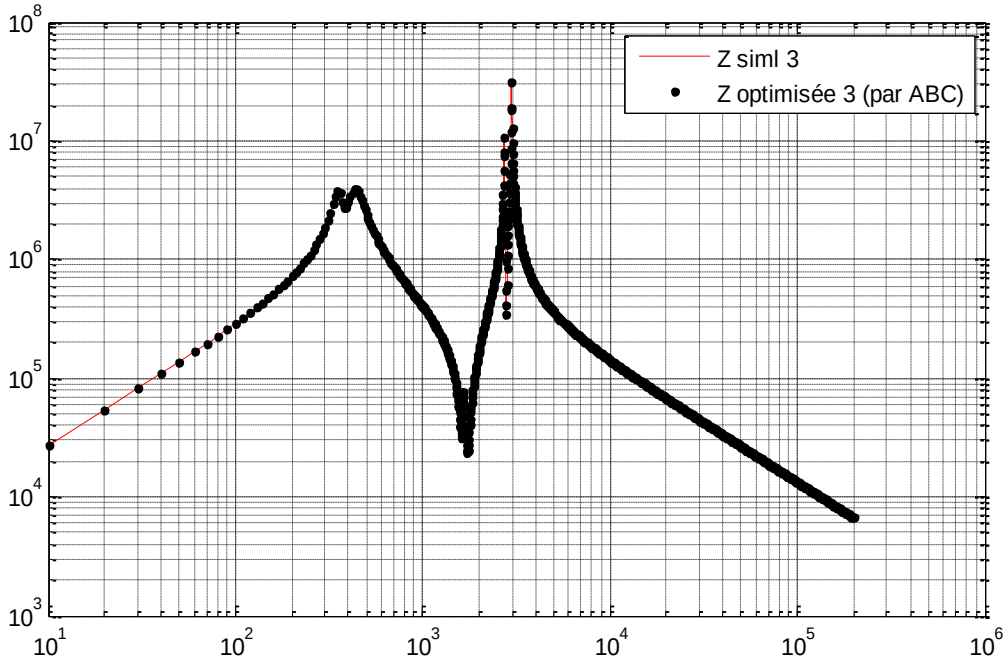


Figure III.19 : La courbe de la réponse (Zsiml3) simulée et la réponse (Zoptim3) optimisée par l'algorithme d'ABC en fonction de la fréquence.

III.6.3 Interprétation des résultats :

La comparaison graphique entre les réponses en fréquence simulées et optimisées par l'algorithme d'ABC montrées sur les figures (III.17 – III.19) démontre que:

- ✓ L'algorithme ABC, est avéré le meilleur comparativement au première technique utilisée.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a consacré d'une part, à l' d'identification des paramètres d'un modèle de base d'un transformateur triphasé en haute fréquence, et d'autre part, à la modélisation et l'analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime HF par l'utilisation de l'algorithme Artificial Bee Colony (ABC).

D'après l'étude menée, nous avons tiré les observations suivantes :

- Les résultats obtenus par simulation en utilisant deux méthodes différentes sont concordants avec les valeurs de modèle adopté.
- Les défauts apparus dans l'enroulement sont traduit par une variation de sa réponse fréquentielle ce qui rend cette dernière un outil important pour le diagnostic.
- En comparant les deux différentes méthodes utilisées pour l'optimisation de réponse fréquentielle, l'algorithme ABC s'est avéré le meilleur en termes de précision et de rapidité.
- Les résultats d'optimisation, nous ont permis de juger la qualité de la technique d'ABC, elle donne une réponse très puissante, le système réagit rapidement (plus rapide que la méthode d'estimation).

Conclusion générale

L'objectif préalablement défini de cette étude consiste à la modélisation et au diagnostic des enroulements d'un transformateur triphasé en HF, qui est un élément très important dans les réseaux électriques, cette étude est consacrée à l'analyse de la réponse en fréquence des enroulements.

Premièrement, nous avons présenté l'intérêt des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, en termes de réduire la défaillance dans les enroulements et d'augmenter la durée de vie de ce dernier. Plusieurs modèles du transformateur sont également développés ainsi que la méthode de diagnostic utilisée, qui est basée sur la technique d'analyse de la réponse fréquentielle.

Deuxièment, afin de choisir le modèle le plus approprié à notre étude, une recherche bibliographique sur les différents modèles du transformateur en régime fréquentiel a constituée la deuxième étape de ce travail.

Le modèle le plus approprié pour notre recherche est le modèle équivalent en π du transformateur en HF à base d'une branche RLC, pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

Ce modèle permettra de modéliser de gros transformateurs et d'étudier leur comportement interne (la répartition de la tension le long des enroulements, Gradient de tension, fréquence de résonance, etc.). Cependant, il est important de trouver un bon programme permettra de calculer les paramètres du modèle afin d'avoir une bonne précision du résultat.

Notre étude de modélisation et de simulation a été réalisée sous logiciel Matlab.

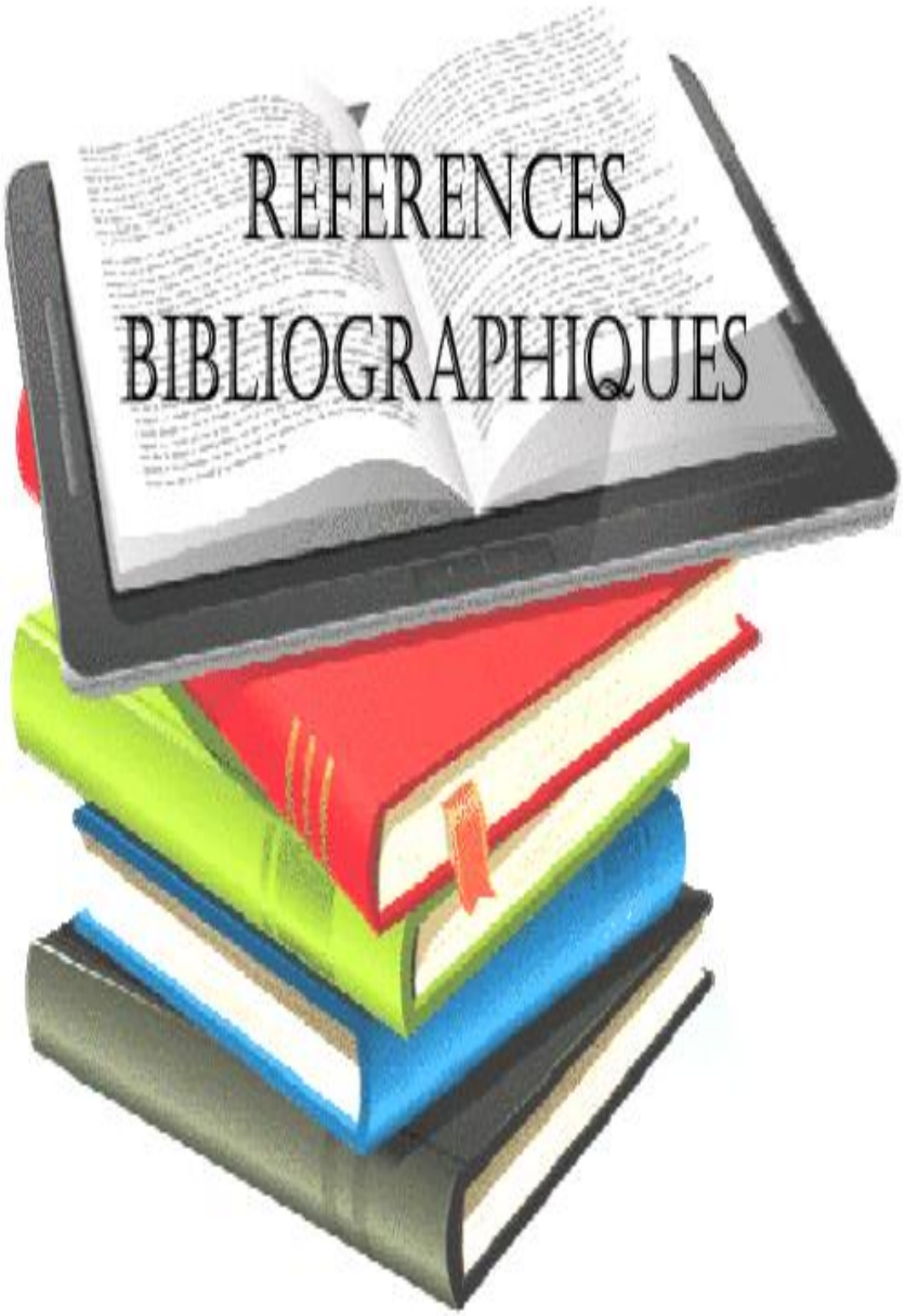
Nous avons injecté des défauts résistifs dans le modèle approprié de transformateur.

D'après les résultats obtenus, on a relevé les points suivants :

- Le modèle obtenu présente des avantages importants en matière de diagnostic de défaillances des enroulements du transformateur en haute fréquence.
- Les deux méthodes utilisées pour l'identification des paramètres du modèle proposé ont donné des résultats satisfaisants.
- En comparant les deux méthodes utilisées, l'Algorithme d'ABC offre plus de précision et de rapidité.

Comme perspectives, pour ce travail, on propose :

- ✓ Utilisation du modèle adopté pour un transformateur de puissance industriel.
- ✓ Une analyse détaillée et un calcul plus affiné des paramètres des éléments des modèles équivalents du transformateur en HF, en tenant compte de la variation paramétrique en fonction de la fréquence et de la température par exemple.


REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : **BOUKIRAT .S et SALHI.S**. «Modélisation et diagnostic des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé» Mémoire de Master, Département Génie électrique, université de Médéa 2017.

[2] : **BOUCHOU HAMZA et DJEDILI MOHAMED** « Modélisation des transformateurs triphasés basée sur l'analyse de la réponse en fréquence en HF et son diagnostique »Mémoire de Master, 2021.

[3] : **Mr.REKIK BADRI** «Etude et modélisation des défauts des transformateurs de puissance » mémoire de Magister ,Université de Annaba ,2008.

[4] : **JEAN SANCHEZ** « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance »Thèse de doctorat ,Université de Grenoble ,2006

[5] : Document réf .Transformateurs .odt, version de 8 février .2007

[6] : **AMARI. MANSOUR**, « Cours Electrotechnique » , Département Génie électrique 2 .

[7] : **HOUASSINE.H,** « Etude des surtensions dans les blocs alternateurs-transformateurs des centrales électriques » ,Thèses de doctorat, Département Génie électrique ,université de Tizi Ouzou 2010.

[8] : **C. ANDRIEU, E. DAUPHANT D. BOSS** « Frequency-Dependant Model For a MV/LV Transformer» International Conference on Power Systems Transients (IPST), Budapest, Hungary, June 20-24, 1999.

[9] : Formation Transformateur GRTE avril 2005.

[10] : **ANKITA NAMEDO AND DR.SHAILJA SHUKLAFAULT** «Identification of 45MVA Tansformer winding by changing Capacitance Value Using Frequency Response Analysis with Artificial Bee Colony »,Method International Journal of Novel Research and Mechanical Engineering Vol 2.

[11] : **MR.KHALDI M ET MR.BOUAICHAOUI I**« Modélisation et analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime MF :application d'ABC» Université de Médea ,2021.

[12] : **HAMADI .Z and KRATBI S.** « Analyse des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé, basée sur l'analyse de l'impédance du transformateur » mémoire de master, université de MEDEA, 2016.

[13] : **A. MORCHED, L. MARTI, ET J. OTTEVANGERS,** « A High Frequency transformer model for the EMTP », IEEE Trans. Power Deliv., vol. 8, no 3, p. 1615–1626, 1993.

[14] : **GUSTAVSEN .B and SEMLYEN .A .** « Application of vector fitting to state équation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients ». IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.

[15] : **H. HOUASSINE**, « Etudes des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri, 2010.

[16] : **NODA .T, NAKAMOTO .H and YOKOYAMA .S.** « Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies", IEEE Transaction on Power ». Delivery,Vol. 17, No. 4, October 2002.

[17] : **M.jose Ignacio ANGUS GOMES, Mlle Ana AZNAR BLANES** « Technique de diagnostic des transformateur de puissance », Formation sur le diagnostic des transformateurs, Ayant lieu à EL-HAMMA, Du 27/10 au 29/10/2007.

[18] : OMICRON electronics « FR Analyzer Manuel d'utilisation »Référence -VESD0662 Version du manuel : FRA.FR.1, 2006.

[19] : **PAUWELS** «Formation générale au transformateurs », Mars 2009.

[20] : **MEGGER** « FRAX 101 Analyseur de réponse de la fréquence de balayage », FRAX101_DS_fr_V01. PDF created with PDF Factory Pro trial version www.pdf.

[21] : **C. SWEETSER ET T. MCGRAIL**, «Sweep frequency response analysis transformer applications, vol. 1. Citeseer, 2003.

[22] : **BERGMAN, C., SFRA–AN,** « application that creates customer value. The Electrical Engineering Program, spring, 2006. ».

[23] : **LAKHDARI F et BEN KORTBI M** «Diagnostic de Défaut dans un transformateur de puissance par la méthode FRA »université de Médea ,2018.

[24] : **ZAIDI .R and HADDADI.A** «LOCALISATION DE DEFAUTS DANS UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCES» mémoire de master, Université de Tizi-Ouzou, 2011.

[25] : **MEZARI NAOUEL,** « Diagnostic des transformateurs de puissances », mémoire de magister ». Département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzo. Juillet 2011.

[26] : **BOUDRAA.S.** « Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.

[27] : **Mr. DJEMAH Hamid et Mr. ALIOUANE Karim** «Diagnostic des transformateurs de puissances en utilisant la technique d'analyse freqencielle fra. ».Université de Tizi Ouzou,2010.

[28] : **R. C. GUIMARÃES**, « Modelo elétrico da impedância do transformador baseado em células RLC passivas », 2010.

[29] : **LARIS .M AND MEGATELI .A** «Analyse et diagnostic de la déformation des enroulements du transformateur par la technique d'analyse de la réponse fréquentielle FRA. »Mémoire de master, Université de Médéa ,2015.

[30] : **M. LARFI A et M. KORICHI A** «Modélisation en HF d'un transformateur triphasé en vue de son diagnostic » université de Bouira ,2018.

[31] : **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.

[32] : **HASNAOUI .A AND MOUSSA .S** «Application de la méthode d'analyse fréquentielle pour le diagnostique des défaillances des enroulements du transformateur de puissance» mémoire de master, Université de Médéa ,2020.

[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] : **AHMAD .AHMAD** «Contribution à la modelisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute frequence » thèse de doctorat de l'ecole centrale de lyon ,1992.

[35] : **KERBOUCI .M AND SABOUR .K** «Diagnostic des enroulements dans un transformateur triphasé en régime HF en utilisant la technique d'optimisation méta heuristique essaim de particules» mémoire de master, Université de Médéa, 2022.

[36] : **GONZALEZ GARCIA CARLOS.** « Procedimiento de Modelado basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia y aplicación en Transformadores Trifásicos de Potencia para su Caracterización y Diagnóstico, universidad carlos iii de madrid, departamento de tecnología electrónica leganés, tesis doctoral », 9 de enero de 2012.

[37] : **ABDI SIF ELDINE,** « Modélisation et diagnostic des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé ».

[38] : **MOUASSA SOUHIL.** « Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS », Option : Réseaux électriques, université FERHAT Abbas Sétif - (Algérie) Faculté de Technologie Présenté au département d'Electrotechnique, Magister En Electrotechnique, 19/06/2012.

[39] : **GERARD BIAU , FREDERIC CÉROU AND ARNAUD GUYADER** . « Analyse non paramétrique de l'algorithme abc », LSTA Université´e Pierre et Marie Curie – Paris, 75252 Paris Cedex 05, INRIA Rennes Bretagne Atlantique ,ASPI Project-team Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France, Université´e Rennes 2 Place du Recteur Henri Le Moal, CS 24307 35043 Rennes Cedex, France.

[40]: **MUKHERJEE PRITAM AND SATISH .L.** « Construction of Equivalent Circuit of a Single and Isolated Transformer Winding From FRA Data Using the ABC Algorithm », IEEE transactions on power delivery, vol. 27, no. 2, April 2012.

[41] :**MEZURA-MONTES EFREN, DAMIAN-ARAOZ MAURICIO AND CETINADOM´INGEZ OMAR.** « Smart Flight and Dynamic Tolerances in the Artificial Bee Colony for Constrained Optimization » .Sep. 2010.

[42] **: GONZALEZ GARCIA Carlos**. « Procedimiento de Modelado basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia y aplicación en Transformadores Trifásicos de Potencia para su Caracterización y Diagnóstico, universidad carlos iii de madrid, departamento de tecnología electrónica leganés, tesis doctoral », 9 de enero de 2012.