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

UNIVERSITE D_R. 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 enroulements dans un transformateur triphasé

en régime HF en utilisant la technique d'optimisation

méta heuristique essaim de particules

Proposé et dirigé par,

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

Préparé et présenté par,
Kerbouci Mebarka.
Sabour khalida .

Année Universitaire

2021/2022

Remerciements

El hamdou li ALLAH Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département de génie électrique de l'université yahya farés de Médéa.

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé, et la patience durant toutes ces années, pour accomplir ce travail.

Nous remercions sincèrement co_promoteur 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 adressons nos remerciements particuliers à notre promoteur ***:***
Dr. abbadi amel

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.

Dédicace

Je m'incline devant dieu tout puissant qui m'a ouvert l

a porte du savoir et m'a aidé à la Franchir.

Je dédie ce Modeste travail :

A ma chère et tendre: ma mère, ma mère, ma mère,

Source d'affectation de courage et

D'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour.

A mon père source de respect, en témoignage de ma profonde Reconnaissance pour tout L'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.

A mes frères al Hassan et al Hocine je vous souhaite

Un avenir plein de réussite et de bonheur

A mes sœurs chahrazed et roumaissa et son mari kada abde el nour.

À mon professeur respecté samia boukirat Qui m'a soutenu tout le temps. Merci. Je te souhaite le meilleur et le succès.

À ma chère meilleure amie et très proche meskine Kheira.

A touts mes amis surtout Kerbouci mebarka.

A mes camarades et tous ceux de la faculté des

Sciences et des technologies de l'université de

YAHIA FARES

A tous ceux que je porte dans mon coeur.

SABOUR KHALIDA

Dédicace

Je dédie ce travail :

A la main pure qui m'a secouru à chaque chute ,A qui appartiennent mon nom et mon âme cher père.

A qui sa supplication a été le secret de ma réussite et de ma joie ,A qui on ne voit que de l'amour et de la tendresse dans ses yeux, ma chère et bien-aimée mère.

A mes chères sœurs FATIMA et DJAMILA pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères TAYEB et AISSA pour leur appui et leur encouragement,

à ma tante ZAHRA

A mes neveux

A mes nièces

À mon professeur respecté samia boukirat Qui m'a soutenu tout le temps. Merci. Je te souhaite le meilleur et le succès

A mon amie sabour khalida

Kerbouci Mebarka

Table des matières

Dédicace.
Remerciement.

Introduction générale .

Chapitre I **:** Transformateurs : fonctionnement, défaillances et diagnostic

I.1 Introduction :.....3

I.2 Définition :.....3

I.3 Technologie de construction.....3

I.3.1 Les transformateurs à diélectrique liquide 4

I.3.2 Les transformateurs secs 5

I.4 Constitution d'un transformateur triphasé 5

I.4.1 Circuit magnétique.....5

I.4.1.1 Type cuirassé.....6

I.4.1.2 Type à colonnes.....7

I.4.2 Circuit électrique.....8

- Bobinage concentrique simple.....8
- Bobinage mixte.....8
- Bobinage alterné en galettes.....8

I.4.3 Isolants 8

a) Isolant solide 8

b) Isolant liquide.....9

I.4.4 Cuve :.....9

I.4.5 Traversées : 9

I.4.6 Régleur en charge :.....10

I.5 Mode de couplage : 11

I.6 Principe de fonctionnement 12

I.7 Rôle du transformateur:.....13

I.8 Défauts fréquents dans les transformateurs 13

I.8.1 Défaut d'isolement de la partie active.....13

Table des matières

I.8.2 Amorçage diélectrique entre spires....14
I.8.3 Court-circuit entre spires....14
I.8.4 Décharges Partielles....15
I.8.5 Coupure du circuit électrique....16
I.8.6 Déformation géométrique des enroulements....16
I.9 Les technique de diagnostic des transformateurs....17
I.9.1 Mesure électrique....17
I.9.1.1 Mesure du courant à vide....17
I.9.1.2 Mesure du rapport de transformation....18
I.9.1.3 Mesure de la résistance des enroulements....18
I.9.1.4 Mesure de la réactance de fuite....18
I.9.2 Mesures diélectriques....18
a) Mesure de facteur de perte....19
b) Mesure de capacité des enroulements....19
c) Mesure de capacité des bornes....19
d) Mesure de la résistance d'isolement en courant continu....20
I.9.3 Analyse d'huile....20
I.9.3.1 Analyses physico-chimiques....21
I.9.3.2 Analyses des furanes....22
I.9.3.3 Analyses des gaz dissous....22
I.10 Conclusion :....22

Chapitre II : Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle

II.1 Introduction :....23
II.2 L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) :....23
II.2.1 Définition :....23
II.2.2 Principe de la méthode :....23
II.2.3 Objectifs des mesures par FRA....24
II.2.4 Quand faut-il faire un test FRA?....24
II.2.5 Type d'essais par FRA :....25
II.2.5.1 Essais entre extrémités :....25
II.2.5.2 Essais en court-circuit....26

Table des matières

II.2.5.3 Essai capacitif entre enroulements.....26
II.2.5.4 Essai inductif entre enroulements.....27
II.2.6 Méthodes d'interprétation :.....27
II.2.7 Détection de défaut par FRA: 28
II.3 Modélisation de transformateur de puissance triphasé:.....29
II.3.1 modélisation en haute fréquence :.....29
II.3.2 Les modèles usuels des transformateurs :.....29
II.3.2.1 Modèle de RESEL :.....29.
II.3.2.2 Modèle d'EMTP : 29
II.3.2.3 Modélisation par la théorie de lignes :.....31
II.3.2.4 Modélisation par des circuits ou des transformées : 33
II.3.2.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles :.....33
II.3.2.6 Le modèle équivalent en π du transformateur en HF :.....34
II.4 Conclusion 36

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF

III.1.Introduction :.....37
III.2.But principal.....37
III.3.Simulation :.....37
III.3.1 logiciel utilisé.....37
III.3.1.1 Ecran de base.....37
III.3.1.2 Simulink.....37
III.3.1.3 Version utilisée 38
III.4 Description du modèle approuvé :.....38
III.4.1 Modèle simplifié en π du transformateur en HF :.....38
III.4.2 Méthodologie de calcul des paramètres.....40
III.4.3 Calcul des impédances Zph1, Zph2 et Zph3 par simulation :.....41
III.4.4 Estimations des paramètres du modèle RLC pour chaque phase :.....42
III.4.5 Calcul de La fonction objective (l'impédance de chaque cellule RLC parallèle) :.44
III.4.6 Paramètres de simulation :.....44

Table des matières

III.4.7 Simulation de l'impédance Zph1 45

III.4.8 Simulation de l'impédance Zph2 : 45

III.4.9 Simulation de l'impédance Zph3 :.....46

III.4.10 Interprétation des résultats :.....49

III.5 Classification et localisation des défauts capacitifs et inductifs dans les phases de transformateur 49

: III.5.1 Classification des défauts :.....49

III.5.2 Localisation des défauts.....50

III.5.3 Défauts capacitifs :.....50

III.5.4 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut capacitifs.....50

III.5.5 Résultats et discussions :.....54

III.5.6 Défaut inductif :.....54

III.5.7 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut inductif 55

III.5.8 Résultats et discussions :.....57

III.6 Optimisation par Essaim Particulaire :.....59

III.6.1Généralité :.....58

III.6.2 Définition : 59

III.6.3 Principe général :.....60

III.6.4 Algorithme :.....61

III.6.5 Configuration de la méthode :.....63

III.6.6 Comparaison des réponses fréquentielles Par la méthode PSO:.....63

III .6.7 Remarque : 66

III.7 Conclusion :.....66

Conclusion générale.

Bibliographie.

Liste des figures :

Chapitre I **:** Transformateurs : fonctionnement, défaillances et diagnostic.

N° de figure	Intitulé	Page
Figure I.1	Transformateur à diélectrique liquide	**4**
Figure I.2 1	Transformateur sec	**5**
Figure I.3 2	Circuit magnétique d'un transformateur triphasé	**6**
Figure I.4	Transformateur cuirassé	**7**
Figure I.5	Transformateur à trois colonnes	**7**
Figure I.6	Cuve d'un Transformateur de Puissance	**9**
Figure I.7	Traversées des Transformateurs	**10**
Figure I.8	Régleur en charge	**10**
Figure I.9	Représentations symboliques des couplages normalisés	**12**
Figure I.10	Schéma de principe d'un transformateur.	**13**
Figure I.11	Amorçage entre enroulements	**14**
Figure I.12	Amorçage entre spires, sans court-circuit	**14**
Figure I.13	Court-circuit entre spires	**15**
Figure I.14	Décharges partielles sur des cales	**15**
Figure I.15	Coupure suite à la fusion d'un Conducteur	**16**
Figure I.16	Déformation mécanique d'un Enroulement	**17**
Figure I.17	Schéma de capacité d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements	**19**
Figure I.18	Schéma d'une borne de type capacitif	**20**
Figure I.19	machine d'analyse d'huile	**21**

Chapitre II **:** Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle.

N° de figure	Intitulé	Page
Figure II.1	Modèle d'un enroulement de transformateur	**24**
Figure II.2	Essai entre extrémités	**25**
Figure II.3	Essai en court-circuit	**26**
Figure II.4	Essai capacitif entre enroulements	**26**
Figure II.5	Essai inductif entre enroulements	**27**
Figure II.6	La modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.	**30**
Figure II.7	Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP	**31**
Figure II.8	Schéma équivalent d'un enroulement.	**32**
Figure II.9	Modélisation du transformateur par une ligne	**32**
Figure II.10	Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section longueur ΔX.	**33**
Figure II.11	modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié.	**34**
Figure II.12	Structure de modèle d'un quadripôle.	**35**
Figure II.13	Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases.	**35**

Chapitre III **:** Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF.

N° de figure	Intitulé	Page
Figure III.1	Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé.	**39**
Figure III.2	Le circuit équivalent de chaque phase.	**39**
Figure III.3	Modèle de noyau de transformateur représenté par trois impédances ZU, ZV et ZW contenant les caractéristiques de chaque phase.	**42**
Figure III.4	Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur.	**43**
Figure III.5	Module d'impédance Zph1 en fonction de la fréquence.	**45**
Figure III.6	Module d'impédance Zph2 en fonction de la fréquence.	**45**
Figure III.7	Module d'impédance Zph3 en fonction de la fréquence.	**46**
Figure III.8	Module d'impédance Zsiml1 en fonction de la fréquence	**46**
Figure III.9	Module d'impédance Zsiml2 en fonction de la fréquence	**47**
Figure III.10	Module d'impédance Zsiml3 en fonction de la fréquence	**47**
Figure III.11	La courbe de la réponse **Zsiml1** simulée et la réponse **Zestm1** estimée en fonction de la fréquence**.**	**48**
Figure III.13	La courbe de la réponse **Zsiml3** simulée et la réponse **Zestm3** estimée en fonction de la fréquence**.**	**49**

Figure III.14	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut capacitifs dans la phase 1 et d'un enroulement sain	**51**
Figure III.15	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut capacitifs dans la phase 2 et d'un enroulement sain.	**52**
Figure III.16	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut capacitifs dans la phase 3 et d'un enroulement sain.	**53**
Figure III.17	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut inductifs dans la phase 1 et d'un enroulement sain	**55**
Figure III.18	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut inductifs dans la phase 2 et d'un enroulement sain.	**56**
Figure III.19	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut inductifs dans la phase 3 et d'un enroulement sain.	**57**
Figure III.20	essaim des oiseaux.	**59**
Figure III.21	Déplacement d'une particule.	**60**
Figure III.22	Organigramme de la PSO.	**62**
Figure III.23	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant Par le PSO dans la phase 1 et d'un enroulement sain.	**64**

Figure III.24	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant Par le PSO dans la phase 2 et d'un enroulement sain.	**65**
Figure III.25	Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant Par le PSO dans la phase 3 et d'un enroulement sain.	**66**

Liste des tableaux

Chapitre I **:** Transformateurs : fonctionnement, défaillances et diagnostic

N° de tableau	Intitulé	Page
Tableau I.11 :	Couplage des enroulements primaires et secondaires	**11**

Chapitre II **:** Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle.

N° de tableau	Intitulé	Page
Tableau. II.1	Domaines typiques d'interprétation de FRA.	**28**

Chapitre III **:** Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF.

N° de tableau	Intitulé	Page
Tableau III.1	Paramètres de simulation.	**44**

Tableau III.2	Degré des défauts capacitifs par une augmentation d'une capacité dans de 20%C_{sain}	**54**
Tableau III.3	Degré des défauts capacitifs par une augmentation d'une capacité dans de 70%C_{sain}	**54**
Tableau III.4	Degré des défauts résistifs par une augmentation d'une résistance dans de 100% C_{sain}	**54**
Tableau III.5	Degré des défauts inductifs par une augmentation d'une inductance dans de 20%L_{sain}	**58**
Tableau III.6	Degré des défauts inductifs par une augmentation d'une inductance dans de 70%L_{sain}	**58**
Tableau III.7	Degré des défauts inductifs par une augmentation d'une inductance dans de 100% L_{sain}	**58**
Tableau III.8	Paramètre de l'algorithme PSO.	**61**

PSO : Particule Swarm Optimization

BT : Basse tension.

TC : Transformateur de courant.

FRA: Frequency Response Analysis.

HT : Haut tension.

HF: Haut frequence.

BF: Basse frequence.

L : L'inductance propre.

MHz: Méga Hertz.

A: Ampère.

RLC: Résistance-Inductance-Capacité.

B: Bande passante.

Ø : Flux magnétique.

ɷ: La pulsation.

$ɷ_{LO}$: Pulsation de demi-puissance inférieure.

$ɷ_{HI}$: Pulsation de demi-puissance supérieure.

$ɷ_0$: Pulsation de résonance.

^{α} : Constant de distribution initiale de la tension

C: capacité

[C] : Matrice des capacités

F: Farad

f: Fréquence

f0: fréquence de résonance

FEM : force électromotrice

H: Henry

I_{in} : Courant d'entrée

I_p: Courant dans l'enroulement primaire

I_s: Courant dans l'enroulement secondaire

I_0: Le courant applique à l'entré

KHz: Kilo Hertz

KV: Kilo Volt

L: Inductance

[L] : Matrice des inductances

I_{eq} : L'inductance équivalente

Lm: Inductance de magnétisation de transformateur

L_p: Inductance de perte dans l'enroulement primaire

I_s : Les inductances propres

Lf : inductance de fuite

M : Les inductances mutuelles

MHz: Méga Hertz

N : Nombre des cellules

Q: facteur de qualité

R: résistance électrique

rad/s: radian par second

Rg : La résistance interne de générateur

R_m: Résistance de magnétisation

R_p: Résistance électrique de l'enroulement primaire

R_s: Résistance électrique de l'enroulement secondaire

Rf : resistance de fuite

Z: Impédance

Z_p: Impédance primaire

Zf : inductance de fuite

Ω : Ohm

ملخص

هذا العمل عبارة عن دراسة ونمذجة لفائف المحولات لتشخيصها. يصف منهجية لتحديد ثلاث طرق مختلفة (تحليلي ، تحليل استجابة التردد ، خوارزمية سرب الجسيمات) لمعلمات نموذج أساسي لف محول ثلاثي الطور بتردد عالٍ في نطاق من الترددات.: 0-200000 هرتز .

ثم يتم استخدام النموذج المقترح والذي تم التحقق من صحته في مجال تشخيص حالات فشل بتردد عالي في ملفات المحولات.

الكلمات المفتاحية :

المحولات ، التشخيص ، المنهجية ، التحديد ، الخوارزمية ، سرب الجسيمات ، المعلمات ، التردد العالي ،النموذج π ، فشل النماذج.

Résumé :

Ce travail est une étude et modélisation des enroulements du transformateur en vue de Son diagnostic. Il est décrit une méthodologie d'identification par trois méthodes différentes (Analytique, Analyse de la réponse fréquentielle, Algorithme de PSO) 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.

Le modèle en π proposé et validé est par la suite exploité dans le domaine du diagnostic des défaillances en HF dans les enroulements du transformateur.

Mots clés:

transformateur ,diagnostic, méthodologie, identification ,Algorithme , PSO, paramètres , haute fréquence, modèle en π ,défaillances.

Abstract:

This work is a study and modeling of the windings of the transformer for its diagnosis. It is described a methodology of identification by three different methods (Analytical, Frequency response analysis, PSO algorithm) of the parameters of a basic model of the winding of a three-phase transformer at high frequency in a range of frequencies. : 0-200000Hz.

The proposed and validated model is then used in the field of diagnosis of HF failures in transformer windings.

Key Word:

transformer, diagnosis, methodology, identification, algorithm, PSO, parameters, high frequency, model in π , model failures.

Introduction générale

Introduction générale

C'est le fait qu'assurer la qualité de l'approvisionnement est l'une des tâches les plus importantes des entreprises du secteur de l'électricité, où le transformateur de puissance est un élément essentiel et décisif dans la chaîne de transmission de l'énergie électrique, qu'il faut prendre en compte. Le transformateur est l'une des machines électriques fixes qui travaillent pour d'élever ou d'abaisser les valeurs de tension et de courant d'entrée.

Pendant le fonctionnement, les enroulements des transformateurs électriques sont sujets à de nombreux problèmes affectés par des changements internes et externes ,Les signaux mesurables tels que les courants, les tensions, les vibrations ou bien encore la température peuvent fournir des informations significatives sur les défauts.

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).

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.

La FRA se base sur la repense 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 a détecter les défauts. ce qui était notre objectif au cours de ce travail.

Pour cerner l'objectif de notre travail 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 (composant, principe de fonctionnement, ….etc.), ainsi les contraintes et les defaults les plus connues avec les méthodes de diagnostique usuelles.

Introduction générale

Le deuxième chapitre consiste à la modélisation de transformateur. On a présenté les modales les plus fréquent ensuite le modèle adopté. On a expliqué aussi dans ce chapitre la méthode de l'analyse de la réponse en fréquence.

Le troisième chapitre de notre étude est consacré à la validation du modèle adopté et son exploitation pour une étude de diagnostic à haute fréquence, en réalisant plusieurs défauts sur -l'enroulement étudié afin de résoudre les problèmes d'optimisation difficiles, nous avons abordé la technologie d'essaim de particules .Les résultats obtenus sont discutés en fin du chapitre.

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

Chapitre I

Transformateurs : fonctionnement, défaillances et diagnostic

I.1 Introduction :

Le transformateur de puissance à un rôle très important dans les installations électriques, c'est la machine la plus critique et la plus coûteuse des éléments du transport de l'énergie électrique.

En effet, les alternateurs des centrales sont triphasés et la tension qu'ils produisent et relativement basse. Si on veut que de transport de l'énergie soit économique, il faut que celui-ci soit assuré à une tension beaucoup plus élevée ,cette élévation de la tension est assurée par des transformateurs triphasés [1].

Pour obtenir une connaissance de l'état des équipements et d'adopter les solutions les plus adéquates qui garantissent le fonctionnement correct des transformateurs, il est nécessaire d'effectuer périodiquement des inspections et des travaux de réparation [2].

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

I.2 Définition :

Le transformateur est une machine électrique statique à induction électromagnétique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitude généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoin d'utilisation [2]. Le transformateur est un appareil qui peut :

- Transformer une tension alternative d'une grandeur à une autre grandeur.
- Transformer un courant alternatif d'une grandeur à une autre grandeur.
- Isoler un circuit électrique d'un courant continu circulant dans un autre circuit électrique.
- Faire paraître une impédance comme ayant une autre valeur.

I.3 Technologie de construction :

Il existe plusieurs types des transformateurs, mais nous intéresserons à l'étude des transformateurs de puissances (distribution) de réseaux électriques, car ils présentent le plus grand intérêt dans le développement de l'interconnexion des réseaux.

On distingue essentiellement deux technologies : Les transformateurs à diélectrique liquide (ou immergés) et les transformateurs dits "secs"[4].

I.3.1 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 [4]. 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 [4] **:**

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 scellé sans échange d'air .Le volume de gaz se situe alors en haut de la cuve.



Figure I.1: Transformateur à diélectrique liquide [4].

I.3.2 Les transformateurs secs :

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 [4].



Figure I.2: Transformateur sec [4].

I.4 Constitution d'un transformateur triphasé :

Les principaux composants du transformateur de puissance sont :

I.4.1 Circuit magnétique :

Le circuit magnétique est composé de trois colonnes fermées par deux culasses [5].Le noyau est constitué d'un empilage de tôles ferromagnétiques feuilletées, chaque noyau porte [2], [5] :

- ✓ Un enroulement primaire.
- ✓ Un ou plusieurs enroulements secondaires.

Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis **.**

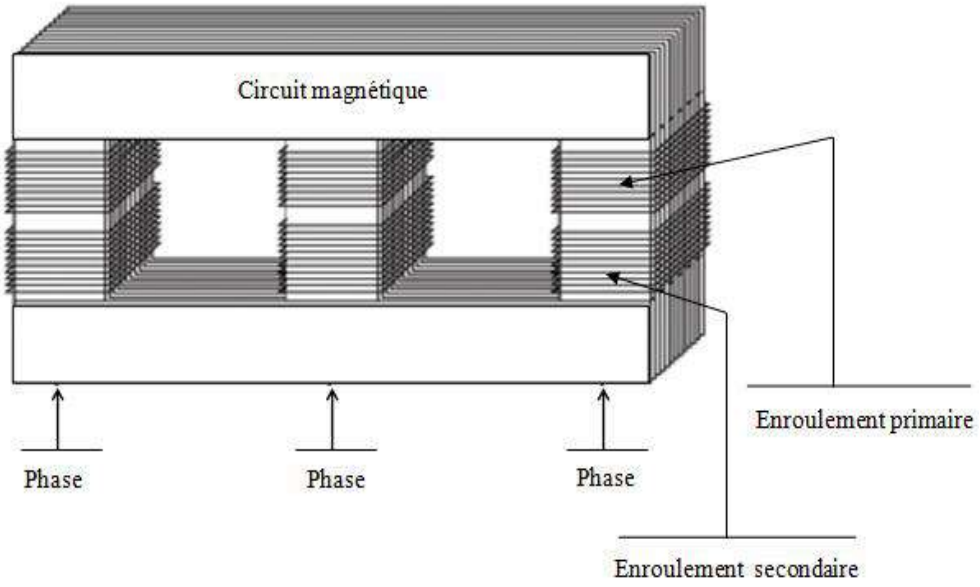


Figure I.3: Circuit magnétique d'un transformateur triphasé [5].

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

I.4.1.1 Type cuirassé :

Un transformateur de type cuirassé, compose d'un circuit magnétique entour complètement l'enroulement des deux cotés (Fig I.4), ce qui lui confère un fonctionnement à "flux libre". Ces transormateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions transitoires sont fréquentes [5].

Dans ce type de construction, les enroulements sont répartis en plusieurs sous groupes de bobines (galette). Les galettes sont alternées entre la haute et la basse tension afin de diminuer les fuites magnétiques. En outre, cette topologie offre l'avantage d'engendrer des forces en opposition entre chaque galette lors de court-circuit [5].

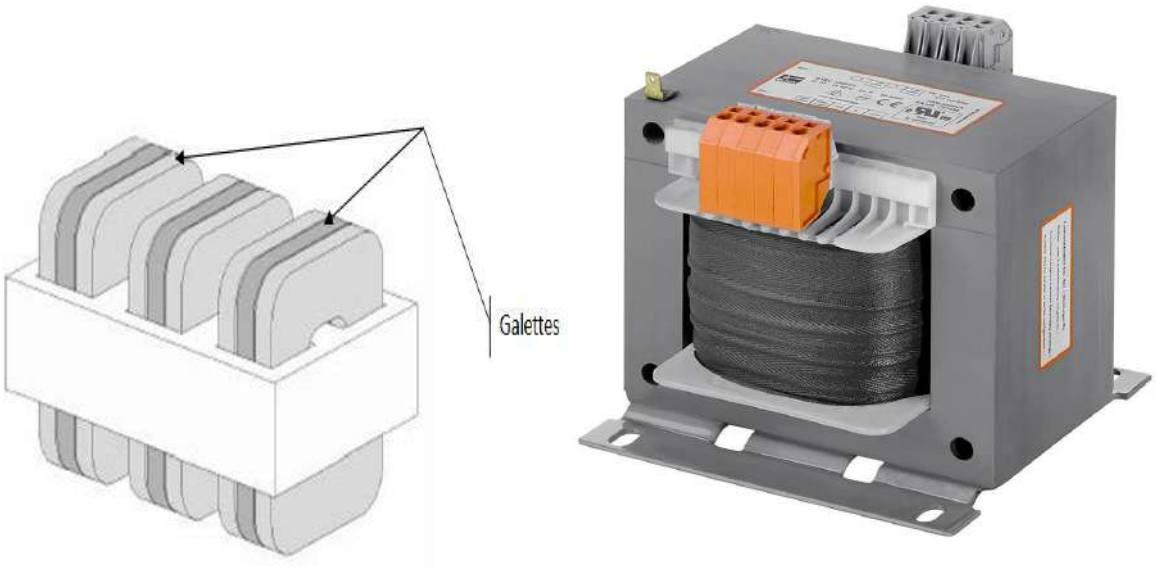


Figure I.4.: Transformateur cuirassé [5].

I.4.1.2 Type à colonnes :

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase . Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs **[5].(**Fig I.5).



Figure I.5: Transformateur à trois colonnes

Les enroulements sont constitués de spires dont le nombre est différent pour les enroulements de haute et de basse tension respectivement primaire/secondaire. Les conducteurs formant les enroulements sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes [5].

Selon la gamme de puissance des transformateurs, les conducteurs peuvent êtres sous forme de fils massifs, de section circulaire ou carrée, de type méplat, ou encore laminés en fines feuilles [6].

I.4.2 Circuit électrique :

Pour les transformateurs de BT et faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en file de cuivre émaillé, chaque couche étant isolée de la suivante par du papier [7].

Pour les transformateurs de HT et grande puissance, les bobines sont fractionnées en galettes,sont constituées par du fil rond ou méplat isolé au carton imprégné et séparées par des isolants tels que fibre, mica …etc [7].

Selon la position des enroulements sur les colonnes on distingue trois types [2], [7] :

- **Bobinage concentrique simple :**

L'enroulement BT est placé près de la colonne car la distance d'isolation entre la bobine et la colonne sera la plus faible.

- **Bobinage mixte :**

Ce type de bobinage utilisé pour éviter les très fortes différences de potentiel entre les spires d'extrémité de deux couches successives.

- **Bobinage alterné en galettes :**

Les bobinages hauts et bas sont fractionnés et constitués par des couronnes qui sont enfilées alternativement sur les noyaux.

I.4.3 Isolants :

On trouve deux types d'isolant [6]:

a) **Isolant solide :**

Il assure l'isolation entre :

- ✓ Spires et isolation des connexions.
- ✓ Isolation entre enroulements.
- ✓ Isolation entre enroulements et masse.

b) **Isolant liquide :**

Dans de nombreux équipements électrique, l'huile assure l'isolation entre les éléments à des potentiels électriques différents qu'il est nécessaire d'isoler les uns par rapport aux autres.

I.4.4 Cuve :

Les cuves sont conçues dans les types “réservataire ” ou “cloche”, elles sont destinées aux transformateurs concentriques ou cuirassé-imbriqués, respectivement. Elles assurent le serrage du total des composants de transformateurs, le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements [8], [9].



FigureI.6: Cuve d’un Transformateur de Puissance [8].

I.4.5 Traversées :

Les traversées sont des dispositifs ou composants électriques qui assurent le raccordement des enroulements .Ils sont constitués à l'intérieur d'une structure capacitive et à l'extérieur d'un isolateur afin d'éviter les arcs électriques [6], [10]. On peut, classer les traversées en deux grands groupes : type solide et type condensateur.



Figure I.7.: Traversées des Transformateurs [6], [10].

I.4.6 Régleur en charge :

Le régleur en charge est un dispositif électromécanique, permettant de rajouter ou de retrancher des spires à l'enroulement principal du transformateur, il permet aussi de modifier le rapport de transformation du transformateur sans mettre hors tension ce dernier. L'enroulement de réglage est généralement sur l'enroulement HT [6], [11].



Figure I.8: Régleur en charge [6], [11].

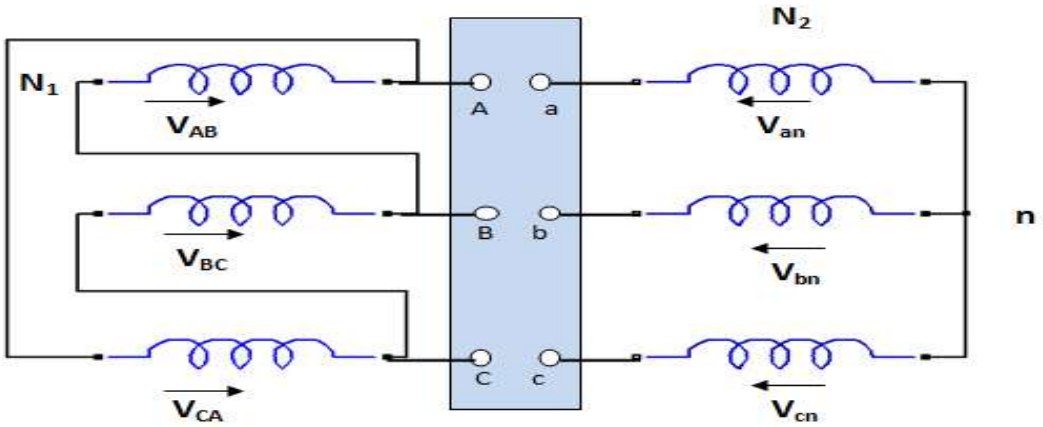
I.5 Mode de couplage :

- Au primaire les enroulements peuvent être couplés soit en étoile, soit en triangle.
- Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile, triangle et zigzag.

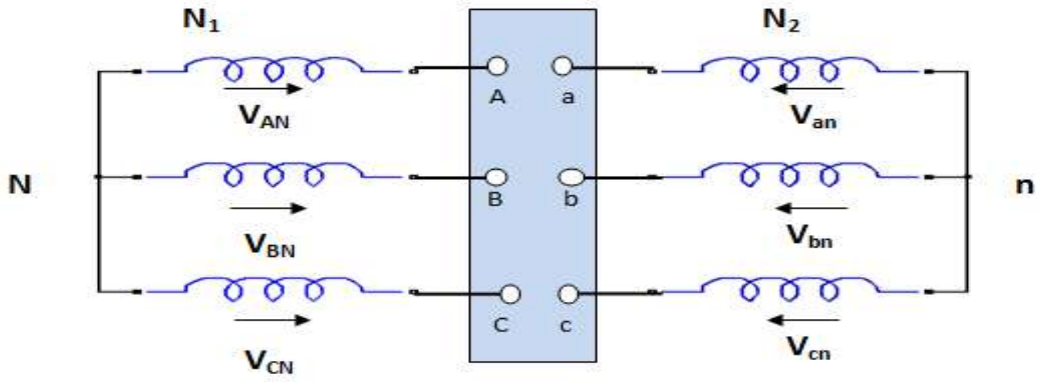
Tableau I.11 : Couplage des enroulements primaires et secondaires [12].

Couplage HT (coté primaire)	Couplage BT (coté secondaire)
Y : étoile	y : étoile
D : triangle	d : triangle
	z : zigzag

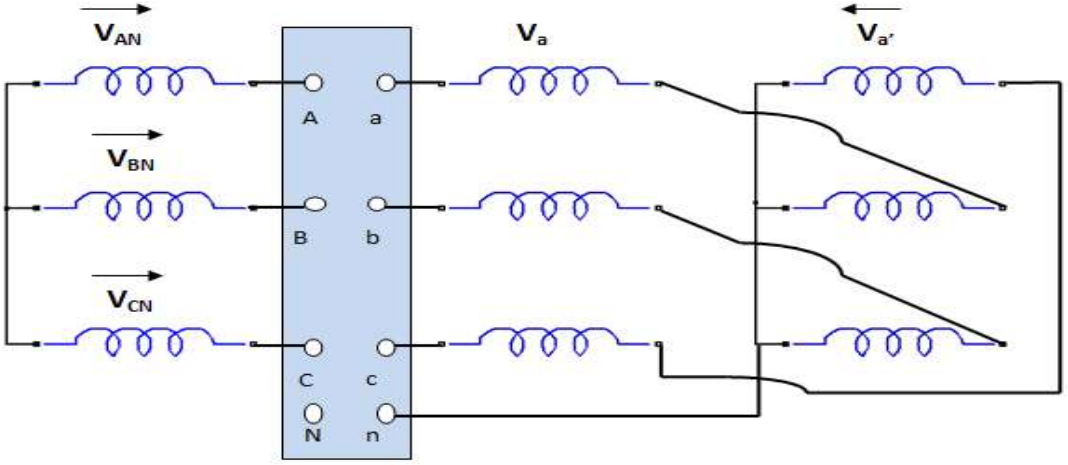
Voici ci-dessous la représentation de quelques couplages utilisés :



-a-Triangle- étoile



-b-Etoile- étoile



-c-Etoile- zigzag

Figure I.9: Représentations symboliques des couplages normalisés [12].

I.6 Principe de fonctionnement:

Selon la loi de Faraday-Lenz, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable Φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une f.e.m proportionnelle dans le temps ($d\Phi / dt$) [13].

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 spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire [13].

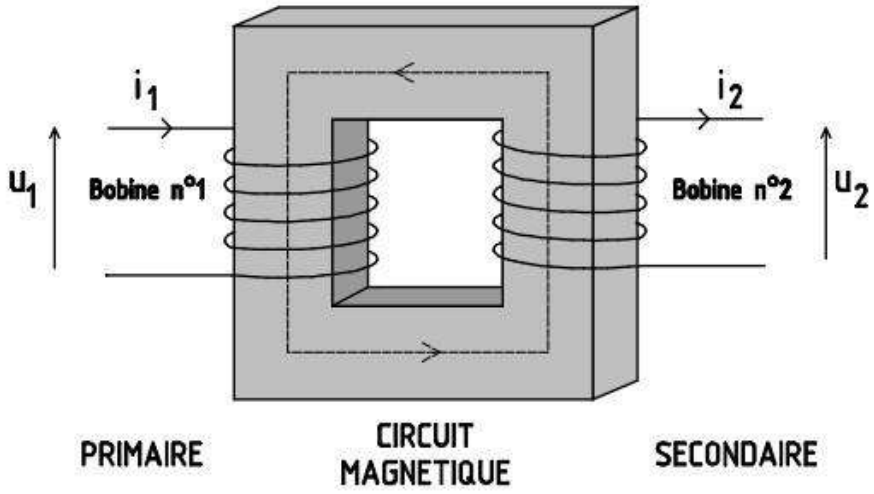


Figure I.10: Schéma de principe d'un transformateur.

I.7 Rôle du transformateur:

Les principaux rôles du Transformateur sont [14]:

1. l'adaptation (limitation) des courants de défauts du réseau dans les cas équilibrés (court-circuit triphasés) ou déséquilibrés (court-circuit monophasés ou biphasés).
2. L'isolation du deux parties d'un réseau afin, par exemple, de changer de régime de neutre entre l'amont et l'aval du transformateur.
3. L'élimination de certaines perturbations harmoniques.
4. Elévation de la tension pour permettre le transport de l'énergie électrique. Exemple : transformateurs élévateurs d'une Centrale.
5. Connecter deux réseaux de tensions différentes.

I.8 Défauts fréquents dans les transformateurs :

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

Le défaut d'isolement de la partie active est caractérisé par la perte, ou la très forte diminution, d'isolement d'un circuit électrique par rapport à son environnement, dont il doit être normalement isolé [16-19].

Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes [17]:

- Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux (Fig. I.11).

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



Figure I.11: Amorçage entre enroulements [16], [17].

I.8.2 Amorçage diélectrique entre spires :

C'est un amorçage entre spires d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux (Fig I.12).L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit localement [17], [19].



Figure I.12: Amorçage entre spires, sans court-circuit [16], [17].

I.8.3 Court-circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles. (Fig I.13).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 [16], [17].



FigureI.13: Court-circuit entre spires [16], [17].

I.8.4 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 (Fig. I.14).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 [16], [17].

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 [17], [18].



Figure I.14 : Décharges partielles sur des cales [16], [17].

I.8.5 Coupure du circuit électrique :

La plupart des cas de coupure d'un circuit électrique sont le résultat d'un défaut interne, suite à **[16]**, **[17]**:

- 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 (Fig. I.15).
- Un mauvais alignement d'un régleur.



Figure I.15: Coupure suite à la fusion d'un Conducteur [16], [17].

I.8.6 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 (Fig. I.16), à noter sans amorçages entre spires, ni court-circuit internes) [17], [18].

Il est possible de déformer un enroulement, ce qui fragilise inévitablement son isolement papier se trouvant au contact des conducteurs, sans nécessairement avoir d'amorçages entre spires ou à la masse. Un transformateur avec une telle déformation mécanique peut dans certains cas fonctionné à son régime nominal. Il reste néanmoins fragilisé et il n'est absolument pas certain qu'il puisse ainsi tenir des perturbations de court-circuit ou de surtensions ultérieures sans amorcer [17], [18].



Figure I.16 : Déformation mécanique d'un Enroulement [16], [17].

I.9 Les technique de diagnostic des transformateurs:

L'utilisation des techniques de diagnostic, 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.

Dans ce cadre, les différentes procédures de diagnostic effectuées sur les transformateurs de puissances sont :

I.9.1 Mesure électrique :

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont présentés comme suit :

I.9.1.1 Mesure du courant à vide :

Le courant d'excitation d'un transformateur est le courant consommé lorsque l'un des enroulements est alimenté à une tension alors que le second est ouvert. Ce courant total à vide à une composante de magnétisation et une composante de perte [20].

L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer le circuit magnétisé du transformateur [21]:

- Problème associé au noyau (des tôles coupées, des joints défectueux).
- Problème associé au bobines (des spires en court-circuité ou en circuit ouvert).

La Technique d'essai consiste à injecter une tension alternative de valeur réduite de différents niveaux, et réaliser une mesure du courant de magnétisation [21].

I.9.1.2 Mesure du rapport de transformation :

La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haut tension [21], elle est effectuée afin de mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures [20].

Les mesures sont effectuées :

- A la mise en service.
- En cas d'une défaillance.
- Après une réparation.

I.9.1.3 Mesure de la résistance des enroulements :

Cette mesure à pour objectif de déterminer les pertes par effet joule dans les enroulements ainsi que l'existante des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinages [20].

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 [20].

La résistance corrigée est calculé par l'équation (I.1) suivante :

$$R_{corrg} = R_m * \left(\frac{\theta_F + \theta_{ref}}{\theta_F + \theta_{en}}\right) \qquad (I.1).$$

R_m : Résistance mesuré.

Θ_f : Température de fonctionnement (235 pour le cuivre et 255 pour aluminium).

Θ_{ref} : Température de référence.

Θ_{en}: Température des enroulements.

I.9.1.4 Mesure de la réactance de fuite :

La mesure de la réactance de fuite, permet de détecter des changements importants qui devraient amenée à des investigations plus importantes, un circuit ouvert ou des courts-circuits entre spires, ou entre enroulements et cuve [20], [21].

I.9.2 Mesures diélectriques :

L'objectif de ces mesures diélectriques, est de détecter la dégradation dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenu d'un incident [20].

Pour évaluer son état on doit effectuer les mesures suivantes :

a) Mesure de facteur de perte :

La mesure du facteur de perte est un bon outil pour déterminer la qualité, l'intégrité et l'état de l'isolement capacitif des enroulements [2], [20].

b) Mesure de capacité des enroulements :

La mesure de capacité se fait entre la cuve et l'enroulement ou entre les enroulements (Fig. I.17) [2].

La variation de la capacité d'isolement prouve l'existence de conditions anormales, comme la présence d'humidité, de sections de conducteurs Court-circuitées ou interrompues, de déformation de bobinage [20].

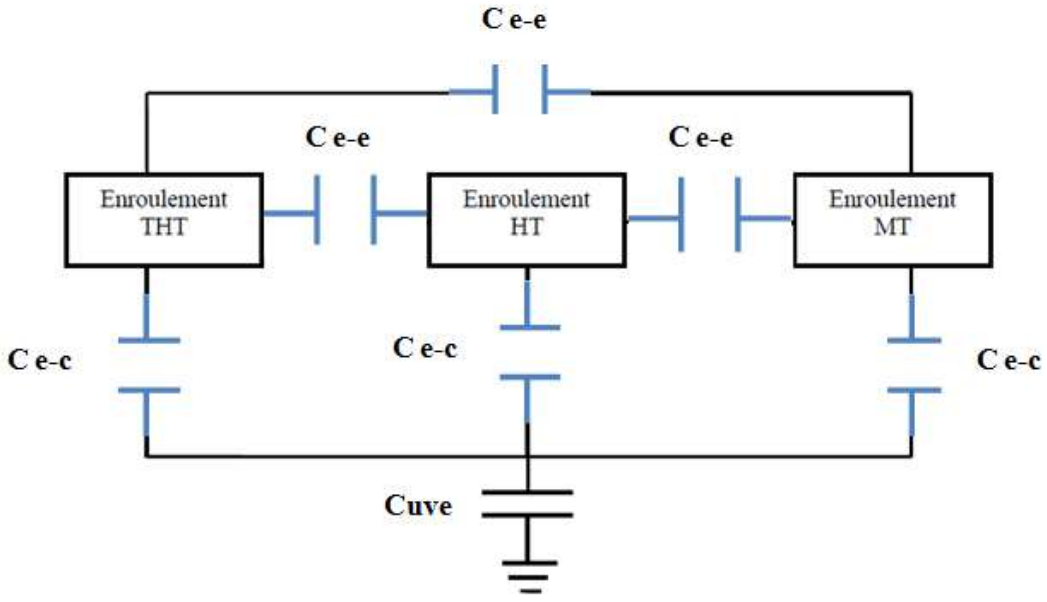


Figure I.17: Schéma de capacité d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements [2].

c) Mesure de capacité des bornes :

Cette mesure peut renseigner sur l'état des bornes ce qui permettra d'éviter des explosions des traversées [2], [20].

Si les bornes sont de type capacitif, elles possèdent normalement une prise de mesure, une borne capacitive de construction typique possède deux isolements C1 et C2 voir (Fig. .I.18) [20].

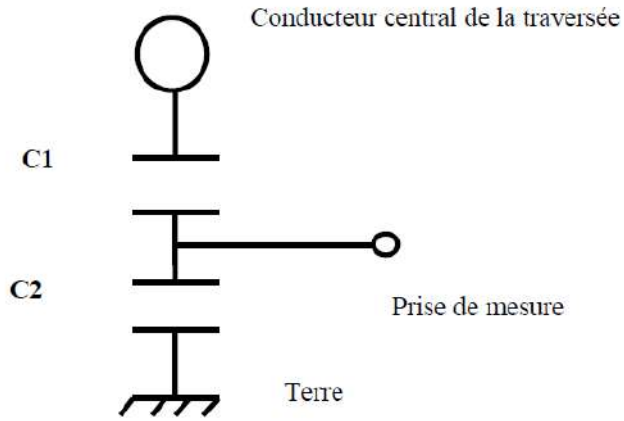


Figure I.18. : Schéma d'une borne de type capacitif [2].

Les résultats des mesures doivent être comparés aux résultats des tests effectués en usine, permettant de déterminer les courts-circuits dans les galettes capacitives de la traversée et les détériorations du corps des traversées [20].

d) Mesure de la résistance d'isolement en courant continu :

Elle correspond principalement à la mesure de la conductivité superficielle de l'isolement **.** Elle consiste à vérifier l'isolement entre [2]:

- enroulements,
- enroulement et cuve,
- cuve et masse.

Cette mesure consiste à court-circuité toute les bornes de l'enroulement essayé et y appliquer une tension généralement de 5000 V avec le mégohmmètre et les autre enroulements sont court-circuités et raccordés à la terre [22].

I.9.3 Analyse d'huile :

L'huile isolante est l'un des éléments les plus importants dans un transformateur qui nécessite une surveillance et un entretient car sa fonction est d'assure l'isolation et le refroidissement de celui-ci [2], [23].

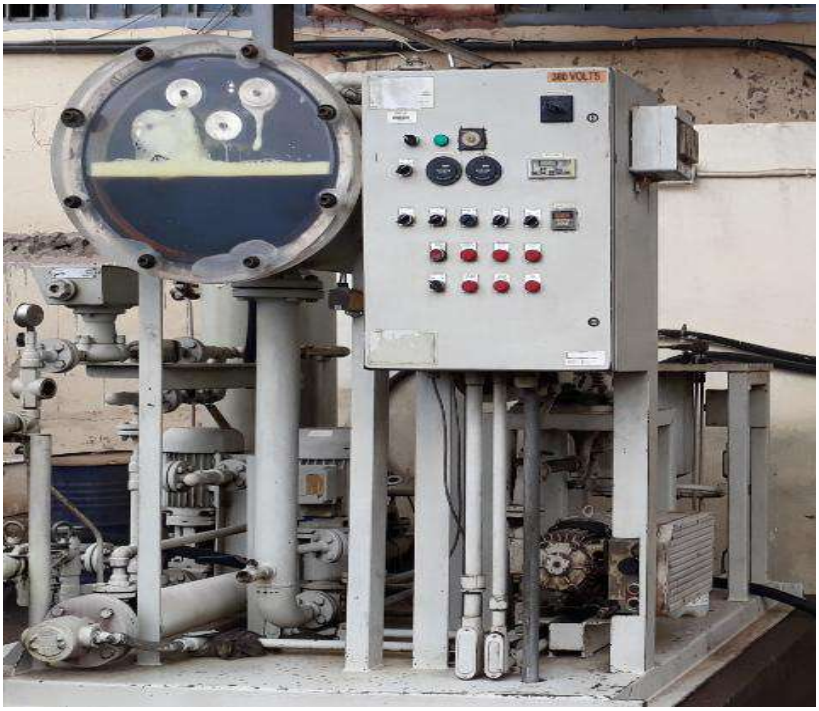


Figure. I.19: machine d'analyse d'huile.

Les aspects les plus significatifs à vérifier sur l'huile sont :

- Les analyses physico-chimiques,
- Les analyses des furanes,
- Les analyses des gaz dissous.

I.9.3.1 Analyses physico-chimiques :

Ces analyses à pour but de déterminer la tenue diélectrique de l'huile et son état d'oxydation à travers [20], [21], [24-26]:

- L'indice de neutralisation.
- L'aspect et couleur.
- La viscosité.
- Teneur en eau (mg/kg).
- La teneur en soufre.
- Tension de claquage (kV) …etc.

I.9.3.2 Analyses des furanes :

La dégradation des matériaux cellulosiques qui constitue de l'isolation solide des enroulements du transformateur, conduit à la formation des dérivées du furane .La présence des dérivées du furane dans les huiles du transformateur est un bon outil de diagnostic de l'état de l'isolation [20], [21].

L'analyse des composés des furanes dans l'huile est effectuée par chromatographie liquide dans le laboratoire [21].

I.9.3.3 Analyses des gaz dissous :

Les analyses des gaz dissous dans l'huile sont présentées ci-dessous :

1) **Formation de gaz dissous dans l'huile lors de défaut** :

Cette technique de diagnostic est une méthode prédictive fiable, et présente l'avantage de pouvoir être effectuée sans laisser le transformateur hors service. Elle permettre [20]:

- De suivre le comportement du transformateur à travers des analyses par chromatographie en phase gazeuse.
- D'avoir des hypothèses sur le type de défaut (Arc, décharge partielle,…etc).
- Détecter la présence d'anomalies dans les transformateurs dés leur premier stade d'apparition et de suivre leur évolution.

2) **Méthodes d'interprétation des résultats :**

Sont des techniques bien connu dans l'industrie, consiste à expliquer les résultats d'une recherche scientifique. Les méthodes d'interprétation les plus connues sont ceux de Rogers, Doernenburg et triangle de Duval [27].

I.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les transformateurs de puissance et son principe de fonctionnement. En plus une vue d'ensemble des différentes intérêts des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, dans le but de réduire la défaillance dans les enroulements et d'augmenter la durée de vie de transformateur.

➢ *Chapitre II*

Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle

II.1 Introduction :

En régime fréquentiel, le transformateur est considéré comme un réseau complexe des éléments RLC, qui est représenté par trois éléments, des résistances, des inductances et des condensateurs. les trois éléments sont utilisés pour représenter la résistance des enroulements de cuivre, l'inductance des bobines d'enroulement et la capacité des couches d'isolation entre spires et entre les bobinages, entre un enroulement et un noyau, entre un noyau et la cuve, et encore entre la cuve et un enroulement [26].

Nous présentons dans ce chapitre les principaux modèles des transformateurs de puissance qui existent dans la littérature, dans le but de choisir le modèle le mieux adapte 0 notre étude.

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

II.2.1 Définition :

L'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil qui peut donner une indication du mouvement du noyau ou d'enroulement dans les transformateurs. Ceci est fait en effectuant une mesure simple, tout en regardant à quel point un enroulement de transformateur peut transmettre un signal de basse tension qui varie en fréquence. Tout cela est lié à son impédance, dont les éléments capacitifs et inductifs sont intimement distribués dans la construction physique du transformateur. Les changements de la réponse en fréquence mesuré par des techniques FRA peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être en suite identifiée et analysé [28].

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 [28].

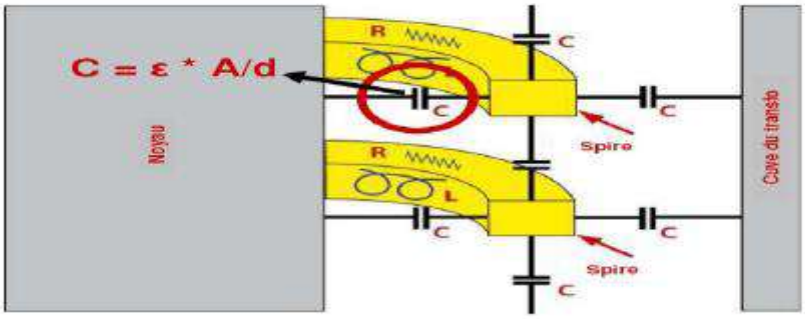


Figure II. 1 : Modèle d'un enroulement de transformateur

La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs. Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances [28].

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 [28].

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 [29].

II.2.4 Quand faut-il faire un test FRA [30]?

Généralement les mesures sur les transformateurs sont recommandées .

- 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 courts-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 [31] 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 (figureII.2) [32].

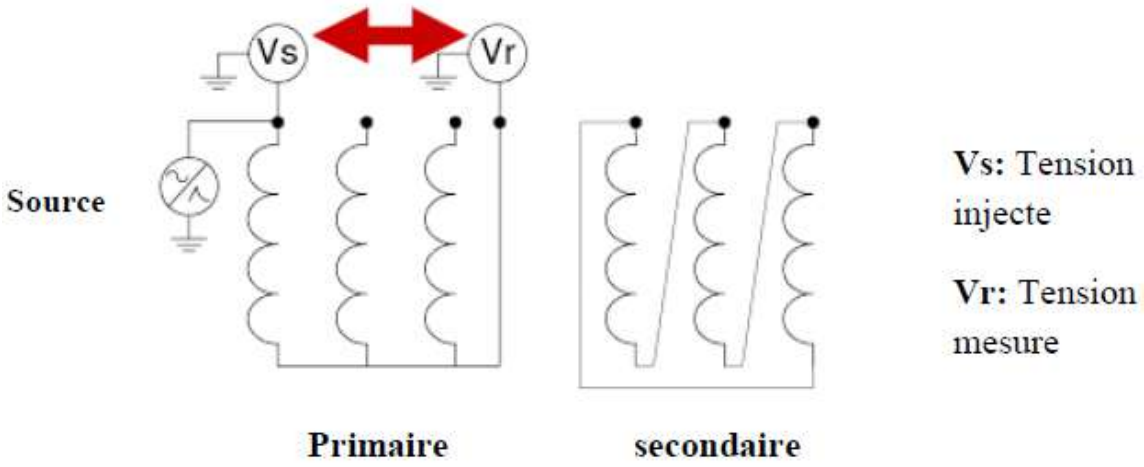


Figure II. 2.Essai entre extrémités

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 [32].

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 (figureII.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 [32]

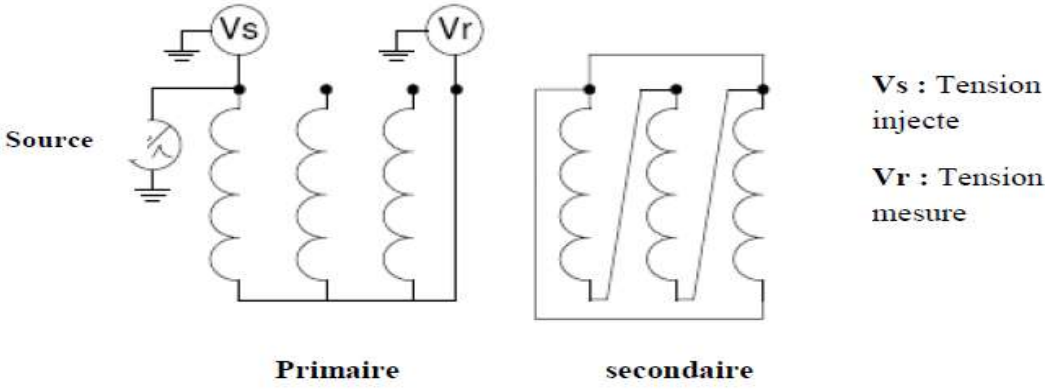


Figure II. 3. Essai en court-circuit

II.2.5.3 Essai capacitif entre enroulements

On applique le signal à une extrémité d'un enroulement [32] et l'on mesure la réponse à une extrémité d'un autre enroulement de la même phase (non relie au premier) (figureII.4) .

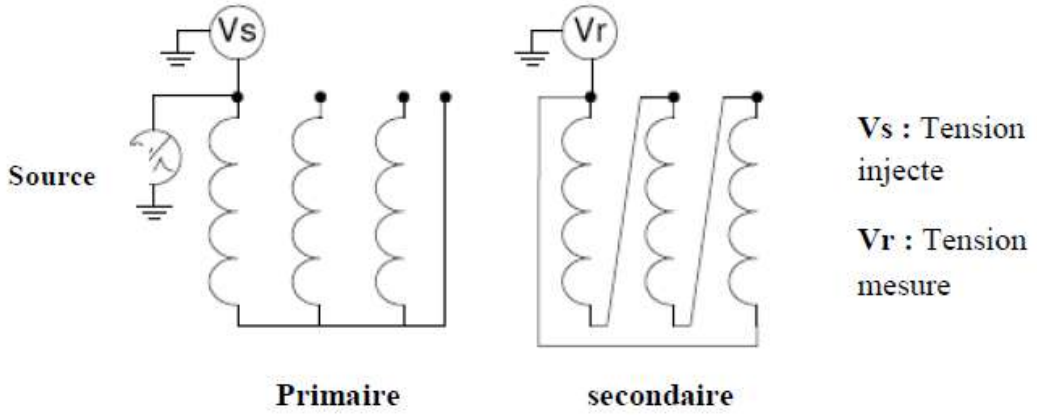


Figure II. 4.Essai capacitif entre enroulements

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) [32].

Pour cette mesure, la plage en basse fréquence est déterminée par le rapport des nombres de spires des enroulements [32].

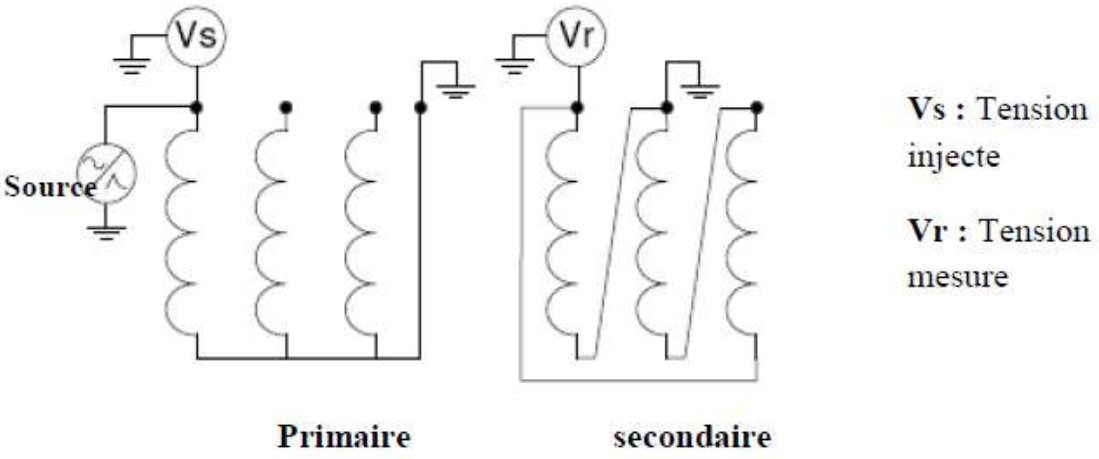


Figure II. 5. Essai inductif entre enroulements

II.2.6 Méthodes d'interprétation :

A. 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 [32].

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

B. 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.

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 [32].

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

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'enroulement.
2 MHz < f < 10 MHz	Disposition de couplages et câbles de mesure.

II.2.7 Détection de défaut par FRA: [32]

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

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

- La déformation d'un enroulement (axiale et radiale).
- Le mouvement et déplacement d'enroulement haute et basse tension.
- L'effondrement partiel d'un enroulement.
- Mouvement du circuit magnétique.
- Rupture de spires et desserrage de l'enroulement de la culasse.
- Court-circuit ou circuit ouvert d'enroulement.
- Mauvaise connexion de prise de terre de la cuve du transformateur.
- Problèmes de connexion interne

Cependant, La mesure par FRA est souvent la seule méthode qui peut détecter les mouvements axiaux d'enroulements. Elle détecte également les mouvements radiaux, qui peuvent être aussi vérifiés par les essais de réactance de fuite. Il est utile de mettre en corrélation les deux méthodes pour augmenter la précision du résultat. Cela est également vrai pour les autres défauts, notamment mécanique [32].

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 [33] :

- 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 Modèle de RESEL :

RESEL [33] 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 [33].

La figure II.6 illustre la modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.

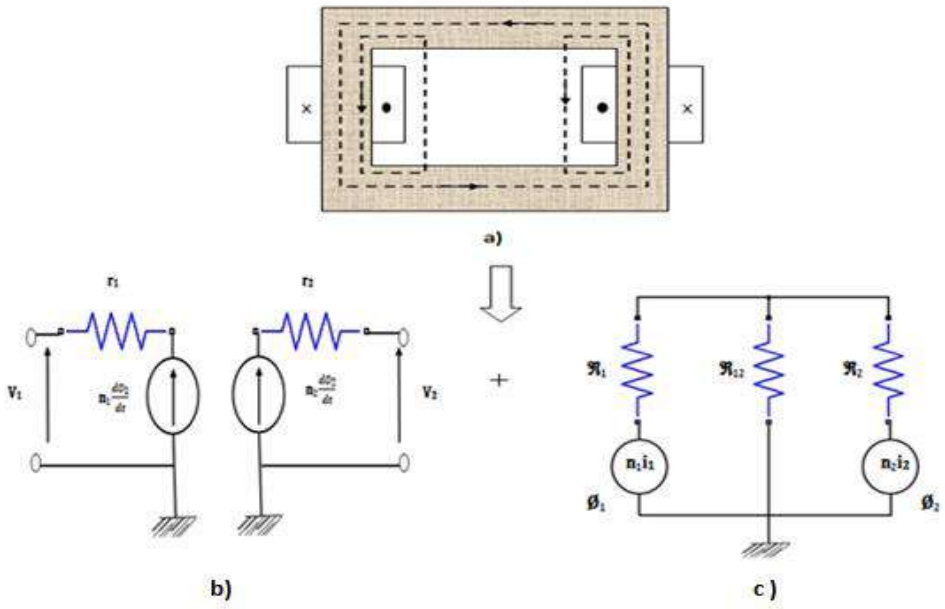


Figure II. 6. La modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.

II.3.2.2 Modèle d'EMTP :

EMTP est une abréviation du mot « Analyse des transitoires électromagnétiques », ce code est utilisé pour simuler le comportement en régime transitoire des réseaux électriques. Pour modéliser un transformateur sous EMTP [33] consiste à faire un schéma équivalent comprenant :

- Des transformateurs parfaits.
- Une branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer.
- Des résistances des enroulements, des capacités de couplage et des inductances de fuite.
- Des inductances de fuite des groupes (galettes, couches, ou bobines).

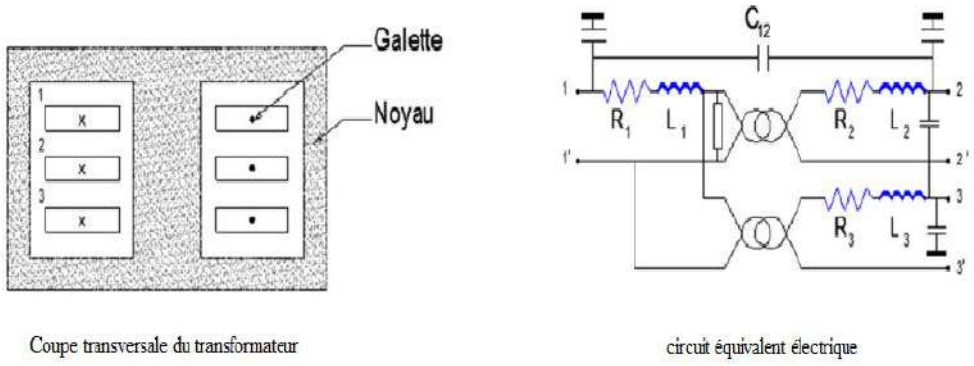


Figure II.7.Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

Les paramètres sont déterminés soit par la mesure (essai à vide, essai en court-circuit…), soit par le calcul direct de la géométrie .L'intérêt du modèle est son utilisation dans EMTP permettant d'intégrer des schémas non-linéaires (parafoudres, ...), des lignes à constantes réparties, et d'effectuer des études d'interaction du transformateur avec le réseau dans des configurations réelles. Mais, dans certains cas, l'utilisation du code de calcul EMTP, pour modéliser un transformateur, ne représente pas la réalité [33].

II.3.2.3 Modélisation par la théorie de lignes :

En même temps que l'évolution de la théorie et l'analyse modale de lignes de transmission, des modèles, basés sur la même théorie, sont développés, pour modéliser les transformateurs figure 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 [33].

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 [33].

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 [33].

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 [33].

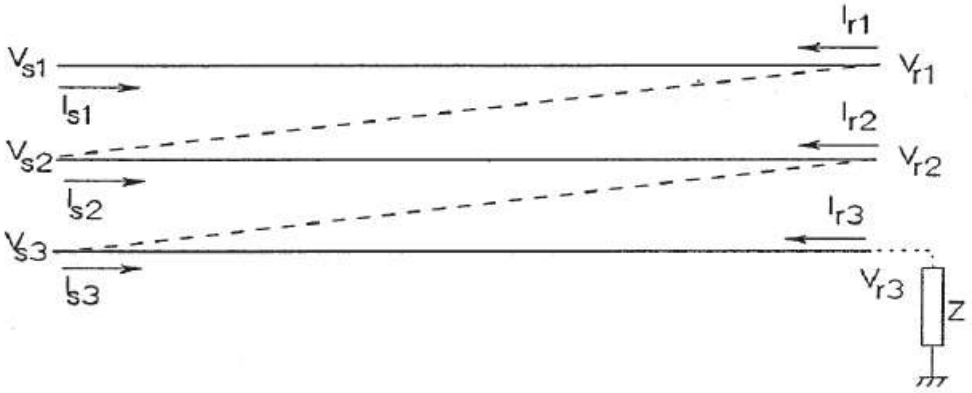


Figure II.8. Schéma équivalent d'un enroulement.

Malgré les conclusions positives de ces diverses études, la modélisation par la théorie de lignes semble avoir un domaine d'application spécifique et restreint : elle est limitée pour les études d'interaction entre transformateur et ligne. La figure (II.9) la détermination des paramètres n'est pas aisée (impédance caractéristique de la ligne équivalente au transformateur [33].

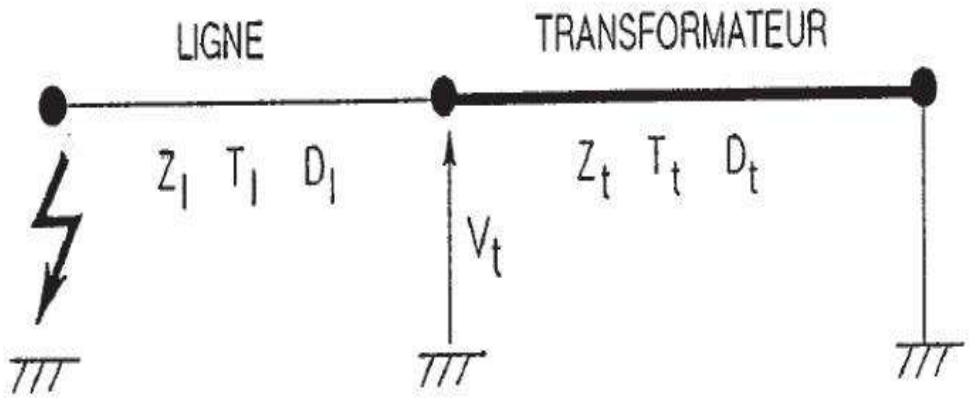


Figure II.9. Modélisation du transformateur par une ligne

- Z impédance caractéristique.
- T temps de propagation.
- D facteur d'amortissement.

II.3.2.4 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.

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 [34].

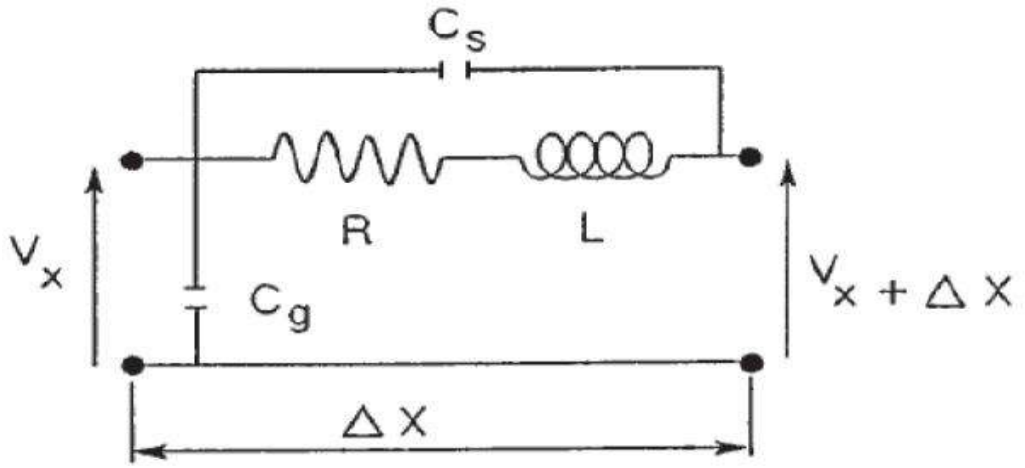


Figure II.10. Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section longueur ΔX.

II.3.2.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles :

Heller et V Severka ont montré que le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc est assimilable à celui d'un système de condensateurs, de résistances, et d'inductances. C'est le principe du modèle de transformateur de puissance basé sur les inductances propres et mutuelles. Selon l'étude envisagée, c'est-à-dire selon qu'oins intéresse au phénomène de propagation, ou aux modes de résonance du transformateur, ces paramètres peuvent être répartis ou concentrés. Cette approche peut être plus ou moins précise, et plus ou moins coûteuse en temps de calcul, suivant le degré de raffinement atteint dans la représentation des enroulements [34].

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes Figure (II.11).

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

inductances mutuelles. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément, une capacité par rapport à la masse [34].

Ces éléments sont calculés, en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau magnétique [34].

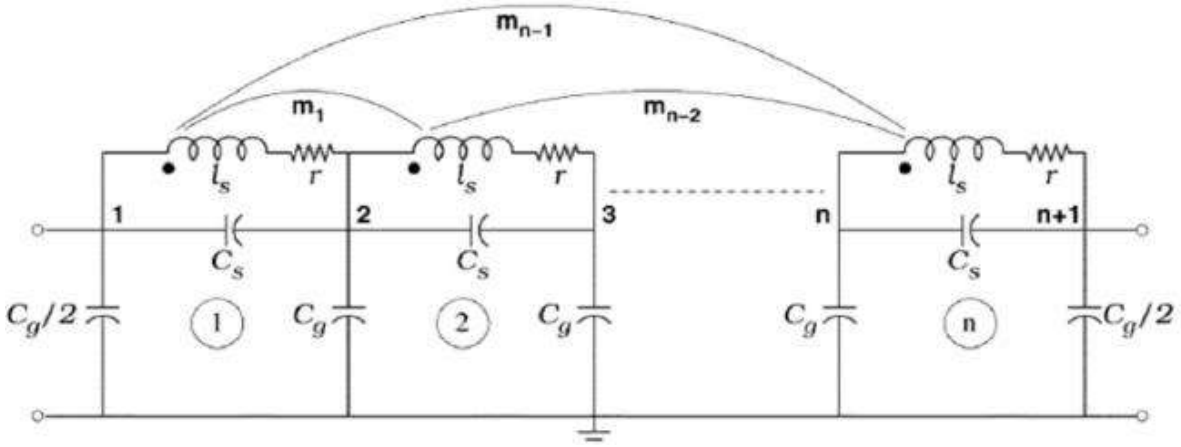


Figure II.11.modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié.

Avec :

Cs : capacité série.

Cg : capacité shunt.

r: résistance.

L : l'inductance propre.

M1N : représenté les inductances mutuelles.

II.3.2.6 Le modèle équivalent en π du transformateur en HF :

La structure de ce modèle est basée sur la théorie du quadripôle en. 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 [34].

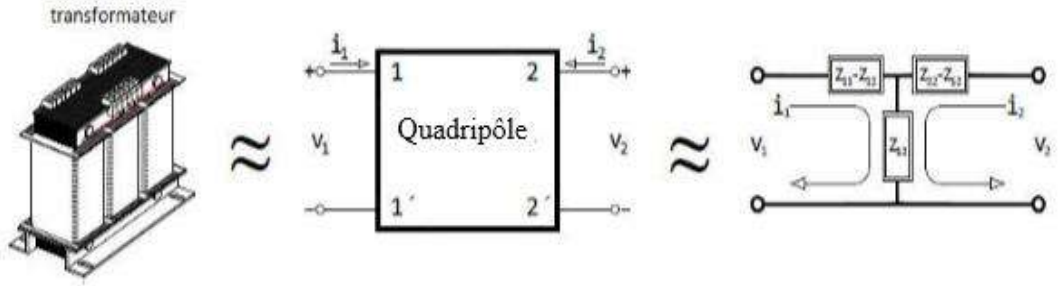


Figure II.12 : Structure de modèle d'un quadripôle.

Le circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases est montré dans la figure. II.13.

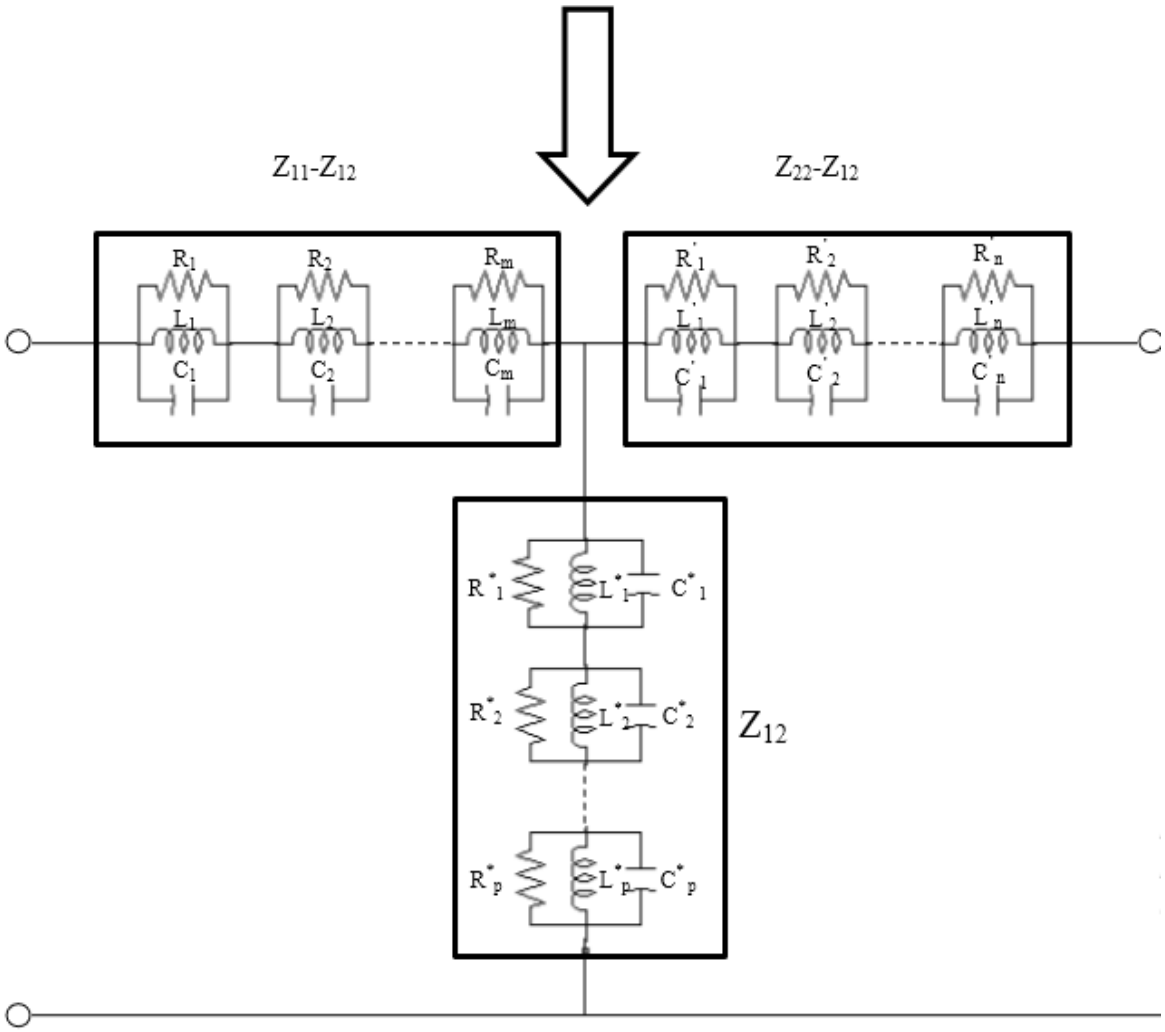


Figure II.13 : Processus suivi pour obtenir la structure de modèle d'un quadripôle (modèle en T).

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général pour 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 de mesure 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, nous présenterons le modèle du transformateur sur lesquels nous nous concentrerons sur 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.

Le modèle le plus approprié pour notre étude est le modèle équivalent en π du transformateur en HF à base d'inductance propre et mutuelle, 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 de l'étude :

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- Présenter le modèle du transformateur de puissance adopté en tenant compte des équations mathématiques du schéma équivalent.
- Présenter la procédure de calcul des paramètres.
- détecter et classifier des défauts (inductifs et capacitifs) dans un enroulement de transformateur de puissance par l'observation de la variation entre les grandeurs mesurées par rapport à une signature de référence d'un enroulement sain.
- Optimiser l'allure de la réponse en fréquence des différentes phases en haute fréquences HFF), en utilisant la technique d'optimisation méta heuristique essaim de particules.

III.3 Simulation :

III.3.1 Logiciel utilisé :

Cette simulation est réalisée par le logiciel « Matlab-Simulink » avec Power Système Toolbox [21].

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 [21].

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 [21].

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. [21].

III.3.1.3 Version utilisée :

Matlab R2013a (8.1.0.604).

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 π-équivalent d'un transformateur en HF basé sur l'inductance propre et mutuelle contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur (dans notre cas nous injecterons des défauts capacitifs et inductifs).

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

Le schéma fonctionnel de notre modèle a été généré 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.

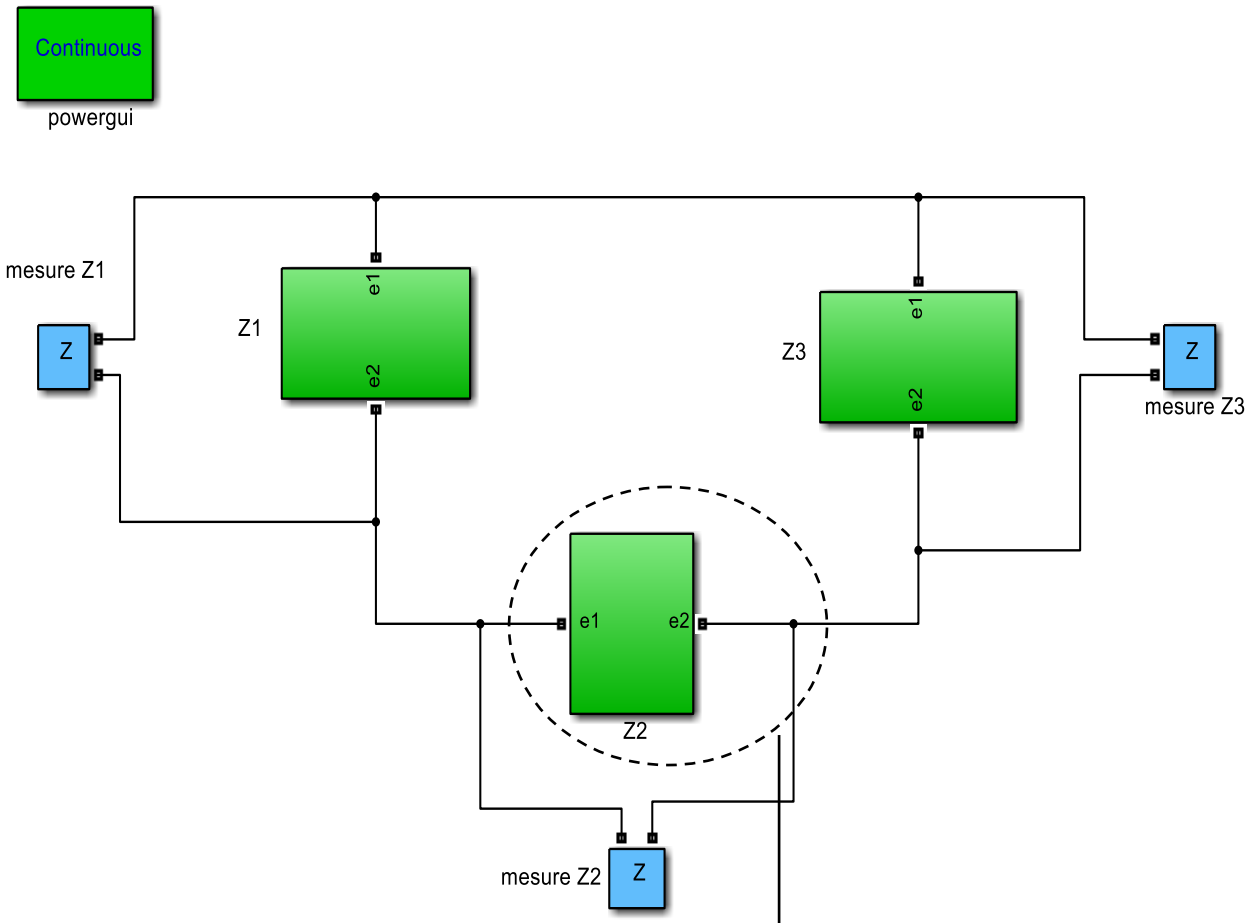


Figure III.1 : Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé.

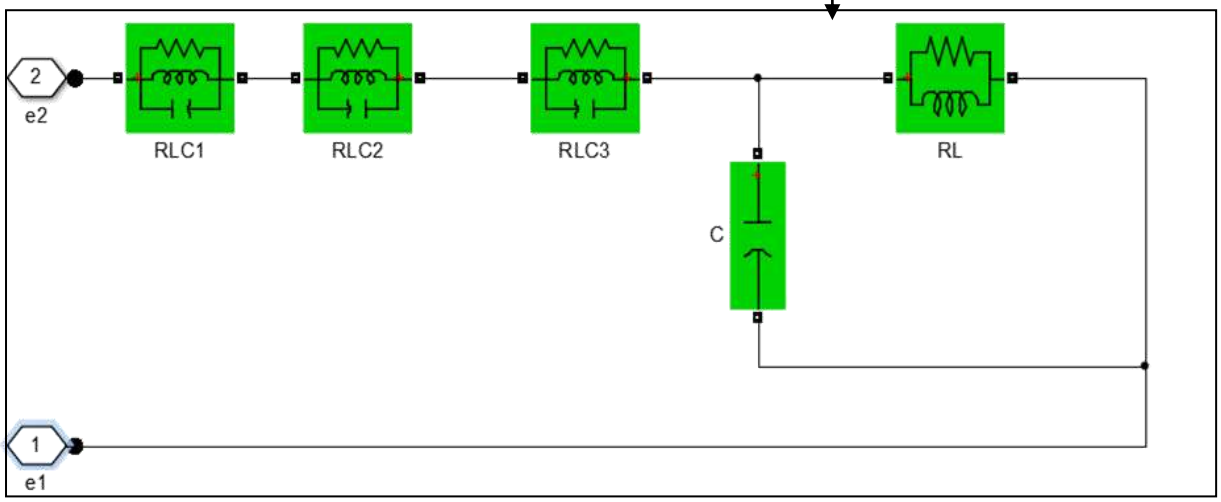


Figure III.2 : Le circuit équivalent de chaque phase.

III.4.2 Méthodologie de calcul des paramètres

➔ Afin de déterminer les paramètres du modèle adopté en HF du transformateur, on propose la méthodologie suivante [25]:

- Une simulation sur chacune des trois phases du transformateur.
- Une estimation des valeurs obtenues.

A l'issue de cette méthode utilisée, un circuit composé de trois cellules RLC en séries en parallèle avec une autre cellule RL et C est synthétisé dont sa réponse en fréquences et ensuite comparée à la réponse estimée.

➔ Les paramètres L1, L2 et L3 représentent les inductances de magnétisation des trois branches RLC en séries telles exprimées par les équations (III.1 - III.3) où R_1, R_2 et 3 sont les reluctances magnétiques et N1, N2 et N3 sont les nombres de spires sur chaque enroulement.

➔ Les variations des paramètres L1, L2 et L3 peuvent indiquer des aimantations résiduelles, ou des défaillances associées au noyau magnétique.

$$L_1 = \frac{{N_1}^2}{R_1} \qquad \text{(III.1)}$$

$$L_2 = \frac{{N_2}^2}{R_2} \qquad \text{(III.2)}$$

$$L_3 = \frac{{N_3}^2}{R_3} \qquad \text{(III.3)}$$

➔ Les pertes fer peuvent être représentées en ajoutant les trois paramètres résistifs R1, R2 et R3 exprimées en (III.4- III.6) où V1, V2 et V3 sont les tensions d'essai et P01, P02 et P0W3sont les pertes fer.

➔ Des variations dans les paramètres R1, R2 et R3 peuvent indiquer des problèmes associésau noyau magnétique.

$$R_1 = \frac{{V_1}^2}{P_{01}} \qquad \text{(III.4)}$$

$$R_2 = \frac{{V_2}^2}{P_{02}} \qquad \text{(III.5)}$$

$$R_3 = \frac{{V_3}^2}{P_{03}} \qquad \text{(III.6)}$$

➔ En fin, le modèle en HF (Fig.III.3) est complété par l'addition des paramètres C représentant la capacité d'enroulement du chacune des branches RLC.

➔ Des variations dans les paramètres C1, C2 et C3 peuvent indiquer des problèmes tels quele mouvement global des enroulements.

➔ Les paramètres Ra La et Ca telles exprimées par les équations (III.7 – III.9)

$$R_aX = \frac{\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}\}}{\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{G_i}{|Y_{med_i}|^2}\}} \quad \text{(III.7)}$$

$$L_aX = \frac{(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{|Y_{med_i}\cdot|^2}1)^2-(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_{i^2}\cdot|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{\omega_{i^2}}{|Y_{med_i}|^2}1)}{(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_i\cdot|Y_{med_i}|^2}1)(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{\omega_{i^2}}{|Y_{med_i}|^2}1)-(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{S_i\cdot\omega_i}{|Y_{med_i}|^2}1)} \quad \text{(III.8)}$$

$$C_{LV}X = \frac{(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}1\frac{1}{\omega_i\cdot|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}1\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}1)-(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_{i^2}\cdot|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{S_i\cdot\omega_i}{|Y_{med_i}|^2}\})}{(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}1\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}1)^2-(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_{i^2}|Y_{med_i}|^2}1)(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{\omega_{i^2}}{|Y_{med_i}|^2}\})} \quad \text{(III.9)}$$

III.4.3 Calcul des impédances Zph1, Zph2 et Zph3 par simulation :

Lorsque des mesures de circuit ouvert de bout en bout sont obtenues, les effets des impédances Zph1, Zph2 et Zph3 sont mélangés en raison du couplage magnétique. Par exemple, l'impédance mesurée Zsiml1 obtenue entre deux bornes du circuit (Fig. III.3) est égale à la connexion en parallèle de Zph1 et (Zph2 + Zph3). Dans ce cas, la variation de l'impédance simulée Zsiml1 peut être dérivée de n'importe quelle impédance Zph1, Zph2 ou Zph3, et l'emplacement précis de la phase en défaut n'est pas simple. Les impédances analogiques Zsiml2 et Zsiml3 souffrent des mêmes effets de couplage et des mêmes inconvénients [25].

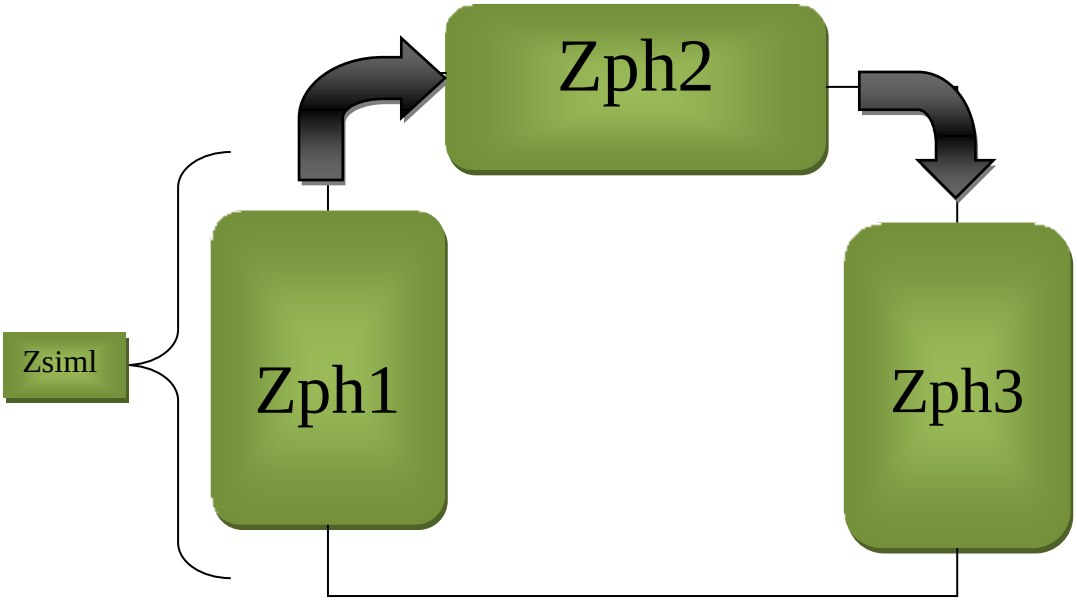


Figure III.3: Modèle de noyau de transformateur représenté par trois impédances ZU, ZV et ZWcontenant les caractéristiques de chaque phase.

Les trois équations suivantes sont obtenues avec lesquelles obtient l'impédance indépendante de chaque phase du transformateur respectivement :

$$Z_n U = \frac{Z_m U^2+Z_m V^2+Z_m W^2-2.(Z_m U.Z_m V+Z_m U.Z_m W+Z_m V.Z_m W)}{2.(Z_m U-Z_m V-Z_m W)} = \frac{Z_m U}{2} - \frac{Z_m V}{2} - \frac{Z_m W}{2} + \frac{2.(Z_m V.Z_m W)}{(Z_m V+Z_m W-Z_m U)} \quad \text{……(III.10)}$$

$$Z_n V = \frac{Z_m U^2+Z_m V^2+Z_m W^2-2.(Z_m U.Z_m V+Z_m U.Z_m W+Z_m V.Z_m W)}{2.(Z_m V-Z_m U-Z_m W)} = \frac{Z_m V}{2} - \frac{Z_m U}{2} - \frac{Z_m W}{2} + \frac{2.(Z_m U.Z_m W)}{(Z_m U+Z_m W-Z_m V)} \quad \text{……..(III.11)}$$

$$Z_n W = \frac{Z_m U^2+Z_m V^2+Z_m W^2-2.(Z_m U.Z_m V+Z_m U.Z_m W+Z_m V.Z_m W)}{2.(Z_m W-Z_m U-Z_m V)} = \frac{Z_m W}{2} - \frac{Z_m V}{2} - \frac{Z_m U}{2} + \frac{2.(Z_m V.Z_m U)}{(Z_m U+Z_m W-Z_m W)} \quad \text{……....(III.12)}$$

III.4.4 Estimations 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.

La courbe de résonance 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.4) [25].

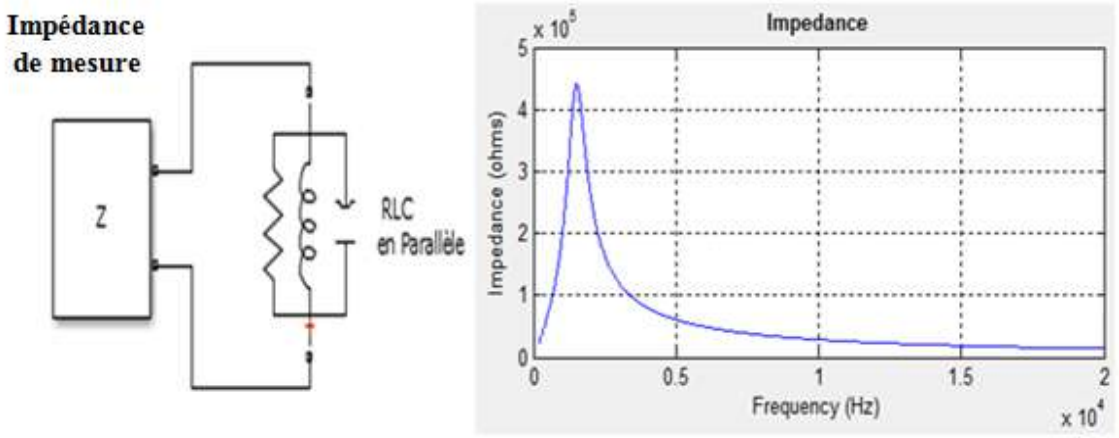


Figure III.4: Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur.

Pour trouver l'erreur on applique :

$$Error_{total} = \sum_{i=1}^{I=n_{bmf}} E_i = \sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \frac{\left|Y_{est_i} - \left(G + j*\left(\omega.c - \frac{B}{\omega}\right)\right)\right|^2}{\left|Y_{est_i}\right|^2} \quad \text{(III.13)}$$

Les paramètres RLC sont déterminés en utilisant les équations suivantes (III.14 - III.16).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \left(\frac{1}{\left|Y_{est_i}\right|^2}\right)}{\sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \left(\frac{G_{est_i}}{\left|Y_{est_i}\right|^2}\right)} \quad \text{(III.14)}$$

$$C = \frac{(t_1^2 - t_4 * t_2)}{(t_1 * t_3 - t_5 * t_2)} \quad \text{(III.15)}$$

$$L = \frac{(t_1 * t_3 - t_5 * t_2)}{(t_1 * t_5 - t_4 * t_3)} \quad \text{(III.16)}$$

Sachant que :

$$t_1 = \sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \left(\frac{S_{est_i}}{\left|Y_{est_i}\right|^2 * \omega_i}\right) \quad \text{(III.17)}$$

$$t_2 = \sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \left(\frac{1}{\left|Y_{est_i}\right|^2 * {\omega_i}^2}\right) \quad \text{(III.18)}$$

$$t_3 = \sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \left(\frac{1}{\left|Y_{est_i}\right|^2}\right) \quad \text{(III.19)}$$

$$t_4 = \sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \left(\frac{S_{est_i} * \omega_i}{\left|Y_{est_i}\right|^2}\right) \quad \text{(III.20)}$$

$$t_5 = \sum_{i=1}^{i=n_{bmf}} \left(\frac{{\omega_i}^2}{\left|Y_{est_i}\right|^2}\right) \quad \text{(III.21)}$$

III.4.5 Calcul de La fonction objective (l'impédance de chaque cellule RLC parallèle) :

La méthode d'estimation analytique commence à établir l'admittance caractéristique de chaque phase [25].

La fonction objective est alors définie par (III.22).

$$\frac{1}{Z_{phX}} = Y_{phX} = G + j * (\omega * C - \frac{B_L}{\omega}) \quad \text{……..……} \quad \text{(III.22).}$$

Avec:

$$G = \frac{1}{R_{phX}}; \quad B_L = \frac{1}{L_{phX}}; B = (\omega * C - \frac{B_L}{\omega})$$

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

III.4.6 Paramètres de simulation *:*

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

Tableau III.1 : Paramètres de simulation.

	Phase 1	Phase2	Phase 3
Frequencies (HZ)	[0 200000]	[0 200000]	[0 200000]
Le pas	10	10	10
R1(KΩ)	125.5	124.7	125.1
L1(mH)	0.51817	0.48074	0.50038
C1(nF)	42.22	39.59	40.38
R2(KΩ)	579.016	583.497	578.244
L2(mH)	0.11057	0.11048	0.1256
C2(nF)	4290.4	4267.3	4231.6
R3(KΩ)	579.016	583.497	578.244
L3(mH)	0.11057	0.11048	0.1256
C3(nF)	4290.4	4267.3	4231.6
Ra(KΩ)	1696.652	1700.94	1683.945
La (mH)	0.10204	0.11221	0.11832
Ca (nF)	79494	80023	79537

III.4.7 Simulation de l'impédance Zph1 :

L'impédance Zph1 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.5.

$$Z_{ph1} = Z_1||(Z_2 + Z_3) \quad \text{.....} \quad \text{(III.23)}$$

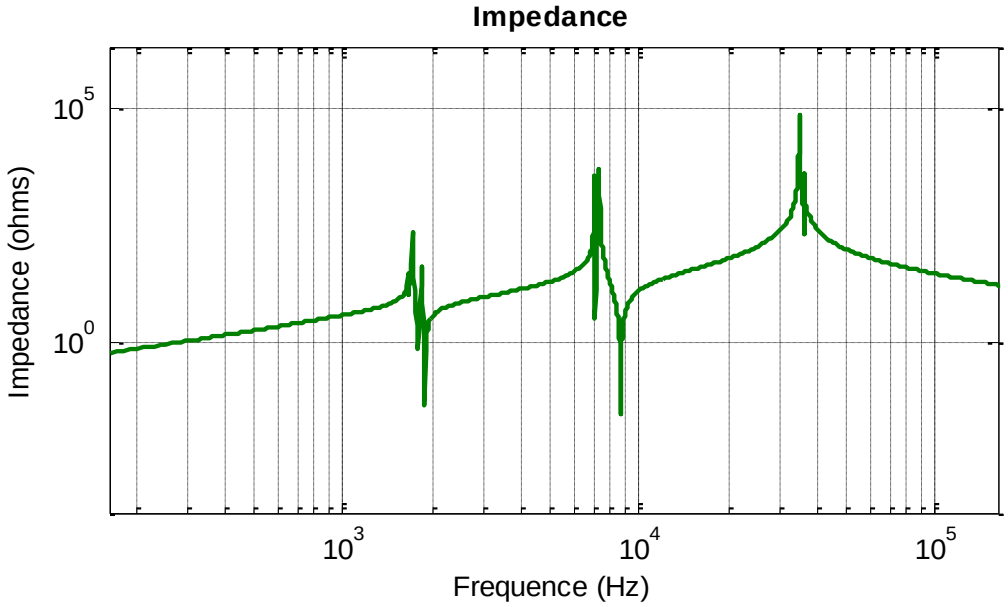


Figure III.5 1: Module d'impédance Zph1 en fonction de la fréquence.

III.4.8 Simulation de l'impédance Zph2 :

L'impédance Zph2 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.6.

$$Z_{ph2} = Z_2||(Z_1 + Z_3) \quad \text{.....} \quad \text{(III.24)}$$

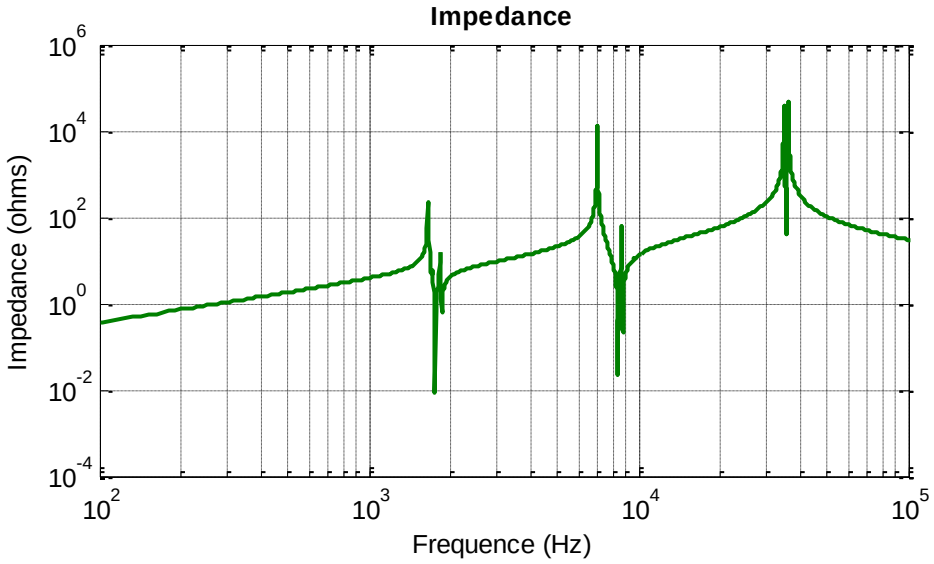


Figure III.6 2: Module d'impédance Zph2 en fonction de la fréquence.

III.4.9 Simulation de l'impédance Zph3 :

L'impédance Zph3 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.7.

$$Z_{ph3} = Z_3||(Z_1 + Z_2) \quad \text{(III.25)}$$

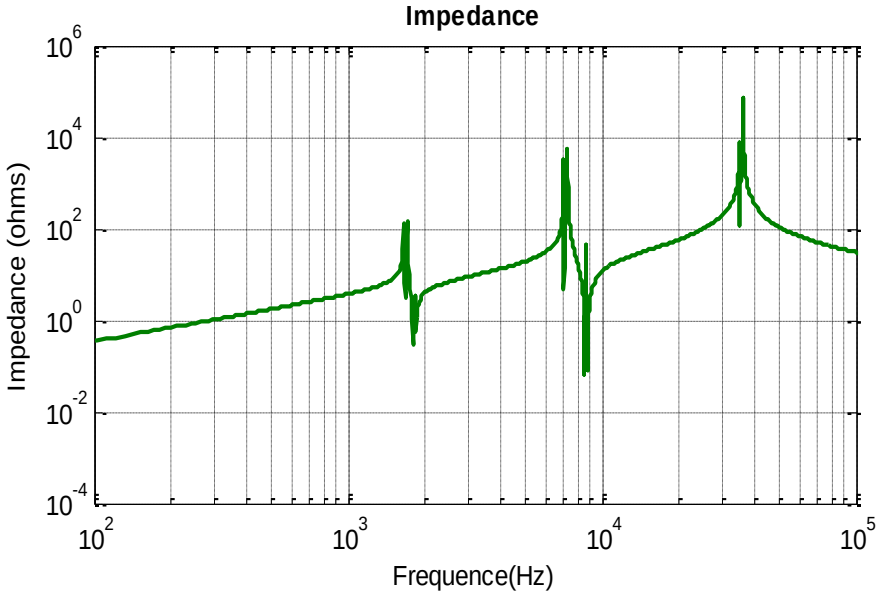


Figure III.7 3: Module d'impédance Zph3 en fonction de la fréquence.

Les figures (III.8 – III.10), représentent respectivement les modules des impédances Z_{siml1}, Z_{siml2} et Z_{siml3} simulées en fonction de la fréquence.

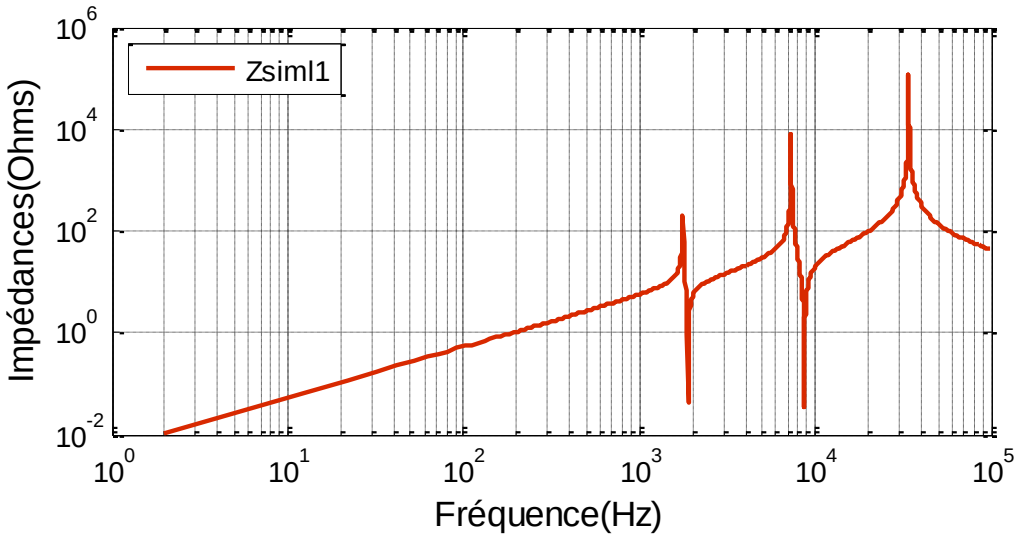


Figure III.84 : Module d'impédance Zsiml1 en fonction de la fréquence

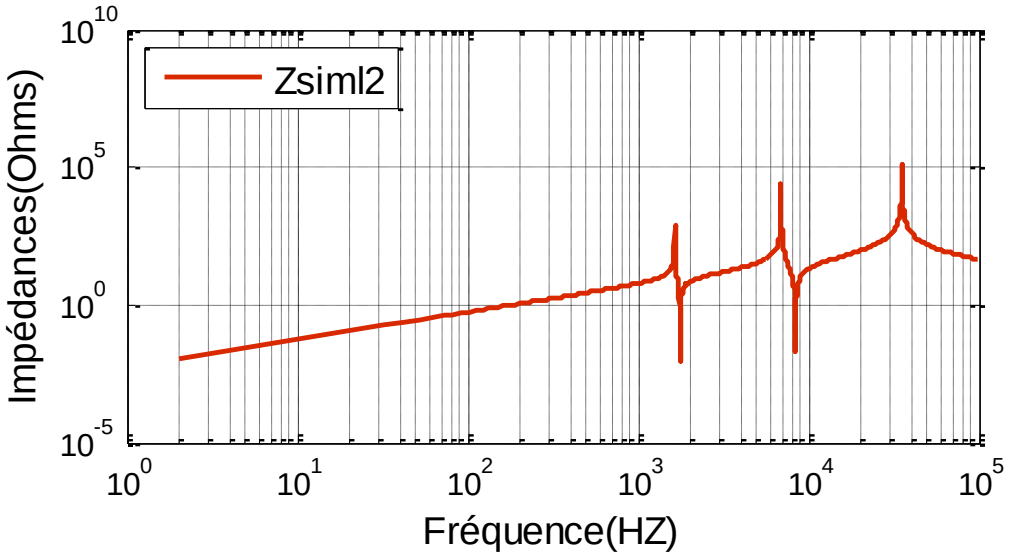


Figure III.95 : Module d'impédance Zsiml2 en fonction de la fréquence

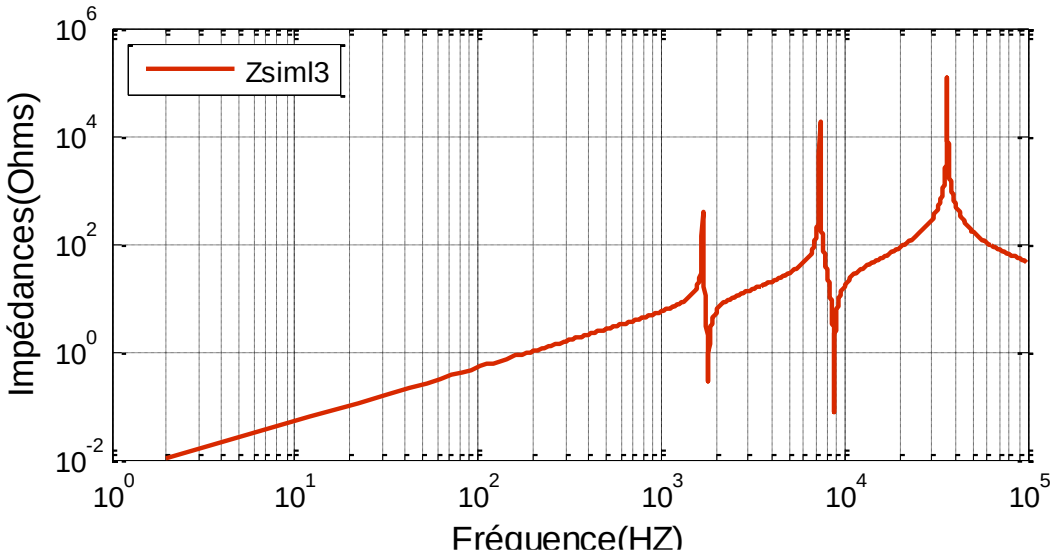


Figure III.106 : Module d'impédance Zsiml3 en fonction de la fréquence

Les résultats des réponses **Zsiml** simulées et les réponses **Zestm** estimées en fonction des fréquences obtenues sont représentés sur les figures (III.11 – III.13).

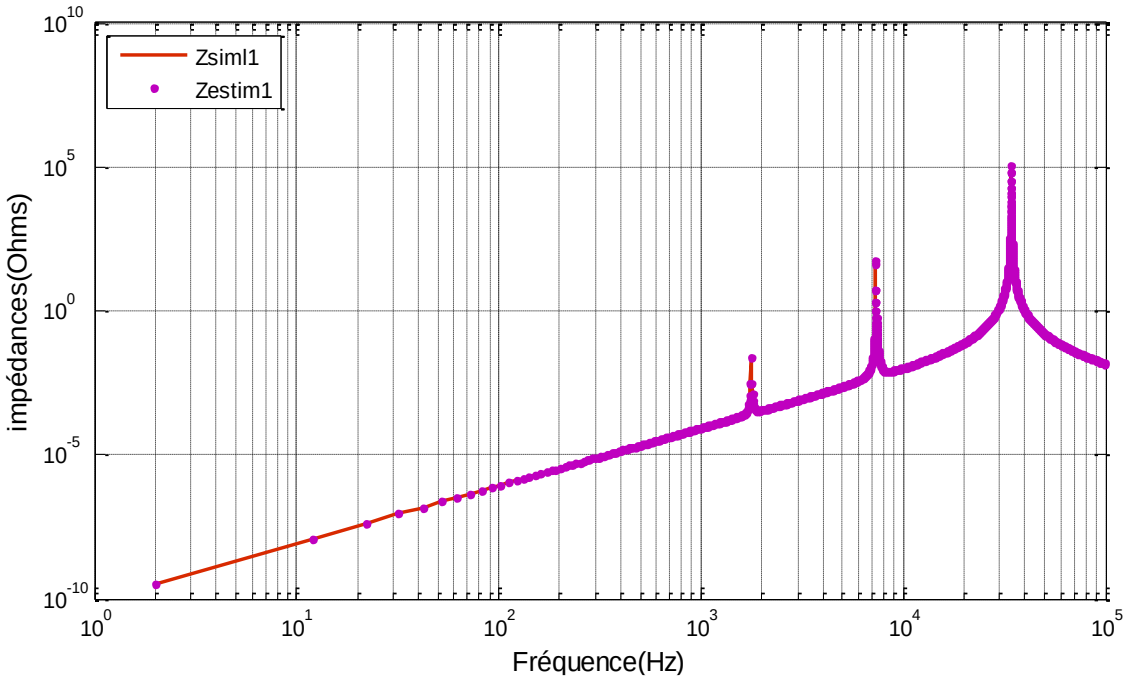


Figure III.11 7 : La courbe de la réponse **Zsiml1** simulée et la réponse **Zestm1** estimée en fonction de la fréquence**.**

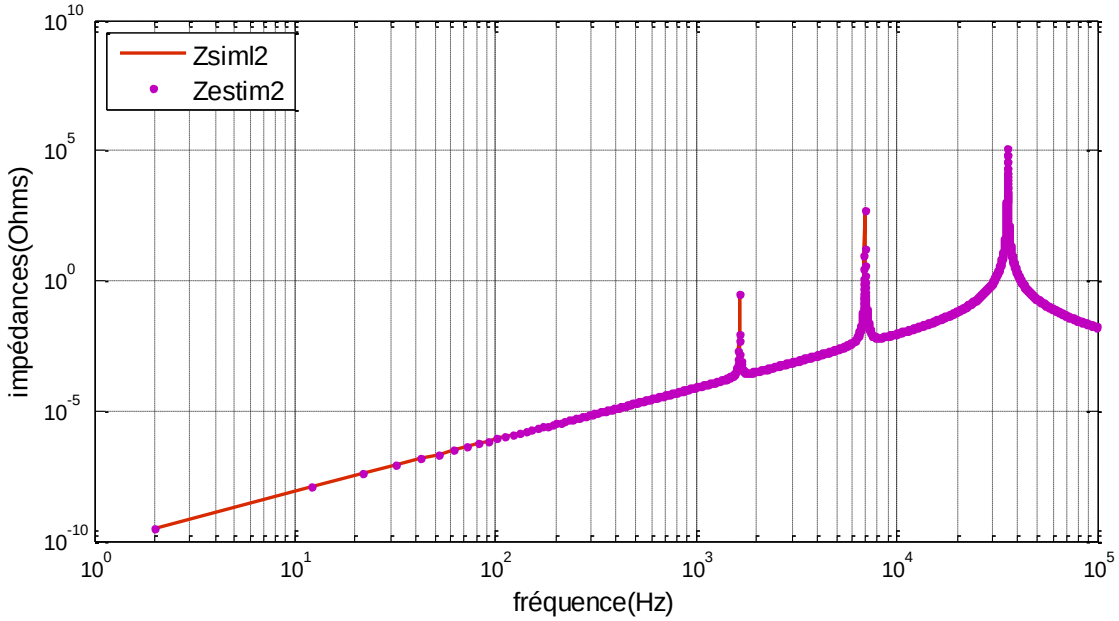


Figure III.12 8 : La courbe de la réponse **Zsiml2** simulée et la réponse **Zestm2** estimée en fonction de la fréquence**.**

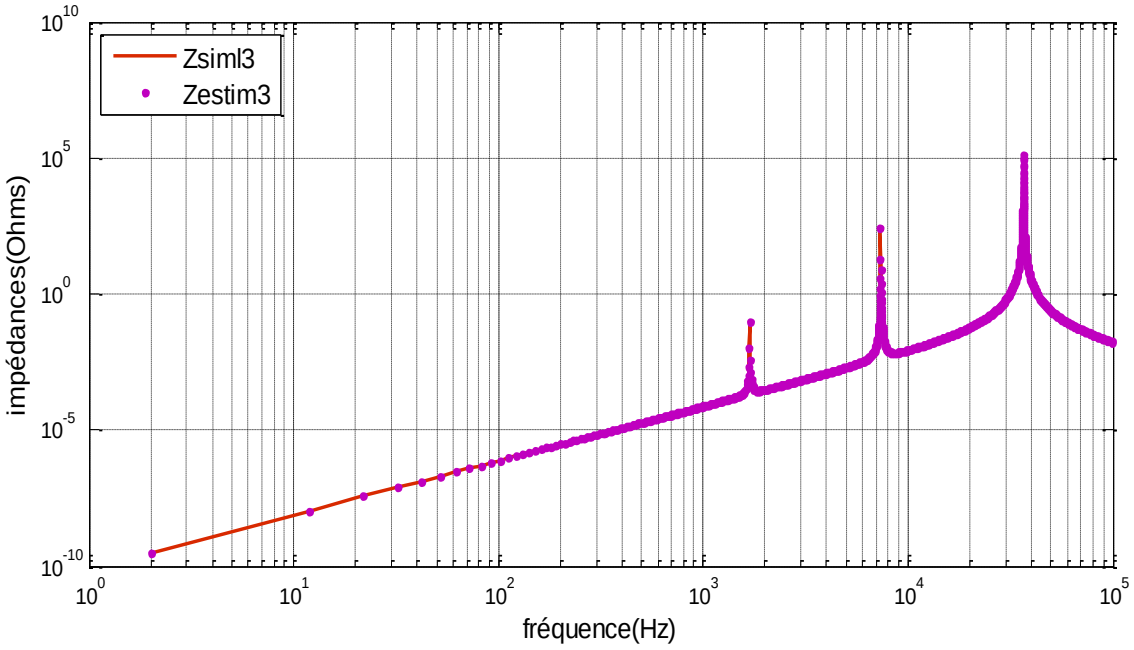


Figure III.13 9 : La courbe de la réponse **Zsiml3** simulée et la réponse **Zestm3** estimée en fonction de la fréquence**.**

III.4.10 Interprétation des résultats :

La comparaison graphique entre les réponses en fréquence estimées et simulées montrées sur les figures (III.11 – III.13) démontre que:

- ✓ Les résultats obtenus par la simulation sont concordants avec ceux obtenus par estimation.

III.5 Classification et localisation des défauts capacitifs et inductifs 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 capacitifs et inductifs qui peuvent avoir lieu dans l'enroulement réel .

III.5.1 Classification des défauts :

Classification d'un défaut est un système organisé et hiérarchisé de différentes catégorisations, une tâche très importante pour déterminer la ou les phases en défaut et par suite déterminer l'endroit du défaut afin de réparer le plus rapidement possible ces défauts et rendre le service d'alimentation aux clients [27].

De nombreuses méthodes de classification sont développées jusqu'à présent, ceux qui sont basées sur le calcul des impédances, dépendent de l'impédance directe, inverse et homopolaire.

III.5.2 Localisation des défauts

La localisation rapide et précise d'un défaut ayant provoqué le fonctionnement d'une protection est un élément de la qualité de service du réseau (maintenance rapide, restauration rapide de l'alimentation, sécurité et fiabilité du réseau), et généralement, la localisation d'un défaut comprend la détermination de son emplacement géographique. Le terme peut également faire référence à des adaptations à des défauts dans des régions spécifiques [27].

La localisation des défauts peut permettre :

- Soit de réaliser une localisation de la zone en défaut
- Soit de calculer de façon la plus précise possible, la distance entre le défaut et un point de référence.

III.5.3 Défauts capacitifs :

Les défauts capacitifs sont traduits dans l'enroulement, en premier lieu par une augmentation de la capacité, cette augmentation peut avoir lieu physiquement dans le transformateur lors d'un mouvement des enroulements par rapport au noyau suite à un court-circuit, à un séisme ou lors du transport. Et en seconde lieu par une diminution da la capacité d'isolation qui peut traduite une dégradation des propriétés diélectriques d'isolation des transformatrices suites par exemple au vieillissement ou élévation de la température [27].

III.5.4 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut capacitifs:

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts capacitifs injectés sur le côté primaire du transformateur étudié est illustrée sur les figures (III.14-III.16).

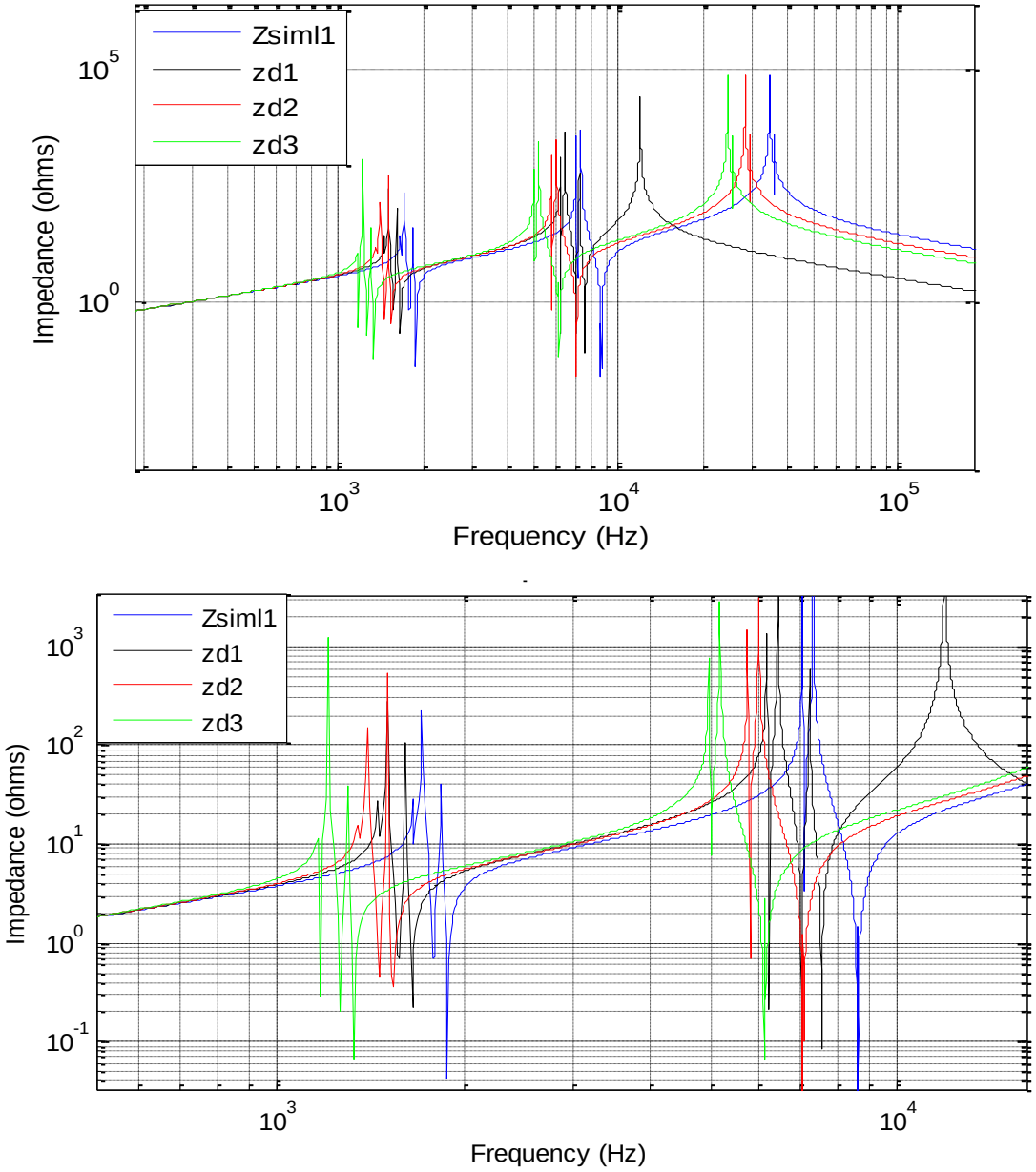


Figure III.14 10 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut capacitifs dans la phase 1 et d'un enroulement sain

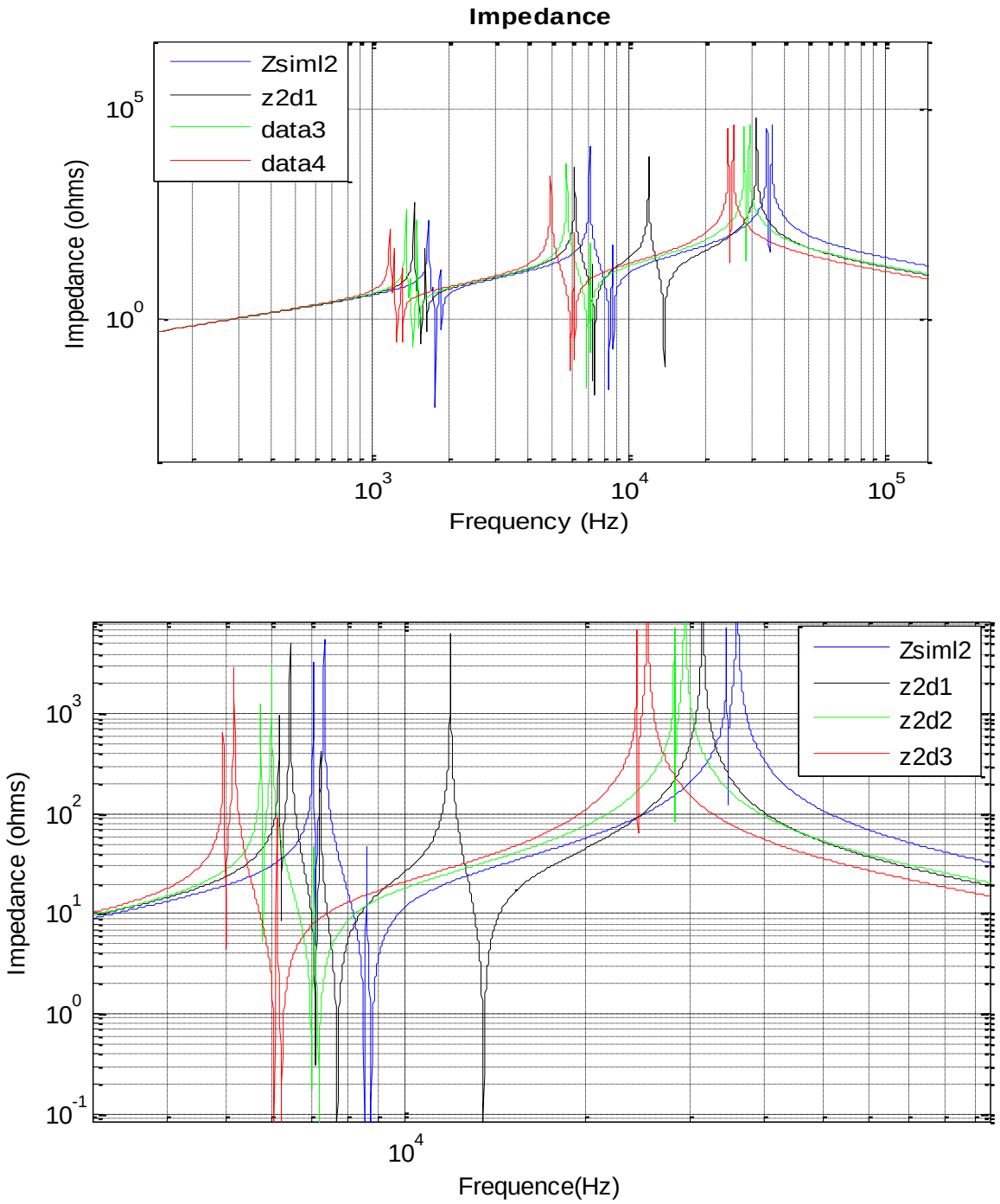


Figure III.15 Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut capacitifs dans la phase 2 et d'un enroulement sain.

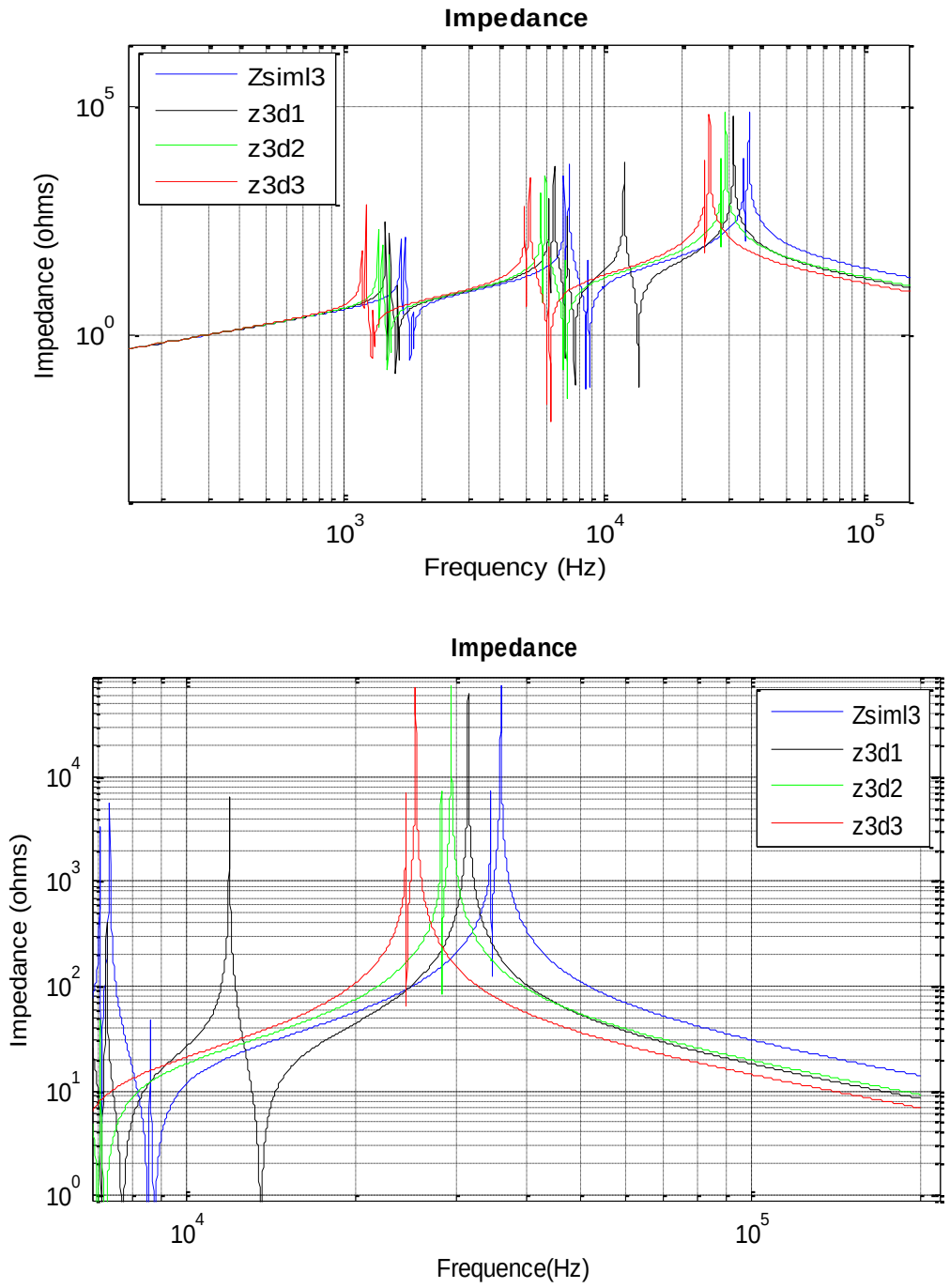


Figure III.1611 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut capacitifs dans la phase 3 et d'un enroulement sain.

III.5.5 Résultats et discussions :

Les tableaux (III.2- III.4) indiquent le degré des défauts capacitifs en injectant un défaut capacitif sur le côté primaire du transformateur triphasé étudié.

Les défauts capacitifs sont simulés par une augmentation de la capacité dans une plage de 20% $C_{sain,}$ 50%C_{sain} et 100%C_{sain}.

Tableau III.2 : Degré des défauts capacitifs par une augmentation d'une capacité dans de 20%C_{sain}

	Phase1	Phase2	Phase3
Cd1 (µF)	0.50664	0.48456	0.47508
Cd2(µF)	51.4848	50.7792	51.2076
Cd3(µF)	51.4848	50.7792	51.2076
Cda(µF)	953.928	954.444	960.276

Tableau III.3: Degré des défauts capacitifs par une augmentation d'une capacité dans de 50%C_{sain}

	Phase1	Phase2	Phase3
Cd1 (µF)	0.6333	0.6057	0.59385
Cd2(µF)	64.356	63.474	64.0095
Cd3(µF)	64.356	63.474	64.0095
Cda(µF)	1192.41	1193.055	1200.345

Tableau III.4 : Degré des défauts résistifs par une augmentation d'une résistance dans de 100% C_{sain}

	Phase1	Phase2	Phase3
Cd1 (µF)	0.8444	0.8076	0.7918
Cd2(µF)	85.808	84.632	85.346
Cd3(µF)	85.808	84.632	85.346
Cda(µF)	1589.88	1590.74	1600.46

III.5.6 Défaut inductif :

Les défauts inductifs sont introduits par la diminution de l'inductance de magnétisation. Cette diminution peut être interprétée physique par la détérioration des caractéristiques

magnétique du noyau telle la diminution de la perméabilité magnétique du circuit magnétique qui entraine l'augmentation de la reluctance et par conséquent la diminution de l'inductance.

III.5.7 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut inductif :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts inductif injectés sur le côté primaire du transformateur étudié est illustrée sur les figures (III.17-III.19).

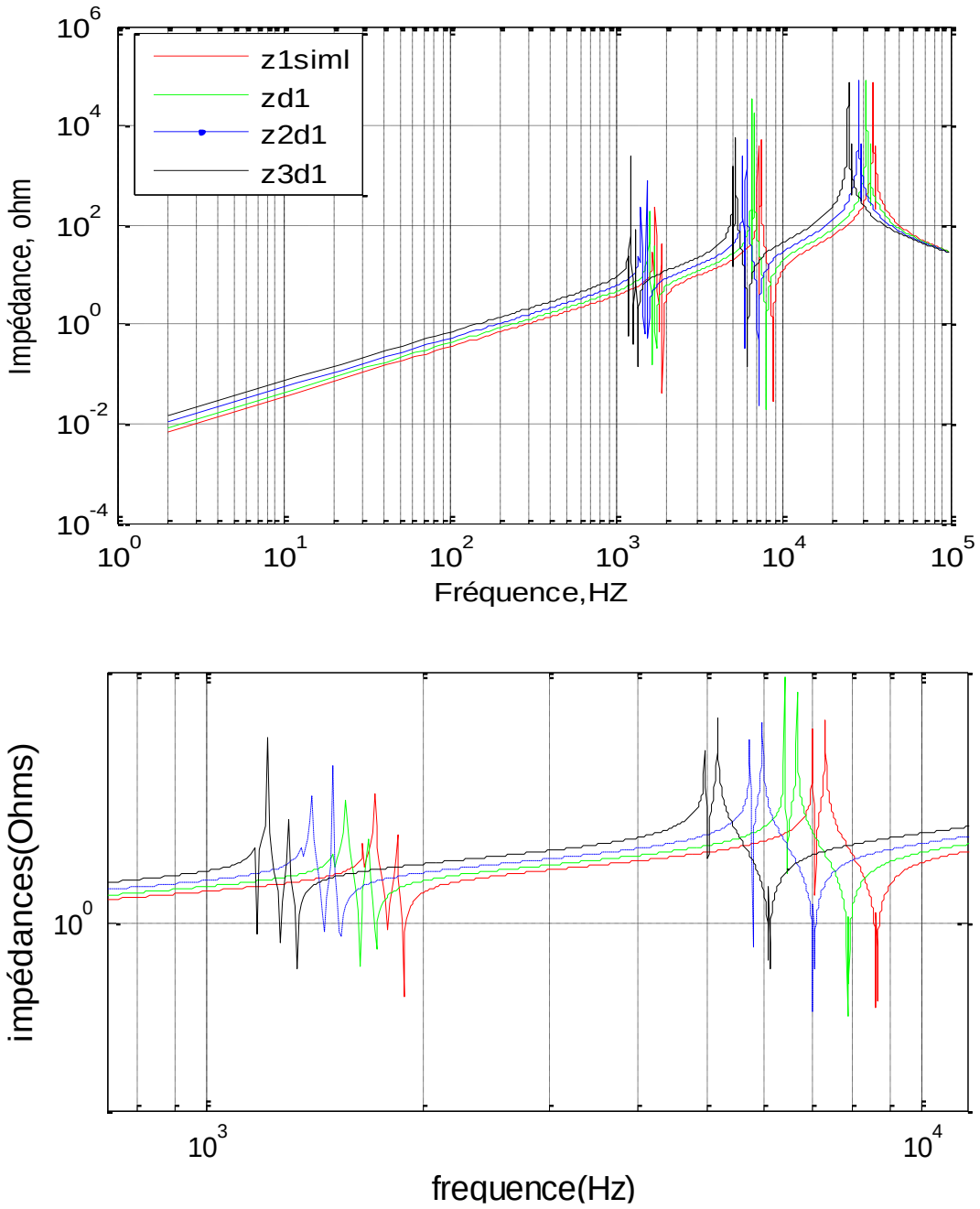


Figure III.1712 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut inductifs dans la phase 1 et d'un enroulement sain

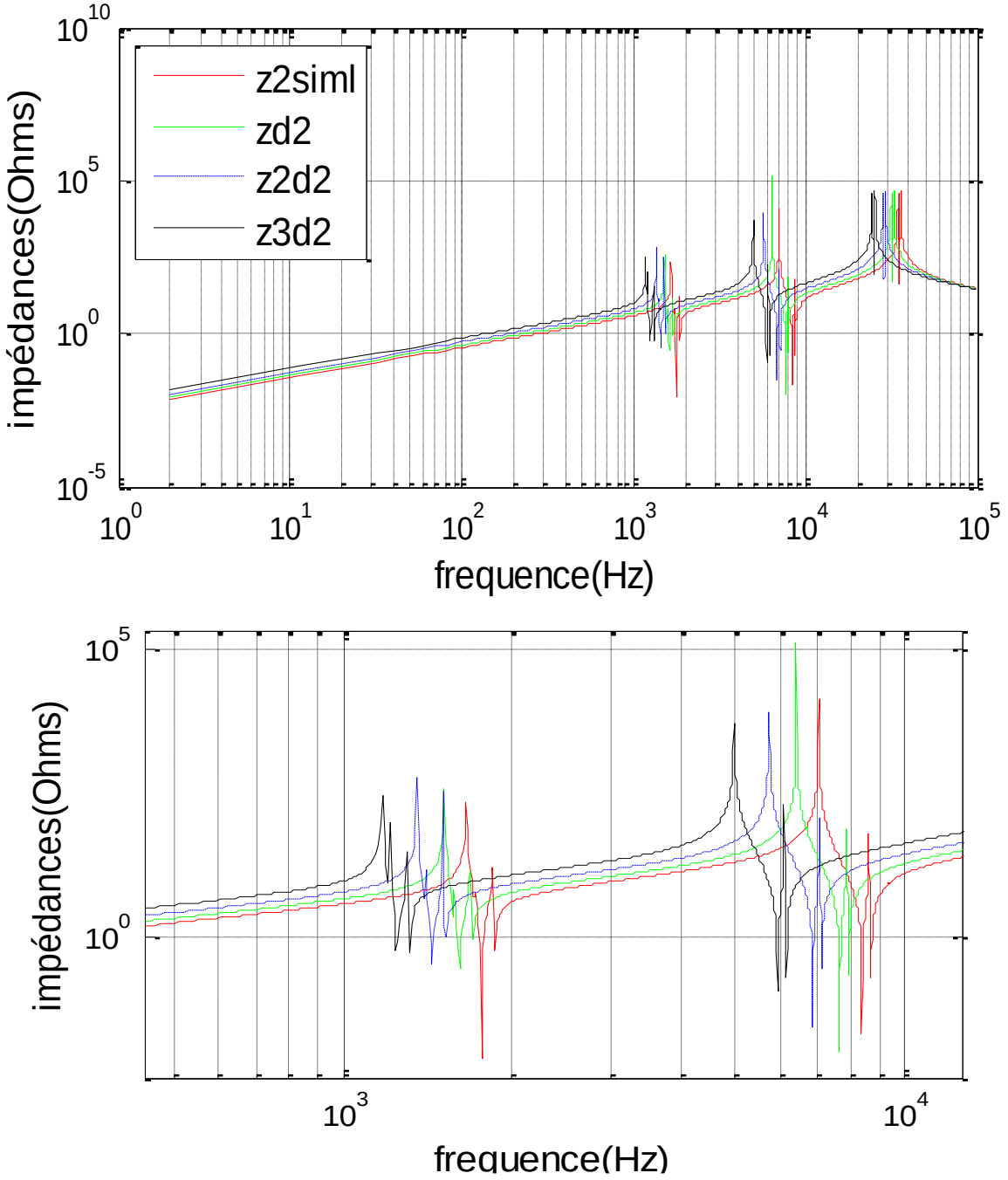


Figure III.1813 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut inductifs dans la phase 2 et d'un enroulement sain.

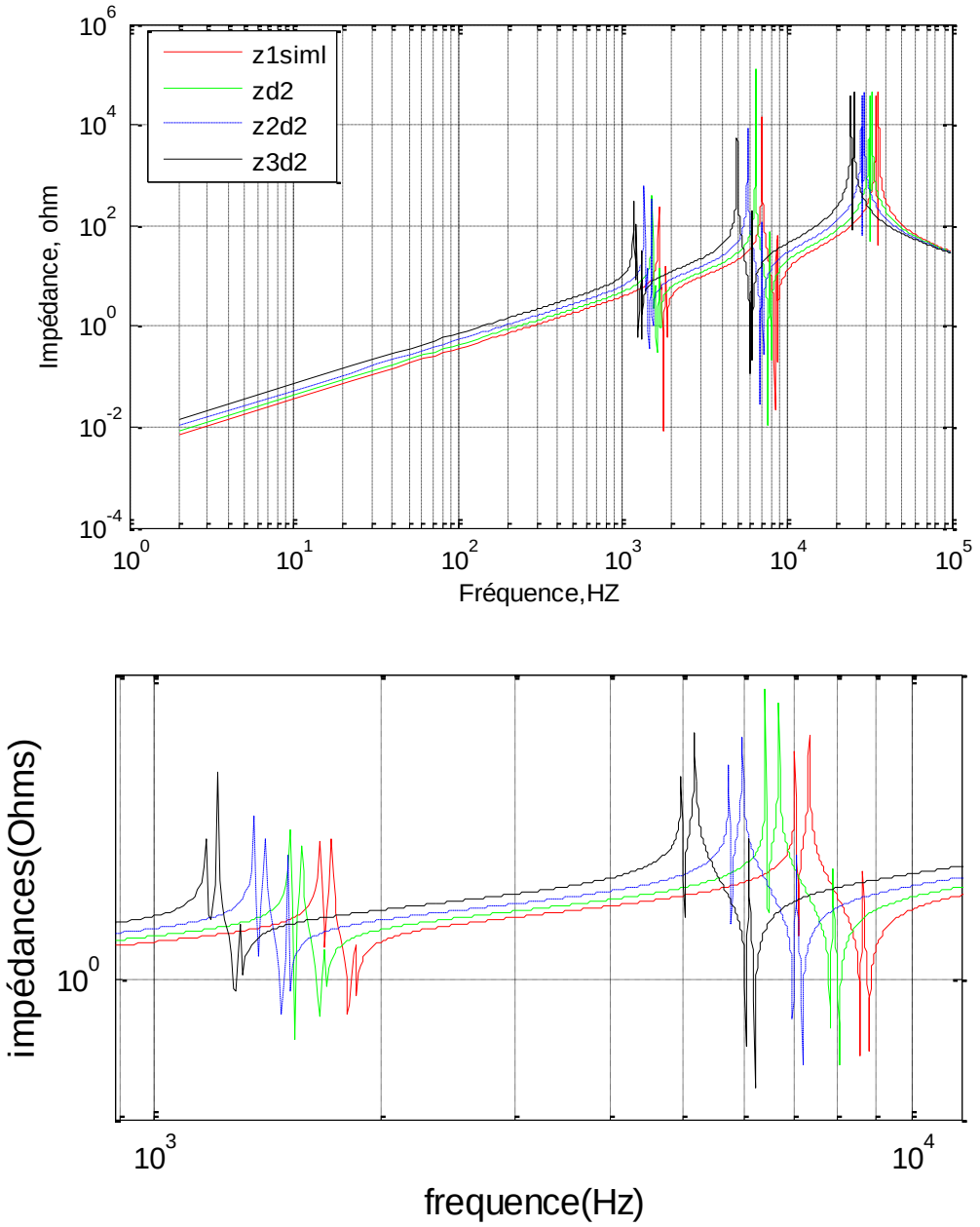


Figure III.1914 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un Défaut inductifs dans la phase 3 et d'un enroulement sain.

III.5.8 Résultats et discussions :

Les tableaux (III.5- III.7) indiquent le degré des défauts inductifs en injectant un défaut inductif sur le côté primaire du transformateur triphasé étudié.

Les défauts inductifs sont simulés par une augmentation de l'inductance dans une plage de 20% L_{sain}, 50%L_{sain} et 100% L_{sain}.

Tableau III.5 : Degré des défauts inductifs par une augmentation d'une inductance dans de $20\%L_{sain}$

	Phases1	Phases2	Phases3
Ld1 (mH)	0.621804	0.600456	0.576888
Ld2(mH)	0.132684	0.15072	0.132576
Ld3(mH)	0.132684	0.15072	0.132576
Lda(mH)	0.122448	0.141984	0.134652

Tableau III.6: Degré des défauts inductifs par une augmentation d'une inductance dans de $70\%L_{sain}$

	Phases1	Phases2	Phases3
Ld1 (mH)	0.777255	0.75057	0.72111
Ld2(mH)	0.165855	0.1884	0.16572
Ld3(mH)	0.165855	0.1884	0.16572
Lda(mH)	0.15306	0.17748	0.168315

Tableau III.7 : Degré des défauts inductifs par une augmentation d'une inductance dans de $100\%\ L_{sain}$

	Phases1	Phases2	Phases3
Ld1 (mH)	1.03634	1.00076	0.96148
Ld2(mH)	0.22114	0.2512	0.22096
Ld3(mH)	0.22114	0.2512	0.22096
Lda(mH)	0.20408	0.23664	0.22442

III.6 Optimisation par Essaim Particulaire :

III.6.1Généralité :

Origines L'optimisation par essaim particulaire (OEP) est une méthode née en 1995 aux États-Unis sous le nom de Particule Swarm Optimisation (PSO) [15-16]. Initialement, ses deux concepteurs, Russel Eberhart et James Kennedy, cherchaient à modéliser des interactions sociales entre des « agents » devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun, chaque agent ayant une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information.

PSO s'inspire de la dynamique d'animaux se déplaçant en groupes compacts (essaims d'abeilles, vols groupés d'oiseaux, bancs de poissons). Les particules d'un même essaim communiquent entre elles tout au long de la recherche pour construire une solution au problème

posé, et ce en s'appuyant sur leur expérience collective. L'algorithme PSO, qui est simple à comprendre, à programmer et à utiliser, se révèle particulièrement efficace pour les problèmes d'optimisation à variables continues. Cependant, comme tout le méta heuristique, PSO possède des inconvénients, qui rebutent encore certains utilisateurs. Le problème de convergence prématurée, qui peut conduire les algorithmes de ce type à stagner dans un optimum local [16].

Le PSO standard est très simple et facile à mettre en œuvre. Dans le PSO standard, le nouvel emplacement de chaque particule est déterminé par un terme de vitesse, qui reflète l'attraction du meilleur global (gb) et de son propre meilleur (ob) au cours de l'histoire de la particule et des coefficients aléatoires [16](Figure III.20)



Figure III.20 :essaim des oiseaux.

III.6.2 Définition :

L'OEP [15] est un technique méta heuristique d'optimisation. Et de modélisation par une équation mathématique permettant de guider les particules durant leur processus de déplacement.

Le déplacement d'une particule est influencé par trois composantes : la composante d'inertie, la composante cognitive et la composante sociale. Chacune de ces composantes reflète une partie de l'équation, figure 21.

- ✓ La composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- ✓ La composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- ✓ La composante sociale : la particule tend à se diriger vers le meilleur site atteint par ses voisines.

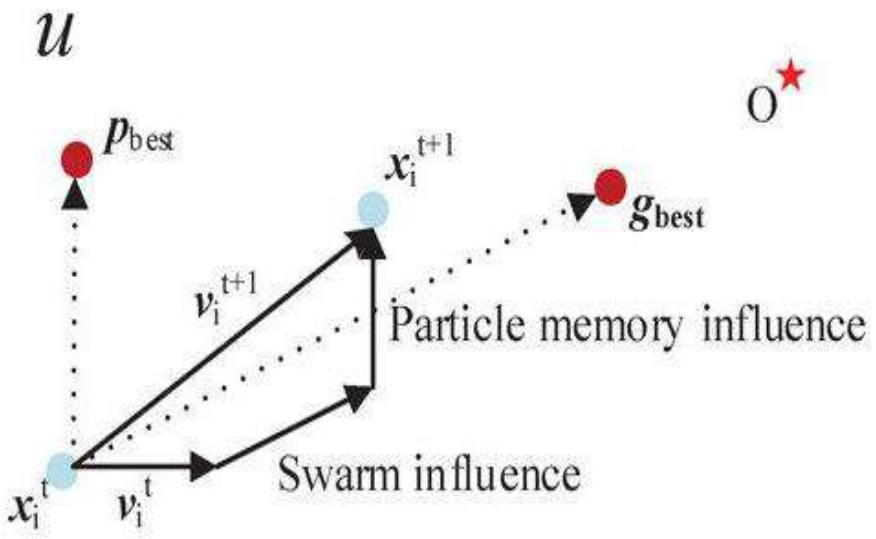


Figure III.21 : Déplacement d'une particule.

III.6.3 Principe général :

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules.Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) [17].

Une particule i de l'essaim dans un espace de dimension D est caractérisée, à l'instant t, par :

- X : sa position dans l'espace de recherche.
- V : sa vitesse.
- Pb : la position de la meilleure solution par laquelle elle est passée.
- Pg : la position de la meilleure solution connue de tout l'essaim.
- f (Pb) : la valeur de fitness de sa meilleure solution.
- f (Pg) : la valeur de fitness de la meilleure solution connue de tout l'essaim.

Le déplacement de la particule i entre les itérations t et t+1 se fait selon les deux équations suivantes :

$$V(t+1)=V(t) + C1r1 (Pb(t) - X(t)) + C2r2 (Pg(t) - X(t)) \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.26)}$$

$$X(t+1)= X(t)+V(t+1) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.27)}$$

- C1 et C2 : deux constantes qui représentent les coefficients d'accélération, elles peuvent être non constantes dans certains cas selon le problème d'optimisation posé.
- r1 et r2 : deux nombres aléatoires tirés de l'intervalle [0,1].

III.6.4 Algorithme :

L'algorithme de base de la méthode PSO proposé par, commence par une initialisation aléatoire des particules dans leur espace de recherche, en leurs attribuant une position et une vitesse initiales. À chaque itération de l'algorithme les particules se déplacent selon les équations (1) et (2) et les fonctions objectives (fitness) des particules sont calculées afin de pouvoir calculer la meilleure position de toutes Pg. La mise à jour des Pb et Pg est faite à chaque itération [18].

Tableau III.8 Paramètre de l'algorithme PSO.

Nombre d'essaims	swarms	10
Nombre des iterations	Inter_mix	10
Poids de l'information locale	c1	1
Poids de l'information global	c2	2
Poids de l'inertie	W	0.5
Démention du problème	Dim	1
Point global de puissance maximal	GMPP	0

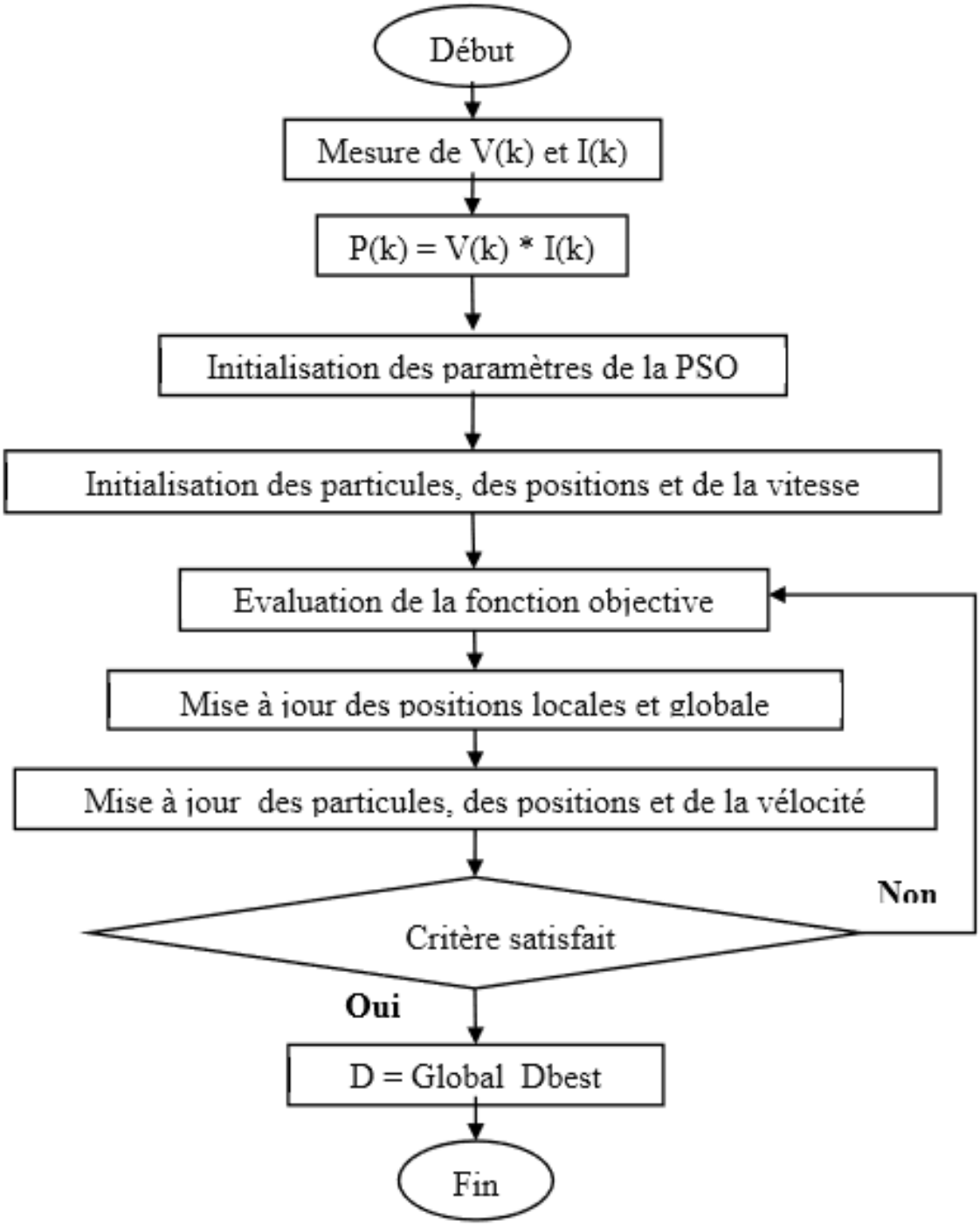


Figure III.22 : Organigramme de la PSO.

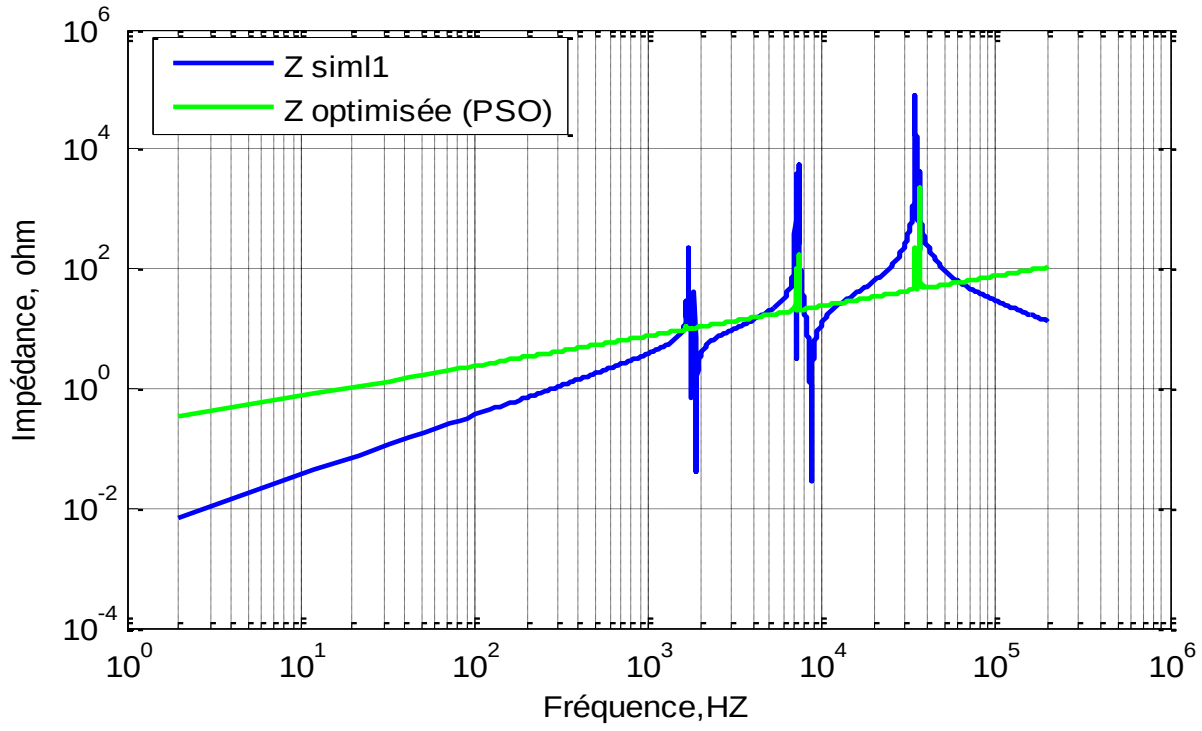
III.6.5 Configuration de la méthode :

Il existe plusieurs paramètres qui interviennent et influencent la performance de la méthode PSO [19]. Le choix de ces paramètres reste critique et dépend généralement du problème posé, mais a une grande influence sur la convergence de l'algorithme. Parmi les paramètres qui rentrent en ligne de compte citons :

- La dimension du problème ;
- Le nombre des particules ;
- La disposition des particules ;
- Les coefficients de confiance ;
- La vitesse maximale ;
- Le facteur d'inertie ;
- Le facteur de construction ;
- La notion du voisinage ;
- Le critère d'arrêt.

III.6.6 Comparaison des réponses fréquentielles par la méthode PSO:

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à un enroulement par la méthode PSO injectés sur le côté primaire du transformateur étudié est illustrée sur les figures (III.23-III.25).



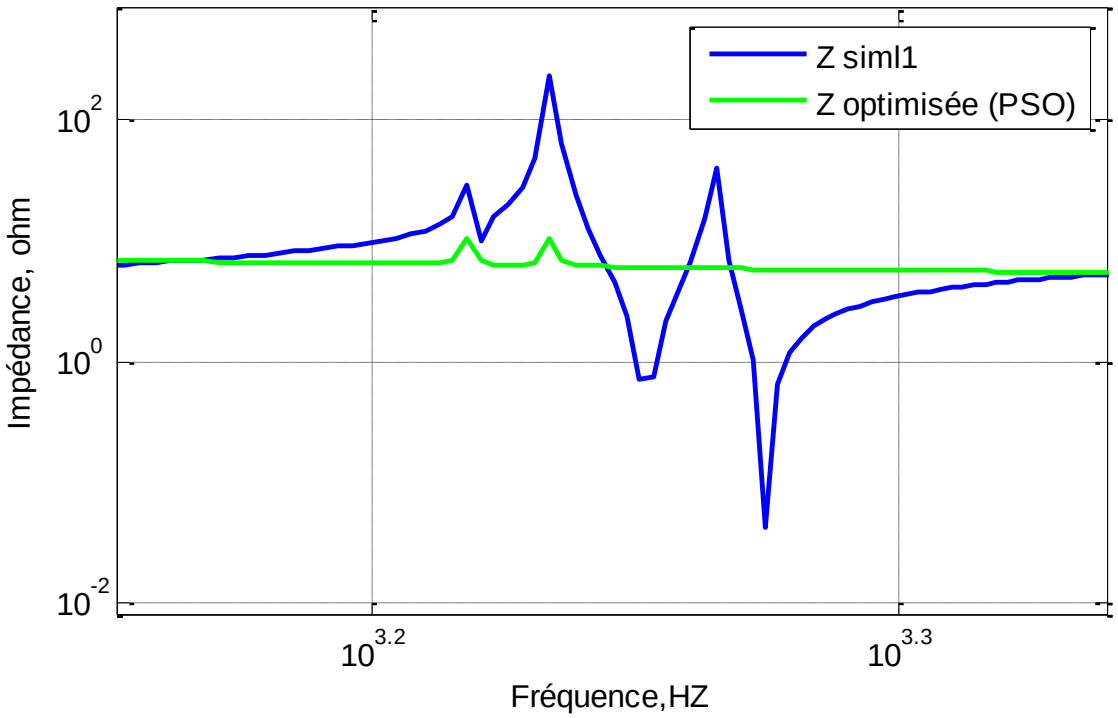
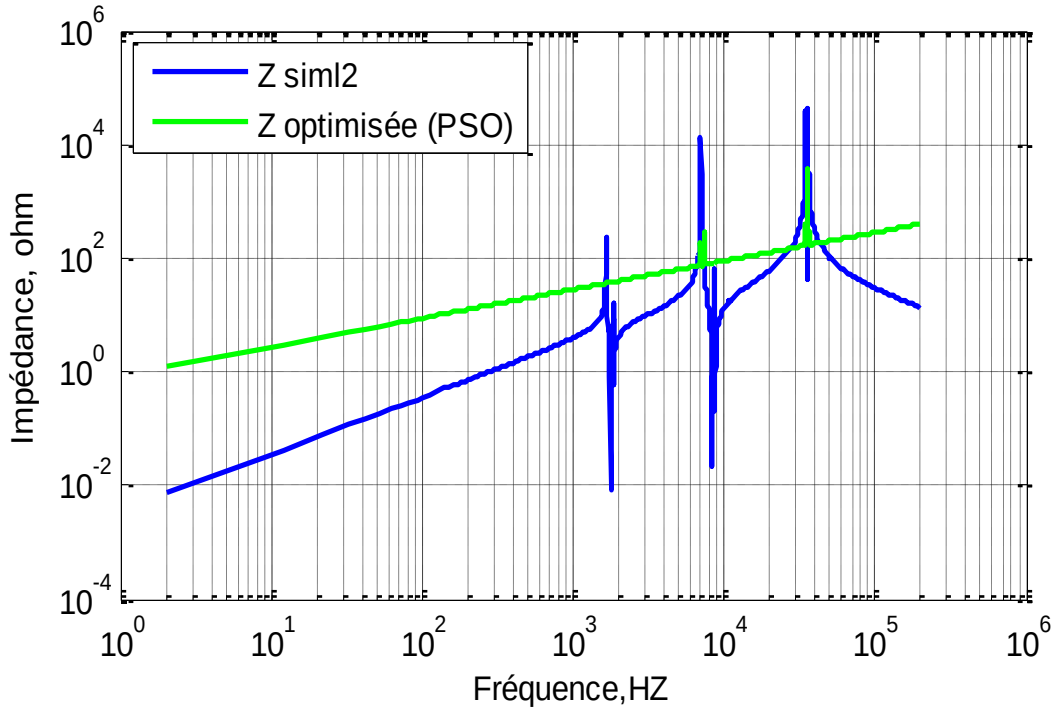


Figure III.23 15 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant Par le PSO dans la phase 1 et d'un enroulement sain.



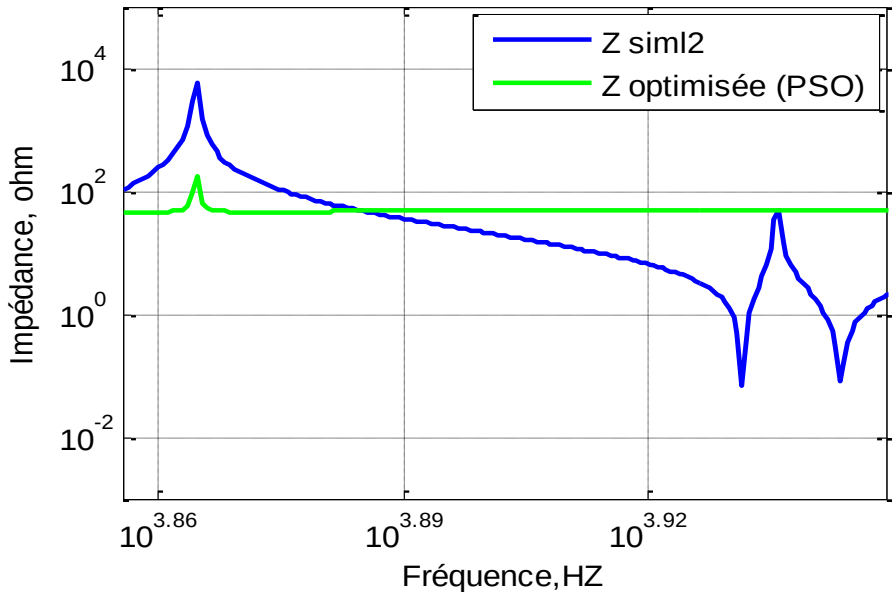
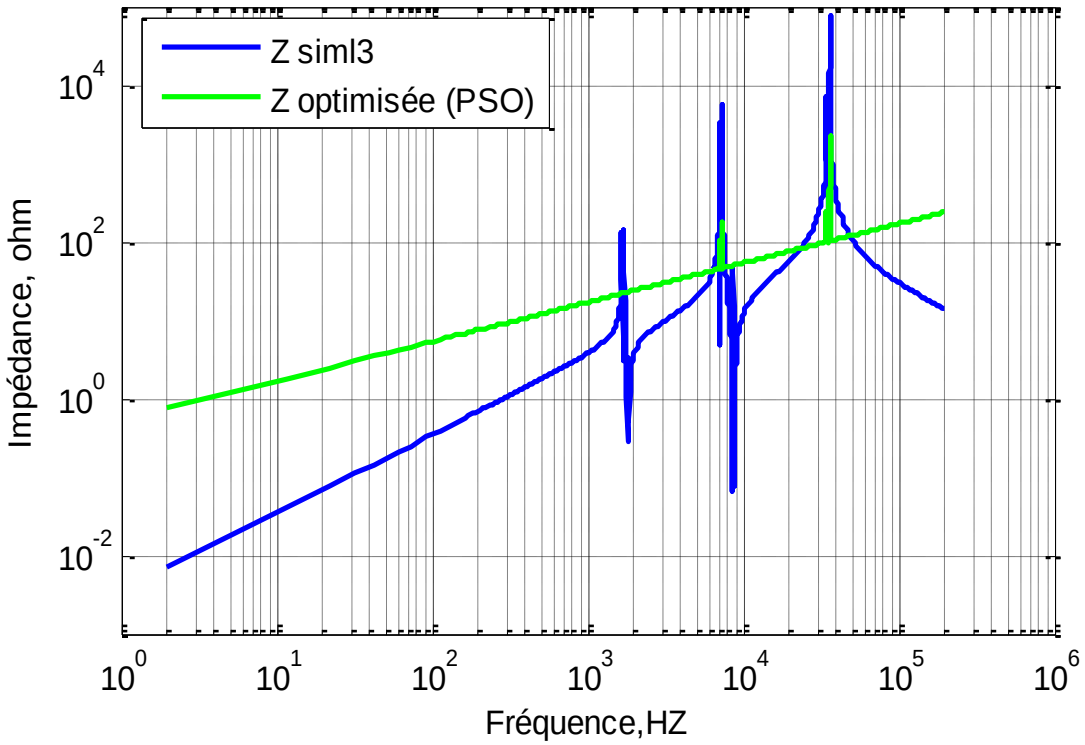


Figure III.24 16 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant Par le PSO dans la phase 2 et d'un enroulement sain.



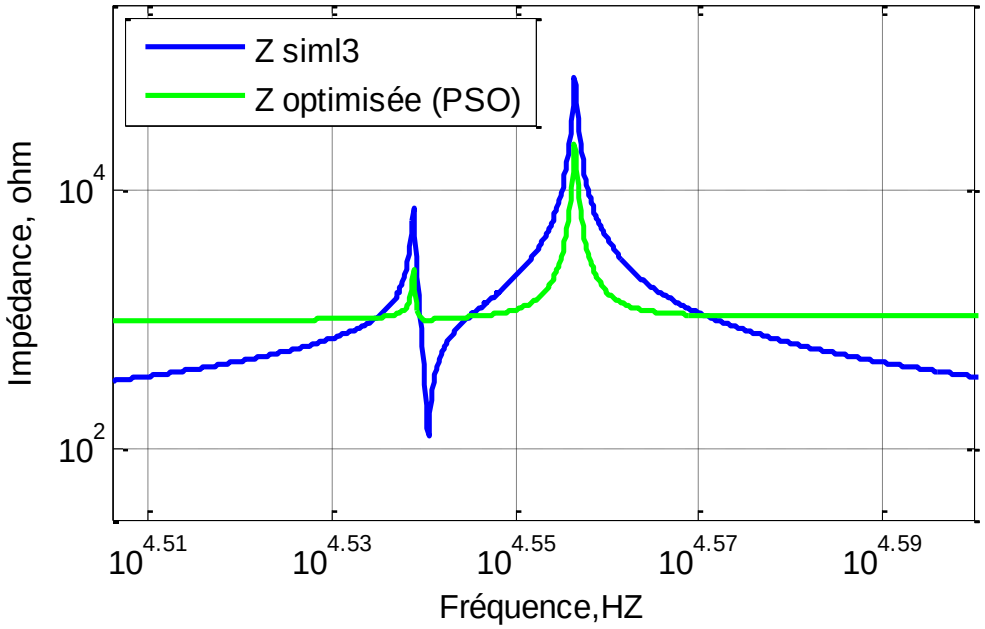


Figure III.2517 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant Par le PSO dans la phase 3 et d'un enroulement sain.

III .6.7 Remarque :

Dans ce cas et après avoir testé l'algorithme PSO appliqué au système de travail du transformateur électrique, les tests ont donné des résultats satisfaisants en termes de :

- qualité de la solution (élimination des valeurs négatifs et travail dans l'intervalle positif uniquement) et précision,
- contraintes de manipulation et consommation de temps (Délai d'exécution court et vitesse rapide)

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a effectué une méthodologie pour obtenir les paramètres d'un modèle de base, du transformateur de puissance en HF basé sur les données de sa réponse fréquentielle.

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

- L'enroulement du transformateur peut être représenté en haute fréquence par une cascade de cellule RLC.
- Les résultats obtenus par simulation sont concordants avec ceux obtenus par l'estimation.
- En comparant les deux méthodes d'identification utilisées pour le calcul des paramètres, l'algorithme PSO s'est avéré le meilleur en termes d'élimination des valeurs négatifs .

- Tout défaut apparu dans l'enroulement est traduit par une variation de sa réponse fréquentielle ce qui rend cette dernier un outil important pour le diagnostic.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Le modèle que nous avons jugé le plus adéquat pour notre étude est le modèle en π basé sur la discrétisation de l'enroulement par une cellule RLC. Pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en basse fréquences.

Afin de compléter cette deuxième partie, une modélisation des différent défaillances dans les enroulements primaire a été réalisée.

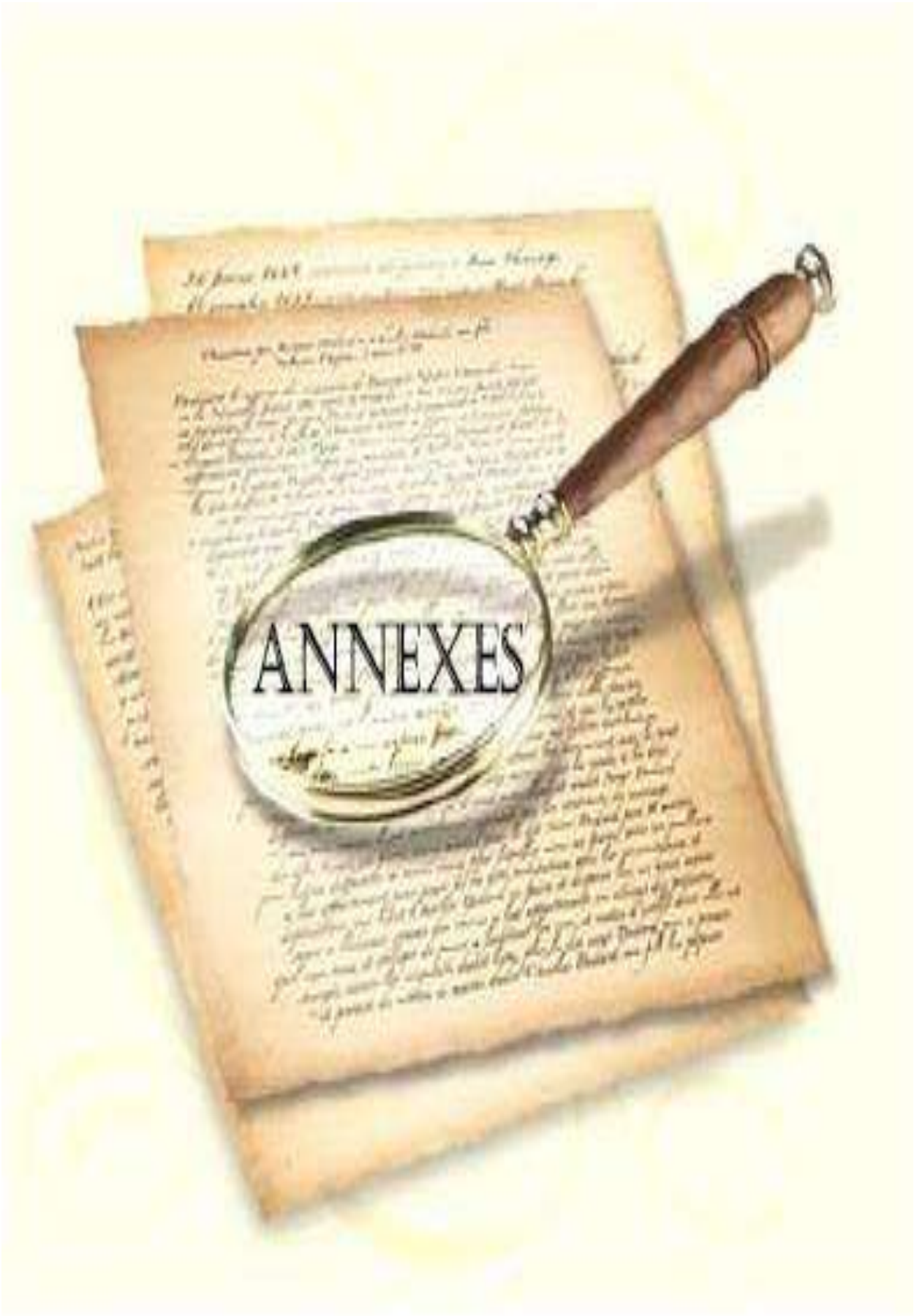
D'après l'étude amenée on a tiré les points suivant :

- Les trois méthodes utilisées pour l'identification des paramètres du modèle proposé ont donné des résultats satisfaisants.

- En résumé, le modèle obtenu présente des avantages importants en matière de diagnostic de défaillances des enroulements du transformateur en basse fréquence.

Comme perspectives pour ce travail, nous suggérons les points suivants :

- Un calcul plus affiné des paramètres des éléments du modèle équivalent en tenant compte de la variation paramétrique en fonction de la fréquence et de la température.
- Une réalisation pratique du modèle étudié.
- Etude de l'empreinte suite au déplacement relatif entre les deux enroulements HT et BT.


ANNEXES

Programmation 1 d'un transformateur sain en HF

Phase 1= [.....]

Phase 2=[.....]

Phase3=[.....]

```
%%   %%%%   calcule des imp Zph1,Zph2,Zph3 (méthode Analytique)
%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph1==========%%%%%%%%%
Zph1=((Zmes1.^2+Zmes2.^2+Zmes3.^2)-
2.*(Zmes1.*Zmes2+Zmes1.*Zmes3+Zmes2.*Zmes3))./(2.*(Zmes1-Zmes2-Zmes3));
%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph2==========%%%%%%%%%
Zph2=((Zmes1.^2+Zmes2.^2+Zmes3.^2)-
2.*(Zmes1.*Zmes2+Zmes1.*Zmes3+Zmes2.*Zmes3))./(2.*(Zmes2-Zmes1-Zmes3));
%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph3==========%%%%%%%%%ù
Zph3=((Zmes1.^2+Zmes2.^2+Zmes3.^2)-
2.*(Zmes1.*Zmes2+Zmes1.*Zmes3+Zmes2.*Zmes3))./(2.*(Zmes3-Zmes1-Zmes2));

%% %%%%     %calcul des paramètres optimisés
RLC_U=calcularRLC(Zph1,frec1,Iinf,Isup);
RLC_V=calcularRLC(Zph2,frec2,Iinf,Isup);
RLC_W=calcularRLC(Zph3,frec3,Iinf,Isup);


%%  %%%%%% calcule des imp Zph1,Zph2,Zph3 ( La fct obj ) %%%%%
%phase U
YU=complex(1/RLC_U(2),(RLC_U(3)*w1-1./(RLC_U(1)*w1)));
ZcellU=1./YU;
%phase V
YV=complex(1/RLC_V(2),(RLC_V(3)*w2-1./(RLC_V(1)*w2)));
ZcellV=1./YV;
%phase W
YW=complex(1/RLC_W(2),(RLC_W(3)*w3-1./(RLC_W(1)*w3)));
ZcellW=1./YW;

%%   %%%%%   Z optimisée (d'aprés La fct obj)  %%%%%%

Zest1=ZcellU.*(ZcellV+ZcellW)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);
Zest2=ZcellV.*(ZcellU+ZcellW)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);
Zest3=ZcellW.*(ZcellV+ZcellU)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);


%% %%%%%% Les Modules et l'ang %%%%%
%phase U
Zmod1=abs(Zmes1);
Zestm1=abs(Zest1);
teta_mod1=(180/pi)*(angle(Zmes1));
teta_estm1=(180/pi)*(angle(Zest1));
%phase V
Zmod2=abs(Zmes2);
Zestm2=abs(Zest2);
teta_mod2=(180/pi)*(angle(Zmes2));
teta_estm2=(180/pi)*(angle(Zest2));
%phase W
Zmod3=abs(Zmes3);
Zestm3=abs(Zest3);
teta_mod3=(180/pi)*(angle(Zmes3));
teta_estm3=(180/pi)*(angle(Zest3));
```

```
%% %%%%%% Les vecteurs créés avec des données
eZ1=errorZ(ZcellU,Zph1,Iinf,Isup);
eZ2=errorZ(ZcellV,Zph2,Iinf,Isup);
eZ3=errorZ(ZcellW,Zph3,Iinf,Isup);

dataLn=[RLC_U(1);RLC_V(1);RLC_W(1)]
dataRn=[RLC_U(2);RLC_V(2);RLC_W(2)]
dataCn=[RLC_U(3);RLC_V(3);RLC_W(3)]
dataeZ=[eZ1;eZ2;eZ3];
resultats=[dataLn,dataRn,dataCn,dataeZ];


%% eq.III.13__III.23
function parametrosCelda=calcularRLC(Z,frec,Iinf,Isup)
 frec=frec(Iinf:Isup)
 Z=Z(Iinf:Isup)
 w=2*pi*frec
 Y=1./Z
 G=real(Y)
 S=imag(Y)
 mod2=(abs(Y)).^2
 t3=sum(1./mod2)
 R=t3/(sum(G./mod2))
 t1=sum((S.*w)./(mod2))
 t2=sum((w.^2)./mod2)
 t4=sum(S./(w.*mod2))
 t5=sum(1./((w.^2).*(mod2)))
 L=(t3^2-t5*t2)/(t4*t2-t3*t1)
 C=(-t1*t5+t3*t4)/(t3^2-t5*t2)
 parametrosCelda=[L,R,C]
end
function et=errorZ(Zph,Zcell,Iinf,Isup)

 et=0;
 for i=Iinf:2:Isup
 e=(abs(Zph(i)-Zcell(i)))/(abs(Zcell(i)));
 if e<0.1
 et=et+e;
 else
 et=et+0.1;
 end
 end
 et=et*100/i;
end
```

Programmation 2 d'un transformateur sous défauts en HF

```
Phase 1=[.......]
Phase 2=[.......]
Phase 3=[.......]
%defaut inductance ou capacitif

%defaut1=
zd1=abs(phaselz1)
z2d1=abs(phaselz2)
z3d1=abs(phaselz3)

%defaut2=
Zd2=abs(phaselz1)
Z2d2=abs(phaselz2)
Z3d2=abs(phaselz3)

%defaut3=
Zd3=abs(phaselz1)
Z2d3=abs(phaselz2)
Z3d3=abs(phaselz3)

%%   %%%%   calcule des imp Zph1,Zph2,Zph3 (méthode Analitique)  (eq
%%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph1==========%%%%%%%%%
Zph1=((Zmes1.^2+Zmes2.^2+Zmes3.^2)-
2.*(Zmes1.*Zmes2+Zmes1.*Zmes3+Zmes2.*Zmes3))./(2.*(Zmes1-Zmes2-Zmes3));
%%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph2==========%%%%%%%%%
Zph2=((Zmes1.^2+Zmes2.^2+Zmes3.^2)-
2.*(Zmes1.*Zmes2+Zmes1.*Zmes3+Zmes2.*Zmes3))./(2.*(Zmes2-Zmes1-Zmes3));
%%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph3==========%%%%%%%%%ù
Zph3=((Zmes1.^2+Zmes2.^2+Zmes3.^2)-
2.*(Zmes1.*Zmes2+Zmes1.*Zmes3+Zmes2.*Zmes3))./(2.*(Zmes3-Zmes1-Zmes2));
%% %%%%     %calcul des paramètres optimisés
RLC_U=calcularRLC(Zph1,frec1,Iinf,Isup);
RLC_V=calcularRLC(Zph2,frec2,Iinf,Isup);
RLC_W=calcularRLC(Zph3,frec3,Iinf,Isup);
%%  %%%%%% calcule des imp Zph1,Zph2,Zph3 ( La fct obj ) %%%%%
%phase U
YU=complex(1/RLC_U(2),(RLC_U(3)*w1-1./(RLC_U(1)*w1)));
ZcellU=1./YU;
%phase V
YV=complex(1/RLC_V(2),(RLC_V(3)*w2-1./(RLC_V(1)*w2)));
ZcellV=1./YV;
%phase W
YW=complex(1/RLC_W(2),(RLC_W(3)*w3-1./(RLC_W(1)*w3)));
ZcellW=1./YW;
%%   %%%%%   Z optimisée (d'aprés La fct obj)  %%%%%%

Zest1=ZcellU.*(ZcellV+ZcellW)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);
Zest2=ZcellV.*(ZcellU+ZcellW)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);
Zest3=ZcellW.*(ZcellV+ZcellU)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);
%% %%%%%% Les vecteurs créés avec des données
eZ1=errorZ(ZcellU,Zph1,Iinf,Isup);
eZ2=errorZ(ZcellV,Zph2,Iinf,Isup);
eZ3=errorZ(ZcellW,Zph3,Iinf,Isup);

dataLn=[RLC_U(1);RLC_V(1);RLC_W(1)]
dataRn=[RLC_U(2);RLC_V(2);RLC_W(2)]
dataCn=[RLC_U(3);RLC_V(3);RLC_W(3)]
dataeZ=[eZ1;eZ2;eZ3];
resultats=[dataLn,dataRn,dataCn,dataeZ];
end
```

```
 %% eq.III.13__III.23
function parametrosCelda=calcularRLC(Z,frec,Iinf,Isup)
 frec=frec(Iinf:Isup)
 Z=Z(Iinf:Isup)
 w=2*pi*frec
 Y=1./Z
 G=real(Y)
 S=imag(Y)
 mod2=(abs(Y)).^2
 t3=sum(1./mod2)
 R=t3/(sum(G./mod2))
 t1=sum((S.*w)./(mod2))
 t2=sum((w.^2)./mod2)
 t4=sum(S./(w.*mod2))
 t5=sum(1./((w.^2).*(mod2)))
 L=(t3^2-t5*t2)/(t4*t2-t3*t1)
 C=(-t1*t5+t3*t4)/(t3^2-t5*t2)
 parametrosCelda=[L,R,C]
end

function et=errorZ(Zph,Zcell,Iinf,Isup)

 et=0;
 for i=Iinf:2:Isup
 e=(abs(Zph(i)-Zcell(i)))/(abs(Zcell(i)));
 if e<0.1
 et=et+e;
 else
 et=et+0.1;
 end
 end
 et=et*100/i;
end
```

Programmation 3 d'un transformateur en HF (utilisation de PSO)

Phase1 = [.....]

Phase1 = [.....]

Phase1 = [.....]

```
F=[0,200000]

iterations=10;
inertia= 1.0;
correction_factor = 2.0;
swarms=1;

% --------------------------- Iteration ---------------------------------%
for iter=1:  iterations

    %------- position of swarms -----%
    for i= 1 : swarms
        swarm(i, 1)=swarm(i, 1) + swarm(i, 5)/1.2;       % mettre à jour la
position u
        swarm(i, 2)=swarm(i, 2) + swarm(i, 6)/1.2;       % mettre à jour la
position v
        u=swarm(i,1);
        v=swarm(i,2);

        value=(u-20)^2+(v-10)^2;                         % fonction
objective
%           value=((u.^2)-2.*(u.*u)./(2.*(v)));


   if value < swarm(i,7)       % Toujours vrai

    swarm(i, 3)=swarm(i, 1); % mettre à jour la meilleure position de u

     swarm(i, 4)=swarm(i, 2); % mettre à jour la meilleure position de v

      swarm(i, 7)=value;  % meilleure valeur minimale mise à jour

       end

   end

    [temp, gbest] = min(swarm(:,7));     % gbest position

     % ----- mise à jour des vecteurs vitesse ----------------%

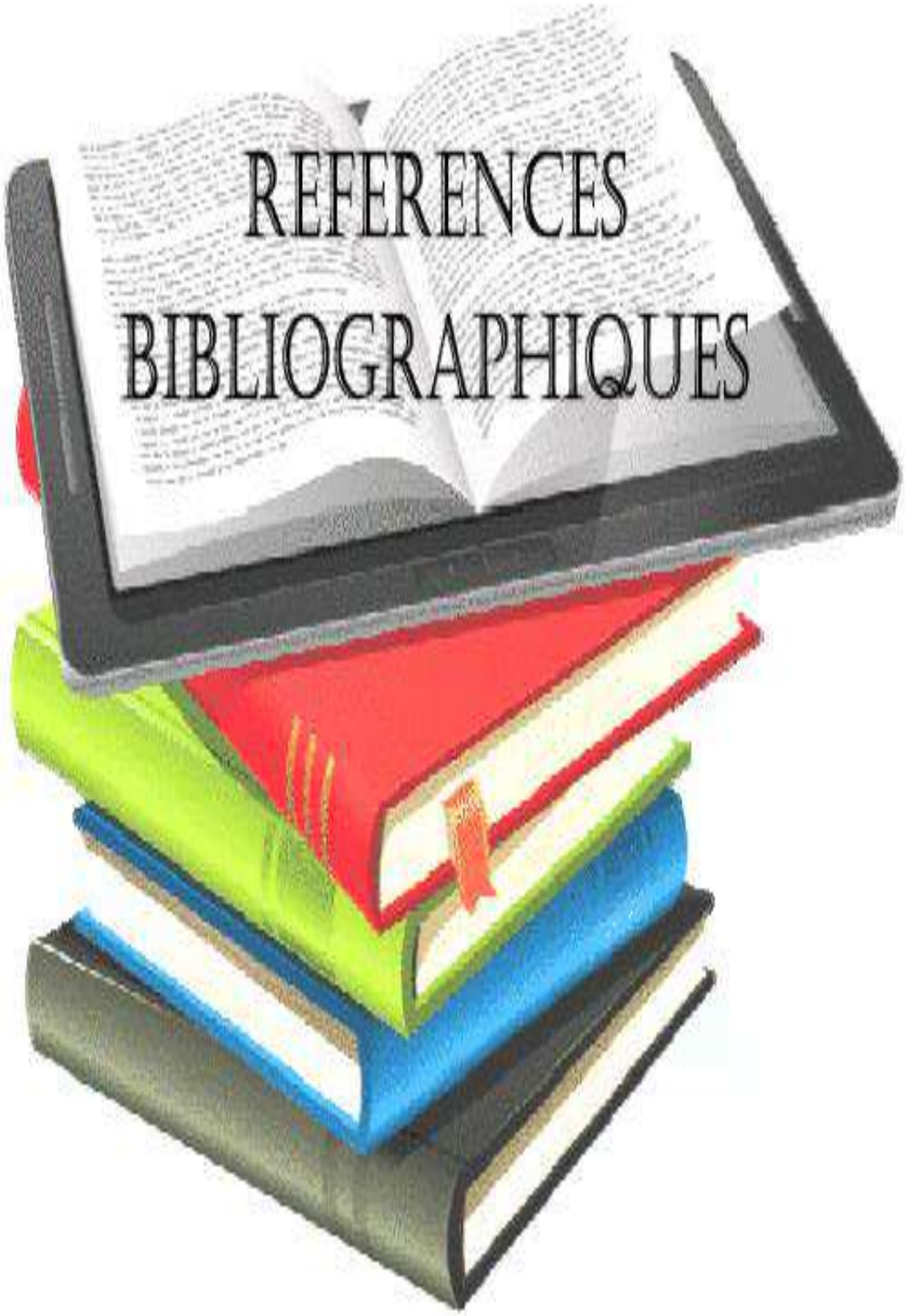
    for i = 1: swarms
  swarm(i, 5)= rand*inertia*swarm(i, 5)correction_factor*rand*(swarm(i,3)
  -swarm(i,1))+ correction_factor*rand*(swarm(gbest,3)- swarm(i,1));
                                     % u velocity parameters

  swarm(i,6)= rand*inertia*swarm(i,6)+ correction_factor*rand*(swarm(i,4)
  -swarm(i,2))+ correction_factor*rand*(swarm(gbest,4)- swarm(i,2));

                                      % v  velocity parameters

     end
```

```
%      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%    Z1   %%%%%%%%%%%%%%%%%%
    ini=0;
     for i = 1: swarms
    ObjVal =  Z1-(sqrt((1./swarm(i,1)).^2- ((w*swarm(i,3))-
(1./(w*swarm(i,2))))))) ;
   ini=ini+1 ;
     end
  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%    Z2   %%%%%%%%%%%%%%%%%%
     ini=0;
      for i = 1: swarms
   ObjVal =  Z2-(sqrt((1./swarm(i,1)).^2- ((w*swarm(i,3))-
(1./(w*swarm(i,2))))))) ;
   ini=ini+1 ;
     end
  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%    Z3   %%%%%%%%%%%%%%%%%%
   ini=0;
     for i = 1: swarms
    ObjVal =  Z3-(sqrt((1./swarm(i,1)).^2- ((w*swarm(i,3))-
(1./(w*swarm(i,2))))))) ;
  ini=ini+1 ;
    end
```


REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

[1] « FRANÇOIS MILSANT, « Électrotechnique machines électriques transformateurs électriques ,3e édition » 15 janvier 1991.

[2] « MEZARI NAOUEL, « Diagnostic des transformateurs de puissances », mémoire de magister ». département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011.

[3] « THEODORE Wildi and SYBILLE Gilbert, « Electrotechnique: transformateur »,4e édition, Bibliothèque Nationale, Paris, juin 2005 ».

[4] D. KARABOGA, « An idea based on honey bee swarm for numerical optimization », Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer …, 2005.

[5] A. BOURGEOIS, « Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance », PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2007.

[6] Y. LE MENACH, « Contribution à la modélisation numérique tridimensionnelle des systèmes électrotechniques : prise en compte des inducteurs », PhD Thesis, Lille 1, 1999.

[7] A. LEFEVRE, « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires », PhD Thesis, Université de Nantes, 2006.

[8] S. ABDOUN, « Etude de l'infleunce du noyau sur les surtensions impulsionnelles dans les enroulements du transformateur », PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri, 2009.

[9] T. NODA, H. NAKAMOTO, ET S. YOKOYAMA, « Accurate modeling of core-type distribution transformers for electromagnetic transient studies », *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no 4, p. 969–976, 2002.

[10] « Document_Technique_Les_Transformateurs_Triphases.Pdf **».**

[11] « M. R. BADRI, «Etude Et Modelisation Des Defauts Des Transformateurs De Puissance, Universite Badji Mokhtar- Annaba, 2008. ».

[12] J. SANCHEZ, « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance », PhD Thesis, Université de Grenoble, 2011.

[13] « I. 60214-1, changeurs de prises-partie 1 : prescriptions de performances et méthodes d'essai, 2003. ».

[14] N. MAHOMED, « Electromagnetic forces in transformers under short circuit conditions », *Energize online*, p. 36–40, 2011.

[15] J. KHOJA, A. DEMANE, ET A. ALILI, « Amélioration de la protection d'un transformateur de puissance ». Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2017 /2018.

[16] C. ANDRIEU, E. DAUPHANT, ET D. BOSS, « A frequency-Dependant Model for a MV/LV Transformer », in *International Conference on Power System Transients*, 1999, p. 20–24.

[17] A. SEMLYEN ET B. GUSTAVSEN, « Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients ≫. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.

[18] BOUDRAA, S, « Analyse des gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle. 2005, Université de Batna 2. » .

[19] M. KRATBI, SEYF EDDINE, « Analyse des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé, basée sur l'analyse de l'impedance du transformateur.UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA, Année Universities 2015 - 2016. ».

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

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

[22] A. RAKOTOMALALA, « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences », PhD Thesis, Ecully, Ecole centrale de Lyon, 1996.

[23] 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.

[24] DOMMEL, H.W, « Electromagnetic Transients Program: Reference Manual:(EMTP theory book). 1986: Bonneville Power Administration. » .

[25] J. G. HAYES, N. O'DONOVAN, ET M. G. EGAN, « The extended T model of the multiwinding transformer », in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)*, 2004, vol. 3, p. 1812–1817.

[26] DR.CHADELI, « Représentation d'un réseau passif par un quadripôle, chapitre VI, les quadripôles passifs, cours d'électronique Général I _2ème année LMD Génie Electrique ». Université de YAHIA Fares de Médéa 2010.2013, 2014. » .

[27] W. HERRERA, G. APONTE, J. PLEITE, ET C. GONZALEZ-GARCIA, « A novel methodology for transformer low-frequency model parameters identification », *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, p. 643–648, 2013.

[28] L. BOUCHAOUI*, K. E. HEMSAS*, S. BELAHNECHE,** « Diagnostic des Transformateurs de Puissance par l'Analyse de la Réponse Fréquentielle (FRA) *LAS,

Université Ferhat Abbas, Sétif ** Laboratoire d'Analyse Régionale - Sonelgaz- GRTE – SETIF »,2009.

[29] M.JOSE IGNACIO ANGUS GOMES, Mlle Ana AZNAR BLANES , «diagnostic des transformateur de puissance ». Formation sur le diagnostic des transformateurs, Ayant lieu à ELHAMMA, Du 27/10 au 29/10/2007.

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

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

[32] OMICRON ELECTRONICS, « « FRAnalyzer Manuel d"utilisation » Référence - VESD0662 Version du Manuel: FRA.FR.1, 2006. »

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

[34] C. GONZALEZ GARCIA, « Procedimiento de Modelado basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia y aplicación en Transformadores Trifásicos de Potencia para su Caracterización y Diagnóstico », 2012.