الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en électrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

Analyse des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé,basée sur l'analyse de l'impedance du transformateur

Proposé et dirigé par :

Dr. HOUASSINE Hamza

Préparé et présenté par :

M. KRATBI Seyf Eddine

M. HAMADI Zakaria

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à,

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

- *A mes très chers frères.*
- *A mes sœurs, leurs maris, et leurs enfants.*
- *A toute ma famille de près ou de loin sans exception.*
- *A mes chers amis de mon quartier.*
- *A toute mes chers amis de l'université de Médéa.*
- *A mon promoteur H.HOUASSINE et mon binôme HAMADI Zakaria.*
- *A tout la promotion 2015-2016 électrotechnique sans exception.*
- *Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment .*

SEYF EDDINE

DÉDICACE

Je dédie ce travail,

A mes très chers parents qui ont sacrifié leur vie pour

ma réussite, et pour leurs encouragements. Que dieu

les garde éternellement heureux.

A toute la famille Hamadi et seddir

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

A toute mes amis et mes collègues surtout mon binôme, KRATBI Seyf Eddine, GACEM Zakaria et à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électrotechnique

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment

ZAKARIA

Remerciement

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

Nous adressons de chaleureux remerciements à notre encadreur M. HOUASSINE Hamza, Docteur à l’université Yahia Farés de Médéa pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail, et Sahnoune chaouche moustafa nous les remercies encore pour son aide si précieuse sur les plans conseils et orientations.

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

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

Nous tenons à présenter nos vifs remerciements au directeur et au membre du laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique (LREA) de l’université de disposition pour faire aboutir ce travail.

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

الملخص :

هذا العمل عبارة عن نمذجة لعمود محول ثلاثي الاعمدة وثلاثي الأطوار النموذج المحصل عليه قد تم إثبات صحته بتجارب عملية بالمخبر على محول كهربائي 1kVA.220/380V.50Hz . لقد استعمل هذا النموذج من أجل التحري في مجال تشخيص الأعطاب داخل المحول دون اللجوء إلى فتحه.

مفتاح الكلمات: المحولات، التشخيص.

Résumé :

Dans ce travail un modèle d'une colonne d'un transformateur triphasé a été développé et validé expérimentalement sur un transformateur de laboratoire 1kVA.220/380V, 50 Hz ce modèle est obtenu à partir des mesures effectuées sur les côtes HT et BT du transformateur ce model en T obtenu est exploité dans le domaine de diagnostic des défaillances dans les enroulements du transformateur.

Mot clés : Transformateur, Diagnostic.

Abstract :

This work is modelisation of transformer windings, The T model of transformer colone was validated with experiment tests under triphase transformer 1kVA.220/380V.50Hz,This model was used to diagnostic faults in the transformer windings .

Keyword: transformer, Diagnosis.

Table des matières

LISTES DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ABRIVIATION

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : Transformateur, défauts et diagnostic.

I.1.Introduction ……01

I.2. Définition……..……...01

I.3.Principe de fonctionnement…….……02

I.4 Différents types de transformateurs ……..…..02

I.4.1 Transformateur à colonnes …….……03

I.4.1.1 Les enroulements …….……03

I.4.1.2 Le circuit magnétique ……..……04

I.4.1.3 Limitations des transformateurs à colonnes ……..…..04

I.4.2 Transformateur cuirassé ……..…….04

I.4.2.1 Les enroulements ……..05

I.4.2.2 Les écrans électrostatiques ……...06

I.4.2.3 Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé …….……06

I.5. Les accessoires de surveillance ……06

I.5.1. Indicateur de niveau d'huile …….. 06

I.5.2. La soupape de surpression ……..…....06

I.5.3. Indicateur de température d'huile …….....07

I.5.4. Indicateur de température de bobinage ……...07

Table des matières

I.5.5. Relais BUCHHLOZ ……07

I.5.6. L'assécheur (dessiccateur d'air) ……..……...…08

I.6. Défauts fréquents dans les transformateurs …….……08

I.6.1. Défaut d'isolement de la partie active ……...….08

I.6.2. Amorçage diélectrique entre spires …….……..09

I.6.3. Court-circuit entre spires ……...…09

I.6.4. Décharges Partielles …….……..…10

I.6.5. Coupure du circuit électrique …….……...10

I.6.6. Déformation géométrique des enroulements ……..…..11

I.7. Techniques de diagnostic défauts dans les transformateurs ……..12

I.7.1. Mesures électriques ……..……..…12

I.7.1.1. Mesure de la résistance des enroulements ……..…….12

I.7.1.2 .Mesure du courant à vide …….……13

I.7.1.3. Mesure de la réactance de fuite…….……...13

I.7.1.4 .Mesure de rapport de transformation ……..…13

I.7.2 .Mesures diélectriques ……..……...14

I.7.2.1.Mesure du facteur de perte et de la capacité ……..……..…14

I.7.2.2 .Mesure de capacité des bornes …….....15

I.7.3.Analyse d'huile ……..…….16

I.8.Conclusion ……..……..….17

Table des matières

Chapitre II : modélisation fréquentielle du transformateur et analyse FRA

II.1.Introduction……..…….....18

II.2. Définition ……..…..…...18

II.3. Buts de la FRA ……..…..18

II.4. Utilisation des tests FRA ……19

II.5. Détection de défaut par FRA…….....19

II.6. Principe de la méthode ……..…..…20

II.7.Fonction de transfert d'un transformateur de puissance ……..…….21

II.8. Les Modèles fréquentiels du transformateur……22

II.8.1.Le modèle universel EMTP ……...22

II.8.2.Le modèle de RESEL ……24

II.8.3.Modèle de LEON ……...25

II.8.4.Modélisation par l'analyse modale ……..…26

II.8.5. Modélisation par la théorie de lignes ……27

II.8.6. Méthodes utilisant des transformées ou des circuits ……..…28

II.8.7.Modélisation par inductances propres et mutuelles ……...30

II.8.8.Modèle en T (adopté) …….……...….32

II.9. Conclusion ……..……..……....35

Chapitre III : Diagnostic des défauts dans le transformateur : Modélisation, Test et Validation

III.1.Introduction……...35

III.2.Objectif général……35

III.3.Méthodologie……....35

III.4.Essais expérimentaux et calculs des paramètres du modèle ……...36

III.4.1.Essais expérimentaux……36

III.4.1.1.Mesure de l'impédance Z_{11}……38

Table des matières

III.4.1.2.Mesure de l'impédance Z_{22} ……39

III.4.1.3 Mesure de l'impédance Z* ……40

III.4.2.Calcul des paramètres du modèle en T ……...41

III.4.2.1.Synthèse du schéma équivalent RLC et calcul de ses paramètres ……...46

III.5.Validation du modèle en T d'une colonne du transformateur ……48

III.5.1.Validation à la fréquence de fonctionnement nominal (50Hz) ……....48

III.5.2.Validation du modèle en haute fréquence ……49

III.6. Localisation et détection des défauts dans un enroulement du transformateur ……...50

III.6.1.Court-circuit entre spires du primaire ……...51

III.6.1.1.Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut de court-circuit primaire…….51

III.6.1.2.Comparaison des paramètres de circuit RLC en cas de défaut court-circuit primaire…….53

III.6.2.Court-circuit entre spires au secondaire…….55

III.6.2.1.Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut de court-circuit secondaire ……55

III.6.2.2.Comparaison des paramètres de circuit RLC en cas du défaut de court-circuit secondaire……..57

III.6.3.Comparaison des réponses fréquentielles des court-circuits primaires et secondaires.....59

III.6.4.Ouverture des spires au primaire et secondaire……61

III.6.4.1.Comparaison des réponses fréquentielles en cas de défaut d'Ouverture de spires….61

III.6.4.2. Calcul des paramètres de circuit RLC en cas de défaut d'Ouverture de spires…….63

III.6.5.Comparaison entre les réponses fréquentielles des différents défauts réalisés dans le transformateur ……..…65

III.7. Conclusion……...66

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

***Chapitre* I :**

N° Titre de la figure Page

Figure(I.1): Coupe d'un transformateur de puissance……..…….02
Figure (I.2): Transformateur à colonnes ……..…03
Figure (I.3):Transformateur cuirassé…...……05
Figure (I.4): Transformateur triphasé type cuirassé…….05
Figure(I.5): Indicateur de niveau d'huile ……..06
Figure(I.6): Soupape de surpression……....06
Figure(I.7): Indicateur de température d'huile ……...07
Figure(I.8): Indicateur de température de bobinage ……....07
Figure(I.9): Relais BUCHHLOZ…….……07
Figure(I.10): Assécheur……..….08
Figure (I.11) : Amorçage entre enroulements……..…09
Figure (I.12) : Amorçage entre spires, sans court-circuit……09
Figure (I.13) : Court-circuit entre spires……..……10
Figure (I.14) : Décharges partielles sur des cales……10
Figure (I.15) : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur……..…11
Figure (I.16) : Déformation mécanique d'un Enroulement…**….** 11
Figure (I.17) : Schéma de capacité de d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements…..14
Figure (I.18) : Schéma d'une borne de type capacitif…….….15

***Chapitre* II :**

N° Titre de la figure Page

Figure (II.1): Modèle d'un enroulement de transformateur……20
Figure (II.2): Principe de la FRA…….21
Figure (II.3): Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP……23
Figure (II.4): Modélisation d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP ……...23
Figure (II.5): Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL ……..24
Figure (II.6): Circuit de FOSTER en série……..25
Figure (II.7): Modèle de CAUER pour le noyau de fer……..26

Figure (II.8): Schéma équivalent modal……..27

Figure (II.9) : Schéma équivalent d'un enroulement……...28

Figure(II.10): Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique…28

Figure (II.11) : Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section de longueur ΔX…….….29

Figure(II.12) : Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert du transformateur ayant une seule fréquence de résonance ……..30

Figure(II.13): Modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié……...31

Figure(II.14): Structure de modèle d'un quadripôle……32

Figure(II.15): Processus suivi pour obtenir la structure de modèle d'un quadripôle (modèle en T)……..34

***Chapitre* III :**

N° Titre de la figure Page

Figure(III.1): Module de comportement de l'impédance d'un circuit RLC parallèle en fonction de la fréquence. ……..36

Figure(III.2): Banc d'essai Expérimental……37

Figure(III.3) : Schéma illustratif des essais pour la détermination des impédances Z_{11}, Z_{22} et Z_{12} à partir des essais en régime fréquentiel.…… ……..……..……37

Figure(III.4): Mesure d'impédance Z_{11}**……**……38

Figure(III.5): Module d'impédance Z11en fonction de la fréquence……..…..……..38

Figure(III.6) : Mesure d'impédance Z_{22}…….……39

Figure(III.7): Module d'impédance Z_{22} en fonction de la fréquence…….……39

Figure(III.8) : Mesure d'impédance Z*……..……40

Figure(III.9) : Module d'impédance Z* en fonction de la fréquence……..……..40

Figure(III.10) : Schéma équivalent d'un transformateur……41

Figure(III.11) : Module d'impédance Z_{12} en fonction de la fréquence…….……41

Figure(III.12) : Module d'impédance (Z_{11}- Z_{12}) en fonction de la fréquence……...…….42

Figure(III.13) : Module d'impédance (Z_{22}- Z_{12}) en fonction de la fréquence…….....42

Figure (III.14) : Module d'impédance Z_{12} mesuré en fonction de la fréquence…….44

Figure (III.15) : Synthèse du circuit RLC à partir de réponse fréquentielle del'impédance...44

Figure(III.16) : Comparaison entre le module d'impédance Z_{12} mesurée et simulée……44

Figure(III.17): Structure du modèle en T……...…….45

Figure(III.18) : Représente le modèle en T trouvé suivante les étapes ci-dessous…..…..….46

Figure(III.19):Validation du model d'un transformateur a50 HZ ……..……47

Figure(III.20): Validation du modèle en T à 50Hz…….……48

Figure(III.21):Validation du model du transformateur à haute fréquence……...……..…48

Figure(III.22): Comparaison de l'impédance Z_{12} mesurée et celle issue du schéma équivalent RLC .....…….…….…….…49

Figure(III.23) : Défaut de court-circuit primaire proche du neutre(CCPP) et loin du neutre(CCPL) réalisé sur la phase U du transformateur. …….50

Figure(III.24) : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit dans primaire et un enroulement sain…….…..51

Figure(III.25) : Comparaison des résistances au pic N°01 en cas de court-circuit primaire loin et proche du neutre par rapport au sain……..52

Figure(III.26) : Comparaison des inductances au pic N°01 en cas de court-circuit primaire loin du neutre (CCPL) et proche du neutre (CCPP) par rapport au sain……53

Figure(III.27) : Défaut de court-circuit secondaire proche du neutre(CCSP) et loin du neutre(CCSL) réalisé sur la phase U du transformateur……...54

Figure(III.28) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit secondaire proche et loin du neutre et un enroulement sain……..55

Figure(III.29) : Comparaison des résistances au pic N° 01 en cas de court-circuit secondaire loin du neutre (CCSL) et proche du neutre (CCSP) par rapport au sain……..…56

Figure(III.30) : Comparaison des inductions au pic N°01 en cas de court-circuit secondaire loin du neutre (CCSL) et proche du neutre (CCSP) par rapport au sain……57

Figure(III.31) : Comparaison des capacités au pic N°01 en cas de court-circuit secondaire loin du neutre (CCSL) et proche du neutre (CCSP) par rapport au sain……58

Figure(III.32) : Comparaison de la réponse en fréquence, entre un enroulement présentant des défauts de court-circuit, primaire et secondaire (proche et loin) du neutre et un enroulement sain……...59

Figure (III.33) : Défaut d'Ouverture de spires réalisé sur la phase U du transformateur…..60

Figure(III.34) : Comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spires au primaire et au secondaire et un enroulement sain…….....61

Figure(III.35) : Comparaison des résistances au pic n 01 en cas d'ouverture de spires primaire et secondaire par rapport au sain……..…..62

Figure(III.36) : Comparaison des capacités au pic n 01 en cas d'ouverture de spires, primaire et secondaire par rapport au sain……..….63

Figure(III.37) : Comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant des défauts (court-circuit, ouverture de spires) au primaire et secondaire et un enroulement sain ……..64

N°	Titre	Page
Tableau (III.1) :	Circuit RLC synthétisé à partir d'une réponse fréquentielle	43

BT : Basse tension.

TC :Transformateur de courant.

C : Capacité.

FRA: Frequency Response Analysis.

Hz: Hertz.

HT : Haut tension.

HF: Haut frequence.

BF:Basse frequence.

kHz : kilo Hertz.

L : L'inductance propre.

MHz: Méga Hertz.

Z : Impédance.

e : Force électromotrice.

A: Ampère.

RLC: Résistance-Inductance-Capacité.

Ω : Ohm.

B: Bande passante.

Ø : Flux magnétique.

kV : kilo Volt.

CCPL : Court-circuit primaire loin du neutre.

CCSL : Court-circuit secondaire loin du neutre.

CCPP : Court-circuit primaire proche du neutre.

CCSP : Court-circuit secondaire proche du neutre.

ω : La pulsation.

ω_{LO} : Pulsation de demi-puissance inférieure.

ω_{HI} : Pulsation de demi-puissance supérieure.

ω_0 : Pulsation de résonance.

Introduction générale

Introduction générale

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

La modélisation des transformateurs de puissance à traditionnellement occupé beaucoup d'attention durant des années, pour leur importances dans les systèmes de puissance, le grand intérêt porté à l'étude de ces derniers on permet de réaliser un développement remarquable dans le domaine de la conversion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

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. Il existe différentes méthodes d'évaluation du spectre des fréquences pour confirmer la présence d'un défaut [1].

Ainsi, la technique FRA a le potentiel pour détecter des problèmes d'enroulement. C'est la technique la plus efficace actuellement disponible qui n'exige pas d'ouvrir le transformateur en raison de sa sensibilité élevée pour détecter les défauts. Cette méthode est basée sur le concept du changement géométrique dans les enroulements en raison de la déformation et des déplacements causés par une modification dans les impédances de l'enroulement du transformateur et par conséquent d'une modification de sa réponse en fréquence. L'impédance du transformateur de puissance est composée d'une configuration complexe comportant des résistances, inductances et capacités (circuit résonnant RLC).

L'application pratique de la technique FRA pour détecter les dommages mécaniques et électriques dans un transformateur dépend de sa sensibilité à tout changement dans les inductances et les capacités réparties. Le circuit équivalent est utile dans la modélisation de la sensibilité de la réponse fréquentielle aux changements qui peuvent avoir lieu dans les enroulements.

L'interprétation de la FRA basée sur la modélisation de circuit du transformateur a pour but de représenter le comportement d'un transformateur sur toute la gamme de fréquence.

La modélisation du transformateur basée sur la variété de types des modèles, utilisent des paramètres de réseau équivalent (RLC) et se concentrent sur la gamme de fréquence d'intérêt [1].

L'objectif de ce travail est de localiser et détecter les différents défauts dans un transformateur de puissance, par ailleurs un modèle d'un transformateur traduisant son comportement en régime fréquentiel a été proposé afin de l'utiliser comme un outil de simulation des défauts le long de l'enroulement du transformateur d'une part et d'une autre part un outil d'analyse et de maintenance de ce type de machine très importante dans les systèmes d'énergie électrique.

Pour cerner cet objectif notre mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique portant sur les défauts et les différentes méthodes de diagnostic de transformateur de puissance.

Une présentation des principaux modèles du transformateur de puissance existant dans la littérature, dans le but de choisir le modèle le mieux adapté à notre étude et la présentation de la démarche de l'analyse de la réponse fréquentielle, ont fait l'objet du second chapitre.

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. Les résultats obtenus sont enfin discutés en fin du chapitre.

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

***Chapitre* I :**

Transformateur, défauts et diagnostic

I.1.Introduction :

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

En effet, les alternateurs des centrales sont triphasés et la tension qu'ils produisent et relativement basse (soit 20kV pour les centrales moderne). 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 [2].

Les transformateurs de puissance sont des constituants essentiels de tous les réseaux de transport et de distribution d'électricité. L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs parasites produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Un transformateur peut aussi être soumis à des contraintes pendant son transport et son installation ainsi que par suite des variations cycliques de la température ambiante. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [3].

I.2.Définition :

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables d'intensité et de tensions généralement différentes mais de même fréquence [4].

Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance, en transformant les valeurs de la tension et de l'intensité à des valeurs qui rendent abordable techniquement et économiquement le transport depuis les centres de production aux centres d'utilisation [5].

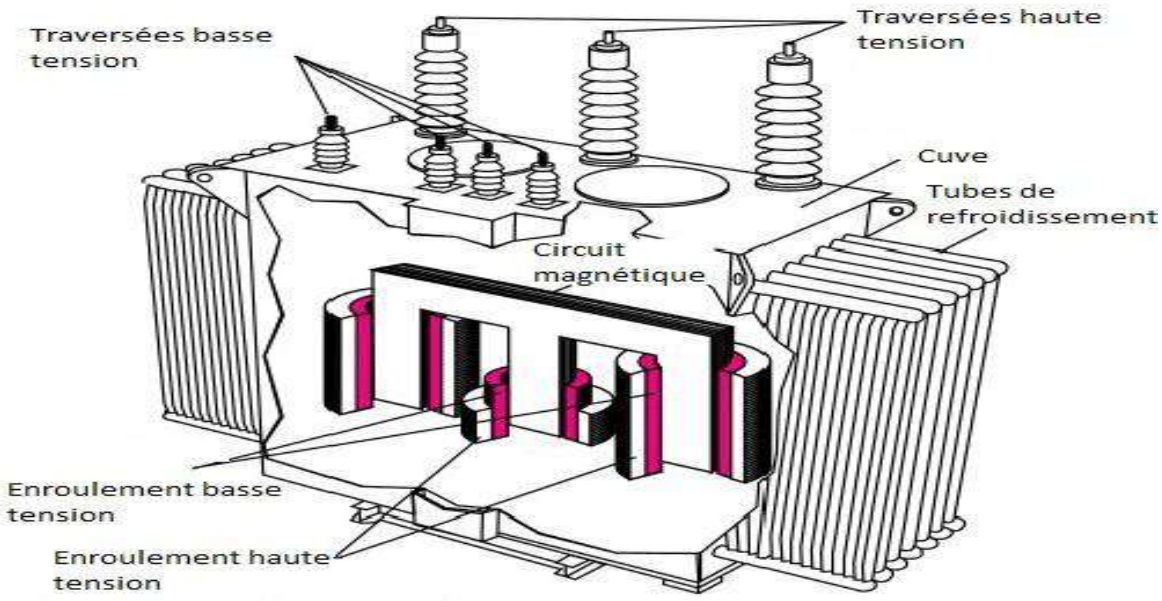


Figure (I.1): Coupe d'un transformateur de puissance.

I.3.Principe de fonctionnement:

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable ∅ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($\mathbf{d}\,\Phi / \mathbf{d}\,t$) et au nombre de spire que comporte cet enroulement. Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire [6].

I.4.Différents types de transformateurs :

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

Du point de vue construction, deux principales technologies sont distinguées, à savoir les transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés.

I.4.1.Transformateur 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 généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique [7].

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique figure(I.3).

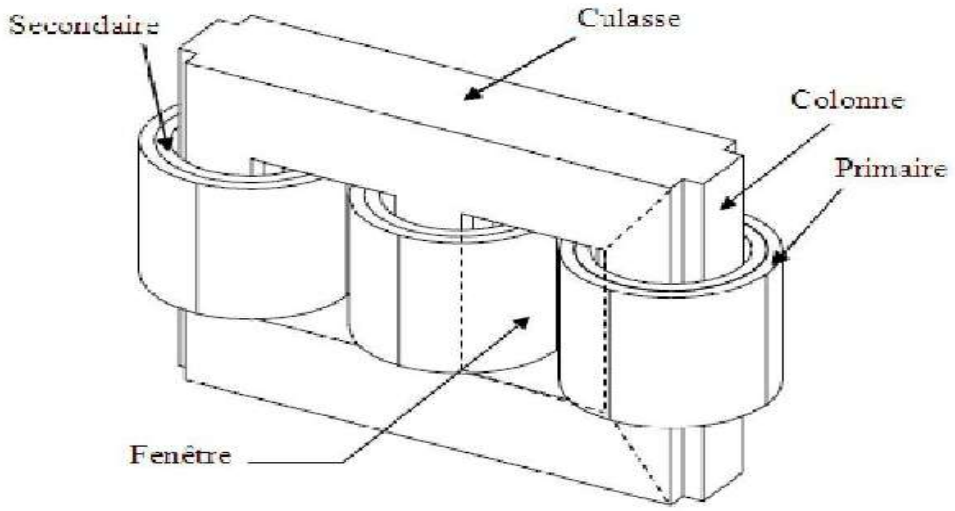


Figure (I.2): Transformateur à colonnes.

I.4.1.1.Les enroulements :

Les enroulements sont constitués de spires dont le nombre est différent pour les enroulements de haute et de basse tension respectivement primaire/secondaire. Les spires sont-elles mêmes subdivisées en plusieurs brins mis en parallèle. Les conducteurs formant les enroulements sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autres pour leurs bonnes conductivités thermiques.

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 [8].

I.4.1.2.Le circuit magnétique :

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, isolées Electriquement entres elles afin de réduire les pertes par courants de Foucault. Les tôles de circuit magnétique de type (Fe-Si), à grain orienté laminé à froid, ont une épaisseur qui varie de 0.15mm à 0.3mm [9].

Des joints enchevêtrés et orthogonaux effectuent la liaison entre les colonnes et les culasses sur les transformateurs de petite puissance. Ces joints qui constituent une succession de stratifications jouent un rôle important dans la performance du noyau afin d'obtenir une stabilité mécanique plus élevée, et diminuent également le bruit des vibrations pendant le fonctionnement du transformateur [8].

L'espace délimité par deux colonnes successives et les culasses est dénommé "fenêtre magnétique" et accueille donc les bobinages [8].

I.4.1.3.Limitations des transformateurs à colonnes :

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquence, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants.

Par ailleurs ce type de construction qui à fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30 KVA), présente quelque difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 KVA) et des tensions plus élevées.

I.4.2.Transformateur cuirassé :

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal.

Le circuit magnétique, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et des enroulements.

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtension sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

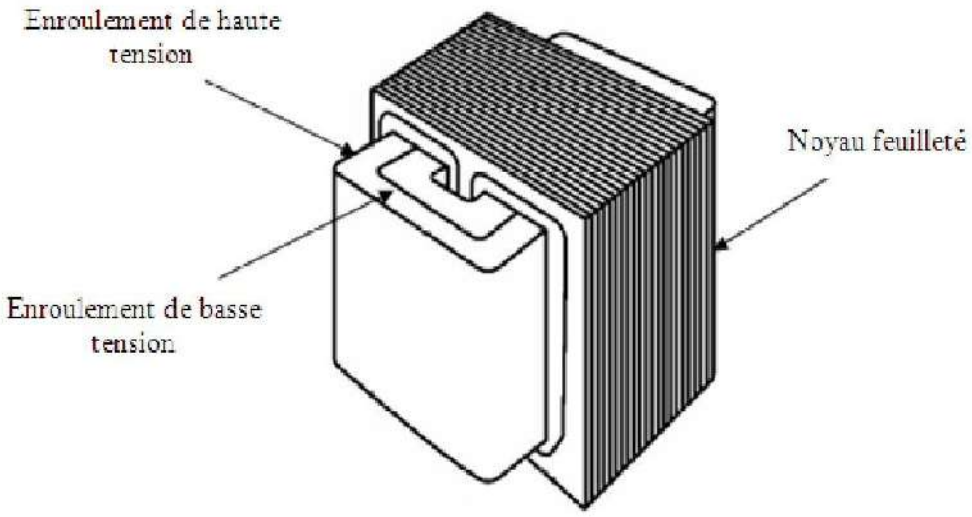


Figure (I.3): Transformateur cuirassé.

I.4.2.1.Les enroulements :

Dans ce type de construction la bobine qui est en fait une grande spirale rectangulaire très plate (galette), contient un certain nombre de spires, chaque spire étant elle-même constituée d'une ou de plusieurs couches de conducteurs.

Les galettes sont alternées entre la haute et la basse tension afin de diminuer les fuites magnétiques et le gradient de tension. En outre, cette topologie offre l'avantage d'engendrer des forces en opposition entre chaque galette lors de court-circuit.

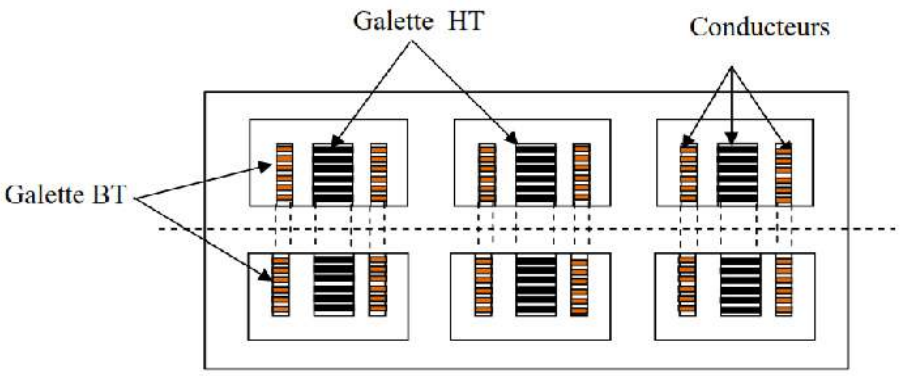


Figure (I.4): Transformateur triphasé type cuirassé.

I.4.2.2.Les écrans électrostatiques :

Des feuilles métalliques à haute résistivité et de faible épaisseur sont employées pour réduire les contraintes entre les spires. Celles-ci sont insérées entre les feuilles isolantes des bobines haute tension. L'effet capacitif, uniformément distribué de cette manière permet alors de mieux répartir la tension sur toute la longueur de la bobine lors d'une onde de choc.

I.4.2.3.Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé :

Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relatif plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans le transformateur à colonnes.

Mais il présente aussi certains inconvénients : ses enroulements sont moins accessibles à l'agent refroidissant, l'examen et la réparation sont plus difficiles et demande d'avantage de matériaux isolants pour la haute tension.

I.5.Les accessoires de surveillance :

I.5.1.Indicateur de niveau d'huile :

Cet indicateur indique le niveau d'huile dans le conservateur. Monté sur un des côtés du conservateur, il est équipé d'un ou deux contacts d'alarme [10].



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

I.5.2.La soupape de surpression :

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

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



Figure(I.6): Soupape de surpression.

Lorsque la soupape est revenue à son point de repos, la tige indicatrice signale que la soupape a fonctionné, son réarmement se fait manuellement [9].

I.5.3.Indicateur de température d'huile :



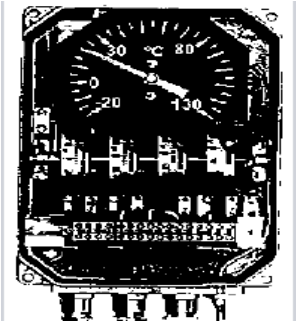
Cet indicateur contrôle la température d'huile au sommet de la cuve du transformateur.

- Contact alarme à 100°C.
- Contact déclenchement à 110 °C [10].

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

I.5.4.Indicateur de température de bobinage :

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



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

- Contact alarme à 120°C.
- Contact déclenchement à 130°C [10].

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

I.5.5.Relais BUCHHLOZ :



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

En cas de défaut, deux contacts peuvent fonctionner:

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

Figure(I.9): Relais BUCHHLOZ.

- Déclenchement : un mouvement brutal de l'huile de la cuve de l'appareil vers le conservateur suite à un arc électrique violent ou un mouvement des enroulements [11].

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



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

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

Figure(I.10): Assécheur

Le sillicage bleu n'est donc plus disponible sur le marché et il est remplacé par un gel de silice de couleur orange lorsqu'il est déshydraté et se transforme en :

- Couleur blanche sale translucide lorsqu'il est saturé.
- A ce jour, ce produit ne contient aucune substance qui soit considérée comme dangereuse pour la santé et pour l'environnement. C'est le produit le plus utilisé actuellement [11].

I.6.Défauts fréquents dans les transformateurs :

I.6.1.Défaut d'isolement de la partie active :

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

Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes :

- ✓ Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux figure (I.11).
- ✓ Amorçage entre la masse (la cuve ou le circuit-magnétique typiquement) et un enroulement, une connexion ou une traversée.

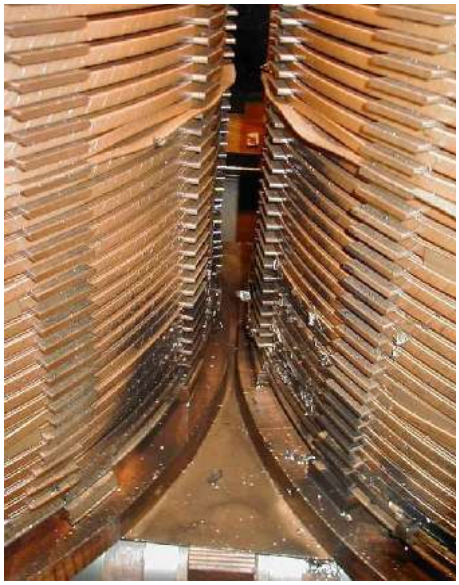


Figure (I.11) : Amorçage entre enroulements

I.6.2.Amorçage diélectrique entre spires :

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



Figure (I.12) : Amorçage entre spires, sans court-circuit.

I.6.3.Court-circuit entre spires :

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



Figure (I.13) : Court-circuit entre spires

I.6.4.Décharges Partielles :

Les décharges partielles, sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l'isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible sur la Figure (I.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.

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



Figure (I.14) : Décharges partielles sur des cales.

I.6.5.Coupure du circuit électrique :

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

- Un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur.
- Un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact figure (I.15).

- Un mauvais alignement d'un régleur.



Figure (I.15) : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur.

I.6.6.Déformation géométrique des enroulements :

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des court-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés, qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes Figure (I.16), à noter sans amorçages entre spires, ni court-circuit internes).

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



Figure (I.16) : Déformation mécanique d'un Enroulement.

I.7.Techniques de diagnostic défauts dans les transformateurs :

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

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

I.7.1.Mesures électriques :

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont:

I.7.1.1.Mesure de la résistance des enroulements :

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

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

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

$$\boldsymbol{R_{corg}} = \left(\frac{\boldsymbol{\theta_F + \theta_{ref}}}{\boldsymbol{\theta_F + \theta_m}}\right) \quad \text{.....(I.1).}$$

R_m : Résistance mesuré.

θ_F : 235 pour le cuivre et 255 pour aluminium.

θ_{ref} : Température de référence.

θ_m : Température des enroulements.

Des valeurs supérieures peuvent indiquer :

- L'existence de court-circuit entre spires.

- Des irrégularités dans les circuits de régulation du transformateur (valeur de la Résistance par prise).
- Des connexions défectueuses.
- Des échauffements anormaux dans les bobines et les conducteurs.

La mesure de la résistance des enroulements doit être effectuée en dernier lieu, puisqu'elle produit des problèmes de magnétisation du noyau en étant effectué l'essai avec du courant continu [13].

I.7.1.2.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 [13].

L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer le circuit magnétisé du transformateur [13] :

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

Principe de mesure :

La Technique d'essai consiste à injecter une tension alternative de valeur réduite (jusqu'à 12 kV) de différents niveaux, et réaliser une mesure du courant de magnétisation [12].

I.7.1.3.Mesure de la réactance de fuite :

La mesure de la réactance de fuite ou impédance de court-circuit, permet par comparaison aux valeurs des mesures lors des essais en usine du transformateur de détecter des changements très importants (> ±5%) qui devrait amenée à des investigations plus importantes, un circuit ouvert ou des court-circuits entre spires, ou entre enroulements et cuve.

I.7.1.4.Mesure de rapport de transformation :

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures. Des déviations indiquent des court-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régleur [14].

Les mesures sont effectuées :

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

La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haut tension, en mesurant les tensions résultantes dans les autres [13].

I.7.2.Mesures diélectriques :

Les isolants électriques des équipements sont soumis à un vieillissement donnant lieu à une perte progressive de leurs caractéristiques diélectriques pouvant être la cause des défauts du transformateur. L'objectif des mesures diélectriques est de déceler d'éventuelle dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenu d'un incident due à une avarie [14].

La condition d'isolement est un facteur essentiel de la fiabilité opérationnelle des transformateurs. Pour évaluer son état on doit effectuer la mesure des paramètres suivants :

- Mesure de facteur de puissance.
- Mesure de capacité.
- Mesure de la résistance d'isolement en courant continu.

I.7.2.1.Mesure du facteur de perte et de la capacité :

La capacité fournit des informations générales sur la perte d'isolement dans le noyau ou les enroulements. La mesure de capacité se fait entre cuve et enroulement ou entre enroulement Figure (**I.17**).

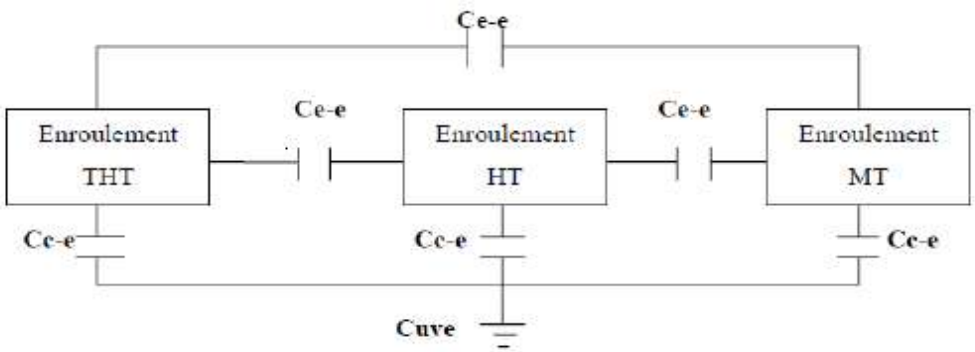


Figure (I.17) : Schéma de capacité de d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements.

C c-e : capacité entre cuve et enroulement.

C e-e : capacité entre enroulements.

Ainsi, une 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 [14].

I.7.2.2.Mesure de capacité des bornes :

Les traversées haute tension sont un accessoire important qui peut en cas d'avarie être une cause d'indispensabilité importante du transformateur ce qui fait une attention particulière doit être accordée à leur entretient. La mesure de la capacité des bornes, peut renseigner sur l'état des bornes ce qui permettra d'éviter des avaries (explosion) de traversées. 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, la valeur C1 représente la capacité entre le conducteur central de la borne et la prise capacitive, et C2 indique la capacité entre la prise capacitive et la terre voir Figure **(I.18)** [14].

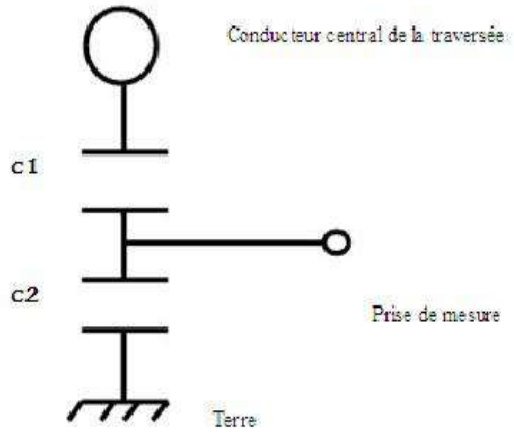


Figure (I.18) : Schéma d'une borne de type capacitif.

Les résultats des mesures doivent être comparés aux résultats des tests effectués en usine, permettant de déterminer le court-circuit dans les galettes capacitives de la traversée et les détériorations du corps des traversées. Donc il est nécessaire de prendre certain précautions pour réduire les causes d'erreurs :

- réaliser les mesures si l'humidité atmosphérique est faible.

- veiller sur la dépollution des traversées avant de mesurer.

Les mesures doivent être effectuées à une température proche de celle de l'essai en usine [13].

I.7.3.Analyse d'huile :

Le fonctionnement dans des bonnes conditions des transformateurs, dépend dans une large mesure de la qualité des huiles minérales isolantes utilisées. Les caractéristiques des huiles se dégradent par l'effet de la contamination, de l'humidité et du vieillissement. L'huile isolante est l'un des éléments les plus importants dans un transformateur qui nécessite une surveillance et un entretient car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci. L'huile est un fluide qui pénètre dans toutes les parties internes du transformateur, sa circulation permet l'évacuation de la chaleur produite par les enroulements, par convection à travers la cuve du transformateur [15].

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

Les aspects les plus significatifs à vérifier sur l'huile, reposent sur un nombre important d'analyse telle que :

- Les analyses physico-chimiques.
- Les analyses des furanes.
- L'analyse des gaz dissous.

I.8.Conclusion :

Le transformateur est un organe très sensible aux déférentes conditions d'exploitations, dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur la constitution du transformateur et les différentes avaries qui peuvent l'affecter ainsi que les déférentes méthodes des diagnostiques de pannes dans les transformateur.

Chapitre II :

Modélisation fréquentielle du transformateur et analyse FRA

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.

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

II.2.Définition :

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 mesurée par des techniques FRA peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être en suite identifiée et analysée [16].

II.3.Buts de la FRA :

Le but de la mesure FRA est la détection de:

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

- Défaut de connexions des barrières.

II.4.Utilisation des tests FRA : [2], [17].

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

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

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

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

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

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

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

II.6.Principe de la méthode : [16], [17], [18].

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

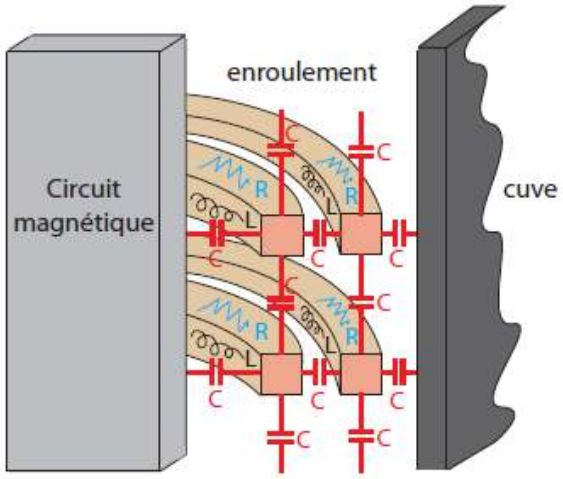


Figure (II.1): Modèle d'un enroulement de transformateur.

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

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

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

Le principe de fonctionnement est d'injecter un signal d'excitation électrique sur l'un des enroulements et de mesurer le signal de réponse sur une large plage de fréquence (Méthode de balayage en fréquence). Le rapport de ces deux signaux donne la réponse exigée. Ce rapport s'appelle la fonction de transfert du transformateur à partir duquel la grandeur et la phase peuvent être obtenues, Figure (II.2).

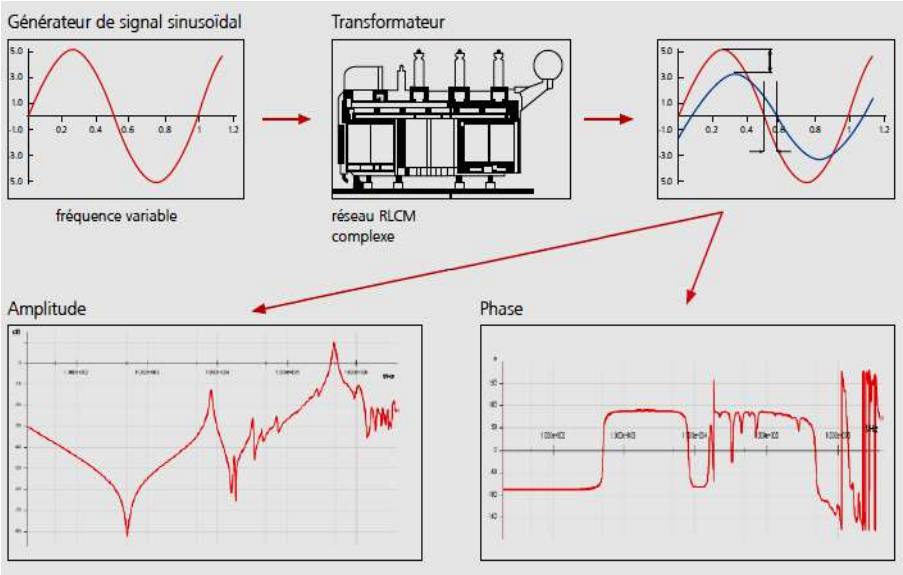


Figure (II.2): Principe de la FRA.

II.7.Fonction de transfert d'un transformateur de puissance :

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

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

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

L'idée de l'application de la FRA pour l'évaluation de l'état d'enroulement du transformateur est basée sur le fait que le déplacement ou la déformation d'enroulement change les propriétés géométriques, qui sont liées à ses paramètres capacitives et inductives internes. Les changements de ces paramètres modifient par conséquent les réponses de fréquence d'enroulement, qui peuvent être observées par la mesure de la fonction de transfert [16].

II.8. Les Modèles fréquentiels du transformateur :

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

II.8.1.Le modèle universel EMTP : [15], [19].

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

- des transformateurs parfaits;

- une branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer.

- des inductances de fuite des groupes (galettes, couches, ou bobines).

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

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

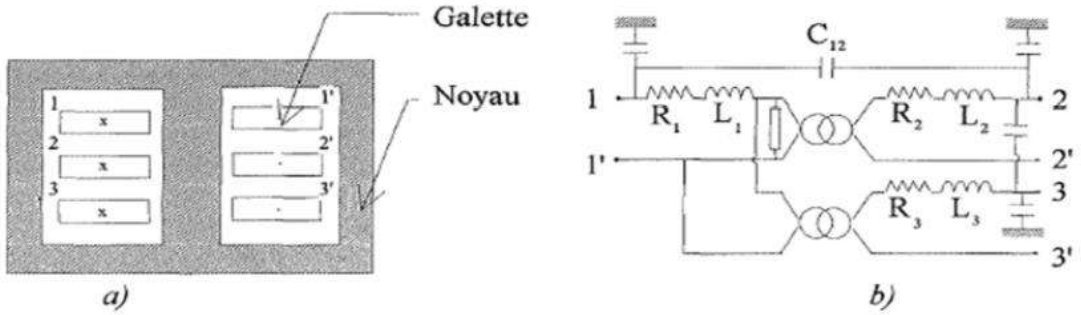


Figure (II.3): Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

a) Coupe transversale du transformateur.

b) Circuit équivalent.

Les différents paramètres du schéma équivalent représenté sur la Figure (II.1) (R = résistance de la galette1) sont déterminés, soit par calcul numérique ou analytique, à partir de la géométrie du transformateur, et en faisant des hypothèses simplificatrices (symétrie, perméabilité du noyau magnétique constante,….), soit par mesure (essais à vide, essais en court-circuit,...).

Mais, dans certains cas, l'utilisation du code de calcul EMTP, pour modéliser un transformateur, ne représente pas la réalité. En effet, par exemple pour un transformateur monophasé à deux enroulements égaux (haute tension et basse tension), le modèle EMTP n'est pas symétrique, et l'inductance de court-circuit n'est pas la même, vue du primaire et du secondaire figure (II.4).

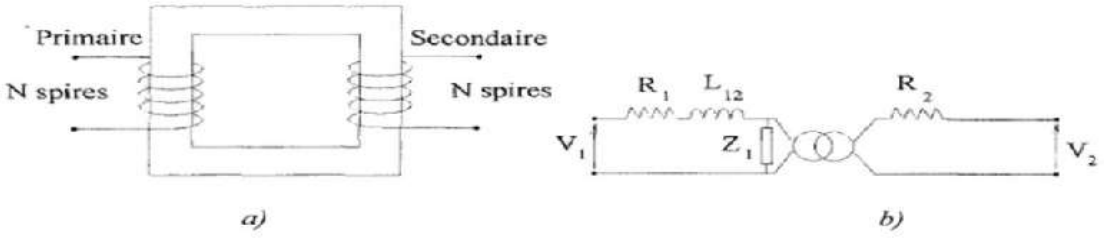


Figure (II.4): Modélisation d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP [15].

a) Le transformateur.

b) Modèle EMTP.

II.8.2.Le modèle de RESEL : [15].

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

Un schéma (figure II.5.b) qui traduit le comportement électrique du transformateur, composé de forces électromotrices, et de plusieurs cellules RL (l'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateurs), et un schéma (Figure II.5.c) qui traduit son comportement magnétique, composé d'un réseau de réluctances (R_{f1} et R_{f2} : réluctances de fuites, et R_{12} : réluctance principale) et de forces magnétomotrices (Ni_1et Ni_2)

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

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

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

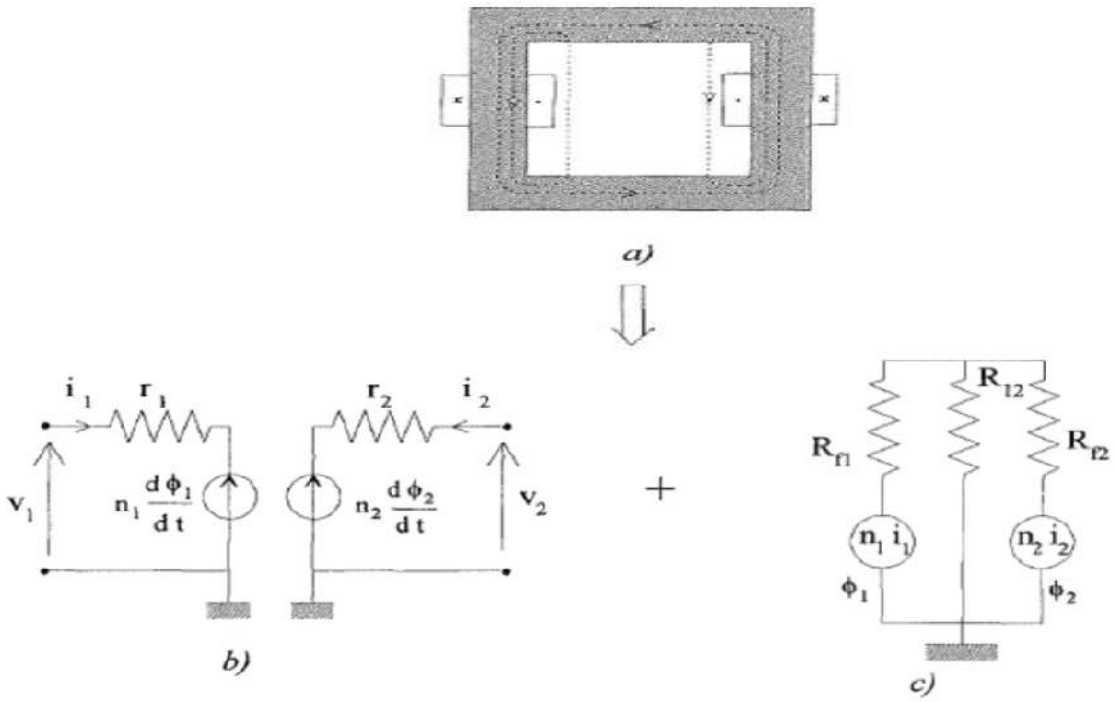


Figure (II.5): Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.

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

b) Le circuit électrique correspondant.

c) Le circuit magnétique correspondant.

II.8.3.Modèle de LEON : [16], [10].

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

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

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

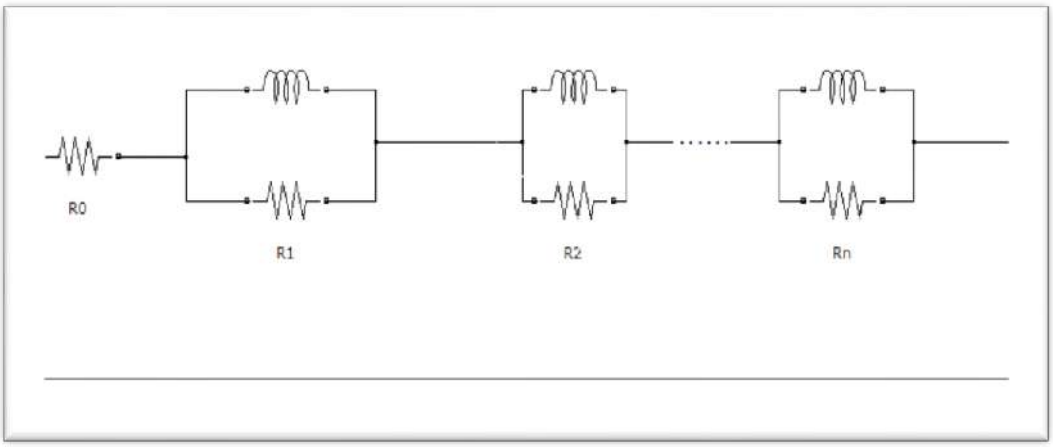


Figure (II.6): Circuit de FOSTER en série.

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

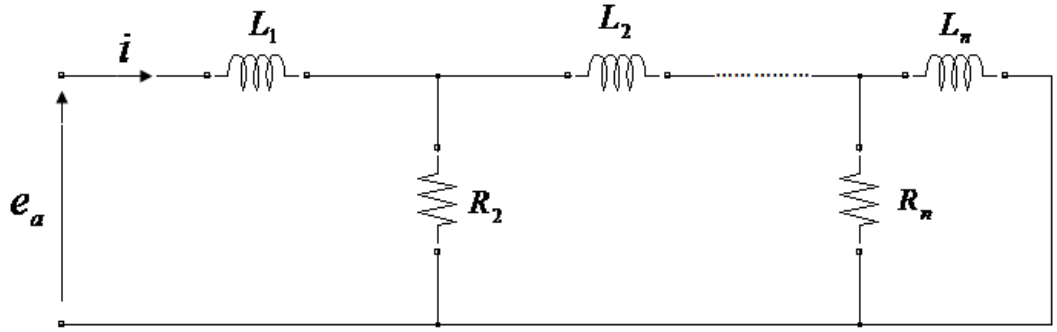


Figure (II.7): Modèle de CAUER pour le noyau de fer.

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

II.8.4.Modélisation par l'analyse modale :

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

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

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

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

Des modèles plus développés pour le calcul des tensions transmises, montrent l'intérêt de la méthode pour les études de réseaux et que le calcul de surtensions transmises, par le modèle, reste un problème délicat au niveau de leurs amplitudes. Le modèle permet d'une part le calcul de fréquences de résonance avec une bonne précision et d'autre part il sert de schéma équivalent pour la prise en compte de la réaction sur le réseau d'un transformateur lors de calcul de réseaux [19].

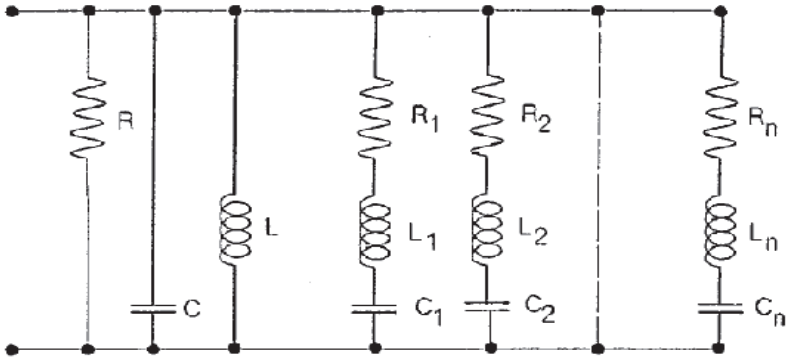


Figure (II.8): Schéma équivalent modale.

II.8.5.Modélisation par la théorie de lignes : [19].

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

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

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

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

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

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

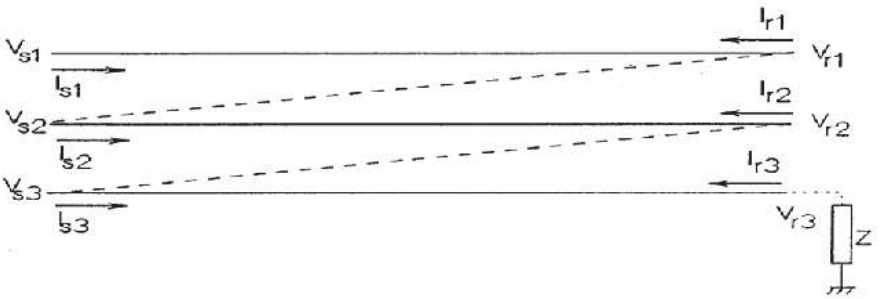


Figure (II.9) : Schéma équivalent d'un enroulement.

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

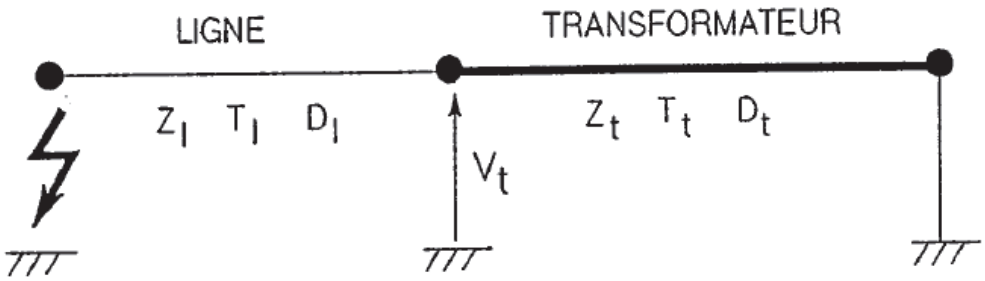


Figure (II.10): Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique

II.8.6.Méthodes utilisant des transformées ou des circuits :[16].

Des travaux ont combiné l'approche des ondes mobiles pour simuler la ligne avec un circuit équivalent du transformateur, par unité de longueur, pour l'étude des interactions ligne-transformateur. Ils ont utilisé une inversion numérique de la transformée de Laplace, en identifiant la fonction de Laplace à inverser. Leur application reste restreinte par les

hypothèses prises pour modéliser le transformateur et la ligne. La modélisation de la ligne est faite sans tenir compte de l'effet de peau, de l'effet du sol, et de la variation fréquentielle des paramètres.

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

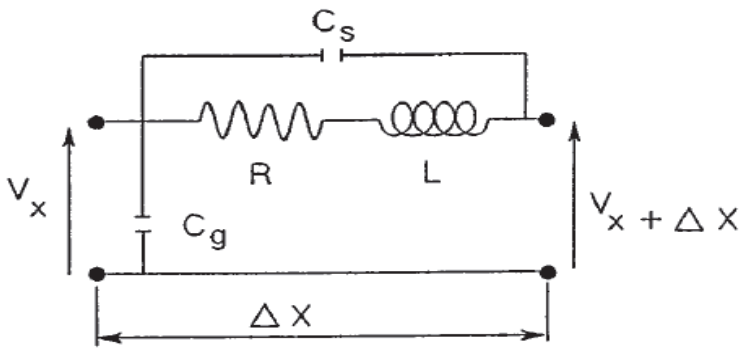


Figure (II.11) : Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section de longueur ΔX.

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

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

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

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

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

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

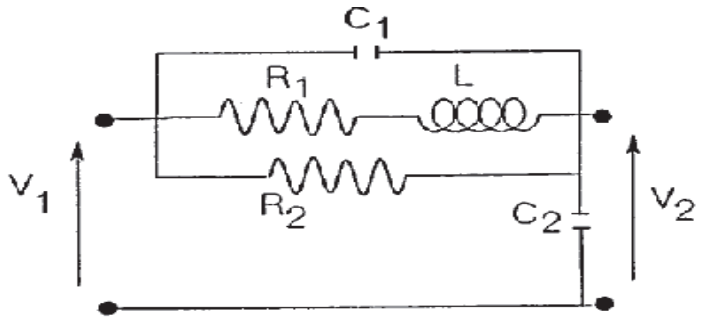


Figure (II.12) : Circuit équivalent simplifié pour simuler la fonction de transfert du transformateur ayant une seule fréquence de résonance.

II.8.7.Modélisation par inductances propres et mutuelles :

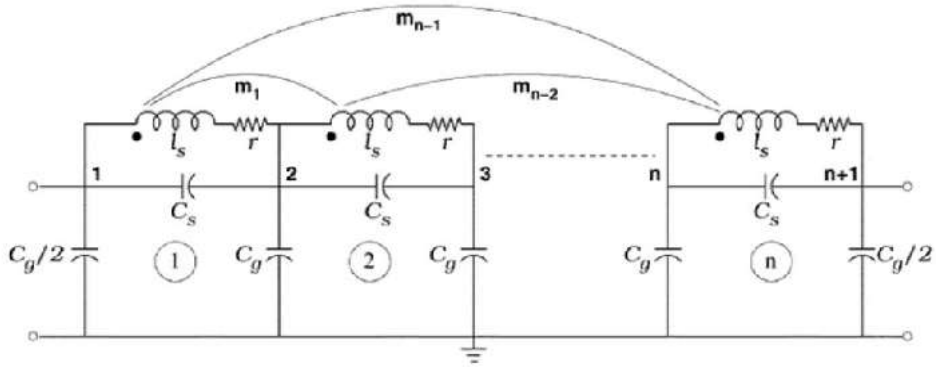
Heller et Veverka [18] ont montré que le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc est assimilable à celui d'un système de condensateurs, de résistances, et d'inductances. C'est le principe du modèle de transformateur de puissance basé sur les inductances propres et mutuelles. Selon l'étude envisagée, c'est-à-dire selon qu'on s'intéresse au phénomène de propagation, ou aux modes de résonance du transformateur, ces paramètres peuvent être répartis ou concentrés.

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

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes (Figure II.13).

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.

Les éléments de ce modèle sont calculés, en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau magnétique [19].



Figure(II.13*)*: Modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié.

Avec :

Cs : capacité série.

Cg : capacité shunt.

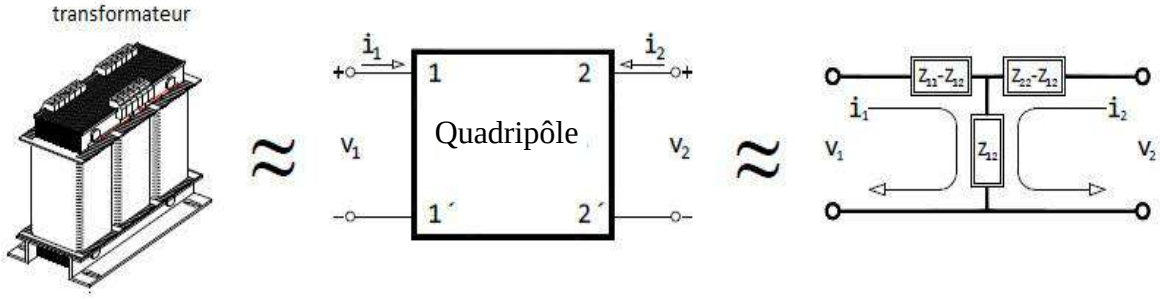
r : résistance.

L : l'inductance propre.

M_{1N} : représenté les inductances mutuelles.

II.8.8.Modèle en T du transformateur :

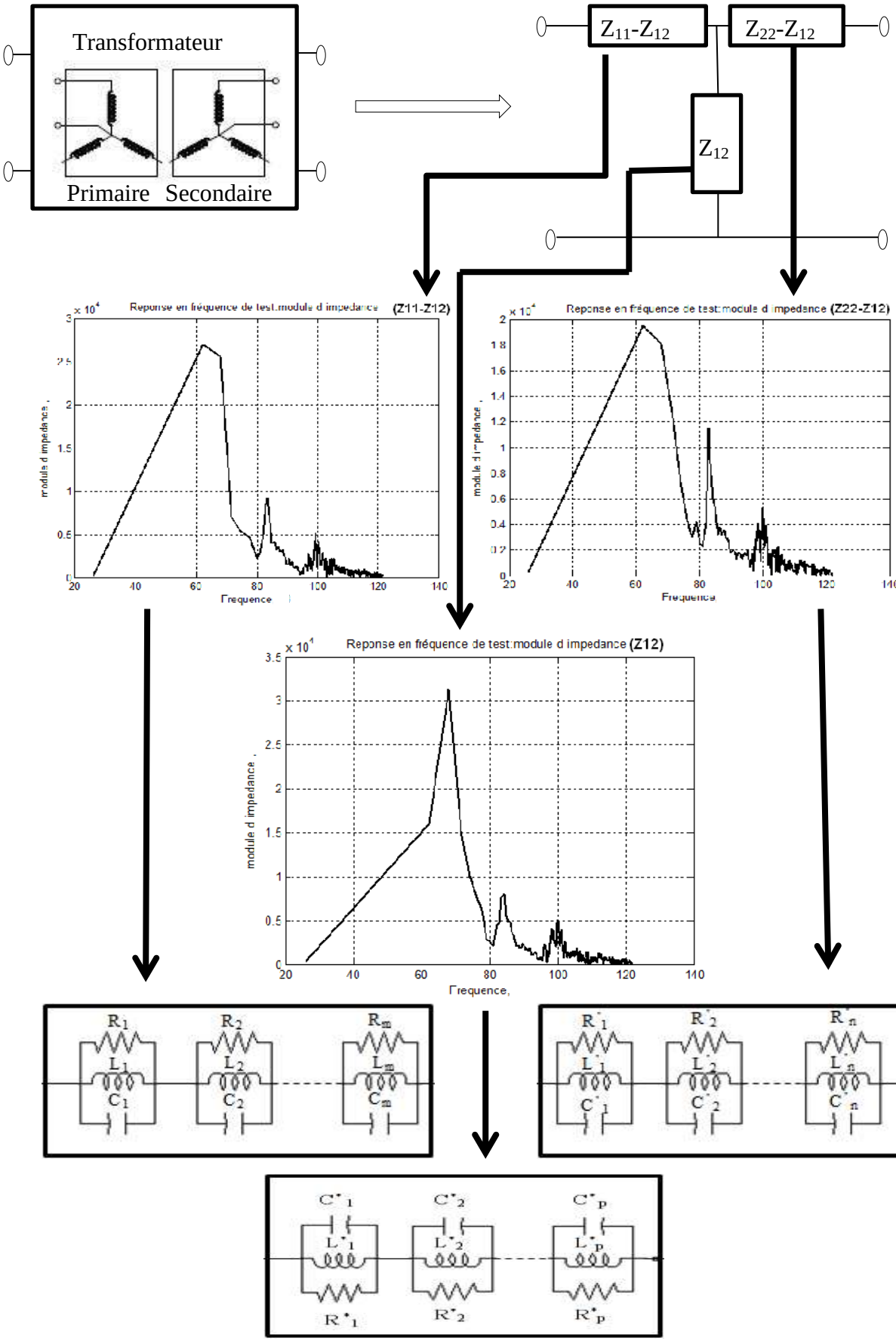
La structure de ce modèle est basée sur la théorie du quadripôle. Elle établit la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes d'entrée et de la sortie d'une phase du transformateur, les impédances obtenues sont exploitées pour construire un modèle en T du transformateur illustré dans la figure(II.14). [20]

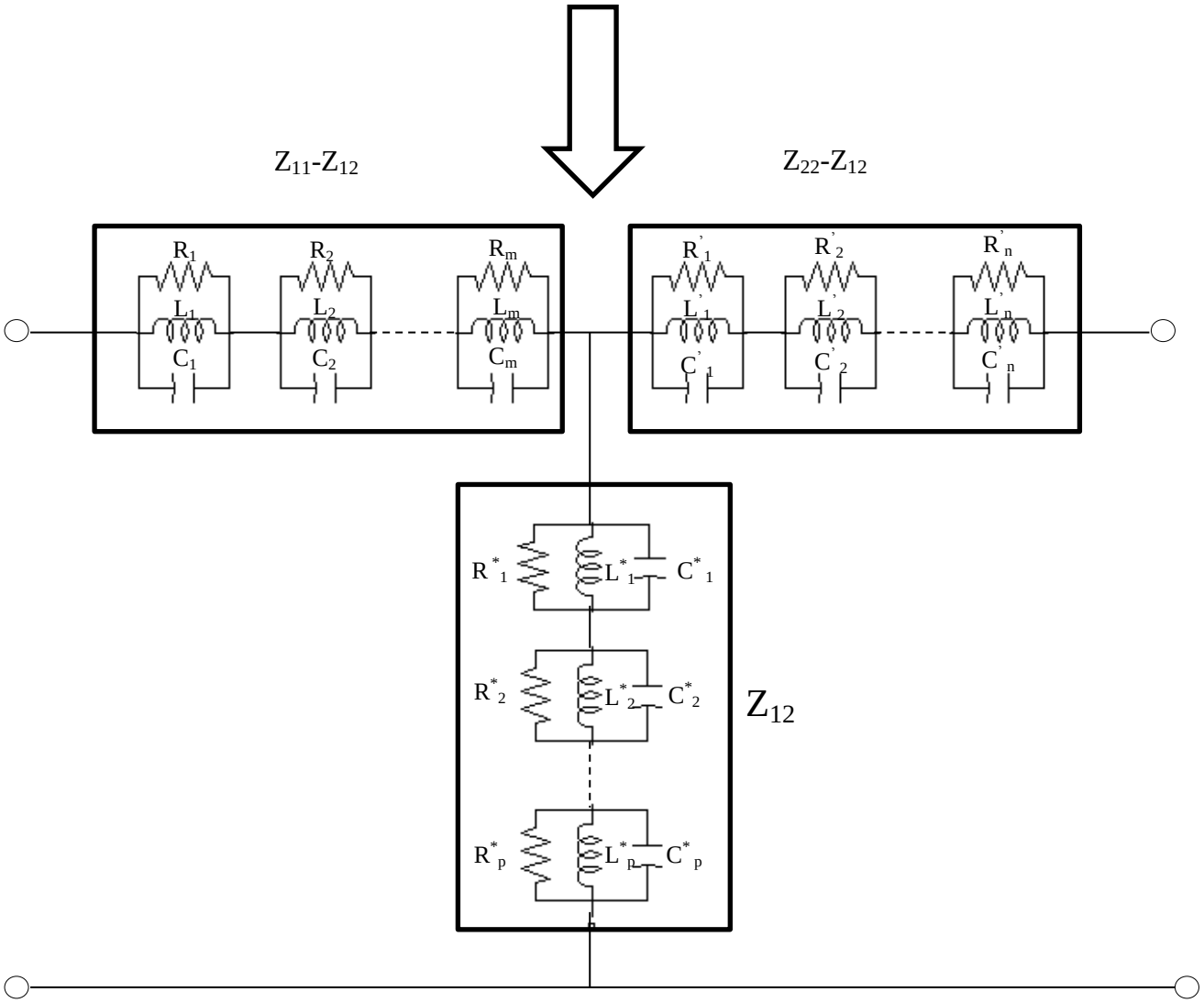


Figure(II.14): Structure de modèle d'un quadripôle.

La figure (II.15) représente les étapes à suivre pour l'obtention du schéma global du modèle en T.

Essai à vide en régime fréquentiele





Figure(II.15): Processus suivi pour obtenir la structure de modèle d'un quadripôle (modèle en T).

Avec n, m et p nombre de pics des impédances $(Z_{11}-Z_{12})$, $(Z_{22}-Z_{12})$ et(Z_{12}) respectivement.

II.9. 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 T. 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 :

Diagnostic des défauts dans le transformateur :Modélisation, Test et Validation

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre le modèle en T d'une colonne d'un transformateur a été validé expérimentalement sur un transformateur de laboratoire de puissance 1kVA, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

L'objectif principal est la détection et la localisation des défauts (court-circuit, ouverture de spires) dans un enroulement de transformateur de puissance par l'observation des écarts enregistrés entre les grandeurs mesurées par rapport à une signature de référence d'un enroulement sain. Une autre approche de diagnostic a été adoptée en utilisant une comparaison entre les paramètres du schéma équivalent à l'enroulement sain et ceux calculés à partir des réponses collectées sur l'enroulement défaillant.

III.2.Objectif général :

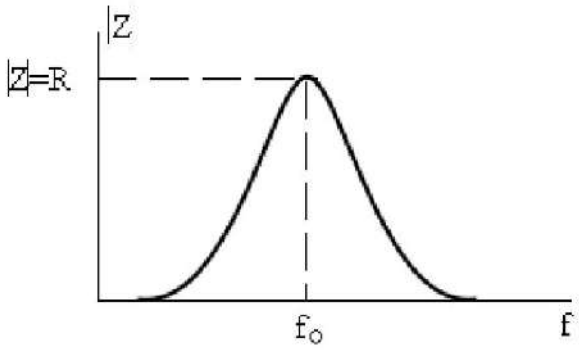
L'objectif de ce travail est de déterminer les paramètres du modèle en T d'une colonne d'un transformateur en HF afin de l'exploiter pour le diagnostic de défaillances dans les enroulements.

III.3.Méthodologie :

Le modèle proposé est basé sur des mesures, en régime haute fréquence, réalisées sur une colonne d'un transformateur triphasé.

La technique consiste à comparer les données obtenues par le procédé de la réponse en fréquence de l'impédance et de celles obtenues par le modèle de la colonne du transformateur.

Des circuits RLC parallèle sont déterminés à partir des pics de résonance correspondant aux différentes fréquences de coupure de la réponse de l'enroulement à une sollicitation haute fréquence fig.III.1. Les cellules RLC parallèle ainsi obtenues, sont arrangées en fonction du nombre de points de résonance de la réponse en fréquence de l'impédance afin d'obtenir un schéma équivalent à l'enroulement test.



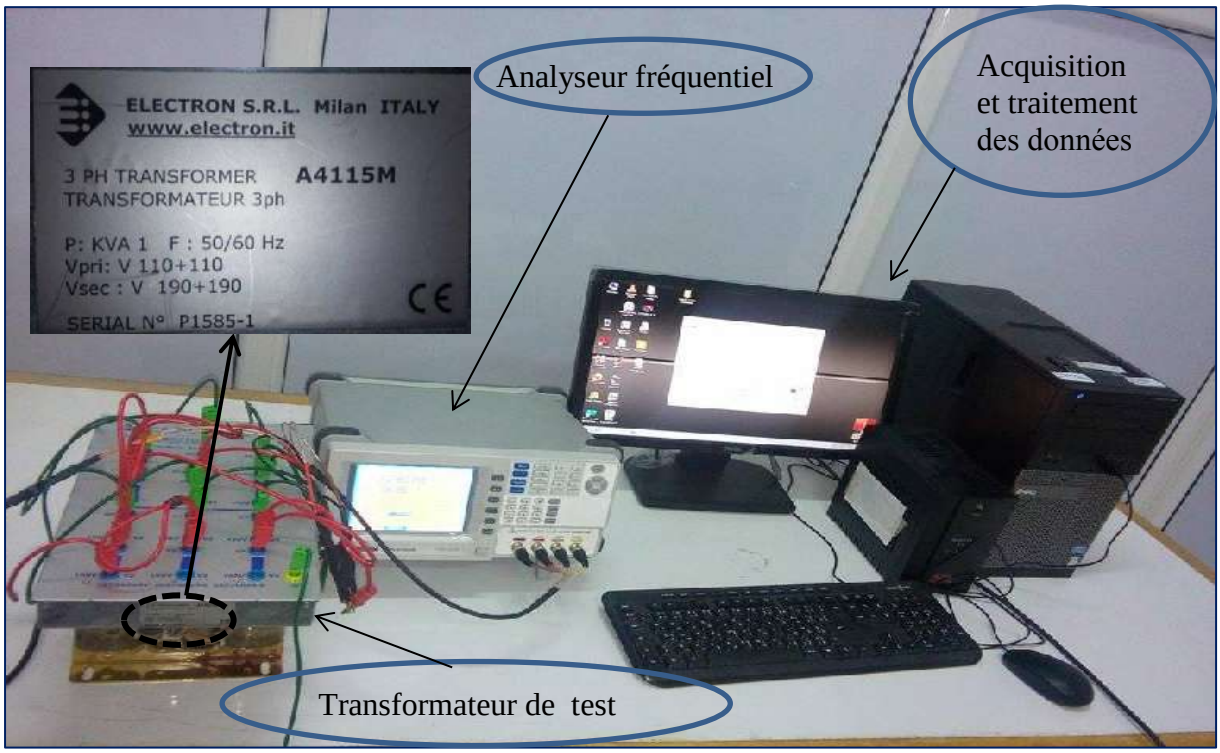
Figure(III.1): Module de comportement de l'impédance d'un circuit RLC parallèle en fonction de la fréquence.

III.4.Essais expérimentaux et calculs des paramètres du modèle :

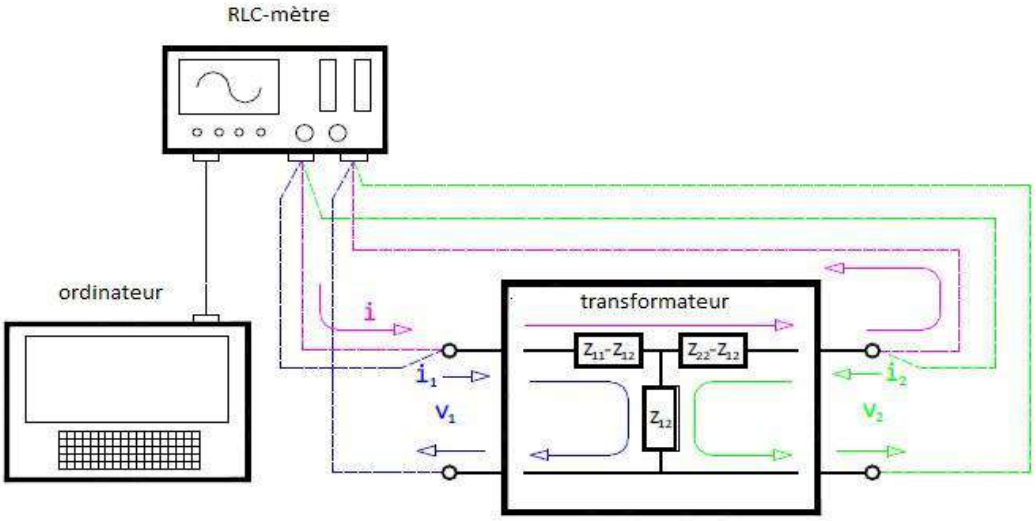
III.4.1.Essais expérimentaux :

Les essais sont effectués sur une colonne d'un transformateur (1kVA, 220/380-50Hz) à vide dans une gamme de fréquences variant de 20Hz à 1MHz. Un analyseur fréquentiel est utilisé pour prélever les données en spectre de fréquences souhaité et transmis à travers le RS232 vers un ordinateur; un logiciel approprié pour le traitement de données.

Les figures (III.2) et (III.3) représentent respectivement le banc d'essai et schéma de montage réalisé afin d'obtenir les différents éléments du modèle en T d'une colonne d'un transformateur.



Figure(III.2): Banc d'essai Expérimental.

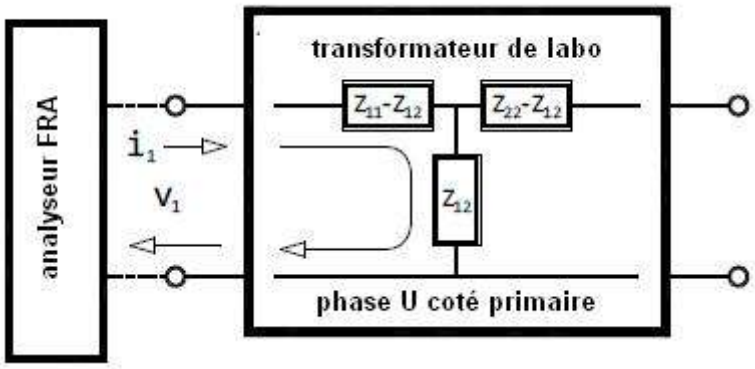


Figure(III.3) : Schéma illustratif des essais pour la détermination des impédances Z_{11}, Z_{22} et Z_{12} à partir des essais en régime fréquentiel.

III.4.1.1.Mesure de l'impédance Z_{11} :

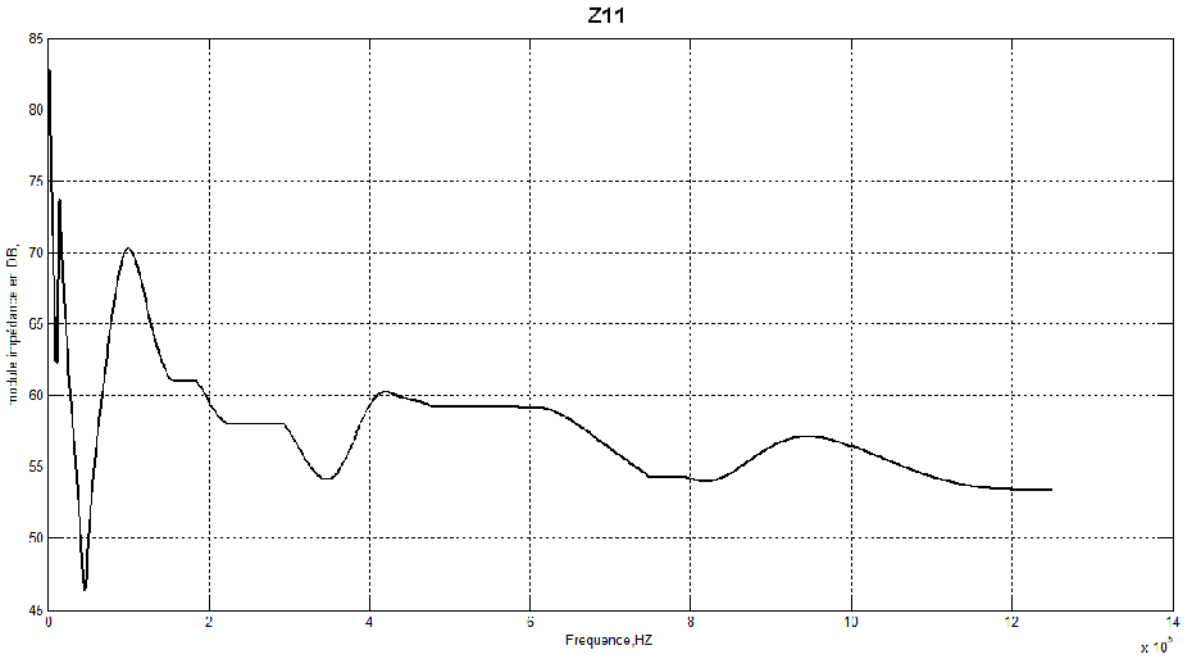
La mesure de l'impudence Z_{11} est effectuée du côté primaire du transformateur à l'aide d'un analyseur de fréquence comme le montre la figure (III.4).

$$\left[\frac{V1}{i1}\right]_{i2=0} = Z_{11} \quad \text{.....(III.1).}$$



Figure(III.4): Mesure d'impédance Z_{11}.

La figure(III.5) représente le module de l'impédance Z_{11} mesurée d'une phase primaire du transformateur triphasé en fonction de la fréquence.

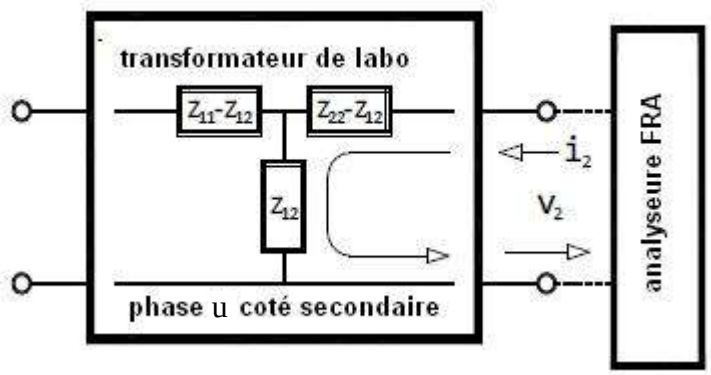


Figure(III.5): Module de l'impédance Z_{11}en fonction de la fréquence.

III.4.1.2.Mesure de l'impédance Z_{22} :

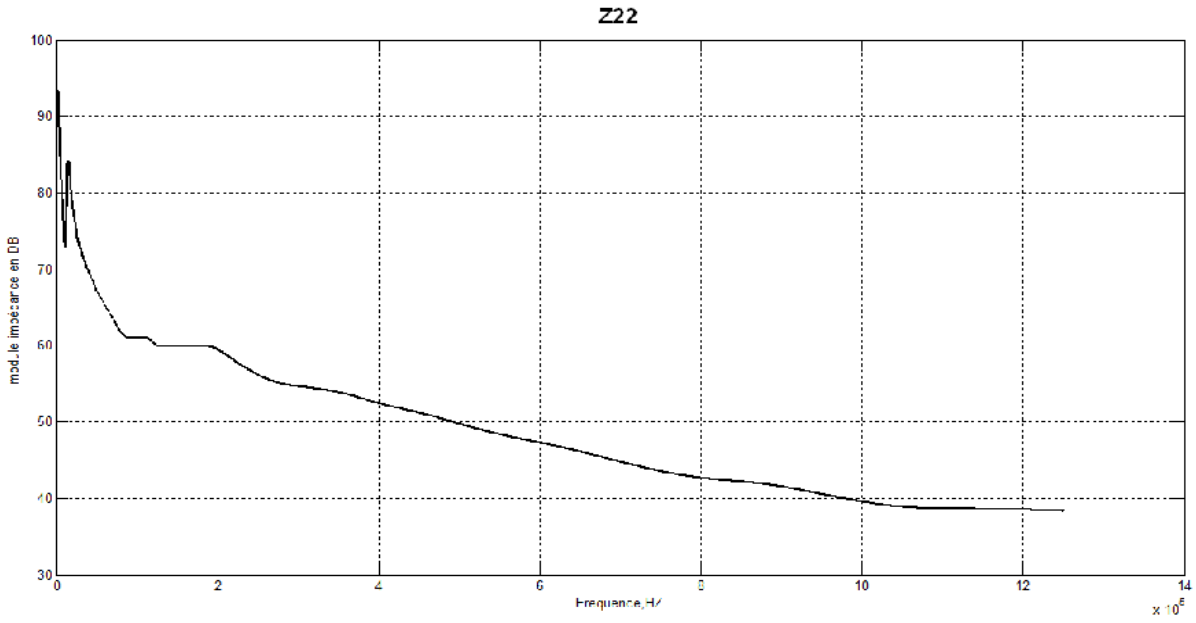
La procédure de la mesure de Z_{22} est similaire que Z_{11}, la seule différence est que l'analyseur FRA est relié du côté secondaire de la même colonne que l'essai précèdent comme illustré sur la Figure (III.6).

$$\left[\frac{V2}{i2}\right]_{i1=0} = Z_{22} \quad \text{.....(III.2)}$$



Figure(III.6) : Mesure d'impédance Z_{22}.

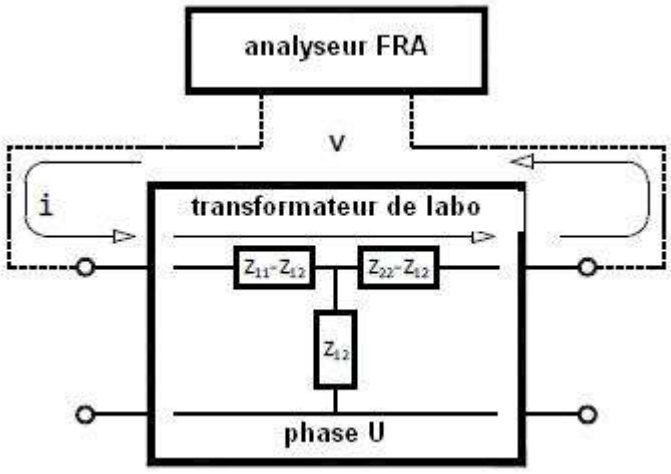
La figure (III.7) représente le module de l'impédance Z_{22} d'une phase secondaire d'un transformateur testé en fonction de la fréquence.



Figure(III.7): Module de l'impédance Z_{22} en fonction de la fréquence.

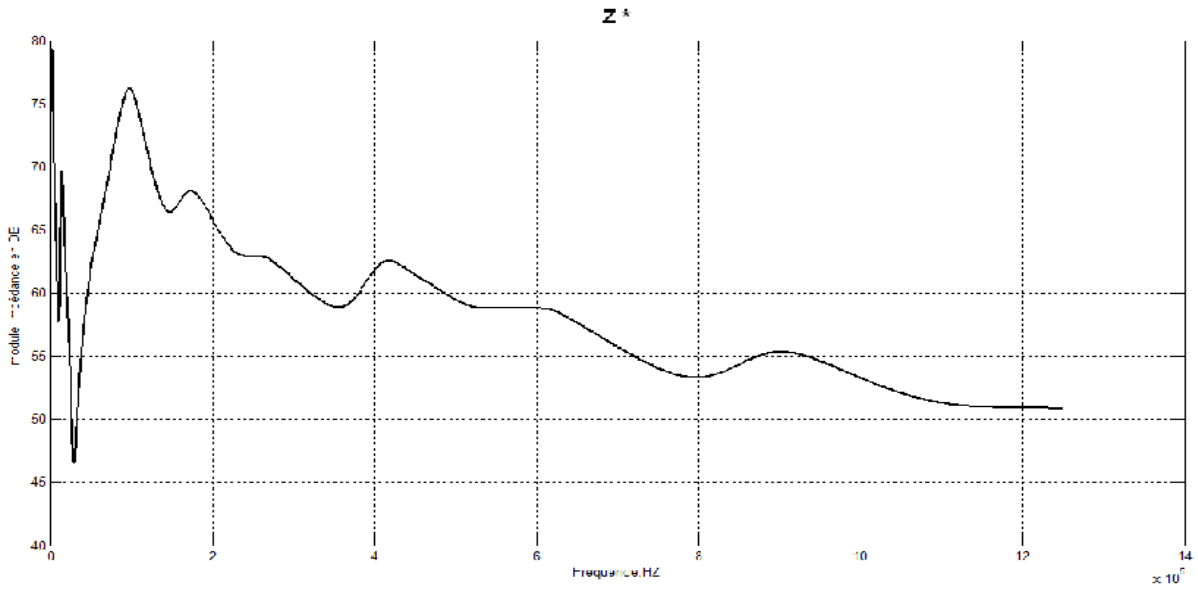
III.4.1.3.Mesure de l'impédance Z* :

Dans ce cas, l'analyseur fréquentiel est connecté entre les bornes du primaire et du secondaire de la même colonne du transformateur que les essais précédents tel illustré dans la figure(III.8).



Figure(III.8) : Mesure de l'impédance Z*.

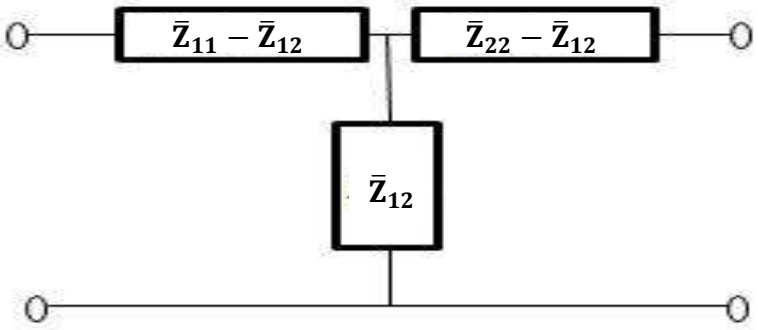
La figure(III.9) représente le module de l'impédance Z^* du transformateur testé en fonction de la fréquence.



Figure(III.9) : Module de l'impédance Z* en fonction de la fréquence.

III.4.2.Calcul des paramètres du modèle en T :

Les mesures effectuées précédemment sont nécessaires pour obtenir les paramètres de schéma équivalent en T d'une colonne d'un transformateur triphasé figure(III.10).

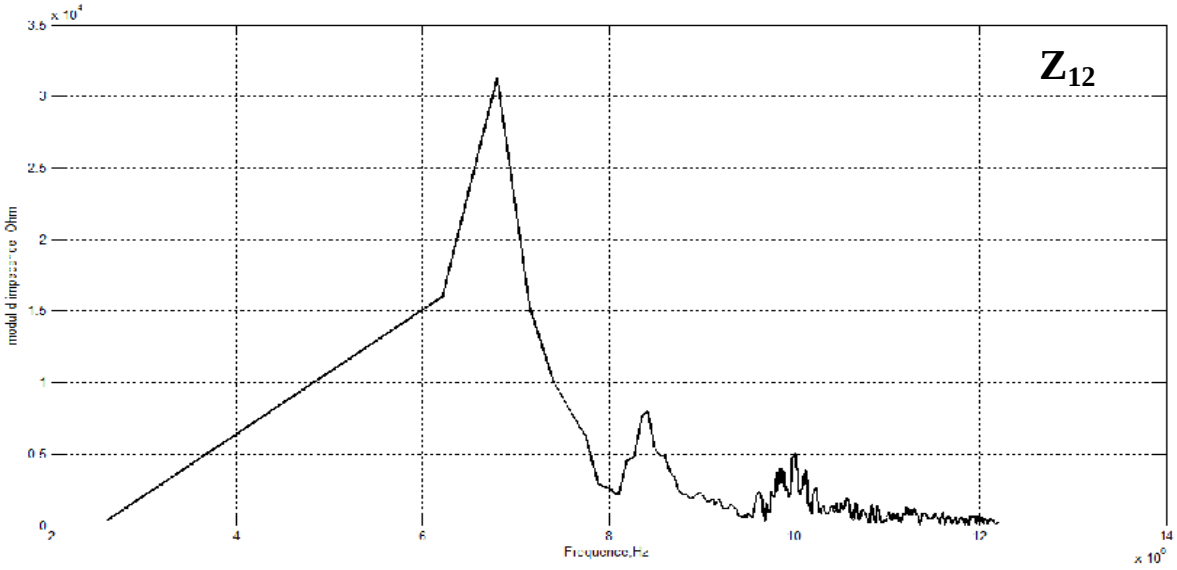


Figure(III.10) : Schéma équivalent d'un transformateur.

L'impédance Z_{12} est obtenue conformément à la relation (III.3).

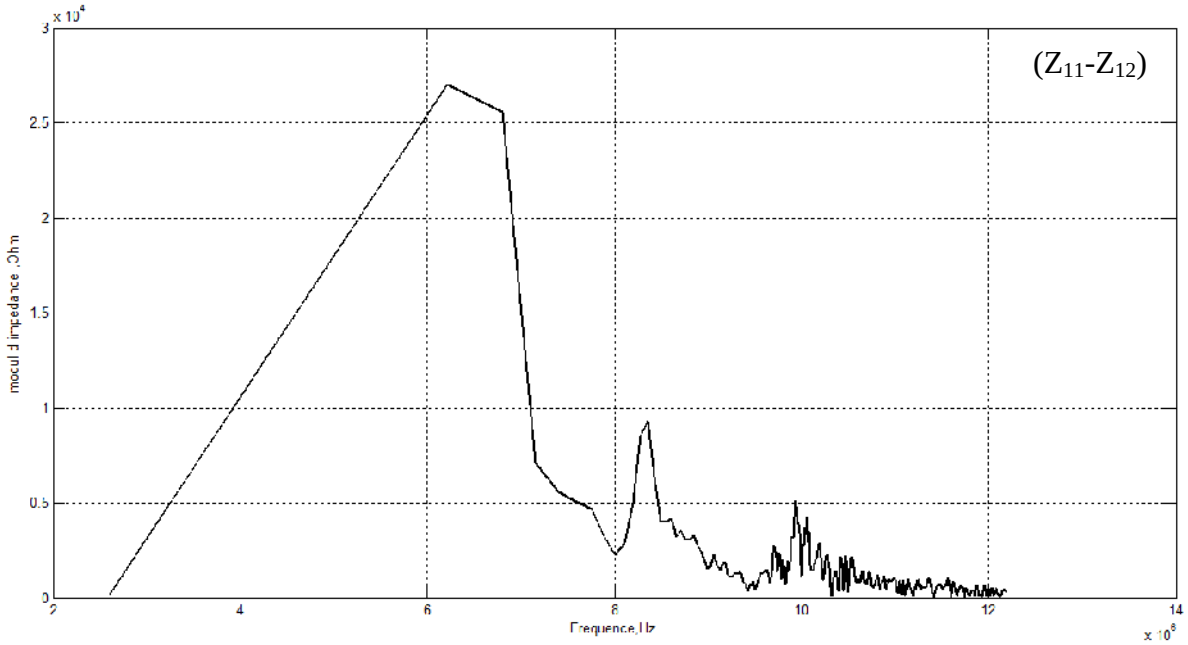
$$\bar{Z}_{12} = \frac{\bar{Z}^* - \bar{Z}_{11} - \bar{Z}_{22}}{-2} \quad \text{.....(III.3).}$$

La figure (III.11) représente le module de l'impédance Z_{12} en fonction de la fréquence calculé à partir de la relation(III.3).

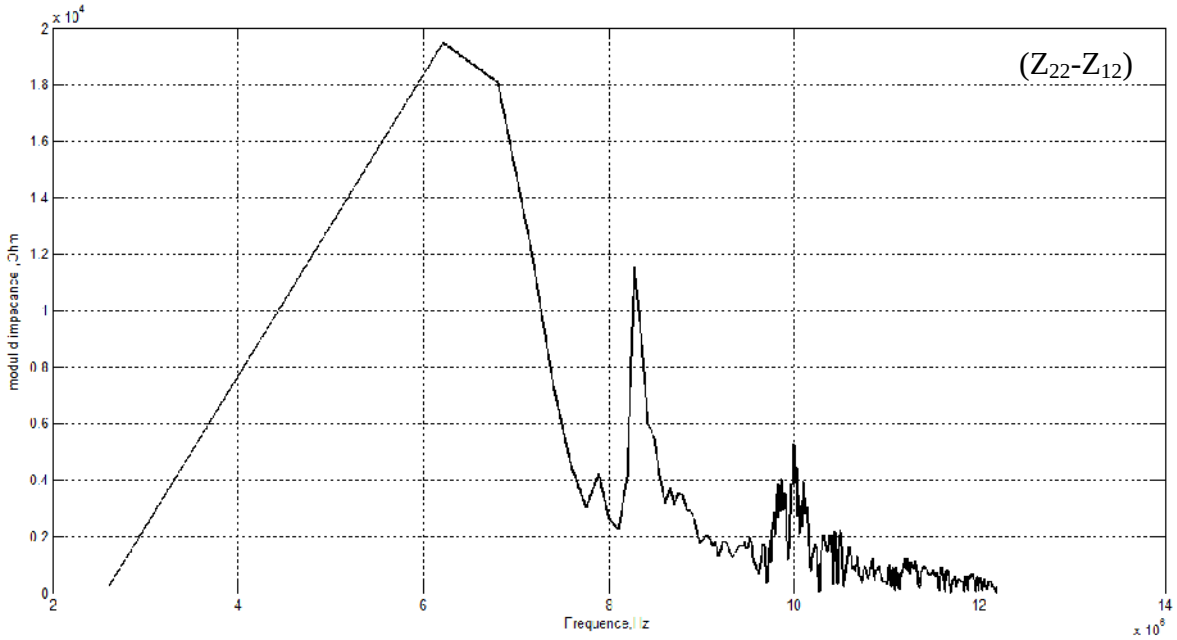


Figure(III.11) : Module d'impédance Z_{12} en fonction de la fréquence.

Les figures(III.12) et (III.13)**,** représentent respectivement les modules des impédances Z_{11}-Z_{12} et Z_{22}-Z_{12} en fonction de la fréquence.



Figure(III.12) : Module d'impédance (Z_{11}- Z_{12}) en fonction de la fréquence.



Figure(III.13) : Module de l'impédance (Z_{22}- Z_{12}) en fonction de la fréquence.

Après avoir obtenu les différentes impédances qui constituent les paramètres du modèle en T d'une colonne d'un transformateur, l'analyse de ces dernières, permet de calculer le modèle en cascade de cellules RLC de chacune de ces impédances et par conséquent du modèle en T du transformateur.

L'analyse est basée sur la détection des fréquences de résonance sur la courbe de l'impédance en fonction de la fréquence où chaque fréquence de résonance peut être représentée par une cellule RLC parallèle. Ainsi les courbes obtenues avec des profils simples pour la synthèse des circuits RLC constituant le modèle global (voir le tableau.1),

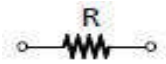
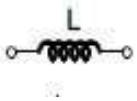
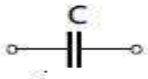
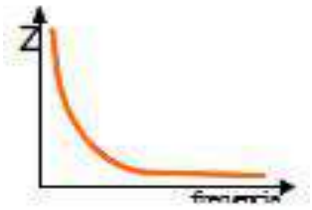
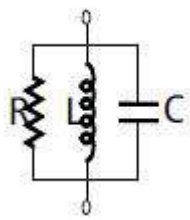
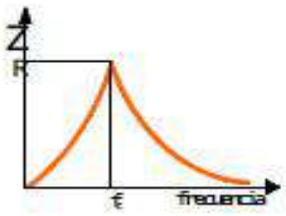
N°	Symbole	Impédance	Graphe (z-f)
1		$Z = R$ $\varphi = 0$	
2		$Z = X_L = \omega L = 2\pi f L$ $\varphi = -90°$	
3		$Z = X_c = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi f c}$ $\varphi = +90°$	
11		$(\frac{1}{Z})^2 = (\frac{1}{Z})^2 + (\frac{1}{\omega L} - \omega c)^2$ $Y^2 = G^2 + (B_L + B_C)^2$ $\omega = artg\frac{R(1-\omega LC)}{\omega L}$	

Tableau (III.1) : Circuit RLC synthétisé à partir d'une réponse fréquentielle.

Les figures (III.14), (III.15) et (III.16) représentent un exemple de synthèse du schéma RLC correspondant une réponse fréquentielle.

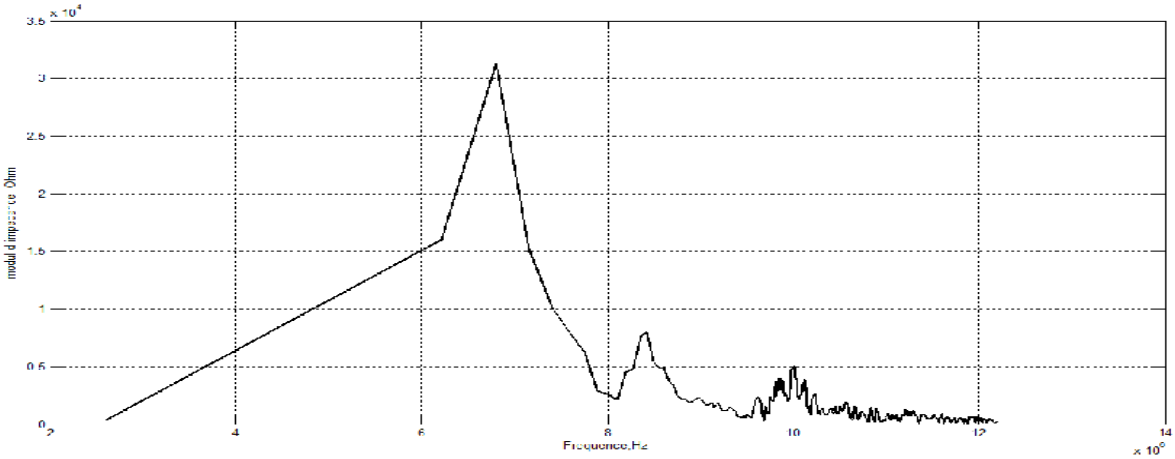


Figure (III.14) : Module d impédance Z_{12} mesurée en fonction de la fréquence.

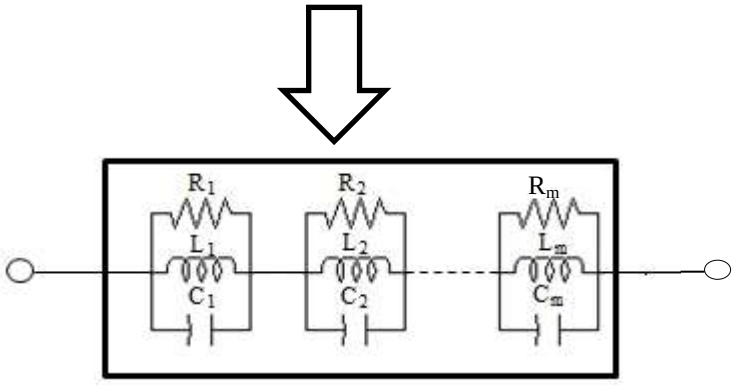
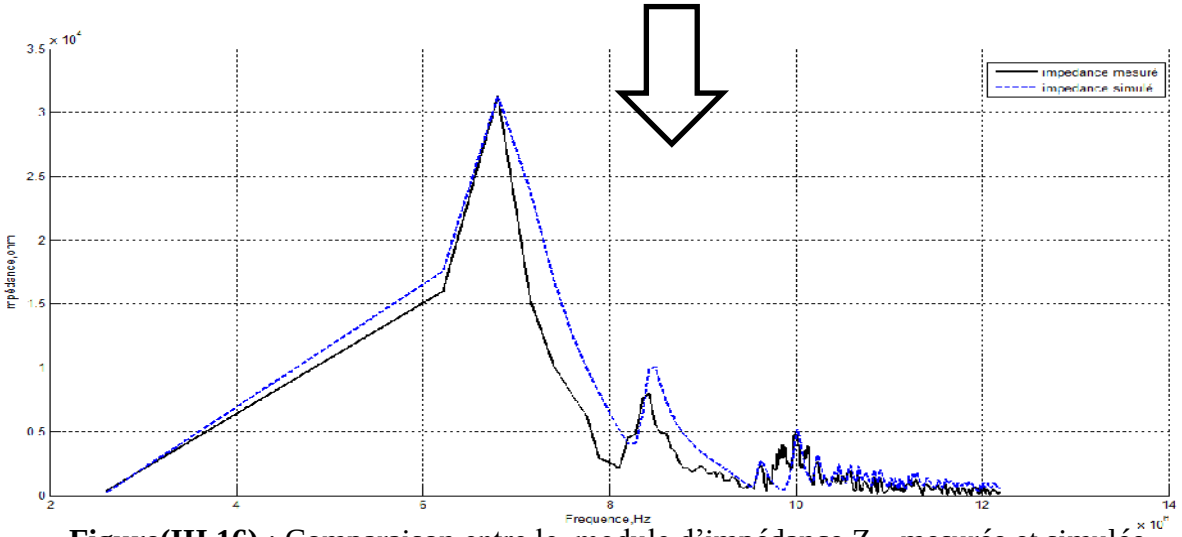
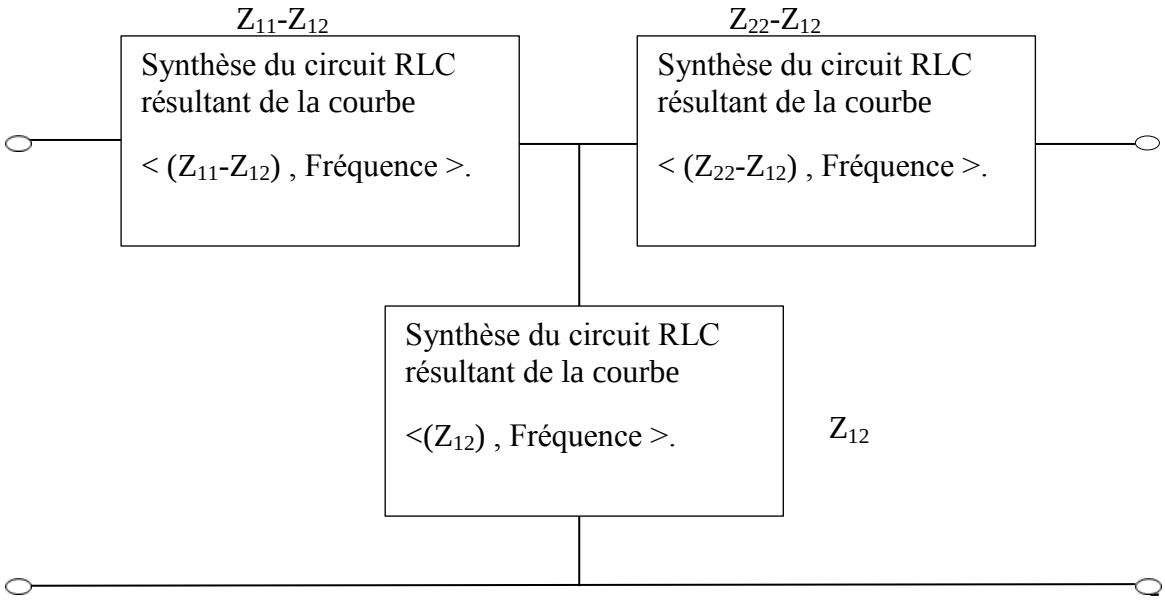


Figure (III.15) : Synthèse du circuit RLC à partir de réponse fréquentielle de l'impédance.



Figure(III.16) : Comparaison entre le module d'impédance Z_{12} mesurée et simulée.

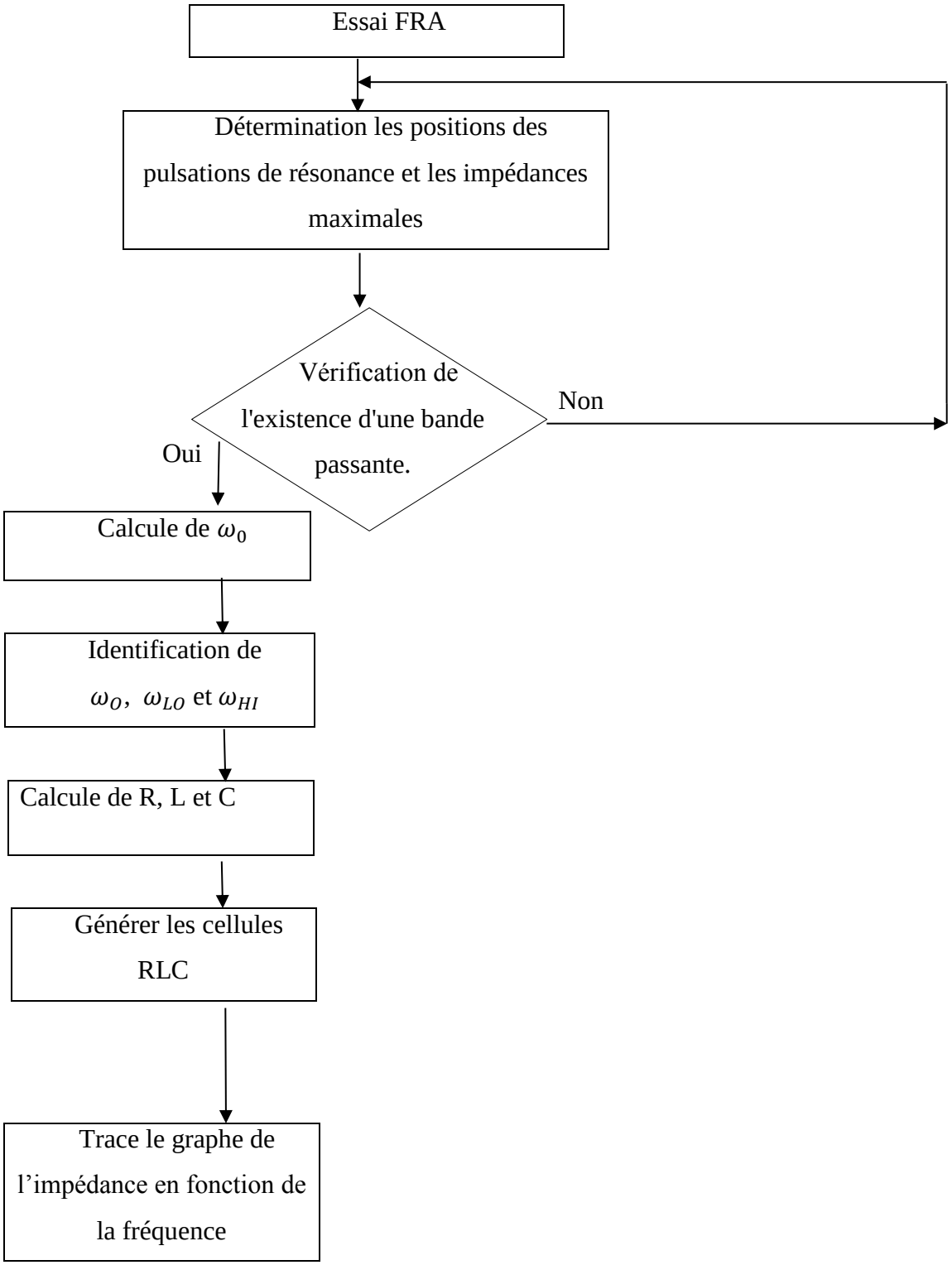
Une fois l'analyse des trois impédances effectuée, on obtient ainsi le modèle en T d'une colonne d'un transformateur dont chaque impédance est constituée d'une cascade de cellules RLC parallèle figure (III.17).



Figure(III.17): Structure du modèle en T.

III.4.2.1.Synthèse du schéma équivalent RLC et calcul de ses paramètres :

La détermination des paramètres RLC du modèle en T est conforme à l'organigramme suivant.



Figure(III.18) : Représente le modèle en T trouvé suivante les étapes ci-dessous.[20]

1-Effectuer un essai à vide (test FRA) sur une large gamme de fréquence, afin d'obtenir les impédances Z_{11}, Z* et Z_{22}.

2-Le calcul des impédances Z_{12}, Z11-Z_{12} et Z_{22}-Z_{12} du modèle en T équivalent dans large gamme de fréquence.

3-Analyser chaque graphe séparément en termes de forme et synthétiser le réseau des circuits RLC.

4-Connecter chacun des réseaux des circuits RLC d'une manière ordonnée pour obtenir le modèle en T désiré.

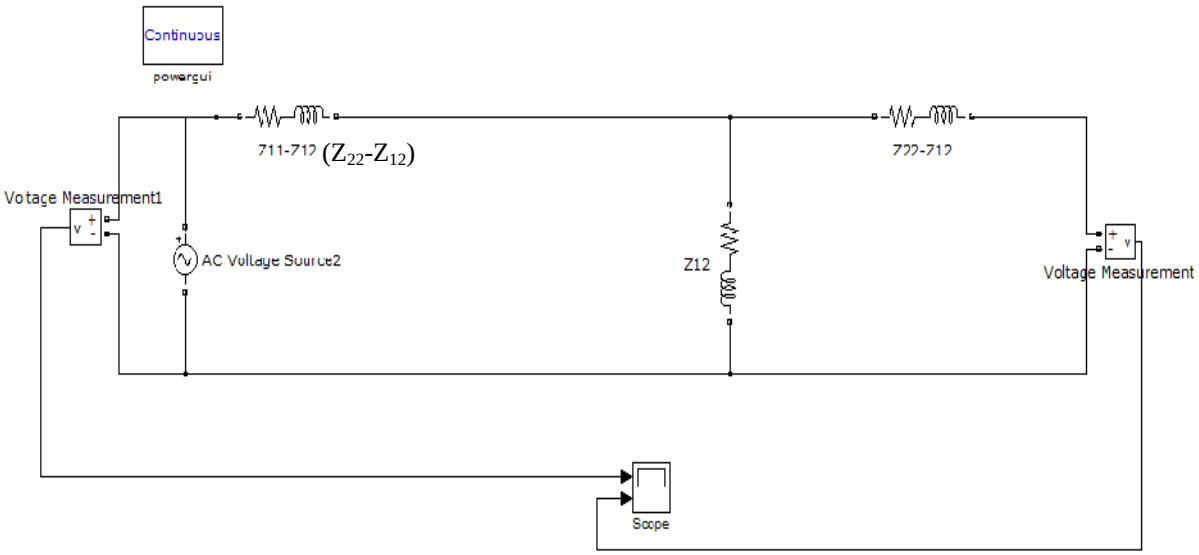
III.5.Validation du modèle en T d'une colonne du transformateur :

III.5.1.Validation à la fréquence de fonctionnement nominal (50Hz) :

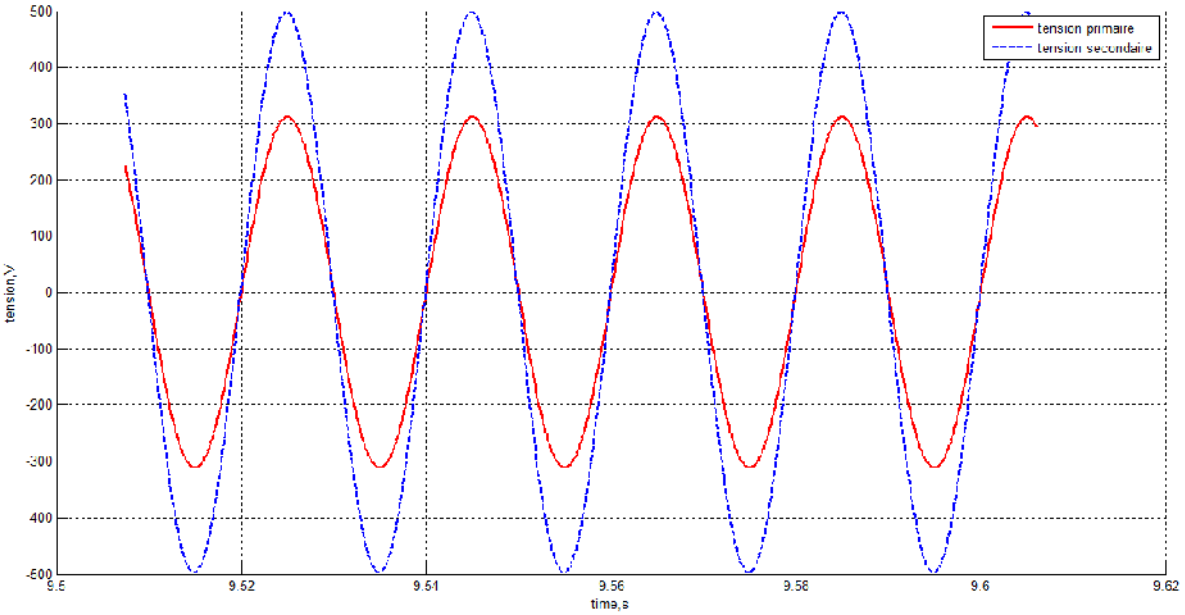
Après avoir calculé les paramètres du modèle en T, une validation est avérée nécessaire pour cela un prélèvement d'impédance à 50Hz a été effectué.

Un calcul d'impédance équivalente du modèle en T a été réalisé comme illustré sur la figure (III.19) les résultats obtenus sont représentés par la figure (III.20).

En alimentant le côté primaire sous une tension 220V efficace, on a obtenu une tension 380V au secondaire conformément à la plaque signalétique du transformateur testé.



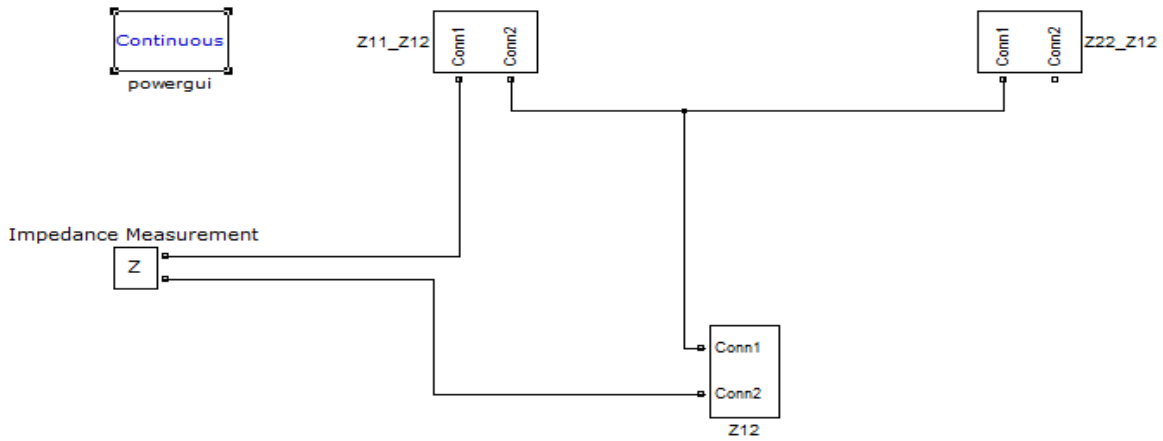
Figure(III.19): Validation du modèle d'un transformateur à 50 HZ.



Figure(III.20): Validation du modèle en T à 50Hz.

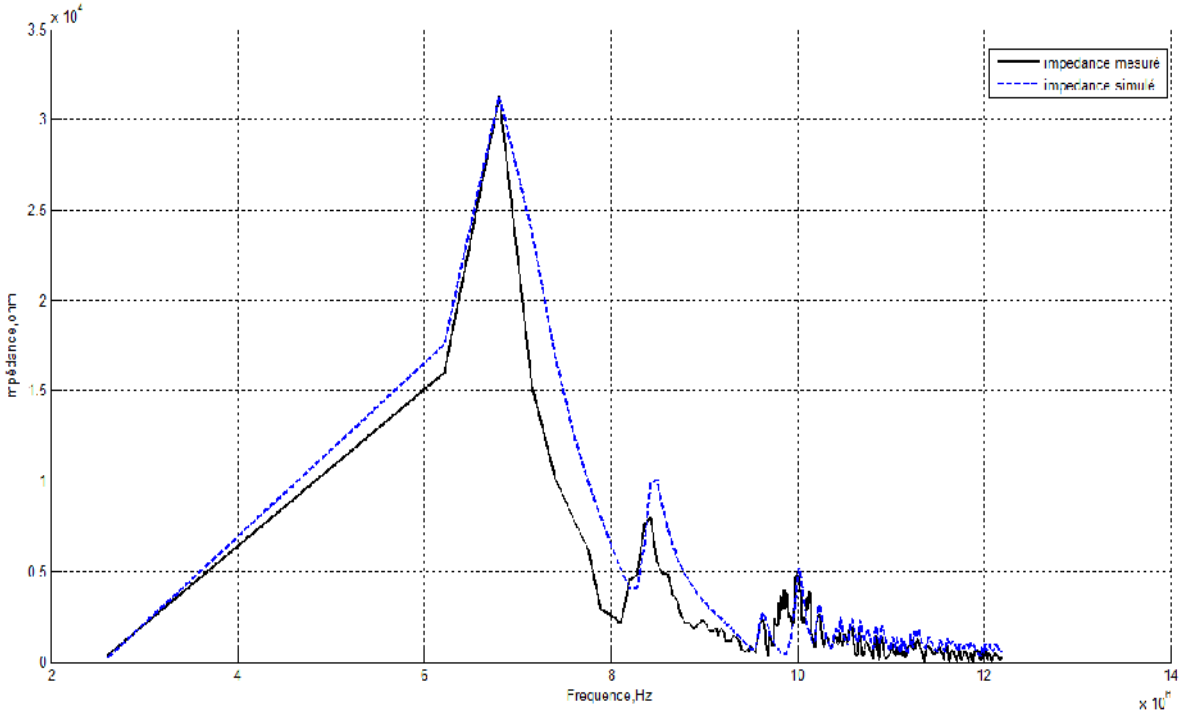
III.5.2.Validation du modèle en haute fréquence :

La représentation globale sur une large gamme de fréquences du modèle en T a été effectuée selon la méthodologie expliquée précédemment, la figure (III.21) représente le schéma correspondant du modèle synthétisé.



Figure(III.21): Validation du modèle du transformateur à haute fréquence.

La figure (III.22) représente une comparaison entre la réponse mesurée et simulée de l'impudence Z_{12} du modèle en T du transformateur.



Figure(III.22): Comparaison de l'impédance Z_{12} mesurée et celle issue du schéma équivalent RLC.

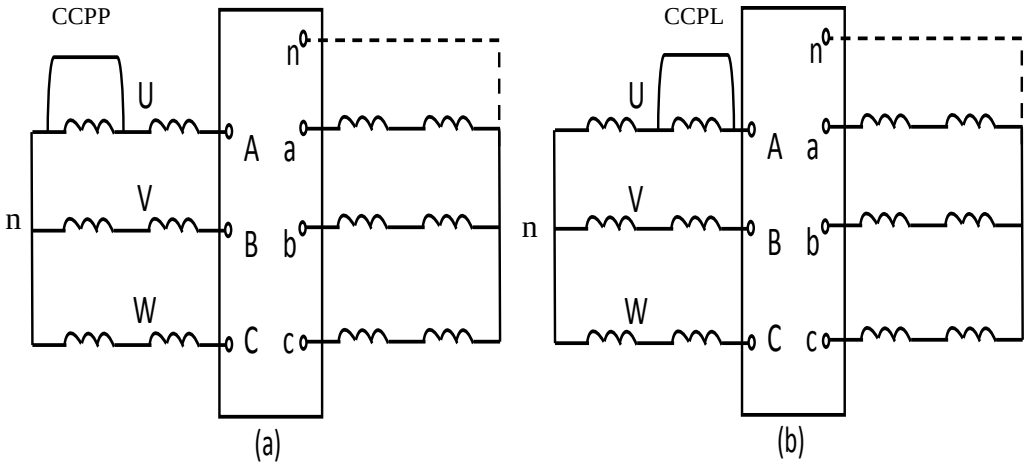
Comme on voit, les résultats obtenus par la mesure sont concordant avec ceux obtenus par simulation.

III.6.Localisation et détection des défauts dans un enroulement du transformateur :

Après avoir validé le modèle en T par une comparaison entre les signatures simulées et mesurées, on procède dans ce qui suit à l'exploitation du modèle pour le diagnostic de défaillances dans les enroulements du transformateur.

III.6.1.Court-circuit entre spires du primaire :

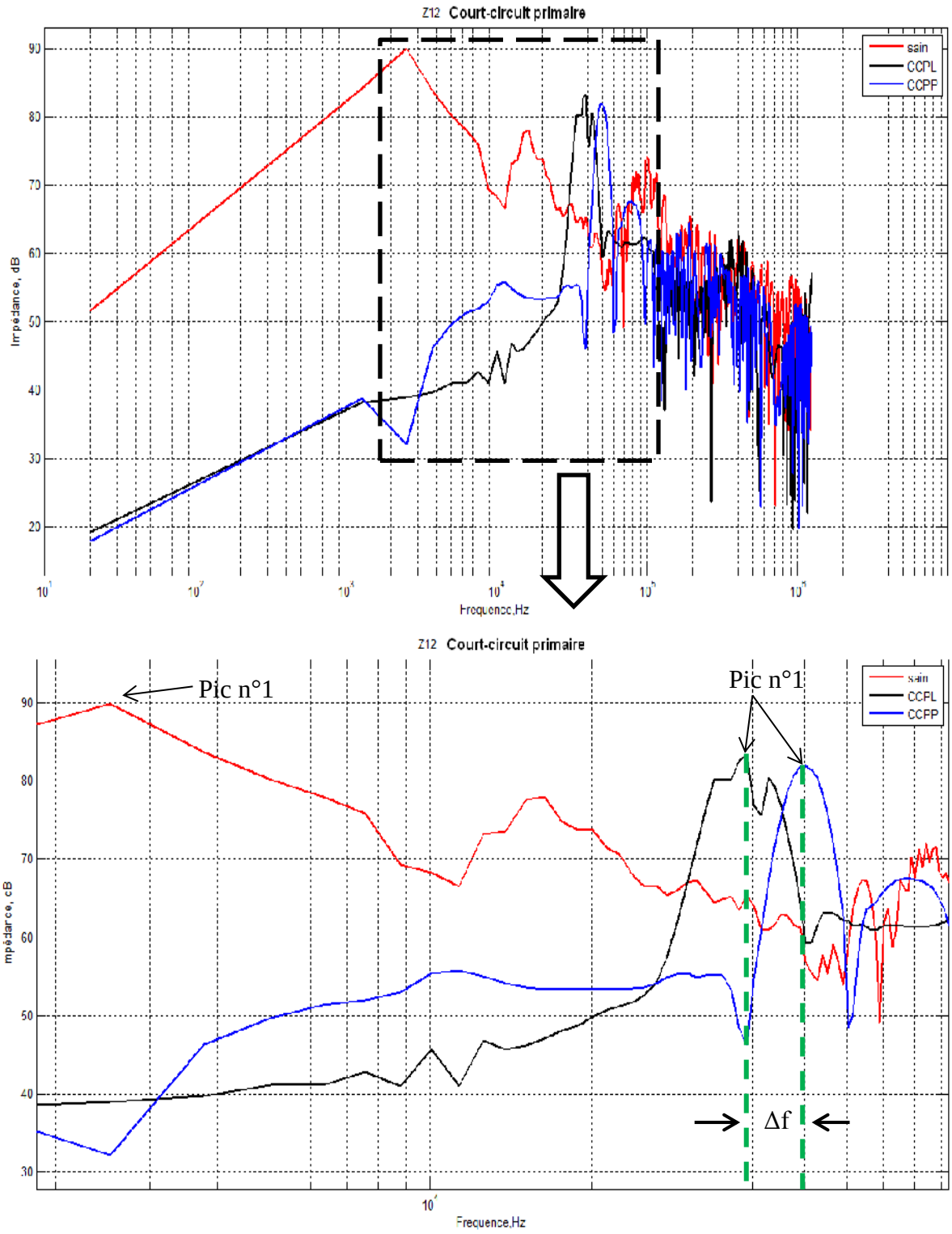
Des court-circuits sont réalisés sur les demies bobines primaires, proche et loin du neutre comme montré par la figure (III.23).



Figure(III.23) : Défaut de court-circuit primaire proche du neutre(CCPP) et loin du neutre(CCPL) réalisé sur la phase U du transformateur.

III.6.1.1.Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut de court-circuit primaire :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts de court-circuit réalisés sur le primaire du transformateur proche et loin du neutre est illustrée sur la figure (III.24).



Figure(III.24) : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit dans primaire et un enroulement sain.

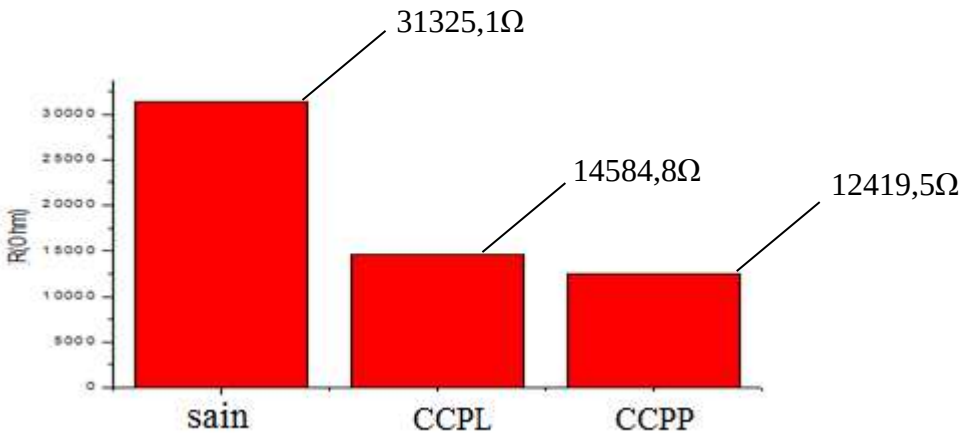
D'après la figure (III.24), on a constaté :

Une apparition d'une impédance minimale dans les basses fréquences pour les deux réponses relatives aux enroulements présentant un court-circuit comparativement à l'enroulement sain, ce qui nous permet de lier l'atténuation de l'impédance dans les basses fréquences à l'existence d'un défaut de court-circuit dans l'enroulement testé.

On a remarqué un décalage en fréquence vers la droite de première pic de résonance dans le cas des défauts de court-circuit primaire, et un décalage de l'ordre de $\Delta f=10^4 Hz$ vers la droite de la première résonance dans le cas de court-circuit proche du neutre par rapport court-circuit loin du neutre.

III.6.1.2.Comparaison des paramètres de circuit RLC en cas de défaut court-circuit primaire:

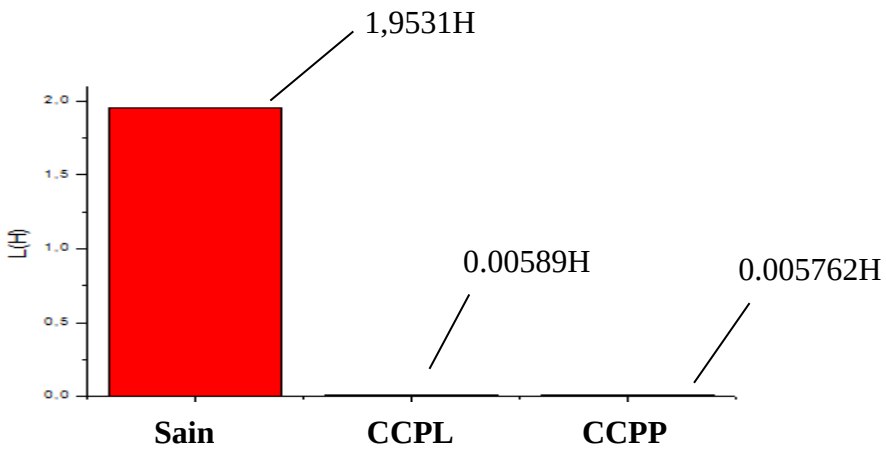
Le calcul des paramètres de circuit RLC relatif à la première résonance des trois impédances relatives à l'enroulement sain ,l'enroulement présentant un court-circuit proche du neutre et court-circuit loin du neutre, nous a permis de relever certaines remarques permettant de différencier entre les deux types des défauts injectés comme le montre les figures(III.25),(III.26).



Figure(III.25) : Comparaison des résistances au pic N°01 en cas de court-circuit primaire loin et proche du neutre par rapport au l'enroulement sain.

La figure (III.25) représente la comparaison entre les valeurs des résistances du modèle en T d'un enroulement sain et ceux des défauts de court-circuit primaire de la première résonance.

On remarque 'il y a une diminution de résistance dans le cas de défaut de court-circuit primaire, ainsi que, la résistance correspondant à la première résonance dans le cas d'un court-circuit entre spires primaire loin du neutre est supérieur à celle calculée dans le cas d'un court-circuit proche du neutre.



Figure(III.26) : Comparaison des inductances au pic N°01 en cas de court-circuit primaire loin du neutre(CCPL) et proche du neutre (CCPP) par rapport au l'enroulement sain.

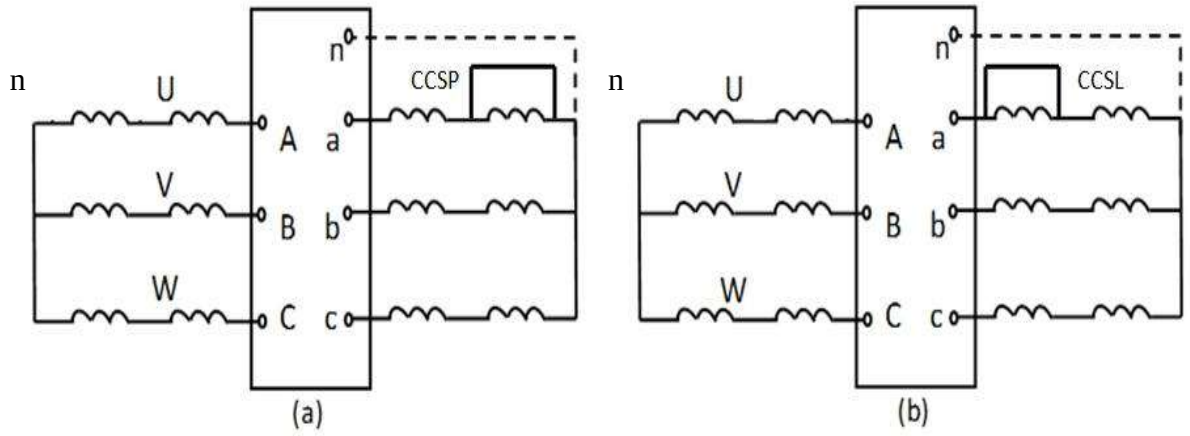
La figure (III.26) représente la comparaison entre les valeurs des inductances du modèle en T d'un enroulement sain et ceux des défauts de court-circuit primaire de la première résonance.

D'après la figure (III.26) la valeur de l'inductance a tendance à diminuer comparant celles calculées dans cas d'un enroulement sain et celle calculées dans cas de court-circuit.

Comme on l'a déjà constaté pour la résistance, l'inductance correspondant au la première résonance est important dans le cas du défaut court-circuit loin du neutre par rapport à celle calculée pour cas de court-circuit proche du neutre.

III.6.2.Court-circuit entre spires au secondaire :

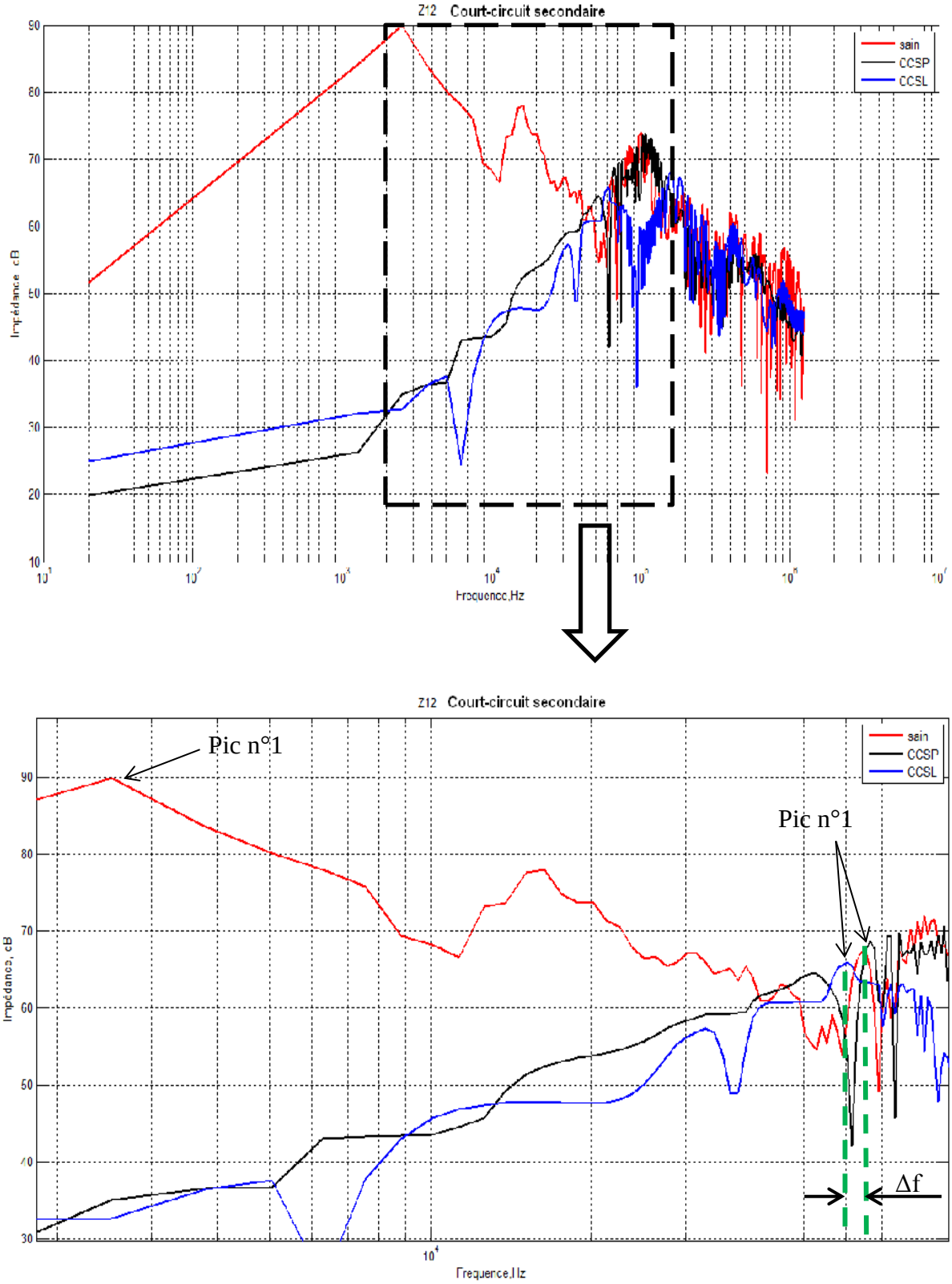
Des court-circuits sont réalisés sur les demi-bobines secondaires, proche et loin du neutre tel illustrée par la figure (III.27).



Figure(III.27) : Défaut de court-circuit secondaire proche du neutre(CCSP) et loin du neutre(CCSL) réalisé sur la phase U du transformateur.

III.6.2.1.Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut de court-circuit secondaire :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts de court-circuit réalisés sur le secondaire du transformateur proche et loin du neutre est illustrée sur la figure (III.28).



Figure(III.28) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit secondaire proche et loin du neutre et un enroulement sain.

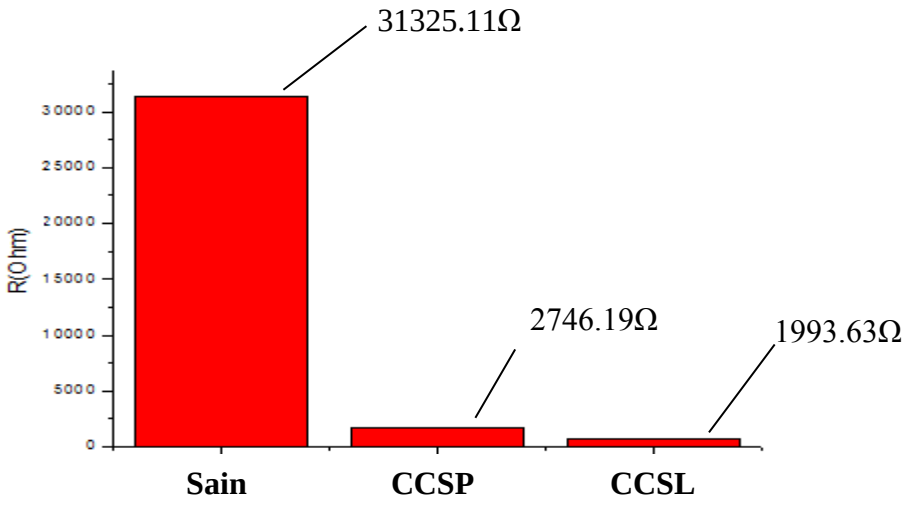
De la même manier que dans le cas des court-circuits primaires, on a constaté :

Une apparition d'une impédance minimale dans les basses fréquences pour les deux réponses relatives aux enroulements présentant un court-circuit secondaire comparativement à l'enroulement sain.

Un décalage de la fréquence de la première gamme en cas des court-circuits au côté secondaire par rapport à l'enroulement sain, et décalage vers la droit de l'ordre de Δf=6400Hz de la fréquence de première pic dans le cas court-circuit secondaire proche du neutre par rapport au cas de court-circuit secondaire loin du neutre.

III.6.2.2.Comparaison des paramètres de circuit RLC en cas du défaut de court-circuit secondaire :

Le calcul des paramètres de circuit RLC relatif à la première résonance des trois impédances relatives à l'enroulement secondaire sain, l'enroulement présentant un court-circuit proche du neutre et court-circuit loin du neutre ,nous a permis de relever certaines remarques permettant de faire la distinction entre les deux types des défauts injectés comme le montre les figures(III.29),(III.30)et(III.31) .

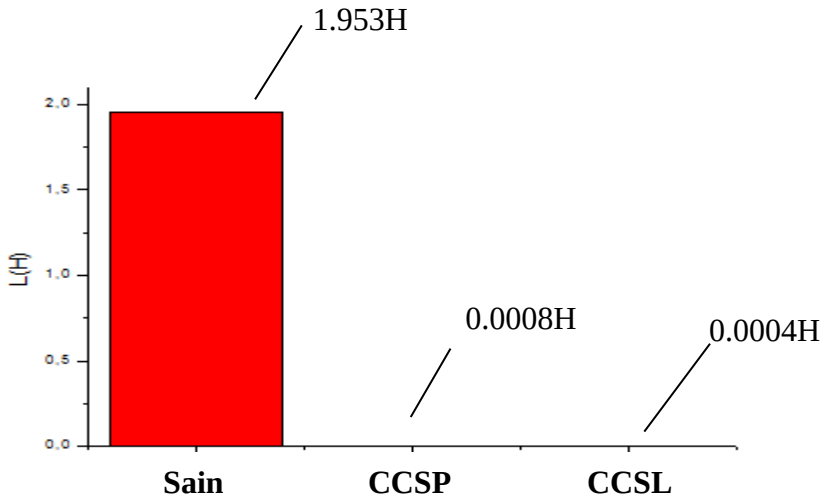


Figure(III.29) : Comparaison des résistances au pic N° 01 en cas de court-circuit secondaire loin du neutre (CCLS) et proche du neutre (CCSP) par rapport au sain.

La figure (III.29) représente la comparaison entre les valeurs des résistances du modèle en T d'un enroulement sain et celles des défauts de court-circuit secondaire de la première fréquence de résonance.

Une diminution de la valeur de la résistance relative au premier pic est constatée entre l'enroulement sain et l'enroulement présentant un court-circuit.

La valeur de résistance calculée pour cas d'un court-circuit secondaire proche du neutre est supérieure à celle déterminée pour cas d'un court-circuit secondaire loin du neutre.

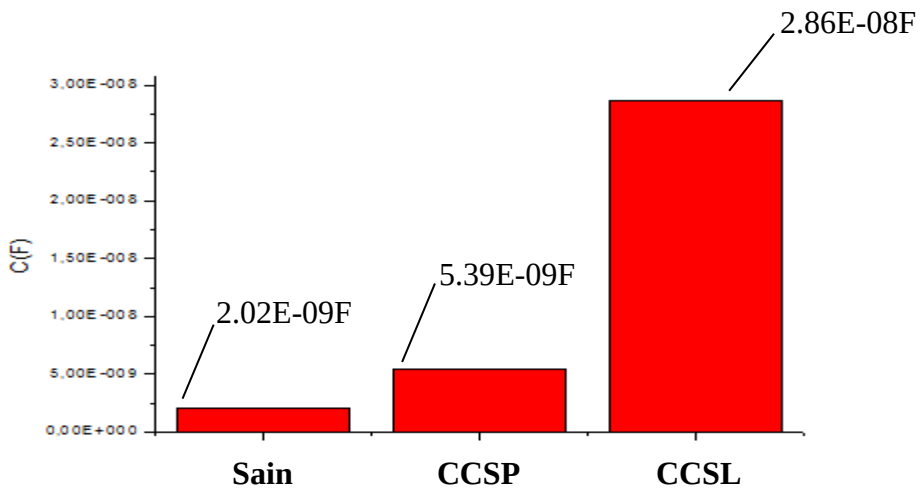


Figure(III.30) : Comparaison des inductions au pic N°01 en cas de court-circuit secondaire loin du neutre (CCSL) et proche du neutre(CCSL) par rapport au sain.

La figure (III.30) représente la comparaison entre les valeurs des inductances du modèle en T d'un enroulement sain et celles des défauts de court-circuit secondaire de la première fréquence de résonance.

D'après la figure (III.30) la valeur de l'inductance a tendance à diminuer comparant celles calculées dans cas d'un enroulement sain et celle calculées dans cas de court-circuit.

Comme on l'a déjà constaté pour la résistance, l'inductance correspondant à la première résonance est importante dans le cas du défaut court-circuit secondaire proche du neutre par rapport à celle calculée pour cas de court-circuit secondaire loin du neutre.



Figure(III.31) : Comparaison des capacités au pic N°01 en cas de court-circuit secondaire loin du neutre(CCSL) et proche du neutre(CCSP) par rapport au sain.

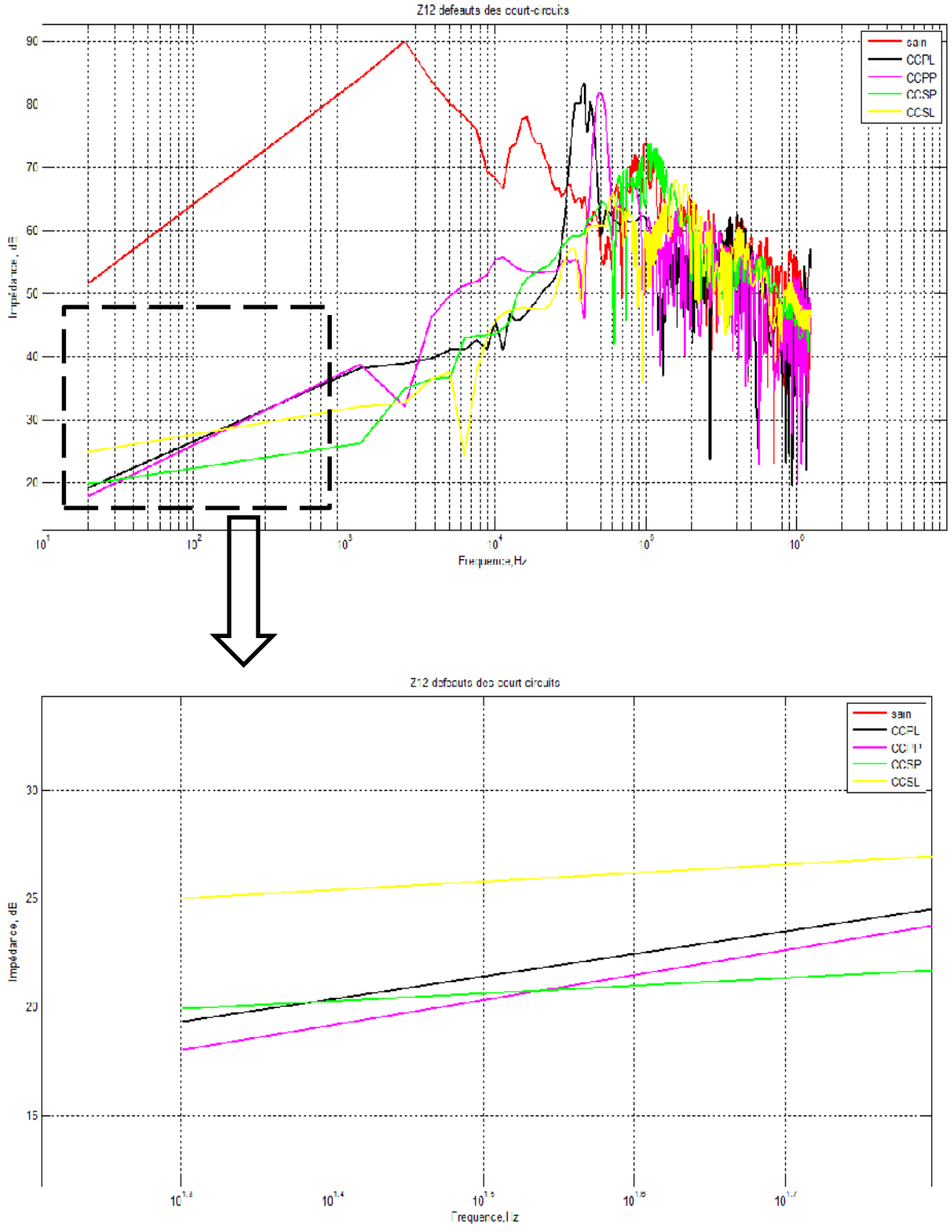
La figure (III.31) représente la comparaison entre les valeurs des capacités du modèle en T d'un enroulement sain et celles des défauts de court-circuit secondaire de la première résonance.

On remarque il y a une augmentation de capacité dans le cas du défaut de court-circuit secondaire.

La capacité calculée dans le cas du court-circuit secondaire loin du neutre est supérieure à celle calculée dans le cas du court-circuit secondaire proche du neutre.

III.6.3.Comparaison des réponses fréquentielles des court-circuits primaires et secondaires :

La figure (III.32) illustre la comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts de court-circuit réalisé sur le primaire et le secondaire du transformateur proche et loin du neutre.



Figure(III.32) : Comparaison de la réponse en fréquence, entre un enroulement présentant des défauts de court-circuit, primaire et secondaire (proche et loin) du neutre et un enroulement sain.

D'après la figure (III.32), on peut facilement distinguer les défauts de court-circuit réalisés au primaire par rapport à ceux réalisés au secondaire, et ceci par l'intermédiaire de l'impédance en registrée en basse fréquences, les court-circuits de côté secondaire présentent une impédance plus importante par rapport à celle des court-circuits de côté primaire.

.III.6.4.Ouverture de spires au primaire et secondaire :

Les défauts d'Ouverture de spires sont réalisés sur les demi-bobines, primaire et secondaire comme le montre la figure (III.33)**.**

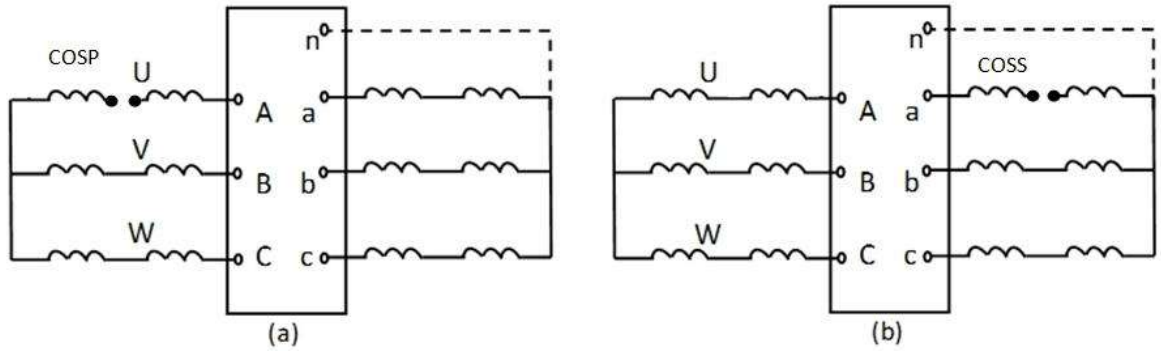
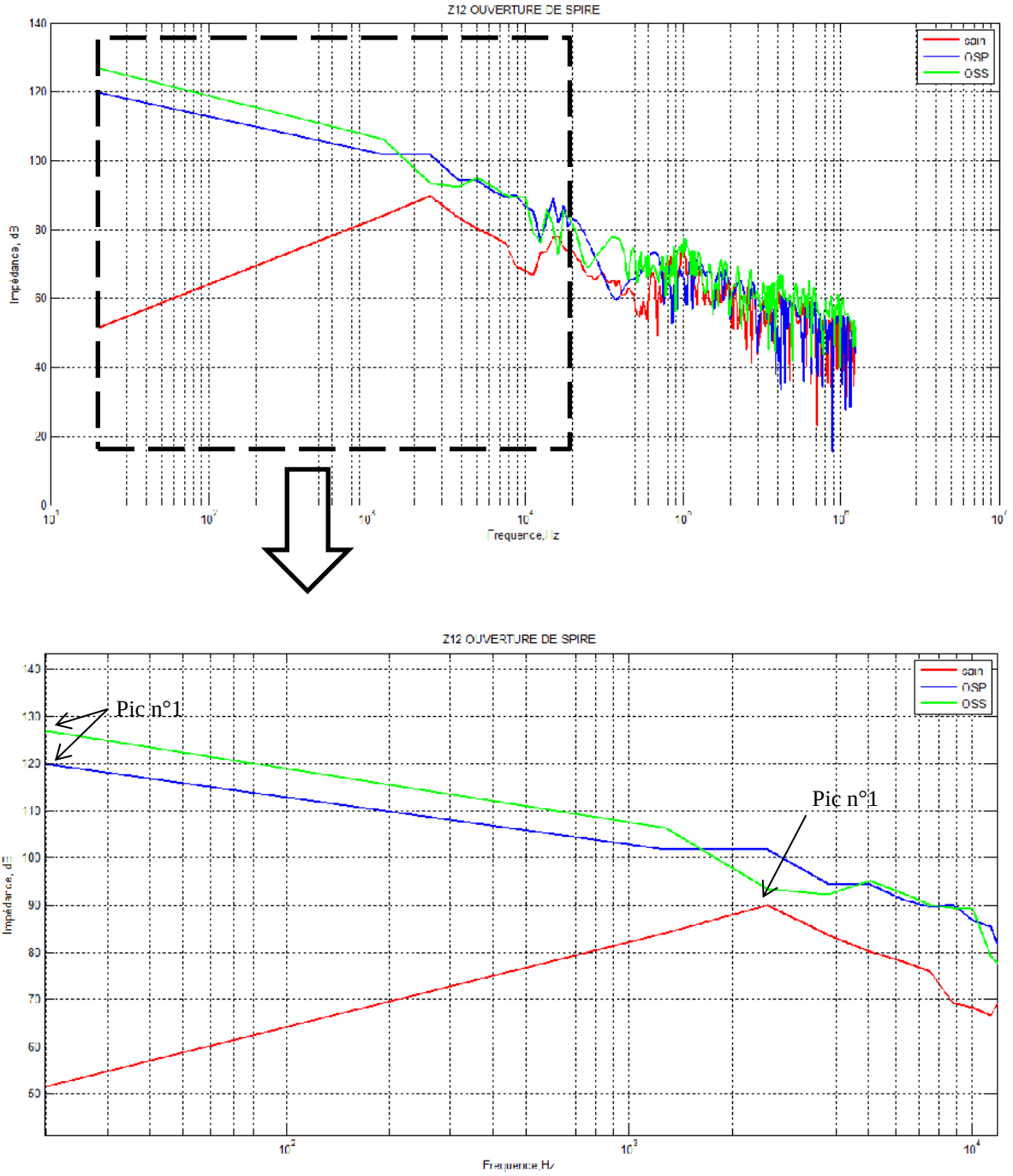


Figure (III.33) : Défaut d'Ouverture de spires réalisé sur la phase U du transformateur.

III.6.4.1.Comparaison des réponses fréquentielles en cas de défaut d'Ouverture de spires :

La comparaison de la réponse fréquentielle d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts d'ouverture de spires réalisés sur le primaire et sur le secondaire du transformateur est illustrée par la figure (III.34).

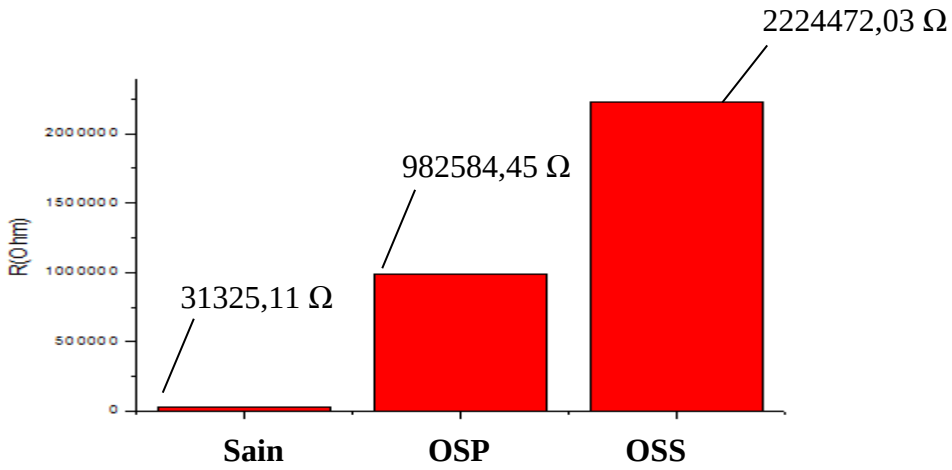


Figure(III.34) : Comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spires au primaire et au secondaire et un enroulement sain**.**

L'apparition d'une impédance maximale dans les basses fréquences pour les deux réponses relatives aux enroulements présentant un défaut d'ouverture de spires primaire et secondaire comparativement à l'enroulement sain, ce qui nous permet de lier l'augmentation de l'impédance en basses fréquences à l'existence d'un défaut d'ouverture de spires dans l'enroulement testé.

III.6.4.2.Calcul des paramètres de circuit RLC en cas de défaut d'Ouverture de spires:

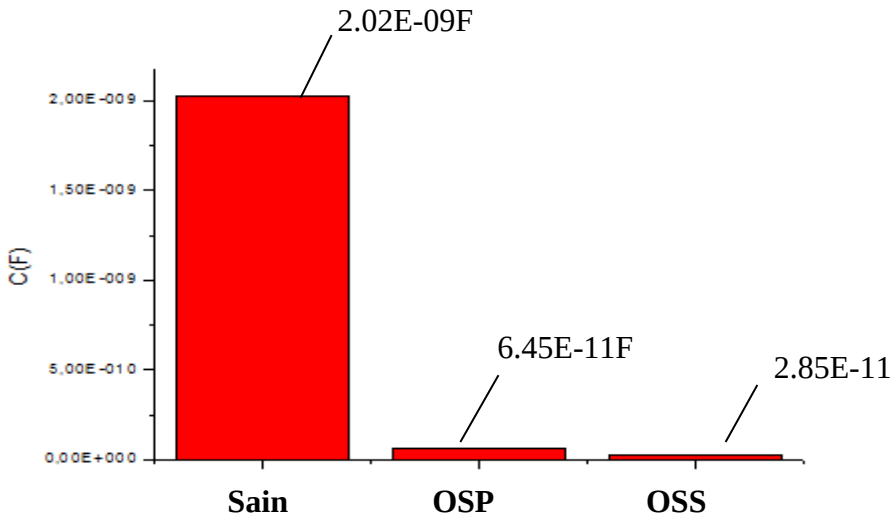
Le calcul des paramètres de circuit RLC relatif à la premier résonance des trois impédances relative à l'enroulement sain ,l'enroulement présentant un court-circuit proche du neutre et court-circuit loin du neutre ,nous a permis de relever certaines remarque permettant de faire la différence entre les deux types de défauts injectés comme montré sur les figures(III.35),(III.36).



Figure(III.35) : Comparaison des résistances au pic N° 01 en cas d'ouverture de spires primaire et secondaire par rapport au sain.

La figure (III.35) représente la comparaison entre les valeurs des résistances du modèle en T d'un enroulement sain et celles des défauts d'ouverture de spires, primaire et secondaire de la première résonance.

On remarque 'il y a une augmentation de résistance dans le cas de défaut d'Ouverture de spires, cette résistance est la plus importante dans le cas d'Ouverture de spires réalisée au secondaire.

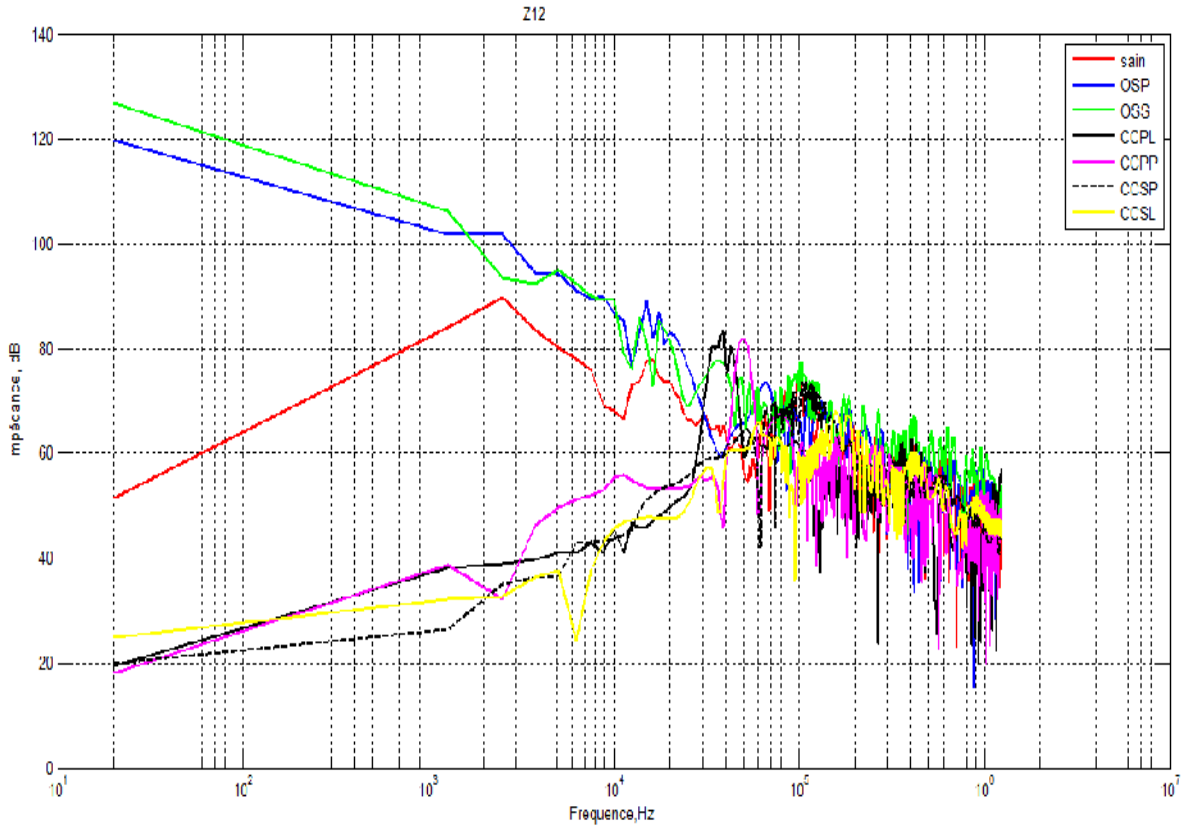


Figure(III.36) : Comparaison des capacités au pic N° 01 en cas d'ouverture de spires, primaire et secondaire par rapport au sain.

La figure (III.36) représente la comparaison entre les valeurs des capacités du modèle en T d'un enroulement sain et ceux des défauts d'ouverture de spires primaires et secondaires de la première résonance.

On remarque il y a une diminution de la capacité dans le cas de défaut d'ouverture de spires, la capacité calculée pour cas du défaut au primaire est supérieure a la capacité calculée dans le défaut secondaire.

III.6.5.Comparaison entre les réponses fréquentielles des différents défauts réalisés dans le transformateur :



Figure(III.37) : Comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant des défauts (court-circuit, ouverture de spires) au primaire et secondaire et un enroulement sain**.**

D'après la figure (III.37) la distinction entre les défauts d'ouverture de spires et de court-circuit est aisément remarquable en basse fréquences, en effet à cette gamme de fréquences les défauts d'ouverture de spires présentent une impédance plus importante comparativement au défaut de court-circuit.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a validé le modèle proposé expérimentalement sur le transformateur de puissance, ensuite on a simulé une variété de défauts afin de construire une base de données nécessaires pour le diagnostic de défaillance de l'enroulement.
D'après l'étude menée les points suivants sont retenus :

- L'enroulement du transformateur peut être représenté en haute fréquence par une cascade de cellule RLC.
- Tout défaut apparu dans l'enroulement est traduit par la variation de son impédance en fonction de la fréquence.
- La fréquence de coupure déduite de la réponse fréquentielle de l'impédance pout être un outil important pour la détection et la classification des défaillances.
- La méthode proposée est basée sur l'évolution du défaut en fonction de la fréquence de coupure, cette méthode a permis de détecter les défauts d'une part et de les localiser d'autre part.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail rentre dans l'axe du contrôle non destructif des dispositifs électrotechnique, on s'est intéressé au transformateur qui est un élément clé dans les réseaux électriques.

Afin de choisir le modèle le plus approprié à notre étude, une recherche bibliographique sur les différents modèles du transformateur en régime HF a constitué la première étape de ce travail.

Afin de cerner notre problématique nous avons opté pour le modèle en T basé sur la discrétisation de l'enroulement par une cascade de cellules RLC. Ce modèle a été validé expérimentalement sur un transformateur de laboratoire de puissance 1kVA, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

Les différents défauts qui peuvent avoir lieu dans l'enroulement du transformateur ont été réalisés sur un transformateur et simulés en utilisant le modèle en T de l'enroulement.

Le résultats obtenus peuvent constitués une base de données pour les travaux futurs, dans le cadre de la détection et la localisation des défauts (court-circuit, ouverture de spires) dans un enroulement de transformateur de puissance par l'observation des écarts enregistrés entre les grandeurs mesurées par rapport à une signature de référence d'un enroulement sain.

Une autre approche de diagnostic a été adoptée en utilisant une comparaison entre les paramètres du schéma équivalent à l'enroulement sain et ceux calculés à partir des réponses collectées sur l'enroulement défaillant.

A partir de l'étude réalisée, les points suivants ont été retenus :

- Apparition d'une faible impédance en basses fréquences dans le cas des courts-circuits.
- Apparition d'une impédance élevée dans le cas d'ouverture de spires.
- Un décalage en fréquence vers la droite de première pic de résonance dans le cas des défauts de court-circuit primaire, et un décalage de l'ordre de $\Delta f=10^4$Hz vers la droite de la première résonance dans le cas de court-circuit proche du neutre par rapport court-circuit loin du neutre.
- Un décalage de la fréquence de la première gamme en cas des court-circuits au côté secondaire par rapport à l'enroulement sain, et décalage vers la droit de l'ordre de Δf=6400Hz de la fréquence de première pic dans le cas court-circuit secondaire proche du neutre par rapport au cas de court-circuit secondaire loin du neutre.

- Les défauts des court-circuits de côté secondaire à basse fréquence présentent une impédance plus importante par rapport à celle des court-circuits de côté primaire.
- Les défauts d'ouverture de spires de côté secondaire à basse fréquence présentent une impédance plus importante par rapport à celle des défauts d'ouverture de spires de côté primaire.

Bibliographie

Référence bibliographique

[1] : Théodore Wildi, Gilbert SYBILLE, " ELECTROTECHNIQUE : transformateur ". 4e édition, Bibliothèque Nationale, Paris, juin 2005.

[2] : FRANÇOIS MILSANT, « Électrotechnique machines électriques transformateurs Électriques ».

[3] : Omicron électroniques 'FRA analyser Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.

[4] : Sonelgaz DEPT GRTE formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance « Méthodes de diagnostic de transformateur E. cottens janvier 2008 »

[5] : DERBALI RABAH, « Diagnostic et Localisation des Défauts dans les Enroulements du Transformateur » Mémoire de Magister Soutenu publiquement 2012.

[6] Yyonnick Le Menach « Contribution à la modélisation numérique tridimensionnelle des systèmes électrotechniques » Thèse de Doctorat de l'Université de Lille1, Année 1999.

[7] Anthony Lefevre Laurence. Miégeville Java. Fouladgar Guy. Olivier «3D computation of transformers overheating under nonlinear loads » IEEE Transaction On Magnetics, vol.41, No.5, pp 1564-1567, May 2005.

[8] T. Nakata ; N. Takahashi ; Y. Kawase « magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores » IEEE Transactions On Magnetics, Vol. Mag-18, No. 6, November 1982.

[9] : Formation transformateur « Formation transformateur de puissance»

[10] : FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005.

[11] : C.Andrieu, E. Dauphant D. Boss, ≪ A Frequency-Dependant Model For a MV/LV

Transformer≫ International Conference on Power Systems Transients (IPST), Budapest,

Hungary, June 20-24, 1999.

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

[13] : T.Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, ≪Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies", IEEE Transaction on Power Delivery,Vol. 17, No. 4, October 2002.

[14] C.Andrieu, E. Dauphant D. Boss, ≪ A Frequency-Dependant Model For a MV/LV

Transformer≫ International Conférence on Power Systèmes Transients (IPST), Budapest,

Hungary, June 20-24, 1999

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

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

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

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

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

[20]: Dr. D. Mario Mañana Canteli « APORTACIONES AL MODELADO DEL TRANSFORMADOR EN ALTA FRECUENCIA » Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria. Departamento de Ingenier Eléctrica y EnergéticaSantander, 2012.