الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE D_R. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Electrique



Projet de Fin d'Etudes

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

THEME :

Modélisation et diagnostic des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé

Proposé et dirigé par :

Dr. HOUASSINE Hamza.

Préparé et présenté par :

M^{lle}.BOUKIRAT Samia.
M^{lle}.SALHI Sakhria.

Année Universitaire 2016-2017.

Remerciements

*Le plus grand Merci revient à **Allah** qui lui seul nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous aidé à réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur **''Mr. HOUASSINE Hamza''**, Docteur à l'université D_R. YAHIA Fares de Médéa, pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce travail et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et ses directives, et d'avoir aussi au la gentillesse de lire et corriger ce travail.*

*Notre gratitude au monsieur le Directeur de Laboratoire de Recherche en Électrotechnique et en Automatique (LREA) **Dr. BOUDANNA Djamel**, et tous les membres de ce Laboratoire.*

*Nous exprimons nos profondes gratitudes à **nos parents** pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont en duré.*

*Nos sincères remerciements aux **messieurs les membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.*

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

Nous remercions le Doctorant Mr. CHAOUCHE Moustafa pour ses conseils et ses orientations.

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à **tous nos amis et collèges** pour tout le soutien moral et matériel…*

SALHI Sakhria.

BOUKIRAT Samia.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

En premier lieu ***à mes très chers parents*** *qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite, et pour leurs encouragements pendant toute la durée de mes études.*

A mes sœurs Faiza, Leila et Fethia.

A mes tantes, mes oncles spécialement Mouloud.

A toute la famille BOUKIRAT.

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

Mr.HOUASSINE Hamza.

Mme.ABBADI Amel.

Mr.ABDI Sif-eddine.

Mr.HEDJRI Mostafa.

A toute mes amis et mes collègues surtout ma chère binôme SALHI Sakhria.

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

A tous ceux que j'aime, qui m'aiment et tous ceux que m'ont connu.

A tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.

Samia



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère Mère et mon Père bien-aimé

qui ont consenti beaucoup de sacrifices

pour me Permettre de réaliser mes objectifs

qu'ils, trouvent ici Toute ma

reconnaissance et ma gratitude.

A mes frères Bouzar, Khierelddine, Benyoucef, Cherif

et Pour leurs femmes.

Aux enfants de mes frères.

A le merveilleux professeur qui a était le père, le frère

et un ami MR.HOUASSINE Hamza.

A ses enfants Yasmin et Amin.

A mes très chères Chahrazed et Samia.

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à

aujourd'hui surtout Mme. ABBADI AMEL

et Mr. ABDI Sif-eddine.

A tous mes camarades particulièrement
ceux d'électrotechnique et mes amis.

Sihem .

Table des matières

Introduction générale…….I

CHAPITRE I :

Transformateurs : fonctionnement, défaillances et diagnostic

Introduction :..... 2

I.1 Définition :..... 2

I.2 Technologie de construction 2

I.2.1 Les transformateurs à diélectrique liquide 2

I.2.2 Les transformateurs secs 3

I.3 Constitution d'un transformateur triphasé 4

I.3.1 Circuit magnétique..... 4

I.3.1.1 Type cuirassé 4

I.3.1.2 Type à colonnes 5

I.3.2 Circuit électrique..... 6

- Bobinage concentrique simple 6
- Bobinage mixte..... 6
- Bobinage alterné en galettes..... 6

I.3.3 Isolants..... 6

a) Isolant solide..... 6

b) Isolant liquide 6

I.3.4 Cuve :..... 6

I.3.5 Traversées :..... 7

I.3.6 Régleur en charge : 7

I.4 Mode de couplage 8

I.5 Principe de fonctionnement..... 10

I.6 Rôle du transformateur:..... 10

I.7 Protection des transformateurs de puissance 10

I.7.1 Appareils de protection contre les défauts 10

I.7.2 Relai Buchhloz..... 10

I.7.3 Soupape de surpression 11
I.7.4 Indicateur de température d'huile 11
I.7.5 Indicateur de niveau d'huile 11
I.7.6 Indicateur de température d'enroulement 12
I.7.7 Enregistreur de l'impact (choc) 12
I.7.8 Dessiccateur d'air 12
I.8 Défauts fréquents dans les transformateurs 13
I.8.1 Défaut d'isolement de la partie active 13
I.8.2 Amorçage diélectrique entre spires 13
I.8.3 Court-circuit entre spires 14
I.8.4 Décharges Partielles 14
I.8.5 Coupure du circuit électrique 15
I.8.6 Déformation géométrique des enroulements 15
I.9 Les technique de diagnostic des transformateurs 16
I.9.1 Mesure électrique 16
I.9.1.1 Mesure du courant à vide 16
I.9.1.2 Mesure du rapport de transformation 17
I.9.1.3 Mesure de la résistance des enroulements 17
I.9.1.4 Mesure de la réactance de fuite 17
I.9.2 Mesures diélectriques 17
a) Mesure de facteur de perte 17
b) Mesure de capacité des enroulements 17
c) Mesure de capacité des bornes 18
d) Mesure de la résistance d'isolement en courant continu 19
I.9.3 Analyse d'huile 19
I.9.3.1 Analyses physico-chimiques 19
I.9.3.2 Analyses des furanes 19
I.9.3.3 Analyses des gaz dissous 20
Conclusion 20

CHAPITRE II :

Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle

Introduction 22
II.1 L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) 22
II.1.1 Définition 22
II.1.2 principe de fonctionnement 22
II.1.3 Objectifs de l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) 23
II.1.4 Les applications de test FRA 24
II.2 Modélisation fréquentielle du transformateur 24
II.2.1 Modèle de Morched (modèle universel EMTP) 24
II.2.2 Le modèle RESEL 25
II.2.3 Modèle de LEON 26
II.2.4 Modèle de Chimklai 27
II.2.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles 29
II.2.6 Modèle d'Andrieu 29
II.2.7 Modèle en π du transformateur 30
Conclusion 33

CHAPITRE III :

Application : test et modélisation

Introduction 35
III.2 Objectifs de l'étude 35
III.3 Méthodologie de calcul des paramètres 35
III.4 Essais expérimentaux en basse fréquence 36
III.4.1 Description du banc d'essai 36
III.4.2 Mesure de l'impédance Zmes1 37
III.4.3 Mesure de l'impédance Zmes2 38
III.4.4 Mesure de l'impédance Zmes3 39
III.5 Présentation du modèle adopté 40

III.5.1 Calcul des paramètres du modèle étudié 41
III.5.1.1 Méthode analytique d'estimation des paramètres..... 41
III.5.1.2 Méthode basée sur l'analyse de la réponse fréquentielle..... 45
III.5.1.3 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeille artificielle (ABC)47
III.6 Validation du modèle 51
III.6.1 Résultats expérimentaux..... 55
III.6.2 Interprétation des résultats..... 56
III.7 Détection et classification des défauts dans les phases de transformateur 56
III.7.1 Défauts résistifs..... 57
III.7.1.1 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut résistif57
III.7.1.2 Résultats et discussions 60
III.7.2 Défauts inductifs 62
III.7.2.1 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut inductif 62
III.7.2.2 Résultats et discussions 66
III.7.3 Défauts capacitifs 67
III.7.3.1 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut capacitif 68
III.7.3.2 Résultats et discussions 71
Conclusion..... 75
Conclusion générale……..……..…IV
Annexes…….VII
Références bibliographiques……....XIII

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I. 1 : Transformateur à diélectrique liquide 3
Figure I. 2 : Transformateur sec 3
Figure I. 3 : Circuit magnétique d'un transformateur triphasé. 4
Figure I. 4 : Transformateur cuirassé 5
Figure I. 5 : Transformateur à trois colonnes. 5
Figure I. 6 : Cuve d'un Transformateur de Puissance. 7
Figure I. 7 : Traversées des Transformateurs 7
Figure I. 8 : Régleur en charge 8
Figure I. 9 : Représentations symboliques des couplages normalisés. 9
Figure I. 10 : Relais BUCHHLOZ. 10
Figure I. 11 : Soupape de surpression 11
Figure I. 12 : Indicateur de température d'huile 11
Figure I. 13 : Indicateur de niveau d'huile 11
Figure I. 14 : Indicateurs de température d'enroulements 12
Figure I. 15 : Enregistreur de choc 12
Figure I. 16 : Dessiccateur d'air. 12
Figure I. 17 : Amorçage entre enroulements. 13
Figure I. 18 : Amorçage entre spires, sans court-circuit. 13
Figure I. 19 : Court-circuit entre spires. 14
Figure I. 20 : Décharges partielles sur des cales. 14
Figure I. 21 : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur 15
Figure I. 22 : Déformation mécanique d'un Enroulement 16
Figure I. 23 : Schéma de capacité d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements 18
Figure I. 24 : Schéma d'une borne de type capacitif. 18

Chapitre II

Figure II. 1: Modèle d'un enroulement de transformateur 22
Figure II. 2 : Principe de la FRA 23
Figure II. 3 : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP 25
Figure II. 4 : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL 26
Figure II. 5 : Circuit de Foster en série 27
Figure II. 6: Modèle de Cauer pour le noyau de fer 27
Figure II. 7 : Modèle du transformateur de Chimklai 28
Figure II. 8 : Modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié 29
Figure II. 9 : Modèle d'Andrieu 30

Figure II. 10 : Circuit équivalent de Zcc. 30
Figure II. 11: Structure de modèle d'un quadripôle.....31
Figure II. 12 : Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases 31
Figure II. 13 : Circuit parallèle RLC.....32

Chapitre III

Figure III. 1 : Banc d'essai expérimental. 36
Figure III. 2 : Schéma illustratif des essais pour la détermination des impédances Zmes1, Zmes2 et Zmes3 à partir des essais en régime fréquentiel. 36
Figure III. 3 : Mesure de l'impédance Z_{mes1}.....37
Figure III. 4 : Module de l'impédance Zmes1 en fonction de la fréquence.....37
Figure III. 5 : Mesure de l'impédance Z_{mes2}.....38
Figure III. 6 : Module de l'impédance Zmes2 en fonction de la fréquence.....38
Figure III. 7 : Mesure de l'impédance Z_{mes3}.....39
Figure III. 8 : Module de l'impédance Zmes3 en fonction de la fréquence.....39
Figure III. 9 : Modèle simplifié d'un transformateur triphasé en basse fréquence. 40
Figure III. 10 : Modèle d'un transformateur triphasé représenté par trois impédances Z_{ph1}, Z_{ph2} et Z_{ph3} 41
Figure III. 11 : Module d'impédance Zph1 en fonction de la fréquence.....43
Figure III. 12 : Module d'impédance Zph2 en fonction de la fréquence.....43
Figure III. 13 : Module d'impédance Zph3 en fonction de la fréquence. 44
Figure III. 14 : Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur. 44
Figure III. 15 : Organigramme de calcul de Q et de BP 46
Figure III. 16 : Organigramme pour la procédure ABC de calcul des paramètres du modèle étudié. 49
Figure III. 17 : schéma équivalent du transformateur triphasé en BF. 51
Figure III. 18 : La courbe de la réponse Zmes1 mesurée et la réponse simulée par les trois méthodes en fonction de la fréquence. 52
Figure III. 19 : La courbe de la réponse Zmes2 mesurée et la réponse simulée par les trois méthodes en fonction de la fréquence. 53
Figure III. 20 : La courbe de la réponse Zmes3 mesurée et la réponse simulée par les trois méthodes en fonction de la fréquence. 54
Figure III. 21 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 1 et d'un enroulement sain……..57
Figure III. 22 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 2 et d'un enroulement sain……...58
Figure III. 23 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 3 et d'un enroulement sain……..59
Figure III. 24 : Le degré de défaut résistif ΔR en fonction de ΔZ dans la première et la troisième phase. 61
Figure III. 25 : Le degré de défaut résistif ΔR en fonction de ΔZ dans la seconde phase.....61
Figure III. 26 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut inductif dans la phase 1 du côté primaire et d'un enroulement sain……63

Figure III. 27 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut inductif dans la phase 2 du côté primaire et d'un enroulement sain.……64

Figure III. 28 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut inductif dans la phase 3 du côté primaire et d'un enroulement sain.……65

Figure III. 29 : Le degré de défaut inductif ΔL en fonction de Δf dans la première et la troisième phase. 66
Figure III. 30 : Le degré de défaut inductif ΔL en fonction de Δf dans la seconde phase. ...67
Figure III. 31 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (augmentation de capacité) dans la première phase et d'un enroulement sain.……68
Figure III. 32 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (augmentation de capacité) dans la deuxième phase et d'un enroulement sain.……68
Figure III. 33 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (augmentation de capacité) dans la troisième phase et d'un enroulement sain. 69
Figure III. 34 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (cas d'une diminution) dans la première phase et d'un enroulement sain.…70
Figure III.35 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (cas d'une diminution) dans la deuxième phase et d'un enroulement sain...70
Figure III. 36 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (cas d'une diminution) dans la troisième phase et d'un enroulement sain.…71
Figure III. 37 : Le degré de défaut capacitif (cas d'une augmentation) ΔC en fonction de Δf dans la première et la troisième phase. 72
Figure III. 38 : Le degré de défaut capacitif (cas d'une augmentation) ΔC en fonction de Δf dans la seconde phase. 73
Figure III. 39 : Le degré de défaut capacitif (cas d'une diminution) ΔC en fonction de Δf dans la première et la troisième phase. 73
Figure III. 40 : Le degré de défaut capacitif (cas d'une diminution) ΔC en fonction de Δf dans la seconde phase. 74

Liste des tableaux :

Chapitre I

Tableau I. 1 : Couplage des enroulements primaires et secondaires 8

Chapitre III

Tableau III. 1 : Valeurs des paramètres obtenues. 55

Tableau III. 2 : La variation ΔZ du chacune des phases. 60
Tableau III. 3 : La variation Δf du chacune des phases. 66
Tableau III. 4 : La variation Δf du chacune des phases (cas d'une augmentation de la capacité). 71
Tableau III. 5 : La variation Δf du chacune des phases (cas d'une diminution de la capacité). 72

Glossaire des termes techniques :

BT : Basse tension.

HT : Haute tension.

f.e.m : force électromotrice.

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

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

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

VA : Volt - Ampère.

mg : milli-gramme**.**

kg : kilo-gramme .

kV: kilo - Volt.

BF : Basse fréquence.

BP : Bande passante.

R_{phx} : Résistance de chacune des phases.

L_{phx} : Inductance de chacune des phases.

C_{phx} : Capacité de chacune des phases.

Z_s : Impédance sain.

Z_d : Impédance de défaut.

Cs : capacité série.

L_{cc} : Inductance de court circuit.

R_{cc} : Résistance de court circuit.

C_{cc} : Capacité de court circuit.

Z_{cc} : Impédance de court circuit .

Ph : Phase.

$Z_{winding}$: Impédance de l'enroulement.

Cg : capacité shunt.

C e-c : capacité entre enroulement et cuve.

C e-e : capacité entre enroulements.

R_{corrg}: Résistance corrigée

R_m : Résistance mesurée.

I_{int} : Courant d'entrée.

V_{out} : Tension de sortie.

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

Esp_{rech} : Espace de recherche.

GM_{val} : Gamme de valeur utilisée.

Rand : Choix aléatoire (Randomly).

Sorc $_{Norr}$: Source de nourriture.

D: La longueur du vecteur (Dimension).

Repmat : Répétition (Replicate).

Bornes $_{sup}$: Bornes supérieures.

Bornes $_{inf}$: Bornes inférieures.

Z_{mes_phx} : Impédance mesurée de chacune des phases.

Z_{siml_phx} : Impédance simulée de chacune des phases.

ez : Erreur entre les impédances.

Sol $_{RLC}$: Solution des paramètres R, L et C.

R_T : Résistance en fonction de la température.

R_0 : Résistance sain.

α : Facteur de dilatation thermique.

ΔT : Variation de la température.

ΔZ : Variation de l'impédance.

ΔR : Degré de défaut résistif .

ΔL : Degré de défaut inductif.

ΔC : Degré de défaut capacitif.

Δf : Variation de la fréquence.

f : Fréquence.

Notations utilisées

N1 ,N2 : Nombre des spires.

V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} : Tensions d'enroulement primaire.

V_{an} , V_{bn} , V_{cn} : Tensions d'enroulement secondaire relié au neutre.

V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} : Tensions d'enroulement primaire relié au neutre.

V_a , $V_{a'}$: Tensions des enroulements secondaires.

Ø : Flux magnétique.

t: Temps.

Θ_F: Température de fonctionnement.

Θ_{ref} : Température de référence.

Θ_{en} : Température des enroulements.

C1 , C2 : Deux isolements (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).

R : Résistance.

R : Inductance.

C : Capacité.

RLC: Résistance-Inductance-Capacité.

r_1, r_2 : Résistances primaire et secondaire respectivement.

$\mathfrak{R}$: reluctance**.**

e_a : Tension d'entrée.

L : Inductance propre.

M : Inductances mutuelles.

ω : La pulsation.

Y : Admittance.

S : Siemens.

Ω : Ohm.

rd : Radian

s : second.

$\boldsymbol{\pi}$: Modèle d'un transformateur.

$\mathbf{I_1}$ **:** Courant d'entrée.

$\mathbf{V_1}$ **:** Tension d'entrée.

$\mathbf{I_2}$**:** Courant de sortie.

$\mathbf{V_2}$ **:** Tension de sortie.

$\mathbf{P_{01}}$**,** $\mathbf{P_{02}}$ **et** $\mathbf{P_{03}}$ **:** Les pertes fer.

$\mathbf{B_L}$ **:** Susceptance inductive.

B : Susceptance capacitive.

G : Conductance.

$\boldsymbol{\omega_0}$ **:** Pulsation de résonance.

$\boldsymbol{\omega_{LO}}$ **:** Pulsation de demi-puissance inférieure.

$\boldsymbol{\omega_{HI}}$ **:** Pulsation de demi-puissance supérieure.

Q **:** Facteur de qualité (Coefficient de surintensité).

ملخص :

هذا العمل يصف منهجية تحديد قيم الضبط باستخدام ثلاثة طرق مختلفة (تحليلية, تحليل استجابة التردد, خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية (ABC)لنموذج قاعدي للفّ محوَل ثلاثي الطور في تردّد منخفض, و تعتمد هذه المنهجية على القياس التجريبي لاستجابة تردَّد لفات المحول في مجال تردد من 10 إلى 6000 هرتز.
تم إجراء الاختبارات التجريبية على الجانب الأوَل لمحول المختبر ثلاثي الطور 300VA- 115V / 230-50HZ .

النتائج المتحصل عليها من المحاكاة و كذا المتحصل عليها تجريبيا متطابقة. وتم استخدام النموذج π المقترح والمتحقق من صحته في وقت لاحق في مجال تشخيص أعطاب لفات المحولات في الترددات المنخفضة.

الكلمات المفتاحية :

محول ثلاثي الطور, نموذج π, استجابة التردد, خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية (ABC), التشخيص.

Résumé :

Ce travail décrit une méthodologie d'identification par trois méthodes différentes (Analytique, Analyse de la réponse fréquentielle, Algorithme ABC) des paramètres d'un modèle de base de l'enroulement d'un transformateur triphasé en basses fréquences, cette méthodologie est basée sur une mesure expérimentale de la réponse en fréquence des enroulements du transformateur dans une gamme de fréquences *10-6000 Hz*.

Des tests expérimentaux ont été réalisés sur le côté primaire d'un transformateur triphasé de laboratoire **300VA-230/115V- 50 Hz**. Les résultats obtenus par simulation et ceux obtenus expérimentalement sont concordants. Le modèle en π proposé et validé, est par la suite exploité dans le domaine du diagnostic des défaillances en basses fréquences dans les enroulements du transformateur.

Mots clés :

Transformateur triphasé, modèle en π, réponse fréquentielle, Algorithme ABC, Diagnostic.

Abstract:

This work describes a methodology of parameters identification by three different methods (Analytical, Frequency Response Analysis, ABC Algorithm) of a basic model of the three-phase transformer windings at low frequencies, This methodology is based on an experimental measurement of the frequency response of the transformer windings in a frequency range 10-6000 Hz.

Experimental tests were carried out on the primary side of a three-phase laboratory transformer300VA-230 / 115V-50 Hz. The results obtained by simulation and those obtained experimentally are consistent. The proposed and validated model π is subsequently used for faults diagnosis at low-frequency in transformer windings.

Keywords:

Three-phase transformer, model inπ, frequency response, ABC algorithm, Diagnosis.

Introduction générale

Introduction générale

La production de l'énergie électrique et même son transport se fait en triphasé. Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie électrique en HT est plus économique d'où la nécessité d'utiliser des transformateurs élévateurs à la sortie de centrale de production et abaisseur tout proche des points de consommation.

Le transformateur est une machine 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'étude du transformateur triphasé nous aidera également à comprendre le fonctionnement d'un grand nombre des machines telles que moteurs d'induction, alternateurs… etc. En effet, pour modifier la tension d'un système triphasé on peut choisir d'utiliser **[1]** :

- ✓ Soit 3 transformateurs monophasés identiques ;
- ✓ Soit un seul transformateur triphasé.

La méthode des diagnostics consiste à la détection d'un changement anormal dans le comportement ou dans l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Elle repose sur la connaissance d'un modèle capable de décrire le fonctionnement du système à surveiller **[2]**.

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) se trouve être un outil utile pour la détection fiable des défauts mécaniques et électriques naissant dans un transformateur. 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 **[3]**.

L'interprétation de la FRA basée sur la modélisation de circuit du transformateur pour le 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) **[3]**.

Ce travail est une suite des travaux déjà réalisés **[16]** au Laboratoire de Recherche en Électrotechnique et en Automatique (LREA) de l'université de Médéa, dans le domaine de diagnostic de défauts dans les machines électriques.

Dans ce cadre, le présent travail est une étude détaillée du transformateur de puissance en régime fréquentiel, dont son principe de fonctionnement, ses principaux modèles, le système de protection et les techniques de diagnostic qui lui sont associées sont présentées. En plus nous avons étudié la procédure d'obtention de ses paramètres et son application lors de l'interprétation des résultats de basse fréquence des mesures d'analyse de réponse en fréquence (FRA).

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

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur le transformateur du point de vue construction, les moyens de protection, les défauts qui y peut avoir lieu et les différentes méthodes de diagnostic de défaillances.

Le deuxième chapitre représentera une étude préliminaire sur :

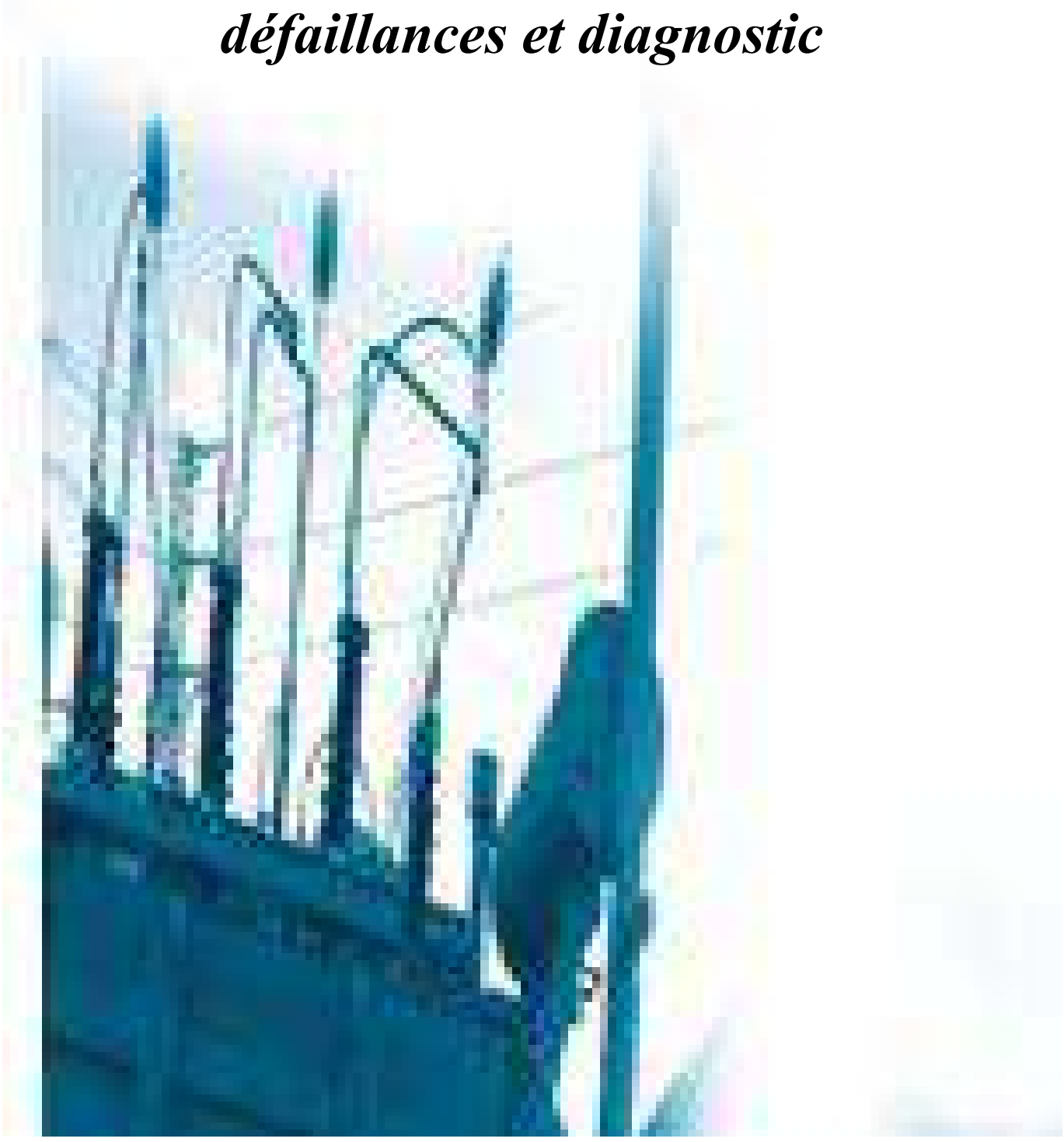
- Les principaux modèles du transformateur de puissance, dans le but de choisir le modèle le mieux adapté à notre étude.
- La présentation de la démarche de l'analyse de la réponse fréquentielle.

Nous aborderons dans le troisième chapitre la validation du modèle adopté et son exploitation pour une étude de diagnostic de défaut dans le transformateur en basse fréquence.

Enfin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

Chapitre I

Transformateurs : fonctionnement, défaillances et diagnostic



Introduction :

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

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

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

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

I.1 Définition :

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

I.2 Technologie de construction :

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

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

I.2.1 Les transformateurs à diélectrique liquide :

Le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans un diélectrique liquide qui assure l'isolation et l'évacuation des pertes caloriques du transformateur **[4]**. Ils sont utilisés pour :

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

On distingue deux possibilités de stockage de l'huile **[4] :**

1) Transformateurs respirant avec conservateur :

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

2) Transformateurs totalement étanches.

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



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

I.2.2 Les transformateurs secs :

Le circuit magnétique est isolé dans une matière isolante sèche. Le refroidissement est assuré par l'air ambiant. Ils sont utilisés dans des locaux où les conditions de poussière, d'humidité et de température sont maîtrisées. Ils sont notamment utilisés pour les grands bâtiments car ils présentent peu de risque en cas d'incendie **[4].**



Figure I. 2 : Transformateur sec [4].

I.3 Constitution d'un transformateur triphasé :

Les principaux composants du transformateur de puissance sont :

I.3.1 Circuit magnétique :

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

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

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

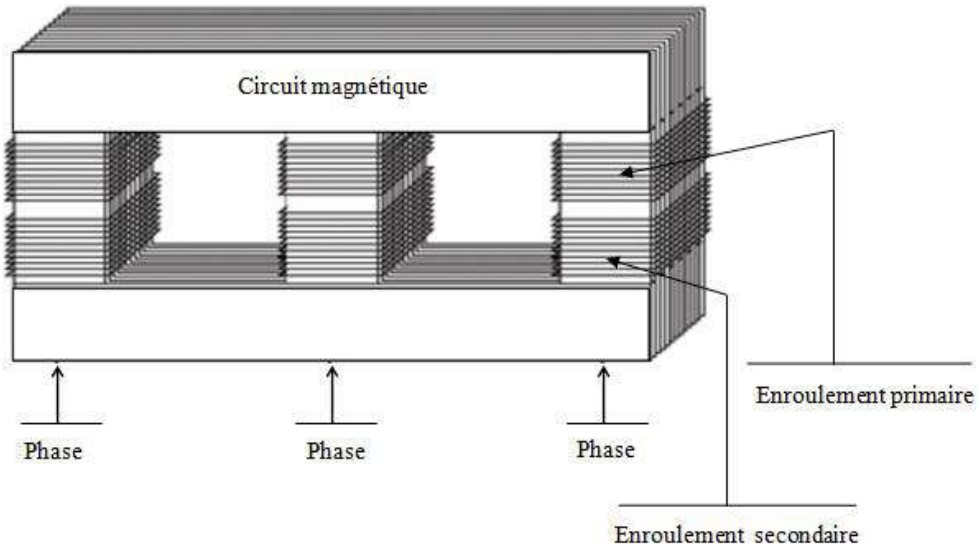


Figure I. 3 : Circuit magnétique d'un transformateur triphasé [5].

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

I.3.1.1 Type cuirassé :

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

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

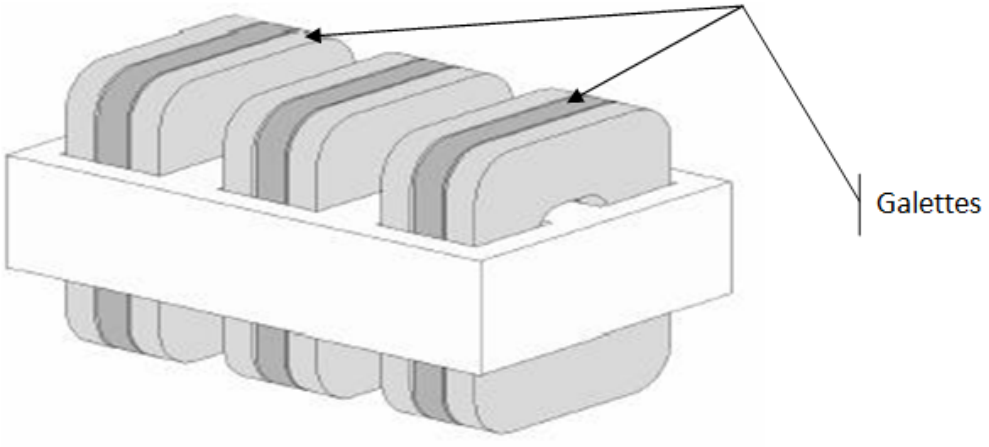


Figure I. 4 : Transformateur cuirassé [5].

I.3.1.2 Type à colonnes :

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

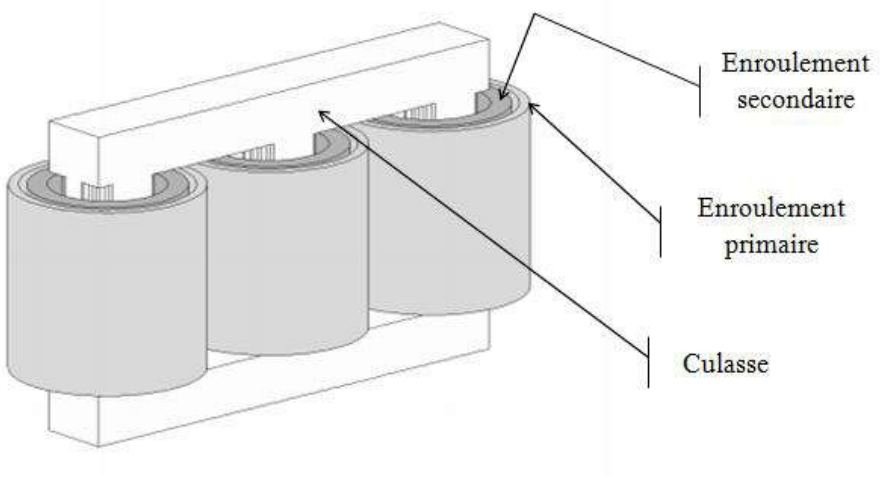


Figure I. 5 : Transformateur à trois colonnes **[5]**.

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

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

I.3.2 Circuit électrique :

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

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

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

- **Bobinage concentrique simple :**

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

- **Bobinage mixte :**

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

- **Bobinage alterné en galettes :**

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

I.3.3 Isolants :

On trouve deux types d'isolant **[6]**:

a) **Isolant solide :**

Il assure l'isolation entre :

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

b) **Isolant liquide :**

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

I.3.4 Cuve :

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



Figure I. 6 : Cuve d'un Transformateur de Puissance **[8].**

I.3.5 Traversées :

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



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

I.3.6 Régleur en charge :

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



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

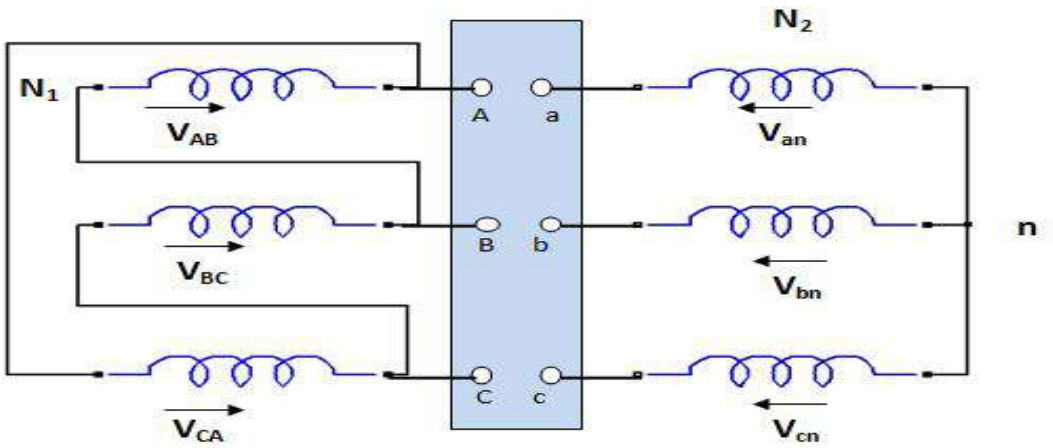
I.4 Mode de couplage [12] :

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

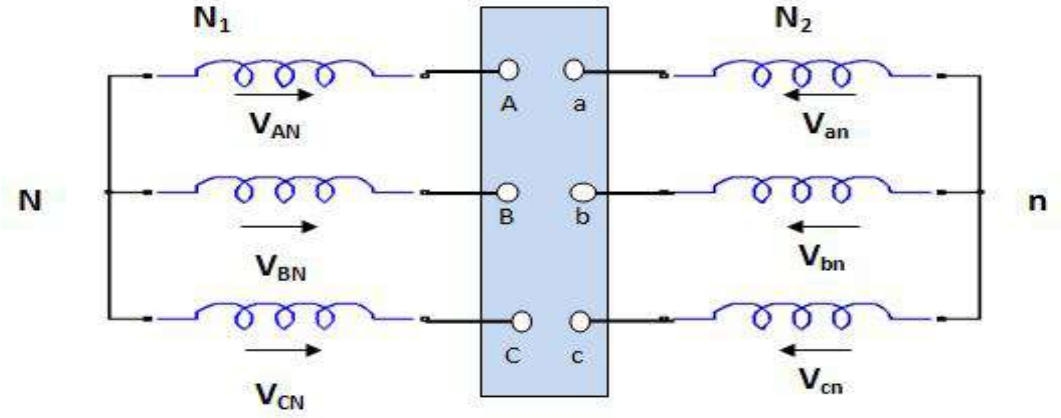
Tableau I.1 : Couplage des enroulements primaires et secondaires [12].

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

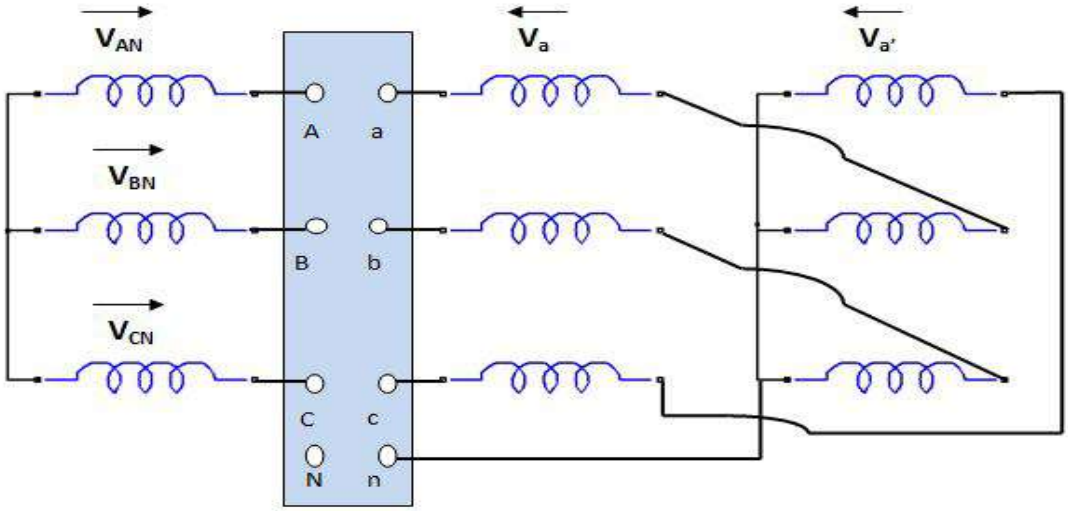
Voici ci-dessous la représentation de quelques couplages utilisés :



-a-Triangle- étoile



-b-Etoile- étoile



-c-Etoile- zigzag

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

I.5 Principe de fonctionnement:

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

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire **[13]**.

I.6 Rôle du transformateur:

Les principaux rôles du Transformateur sont **[14]**:

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

I.7 Protection des transformateurs de puissance :

Les systèmes de protections sont :

I.7.1 Appareils de protection contre les défauts :

Appareils situés généralement sur le réseau du distributeur d'énergie (parafoudres, limiteurs de surtensions …etc)**.**

I.7.2 Relai Buchhloz :



Appareil de protection spécifique aux transformateurs immergés. 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.
- ✓ 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 **[15].**

Figure I. 10: Relais BUCHHLOZ [15].

I.7.3 Soupape de surpression :



Cet équipement, placé sur le couvercle du transformateur, à pour fonction d'éliminer toute surpression interne à la cuve **[6], [16].**

Figure I. 11 : Soupape de surpression [6],[16].

I.7.4 Indicateur de température d'huile :



Cet indicateur contrôle la température d'huile au sommet de la cuve du transformateur **[17].**

Figure I.12 : Indicateur de température d'huile [17].

I.7.5 Indicateur de niveau d'huile :



C'est un flotteur, indique le niveau d'huile, il est monté sur un des côtés du conservateur, il est utilisé comme capteur de niveau d'huile à l'intérieur du conservateur. Il en résulte d'éviter toute fuite et d'éviter la contamination de l'huile isolante en raison de l'infiltration de l'air ambiant dans le conservateur **[9], [17].**

Figure I. 13 : Indicateur de niveau d'huile [17].

I.7.6 Indicateur de température d'enroulement :



Cet indicateur contrôle la température des bobinages, commande la réfrigération et fournit un signal d'alarme et de déclenchement **[6], [17]**.

Figure I. 14 : Indicateurs de température d'enroulements [17].

I.7.7 Enregistreur de l'impact (choc) :



Appareil fournit les indications à propos de niveau de chocs que l'expédition de transformateur subit lors de différentes modes de transportation **[10], [17].**

Figure I. 15 : Enregistreur de choc [17].

I.7.8 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.
- ✓ Interdire l'entrée d'air durant les faibles variations de charge **[16].**

Figure I. 16 : Dessiccateur d'air [16].

I.8 Défauts fréquents dans les transformateurs :

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

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

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

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



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

I.8.2 Amorçage diélectrique entre spires :

C'est un amorçage entre spires d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux (Fig I.18).L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit localement **[17]**, **[19]**.



Figure I. 18 : Amorçage entre spires, sans court-circuit [16], [17].

I.8.3 Court-circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles. (Fig I.19).Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements, ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas **[16]**, **[17]**.



Figure I. 19 : Court-circuit entre spires [16], [17].

I.8.4 Décharges Partielles :

Les décharges partielles, sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l'isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible (Fig. I.20).Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage **[16]**, **[17]**.

Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs **[17]**, **[18]**.

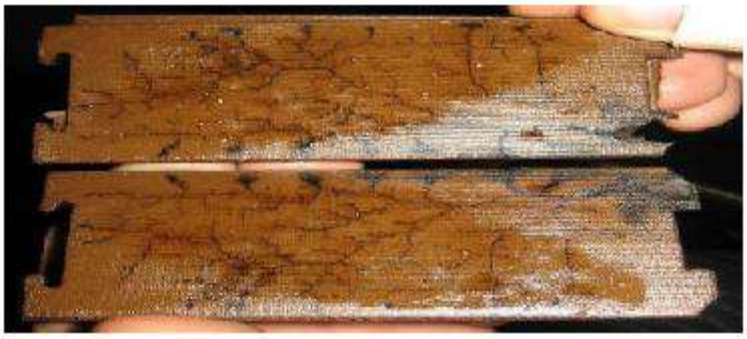


Figure I. 20 : Décharges partielles sur des cales [16], [17].

I.8.5 Coupure du circuit électrique :

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

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



Figure I. 21 : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur [16], [17].

I.8.6 Déformation géométrique des enroulements :

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des court-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés, qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes (Fig I.22), à noter sans amorçages entre spires, ni court-circuit internes) **[17]**, **[18]**.

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



Figure I. 22 : Déformation mécanique d'un Enroulement [16], [17].

I.9 Les technique de diagnostic des transformateurs:

L'utilisation des techniques de diagnostic, permet d'évaluer l'état des composants du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter la programmation des travaux.

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

I.9.1 Mesure électrique :

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

I.9.1.1 Mesure du courant à vide :

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

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

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

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

I.9.1.2 Mesure du rapport de transformation :

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

Les mesures sont effectuées :

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

I.9.1.3 Mesure de la résistance des enroulements :

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

La mesure est effectuée par l'application du courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements **[20].**

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

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

$\mathbf{R_m}$: Résistance mesuré.
$\mathbf{\Theta_f}$: Température de fonctionnement (235 pour le cuivre et 255 pour aluminium).
$\mathbf{\Theta_{ref}}$: Température de référence.
$\mathbf{\Theta_{en}}$: Température des enroulements.

I.9.1.4 Mesure de la réactance de fuite :

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

I.9.2 Mesures diélectriques :

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

Pour évaluer son état on doit effectuer les mesures suivantes :

a) Mesure de facteur de perte :

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

b) Mesure de capacité des enroulements :

La mesure de capacité se fait entre la cuve et l'enroulement ou entre les enroulements (Fig.I.23) **[2].**

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

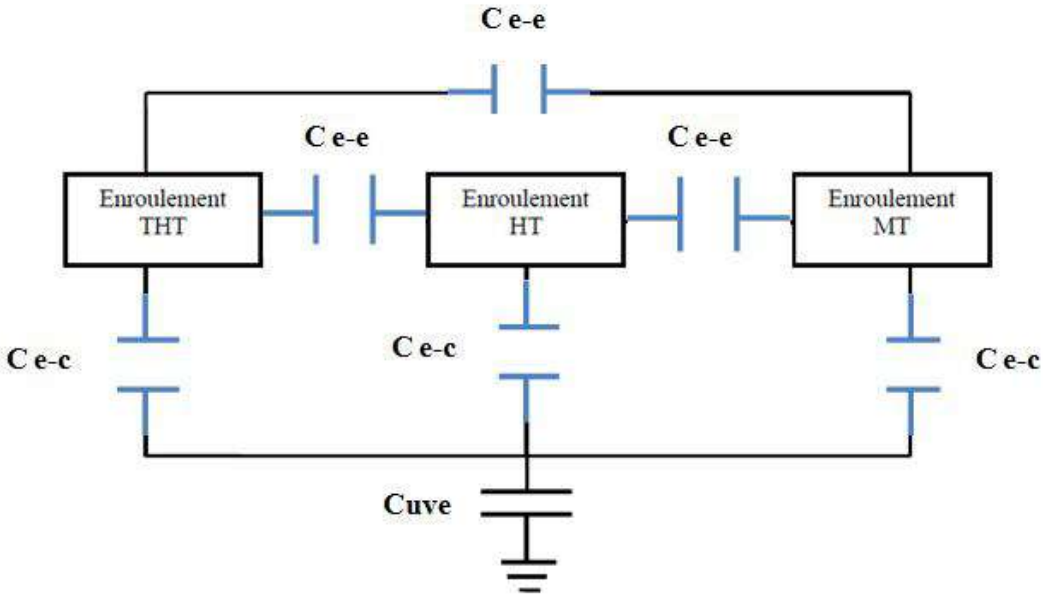


Figure I. 23 : Schéma de capacité d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements [2].

c) Mesure de capacité des bornes :

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

Si les bornes sont de type capacitif, elles possèdent normalement une prise de mesure, une borne capacitive de construction typique possède deux isolements C1 et C2 voir (Fig.I.24) **[20].**

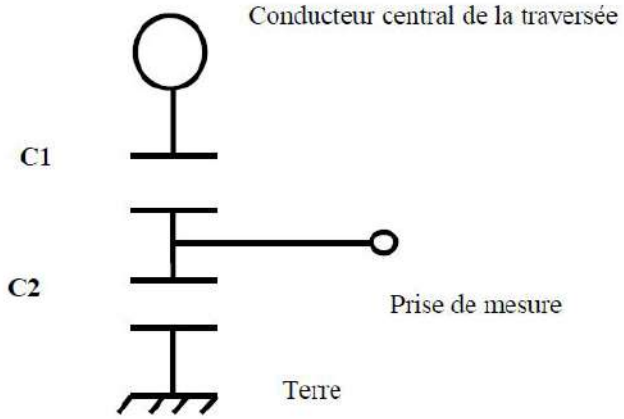


Figure I. 24 : Schéma d'une borne de type capacitif [2].

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

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

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

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

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

I.9.3 Analyse d'huile :

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

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

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

I.9.3.1 Analyses physico-chimiques :

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

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

I.9.3.2 Analyses des furanes :

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

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

I.9.3.3 Analyses des gaz dissous :

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

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

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

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

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

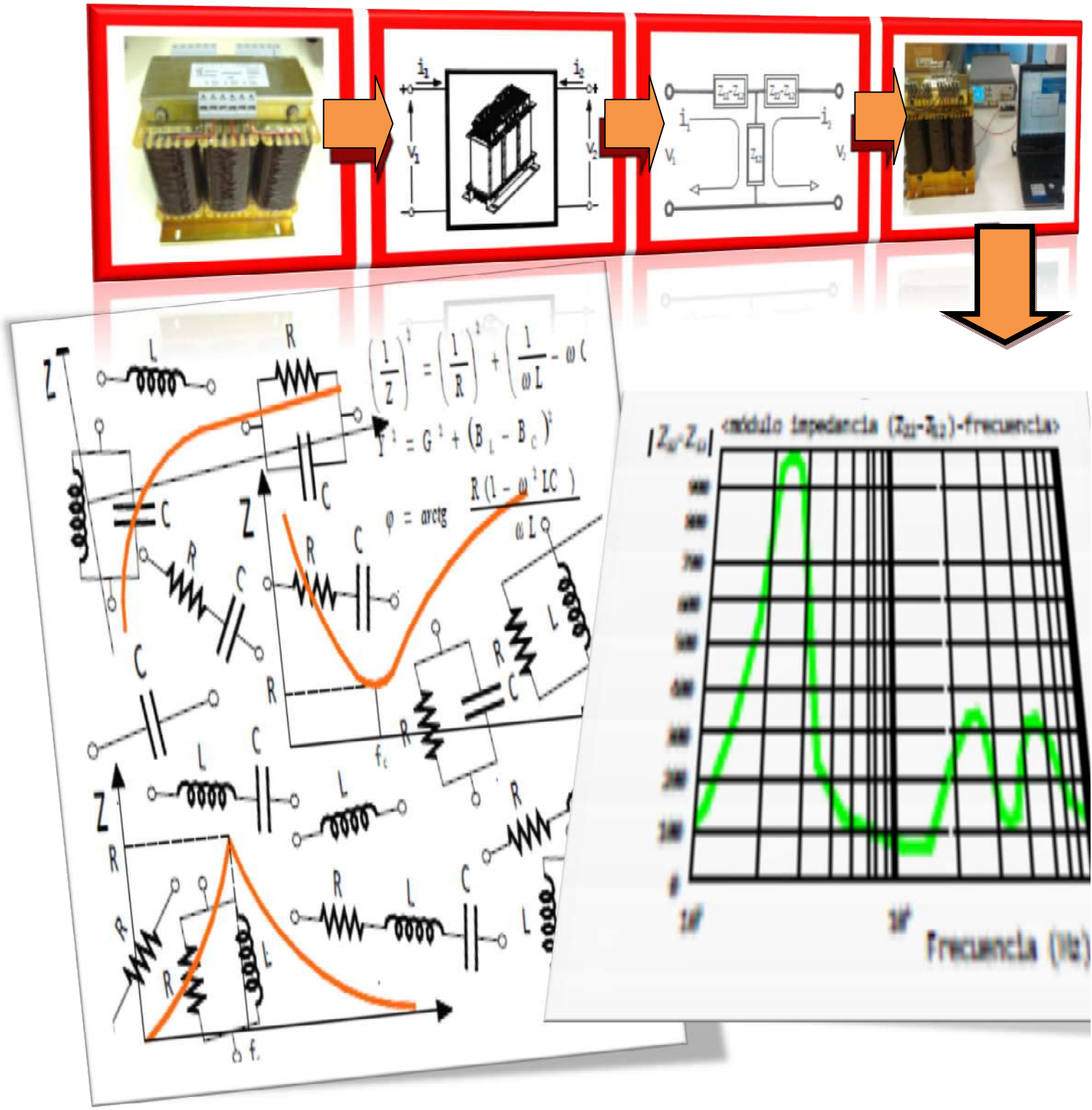
Sont des techniques bien connu dans l'industrie, consiste à expliquer les résultats d'une recherche scientifique. Les méthodes d'interprétation les plus connues sont ceux de Rogers, Doernenburg et triangle de Duval **[27]**.

Conclusion :

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

Chapitre II

Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle



Introduction :

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

II.1 L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) :

II.1.1 Définition :

La technique d'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est une méthode qui permet de détecter les défauts mécaniques dans le transformateur. La réponse FRA d'un transformateur est déterminée par sa géométrie et les propriétés de son matériau. Cette réponse peut être considérée comme l'empreinte du transformateur. Tout changement mécanique et /ou électrique dans le transformateur engendre la modification de la réponse fréquentielle de ses enroulements **[28].**

II.1.2 principe de fonctionnement :

Le transformateur de puissance peut être considéré comme un circuit très complexe (Fig. II.1), contenant un grand nombre de capacités, ainsi que des résistances et d'inductances. Par l'injection d'un signal d'excitation électrique sinusoïdale de faible amplitude et fréquence variable à l'enroulement, la mesure des signaux d'entrée et de sortie permet l'obtention la réponse en fréquences de l'enroulement testé qui peut être considérée comme sa fonction de transfert (Fig. II.2) **[16], [29], [30].**

Ainsi, la technologie FRA permet de détecter tout changement dans l'enroulement se traduit par la variation dans la fonction de transfert de ce dernier **[30].**

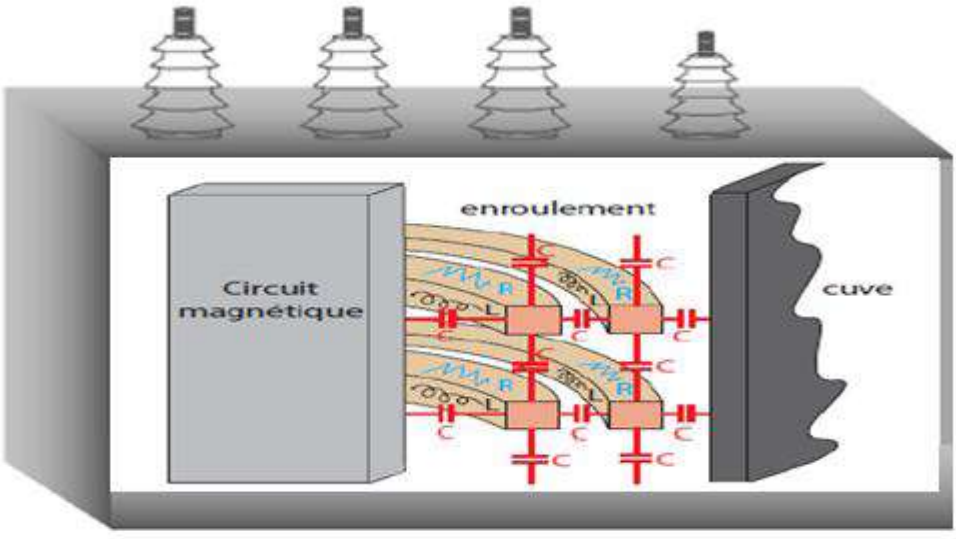


Figure II. 1: Modèle d'un enroulement de transformateur [16], [29].

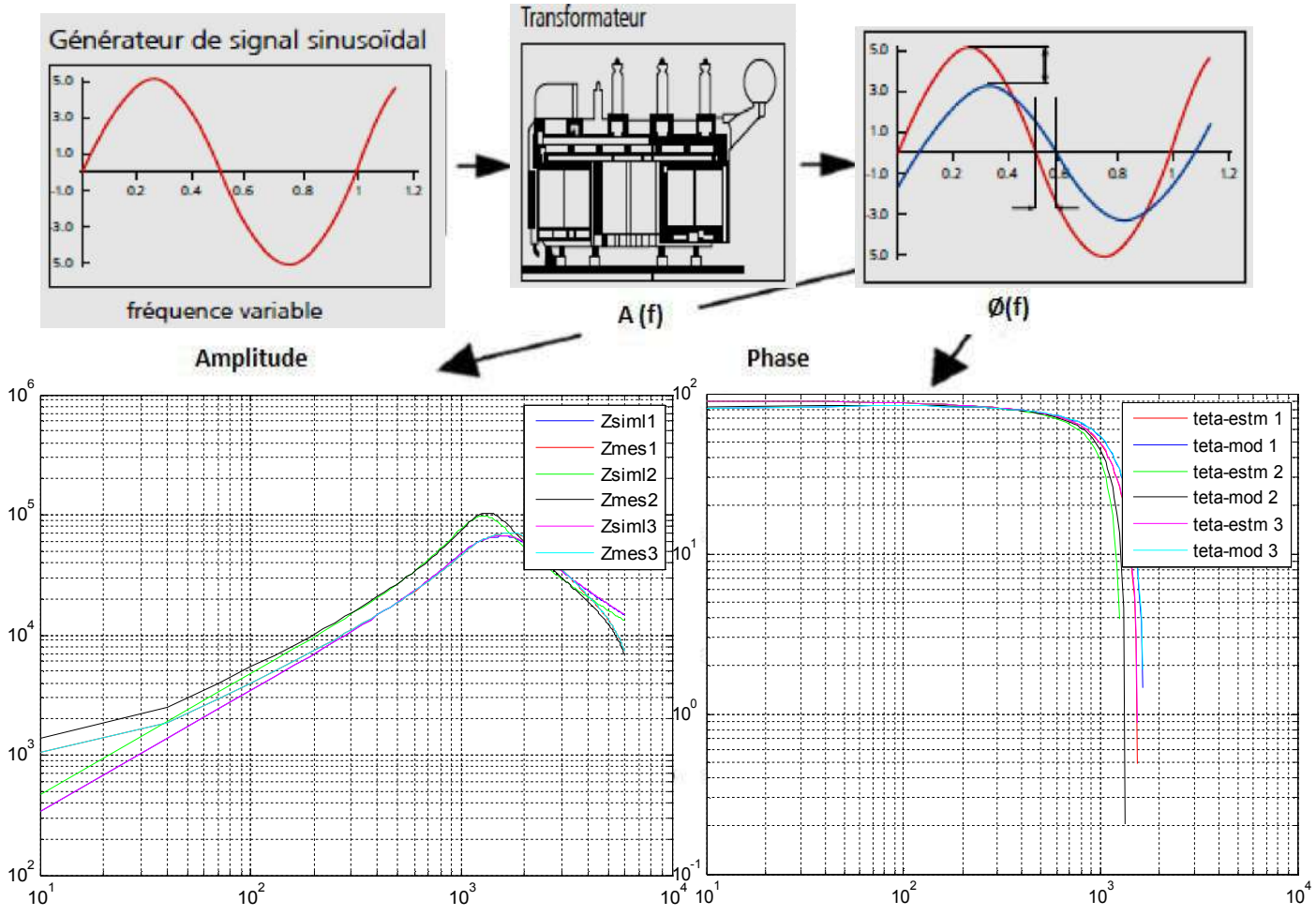


Figure II. 2 : Principe de la FRA [16].

II.1.3 Objectifs de l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) :

Le but principal et l'intérêt essentiel des mesures par FRA sur les transformateurs est de détecter **[16], [29]**:

- La déformation de la géométrie des enroulements (axiale et radiale).
- La mauvaise connexion interne, de prise de terre ou bien des barrières.
- L'effondrement partial d'un enroulement.
- Le court-circuit ou circuit ouvert d'enroulement.
- Le défaut dans le circuit magnétique.
- Le mouvement et déplacement d'enroulement haute et basse tension.

II.1.4 Les applications de test FRA :

L'utilisation de l'analyse de la réponse en fréquences est un dispensable dans plusieurs cas tels que **[16],[29]**:

- Vérification de l'intégrité des transformateurs après ayant été soumise à :
  - ✓ des courants de défaut transitoires élevés ;
  - ✓ un transport ;
  - ✓ test de court-circuit ;
  - ✓ des pannes électriques ;
- Routine de surveillance de diagnostic ;
- Dans la recherche scientifique ;
- L'évaluation de l'état d'un transformateur après les catastrophes naturelles comme les séismes.

II.2 Modélisation fréquentielle du transformateur :

Plusieurs modèles de transformateurs de puissance existent dans la littérature, chacun de ces modèle est dédie pour des études particulières telles les études des régimes transitoires, des régimes permanents, des régimes de défaut, et des régimes fréquentiels. Dans ce qui suit des modèles utilisés dans l'étude des régimes transitoires et fréquentiels seront présentés.

II.2.1 Modèle de Morched (modèle universel EMTP) :

Ce modèle est utilisé dans EMTP (Programme des transitoires électromagnétiques) pour étudier les comportements des réseaux électriques, en régime transitoire. Il est utilisé comme un standard dans les études temporelles et fréquentielles **[31]**. L'utilisation de ce code de calcul, pour modéliser un transformateur consiste à représenter ce dernier par un schéma électrique équivalent, comprenant **[31]** , **[32]** :

- o Des transformateurs parfaits;
- o Une branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer ;
- o Des inductances de fuite des groupes (galettes, couches, ou bobines) ;
- o 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 **[31]**.

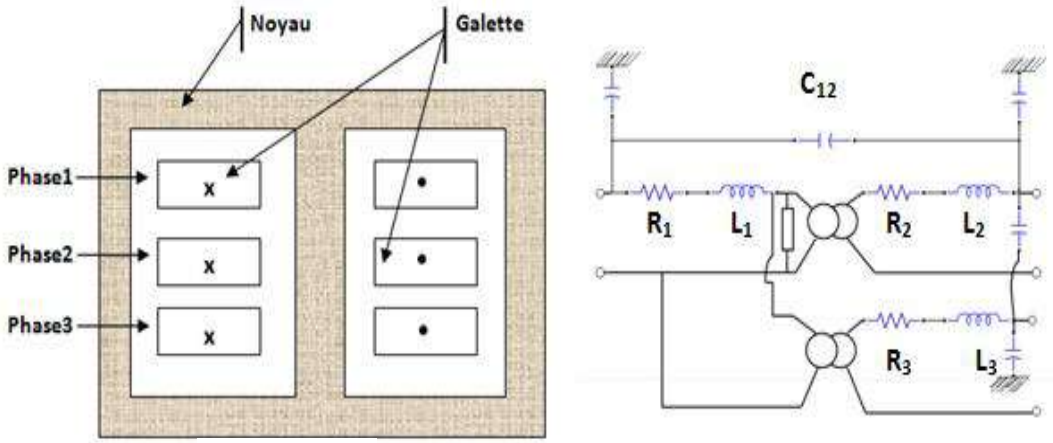


Figure II. 3 : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP [31].

a) Coupe transversale du transformateur.
b) Circuit équivalent.

L'avantage d'utilisation du modèle EMTP est qu'on peut effectuer des études d'interaction du transformateur avec le réseau dans des configurations quasi-réelles, et traite tous les éléments linéaires et non linéaires tels que les parafoudres **[33]**. Cependant, ce modèle ne convient pas aux études internes du transformateur **[31]**, **[34]**.

II.2.2 Le modèle RESEL :

RESEL est un code de calcul développé par des Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité de France **[31]** , et à comme but principal d'étudier les phénomènes transitoires dans les réseaux électriques, en particulier dans les transformateurs, dans le domaine temporel, Son utilisation, pour modéliser un transformateur nécessite deux types de schémas, couplés entres eux **[31]** , **[34]** :

Un schéma (Fig.II.4.b) qui traduit le comportement électrique du transformateur et un schéma (Fig.II.4.c) qui traduit son comportement magnétique.

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,
- ✓ les sources du circuit magnétique liées aux courants dans les enroulements.

La figure. II.4 illustre la modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL **[31]**.

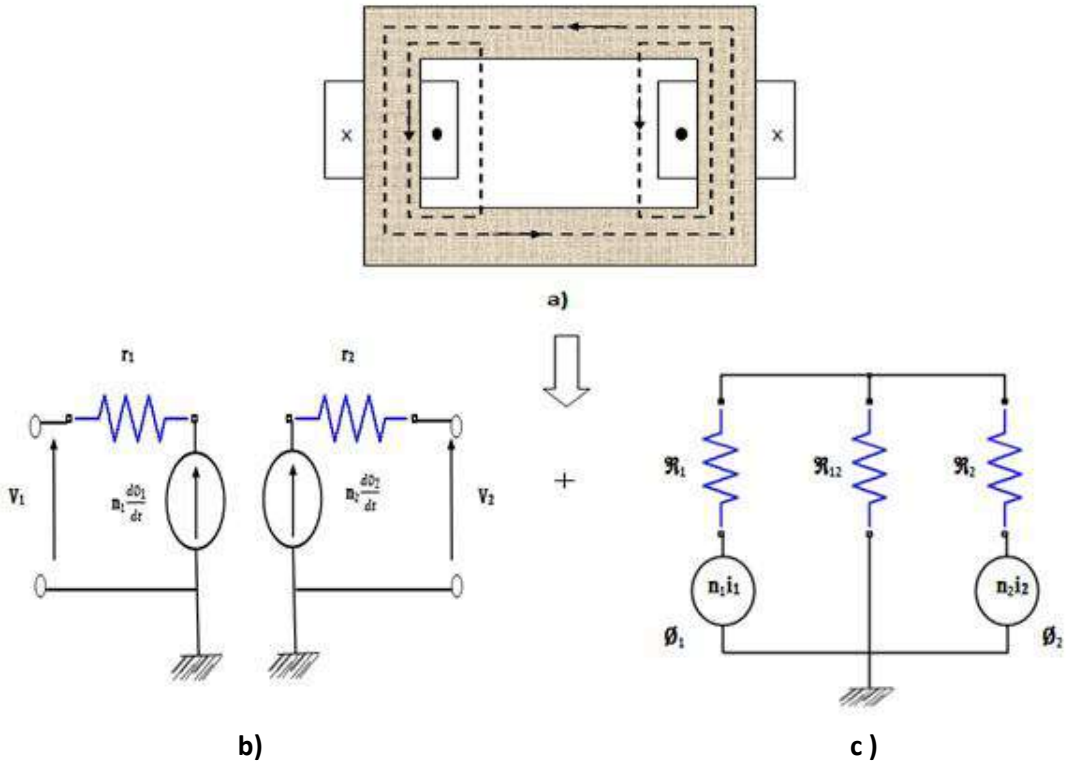


Figure II. 4 : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL [31].

a) Coupe transversale d'un transformateur à 2 enroulements.
b) Le circuit électrique correspondant.
c) Le circuit magnétique correspondant.

II.2.3 Modèle de LEON :

Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau **[2]**. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés **[35], [36]** :

- Une matrice d'inductances de fuite entre les paires de spires (ou sections/galettes).
- Une matrice de capacités entre spires (ou sections/galettes) et entre les spires et les masses.
- Une matrice de résistance, qui dépend de la fréquence et qui tient compte des courants 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 (Fig.II.5) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne **[2]**.

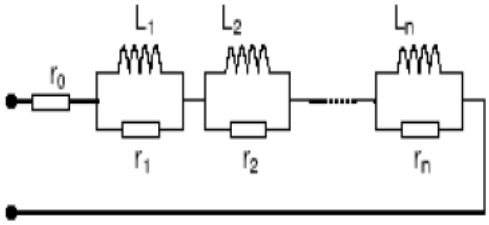


Figure II. 5 : Circuit de Foster en série [35].

Pour le noyau, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de Cauer, (Fig. II.6) **[36]**.

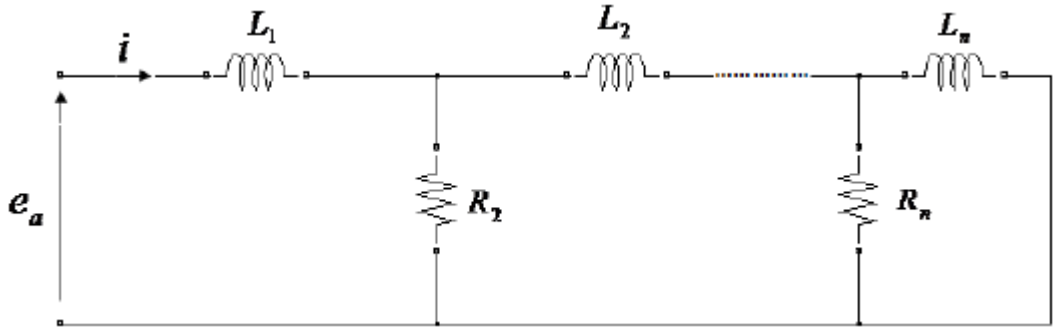


Figure II. 6: Modèle de Cauer pour le noyau de fer [35].

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 **[2]**.

II.2.4 Modèle de Chimklai :

Ce modèle (Fig. II.7) se base sur le modèle classique du transformateur **[37]**. Ensuite pour modéliser le transformateur en régime fréquentiel, les capacités et les circuits R, L, C, sont synthétisés par les mesures et ajoutés dans le circuit du modèle classique. En effet, chaque circuit rajouté représente un phénomène qui se produit en régime fréquentiel. Les capacités représentent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer…etc **[37].**

Cette idée est la base pour établir plusieurs modèles qui sont développés par la suite.

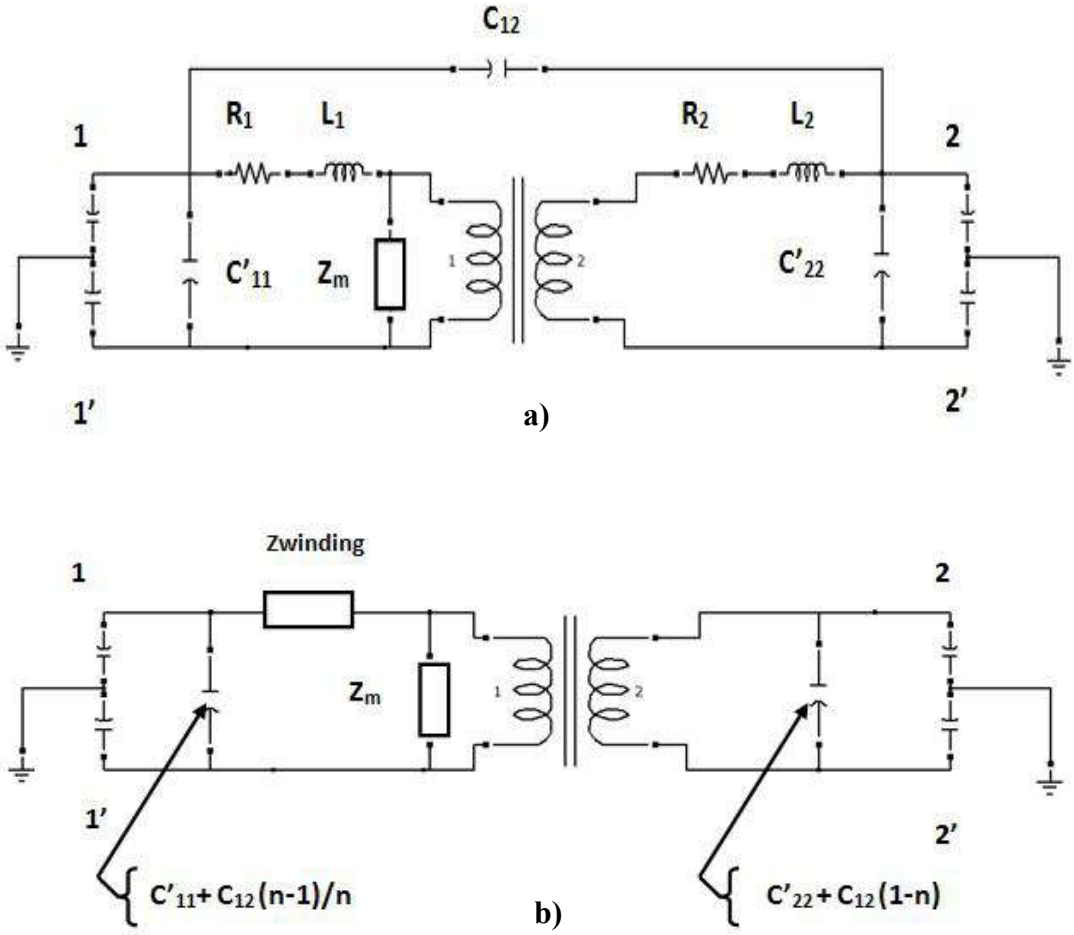


Figure II. 7 : Modèle du transformateur de Chimklai [37].

a) - circuit d'origine.

b) - circuit simplifié.

La considération de la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, dite l'impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$) **[37]**.

Le rajout d'un système de capacités dont les capacités entre enroulements, les capacités entre enroulement et la masse, et celles entre les spires d'un enroulement. Elles sont toutes supposées constantes dans la gamme de fréquence étudiée. Toutes ces capacités sauf la capacité entre les spires d'un enroulement, peuvent être divisées en deux et dont chaque partie est connectée à une extrémité de l'enroulement **[37]**.

II.2.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles :

La modélisation par inductances propres et mutuelles utilise un réseau équivalent des résistances, inductances et des capacités. 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 **[38], [40 - 42].**

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes (Fig. II.8) **[31]**.

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, une capacité par rapport à la masse**[31]**.

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 **[31] , [39]**.

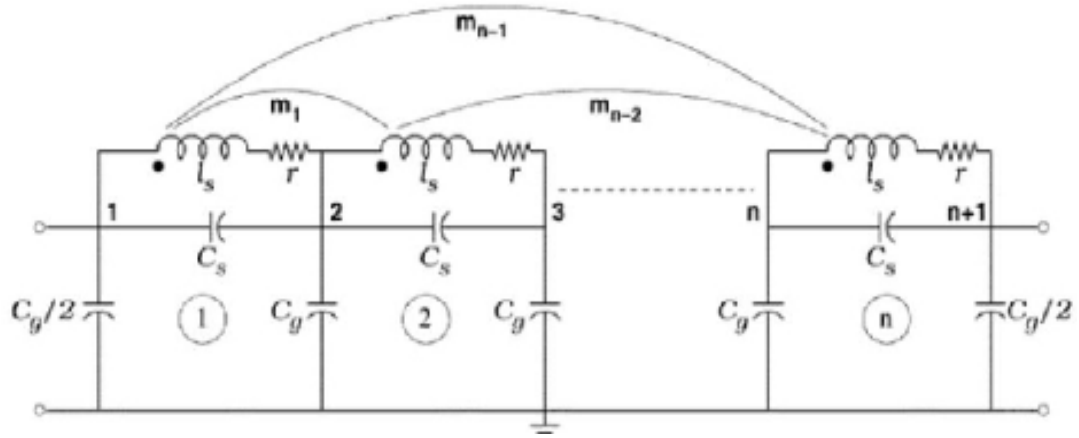


Figure II. 8 : Modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié [38].

II.2.6 Modèle d'Andrieu :

C'est un modèle de transformateur de distribution triphasée à deux enroulements par des principes comme dans le modèle de Chimklai (Fig.II.9). Pour modéliser un transformateur en régime fréquentiel **[43] , [44]**, les phénomènes suivants sont pris en compte**[44]** :

- les capacités.
- les résonances dans l'enroulement HT.
- L'impédance de l'enroulement de BT, dépendant de la fréquence ($\mathbf{Z_{cc}}$).

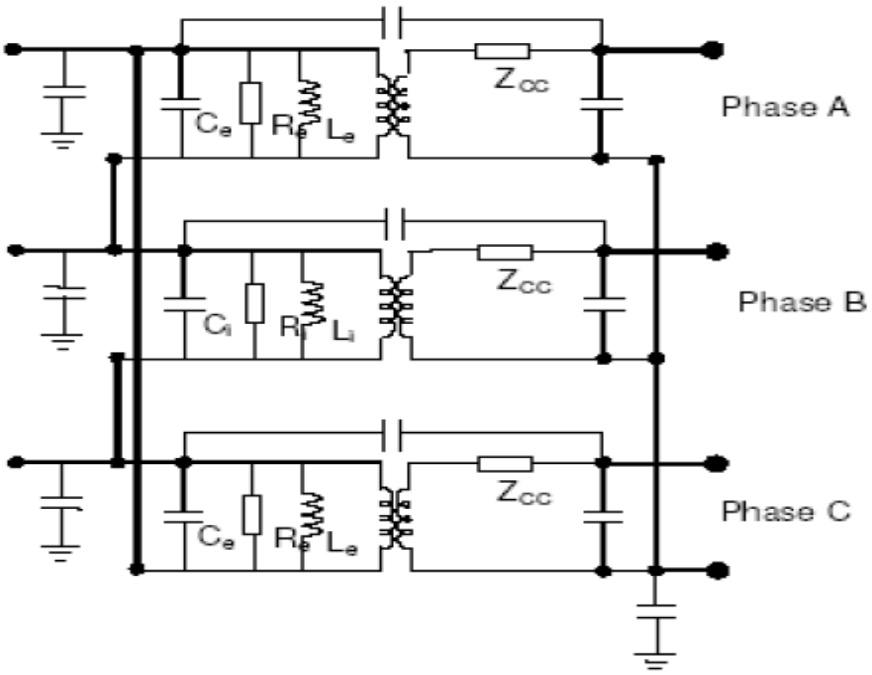


Figure II. 9 : Modèle d'Andrieu [43], [44].

La procédure de calcul des paramètres de ce modèle ; est basée sur les mesures des capacités, les mesures des grandeurs électriques en court-circuit et en circuit ouvert. Mais la fréquence limite dans laquelle le modèle est valable reste inférieure à 1MHz.

Le circuit équivalent de l'impédance Zcc est montré dans la figure. II.10 **[43] , [44]**:

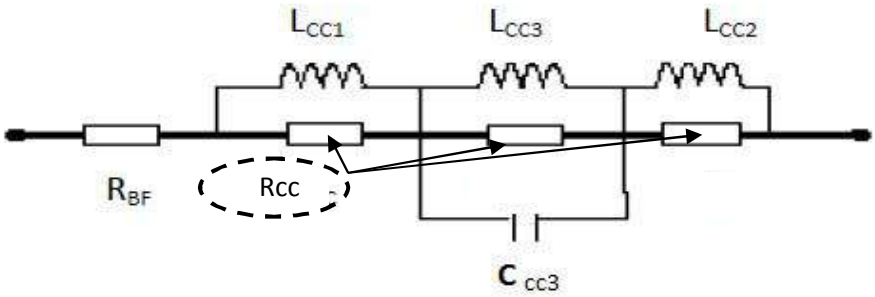


Figure II. 10 : Circuit équivalent de Zcc [44].

II.2.7 Modèle en π du transformateur :

La structure de ce modèle est basée sur la théorie du quadripôle en π. Elle établit la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes d'entrée et de la sortie d'une phase du transformateur, les impédances obtenues sont exploitées pour construire un modèle en π du transformateur illustré dans la figure. II.11 **[45]**.

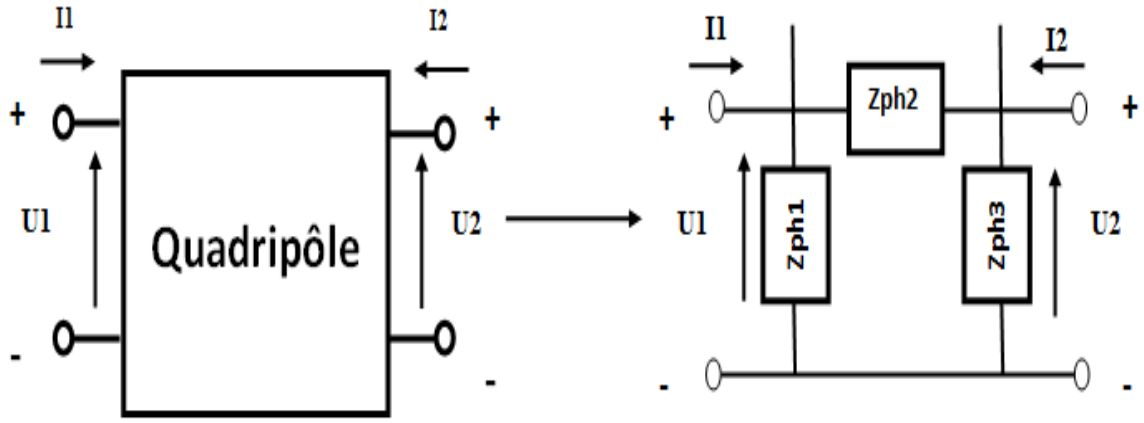


Figure II. 11: Structure de modèle d'un quadripôle [45].

Le circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases est montré dans la figure. II.12 **[47]**.

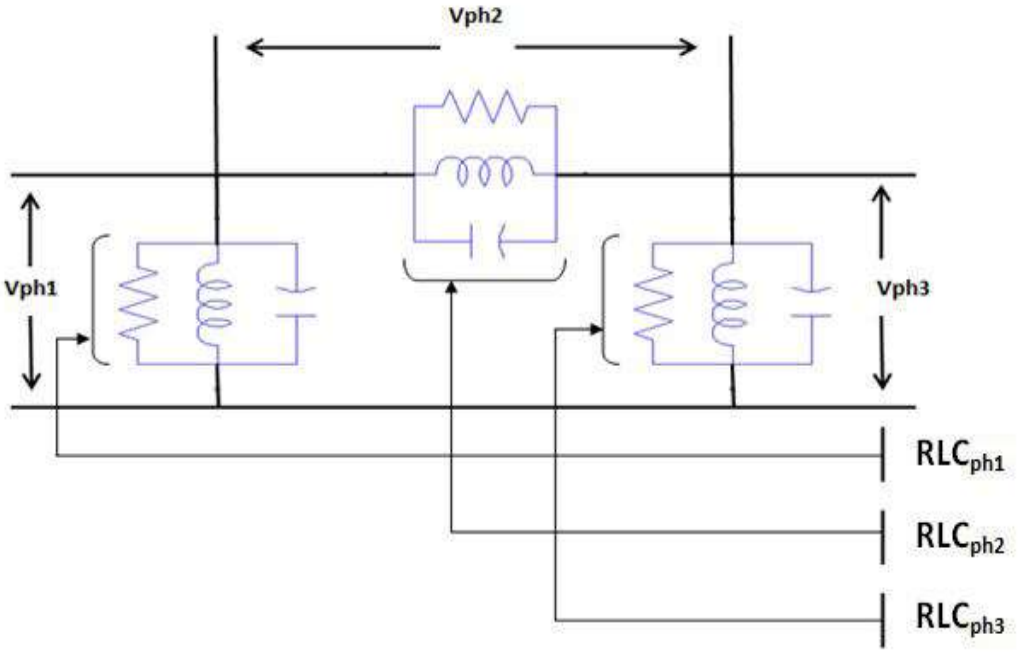


Figure II. 12 : Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases [47].

L'analyse théorique repose sur le circuit RLC parallèle, comme le montre sur la figure. II.13 **[48].**

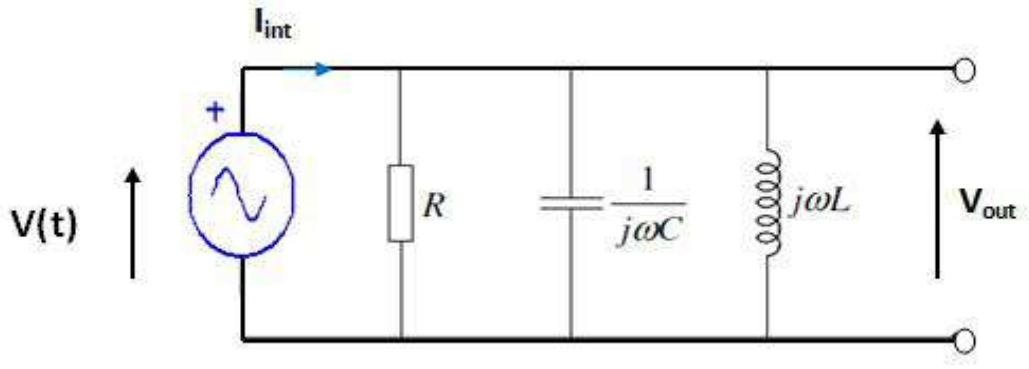


Figure II. 13 : Circuit parallèle RLC [48].

La tension de sortie V_{out} en V (Volt), est définit en (II.1), où I_{int} est le courant délivré par la source dans le circuit, en A (ampère) et l'admittance du circuit Yen S (siemens) **[48]**.

$$V_{out} = \frac{I_{int}}{Y} \qquad \text{(II.1).}$$

A partir de la caractéristique de la fonction de transfert, le module d'impédance de circuit peut être écrit comme en (II.2), où R est la résistance électrique en Ω, C est la capacité en F, L est l'inductance en H, ω est la pulsation en rd /s **[48]** .

$$\left|\frac{V_{out}}{I_{int}}\right| = \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{R})^2+(C\omega-\frac{1}{L\omega})^2}} \qquad \text{(II.2).}$$

L'admittance complexe du circuit est donnée par :

$$Y = \frac{1}{R} + jC\omega + \frac{1}{jL\omega} = \frac{1}{R} + j(C\omega - \frac{1}{L\omega}) \qquad \text{(II.3).}$$

A la pulsation de résonance ω_0, Y est réel :

$$C\omega_0 = \frac{1}{L\omega_0} \quad \rightarrow \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \text{(II.4).}$$

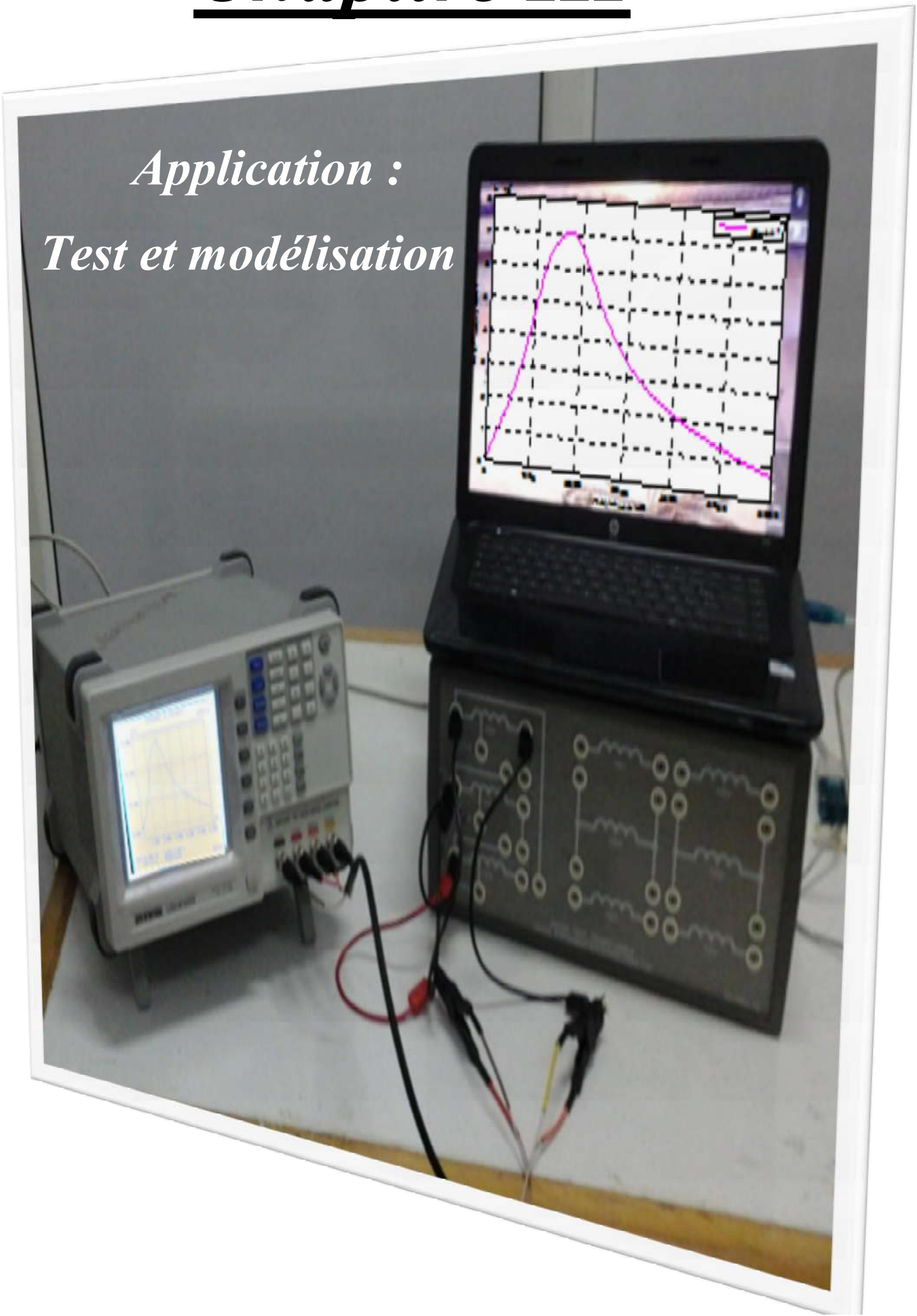
Pour ω_0 :
- Y est minimum.
- Z est maximum.

Conclusion :

Vu l'importance capitale du transformateur dans les réseaux électriques sa surveillance permanente est indispensable, ce chapitre est consacrée une méthode récente de la détection de défaillances dans l'enroulement du transformateur qui est basée sur l'analyse de sa réponse fréquentielle et afin de comprendre le comportement fréquentiel du transformateur une revue succincte de quelques modèles des enroulements est présentée.

Le modèle que nous avons jugé plus approprié à notre étude est celui basé sur la théorie du quadripôle, car il permet d'établir la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes d'entrée et la sortie d'une phase du transformateur, et les impédances constituant un quadripolaire de type π. Le calcul des paramètres de ce modèle sera effectué en se moyennant de trois méthodes distinctes, et ceci fera l'objet de la première partie du prochain chapitre.

Chapitre III



Application :

Test et modélisation

Introduction :

Dans ce chapitre le modèle en π de l'enroulement primaire d'un transformateur triphasé a été validé expérimentalement sur un transformateur triphasé de laboratoire de puissance nominale 300 VA couplé en étoile. Ce modèle est exploité dans le but d'identifier les paramètres d'un modèle de base d'un transformateur de puissance en basses fréquences d'une part et d'autre part l'étude des différentes défaillances dans l'enroulement de ce transformateur.

L'objectif principal est la détection et la classification des défauts (résistifs, inductifs et capacitifs) dans un enroulement de transformateur de puissance par l'observation de la variation entre les grandeurs mesurées par rapport à une signature de référence d'un enroulement sain. 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 Objectifs de l'étude :

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- Présenter la procédure de calcul des paramètres.
- Calculer l'impédance de chacune des phases à partir de la mesure réelle, dans le but d'identifier les paramètres du modèle proposé.
- Optimiser l'allure de la réponse en fréquence des différentes phases en basses fréquences (BF), en utilisant trois méthodes différentes.

III.3 Méthodologie de calcul des paramètres :

Afin de déterminer les paramètres du modèle adopté en BF pour l'enroulement HT du transformateur test, on propose la méthodologie suivante :

1. Un test FRA est réalisé sur chacune des trois phases du transformateur.
2. Une analyse de la réponse fréquentielle obtenue permet le calcul des paramètres du modèle adopté en utilisant différentes méthodes. Dans notre cas trois procédures sont utilisées :
    - Méthode analytique d'estimation des paramètres.
    - Méthode basée sur l'analyse de la réponse fréquentielle.
    - Méthode intelligente (ABC).
3. A l'issue des trois méthodes utilisées, un circuit composé de cellule RLC est synthétisé dont sa réponse en fréquences et ensuite comparée à la réponse mesurée dans l'objectif de la comparaison des trois méthodes utilisées d'une part, d'autre part l'utilisation du schéma synthétisé comme une référence pour la détection et la classification de défaillances dans les phases de transformateur.

III.4 Essais expérimentaux en basse fréquence :

III.4.1 Description du banc d'essai :

Les essais sont effectués du côté primaire d'un transformateur triphasé (300VA, 230/115-50Hz) dans une gamme de fréquences variant de 10Hz à 6000Hz. Un analyseur fréquentiel est utilisé pour prélever les données en spectre de fréquences souhaitées et transmis à travers le RS232 vers un ordinateur; un logiciel approprié est utilisé pour le traitement des données.

Les figures (III.1) et (III.2) représentent respectivement le banc d'essai et le schéma de montage réalisé afin d'identifier les paramètres du modèle adopté.

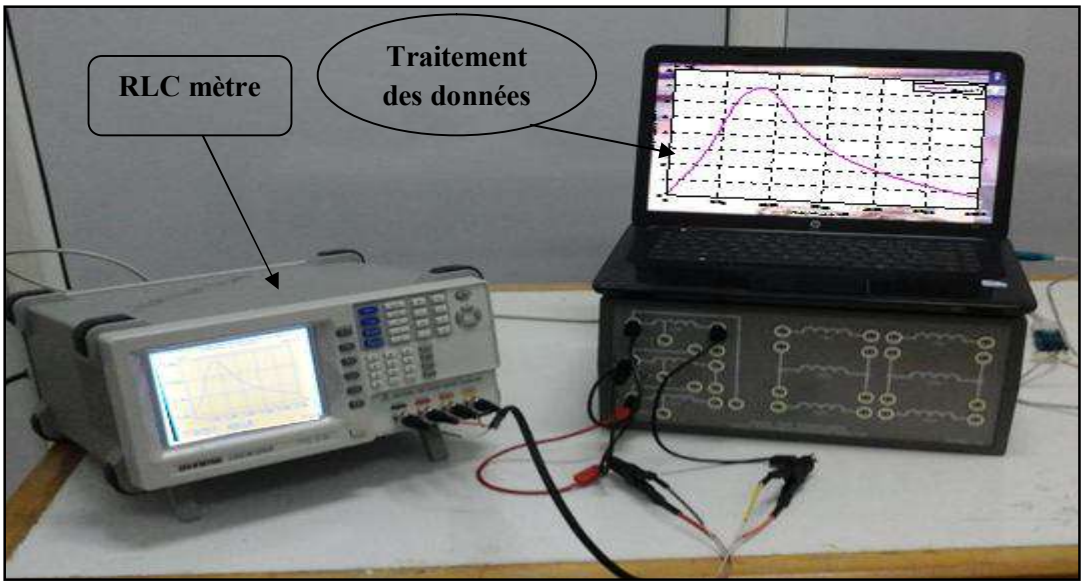


Figure III. 1 : Banc d'essai expérimental **(Photo personnelle, 2017).**

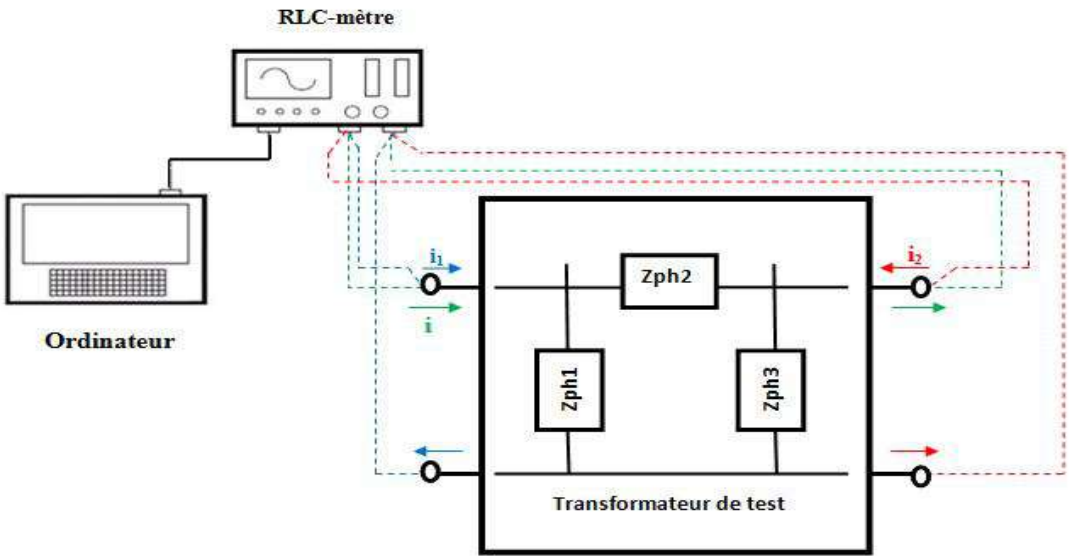


Figure III. 2 : Schéma illustratif des essais pour la détermination des impédances Z_{mes1}, Z_{mes2} et Z_{mes3} à partir des essais en régime fréquentiel.

III.4.2 Mesure de l'impédance Zmes1 :

La mesure de l'impudence $\mathbf{Z_{mes1}}$ est effectuée du côté primaire du transformateur à l'aide d'un analyseur de fréquence comme le montre la figure III.3.

$$Z_{mes1} = Z_{ph1} || (Z_{ph2} + Z_{ph3}) \qquad \text{(III.1).}$$

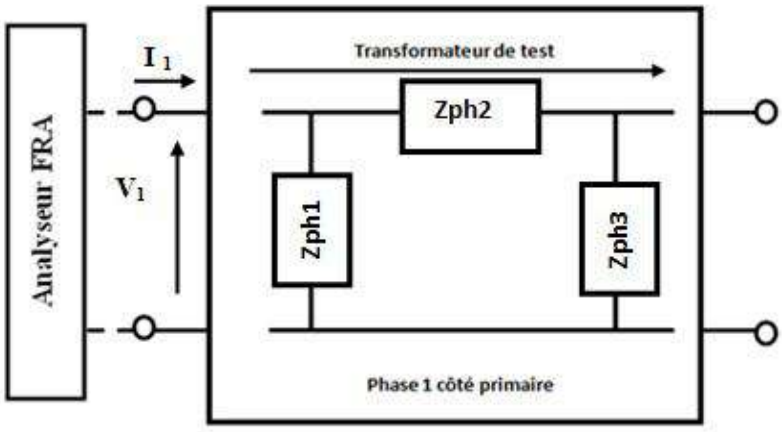


Figure III. 3 : Mesure de l'impédance $\mathbf{Z_{mes1}}$.

La figure III.4 représente le module de l'impédance $\mathbf{Z_{mes1}}$ mesurée d'une phase primaire du transformateur triphasé en fonction de la fréquence.

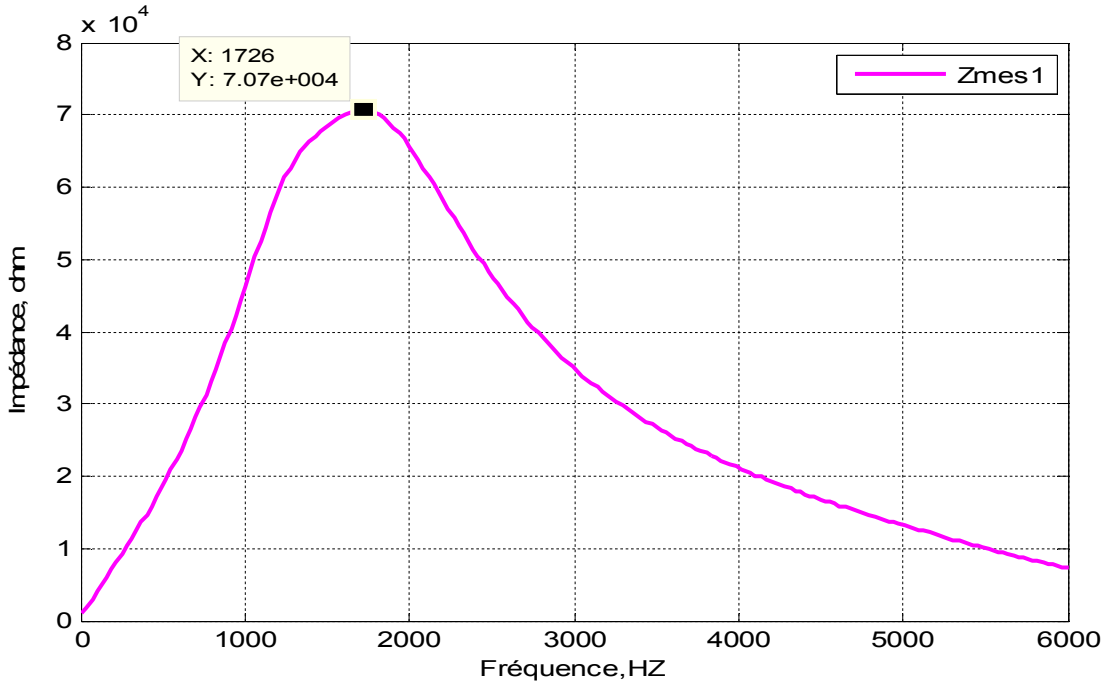


Figure III. 4 : Module de l'impédance Z_{mes1} en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

III.4.3 Mesure de l'impédance Zmes2 :

La mesure de l'impudence $\mathbf{Z_{mes2}}$ est montrée sur la figure III.5.

$$Z_{mes2} = Z_{ph2} || (Z_{ph1} + Z_{ph3}) \qquad \text{(III.2).}$$

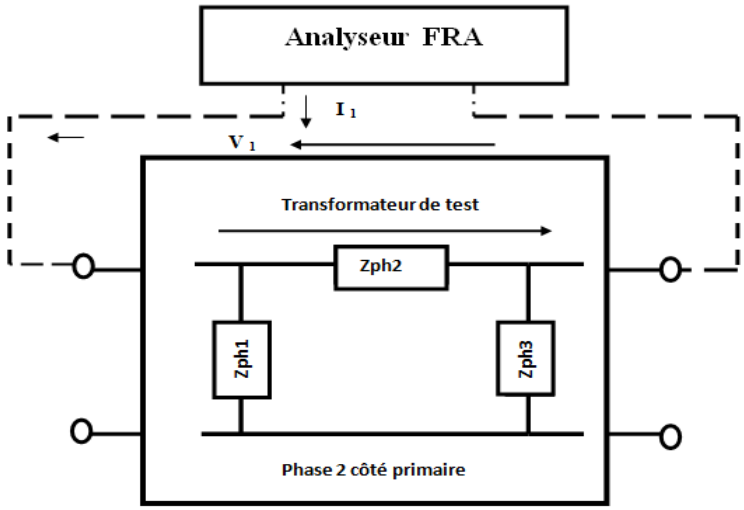


Figure III. 5 : Mesure de l'impédance $\mathbf{Z_{mes2}}$.

La figure III.6 représente le module de l'impédance $\mathbf{Z_{mes2}}$ mesurée de la seconde phase du transformateur triphasé en fonction de la fréquence.

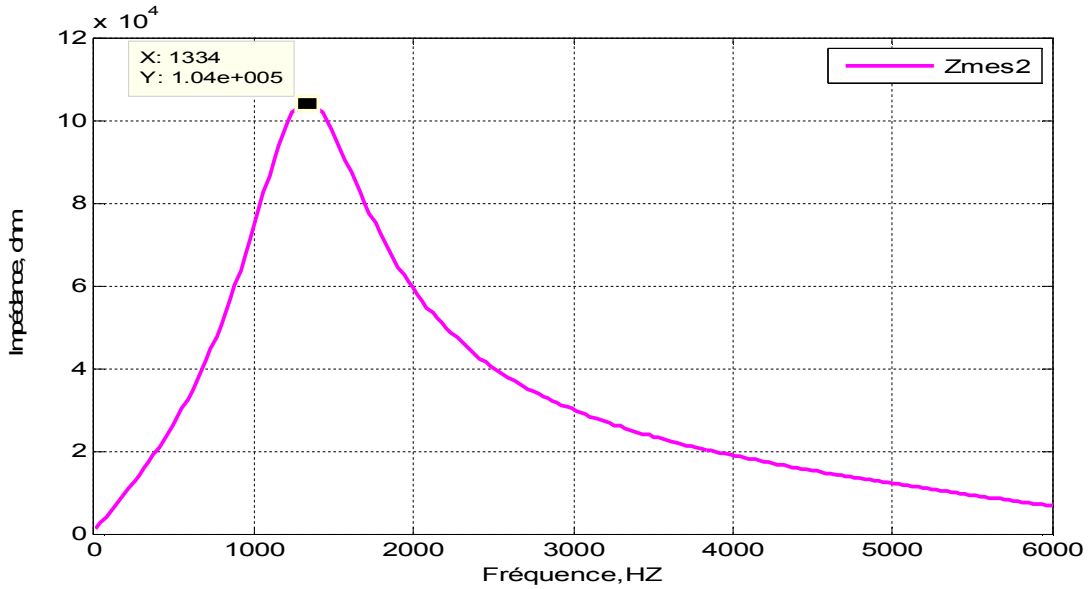


Figure III. 6: Module de l'impédance Z_{mes2} en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

III.4.4 Mesure de l'impédance Zmes3 :

La mesure de l'impudence $\mathbf{Z_{mes3}}$ est représentée sur la figure III.7.

$$Z_{mes3} = Z_{ph3} || (Z_{ph1} + Z_{ph2}) \qquad \text{(III.3).}$$

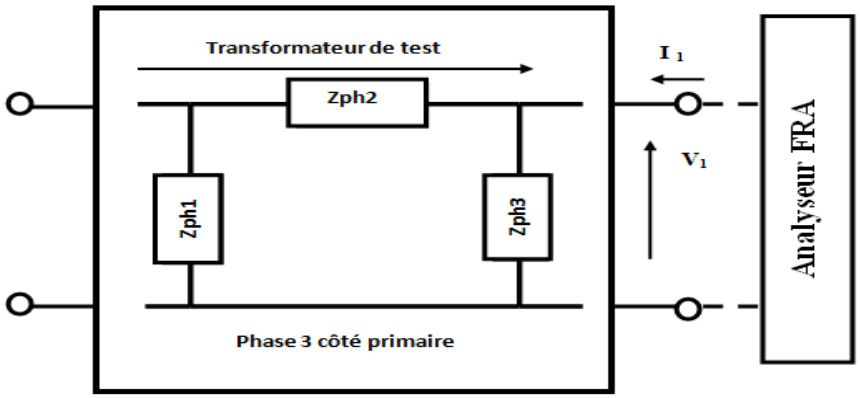


Figure III. 7 : Mesure de l'impédance $\mathbf{Z_{mes3}}$.

La figure III.8 représente le module de l'impédance $\mathbf{Z_{mes3}}$ mesurée de la troisième phase du transformateur triphasé en fonction de la fréquence.

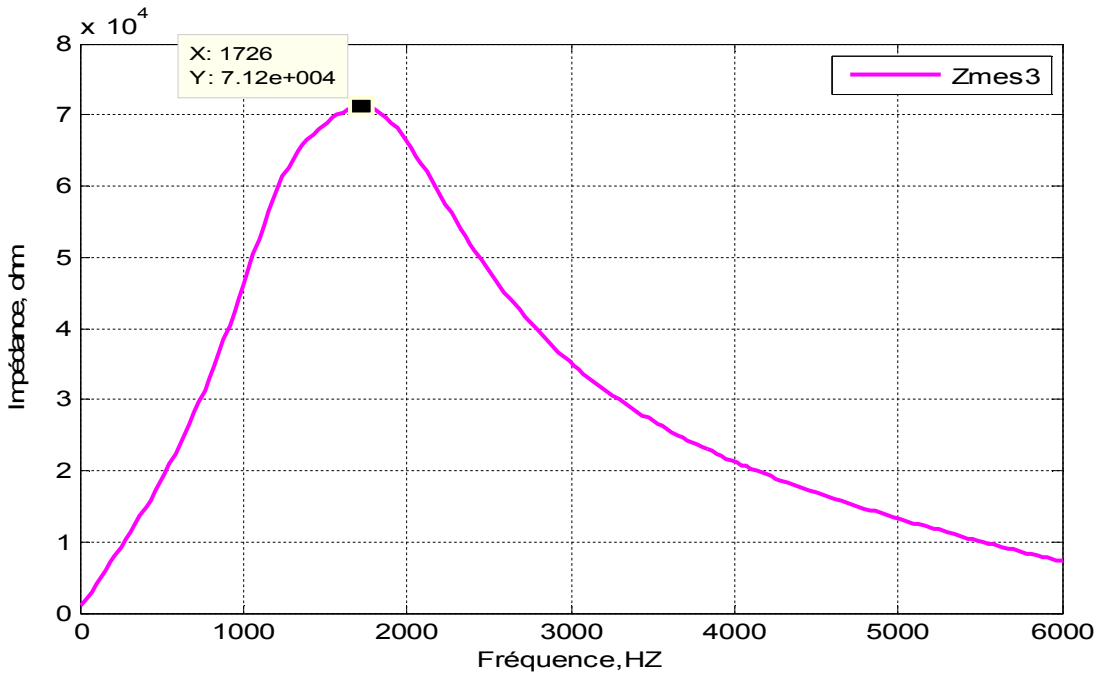


Figure III. 8 : Module de l'impédance Z_{mes3} en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

III.5 Présentation du modèle adopté :

Cette partie présente l'étude de la configuration RLC proposée, et la détermination des valeurs des paramètres de chaque cellule **[48]**.

Le modèle illustré par la figure III.9 à pour objectif de fournir un outil de simulation et d'analyse au comportement du transformateur **[48]**. Ce modèle est basé sur la mesure de la réponse fréquentielle de l'impédance du transformateur.

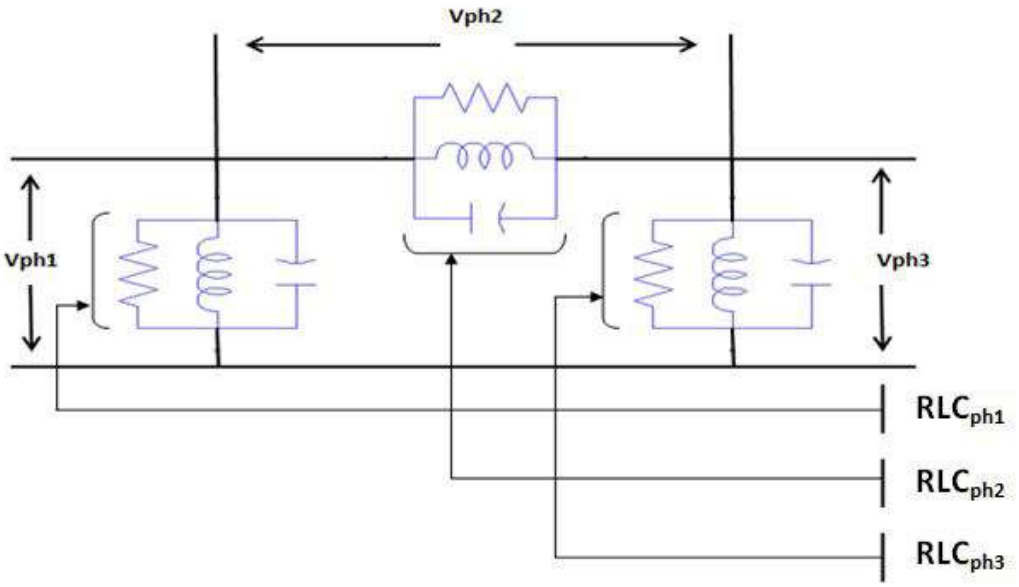


Figure III. 9 : Modèle simplifié d'un transformateur triphasé en basse fréquence [46].

Les paramètres L_{ph1}, L_{ph2} et L_{ph3} représentent les inductances de magnétisation des phases 1, 2 et 3 respectivement telles exprimées par les équations (III.4 - III.6) où $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$ *et* $\mathfrak{R}_3$ sont les reluctances magnétiques et N_1, N_2 et N_3 sont les nombres de spires sur chaque enroulement **[47]**.

Les variations des paramètres L_{ph1}, L_{ph2} et L_{ph3} peuvent indiquer des aimantations résiduelles, ou des défaillances associées au noyau magnétique **[47]**.

$$L_{ph1} = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_1} \qquad \text{(III.4).}$$

$$L_{ph2} = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_2} \qquad \text{(III.5).}$$

$$L_{ph3} = \frac{N_3^2}{\mathfrak{R}_3} \qquad \text{(III.6).}$$

Les pertes fer peuvent être représentées en ajoutant les trois paramètres résistifs R_{ph1}, R_{ph2} et R_{ph3} exprimées en (III.7- III.9) où V_{ph1}, V_{ph2} et V_{ph3} sont les tensions d'essai et P_{01}, P_{02} et P_{03} sont les pertes fer **[47]**.

Des variations dans les paramètres R_{ph1}, R_{ph2} et R_{ph3} peuvent indiquer des problèmes associés au noyau magnétique **[47]**.

$$R_{ph1} = \frac{V_{ph1}^2}{P_{01}} \qquad \text{(III.7).}$$

$$R_{ph2} = \frac{V_{ph2}^2}{P_{02}} \qquad \text{(III.8).}$$

$$R_{ph3} = \frac{V_{ph3}^2}{P_{03}} \qquad \text{(III.9).}$$

Enfin, le modèle en BF (Fig.III.9) est complété par l'addition des paramètres C_{ph} représentant la capacité d'enroulement du chacune des phases **[47]**.

Des variations dans les paramètres C_{ph1}, C_{ph2} et C_{ph3} peuvent indiquer des problèmes tels que le mouvement global des enroulements **[47]**.

III.5.1 Calcul des paramètres du modèle étudié :

Le calcul des paramètres du modèle en BF du transformateur évoqué précédemment (Fig.III.9) est d'effectué de le cadre de notre étude par trois méthodes différentes. Dans ce qui suit ; ces méthodes seront mises en relief.

III.5.1.1 Méthode analytique d'estimation des paramètres:

La méthode d'estimation analytique décrit une méthodologie pour estimer les paramètres du modèle en basses fréquences d'un transformateur triphasé, en utilisant uniquement des données de sa réponse en fréquence **[46].**

a) Calcul des impédances Z_{ph1}, Z_{ph2} et Z_{ph3} à partir de la mesure réelle :

Le modèle de transformateur triphasé en basses fréquences résultant peut être construit par trois impédances (Z_{ph1}, Z_{ph2} et Z_{ph3}) connectées comme montré sur la figure III.10 **[46 - 47].**

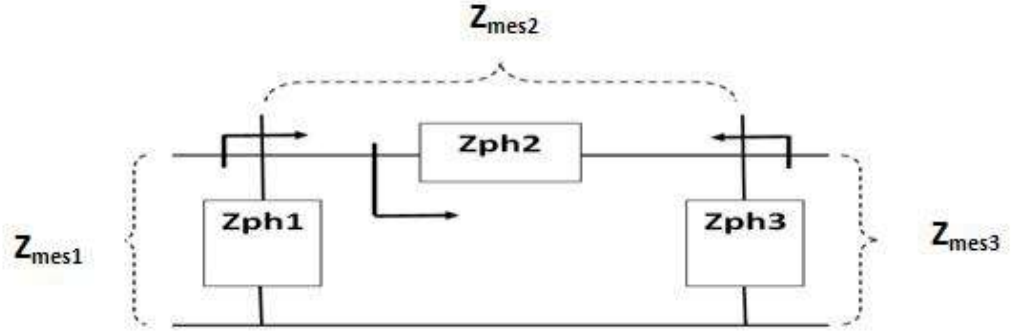


Figure III. 10: Modèle d'un transformateur triphasé représenté par trois impédances Z_{ph1}, Z_{ph2} et Z_{ph3} [47].

Les équations (III.10 - III.12) indiquent les impédances mesurées et modélisées comme suit:

$$Z_{mes1} = Z_{ph1}||(Z_{ph2} + Z_{ph3}) = \frac{Z_{ph1}*(Z_{ph2}+Z_{ph3})}{Z_{ph1}+Z_{ph2}+Z_{ph3}} \quad \text{(III.10).}$$

$$Z_{mes2} = Z_{ph2}||(Z_{ph1} + Z_{ph3}) = \frac{Z_{ph2}*(Z_{ph1}+Z_{ph3})}{Z_{ph1}+Z_{ph2}+Z_{ph3}} \quad \text{(III.11).}$$

$$Z_{mes3} = Z_{ph3}||(Z_{ph1} + Z_{ph2}) = \frac{Z_{ph3}*(Z_{ph1}+Z_{ph2})}{Z_{ph1}+Z_{ph2}+Z_{ph3}} \quad \text{(III.12).}$$

Donc, le système d'équation des impédances Z_{ph1}, Z_{ph2} et Z_{ph3} est donnée par les équations (III.13 - III.15) respectivement.

$$Z_{ph1} = \frac{Z_{mes1}^2+Z_{mes2}^2+Z_{mes3}^2-2*(Z_{mes1}*Z_{mes2}+Z_{mes1}*Z_{mes3}+Z_{mes2}*Z_{mes3})}{2*(Z_{mes1}-Z_{mes2}-Z_{mes3})} \quad \text{(III.13).}$$

$$Z_{ph2} = \frac{Z_{mes1}^2+Z_{mes2}^2+Z_{mes3}^2-2*(Z_{mes1}*Z_{mes2}+Z_{mes1}*Z_{mes3}+Z_{mes2}*Z_{mes3})}{2*(Z_{mes2}-Z_{mes1}-Z_{mes3})} \quad \text{(III.14).}$$

$$Z_{ph3} = \frac{Z_{mes1}^2+Z_{mes2}^2+Z_{mes3}^2-2*(Z_{mes1}*Z_{mes2}+Z_{mes1}*Z_{mes3}+Z_{mes2}*Z_{mes3})}{2*(Z_{mes3}-Z_{mes1}-Z_{mes2})} \quad \text{(III.15).}$$

Les figures (III.11 - III.13), représentent respectivement les modules des impédances Z_{ph1}, Z_{ph2} et Z_{ph3} calculées en fonction de la fréquence à partir des équations (III.13 - III.15).

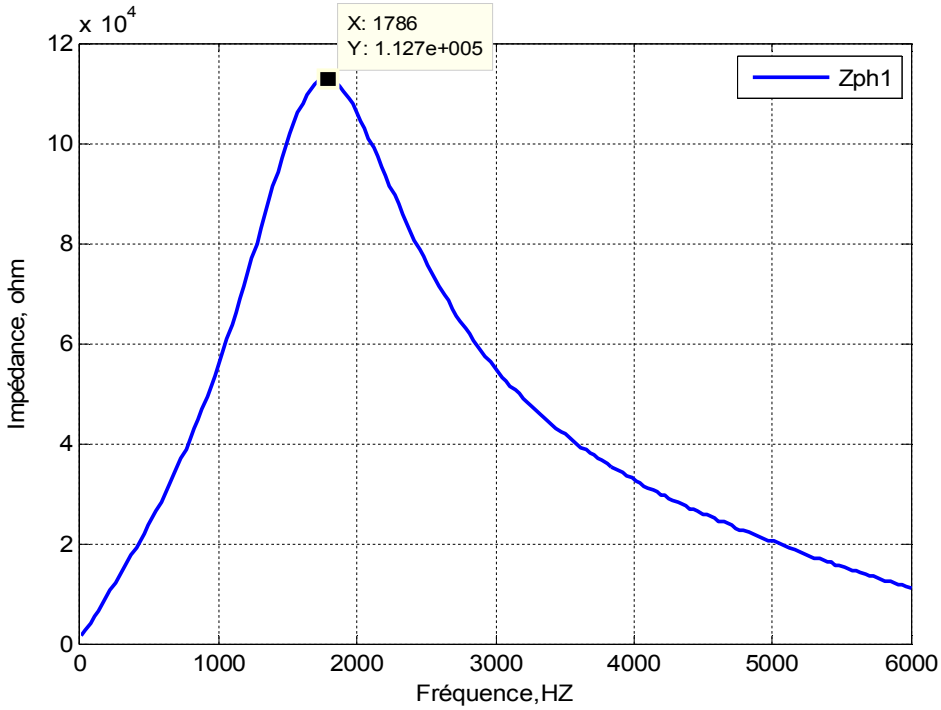


Figure III. 11 : Module d'impédance Z_{ph1} en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

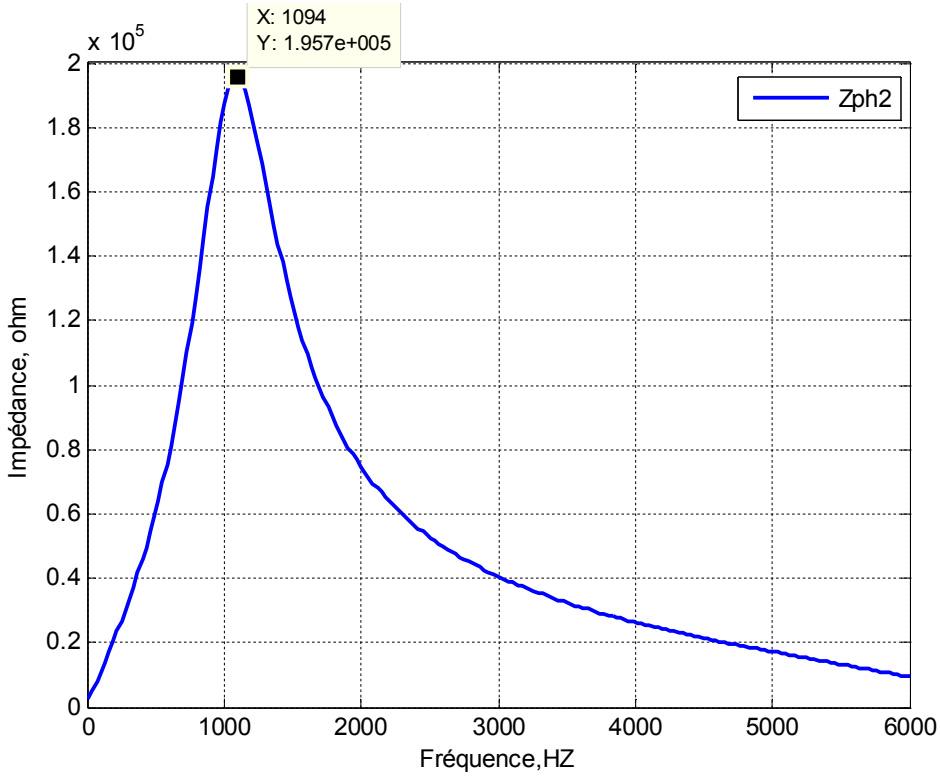


Figure III. 12 : Module d'impédance Z_{ph2} en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

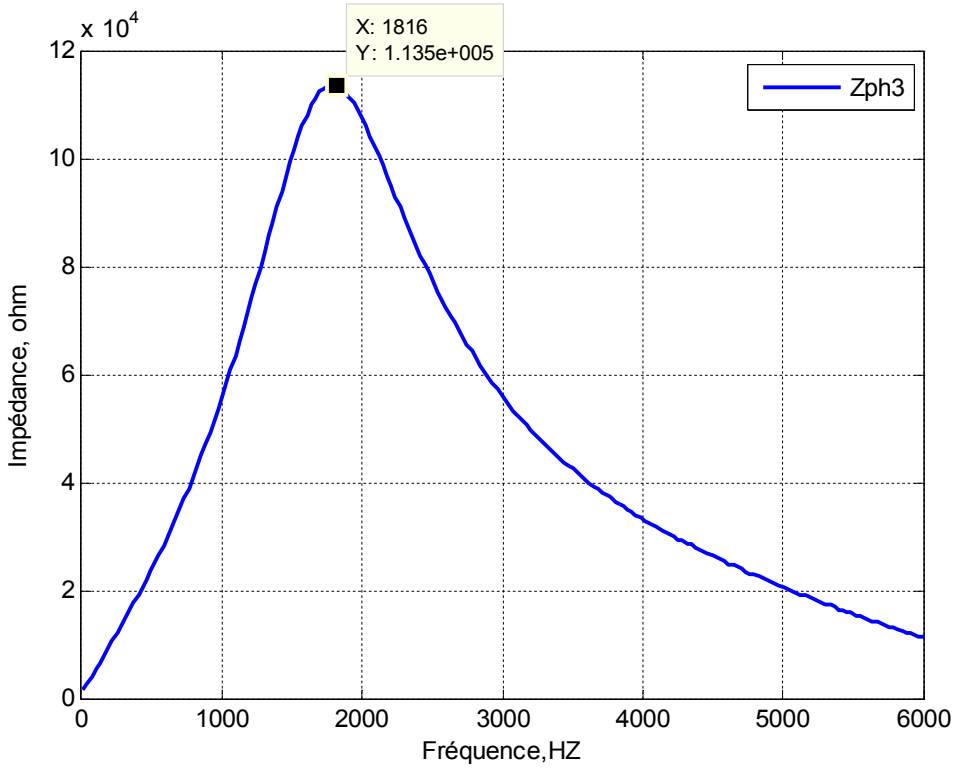


Figure III. 13 : Module d'impédance Z_{ph3} en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

b) Estimation des paramètres du modèle RLC pour chaque phase :

Le pic de résonance de l'impédance du modèle est simulé par une seule branche RLC parallèle dans une bande passante donnée **[45]**.

La courbe de résonance est simulée par une branche RLC parallèle, où la pente positive est montrée par le comportement inductif de L, la pente négative est principalement représentée par le comportement capacitif C et le pic de résonance est la valeur du paramètre R, représenté sur la figure III.14 **[47]**.

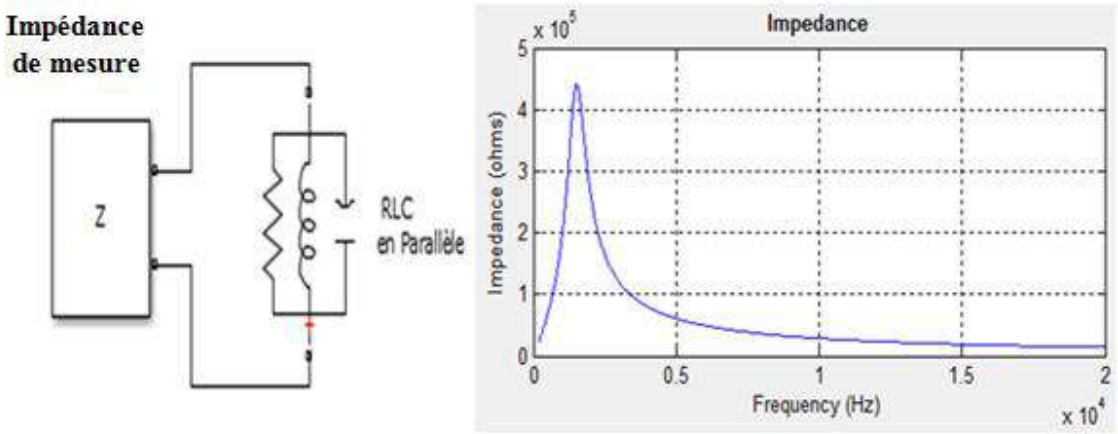


Figure III. 14 : Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur.

Les paramètres RLC sont déterminés en utilisant les équations (III.16 - III.18).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y_{(\omega_i)}|^2}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{G_X(\omega_i)}{|Y(\omega_i)|^2}} \quad \text{(III.16).}$$

$$L = \frac{(\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2})^2 - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2})}{(\sum_{i=1}^{m} \frac{B_X}{\omega * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2}) - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{B_X * \omega}{|Y|^2})} \quad \text{(III.17).}$$

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^{m} \frac{-B_X * \omega}{|Y|^2} * (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2}) + (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{B_X}{\omega * |Y|^2})}{(\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2})^2 - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2})} \quad \text{(III.18).}$$

c) Calcul de La fonction objective (l'admittance de chaque cellule RLC parallèle) :

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

La fonction objective est alors définie par (III.19).

$$\frac{1}{Z_{ph_x}} = Y_{ph_x} = G_x + j * (\omega_x * C_x - \frac{B_{L_x}}{\omega_x}) \quad \text{(III.19).}$$

Avec:

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

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

III.5.1.2 Méthode basée sur l'analyse de la réponse fréquentielle :

Cette méthode présente l'étude de la configuration proposée (cellule RLC), et la détermination des valeurs des paramètres RLC dans chaque cellule **[49]**.

La détermination des paramètres RLC du modèle étudié est compatible à l'organigramme suivant :

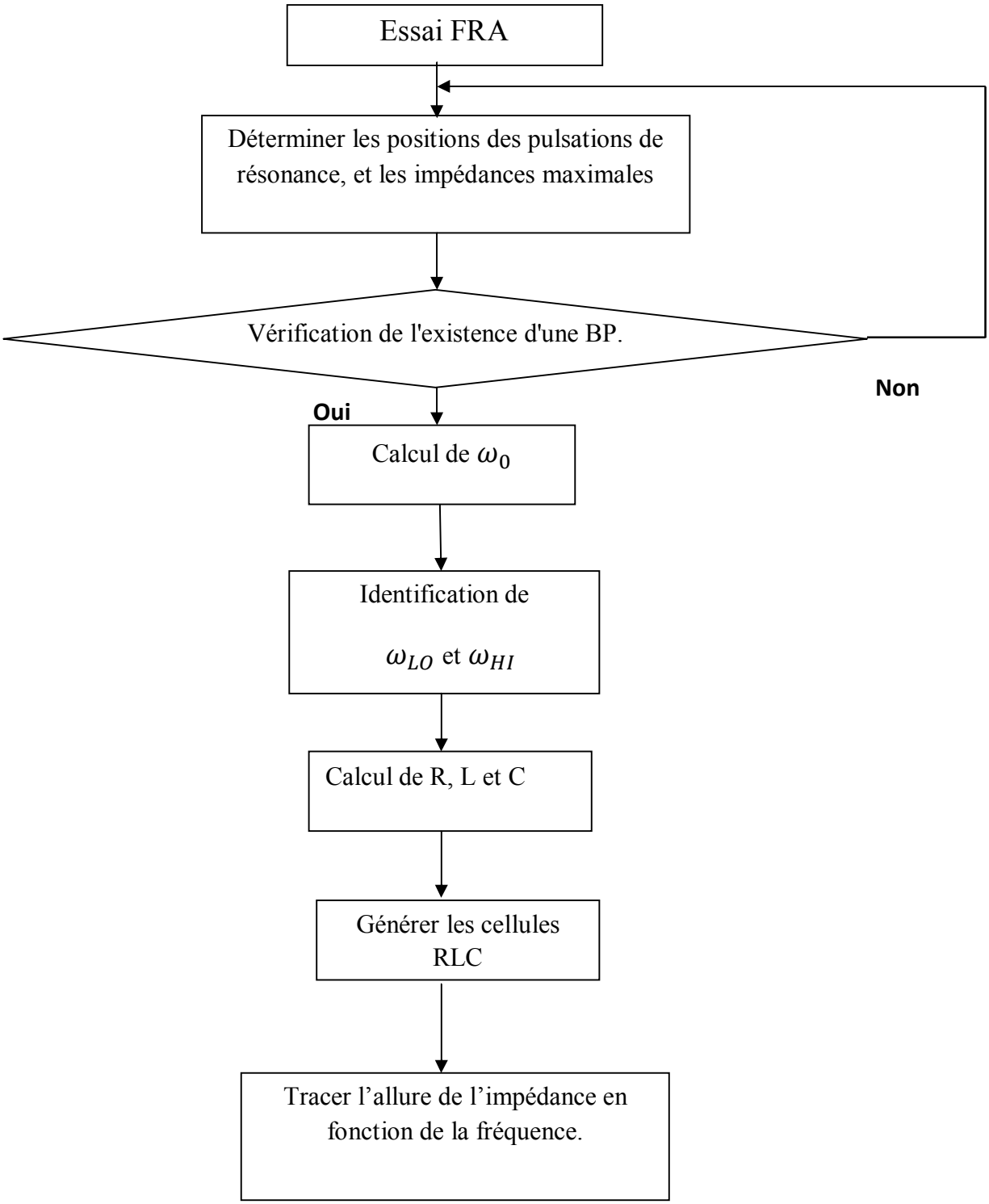


Figure III. 15 : Organigramme de calcul de Q et de BP [49].

La bande passante BP et La pulsation de résonance ω_0 sont exprimées par :

$$BP = \omega_{HI} - \omega_{LO} = \frac{1}{RC} \quad \text{(III.20).}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{(III.21).}$$

Où :

$$\omega_{L0} = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{(2RC)^2+LC}} \qquad \text{Et :} \qquad \omega_{HL} = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{(2RC)^2+LC}}$$

A partir de la largeur du BP, et la valeur de la pulsation de résonance, il est possible de déterminer le facteur de qualité (Le coefficient de surintensité) qui exprimé par :

$$Q = \frac{\omega_0}{BP} = \frac{RC}{\sqrt{LC}} = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{(III.22).}$$

Les équations (III.23 – III.25) ci-dessous peuvent être utilisées pour calculer les paramètres de chaque cellule RLC.

$$\mathrm{R_{phx}} = \mathrm{Z_{max}} \quad \text{(III.23).}$$

$$\mathrm{L_{phx}} = \mathrm{R_{phx}}/(\omega_0 * \mathrm{Q}) \quad \text{(III.24).}$$

$$\mathrm{C_{phx}} = \mathrm{Q}/(\omega_0 * \mathrm{R_{phx}}) \quad \text{(III.25).}$$

Et la fonction objective est définie par (III.19).

III.5.1.3 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeille artificielle (ABC) :

L'algorithme d'optimisation d'ABC (Artificiel Bee Colony) est développé par Karaboga et Basturk en 2005, en inspectant les comportements des abeilles réelles pour trouver la source de nourriture, qui s'appelle le nectar, et partager l'information des sources de nourriture aux autres abeilles dans le nid **[50]**.

Est une méthode approchée, qui nous permet de résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire, et de trouver une solution de l'optimum en un temps raisonnable **[51].**

Dans cet algorithme, les abeilles artificielle sont définies et classifiées en trois groupes à savoir **[52],[53]** :

1) Abeilles employeuses (abeilles qui recherche la nourriture) ;
2) Spectatrices (abeilles d'observation) ;
3) Scouts (éclaireuses) sont chargés de trouver de nouvelles nourritures, (le nectar de nouvelle source).

Si l'abeille employeuse d'un site ne réussit pas de trouver la source de nourriture, elle doit être forcément devenir un scout pour rechercher aléatoirement de nouvelles sources de nourriture. Les abeilles employeuses partagent l'information avec les abeilles spectatrices dans une ruche de sorte que les abeilles spectatrices puissent choisir une source de nourriture pour l'explorer **[52], [54].**

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

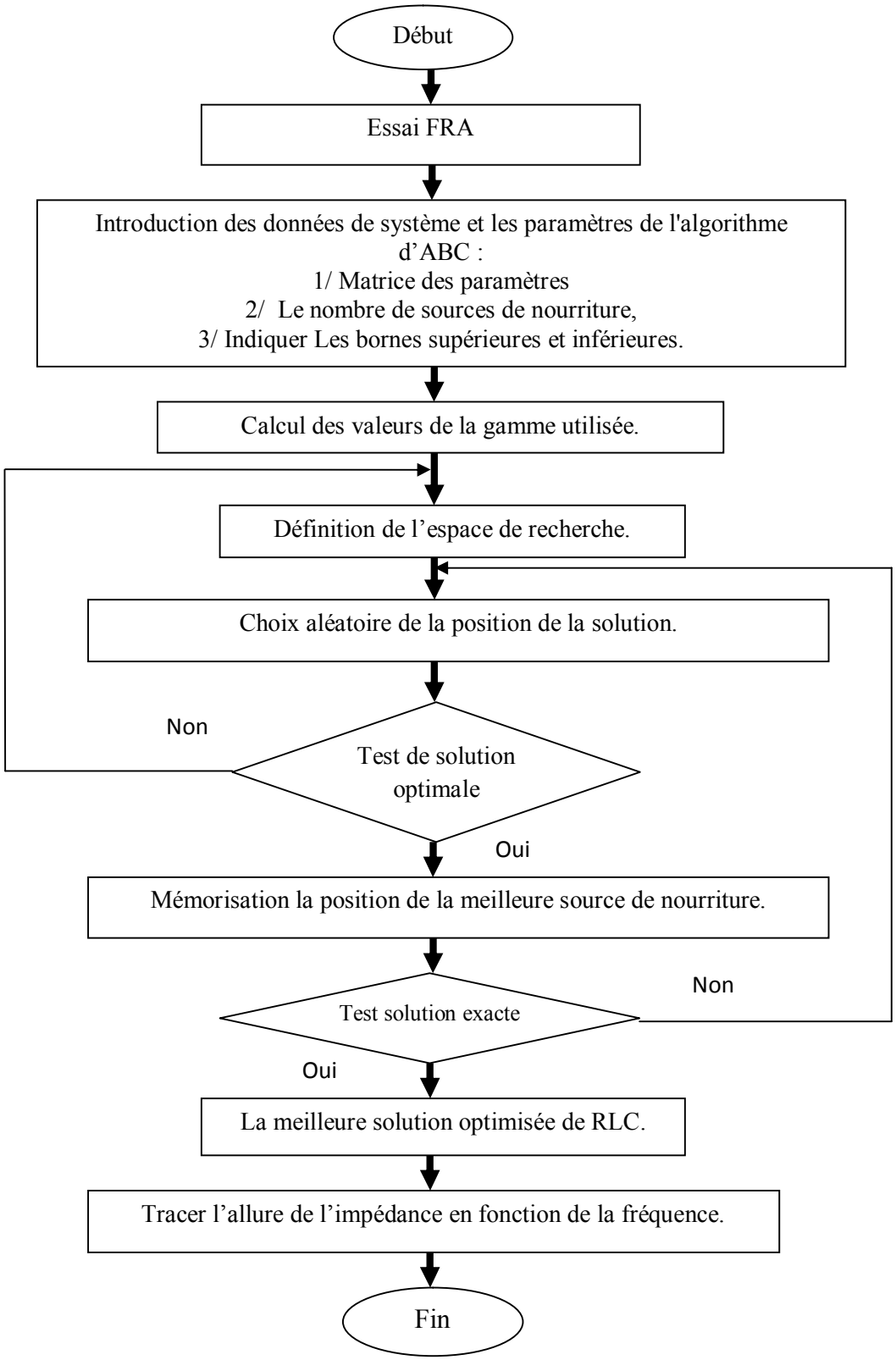


Figure III.16 : Organigramme pour la procédure ABC de calcul des paramètres du modèle étudié **(Organigramme personnel, 2017).**

L'espace de recherche est exprimé par l'équation (III.26) ci-dessous:

$$\mathrm{Esp_{rech}} = \mathrm{rand}(\mathrm{Sorc_{Norr}}, \mathrm{D}) * \mathrm{GM_{Val}} + \mathrm{bornes_{inf}} \qquad \text{(III.26).}$$

Avec:

$$\mathrm{GM_{Val}} = \mathrm{repmat}\left(\left(\mathrm{bornes_{sup}} - \mathrm{bornes_{inf}}\right), [\mathrm{Sorc_{Norr}}\ 1]\right)$$

Et :

$$\mathrm{bornes_{inf}} = \mathrm{repmat}(\mathrm{bornes_{inf}}, [\mathrm{Sorc_{Norr}}\ 1])$$

L'équation (III.27) ci-dessous utilisé pour optimiser la meilleure solution des paramètres R, L et C.

$$\mathrm{Sol_{RLC}} = \left(\mathrm{bornes_{sup}} - \mathrm{bornes_{inf}}\right) * \mathrm{rand}(1, \mathrm{D}) + \mathrm{bornes_{inf}} \qquad \text{(III.27).}$$

Et la fonction objective est démontée par (III.19).

La possibilité de réglage est évaluée par la comparaison visuelle graphique (Fig.III.18 – Fig.III.20) et le réglage d'erreur obtenu en utilisant (III.28) pour les données mesurées et simulées. La différence entre le module de l'impédance mesurée et simulée en pourcentage est déterminée conformément à la formule (III.28) **[46]**.

$$e_z = \sum_{i=1}^{n} e_{zi} * \frac{100}{n} \qquad \text{(III.28).}$$

Avec :

$$e_{Zi} = \begin{cases} \dfrac{|Z_{mes_ph_x} - Z_{siml_phx}|}{|Z_{siml_phx}|} & \text{Si : } e_{z_i} < 0.1 \\ 0.1 & \text{Si : } e_{Zi} >= 0.1 \end{cases}$$

III.6 Validation du modèle :

Le modèle estimé est implémenté sous MATLAB Simulink dans l'objectif de sa validation expérimentale (Fig.III.17).

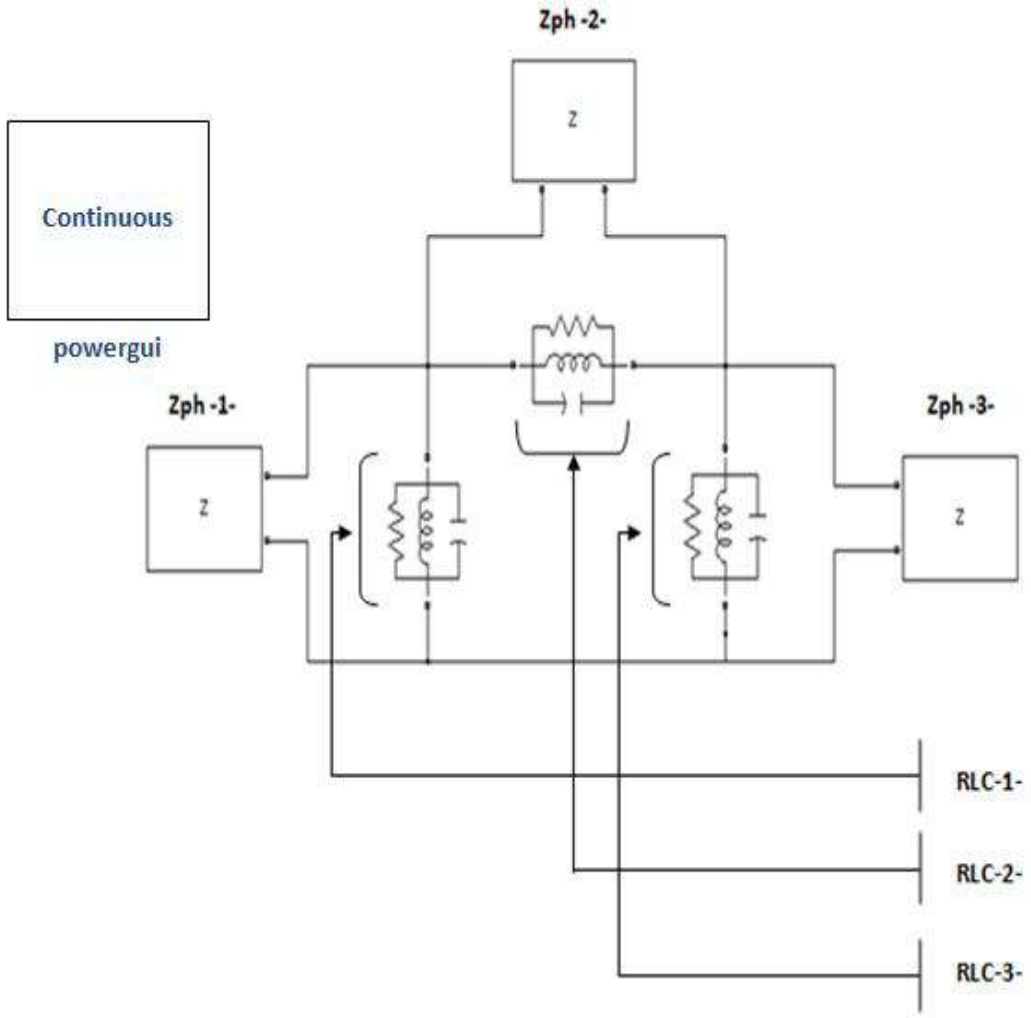


Figure III. 17 : schéma équivalent du transformateur triphasé en BF .

Les résultats obtenus par les trois méthodes sont représentés sur les figures (III.18 – III.20).

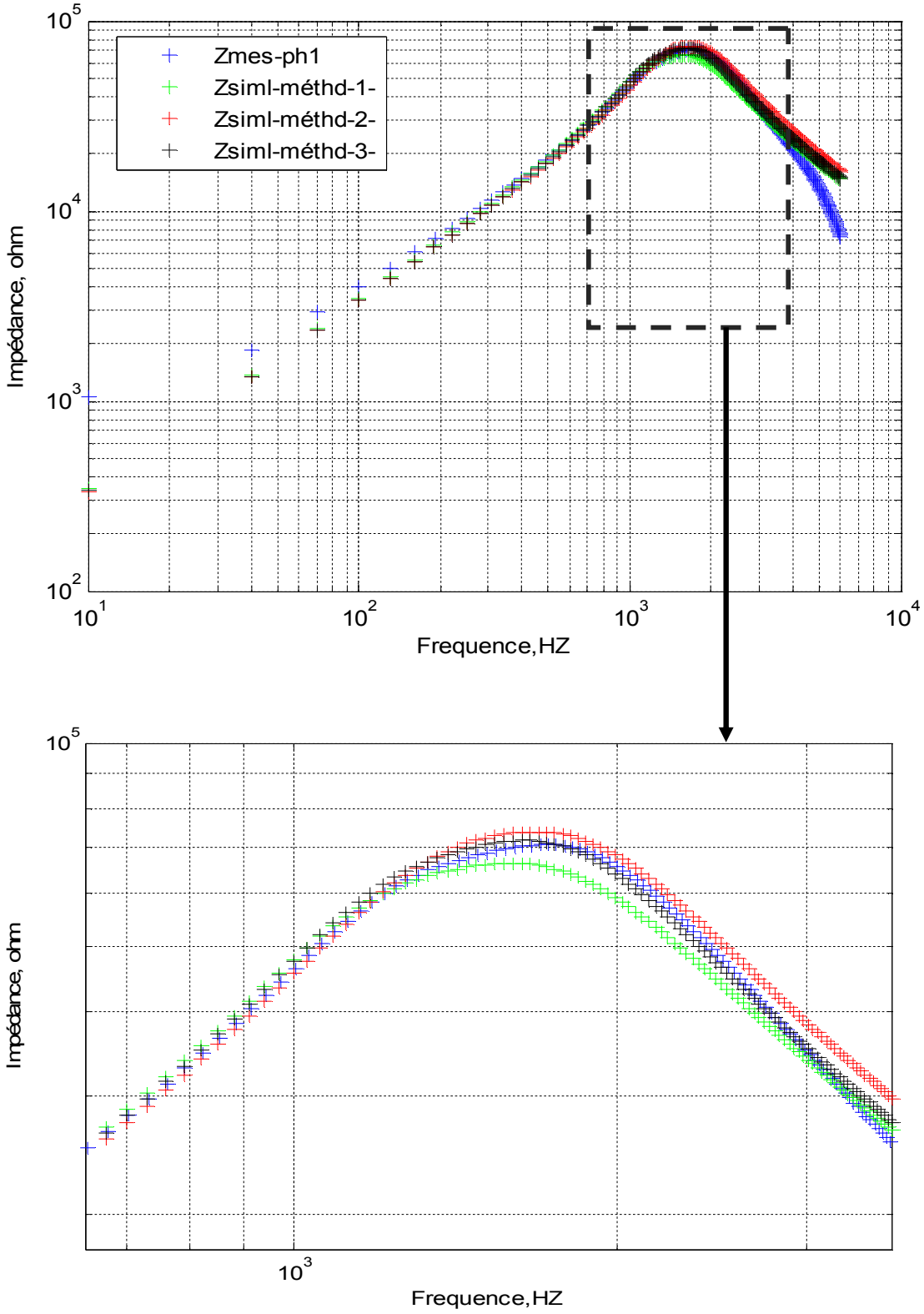


Figure III. 18 : La courbe de la réponse **Zmes1** mesurée et la réponse simulée par les trois méthodes en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

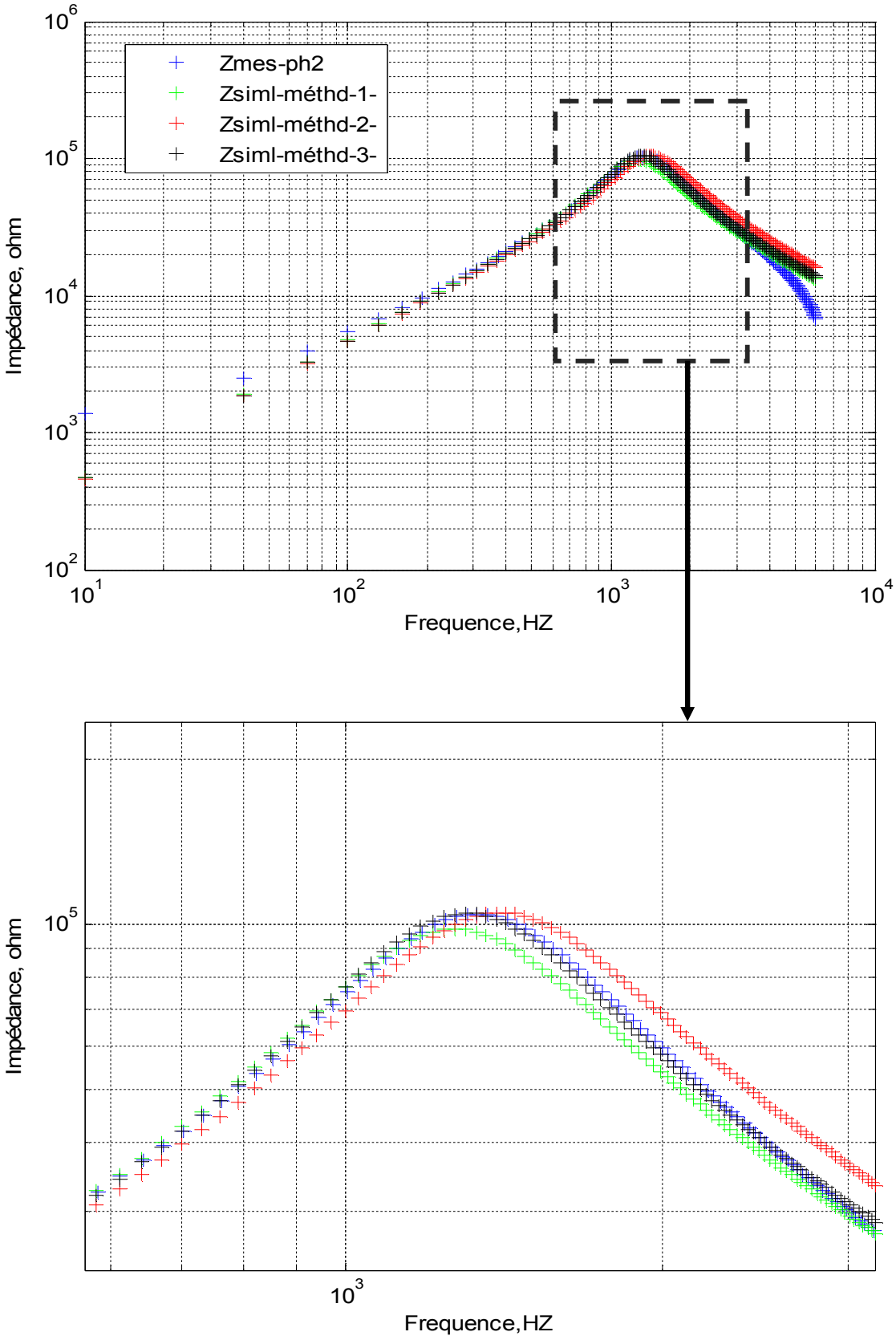


Figure III. 19 : La courbe de la réponse Zmes2 mesurée et la réponse simulée par les trois méthodes en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

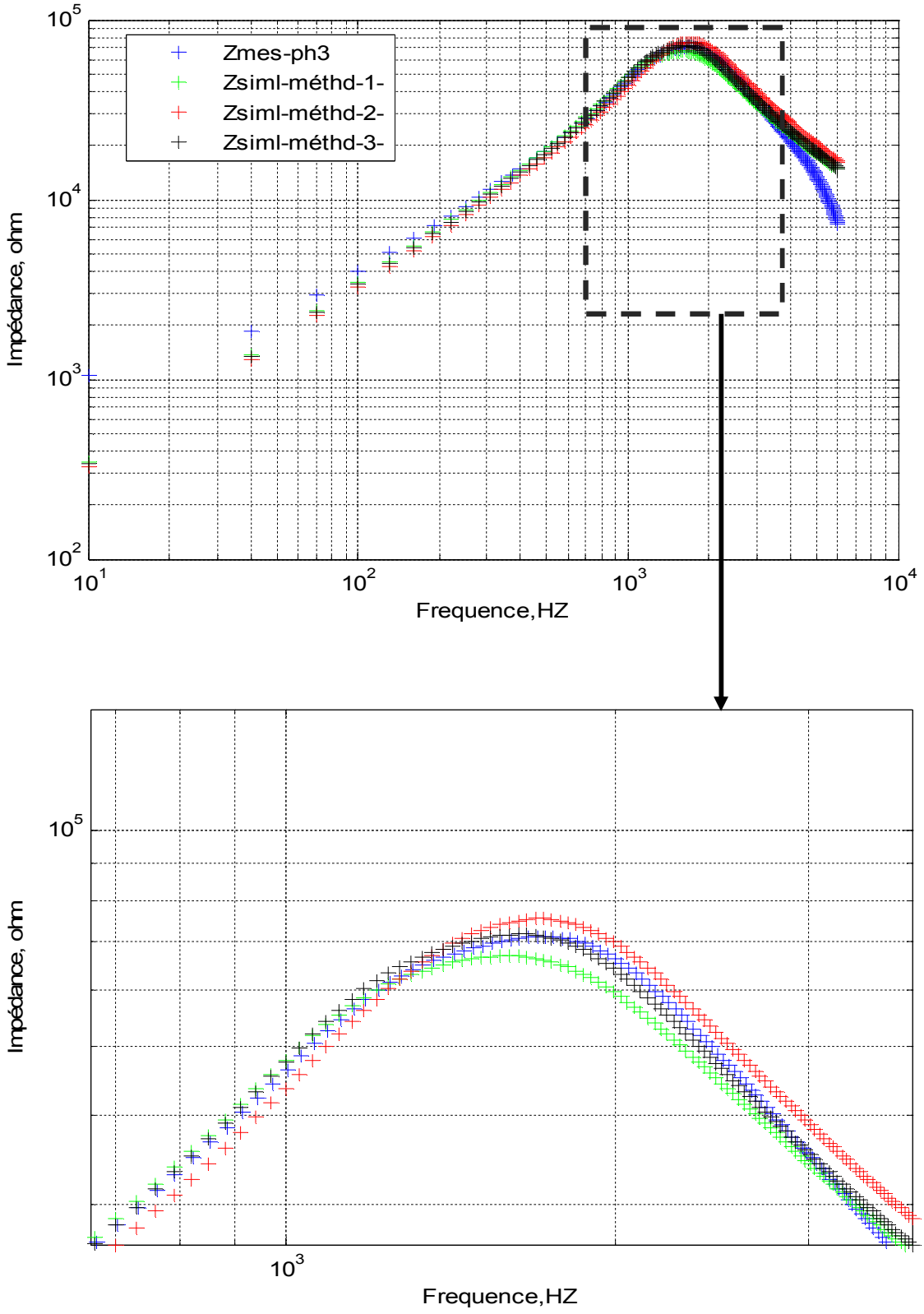


Figure III. 20 : La courbe de la réponse Zmes3 mesurée et la réponse simulée par les trois méthodes en fonction de la fréquence **(Photo personnelle, 2017).**

III.6.1 Résultats expérimentaux :

Le tableau.III.1 indique les résultats obtenus en appliquant les trois méthodes de calcul. Le tableau est divisé par groupes, chaque groupe est spécifié l'algorithme utilisé, les valeurs des paramètres R, L et C, le nombre de points de mesure et de l'erreur entre les valeurs mesurées et celles estimées.

Tableau III. 1 : Valeurs des paramètres obtenues **(Tableau personnel, 2017).**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
Gamme de fréquence (Hz)	**[10 - 6000]**	**[10 - 6000]**	**[10 - 6000]**
Algorithme de calcul	La méthode d'estimation analytique.		
Nombre des points	200	200	200
Rph (KΩ)	103.77	184.56	104.48
Lph (H)	7.203	15.619	7.213
Cph (nF)	1.240	1.476	1.224
Erreur entre Zmes et Zsiml (%)	4.051	3.906	4.036
Algorithme de calcul	La méthode basée sur l'analyse de la réponse en fréquences.		
Nombre des points	200	200	200
Rph (KΩ)	112.88	195.71	113.57
Lph (H)	7.016	15.678	6.653
Cph (nF)	1.171	1.351	1.194
Erreur entre Zmes et Zsiml (%)	2.956	3.265	2.967
Algorithme de calcul	L'algorithme d'optimisation ABC.		
Nombre des points	200	200	200
Rph (KΩ)	112.976	194.589	112.976
Lph (H)	7.023	15.637	7.023
Cph (nF)	1.232	1.403	1.232
Erreur entre Zmes et Z siml (%)	2.945	2.901	2.945

La comparaison graphique entre les réponses en fréquence mesurées et simulées montrées sur les figures (III.18 – III.20) démontre que:

- ✓ Les résultats obtenus par la mesure sont concordants avec ceux obtenus par simulation.
- ✓ L'algorithme ABC, est avéré le meilleur comparativement aux deux autres algorithmes utilisés, l'écart enregistré entre mesure et simulation n'excédent pas 3%, en utilisant cet algorithme et elle de l'ordre 4% pour la méthode analytique de 3.26% pour la méthode basée sur l'algorithme de la réponse fréquentielle.
- ✓ Il y a des petites différences sur la partie initiale des courbes mesurées et modélisées, ces différences se produisent parce que le modèle n'inclut pas la résistance en série de l'enroulement qui apparaît dans les fréquences inférieures **[47].**

III.6.2 Interprétation des résultats :

Les résultats présentés dans le (tab.III.1) démontrent expérimentalement les points suivants:

- La valeur de la résistance $\mathbf{R_{ph2}}$ dans les trois cas est la plus grande, ce qui signifie que cette phase à une perte plus faible.
- Les valeurs des $\mathbf{R_{ph1}}$ et $\mathbf{R_{ph3}}$ des phases latérales sont très proches, avec une différence qui ne dépasse pas 0.7% pour les trois méthodes utilisées. ce qui montre que la longueur du circuit magnétique des deux colonnes (1 et 3) est égale.
- Les valeurs des inductances $\mathbf{L_{ph2}}$ associée à la deuxième phase est supérieure aux inductances $\mathbf{L_{ph1}}$ et $\mathbf{L_{ph3}}$, indiquant que la reluctance de la phase centrale est inférieure à la reluctance des colonnes latérales.
- Les valeurs des inductances $\mathbf{L_{ph1}}$ et $\mathbf{L_{ph3}}$ associées aux colonnes latérales sont approximativement égales, dont la différence ne dépasse pas 5.2 %.
- La valeur de la capacité de chacune des phases dans les trois cas est très proche ; ce qui signifie que l'épaisseur, la section et la nature du diélectrique entre les phases et le circuit magnétique sont identiques.

III.7 Détection et classification des défauts dans les phases de transformateur :

Après avoir validé le modèle en π de l'enroulement par une comparaison entre les réponses simulées et mesurées en utilisant trois méthodes, on a constaté que l'algorithme ABC est plus précis par rapport aux deux autres méthodes utilisées, dans ce qui suit on procédera à l'introduction de variations paramétriques dans le modèle afin de simuler différents défauts qui peuvent avoir lieu dans l'enroulement réel. Les défauts injectés sont :

- Défauts résistifs.
- Défauts inductifs.
- Défauts capacitifs.

III.7.1 Défauts résistifs :

Des défauts résistifs sont injectés dans le modèle du transformateur proposé, ces défauts sont traduits par des augmentations de la résistance du noyau de chacune des phases ; l'augmentation de cette résistance peut être expliquée par l'augmentation de température du noyau magnétique suite à une surcharge ou/et à la circulation des courants harmoniques dans les phases du transformateur.

$$R_T = R_0 + \alpha * \Delta T \qquad \text{(III.29).}$$

III.7.1.1 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut résistif :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts résistifs injectés sur le côté primaire du transformateur étudié est illustrée sur les figures (III.21-III.23).

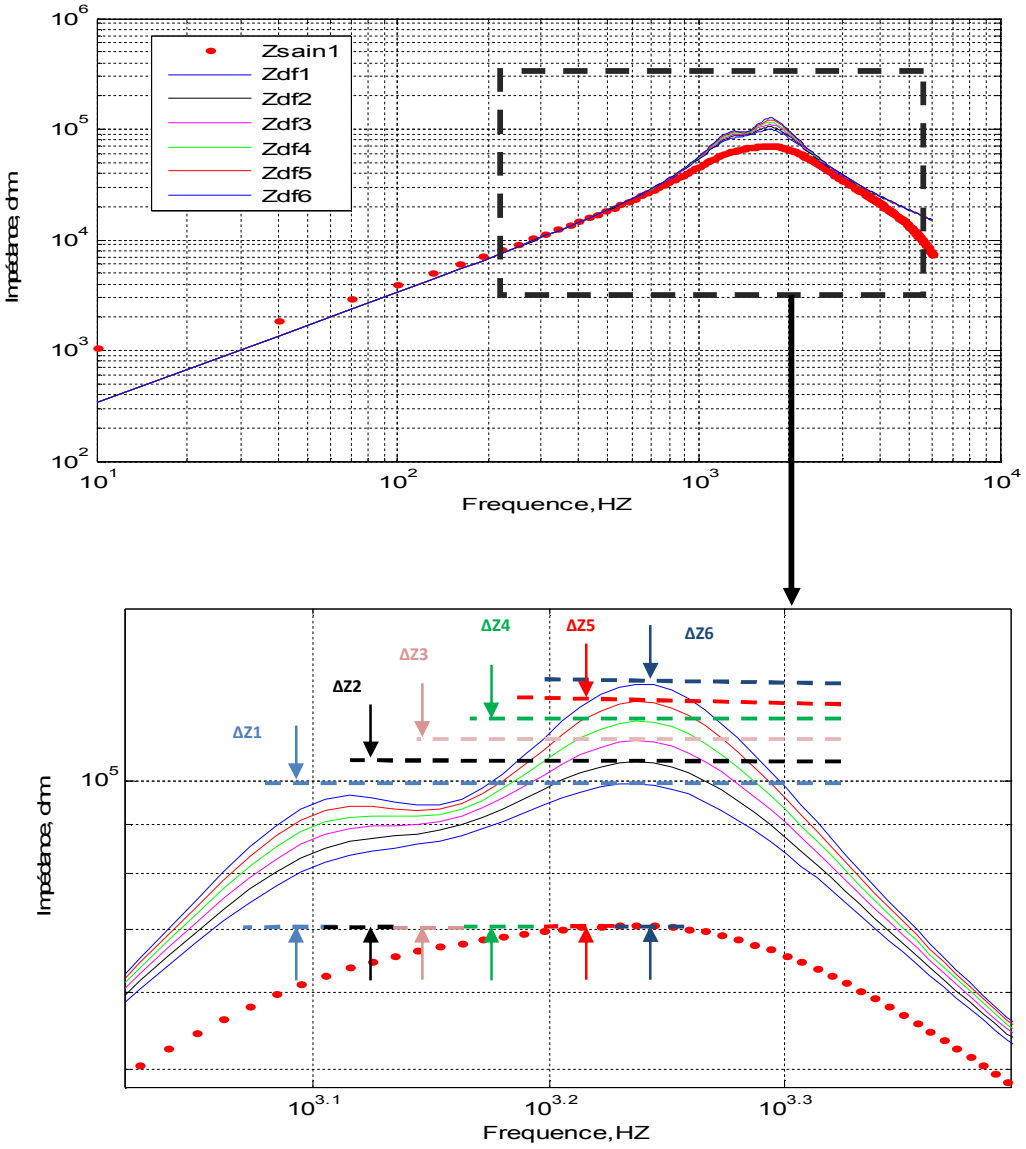


Figure III. 21 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 1 et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

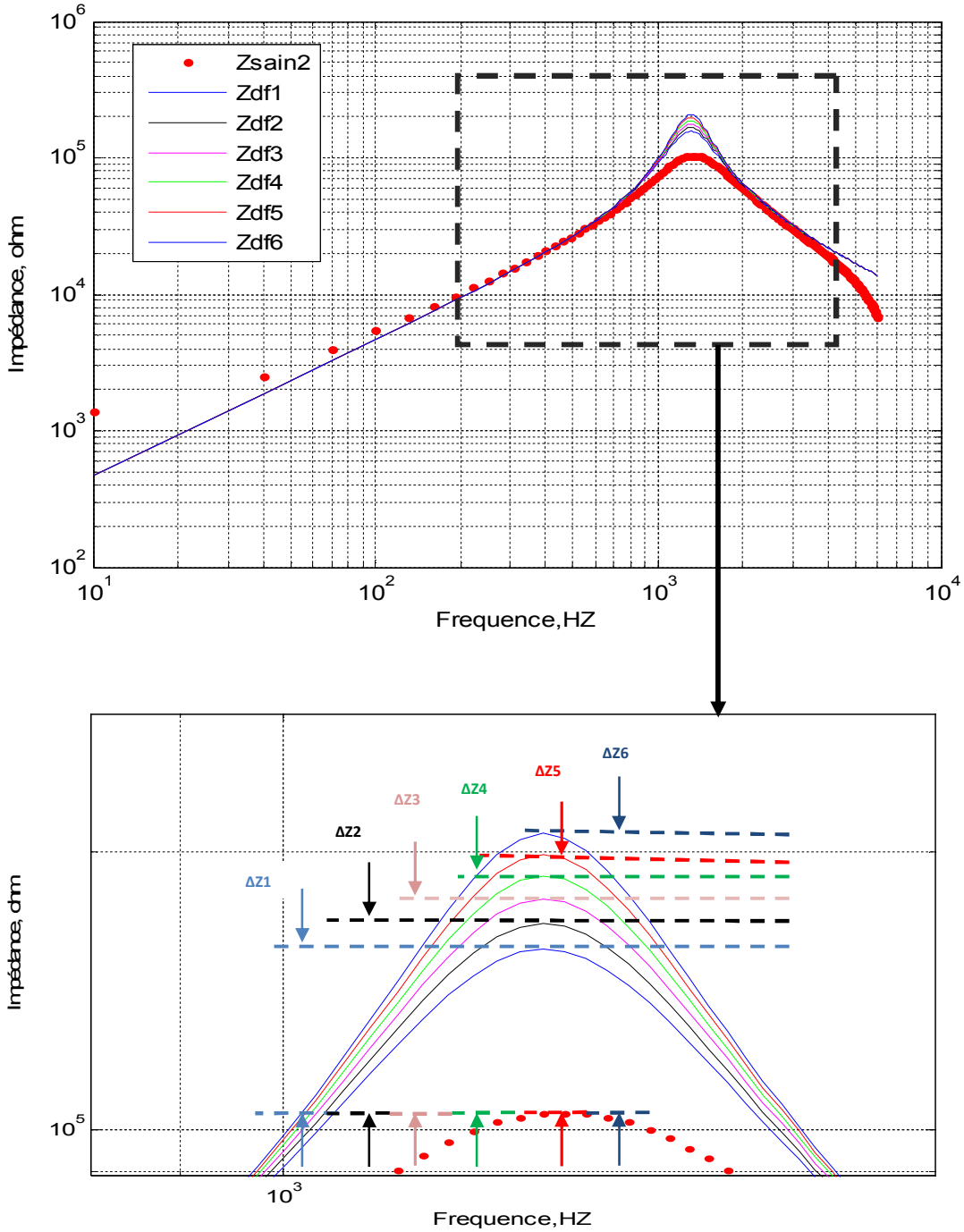


Figure III. 22 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 2 et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

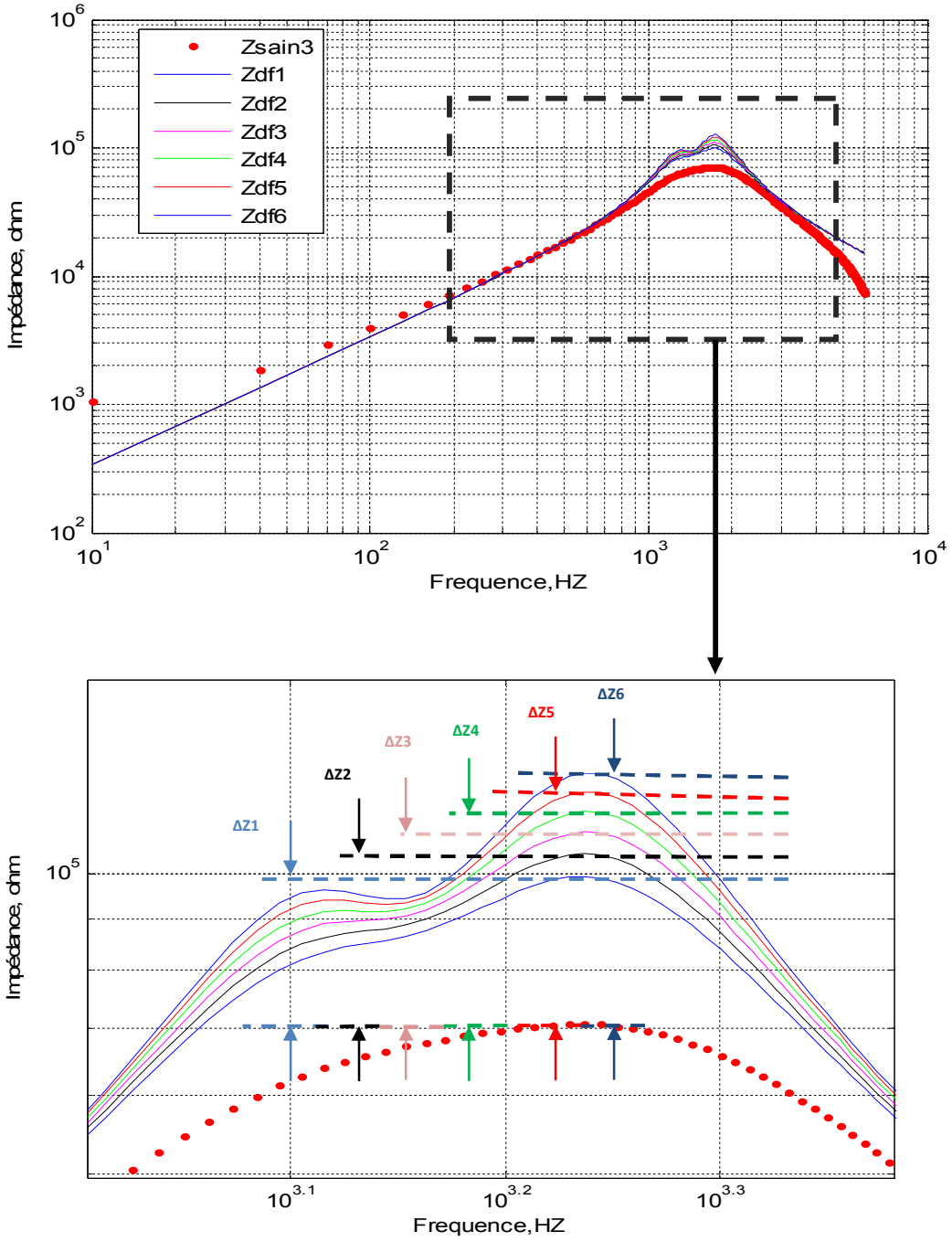


Figure III. 23 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 3 et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

III.7.1.2 Résultats et discussions :

Le tableau.III.2 indique la variation ΔZ en injectant un défaut résistif sur le côté primaire du transformateur triphasé étudié.

Les défauts résistifs sont simulés par une augmentation de la résistance dans une plage de 3/2 R_{sain} jusqu'à 2 R_{sain}.

Tableau III. 2 : La variation ΔZ du chacune des phases **(Tableau personnel, 2017).**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	$\lvert \Delta Z(\%) \rvert = \lvert ((Z_{défaut} - Z_{sain})/ Z_{sain}) \rvert * 100$		
ΔZ_1 (%)	40.44	50.77	40.44
ΔZ_2 (%)	48.09	60.87	48.09
ΔZ_3 (%)	55.74	70.87	55.74
ΔZ_4 (%)	63.37	80.96	63.37
ΔZ_5 (%)	71	90.96	71
ΔZ_6 (%)	78.5	101	78.5

Les figures (III.24 - III.25) représentent le degré de défaut ΔR en fonction de ΔZ de chacune des phases.

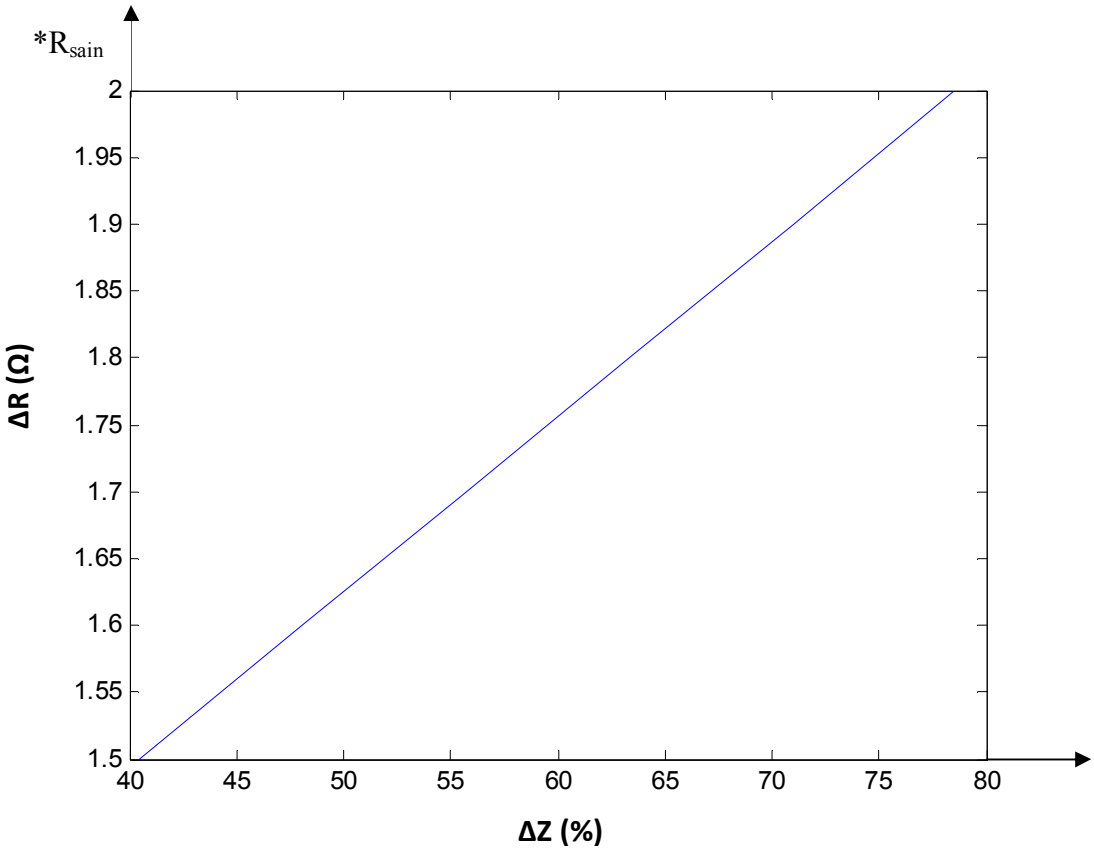


Figure III. 24 : Le degré de défaut résistif ΔR en fonction de ΔZ dans la première et la troisième phase **(Photo personnelle, 2017).**

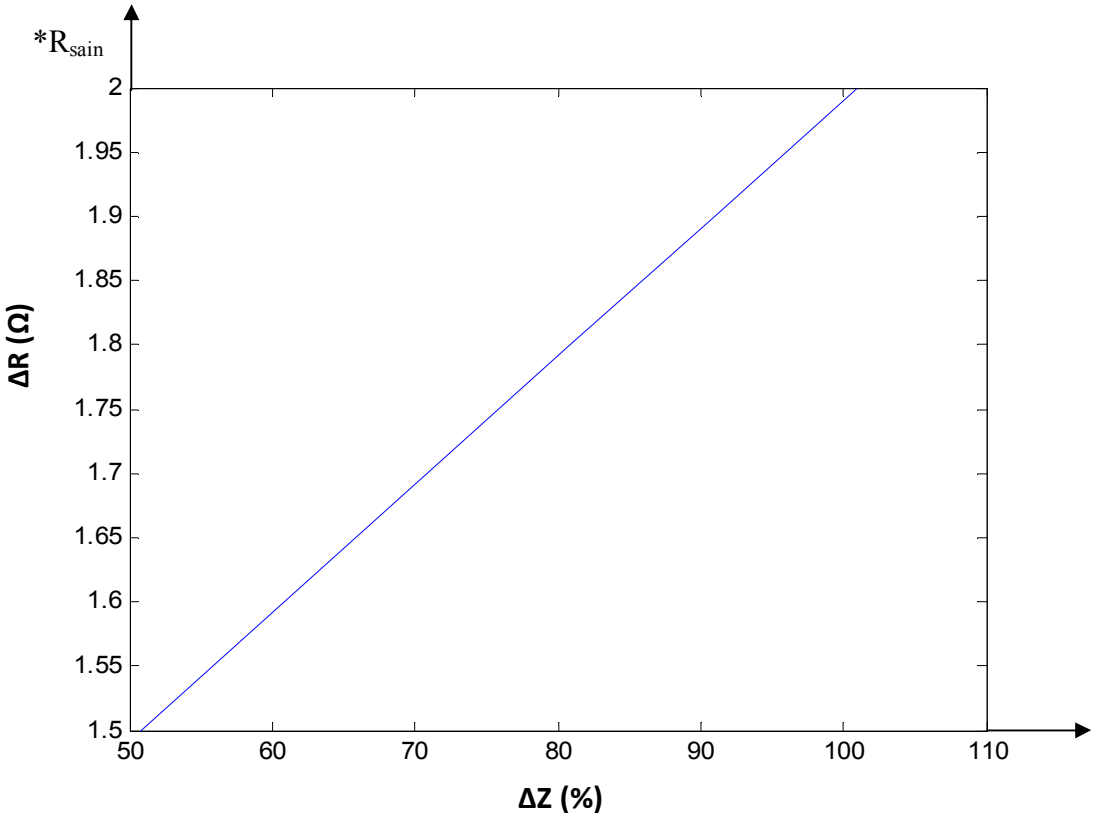


Figure III. 25 : Le degré de défaut résistif ΔR en fonction de ΔZ dans la seconde phase **(Photo personnelle, 2017).**

D'après les figures (III.21-III.25) ci-dessus, on a constaté :

- Une proportionnalité linéaire entre l'augmentation de l'amplitude de point de résonance et l'élévation de la valeur de la résistance mais en gardant la fréquence de résonance particulièrement lorsque le défaut est injecté sur la phase 2.
- Le même phénomène est constaté sur les phases des colonnes latérales, cependant on a relevé une apparition d'un deuxième point de résonance dont sa fréquence est inférieure à celle du pic maximal.
- Une augmentation linéaire de ΔR en fonction de ΔZ.

III.7.2 Défauts inductifs :

Les défauts inductifs sont introduits par la diminution de l'inductance de magnétisation. Cette diminution peut être interprétée physique par la détérioration des caractéristiques magnétique du noyau telle la diminution de la perméabilité magnétique du circuit magnétique qui entraine l'augmentation de la reluctance et par conséquent la diminution de l'inductance.

III.7.2.1 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut inductif :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts inductifs injectés sur le côté primaire du transformateur triphasé est illustrée sur les figures (III.26-III.28).

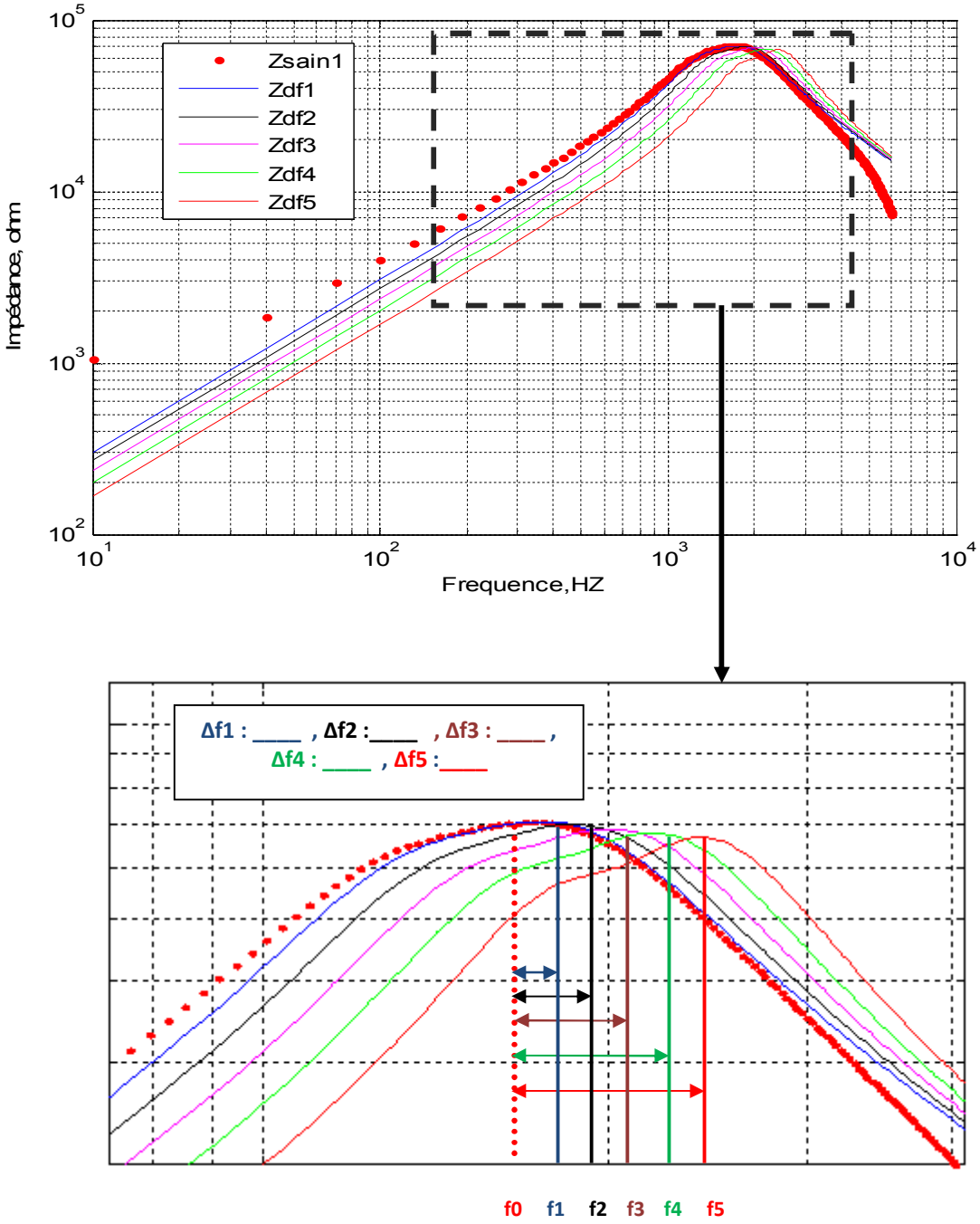


Figure III. 26 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut inductif dans la phase 1 du côté primaire et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

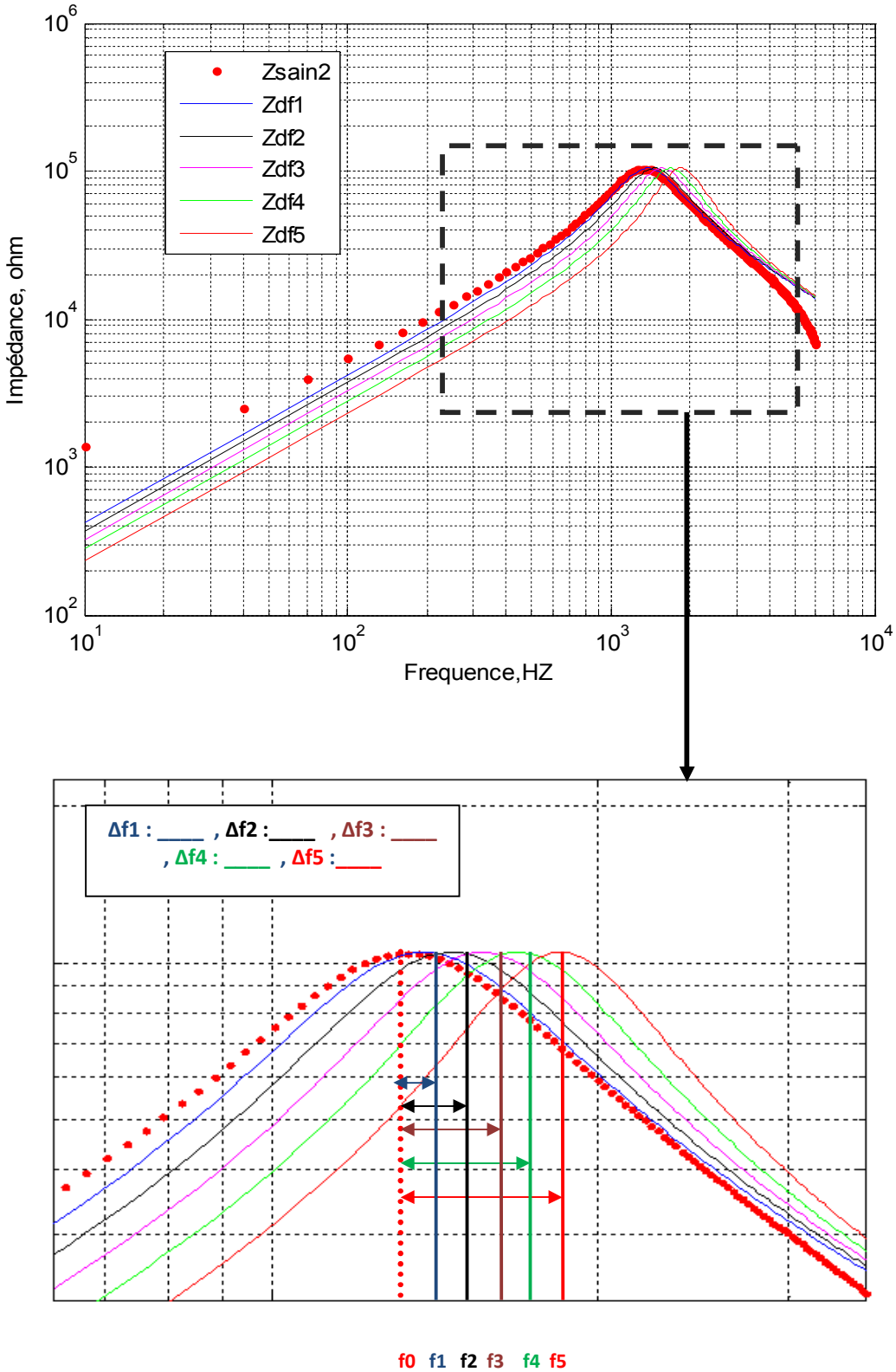


Figure III. 27 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut inductif dans la phase 2 du côté primaire et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

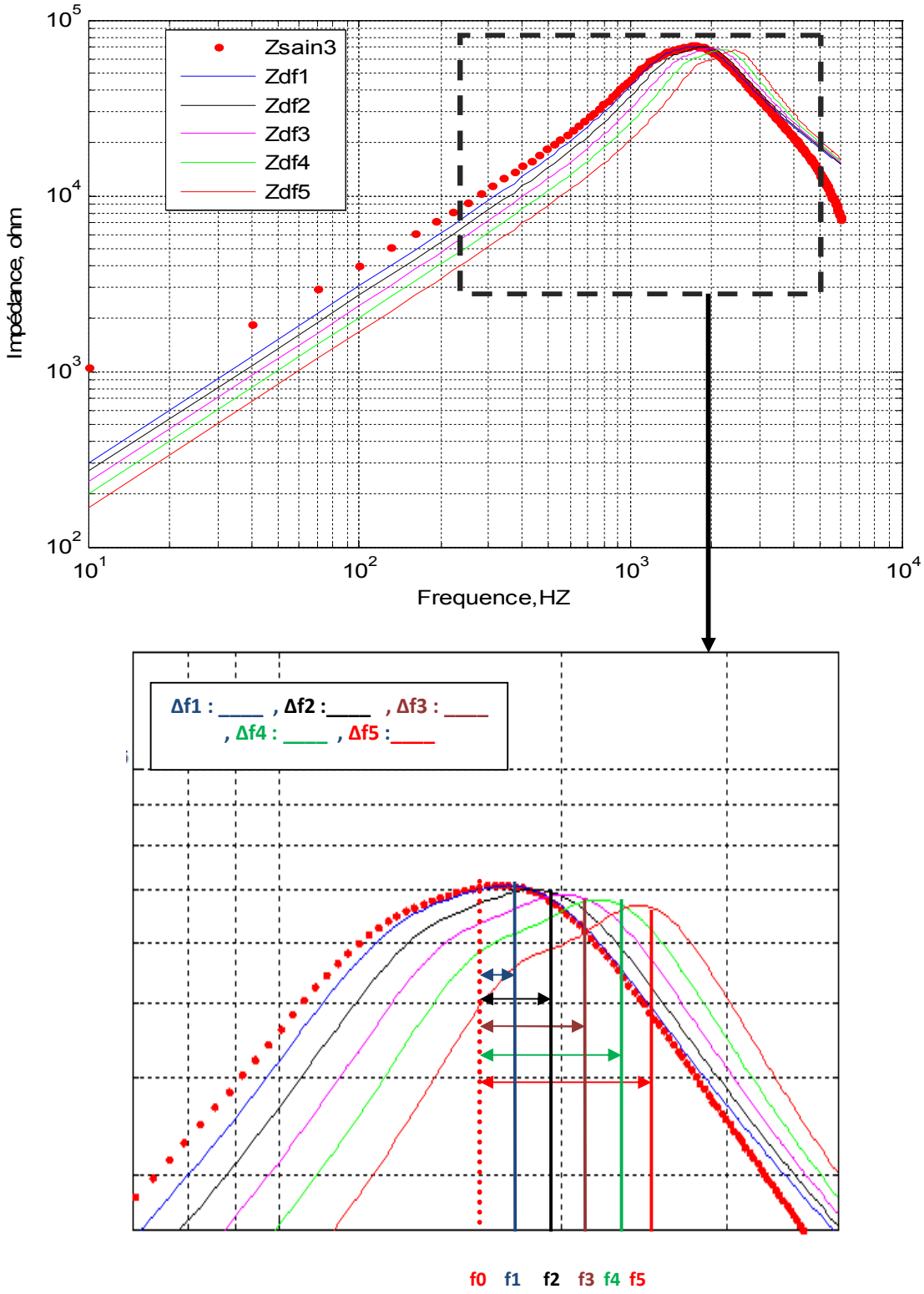


Figure III. 28 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut inductif dans la phase 3 du côté primaire et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

III.7.2.2 Résultats et discussions :

Le tableau.III.3 montre la variation Δf lorsque en injectant un défaut inductif sur les trois phases primaires du transformateur étudié.

Tableau III. 3 : La variation Δf du chacune des phases **(Tableau personnel, 2017).**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	$\|\Delta f(\%)\| = \|((f_{i+1} - f_0)/f_0)\|*100$, (i= 0,1,...,4)		
Δf_1 (%)	1.74	4.57	1.74
Δf_2 (%)	8.69	11.32	8.69
Δf_3 (%)	17.44	18.07	17.44
Δf_4 (%)	27.87	27.14	27.87
Δf_5 (%)	41.83	38.38	41.83

Les figures (III.29-III.30) représentent le degré de défaut inductif ΔL en fonction de Δf du chacune des phases. L'inductance du noyau varie de 0.9 L_{sain} jusqu'à 0.5 L_{sain}.

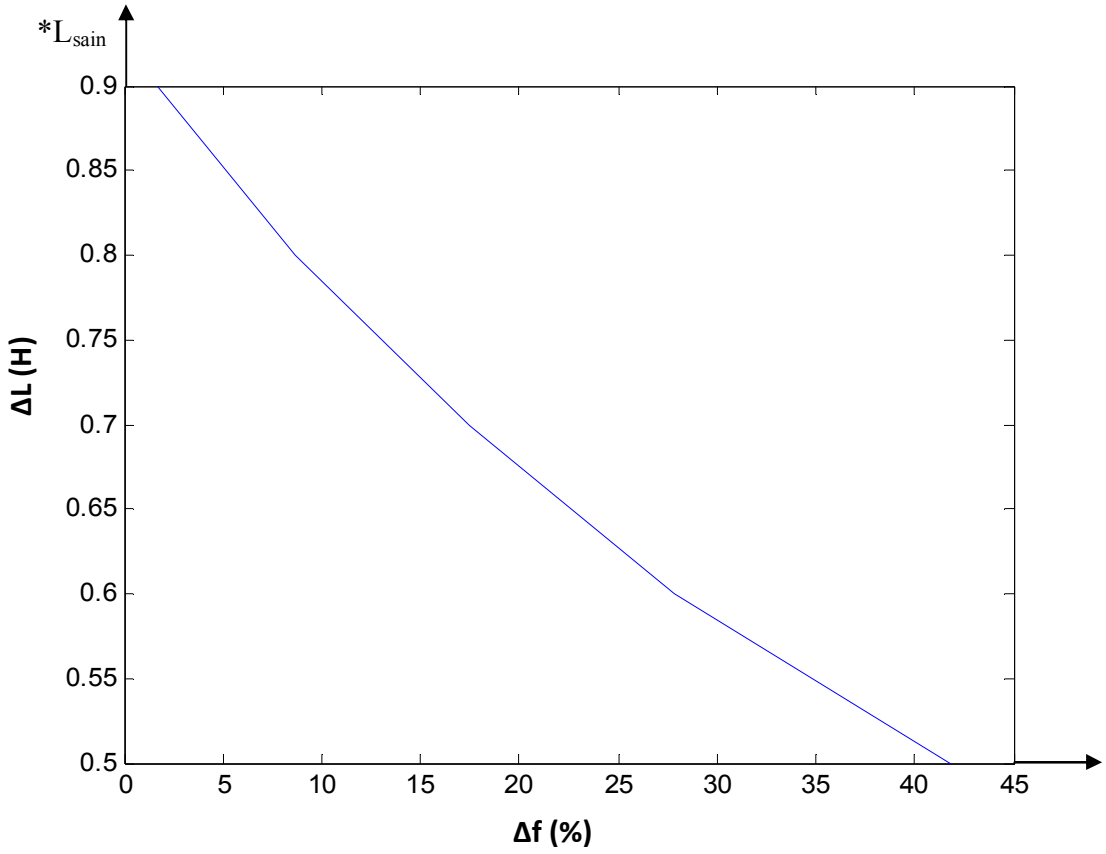


Figure III. 29 : Le degré de défaut inductif ΔL en fonction de Δf dans la première et la troisième phase **(Photo personnelle, 2017).**

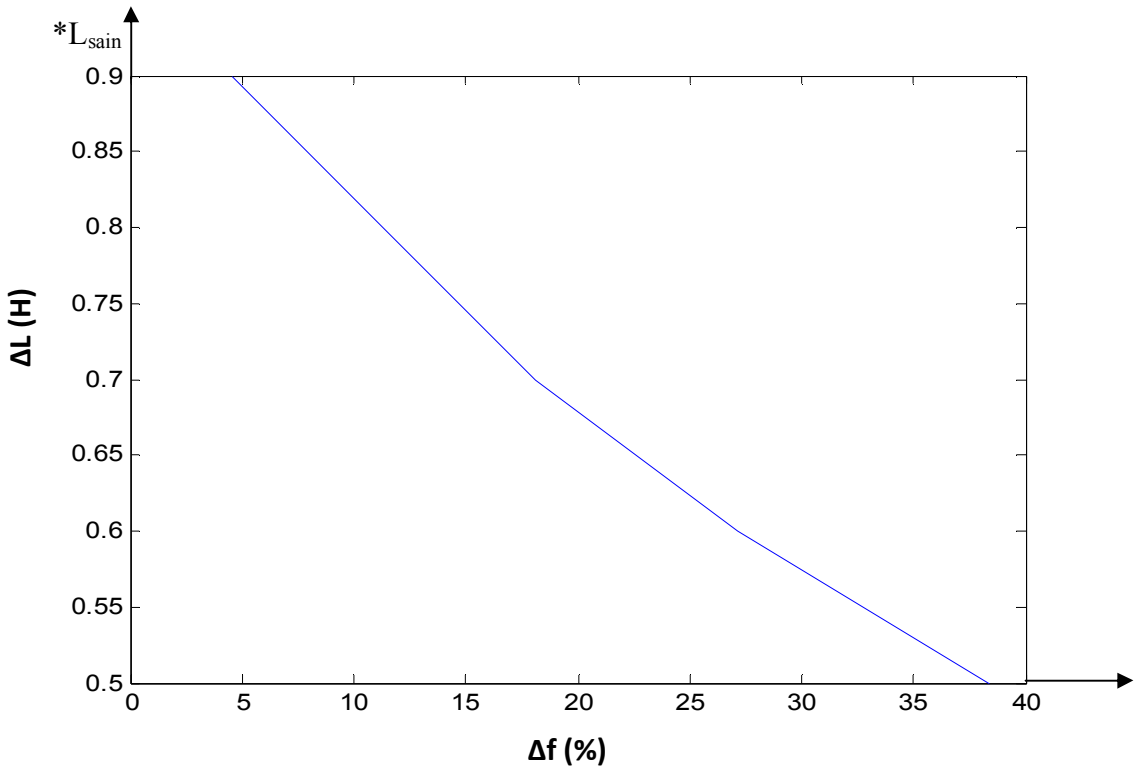


Figure III. 30 : Le degré de défaut inductif ΔL en fonction de Δf dans la seconde phase **(Photo personnelle, 2017).**

D'après les figures (III.26- III.30), et à partir des résultats montrés sur le tableau (III.3), nous avons tiré les observations suivantes:

- Un décalage des fréquences de résonance vers la droite avec la diminution de valeur de l'inductance.
- Une disproportionalité entre la variation d'inductance et les fréquences de résonance. Les fréquences de résonance dans l'enroulement défectueux s'éloignent de celle enregistrée dans le cas d'un enroulement sain de plus en plus avec la diminution de l'inductance.

III.7.3 Défauts capacitifs :

Les défauts capacitifs sont traduits dans l'enroulement, en premier lieu par une augmentation de la capacité, cette augmentation peut avoir lieu physiquement dans le transformateur lors d'un mouvement des enroulements par rapport au noyau suite à un court-circuit, à un séisme ou lors du transport.

Et en seconde lieu par une diminution da la capacité d'isolation qui peut traduite une dégradation des propriétés diélectriques d'isolation du transformateurs suite par exemple au vieillissement ou élévation de la température.

III.7.3.1 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut capacitif :

A. Cas d'une augmentation de la capacité :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts capacitifs injectés dans le cas d'une augmentation de la capacité dans les trois phases du transformateur adopté est illustrée sur les figures (III.31- III.33).

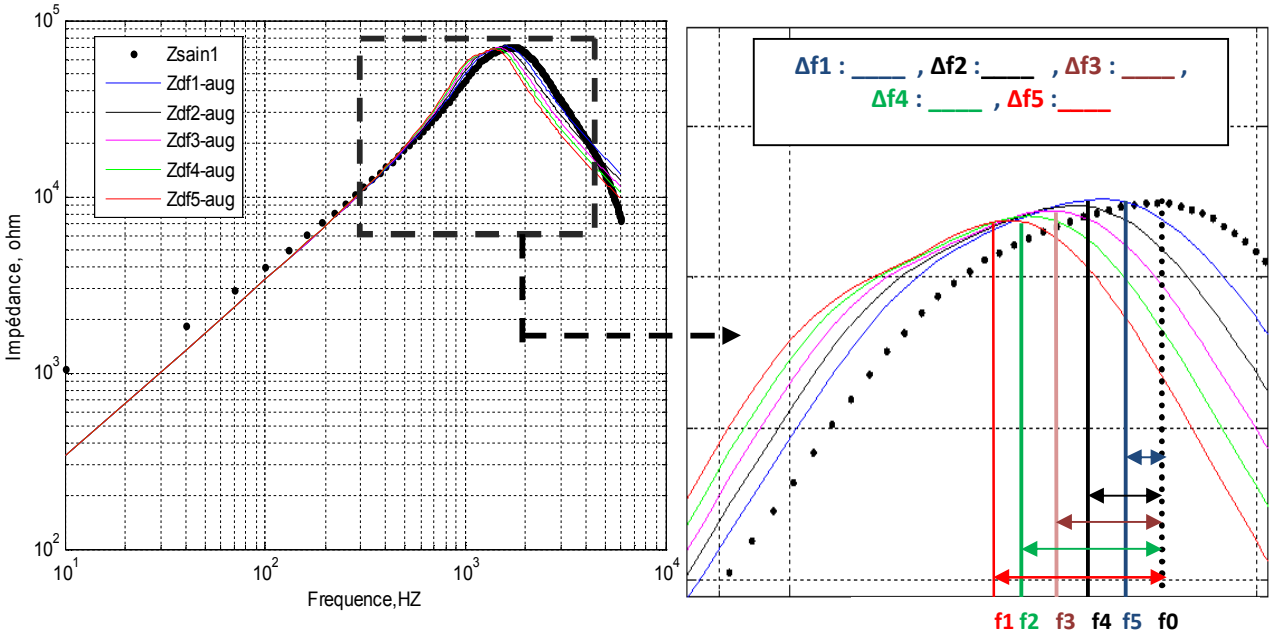


Figure III. 31 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (augmentation de capacité) dans la première phase et d'un enroulement sain.

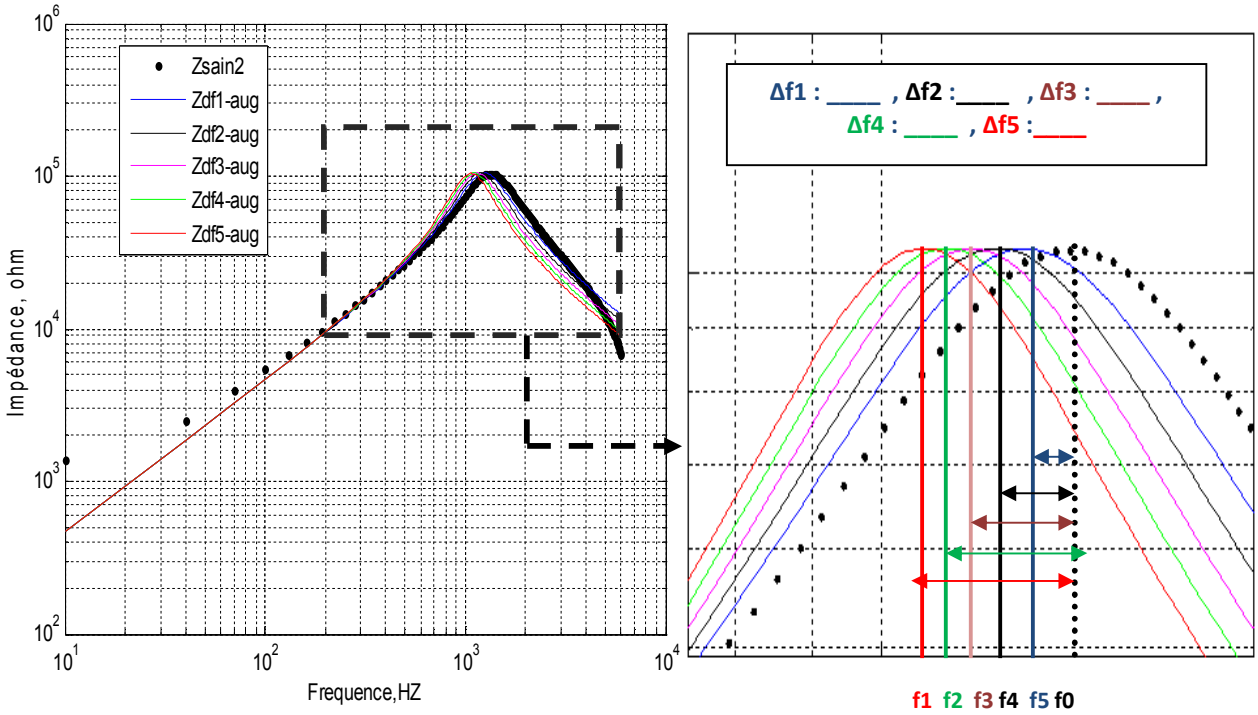


Figure III. 32 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (augmentation de capacité) dans la deuxième phase et d'un enroulement sain.

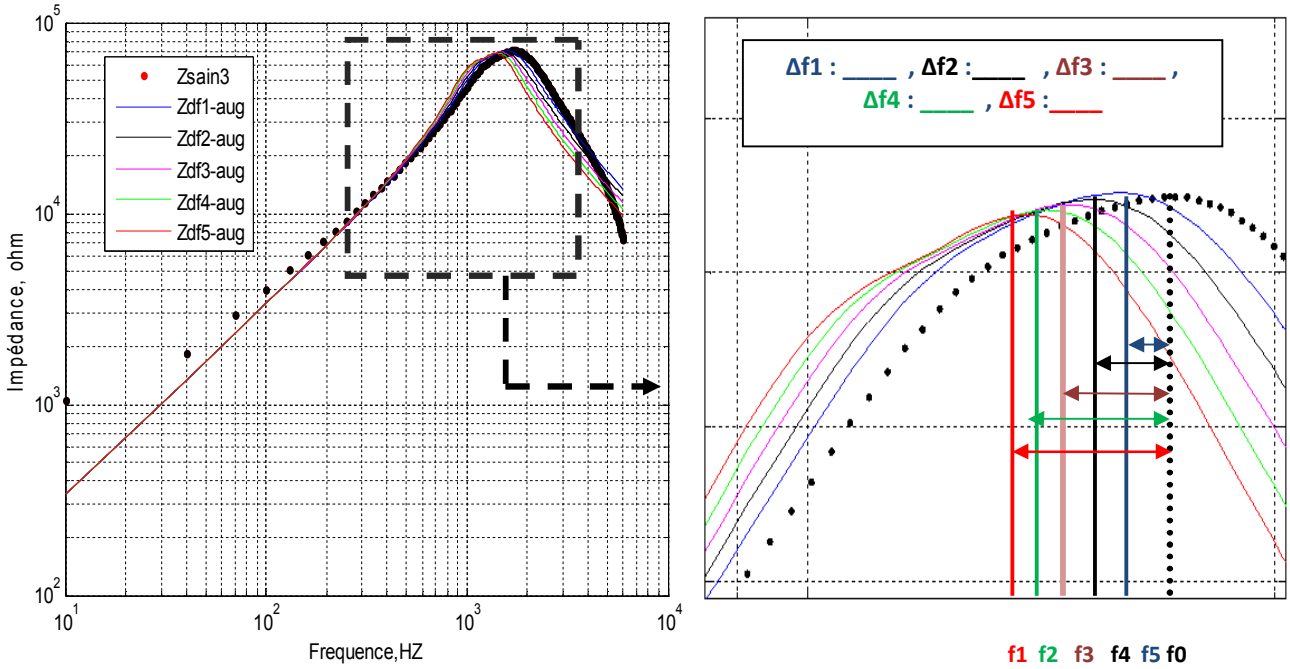


Figure III. 33 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (augmentation de capacité) dans la troisième phase et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

B. Cas d'une diminution de la capacité :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts capacitifs injectés dans le cas d'une diminution de la capacité dans les trois phases du transformateur étudié est montrée sur les figures (III.34- III.36).

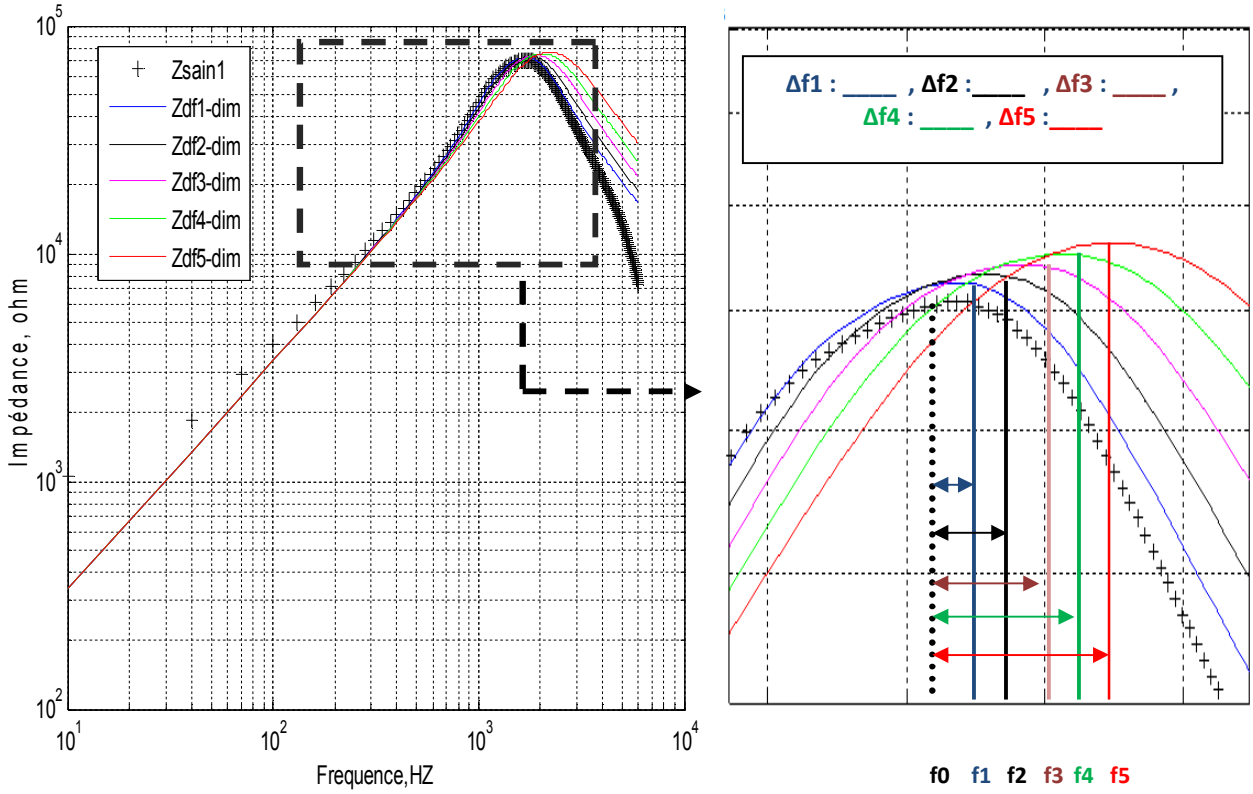


Figure III. 34 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (cas d'une diminution) dans la première phase et d'un enroulement sain.

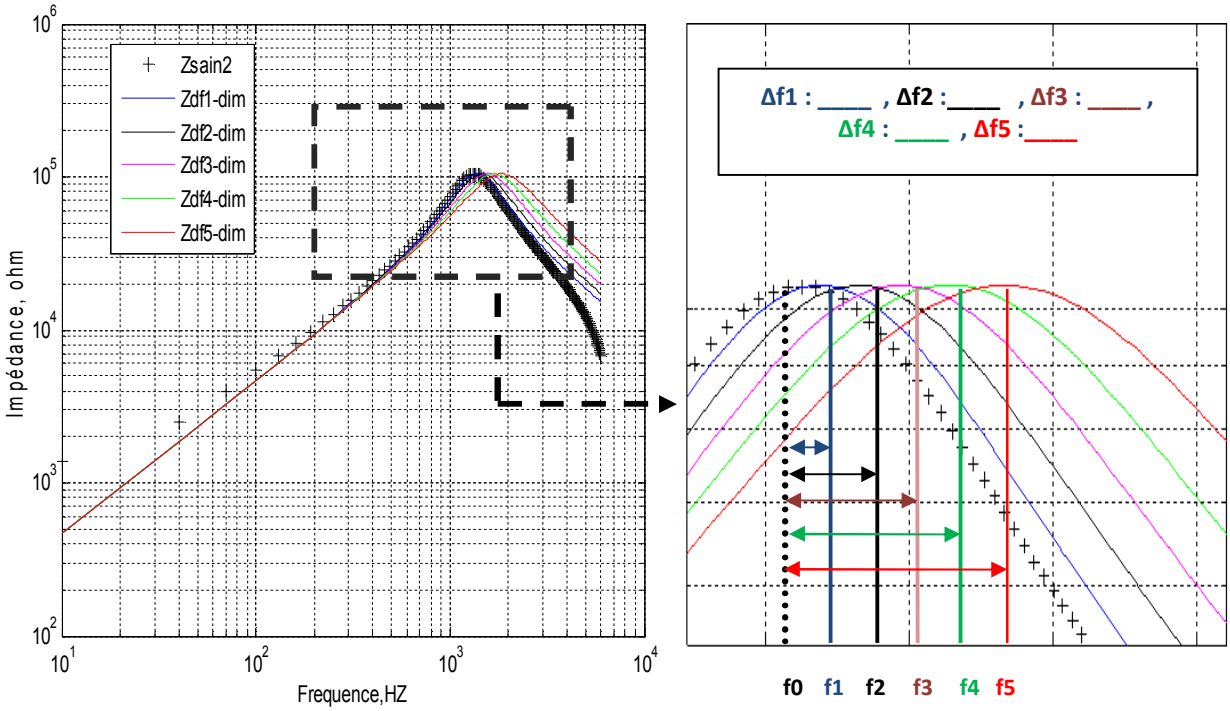


Figure III.35 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (cas d'une diminution) dans la deuxième phase et d'un enroulement sain.

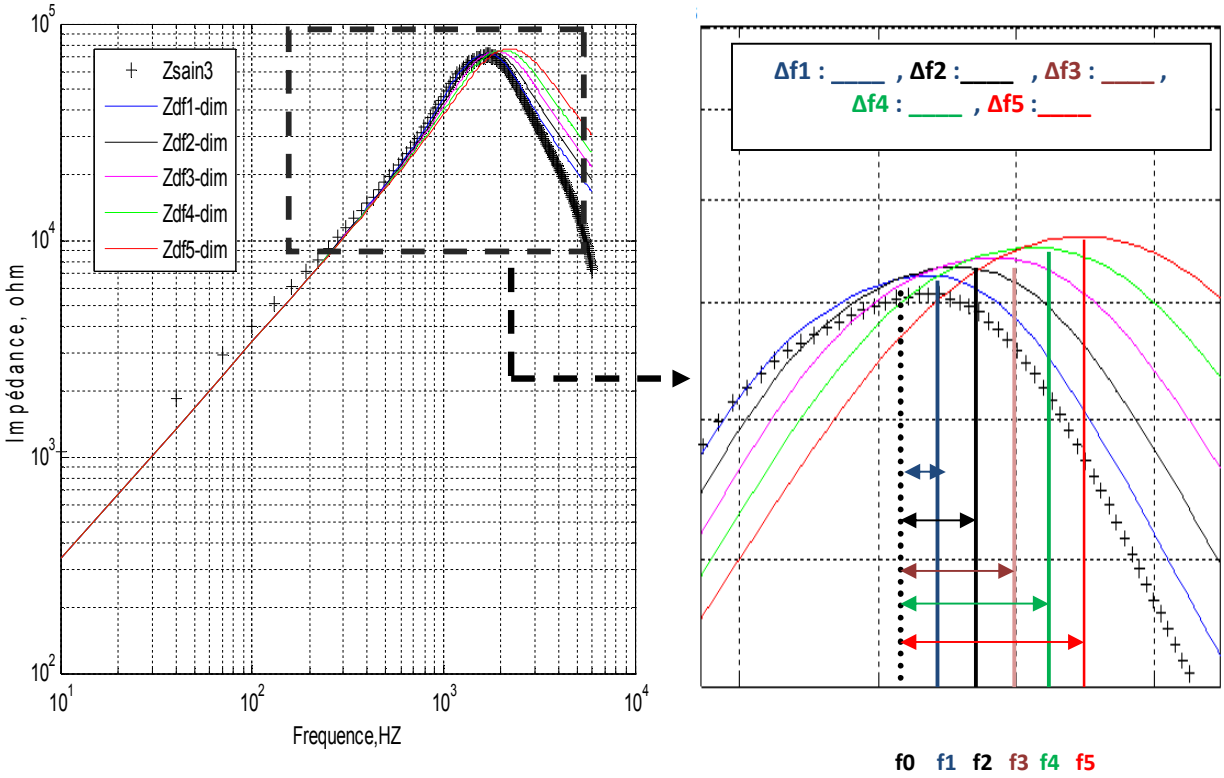


Figure III. 36 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut capacitif (cas d'une diminution) dans la troisième phase et d'un enroulement sain **(Photo personnelle, 2017).**

III.7.3.2 Résultats et discussions :

Les tableaux (III.4 - III.5) récapitulent la variation Δf lors de l'injection des différents défauts capacitifs (augmentation et diminution de la capacité) sur le côté primaire du transformateur.

Tableau III. 4 : La variation Δf du chacune des phases (cas d'une augmentation de la capacité) **(Tableau personnel, 2017).**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	Cas d'une augmentation de la capacité		
	$\|\Delta f(\%)\| = \|((f_{i-1} - f_0)/f_0)\|*100$, (i = 6,5,..,2)		
Δf_1 (%)	7.01	6.75	7.01
Δf_2 (%)	10.49	9	10.49
Δf_3 (%)	13.96	13.49	13.96
Δf_4 (%)	17.44	15.74	17.44
Δf_5 (%)	19.18	20.24	19.18

Tableau III. 5 : La variation Δf du chacune des phases (cas d'une diminution de la capacité) **(Tableau personnel, 2017).**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	Cas d'une diminution de la capacité		
	$\|\Delta f(\%)\| = \|((f_{i+1} - f_0)/f_0)\|*100$, (i= 0,1,...,4)		
Δf_1 (%)	1.74	4.57	1.74
Δf_2 (%)	5.21	11.32	5.21
Δf_3 (%)	12.17	18.07	12.17
Δf_4 (%)	20.92	27.14	20.92
Δf_5 (%)	29.61	40.63	29.61

Les figures (III.37 – III.40) représentent le degré de défaut capacitif Δc dans les deux cas en fonction de la variation Δf de chacune des phases.

Les défauts capacitifs sont simulés par une augmentation et d'une diminution de la capacité dans une plage de 1.1 $*C_{sain}$ jusqu'à 1.5$*C_{sain}$, et de 0.9 $*C_{sain}$ jusqu'à 0.5$*C_{sain}$ respectivement.

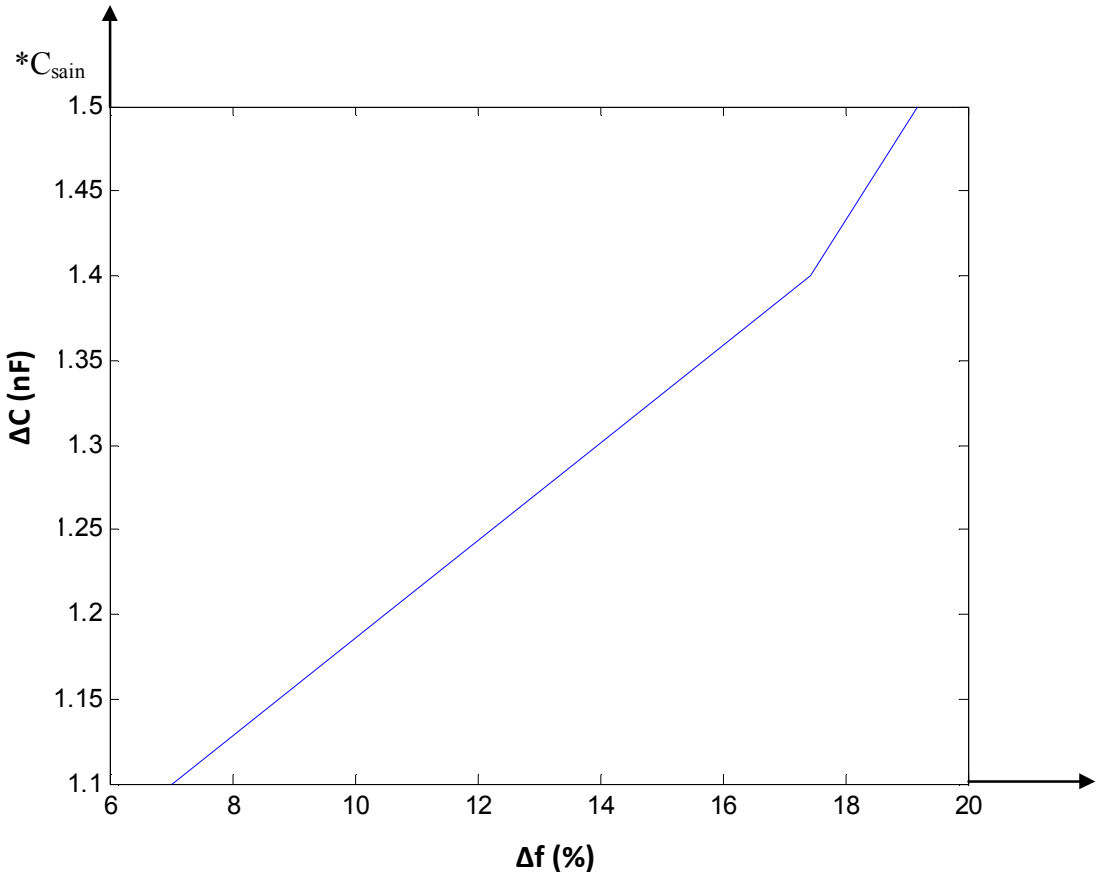


Figure III. 37 : Le degré de défaut capacitif (cas d'une augmentation) ΔC en fonction de Δf dans la première et la troisième phase **(Photo personnelle, 2017).**

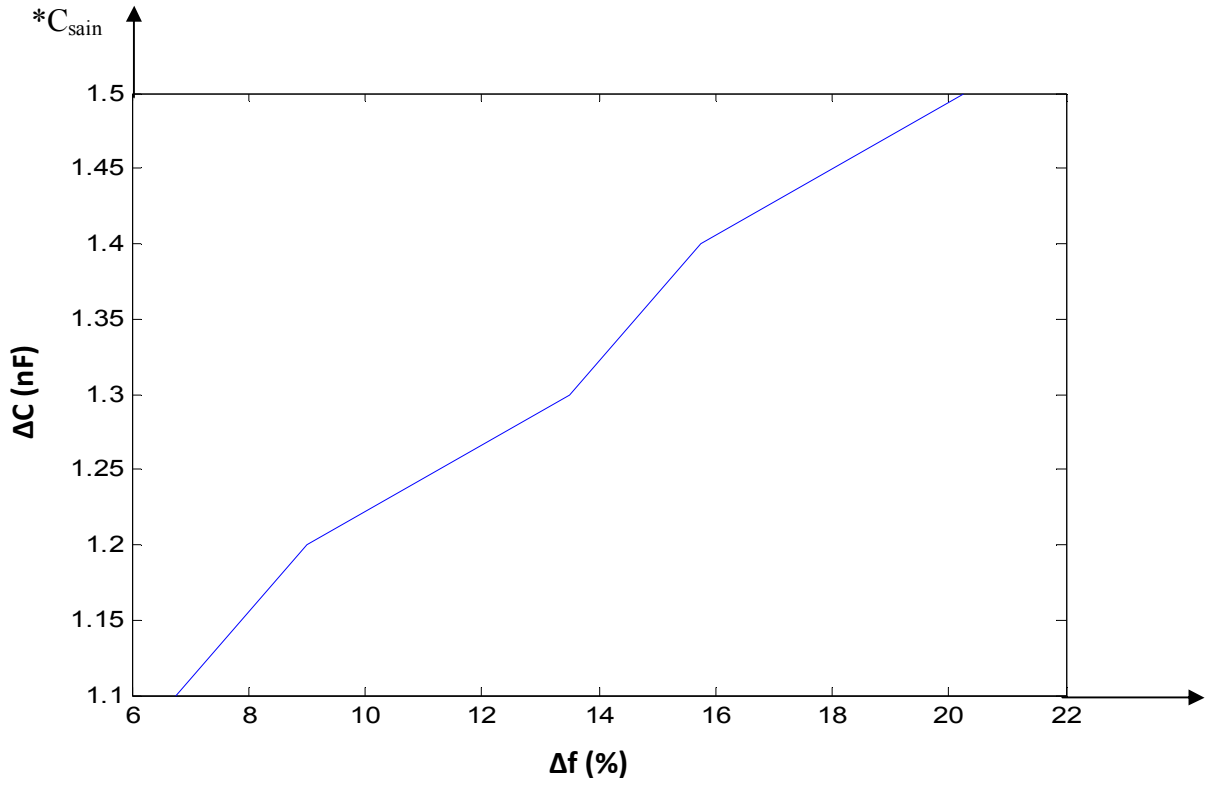


Figure III.38 : Le degré de défaut capacitif (cas d'une augmentation) ΔC en fonction de Δf dans la seconde phase **(Photo personnelle, 2017).**

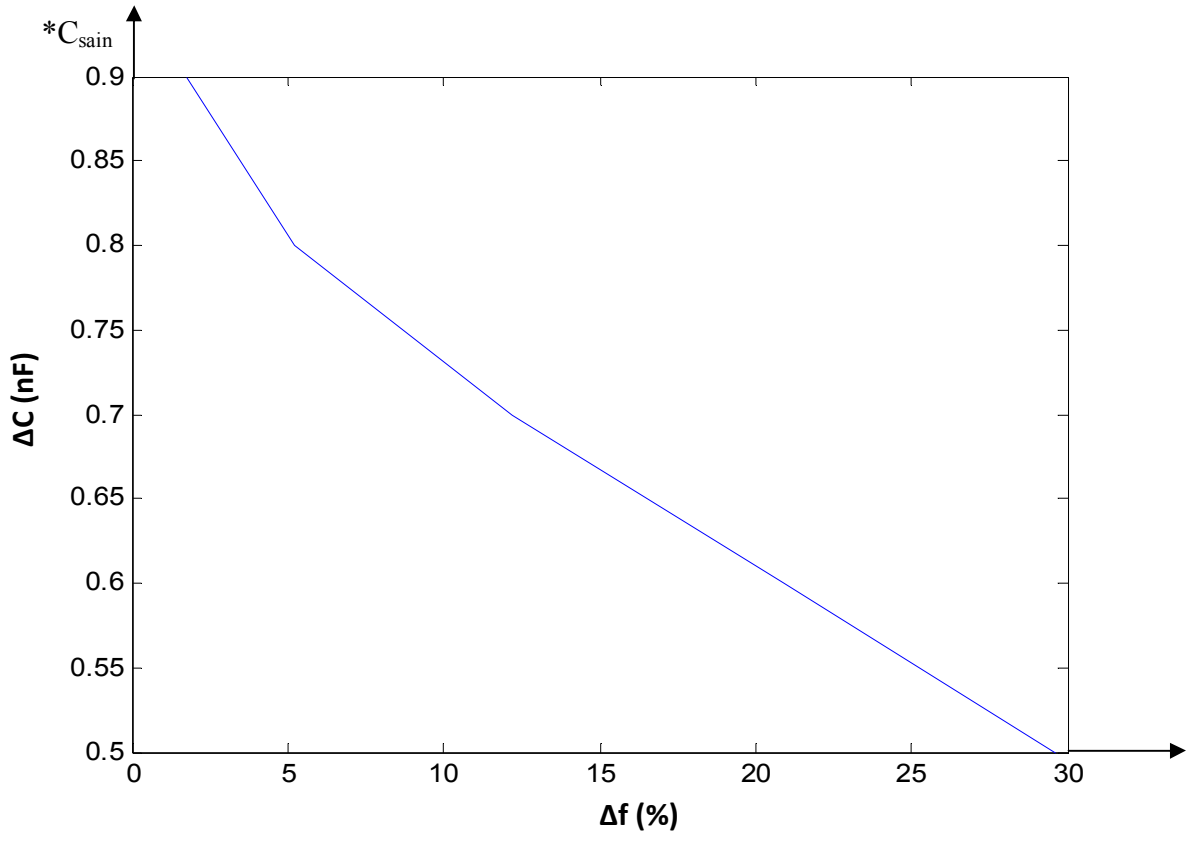


Figure III. 39: Le degré de défaut capacitif (cas d'une diminution) ΔC en fonction de Δf dans la première et la troisième phase **(Photo personnelle, 2017).**

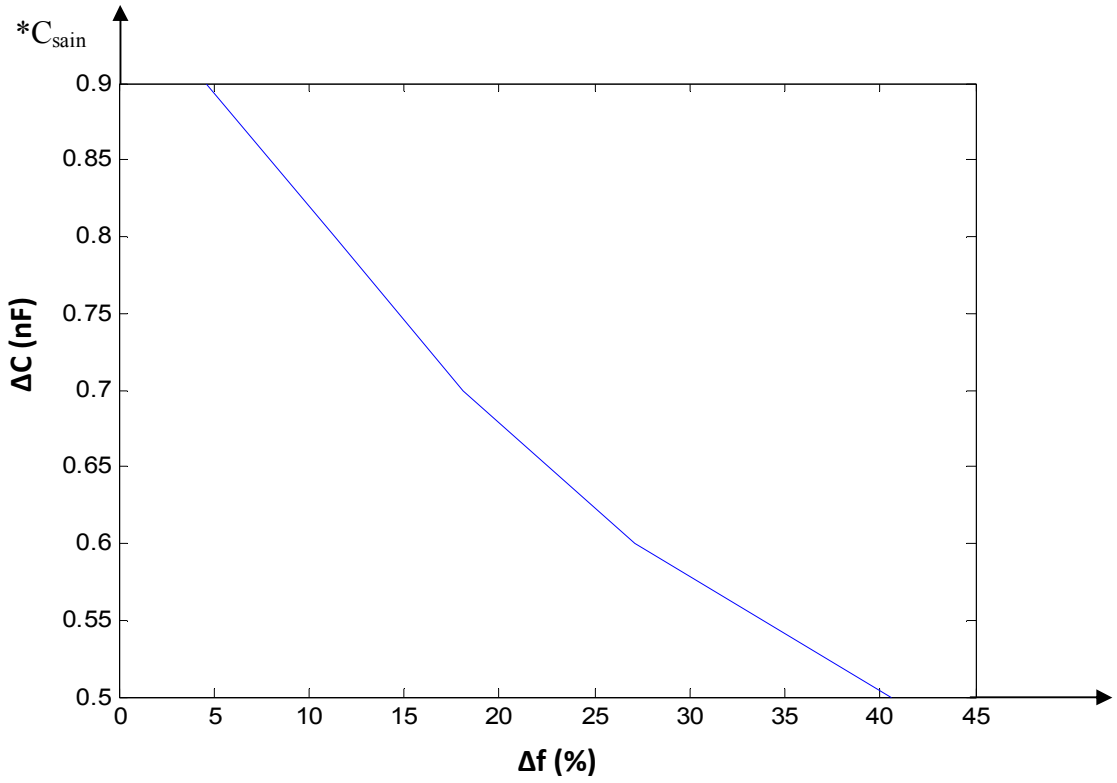


Figure III. 40 : Le degré de défaut capacitif (cas d'une diminution) ΔC en fonction de Δf dans la seconde phase **(Photo personnelle, 2017).**

D'après les résultats obtenus, quelques observations sont retenues :

- Dans le cas d'une atténuation de la capacité, un décalage des fréquences de résonance vers la droite des réponses fréquentielles de l'enroulement défectueux par rapport à l'enroulement sain. Ce décalage est d'autant plus important avec la diminution de la capacité.
- Dans le cas d'une augmentation de la capacité, un décalage des fréquences de résonance vers la gauche des réponses fréquentielles de l'enroulement défectueux par rapport à l'enroulement sain. Ce décalage vers la gauche des fréquences de résonance est proportionnel à l'augmentation de la capacité.

Conclusion :

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

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

- L'enroulement du transformateur peut être représenté en basse fréquence par une cellule RLC.
- Les résultats obtenus par simulation en utilisant trois méthodes différentes sont concordants avec ceux obtenus expérimentalement sur un transformateur de 300VA (230V-115V).
- En comparant les trois méthodes d'identification utilisées pour le calcul des paramètres, l'algorithme ABC s'est avéré le meilleur en terme de précision et de rapidité.
- Tout défaut apparu dans l'enroulement est traduit par une variation de sa réponse fréquentielle ce qui rend cette dernier un outil important pour le diagnostic.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

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

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

Le modèle que nous avons jugé le plus adéquat pour notre étude est le modèle en π basé sur la discrétisation de l'enroulement par une cellule RLC. Pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en basse fréquences. Ce modèle a été validé expérimentalement sur un transformateur de laboratoire de 300VA, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

Afin de compléter cette deuxième partie, une modélisation des différent défaillances dans les enroulements primaire a été réalisée, en tant compte des phénomènes physiques, liés aux défaillances traduit par des variations paramétrique du modèle adopté pour le transformateur.

La simulation a été réalisée sous MATLAB.

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

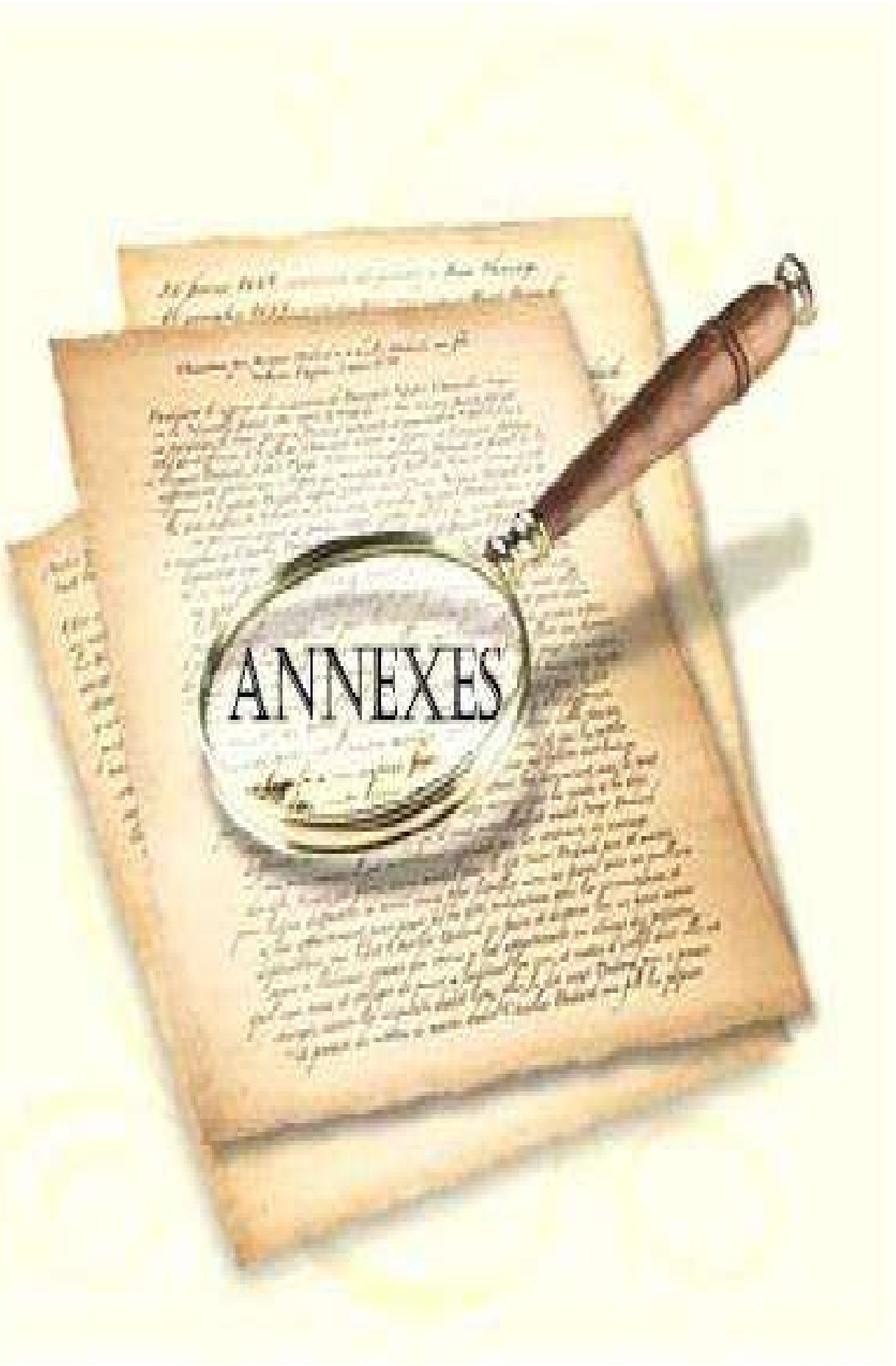
- Les trois méthodes utilisées pour l'identification des paramètres du modèle proposé ont donné des résultats satisfaisants.

- En comparant les trois méthodes utilisées, l'Algorithme ABC offre plus de précision et de rapidité
- En utilisant l'Algorithme ABC, l'écart entre les résultats de mesure et ceux de simulation ne dépasse pas 3%.
- La validation expérimentale du modèle adopté a montré son sens physique, par conséquent ce dernier peut être utilisé comme un outil d'aide au diagnostic.
- Dans la dernière partie nous avons exploité le modèle adopté pour le diagnostic de défaillances dans les phases du transformateur et ceci en introduisant des variations paramétriques appuyée par un sens physique.

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

Comme perspectives, pour ce travail, on propose :

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


ANNEXES

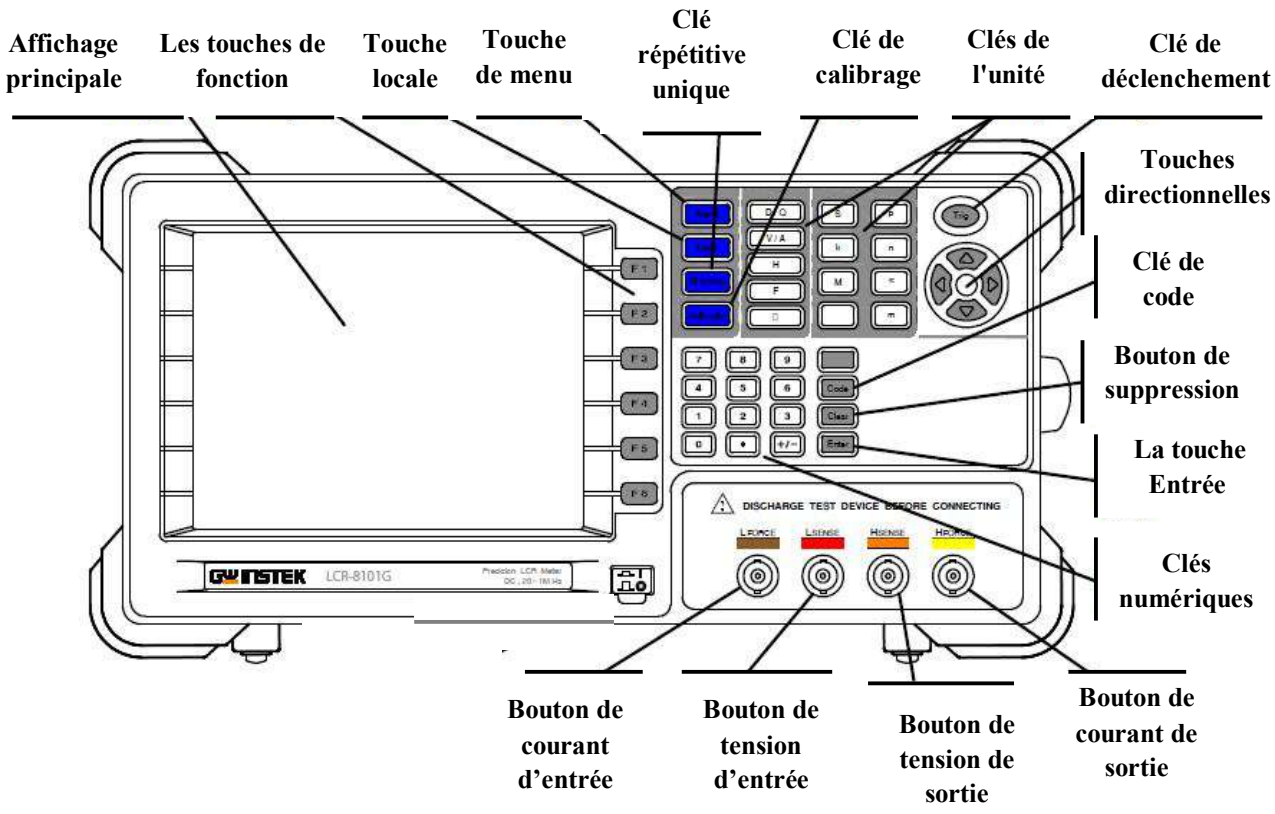
I. Equipements de mesure utilisée :

I.1 RLC mètre :



Est un analyseur de réponse au balayage en fréquence pour le diagnostic des enroulements de transformateur, il mesure la FR des enroulements d'un transformateur sur une large plage des fréquences.

- **Vue de la face avant:**



I.2 Le RS232 :



- Les liaisons RS-232 sont fréquemment utilisées dans l'industrie pour connecter différents appareils électroniques (automate, appareil de mesure, etc.).
- Les ports RS-232 sont désignés par les noms COM1, COM2, …etc.

II. Variations paramétriques :

II.1 Défauts résistifs :

II.1.1 Calcul le degré des défauts résistifs :

$\mathbf{R_{sain}}$ (phase 1) =112976 [Ω] ; $\mathbf{R_{sain}}$ (phase 2) = 194589 [Ω] ; $\mathbf{R_{sain}}$ (phase 3) =112976 [Ω].

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
$\mathbf{\Delta R_1} = R_{sain}$ (1+50%) [Ω]	169464	291883.5	169464
$\mathbf{\Delta R_2} = R_{sain}$ (1+60%) [Ω]	180761.6	311342.4	180761.6
$\mathbf{\Delta R_3} = R_{sain}$ (1+70%) [Ω]	192059.2	330801.3	192059.2
$\mathbf{\Delta R_4} = R_{sain}$ (1+80%) [Ω]	203356.8	350260.2	203356.8
$\mathbf{\Delta R_5} = R_{sain}$ (1+90%) [Ω]	214654.4	369719.1	214654.4
$\mathbf{\Delta R_6} = 2R_{sain}$ [Ω]	225952	389178	225952

II.1.2 La variation ΔZ du chacune des phases :

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	$\lvert\Delta Z\ (\Omega)\rvert = \max(Z_{défaut}) - \max(Z_{sain})$		
ΔZ1(Ω)	28590	52800	28590
ΔZ2(Ω)	34000	63300	34000
ΔZ3(Ω)	39410	73700	39410
ΔZ4(Ω)	44800	84200	44800
ΔZ5(Ω)	50200	94600	50200
ΔZ6(Ω)	55500	105100	55500

II.2 Défauts inductifs :

II.2.1 Calcul le degré des défauts inductifs :

$\mathbf{L_{sain}}$ (phase 1) = 7.023 [H] ; $\mathbf{L_{sain}}$ (phase 2) = 15.637 [H] ; $\mathbf{L_{sain}}$ (phase 3) = 7.023 [H]

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
$\mathbf{\Delta L_1} = L_{sain}$ (1-10%) [H]	6.321	14.073	6.321
$\mathbf{\Delta L_2} = L_{sain}$ (1-20%) [H]	5.618	12.510	5.618
$\mathbf{\Delta L_3} = L_{sain}$ (1-30%) [H]	4.916	10.946	4.916
$\mathbf{\Delta L_4} = L_{sain}$ (1-40%) [H]	4.214	9.382	4.214
$\mathbf{\Delta L_5} = L_{sain}$ (1-50%) [H]	3.512	7.819	3.512

II.2.2 La variation Δf du chacune des phases :

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	$\lvert\Delta f\ (Hz)\rvert = \lvert f_{i+1} - f_0 \rvert$, (i= 0,1,...,5)		
$\mathbf{\Delta f_1}$ **(Hz)**	30	61	30
$\mathbf{\Delta f_2}$ **(Hz)**	150	151	150
$\mathbf{\Delta f_3}$ **(Hz)**	301	241	301
$\mathbf{\Delta f_4}$ **(Hz)**	481	362	481
$\mathbf{\Delta f_5}$ **(Hz)**	722	512	722

II.3 Défauts capacitifs :

II.3.1 Calcul le degré des défauts capacitifs :

$\mathbf{C_{sain}}$ (phase 1) = 1.232 [nF] ; $\mathbf{C_{sain}}$ (phase 2) = 1.403 [nF] ; $\mathbf{C_{sain}}$ (phase 3) = 1.232 [nF]

- **Cas d'une augmentation de la capacité :**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
$\mathbf{\Delta C_1} = C_{sain}$ (1+10%) [nF]	1.355	1.543	1.355
$\mathbf{\Delta C_2} = C_{sain}$ (1+20%) [nF]	1.478	1.684	1.478

$\Delta C_3 = C_{sain}$ (1+30%) [nF]	1.601	1.824	1.601
$\Delta C_4 = C_{sain}$ (1+40%) [nF]	1.725	1.964	1.725
$\Delta C_5 = C_{sain}$ (1+50%) [nF]	1.848	2.104	1.848

- **Cas d'une diminution de la capacité :**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
$\Delta C_1 = C_{sain}$ (1-10%) [nF]	1.109	1.263	1.109
$\Delta C_1 = C_{sain}$ (1-20%) [nF]	0.986	1.122	0.986
$\Delta C_1 = C_{sain}$ (1-30%) [nF]	0.863	0.982	0.863
$\Delta C_1 = C_{sain}$ (1-40%) [nF]	0.739	0.842	0.739
$\Delta C_1 = C_{sain}$ (1-50%) [nF]	0.616	0.702	0.616

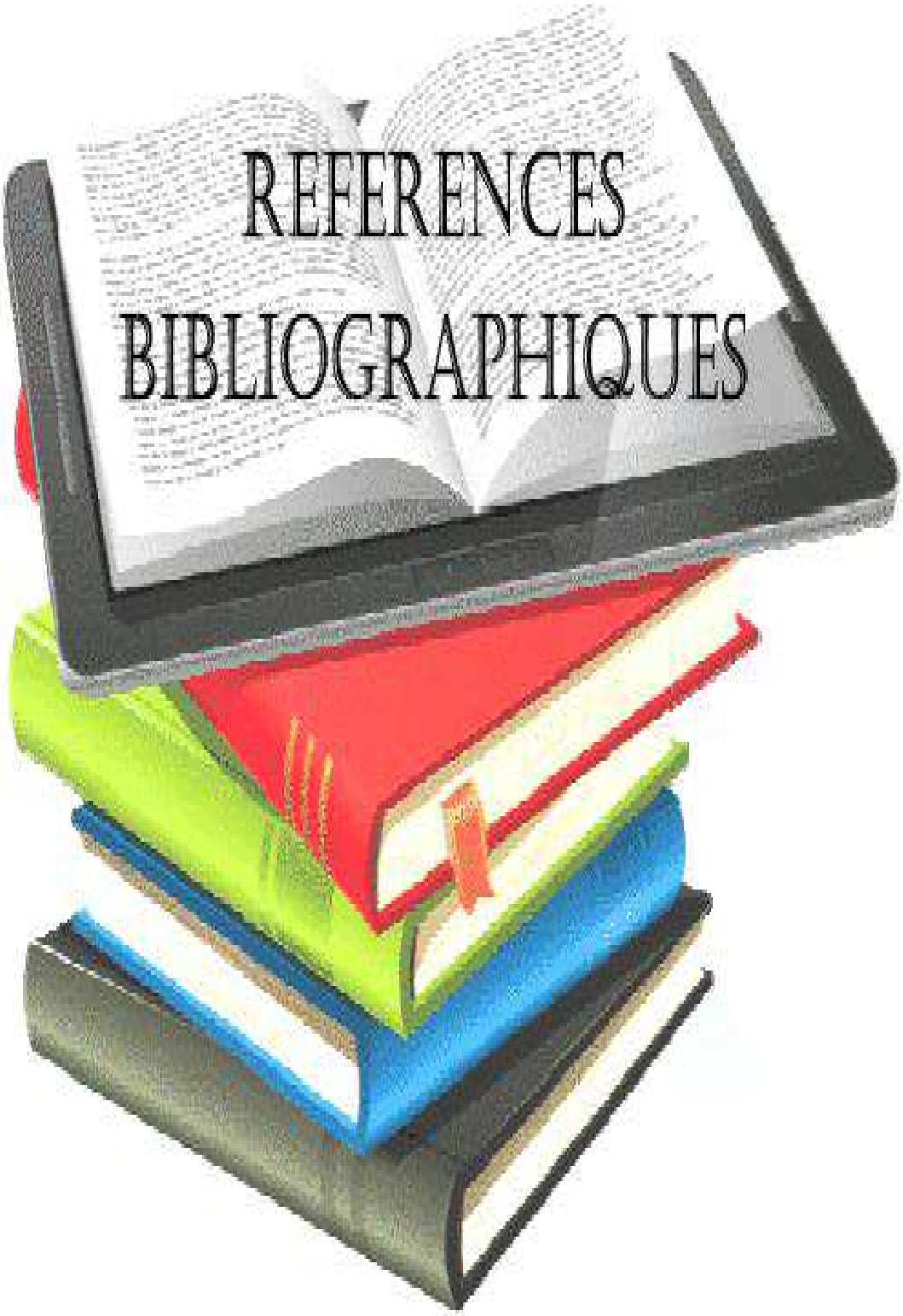
II.3.2 La variation Δf du chacune des phases :

- **Cas d'une augmentation de la capacité :**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	$\lvert\Delta f(Hz)\rvert = \lvert f_{i-1} - f_0 \rvert$, (i =6,5,..,2)		
Δf_1 (Hz)	121	90	121
Δf_2 (Hz)	211	120	211
Δf_3 (Hz)	241	180	241
Δf_4 (Hz)	301	210	301
Δf_5 (Hz)	331	270	331

- **Cas d'une diminution de la capacité :**

	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 3**
	$\lvert\Delta f\ (Hz)\rvert = \lvert f_{i+1} - f_0 \rvert$, (i= 0,1,...,5)		
Δf_1 (Hz)	30	61	30
Δf_2 (Hz)	90	151	90
Δf_3 (Hz)	210	241	210
Δf_4 (Hz)	361	362	361
Δf_5 (Hz)	511	542	511


REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **FRANÇOIS Milsant.** « Électrotechnique machines électriques transformateurs électriques » ,3e édition, Bibliothèque de l'Université Dr. YAHIA Fares, Médéa**.**

[2] **MEZARI Naouel**. « Diagnostic des transformateurs de puissances»**,** mémoire de magister

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

[4] Transformateurs.odt, ,doc ,version du 8 févr. 2007.

[5] **ANTHONY Lefèvre**. « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échaudement sur charges non linéaires ». Submitted on 25 Nov 2006.

[6] **AKKAK Smain and CHIKER Missoum**. « Diagnostic d'un Transformateur de Puissance », Mémoire de Master **,** 2016.

[7] **LEFEVRE.A**. « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs », Ecole Polytechnique de Nantes, 2006.

[8] **MUFIDZADA N.A and OTMANE-CHRIF T**. « Etude de l'influence du Noyau sur les Surtensions impulsionelles dans les enroulements du transformateur », page1-23, 2009.

[9] **EFACEC ENERGIA.** « Essais de transformation de puissance », doc,Porto. janvier 2009.

[10] ABB Power Transformer **.** « Transformateur de Puissance ». Sétif, mai 2009

[11] www.wikipedia.com**.**

[12] **LYCEES PAUL Mathou.** « Electrotechnique : Le transformateur triphasé S0.3 Machines électromagnétiques » ,doc, MS 2011.

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

[14] **GICQUEL Eric.** « Distribution bac ELEEC transformateurs de puissance »,doc.

[15] **SMITH Jessy**. « Fault Diagnosis – Isolation of Malfunctions in Power transformers TATA consultancy service », juin 2009.

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

[17] Formation Transformateurs GRTE avril 2005.

[18] **Florian OMICRON Predl.** « Interpretation of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Measurement Results, www.omicronenergy.cominfo@omicronenergy.com » Australia**.**

[19] **ANKITA Namdeo and Dr. SHAILJA Shuklafault.** « Identification of 45MVA Transformer Winding by Changing Capacitance Value Using Frequency Response Analysis

with Artificial Bee Colony » ,Method, International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering Vol. 2, Issue 3, pp: (3-11), Available at: www.noveltyjournals.com, Month: September-December 2015.

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

[21] **GUSTAVSEN .B and SEMLYEN .A .** « 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.

[22] **BELKACEM.M** « Comportement de l'huile de transformateur ,'Borak 22' sous tension alternative 50 Hz », Mémoire de Magister, Département du Génie Electrique, Option : Réseaux Electriques et Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Soutenu publiquement le 16/05/2007.

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

[24] **MUFIDZADA N.A and OTMANE-CHRIF T.** « Etude de l'Influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur », page1-23, 2009.

[25] **XOSE M. L.F and CASIMIRO A.M.** « Computation method for transients in power transformers With lossy windings » IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, N°. 3, March 2009, pp 1863-1866.

[26] **MANYAHI .M.J , LEIJON .M and THOUTTAPPILLIL .R .** « Transient response of transformer with XPLE insulation cable winding design, Electrical power & energy systems »,Vol 27 pp. 69- 80, 2005.

[27] **AOUCHAR. N and BEKHALED .C.** « Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur », Projet de fin d'études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.

[28] **HANIF TAVAKOLI** .« A High Frequency Transformer Winding Model for FRA Applications » Licentiate thesis in Electromagnetic Engineering, Stockholm, Sweden ,juli 2009.

[29] **MEGGER**. « FRAX 101 Analyzeur de réponse de la fréquence de balayage » FRAX101_DS_fr_V01.

[30] **CHARLES SWEETSER, B.SC, M.SC and Dr. TONY MCGRAIL** .« Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineerin » Version 1.0, 01/2003.

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

[32] **MORCHED.A, .MARTI .L and J OTTEVANGERS .** « A high frequency transformer model for EMTP ». IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 8, No. 3, July 1993.

[33] **DOMMEL.H.W.** « Electromagnetic Transients program (EMTP) Theory Book », Bonneville, 1986.

[34] **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.

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

[36] SONELGAZ Doctrine de maintenance du réseau de transport, Cahier N°2 :« Les transformateurs de puissance », GRTE, Région de transport de l'électricité d'Alger 08.09 2008.

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

[38] **SATISH, SUBRAT K and SAHOO.L.** « Locating faults in a transformer winding: An experimental study, Electric Power Systems Research, journal homepage: www.elsevier.com/locate/epsr » , 2008.

[39] **RAGAVAN .K, SATISH .L and SENIOR MEMBER.** « IEEE, IEEE transactions on power delivery, vol. 22, NO. 3, Localization of Changes in a Model Winding Based on Terminal Measurements: Experimental Study », JULY 2007**.**

[40] **BURAIS N and AURIOL Ph.** « Digital modelling of transformer windings subjected to a surge voltage », Symposium of power and measurement transformera, Positano, Italie, Septembre 1979.

[41] **FERGESTAD P. L and FTENDRIKSEN T.** « Transient oscillations in multiwinding transformers »,, IEEE, Vol. PAS-93, N°3, pp. 500-509, 1974.

[42] **MCNUTT W. J., BLALOCK T. J. and HINTON R. A.** « Response of transformers windings to System transient voltages », IEEE, Vol. PAS-93, N°2, pp. 457-467, 1974.

[43**] HOUASSINE.H.** « Etude des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », Thèse de Doctorat, Département de Génie électrique, Université de Tizi- Ouzou 2010.

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

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

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

[47] **WILDER Herrera, GUILLERMO Aponte, JORGE Pleite and GONZALEZ GARCIA Carlos**. « A novel methodology for transformer low-frequency model parameters identification», « Electrical Power and Energy Systems ,journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijepes», « Elsevier Ltd. All rights reserved, Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Calle 13, No. 100-00, Cali, Colombia, Universidad Carlos III de Madrid, Av. Universidad 30-28911 Leganés, Madrid, Spain », 2013.

[48] **PROF. DR. PETRY HOMRICH Roberto.** « UFRGS Porto Alegre ,Modelo elétrico da impedancia do transformador baseado em células rlc passivas, Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil » , julho de 2010 .

[49] **DR. MARIO MAÑANA CANTELI D.**.« Aportaciones al modelado del transformador en alta frecuencia », Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria. Departamento de Ingenier Eléctrica y EnergéticaSantander », 2012.

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

[51] Méthode des Abeilles Optimisation Avancée.

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

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

[54] **MEZURA-MONTES Efrén, DAMIAN-ARAOZ Mauricio and CETINA-DOM´INGEZ Omar.** « Smart Flight and Dynamic Tolerances in the Artificial Bee Colony for Constrained Optimization » .Sep. 2010.