الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia Farés de Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Projet de Fin D'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en électronique

Spécialité : Instrumentation

Thème

Diagnostic des défauts dans un transformateur de puissance par la méthode d'analyse de la repense en fréquence FRA.

Présenté par :

- LAKHDARI FARIDA.
- *BEN KORTBI M^ed .*

Dirigé par :

- Mr .GACEMI A
- Mr. AMARA A

Année Universitaire 2017-2018

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.GACEMI .A''**, Professeur à l'université D_R. YAHIA Fares de Médéa, pour avoir d'abord proposé ce thème, et pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce travail*

Nous n'oublions pas à remercier *notre co-promoteur Monsieur «**Mr. AMARA .A** » , Professeur à l'université D_R. YAHIA Fares de Médéa pour ses orientations , et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et ses directives, et d'avoir aussi au la gentillesse de lire et corriger ce travail.*

*Nous 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 de génie électrique** de l'université D_R. YAHIA Fares de Médéa qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

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

LAKHDARI FARIDA.

BEN KORTBI M^{ed} .

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

***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 .

Ames frères .

A mes tantes, mes oncles .

A mon marie et mes enfants(meskou,jijo,mido)

*A mes collègues **SOUAD, ZAHRA,NAIMA ,MESKOU ,SOUSOU.kheira .***

*A toute la famille **lakhdari**, **Makhloufi, AbdelFettah, Mohammed Mokhtar Missoumi et Islam***

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

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux de Electronique option instrumentation.

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.

Farida (Samira)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

***À mes très chers parents et A ma femme** qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite, et pour leurs encouragements pendant toute la durée de mes études.*

A mon fils Islam

A mes sœurs et les sœurs de ma femme et leurs enfants.

Amon frère.

A tous membre de la famille BENKORTBI et la famille Fekir

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

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux de Electronique option instrumentation.

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.

MOHAMED.

الملخص:

هذا العمل مخصص لدراسة الأخطاء في اللفات في محول طاقة للتشخيص باستخدام تحليل الاستجابة الترددية (FRA). كان الكشف عن العيوب في ملفات المحولات موضوع هذا العمل ، تم تطبيق الأسلوب الرياضي (الرسم البياني المكافئ). تمت دراسة عدة حالات من أجل رؤية سلوك لف المحولات في ظروف صحية ومعطوبة.

الكلمات المفتاحية: التشخيص، المحول، تحليل الاستجابة الترددية(FRA) ، كشف الأعطال.

Résumé :

Ce travail est consacré à l'étude des défauts dans des enroulements dans un transformateur de puissance en vue de diagnostic en utilisant l'analyse de réponse en fréquence (FRA). La détection des défauts dans les enroulements du transformateur a fait l'objet de ce travail, la méthode mathématique (schéma équivalent) a été appliquée. Plusieurs cas de figures ont été étudiés, afin de voir le comportement de l'enroulement du transformateur dans des conditions saines et défectueuses.

Mots clés : Diagnostic, Transformateur, Analyse de la réponse en fréquence (FRA), détection des défauts.

Abstract :

This work is devoted to the study of faults in windings in a power transformer for diagnostic purposes using frequency response analysis (FRA). The detection of faults in the windings of the transformer has been the subject of this work, the mathematical method (equivalent scheme) has been applied. Several cases of figures have been studied in order to see the behaviour of the transformer winding under sound and defective conditions.

Key words: diagnosis, transformer, frequency response Analysis (FRA), detection of faults.

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I : Généralité sur les transformateurs de puissance

I.1 Introduction 1
I.2 Historique 1
I.3 Définition de transformateur 1
I.3.1 Symbole de transformateur 2
I.3.2 Schéma d'un transformateur monophasé et triphasé 2
I.4 Principe de fonctionnement 3
I.4.1 Schéma électrique équivalant 3
I.4.2 Essais sur les transformateurs 3
I.4.2.1 Essais à vide 4
I.4.2.2 Essais en court-circuit 4
I.4.2.3 Essais en charge 5
I.4.3 Bilan de puissance 5
I.4.4 Rendement 6
I.5 Utilisations de transformateur de puissance 6
I.6 Types des transformateurs de puissances 7
I.6 .1 Transformateur immergé 7
I.6 .2 Transformateurs secs 7
I.6 .3 Autotransformateur 8
I.6 .4 transformateur d'isolement 8
I.6 .5 Transformateur de potentiel 8
I.6 .6 Transformateur de courant 8
I.6 .7 transformateur de distribution 9
I.7 Technologies de construction de transformateur de puissance 9
I.7.1 Partie active 10
I.7.1.1 Circuit magnétique 10
I.7.1.1.1 Type cuirassé 10
I.7.1.1.2 Type colonnes 11
I.7.1.2 Enroulements 12
I.7.2 Isolation 12
I.7.2.1 Isolation cellulosique 12
I.7.2.2 Isolation liquide 13
I.7.3 Cuve 13
I.7.4 Traversées 14
I.7.5 Equipement 14
I.7.5.1 Changeurs de prise 14
I.7.5.3 Conservateur 15
I.7.5.4 Coffret des auxiliaires 15
I.7.5.5 Coffret de commande du changeur de prise en charge 15
I .8 Conclusion 16

Chapitre II : défauts et protection de transformateur de puissance

II.1 Introduction 17
II.2 Contraintes et défauts 18
II.2 .1 Contraintes diélectriques et surtensions 19

SOMMAIRE

II.2 .1 .1Contraintes normales 19
II.2 .1 .2 Contraintes anormales 19
II.2 .1.3 Défauts possibles dus aux contraintes diélectriques 19
II.2 .2 Contraintes électrodynamiques et surintensités 20
II.2 .2 .1Contraintes normales 20
II.2 .2 .2 Contraintes anormales 20
II.2 .2 .3 Défauts possibles dus aux surintensités 21
II.2 .3 Contraintes électriques : mauvais contacts 21
II.2 .3.1 Contraintes normales 22
II.2 .3.2 Contraintes anormales 22
II.2 .3.3 Défauts électriques possibles 22
II.2 .4Contraintes thermiques : surcharges, points chauds et vieillissement 23
II.2 .4.1Contraintes normales 23
II.2 .4.2 Contraintes anormales 23
II.2 .4.3 Défauts possibles dus aux contraintes thermiques 23
II.2 .5 Contraintes électromagnétiques et courants de Foucault 24
II.2 .5.1 Contraintes normales 24
II.2 .5.2 Contraintes anormales 24
II.2 .5.3Défauts possibles dus aux contraintes électromagnétiques 25
II.2 .6 Contraintes mécaniques : vibrations, fuites et transport 25
II.2 .6.1 Contraintes normales 25
II.2 .6.2 Contraintes anormales 25
II.2 .6.3 Défauts possibles dus aux contraintes mécaniques 26
II.3 protection et surveillance de transformateur de puissance 26
II.3 .1 Différents types de protections 27
II.3 .1.1 Protections internes 27
II.3 .1.1 .1 Protection masse cuve 27
II.3 .1.1 .2 Protection par DGPT 27
II.3 .1.1 .3 Protection thermique 28
II.3 .1.2 Protection externes 28
II.3 .1.2.1 Protection des surtensions 28
II.3 .1.2 .2 Protection à maximum d'intensité 29
II.3 .1.3 Protection différentielle 29
II.4 Exploitations d'un transformateur de puissance 30
II.4 .1Vieillissement 30
II.4 .2 Fiabilité d'un transformateur 30
II.4 .3 Age du transformateur 31
II.5. Conclusion 32

Chapitre III : modélisation et technique d'analyse fréquentielle

III.1 Introduction 32
III.2 Analyse de la réponse en fréquence (FRA) 32
III.3 Principe de la méthode FRA 32
III.4 Objectifs des mesures par FRA 33
III.5 Les tests FRA 34
III.5.1 Type d'essais par FRA 35

SOMMAIRE

III.5.1 .1 Essais entre extrémités 35
III.5.1 .2 Essais en court-circuit 35
III.5.1 .3 Essai capacitif entre enroulements 36
III.5.1 .4 Essai inductif entre enroulements 36
III.6.Modélisation des transformateurs 37
III.7 Principaux modèles des transformateurs de puissance 37
III.7 .1 Modèles basés sur des mesures 37
III.7 .1.1 Mesures sur un prototype de taille réelle 38
III.7 .1.2 Mesures sur un prototype de taille réduite 38
III.7 .2 Modèles mathématiques 38
III.7 .2.1 Le modèle EMTP 38
III.7 .2.2 Le modèle RESEL 39
III.7 .2.3 Modélisation par inductances propres et mutuelles 40
III.7 .2.4 Modèle issu du principe de la dualité magnétique-électrique 41
III.7 .2.5 Modélisation à partir du calcul de champ électromagnétique 42
III.7 .2.6 Modélisation par la théorie de lignes 42
III.7 .2.7 Modélisation par l'analyse modale 42
III.7 .2.8 Modélisation par des circuits ou des transformées 43
III.8 circuit équivalent de l'enroulement du transformateur 43
III.9 Équations du schéma équivalent adopté 44
III.9 .1Équations des tensions 44
III.9 .2 Équations des courants 44
III.9 .3 Représentation matricielle des équations du modèle 45
III.10 Conclusion 46

Chapitre IV détection des défauts dans les enroulements

IV.1 Introduction 47
IV.2 Type de défauts de l'enroulement 47
IV.3 Etude de l'influence de chaque type de défaut sur la réponse fréquentielle de l'enroulement 47
IV.3.1 Réponse fréquentielle d'un Court-circuit au niveau impédances 47
IV.3.2 défauts de court-circuit sur l'enroulement 50
IV.3.3 Réponse fréquentielle d'un Court-circuit l'entrée de 56
IV.3.4 Défauts de court-circuit dans le milieu de l'enroulement 58
IV.3.5 Défauts de court-circuit à la sortie de l'enroulement 60
IV.4. Conclusion 61
Conclusion générale.
Bibliographie.
Annexe.

Liste des figures

Figure	Page
Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance	
Figure (I.1) Transformateur monophasé	1
Figure (I.2) Transformateur triphasé	1
Figure (I.3) Symbole de transformateur de puissance	2
Figure (I.4) Schéma d'un transformateur monophasé	2
Figure (I.5) Schéma d'un transformateur triphasé de type colonne	2
Figure (I.6) Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance	3
Figure (I.7) Schéma électrique monophasé	3
Figure (I.7.1) schéma d'essais en charge	5
Figure (I.8) Schéma de bilan de puissance d'un transformateur	5
Figure (I.9) Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique	6
Figure (I.10) Transformateur immerge dans l'huile	7
Figure (I.11) Transformateur sec	7
Figure (I.12) Schéma d'un autotransformateur	8
Figure (I.13) Vue intérieure d'un transformateur, type colonne	9
Figure (I.14) Circuit magnétique	10
Figure(I.15) Circuit magnétique triphasé type cuirassé	11
Figure (I.16) Circuit magnétique triphasé à trois colonnes	11
Figure (I.17) circuit magnétique triphasé à Cinque colonnes	11
Figure(I.18) Enroulement	12
Figure(I.19) Coupe de demi-enroulement	12
Figure (I.20) La cuve d'un transformateur de puissance	13
Figure (I.21) Traversé porcelaine	14
Figure (I.22) Traverse condensateur	14
Chapitre II : défauts et protection de transformateur de puissance	
Figure (II.1): Explosion de transformateur	18
Figure (II.2): Amorçage franc entre spires	20
Figure (II.3): Amorçage entre enroulement	20
Figure (II.4): Effort électrodynamique franc	22
Figure (II.5) : Court-circuit entre spires	22
Figure (II.6): Point chaud sur le sélecteur d'un régleur en charge	23
Figure (II.7): Coupure suite à la fusion d'un conducteur	23
Figure (II.8): Point chaud sur connexion boulonnée	24
Figure (II.9): échauffement excessif d'un enroulement	24
Figure (II.10): Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM)	25
Figure (II.11): Problème de transport	26
Figure (II.12): Joint de traversée écrasé	26
Figure (II.13): Placement de TC tore	27
Figure (II.14): Protection masse cuve	27
Figure (II.15): Dispositif DGBT.	28
Figure (II.16): Eclateur.	29
Figure (II.17): Parafoudre	29
Figure (II.18): schéma de fonctionnement de la protection différentielle	30
Chapitre III : modélisation et technique d'analyse fréquentielle	
Figure (III.1): Principe de la mesure FRA	34

Liste des figures

Figure (III.2): Essai entre extrémités	36
Figure (III.3): Essai en court-circuit	37
Figure (III.4): Essai capacitif entre enroulements	37
Figure (III.5): Essai inductif entre enroulements	38
Figure (III.6): Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP	40
Figure (III.7): modèle de RESEL	41
Figure (III.8): Modèle du transformateur basé sur inductances propres et mutuelles	42
Figure (III.9): Modèle du transformateur basé sur la dualité magnétique-électrique	43
Figure (III.10): circuit équivalent de l'enroulement du transformateur	47
Chapitre IV : détection des défauts dans les enroulements	
Figure IV.1 Schéma équivalent des enroulements du transformateur	48
Figure IV.2 courbes de Réponse fréquentielle de l'enroulement sans défaut	49
Figure IV.3 : Comparaison entre enroulement réel et un circuit synthétisé	50
Figure IV.4 court-circuit d'une cellule	51
Figure IV.5 Courbe de la réponse en base fréquence	51
Figure IV.6 le modèle des enroulements pour la fréquence f =0 Hz	52
Figure IV.7 Réponse des enroulements Req=0.25 Ω état sain	53
Figure IV.8 Réponse des enroulements Req=0.20 Ω cellule en court-circuit	54
Figure IV.9 Réponse des enroulements Req=0.15 Ω /deux cellules en court-circuit	55
Figure IV.10 défauts de court-circuit	56
Figure IV.11 Défauts de court-circuit sur l'entrée de l'enroulement.	57
Figure IV .12 Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut à l'entée	57
Figure IV.13 modèle des enroulements avec défaut au milieu de l'enroulement	58
Figure IV .14 Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut au milieu.	59
Figure IV .15 Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut à la sortie.	60

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Chapitre I Généralité des transformateurs de puissance		
Tableau (I.1)	Essais à vide	**4**
Tableau (I.2)	Essai en court-circuit	**5**
Chapitre IV : détection des défauts dans les enroulements		
Tableau IV.1	Réponse fréquentielle de l'enroulement sans défaut.	**50**
Tableau IV.2	Réponse fréquentielle de l'enroulement état sain	**51**
Tableau IV.3	Réponse fréquentielle de l'enroulement Req =0.20 Ω cellule en court-circuit.	**53**
Tableau IV.4	Réponse fréquentielle de l'enroulement Req =0.15 Ω deux cellules en court-circuit	**55**
Tableau IV.5	Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut au milieu	**59**
Tableau IV.6	Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut a la sortie	**60**

Abréviations

R_{eq}	*Résistance équivalente*	Ω
ϕ	*Flux magnétique*	Vs
N_1	*Nombre des spires primaire*	/
I_1	*Courant primaire*	A
U_1	*Tension primaire*	V
N_2	*Nombre des spires secondaire*	/
I_2	*Courant secondaire*	A
U_2	*Tension secondaire*	U
$Cos\ (\phi)$	*Facteur de puissance*	/
$\frac{1}{R_f}$	*Résistance shunt*	Ω^{-1}
$\frac{1}{X_m}$	*Réactance shunt*	Ω^{-1}
Z_{eq}	*L'impédance équivalente*	Ω^{-1}
X_{eq}	*Réactance équivalente*	Ω^{-1}
P_{cc}	*Puissance en court-circuit*	w
V_{cc}	**Tension en court-circuit*	V
I_{cc}	*Courant en court-circuit*	A
P_{J1}	*Pertes joule au primaire*	w
P_{J2}	*Pertes joule au secondaire*	w
P_{fer}	*Pertes ferromagnétique*	w
P_2	*Puissance utile*	w
HT	*Haute tension*	
BT	*Bas tension*	
CM	*Circuit magnétique*	

Introduction générale

L’énergie électrique est un produit d’intérêt capital pour tout développement de la société d’aujourd’hui, le transformateur est considéré comme l’élément indispensable dans le réseau de transport et de distribution d’électricité, l’impact d'une défaillance du transformateur peut être catastrophique car il peut provoquer des pannes prolongées, des réparations coûteuses et des avaries potentiellement graves, afin de conserver une longue durée de vie, une qualité et une continuité de service, c’est l’objectif de tous les distributeurs et transporteurs à travers le monde, un diagnostic périodique est nécessaire [1].

Le diagnostic consiste en la détection d’un changement anormal dans le comportement du transformateur, un système de diagnostic peut être mis en œuvre dans deux cas ; en cours d’exploitation ou pendant l’arrêt d’exploitation. En cours d’exploitation, le but est de garantir la sécurité et la continuité de service. En arrêt d’exploitation, l’objectif est d’évaluer le degré de vieillissement de certains éléments et de décider d’une opération de maintenance préventive ou curative [2].

Afin d’avoir un fonctionnement fiable du transformateur, il est nécessaire d'identifier les problèmes bien avant qu’une avarie se produise. En dépit de la maintenance corrective et prédictive, la maintenance préventive du transformateur doit être prise en compte pour obtenir la plus haute fiabilité des dispositifs électriques tel le transformateur de puissance, un besoin croissant de meilleures méthodes de diagnostic non intrusif pour évaluer l'état interne des transformateurs s’avère nécessaire de nos jours [3].

Tous les progrès dans le domaine de diagnostic se traduisent par la création d’une panoplie de techniques permettant d’évaluer l’état du transformateur, la technique de l’Analyse de la Réponse en Fréquence (FRA) est considérée comme l’une des méthodes de diagnostic les plus pertinente, elle est considérée comme une méthode a grande précision, économique et non destructive pour le diagnostic des transformateurs [4].

L'identification des paramètres de l’enroulement du transformateur est un problème difficile, plusieurs méthodes ont été proposées pour le résoudre, telles que la méthode de modèle équivalent de l’enroulement du transformateur ont été proposées

Le contenu de cette thèse est structuré en quatre chapitres présentés comme suit :

- Dans le premier chapitre, on trouve des généralités sur les transformateurs de puissance tels que le principe de fonctionnement et les différents éléments qui constituent cette machine.

- Dans le deuxième chapitre nous présentons les différentes méthodes de diagnostic des défauts, et leur protection interne et externe.
- L'analyse de la fréquence FRA et les modélisations des transformateurs fera l'objet du troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre est dédié à la détection des défauts dans les enroulements du transformateur.

Finalement on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus.

I.1 Introduction

Les transformateurs de puissance sont des organes vitaux des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils sont utilisés pour adopter le niveau de tension aux besoins de l'utilisateur.

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs, nous avons aussi donné un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent, leur rôle et leur importance dans cette machine statique.

I.2 Historique

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur véhiculant un courant générait un champ magnétique. Quelques années plus tard, en1830, Josef Henry donne corps aux notions d'induction et de self-induction. En 1831 l'anglais Michael Faraday à une série d'expériences avec un appareil constitué d'un anneau de fer et d'enroulements de fil cuivre isolé.

En 1832 Lucien Gaulard (1850-1880), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la société Française des Électriciens « un générateur secondaire », dénomme depuis Transformateur [1].

I.3 Définition de transformateur

Le transformateur est une machine électrique statique, appelé aussi convertisseur statique à induction, il comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, destiné à transformer la tension et le courant alternatif, à une tension et courant alternatif de même fréquence mais d'amplitudes différentes selon les besoins d'utilisation [2].



Figure (I.1) Transformateur monophasé.



Figure (I.2) Transformateur triphasé.

I.3.1 Symbole de transformateur

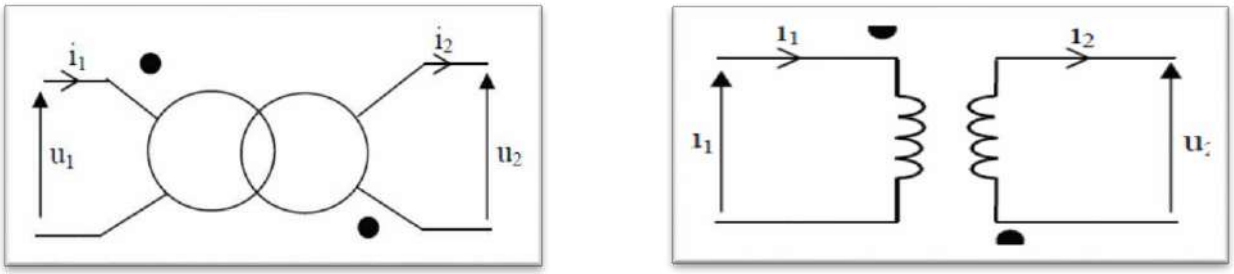


Figure (I.3) Symbole de transformateur de puissance.

Les deux points représentés dans chaque symbole permettent de repérer le sens conventionnel de la tension et du courant [3].

I.3.2 Circuit d'un transformateur monophasé et triphasé :

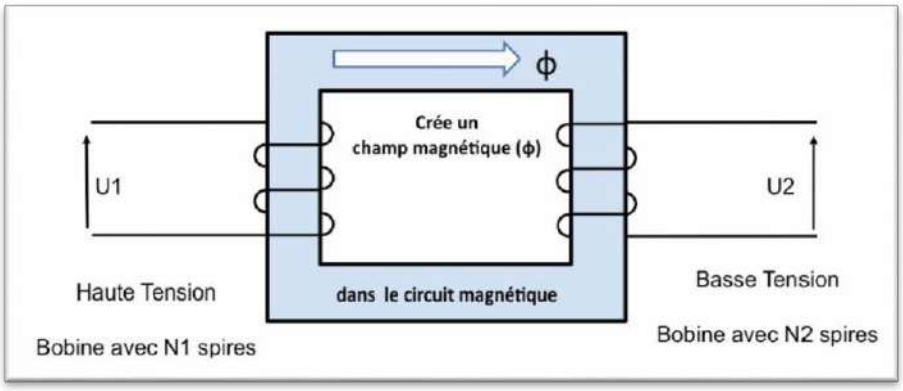


Figure (I.4) Schéma d'un transformateur monophasé.

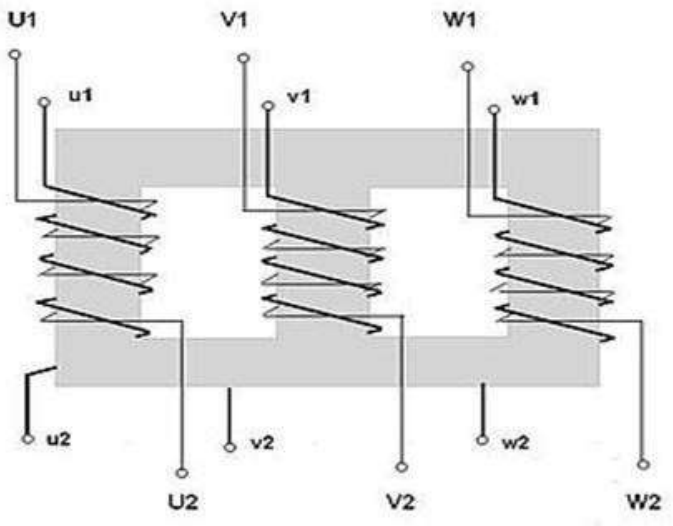


Figure (I.5) Schéma d'un transformateur triphasé de type colonne.

I.4 Principe de fonctionnement

Un transformateur comprend essentiellement deux circuits électriques montés sur un circuit magnétique, l'un des circuits électriques dit enroulement primaire comporte N_1 spires étant raccordé à une source de tension alternatif U_1, le courant I_1 qui traverse cet enroulement donne naissance à un flux ϕ_m dans le circuit magnétique. Ce flux induit une force électromotrice dans le deuxième enroulement dit « enroulement secondaire » de N_2 spires aux bornes duquel apparait une tension U_2 [4].

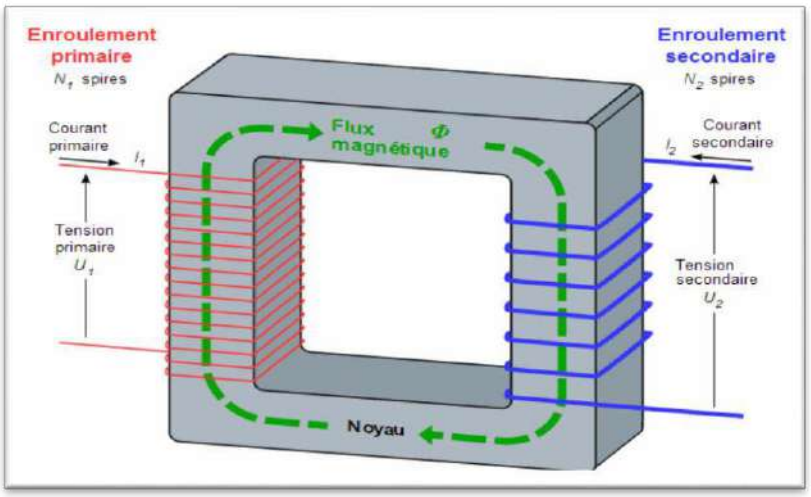


Figure (I.6) Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

I.4.1 Schéma électrique équivalant

Schéma électrique monophasé de transformateur réel représenté ce dissous [5].

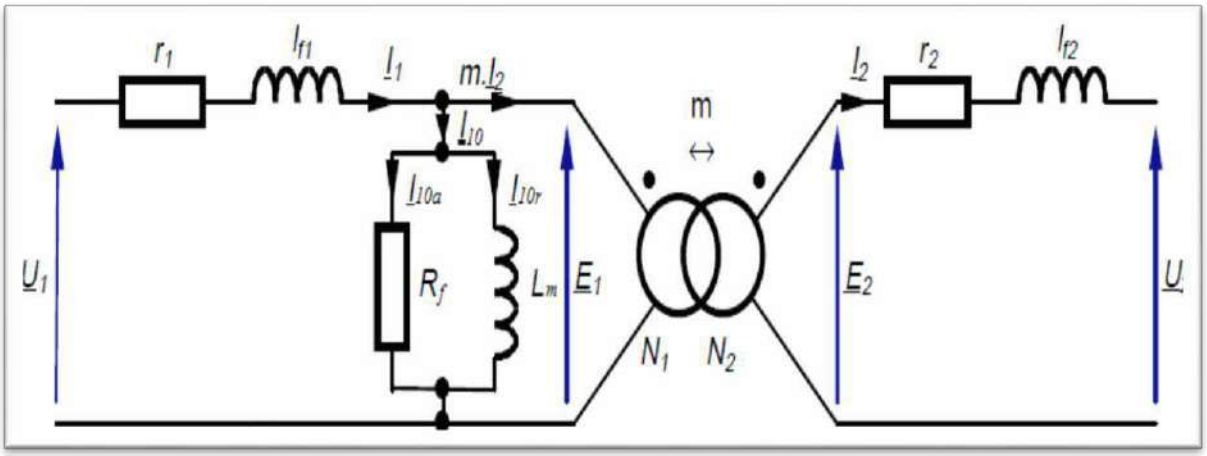


Figure (I.7) Schéma électrique monophasé.

I.4.2 Essais sur les transformateurs

A partir de ces essais on peut déterminer les paramètres du circuit équivalant des transformateurs représentés dans la figure (I.7). Il s'agit des essais suivants [1].

I.4.2.1 Essais à vide

L'essai à vide consiste à appliquer la tension nominale en gardant le secondaire à vide. La mesure du courant, de la puissance et de la tension permet la détermination des paramètres et pertes fer (I_2=0).

Le montage de mesures utilisés sont résumés dans le tableau (I.1).

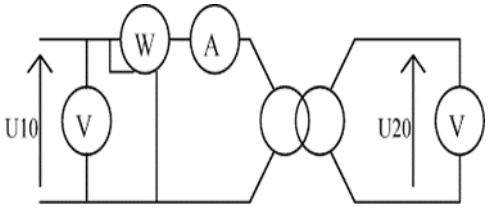
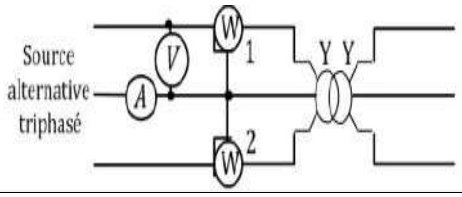
	Cas monophasé	Cas triphasé
Circuit de teste		
Facteur de puissance	$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{V_0 I_0}$	$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{\sqrt{3} V_0 I_0}$
Résistance shunt	$\frac{1}{R_f} = \frac{I_0}{V_0}\cos(\varphi)$	$\frac{1}{R_f} = \frac{I_{0-phase}}{V_{0-phase}}\cos(\varphi)$
Réactance shunt	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_0}{V_0}\sin(\varphi)$	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_{0-phase}}{V_{0-phase}}\sin(\varphi)$

Tableau (I.1) Essais à vide.

I.4.2.2 Essais en court-circuit

L'essai en court-circuit permet la détermination des paramètres et pertes joule, consiste à appliquer la tension réduite (valeur minimale) au primaire en gardant le secondaire en court-circuit. Puis on augmente la tension primaire jusqu'à ce que le courant secondaire atteigne sa valeur nominale. On mesure le courant et la puissance de court- circuit.

Le montage de mesures utilisés sont résumés dans le tableau (I.2).

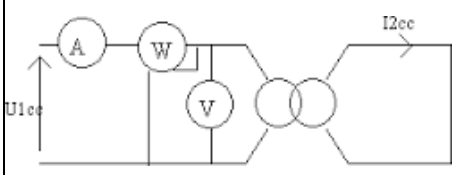
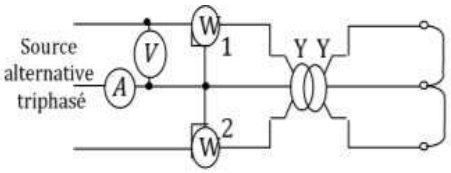
	Cas monophasé	Cas triphasé
Circuit de teste		
Facteur de puissance	$\cos(\varphi) = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{cc}}$	$\cos(\varphi) = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} I_{cc}}$
L'impédance équivalente	$Z_{eq} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \cos(\varphi)$	$Z_{eq} = \frac{I_{cc-phase}}{V_{cc-phase}} \cos(\varphi)$ $R_{eq} = \frac{P_{cc}}{3 {I_{cc}}^2}$
Réactance série	$X_{eq} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \sin(\varphi)$	$X_{eq} = \sqrt{{Z_{eq}}^2 - {R_{eq}}^2}$

Tableau (I.2) Essai en court-circuit.

Les paramètres équivalents séries peuvent être calculés en les ramenant au côté primaire ou secondaire.

I.4.2.3 Essais en charge

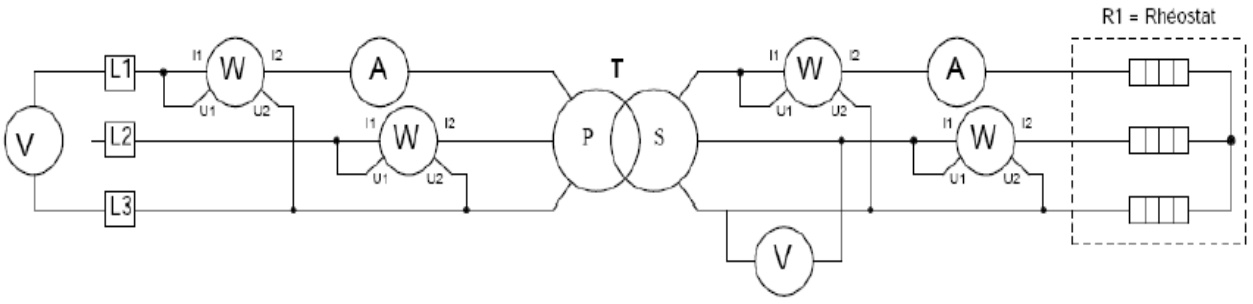


Figure (I.7.1) schéma d'essais en charge

I.4.3 Bilan de puissance

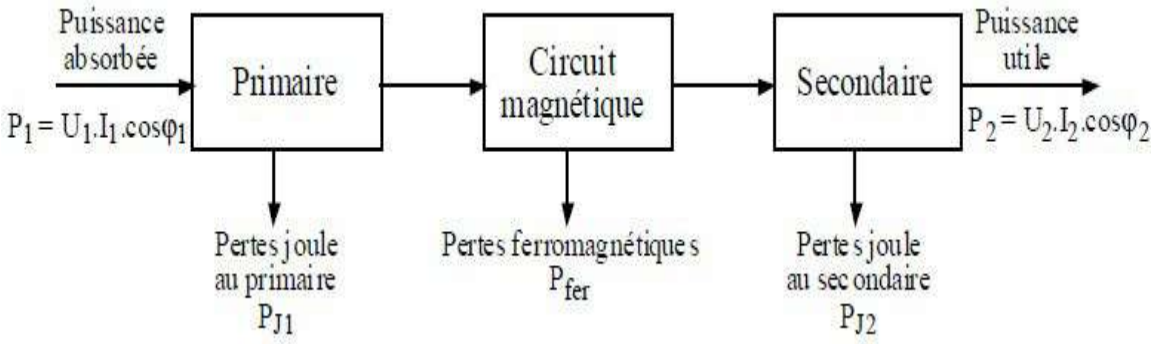


Figure (I.8) Schéma de bilan de puissance d'un transformateur.

Bilan de puissance égale

$P_1 = P_{J1} + P_{fer} + P_{J2} + P_2$

I.4.4 Rendement

Le rendement du transformateur par définition égale le rapport de la puissance fournie par le secondaire sur la puissance absorbée au primaire.

$$n = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{puissance\ fournie\ par\ secondaire}{puissance\ fournie\ par\ primaire}\right)$$

I.5 Utilisations de transformateur de puissance

Les transformateurs de puissance sont des appareils très employés dans les réseaux électriques et les applications industriels [6].

- la sortie des centrales électriques,
- transport d'énergie électrique,
- distribution d'énergie électrique,
- les applications industrielles .

Un transformateur peut assurer deux fonctions :

- élever ou abaisser une tension alternative monophasée ou triphasée,
- assurer l'isolation entre deux réseaux électriques (isolation galvanique entre deux réseaux électriques).

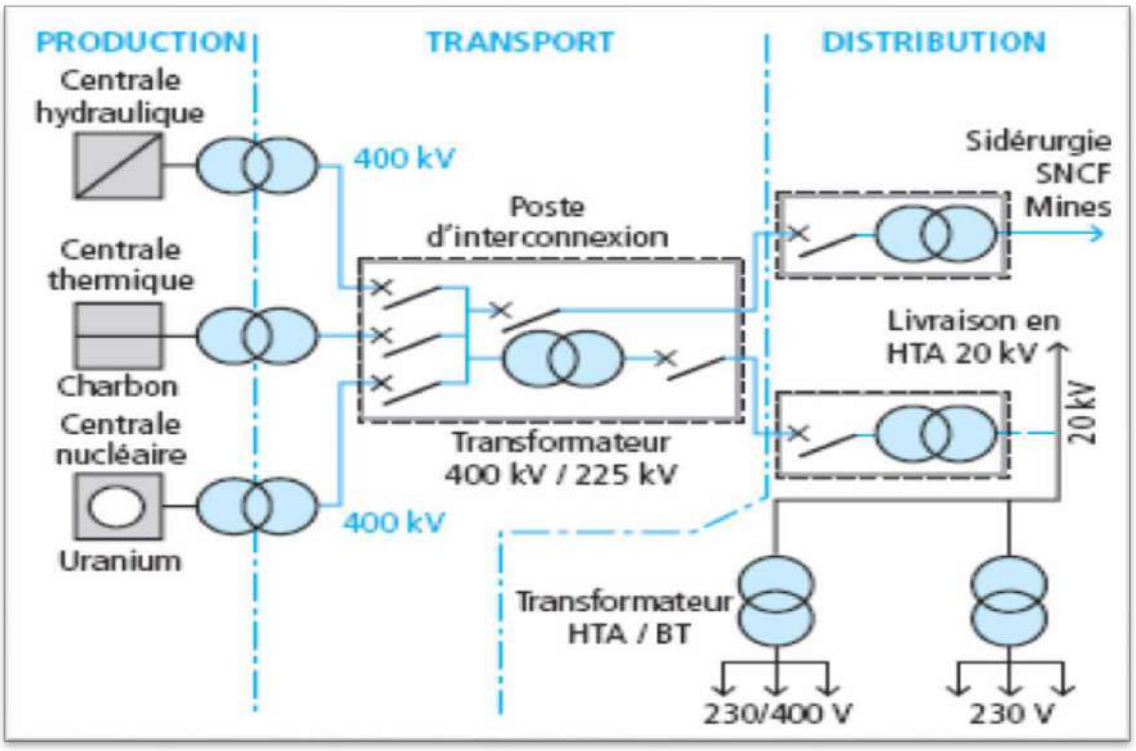


Figure (I.9) Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique [6].

I.6 Types des transformateurs de puissances

I.6 .1 Transformateur immergé

Le transformateur est disposé dans un bain d'huile qui assure l'isolement et le refroidissement. Ce transformateur est moins onéreux et a des pertes moindres que le transformateur sec [7].



Figure (I.10) Transformateur immerge dans l'huile.

I.6 .2 Transformateurs secs

Les enroulements BT et les enroulements HT sont concentriques et enrobés dans une résine époxy. Le transformateur sec peut être disposé dans une enveloppe de protection qui permet de l'isoler du monde extérieur et d'assurer l'évacuation de la chaleur au travers de ses parois.

Le transformateur sec présente les meilleures garanties de sécurité contre la pollution (pas

de fuite de liquide, pas de vapeurs nocives en cas d'incendie) [8].



Figure (I.11) Transformateur sec.

I.6 .3 Autotransformateur

Cet appareil présente l'avantage d'un dimensionnement plus faible que celui d'un transformateur, à puissance traversant égale. Il se distingue du transformateur par le fait qu'il existe un point commun aux enroulements primaires et secondaires. Etant donné qu'il n'y a plus d'isolation galvanique entre les enroulements primaires et secondaires, tout défaut se manifestant sur un réseau se propage immédiatement sur le second [5].

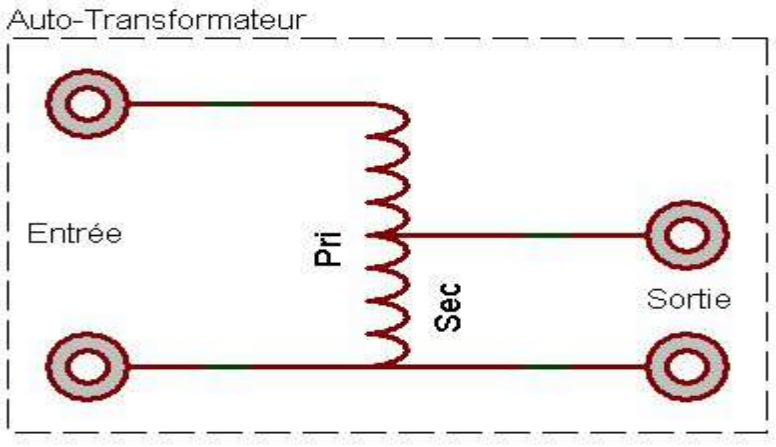


Figure (I.12) Schéma d'un autotransformateur.

I.6 .4 transformateur d'isolement

C'est un transformateur qui crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire, Ils servent à assurer la sécurité d'une installation en protégeant des électrocutions par exemple. La séparation galvanique permet aussi d'éliminer une partie du bruit électrique, ce qui est utile pour certains appareils électroniques sensibles. La composante continue du courant est en effet bloquée par un transformateur.

Ce type est, largement utilisé dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut dans un bloc n'affecte les autres.

I.6 .5 Transformateur de potentiel

Transformateur de potentiel (TP) baisse la tension d'un circuit à une valeur faible qui peut être efficacement et en toute sécurité utilisé pour le fonctionnement des instruments de mesure et de protection tels que voltmètres, wattmètres et relais.

I.6 .6 Transformateur de courant

Transformateur de courant (TC) baisse le courant d'un circuit à une valeur inférieure et utilisé dans les mêmes types d'équipements comme un transformateur de potentiel. Cela se fait par la construction de la bobine secondaire constitué d'un grand nombre de spires de fil autour de la bobine primaire, qui ne contient que quelques spires de fil. De cette manière, les mesures des valeurs élevées de courant peuvent être obtenues.

I.6 .7 transformateur de distribution

Les transformateurs de distribution sont des transformateurs utilisés pour fournir des quantités d'énergies relativement faibles aux clients. Ils sont utilisés à la fin du système de distribution dès l’installation électrique.

I.7 Technologies de construction de transformateur de puissance

La figure (I.13) suivante montre la constitution d’un transformateur de puissance triphasé

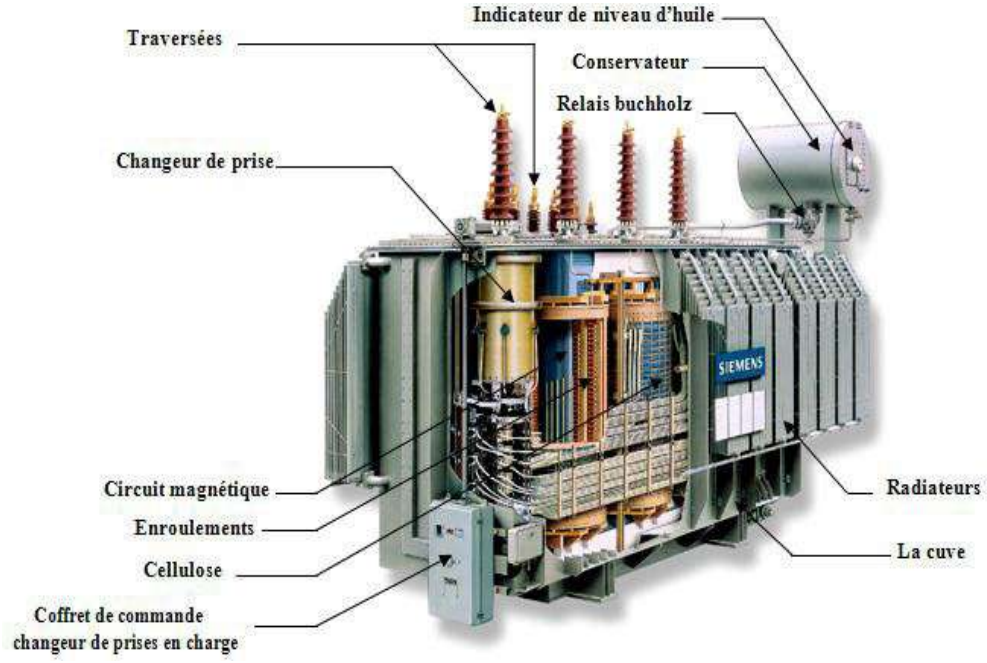


Figure (I.13) Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.

I.7.1 Partie active

La partie active d'un transformateur est définie comme le circuit magnétique et les enroulements.

I.7.1.1 Circuit magnétique

Le rôle du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique produit par l'excitation de l'enroulement primaire vers l'enroulement secondaire [9].

Le noyau se compose d'un empilage de tôles ferromagnétiques de haute perméabilité et à grains orientés, isolées électriquement entre elles. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique. Afin de minimiser les pertes on procède à [9,10] :

- ✓ l'emploi d'acier magnétique doux ayant une petite surface du cycle d'hystérésis et de faible perte par hystérésis,
- ✓ l'emploi de tôles dont l'épaisseur est choisie tel que les courants de f oucault soient pratiquement sans effet.

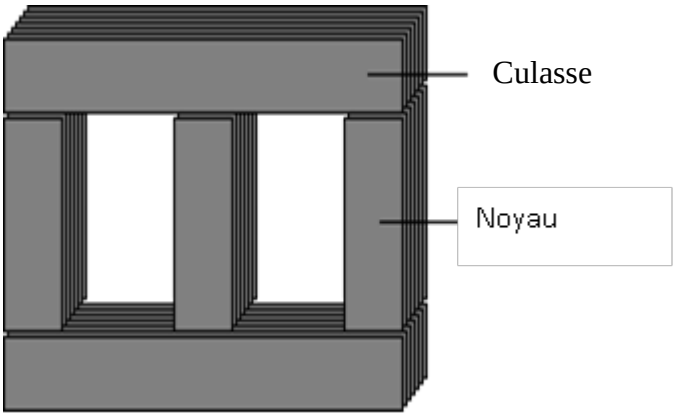
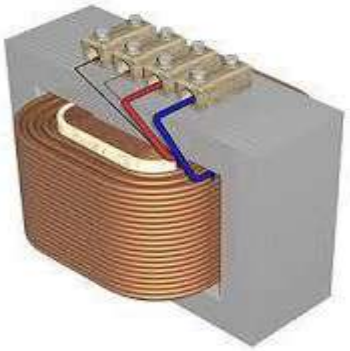


Figure (I.14) Circuit magnétique.

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

I.7.1.1.1 Type cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de distribution, ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques d0ans les bobinages [10].



Figure(I.15) Circuit magnétique triphasé type cuirassé.

I.7.1.1.2 Type 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.

Dans cette technologie. Les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Cette disposition plus simple que le précédent est utilisée pour les transformateurs de haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique trois colonnes (noyaux).Ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.

Si le déséquilibre est important. On utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes. Dont trois sont bobinées et les autres servent au retour des flux [10].



Figure (I.16) Circuit magnétique triphasé à trois colonnes.

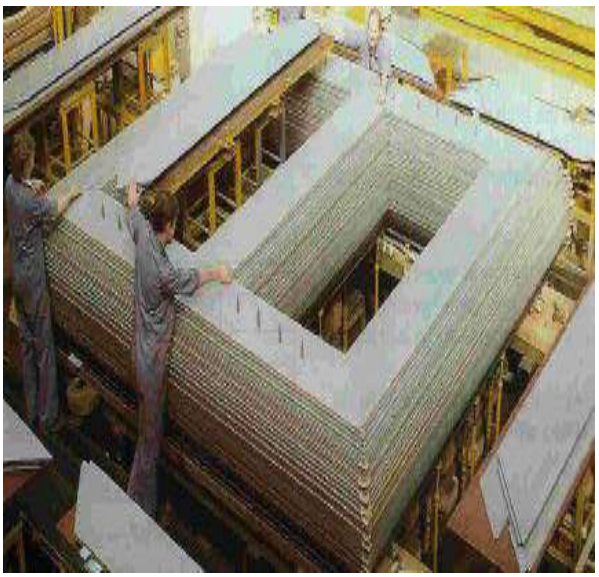


Figure (I.17) circuit magnétique triphasé à cinque colonnes.

I.7.1.2 Enroulements

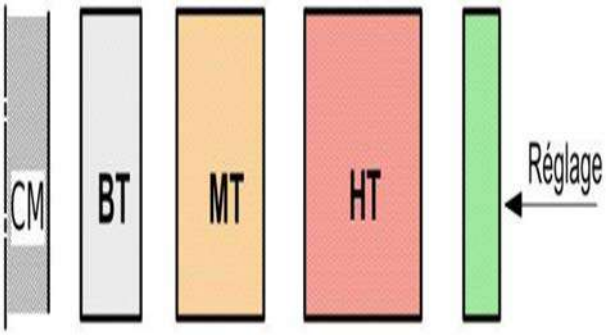
Les enroulements du transformateur sont l'ensemble des spires fabriqués généralement en cuivre émaillé, isolées entre elles par du papier [9].

Pour une phase d'un transformateur donné il y a un enroulement par niveau de tension considéré : un pour la basse tension et un pour la haute tension, avec parfois un supplémentaire pour la moyenne tension. Ces différents enroulements sont imbriqués les uns dans les autres avec l'enroulement de basse tension à l'intérieur et les enroulements de niveau de tension supérieurs de façon croissante vers l'extérieur. La figure (I.19) représente une demi-coupe d'enroulement [5].

Les enroulements permettent le transfert de la puissance du primaire vers le secondaire (tertiaire) tout en modifiant la tension (circulation du courant) [9].



Figure(I.18) Enroulement.



Figure(I.19) Coupe de demi-enroulement.

I.7.2 Isolation

Dans la partie active d'un transformateur de puissance on trouve deux types d'isolation [10].

I.7.2.1 Isolation cellulosique

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, compressé, le cylindre isolant et le carton sont faits à partir des matériaux cellulosiques qui constituent le meilleur compromis technico-économique de l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance.

I.7.2.2 Isolation liquide

L'huile du transformateur est souvent une huile minérale qui est faite d'un mélange d'alcanes, de naphtènes, et des hydrocarbures aromatiques, raffinés à partir du pétrole brut. Les processus de raffinage pourraient inclure le traitement par l'acide, l'extraction par solvants, l'hydrotraitement, ou la combinaison de ces méthodes. Le raffinage lorsqu'il est parfaitement achevé, peut rapporter les caractéristiques de l'huile minérale aux spécifications exigées. Le rôle fondamental de l'huile est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement du transformateur. Les huiles modernes procurent plus de stabilité à la dégradation, et elles sont dépourvues du soufre en corrosif.

Au plus, elles devraient avoir les caractéristiques suivantes :

- point d'inflammabilité élevée.
- point de congélation bas.
- rigidité diélectrique élevée.
- basse viscosité.
- bonne résistance à l'électrification statique.

I.7.3 Cuve

La constitution de la cuve des transformateurs est liée aux calculs thermiques, généralement elle est fabriquée en acier.

La cuve sert à la protection de la partie active du transformateur, elle est ajourée pour permettre la circulation naturelle de l'air autour du transformateur elle assure plusieurs rôles tels que :

- réservoir d'huile,
- assurer la résistance en court-circuit,
- maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuite produit par le courant

  dans les enroulements [9,10].



Figure (I.20) La cuve d'un transformateur de puissance.

I.7.4 Traversées

Les traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaires et secondaires, d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ, d'autre part, à travers le couvercle ; d'où le nom de traversées.

Leurs fonctions sont principalement l'isolement du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle.

Il existe plusieurs types de traversée. Pour les tensions jusqu'à quelques dizaines de kV le corps des traversées est généralement constitué d'un bloc unique de porcelaine, qui est un matériau isolant [5].



Figure (I.21) Traversé porcelaine



Figure (I.22) Traverse condensateur

I.7.5 Equipement

I.7.5.1 Changeur de prise

Le changeur de prise est un ensemble de quelques spires qui sont condensés en série avec les spires de l'enroulement haute tension. Elles permettent de modifier le rapport de transformation en charge et hors charge d'un transformateur de puissance sur une plage de réglage, on distingue deux types de changeur de prise en charge et hors charge (a vide).

I.7.5.2 Refroidissement

Dans les transformateurs de puissance le refroidissement s'effectue via cette huile circulant en circuit fermé de la partie active, siège des pertes vers une source froide à laquelle il abandonne des calories celle-ci peut être. [5] :

- directement la surface de la cuve pour les petites puissances,
- des aéroréfrigérants,
- des radiateurs,
- des hydro réfrigérants.

I.7.5.3 Conservateur

Le conservateur (réservoir d'expansion) est utilisé pour les transformateurs dits « respirant » son rôle est de permettre la dilatation de l'huile en fonction de la température.

La surface du diélectrique peut être en contact avec l'air ambiant (conservateur

classique) ou être séparée par une paroi étanche souple (conservateur à diaphragme) [9].

I.7.5.4 Coffret des auxiliaires

Le coffret des auxiliaires contient. [9] :

- ✓ appareillage de commande et de protection des ventilateurs des pompes,
- ✓ borniers de raccordement des contacts des appareils de mesure et de protection,
- ✓ résistance de chauffage.

I.7.5.5 Coffret de commande du changeur de prise en charge

Ces équipements permettent de commander les changeurs de prise en charge qui se trouve à l'intérieur de la cuve du transformateur [9].

I .8 Conclusion :

La réalisation complète d'un transformateur de puissance depuis sa définition comporte de nombreux éléments techniques à prendre en compte par le constructeur. Bien que les principes de constructions n'aient pas fondamentalement changé depuis plusieurs dizaines d'années, la variété des différentes constructions est grande et complexe.

II.1 Introduction:

Les transformateurs de puissance sont généralement très fiables, avec une espérance de vie entre 20 et 35 ans. Dans la pratique, elle peut s'étaler jusqu'à 60 ans en utilisant une maintenance et une exploitation convenable. Cependant, toute défaillance d'un transformateur est potentiellement coûteuse en réparation ou en remplacement par un autre. Son exploitation continue ou exceptionnelle dans un régime de surcharge pour alimenter une large population peut entraîner son vieillissement prématuré et raccourcir d'une façon consistante, ce qui accroît considérablement le risque de défaillance. Les pannes sont généralement initiées par des conditions sévères, comme la foudre, les manœuvres sur le réseau, les courts circuits, ou autres incidents.

Lorsque le transformateur est neuf, ses tenues électriques et mécaniques sont suffisantes pour résister aux différentes conditions. Quand le transformateur vieillisse, sa tenue diélectrique peut se dégrader au point qu'il ne peut supporter les défauts tels que les courts circuits ou les surtensions transitoires.

Les paramètres d'état caractérisent en général l'état de santé des transformateurs. La gestion de leurs vies exploite souvent ces paramètres dans un processus cohérent pour la prolonger au maximum, et qui se base sur les informations recueillies des différents diagnostics.

Souvent, quatre états apparents (courbe de vie) sont connus dans le cas des transformateurs et qui sont :

- Etat normal
- Etat de défectuosité
- Etat de défaut
- Etat de défaillance

II.2 Contraintes et défauts

Le transformateur étant un objet complexe situé dans une cuve, son accès interne n'est pas évident et la confirmation visuelle de ces défauts internes ne l'est donc pas non plus, d'autant plus qu'une opération de décuvage n'est jamais anodine, et relativement coûteuse.

Les paragraphes suivants détailleront différentes contraintes normales et anormales auxquelles peut être soumis un transformateur, et présenteront plusieurs des défauts internes qui peuvent en découler.

Dans le pire des cas il est possible parfois d'aller jusqu'à l'explosion du transformateur (**Figure II.1**)



Figure II.1: Explosion de transformateur

II.2 .1 Contraintes diélectriques et surtensions

La contrainte diélectrique caractérise la tenue en tension des différents éléments du transformateur. Cette tenue diélectrique au sein du transformateur est liée à l'état isolant [11]:

- papier isolant les conducteurs.
- l'huile diélectrique immergeant l'ensemble de la partie active.
- traversées.

II.2 .1 .1Contraintes normales

Le transformateur doit supporter normalement en exploitation sa tension nominale AC (par exemple 400 kV).

II.2 .1 .2 Contraintes anormales

Les deux contraintes diélectriques normalisées les plus importantes sont les chocs de foudre (1425 kV en 1,2 µs) et les chocs de manœuvre (1050 kV en 200 µs) qui sont des phénomènes très haute tension très brefs, donc à très haute fréquence

II.2 .1.3 Défauts possibles dus aux contraintes diélectriques

Si les caractéristiques des isolants se dégradent trop, due à une humidité interne excessive par exemple, ou sont contraintes au delà de leurs limites alors il peut se développer [12] :

❖ Un amorçage des pièces sous tension :

- Entre elles, comme entre enroulements ou entre spires (**Figure II.2**)
- avec la masse, comme l'amorçage d'une traversée ou d'un enroulement à la cuve ou au circuit magnétique.

❖ Des décharges partielles au sein d'un isolant, classiquement solide dans les transformateurs. Ce sont des micros décharges locales qui tendent à se propager dans le temps.

Tous ces défauts créent du carbone, qui est conducteur, impactant ainsi la tenue diélectrique localement. Ce phénomène étant irréversible, il est impossible de retrouver un fonctionnement normal suite à un amorçage diélectrique.



Figure II.2: Amorçage franc entre spires

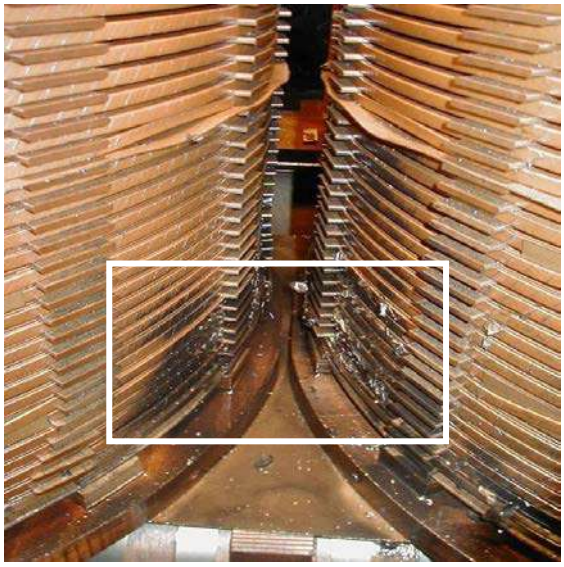


Figure II.3: Amorçage entre enroulements

II.2 .2 Contraintes électrodynamiques et surintensités

Le passage du courant dans un conducteur, soumis à un champ magnétique, provoque une force de Laplace au sein de ce conducteur proportionnel au carré du courant [13].

II.2 .2 .1Contraintes normales

Au courant nominal ($I_{nominal}$) les efforts mécaniques sont négligeables par rapport aux efforts liés aux courants de court-circuit (I_{cc}) (environ 100 fois plus importants), pour lequel le transformateur est dimensionné mécaniquement .

II.2 .2 .2 Contraintes anormales

Les surintensités se distinguent des surcharges par leur plus courte durée (de quelques dixièmes à quelques dizaines secondes) et par leur intensité relative (de 2 à 25 fois l'intensité nominale). Dans les deux cas ce sont des contraintes classiques dans l'exploitation d'un transformateur.

Les surintensités se présentent principalement dans les cas suivants :

- **Court-circuit :** $I_{CC.}$ de 6 à 25 $I_{\text{nominal.}}$ environ ;$I_{CC.}$ est limité par la tension de court-circuit. Les courts-circuits peuvent être externes, venant du réseau, ou internes, suite à un défaut.
- **Mise sous-tension des transformateurs :** Courant transitoire à vide (Io) de quelques fois le courant nominal.
- **Démarrage des moteurs** : $I_{\text{démarrage.}}$ de 3 à 7 $I_{\text{nominal.}}$

II.2 .2 .3 Défauts possibles dus aux surintensités

Les conséquences de ces surintensités sont de trois ordres [14]:

- **Efforts électrodynamiques** : dus aux forces de Laplace dans les bobinages entraînant des contraintes mécaniques élevées. Ces efforts peuvent être particulièrement significatifs lors des efforts de court-circuit, jusqu'à quelques centaines de tonnes, Un exemple franc de déformation mécanique d'enroulement est visible sur la **Figureure.II.4**. Pour s'en affranchir en partie, les enroulements en usine sont serrés jusqu'à plusieurs centaines de tonnes.
- **Echauffements** : élevés des enroulements, dégradant les isolants solides en particulier.
- **Chute de tension :** au secondaire, perturbant la stabilité du réseau.



Figure II.4: Effort électrodynamique franc



Figure II .5 Court-circuit entre spires

II.2 .3 Contraintes électriques : mauvais contacts

Le courant passe à travers différents contacts dans un transformateur, souvent composés de métaux différents. Ce sont les brasures au niveau des connexions de fin d'enroulements, et les différents contacts mobiles des régleurs, en charge ou hors tension [15].

II.2 .3.1 Contraintes normales

Par conception une certaine densité de courant est admissible en régime nominal dans ces éléments. Le courant doit alors circuler dans tout le circuit électrique sans échauffement local particulier, dû à une densité de courant anormale.

II.2 .3.2 Contraintes anormales

Si certains contacts se dégradent dans le temps, ils laissent passer le courant sur une surface de passage effective réduite par rapport à la construction originale. En conséquence la densité de courant locale augmente ce qui peut créer un défaut.

II.2 .3.3 Défauts électriques possibles

Les effets de ces contraintes électriques sont principalement des points chauds dus à des échauffements locaux anormaux sur les éléments suivants :

- **Connexions dans certains changeurs de prises en charge :**en particulier les contacts mobiles de l'inverseur s'ils sont peu manipulés, alors qu'ils voient passer en permanence le courant de charge du transformateur.
- **Connexions des changeurs de prise hors tension** : Les contacts mobiles sur les positions en service qui ne sont jamais bougés peuvent se dégrader avec le temps.
- **Connexion entre le cuivre des enroulements et une connexion interne** : comme pour les prises de réglage ou les connexions qui passent dans les traversées. Ces différentes connexions sont brasées, serties ou boulonnées, et suivant la qualité du contact et les conditions d'exploitation, certains de ces raccords peuvent chauffer anormalement. Un point chaud très avancé sur un contact boulonné est visible.



Figure II.6: Point chaud sur le sélecteur d'un régleur en charge



Figure II.7 : Coupure suite à la fusion d'un conducteur

II.2 .4Contraintes thermiques : surcharges, points chauds et vieillissement

II.2 .4.1Contraintes normales

Les contraintes thermiques sont dues principalement aux pertes Joule liées au passage du courant dans les enroulements, puis à l'évacuation de ces pertes via la réfrigération.

II.2 .4.2 Contraintes anormales

Les perturbations thermiques anormales sont principalement : les surcharges, les points chauds qui se sont éventuellement développés ainsi que des problèmes de réfrigération.

II.2 .4.3 Défauts possibles dus aux contraintes thermiques

Dans tous les cas ces contraintes thermiques provoquent le vieillissement :

- **papiers isolants** : et la dégradation de leurs propriétés diélectriques par voie de conséquence. Ceux-ci sont d'autant plus critiques qu'ils ne sont pas, sauf reconstruction, remplaçables au long de la vie d'un transformateur. Par exemple dans le cas extrême de la **Figure II.9** toute la bobine est noircie de l'intérieur à cause d'un fonctionnement à des températures excessives.
- **l'huile isolante** : La température, l'humidité et l'oxygène accélèrent le vieillissement de l'huile, qui perd donc ses qualités d'origine, ce qui peut mener à un défaut.



Figure II.8 : Point chaud sur connexion boulonnée



Figure II.9 : échauffement excessif d'un enroulement

II.2 .5 Contraintes électromagnétiques et courants de Foucault

II.2 .5.1 Contraintes normales

Le passage d'un courant dans le transformateur induit un champ magnétique, qui à son tour induit des courants de Foucault dans les éléments métalliques du transformateur. Ces courants induits sont la cause majeure des pertes supplémentaires dans un transformateur[16].

II.2 .5.2 Contraintes anormales

Par conception toutes les pièces métalliques, qui ne sont pas les enroulements (circuit magnétique, structure métallique de renfort, tirants, etc.), sont mises au potentiel en un point, généralement à la masse. Si une de ces mises à la masse n'est plus effective, la pièce en question est en potentiel libre et peut se charger/décharger sans contrôle.

D'autre part si une deuxième mise à la masse s'effectue, suite à un défaut d'un isolant interne, une boucle électrique fermée via la masse est alors constituée, et elle est traversée par des champs magnétiques. Un courant de Foucault, induit, anormal circule alors dans les éléments formant cette boucle. Ces éléments n'étant pas conçus pour faire passer du courant, ils peuvent se dégrader, en particulier les isolants[17].

II.2 .5.3Défauts possibles dus aux contraintes électromagnétiques

En cas de mises à la masse en plusieurs points du circuit magnétique (**Figure II.10)**, ou des éléments métalliques de serrage de la partie active, on peut avoir comme défauts typiquement des points chauds dus à [18]:

- **courants de Foucault induits :** anormalement importants.
- **dégradations d'isolants internes :**dus à ces courants de Foucault anormaux.

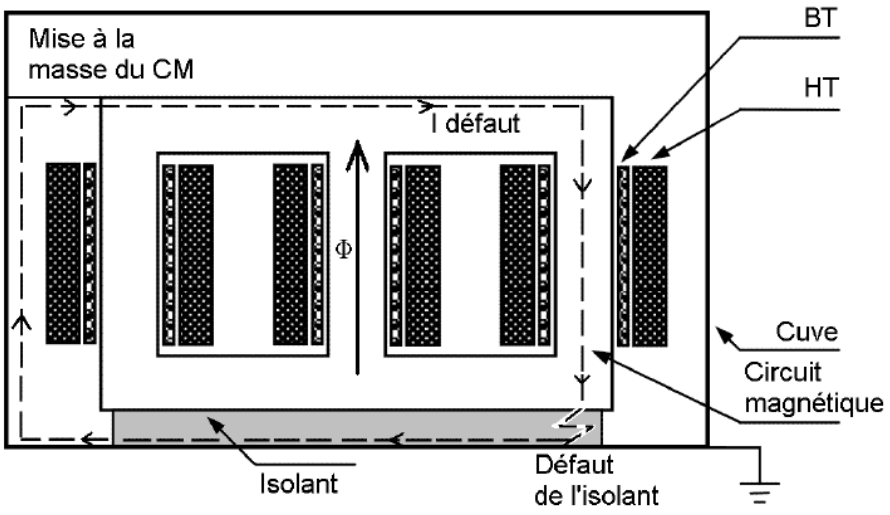


Figure II.10 : Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM)

II.2 .6 Contraintes mécaniques : vibrations, fuites et transport

II.2 .6.1 Contraintes normales

En fonctionnement normal le circuit magnétique vibre légèrement à 100 Hz dû au phénomène vibratoire de magnétostriction, engendré par un champ magnétique, qui allonge, puis rétracte de quelques µm, des tonnes de tôles en acier.

II.2 .6.2 Contraintes anormales

Suite à une mauvaise fixation interne de la partie active, des vibrations anormales en fonctionnement nominal peuvent apparaître ; elles peuvent dégrader certains isolants internes qui ne sont pas prévus pour tenir de telles contraintes mécaniques.

Lors du transport le transformateur ne doit pas recevoir de choc important, ce qui pourrait dégrader les isolants solides de la partie active, ou déplacer le circuit magnétique en particulier et donc diminuer des distances diélectriques en deçà des valeurs prévues lors de la conception.

II.2 .6.3 Défauts possibles dus aux contraintes mécaniques

Les principaux défauts liés aux contraintes mécaniques sont [18]:

- **Des points chauds sur des régleurs de prises** si ceux-ci sont mécaniquement mal alignés.
- **La diminution de distances diélectriques,** dues au déplacement interne massif d'un circuit magnétique de plusieurs centimètres, suite à un choc mécanique comme lors de la chute d'un transformateur (**Figure II.11**).
- **Des dégradations d'isolants internes** dues à des vibrations anormales, elles mêmes dues à un manque de serrage interne à la construction, ou suite à des chocs importants.
- **Les fuites de joints** mécaniquement trop serrés et/ou chauffés (**Figure II.12**) lors de leur installation puis leur exploitation.



Figure II.11 : Problème de transport



Figure II.12 : Joint de traversée écrasé

Toutes ces contraintes peuvent donc être la cause de différents défauts au sein d'un transformateur. Afin de les limiter, plusieurs alarmes et protections peuvent être mises en place.

II.3 protection et surveillance de transformateur de puissance :

La protection est une question à traiter de vue économique, en considérant la probabilité d'un type de défaut, les conséquences de sa manifestation éventuelle (perte de production, coût de remise en état, dommage au matériel) et le coût de l'efficacité des protections destinées à l'empêcher ou à les limités [5].

II.3 .1 Différents types de protections

Le transformateur est un élément particulièrement important d'un réseau électrique. Il est nécessaire de le protéger efficacement contre tous les défauts susceptibles de l'endommager qu'ils soient internes ou externes [10].

II.3 .1.1 Protections internes :

II.3 .1.1 .1 Protection masse cuve

Une protection rapide, détectant les défauts internes au transformateur, est constituée par le relai de détection de défaut à la masse de cuve. Pour se faire, la cuve du transformateur, ses accessoires, ainsi que ses circuits auxiliaires doivent être isolés du sol par des joints isolants.

La mise à la terre de la cuve principale du transformateur est réalisée par une seule connexion courte qui passe à l'intérieur d'un transformateur de courant qui permet d'effectuer la mesure du courant s'écoulant à la terre.

Tout défaut entre la partie active et la cuve du transformateur est ainsi détecté par un relais de courant alimenté par ce TC. Ce relais envoie un ordre de déclenchement instantané aux disjoncteurs primaires et secondaires du transformateur.

Une protection de cuve sera prévue contre les défauts à la terre qui se produisent à l'intérieur du transformateur. La cuve du transformateur doit être isolée de la terre [10].



Figure II.13 : Placement de TC tore.

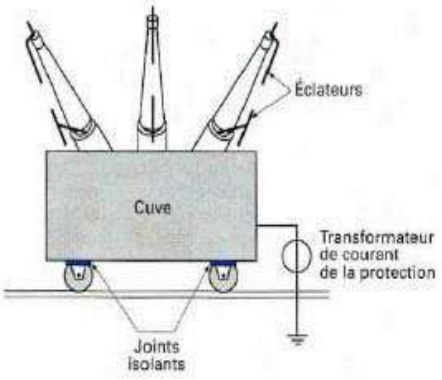


Figure II.14 : Protection masse cuve.

II.3 .1.1 .2 Protection par DGPT

Le DGPT (Détecteur Gaz, Pression et Température) est un dispositif de protection utilisé pour le transformateur d'isolement liquide. Ce dispositif détecte les anomalies au sein du diélectrique liquide telles qu'émission de gaz, élévation de pression ou de température, et provoque la mise hors tension du transformateur. Il est principalement destiné à la protection des transformateurs immergés étanches à remplissage total. Pour un défaut grave, le dégagement gazeux est recueilli en un point haut au relai, une accumulation trop importante provoque une alarme.



Figure II.15: Dispositif DGBT.

II.3 .1.1 .3 Protection thermique

Sur le transformateur sont montés plusieurs thermomètres et des images thermiques donnant une image de la température du cuivre. Depuis quelques années des fibres optiques sont aussi installées dans les enroulements permettant une mesure plus fine et plus rapide de

cette température [5].

II.3 .1.2 Protection externes

II.3 .1.2.1 Protection des surtensions

Deux moyens de protection contre les surtensions sont utilisés de manière large, les éclateurs et les parafoudres :

- **Eclateur :** est un dispositif simple constitué de deux électrodes dans l'air.la limitation de tension aux bornes est effectuée par l'amorçage d'intervalle d'air.
- **Parafoudre :** permettent de se débarrasser de ce comportement néfaste car ils présentent un comportement réversible. Ce sont des résistances fortement non- linéaires qui présentent une diminution importante de leur résistance interne au- dessus d'une certaine valeur de tension aux bornes [11].



Figure II.16 : Eclateur.



Figure II.17 : Parafoudre.

II.3 .1.2 .2 Protection à maximum d'intensité

Des relais reliés à des transformateurs de courant (équivalents d'un ampèremètre en haute tension) déclenchent le transformateur suite à une surintensité temporaire, fixée selon un seuil.

Ces unités de protection agiront contre le défaut externe (défaut ente les phases et défaut entre phase et terre)

- Trois relais à maximum de courant de phase à deux seuils (seuils bas et seuils haut) temporisés pour la protection contre les défauts ente les phases.

- un relais à maximum de courant homopolaire à deux seuils (seuils bas et seuils haut) temporise, désensibilisé à l'harmonique trois pour la protection contre les défauts de la terre [5,10].

II.3 .1.3 Protection différentielle [10]

La protection différentielle est obtenue par la comparaison de la somme des courants primaires à la somme des courants secondaires. L'écart de ces courants ne doit pas dépasser une valeur i_0 pendant un temps supérieur à t_0, au-delà il ya déclenchement. Cette protection à une sélectivité absolue, il lui est demandé plus d'être très stable vis-à-vis des défauts extérieurs.

Le principe de fonctionnement de la protection est basé sur la comparaison des courants rentrants et des courants sortants du transformateur.

Cette protection s'utilise :

- ✓ pour détecter des courants de défaut inférieurs au courant nominal,
- ✓ pour déclencher instantanément puisque la sélectivité est basée sur la détection et non sur la temporisation.

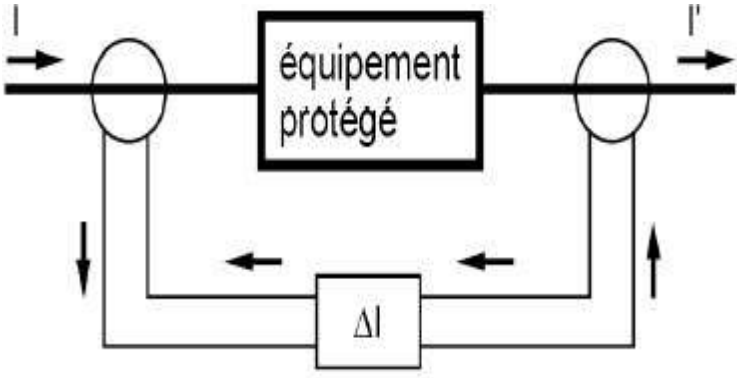


Figure II.17 : schéma de fonctionnement de la protection différentielle.

II.4 Exploitations d'un transformateur de puissance

Le constructeur fabrique un transformateur conforme au cahier des charges initial établi par le client. Afin de garantir un certain nombre de caractéristiques, le transformateur passe des essais de réception, sont potentiellement destructifs (supérieurs à la tension nominale principalement). L'ensemble de ces essais garantissent le bon fonctionnement du transformateur en sortie d'usine et ces derniers sont comme mesures de référence pour le reste de la vie de l'appareil.

La durée de vie d'un transformateur est liée à sa résistance à ces contraintes, le suivit,

la connaissance de son contexte d'exploitation [5].

II.4 .1Vieillissement

Le vieillissement d'un transformateur est défini par la dégradation irréversible de la capacité de service d'un transformateur, en générale altérée par l'augmentation de la probabilité conditionnelle de défaillance avec le temps (due par exemple à la dégradation des matériaux isolants),dans certains cas la capacité de service peu également diminuer en raison de la modification des contraintes économiques et stratégiques [12].

II.4 .2 Fiabilité d'un transformateur

La fiabilité de transformateur de puissance est un souci majeur car la qualité d'énergie électrique pouvant être transmise est diminuée si la puissance de la centrale ou du réseau n'est pas disponible à cause des problèmes de sécurité du fonctionnement. Malgré le nombre limité de données statistiques de différents réseaux, il semble que le taux des défaillances en service soit supérieur pour les transformateurs à tension plus élevée. Il semble que beaucoup de problèmes sont dus à un niveau de puissance plus élevé. Mais on doit signaler que l'augmentation en tension a aussi une influence dans la mesure où les dimensions physiques du transformateur sont plus grandes pour des tensions plus élevées.

Plusieurs experts ont démontré que les prises des régleurs dans ces puissances exercent une influence défavorable sur la fiabilité. Les commutateurs en charge occasionnent certaines pertes de disponibilité car les transformateurs doivent être inspectés pour répares les commutateurs en charge. Les traversés paraissent être une autre cause de perte de disponibilité. Une raison importante d'améliorer leur fiabilité est le coût d'indisponibilité, qui est derrière leur retrait d'exploitation [5].

II.4 .3 Age du transformateur

La vie d'un transformateur dépend en grande partie de la vie du papier qui est utilisé pour isoler le bobinage et divers autres composants. La vie du papier est fonction de la qualité de l'huile avec laquelle le transformateur est rempli, de la qualité même du papier, de la température de fonctionnement, de la charge et des variations brusques de tension auxquelles le transformateur est exposé.

La qualité de l'huile est dépendante du cycle de service et du régime de maintenance qui lui sont appliqués. La durée de vie avant défaillance des gros transformateurs est autour de 50 ans. De telles informations pourraient sembler indiquer que les défaillances sont relativement rares dans les 25 premières années mais que le taux de défaillance augmente de façon significative après 40 ans d'utilisation [5].

II.5. Conclusion

Les transformateurs de puissance sont des appareils complexes, qui doivent tenir de nombreuses et fortes contraintes, de natures diverses, durant leur cycle de vie. De plus, dans le contexte actuel, avec un parc d'appareils vieillissant et un réseau de plus en plus chargé, les transformateurs seront soumis à des contraintes de plus en plus importantes, pendant encore plusieurs années à priori.

Bien que leur fiabilité soit plutôt bonne, les transformateurs restent des éléments critiques de tout réseau électrique. Il est dont très important d'être capable d'en assurer la maintenance, et le dépannage au mieux, afin d'optimiser l'exploitation du matériel lui-même, et surtout de garantir la transmission, importante, d'énergie électrique qui transite par lui.

III.1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les principaux modèles de transformateurs existant dans la littérature et la méthode de diagnostic basée sur l'analyse de la réponse fréquentiel (FRA).

En mettant une image sur leurs avantages et incontinents, les moyens utilisés pour le but de choisir la meilleure méthode adopté à notre étude.

III.2 Analyse de la réponse en fréquence (FRA)

L'analyse de la Réponse en fréquence est un outil puissant et sensible pour évaluer l'intégrité mécanique et géométrique de base, des enroulements et du circuit magnétique dans les transformateurs de puissance, La mesure en fréquences de l'enroulement est effectuée en sollicitant l'enroulement à tester par une faible tension mais à une fréquence qui peut aller jusqu'à 1MHZ. La réponse FRA peut être l'impédance de l'enroulement ou sa fonction de transfert.

Les changements physiques à l'intérieur de l'enroulement du transformateur sont traduits systématiquement par un changement de la réponse en fréquence, ce qui nous amènes à identifier et analyser les causes des changements. En tenant compte de la constitution physique du transformateur, ce dernier peut être considéré comme un réseau complexe constitué d'une cascade de cellules RLC magnétiquement couplés, ces trois éléments sont utilisés pour représenter la résistance des enroulements de cuivre, l'inductance des bobines d'enroulements, la capacité des couches d'isolation, entre les bobines, entre les enroulements et le noyau, entre le noyau et la cuve, entre la cuve et les enroulements, etc.

L'application d'une faible tension à des fréquences variables sur l'enroulement du transformateur est similaire à une excitation d'un circuit résonant, ce qui engendre une ou plusieurs fréquences de coupures de la réponse de l'enroulement, ces dernières peuvent être considérés indicatrices de l'état du bobinage.

III.3 Principe de la méthode FRA

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductances et de résistances ; un circuit très complexe (Fig.**III.1**) qui génère une empreinte digitale ou signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe [**19].**

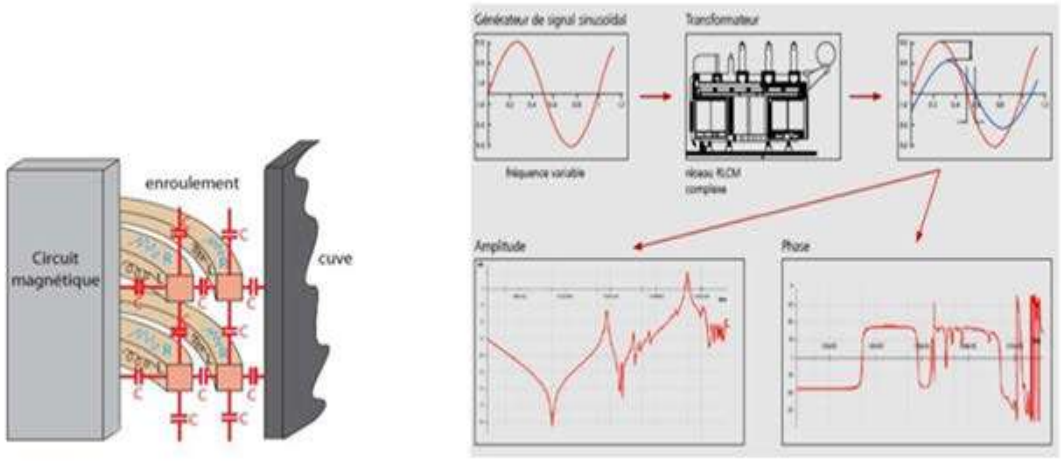


Figure III.1 : principe de la mesure FRA

La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs. Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances [20].
Le principe de fonctionnement est d'injecter un signal d'excitation électrique sur l'un des enroulements et de mesurer le signal de réponse sur une large plage de fréquence (Méthode de balayage en fréquence). Le rapport de ces deux signaux donne la réponse exigée. Ce rapport s'appelle la fonction de transfert du transformateur à partir duquel la grandeur et la phase peuvent être obtenues.

III.4 Objectifs des mesures par FRA

Le principal intérêt des mesures par FRA sur les transformateurs est de détecter des déformations des enroulements qui peuvent résulter des forces électromagnétiques très importantes qui s'exercent du fait des surintensités apparaissant au moment de défauts directs, de défauts dans le régleur, de mauvaises synchronisations [21].

La déformation d'un enroulement peut finalement provoquer un défaut dans le transformateur par suite d'une détérioration de l'isolement entre spires, chose qui provoque la diminution de la tenue diélectrique et aboutir à des spires court-circuitées. En outre, tout desserrage de la fixation d'un enroulement, suite à un amincissement de l'isolation du au vieillissement, augmente le risque de défaut par diminution de la tenue mécanique des assemblages de l'enroulement [21].

En plus du diagnostic des défauts à la suite de court-circuit, on remarque un intérêt croissant qui porte à la détection avant l'apparition de la panne, au moment des inspections

programmées, de défauts liés à des déformations des enroulements, c'est à dire l'évolution de l'état mécanique permettant d'apprécier la fiabilité escomptée des transformateurs, en terme de susceptibilité accrue à des courts circuits futurs .

Un intérêt se manifeste également dans les mesures par FRA pour la détection de tout autre problème conduisant à une modification de la répartition des inductances et des capacités dans les transformateurs, par exemple des défauts sur le noyau ou des défauts de mise à la terre du noyau ou des écrans.

Une autre application des mesures par FRA est le contrôle de l'intégrité mécanique d'un transformateur après transport, fournissant un moyen fiable de confirmer que les assemblages du noyau et des enroulements n'ont subi aucune détérioration malgré les secousses répétée en cours de transport [21].

Les mesures par FRA peuvent donner des informations sur la tenue des structures géométriques des enroulements.

III.5 Les tests FRA

L'analyse de la réponse en fréquence est une méthode efficace, sensible, elle est sollicitée pour tester l'intégrité mécanique des circuits magnétiques et pour évaluer l'état des enroulements à l'intérieur des transformateurs de puissance. Chaque transformateur possède sa propre réponse en fréquence, appelée "empreinte", s'il y'a lieu d'un déplacement ou d'une déformation dans l'enroulement, cela va provoquer des variations de cette réponse en fréquence, par conséquence un changement dans les paramètres du transformateur.

La comparaison des mesures prises sur un transformateur donné avec la réponse donnée par le constructeur du transformateur, permet d'identifier les variations mécaniques ou électriques.

Généralement les mesures sur les transformateurs sont recommandées [22] [23].

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

- Après avoir connu des pannes électriques.
- Essai d'usine.

III.5.1 Type d’essais par FRA

Les principaux types d’essais par FRA sont :

III.5.1 .1 Essais entre extrémités :

On injecte le signal tour à tour à une extrémité de chaque enroulement et l’on mesure le signal à l’autre extrémité (Fig. III.2) [22].

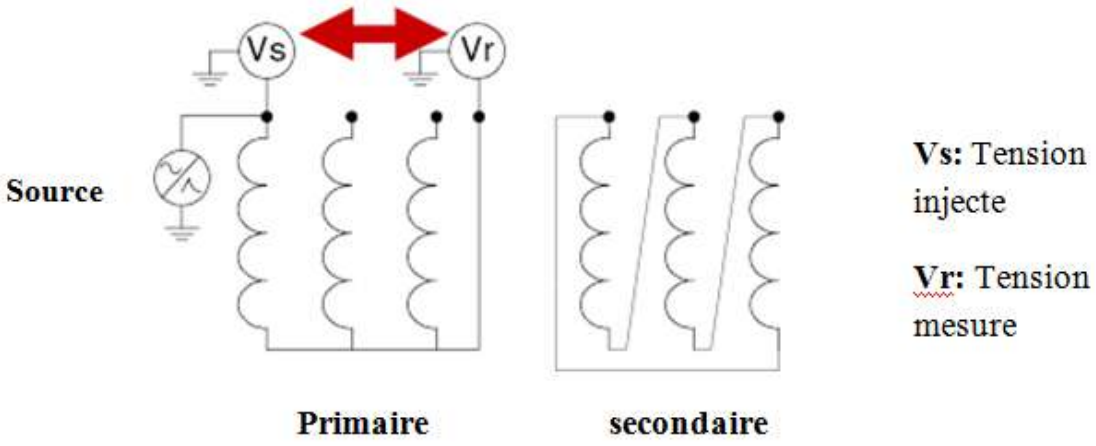


Figure III.2 : Essai entre extrémités

L’impédance de magnétisation du transformateur est le principal paramètre caractérisant la réponse en fréquence basse (en-dessus du premier point de résonance) quand on utilise cette configuration. Cet essai est celui que l’on utilise le plus communément pour sa simplicité et la possibilité qu’il offre d’examiner séparément chaque enroulement .

III.5.1 .2 Essais en court-circuit

Cet essai ressemble à la mesure entre extrémités mais avec un enroulement court-circuite sur la même phase voir (Fig. III.3) [22], de telles mesures permettent d’éliminer l’influence du noyau en dessus de 10-20 KHz environ du fait que la réponse en fréquence basse est caractérisée par l’inductance de fuite au lieu de l’inductance de magnétisation. La réponse pour des fréquences plus élèves est similaires à celle que l’ont obtient en utilisant la mesure entre extrémité.

L’enroulement en court-circuit peut être laissé au potentiel flottant ou bien être mis à la terre. Pour les transformateurs triphasés, il ya deux niveaux de variations, soit avec un

court-circuit par phase soit avec un court-circuit triphasé. En outre, les essais de court-circuit entre extrémités peuvent être réalisés en raccordant la source soit à l'extrémité coté phase, soit à l'extrémité coté neutre [21].

On peut effectuer cet essai si l'on veut obtenir des informations concernant l'impédance de fuite à basse fréquence, ou à éliminer certaines incertitudes liées à l'analyse de l'influence du noyau lorsqu'il existe un magnétisme résiduel [21].

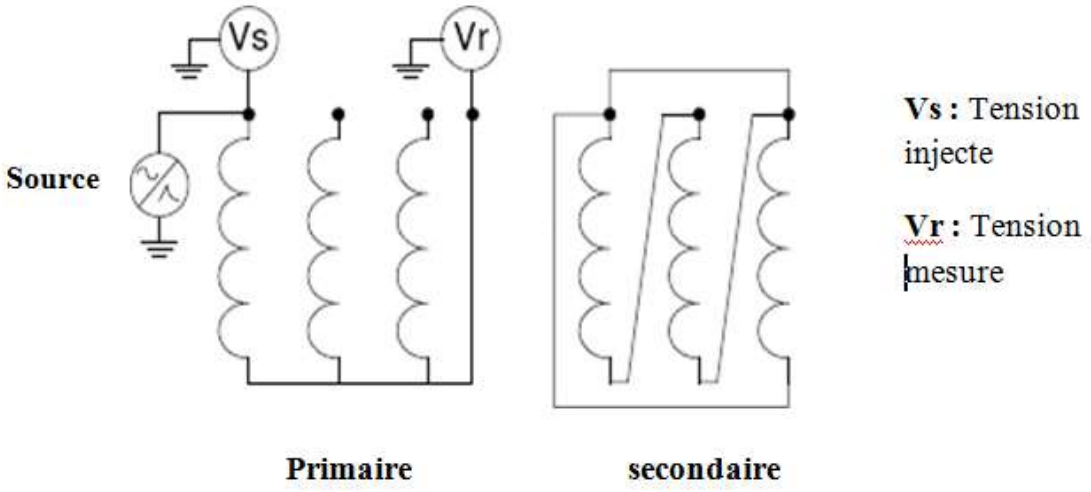


Figure III.3 : Essai en court-circuit

III.5.1 .3 Essai capacitif entre enroulements

On applique le signal à une extrémité d'un enroulement et l'on mesure la réponse à une extrémité d'un autre enroulement de la même phase (non relie au premier) (Fig. III.4) [22].

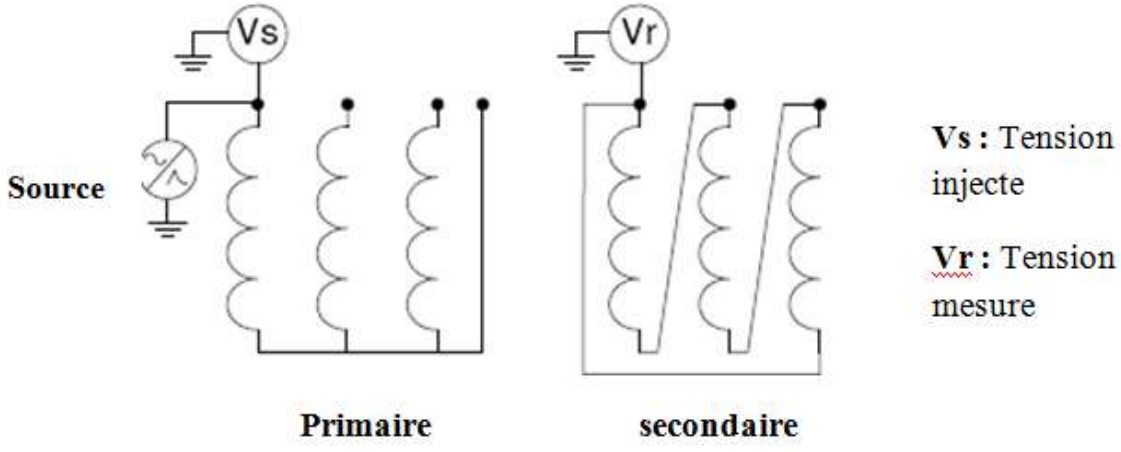


Figure III.4 : Essai capacitif entre enroulements

III.5.1 .4 Essai inductif entre enroulements

On injecte le signal sur une borne coté HT, et l'on mesure la réponse sur la borne correspondante coté BT, les autres extrémités des deux enroulements étant reliées à la terre (Fig. III. 5) [22].

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

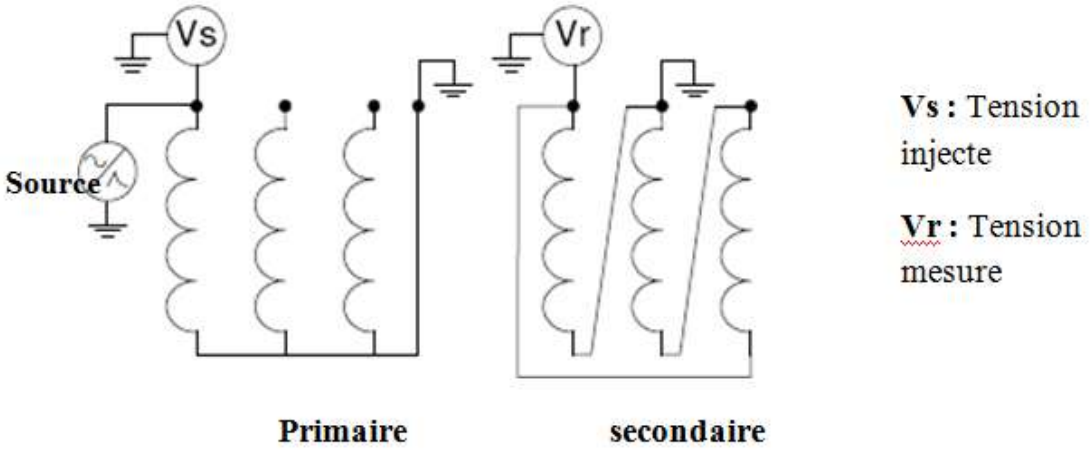


Figure. III. 5 : Essai inductif entre enroulements

III.6.Modélisation des transformateurs :

Les transformateurs sont des éléments clés dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité. La connaissance du comportement de ces équipements joue un rôle très important.

Suivant les conditions de fonctionnement et l'objectif de simulation, les chercheurs visent à développer un modèle qui simule le plus fidèlement possible le comportement des transformateurs en régime fréquentiel.

III.7 Principaux modèles des transformateurs de puissance

La modélisation des transformateurs de puissance en régimes fréquentiel, est réalisée en général par deux procédés. Le premier est réalisé par des mesures expérimentales, ce procédé est relativement coûteux et long à mettre en œuvre. Par ailleurs, le deuxième procédé est réalisé en utilisant un schéma électrique équivalent, dont lequel les paramètres sont répartis. Dans ce cas, la précision des résultats dépond d'une part au modèle du circuit équivalent choisi, d'autre part à la méthode de calcul utilisée.

III.7 .1 Modèles basés sur des mesures

Le principe consiste à réaliser un transformateur prototype, similaire à celui étudié, de taille réelle ou de taille réduite, et faire les mesures nécessaires, afin d'obtenir des résultats pour la modélisation.

III.7 .1.1 Mesures sur un prototype de taille réelle

Dans ce cas, la fiabilité des résultats obtenus dépend essentiellement de la qualité des mesures effectuées (paramètres géométriques, électriques et magnétiques) [24].

Les résultats obtenus ne sont valables que pour le même type de transformateur. Par voie de conséquence le prototype ne peut être généralisé (le choix est couteux et complexe en terme de mesure).

III.7 .1.2 Mesures sur un prototype de taille réduite

Cette méthode consiste à réaliser un transformateur prototype avec une taille réduite, et de procéder à des mesures. À partir des lois de similitude physique, et à l'aide des résultats des mesures, on remonte au comportement et aux paramètres du transformateur de taille réelle [25].

Cette méthode à les mêmes inconvénients que ceux cités précédemment, de plus on rencontre des difficultés liées à la fidélité du modèle et aux problèmes de facteur d'échelle. De ce fait, il est difficile de construire un prototype qui respecte chaque détail du transformateur réel, vu le grand nombre de contrainte à vérifier afin d'avoir une bonne représentation.

Pour les modèles basés sur les mesures, les paramètres résistifs, inductifs et capacitifs du modèle sont déterminés expérimentalement, soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel [26], [27].

III.7 .2 Modèles mathématiques

La modélisation des transformateurs de puissance, l'aide d'un procédé expérimental, est relativement coûteuse et difficile à mettre en œuvre en matière de temps, c'est pour cette raison qu'on préfère le modèle mathématique, rapide et efficace, qui est basé sur un schéma électrique équivalent. Cependant, la précision des résultats obtenus est liée directement au modèle choisi.

III.7 .2.1 Le modèle EMTP

EMTP est une abréviation du mot « Analyse des transitoires électromagnétiques », ce code est utilisé pour simuler le comportement en régime transitoire des réseaux électriques

[28]. Pour modéliser un transformateur sous EMTP consiste à faire un schéma équivalent comprenant :

- Des transformateurs parfaits.
- Une branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer.
- Des résistances des enroulements, des capacités de couplage et des inductances de fuite.

La Figure III. 6 présente un exemple de schéma équivalent d'un transformateur de type cuirassé avec trois galettes.

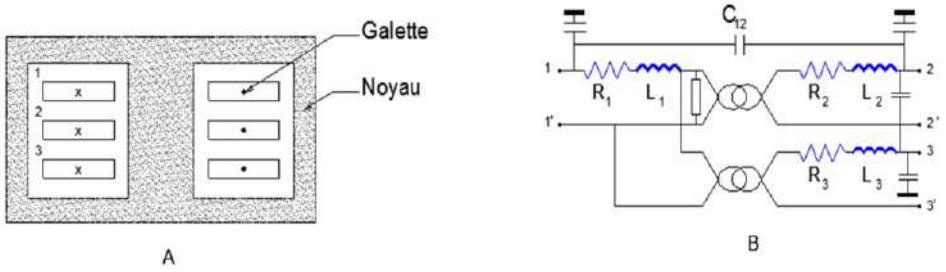


Figure. III. 6 : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

A. Coupe transversale du transformateur

B. circuit équivalent électrique

Avec : C_{12} la capacité entre l'enroulement primaire et secondaire, L_i les inductances de fuite, R_i résistances.

Les éléments du circuit équivalent du transformateur peuvent être déterminés à partir de la géométrie du transformateur, par calcul analytique ou numérique. L'avantage de ce code est qu'il permet d'effectuer des études d'interaction du transformateur avec le réseau électrique, mais ce type de modélisation ne convient pas aux études internes du transformateur.

III.7 .2.2 Le modèle RESEL

Ce modèle est développé pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques, et dans les transformateurs de puissance [29].

Pour modéliser un transformateur, il faut :

Un schéma magnétique qui traduit le comportement magnétique ; il est composé d'un réseau de réluctances et de forces électromotrices (**III. 7** .B).

Un schéma électrique qui traduit le comportement électrique du transformateur ; ce schéma est composé de forces électromotrices et de plusieurs cellules RL (**III. 7** .C).

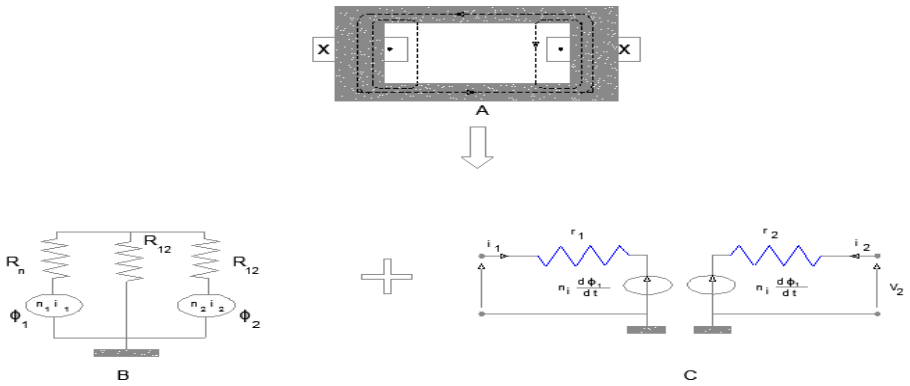


Figure III. 7 : modèle de RESEL

A : Coupe transversale du transformateur

B : circuit équivalent magnétique

C : circuit équivalent électrique

Les sources du circuit électrique sont liées aux variations du flux dans le circuit magnétique, et les sources du circuit magnétique sont liées aux courants dans les enroulements, de cette façon le couplage entre les deux schémas est assuré.

Ce type de modélisation comprend plusieurs étapes pour arriver au résultat final, par ailleurs le calcul des paramètres n'est pas précis. De plus, ce modèle ne permet pas une analyse fréquentielle systématique, mais plutôt une analyse temporelle.

III.7 .2.3 Modélisation par inductances propres et mutuelles

Dans ce modèle (Figure III.8), le transformateur est discrétisé par des spires, ou par des galettes, chaque élément est représenté par sa propre inductance qui est couplée à toutes les autres inductances que l'on appelle inductances mutuelles.

Entre les éléments, il existe des capacités de couplages et pour chaque élément, une capacité par rapport à la masse. Les éléments du modèle peuvent être déterminés expérimentalement comme ils peuvent être déterminés suivant les caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage.

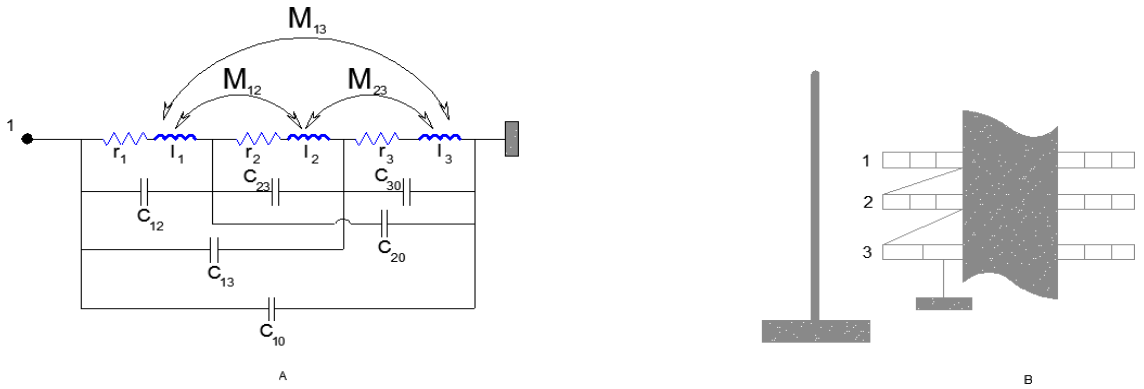


Figure III. **8 :** Modèle du transformateur basé sur inductances propres et mutuelles

A. circuit électrique B. circuit magnétique

Avec : M_{1n} les mutuelles inductances, l_i les inductances propres, C_{in} les capacités.

À partir de la connaissance des paramètres géométriques, électriques et magnétiques du transformateur, une méthode analytique qui permet de calculer les inductances propres et les mutuelles du bobinage [30].

III.7 .2.4 Modèle issu du principe de la dualité magnétique-électrique

La dualité est une solution qui permet de passer d'un problème technique à un autre, et surtout pour simplifier considérablement son étude. La dualité est utilisée dans diverses domaines, par exemple la dualité thermique-électrique, la dualité électrique-magnétique...etc. Les circuits duaux sont des circuits qui constituent deux représentations physiques différentes pour le même système d'équations différentielles. Pour le cas de la dualité magnétique-électrique, on établit d'abord un schéma magnétique équivalent du transformateur, et on en déduit le schéma électrique équivalent.

La Figure III. 9 illustre la modélisation d'un transformateur, par le principe de la dualité, où et représentent respectivement les réluctances de fuite primaire, secondaire, et la réluctance principale.et sont des forces magnétomotrices.

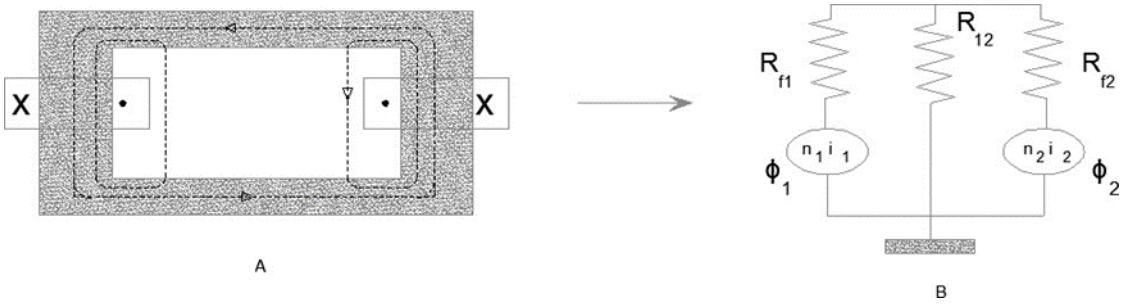


Figure III.9 : Modèle du transformateur basé sur la dualité magnétique-électrique

A. coupe transversale B. circuit magnétique-électrique

III.7 .2.5 Modélisation à partir du calcul de champ électromagnétique

Avec l'utilisation des méthodes de calcul de champs magnétique, les paramètres physiques d'un modèle de transformateur peuvent être calculés avec précision. Cette technique permet d'évaluer un modèle équivalent, en tenant compte de la géométrie de tous les éléments (galette, nombre de spire, noyau magnétique, cuve, etc.). Il s'agit des codes de calcul numériques basés sur la Méthode des Éléments Finis (MEF), qui sont les plus adaptés et les plus utilisés [31]**.**

Le procédé est trouvé long, de plus le temps de calcul est très élevé pour avoir de bons résultats, cela est dû au nombre important de nœuds issu du maillage de la géométrie du transformateur considéré, particulièrement lorsqu'il s'agit d'une modélisation en trois dimensions.

III.7 .2.6 Modélisation par la théorie de lignes

Sur la base de la théorie et l'analyse modale des lignes de transmission, des modèles sont développés pour modéliser les transformateurs [32]. Dans cette technique, l'enroulement du transformateur est décomposé en spires élémentaires, en négligeant l'effet du noyau magnétique (considérant le flux magnétique ne pénètre pas dans le noyau magnétique, et que la vitesse de la propagation est constante dans l'enroulement).

La mise en équation de ce système donne une relation linéaire, entre la matrice d'inductance et la matrice de capacité.

Cette méthode a été appliquée seulement dans le cas d'un transformateur avec un nombre de spires limités (inférieur à 12), mais dans des autres cas des transformateurs de puissance, l'application de cette méthode n'a pas été abordée, et vu les hypothèses simplificatrices, un tel modèle donnerait des résultats erronés. La technique a été ensuite généralisée pour N enroulements, en tenant compte du noyau magnétique. Malgré les résultats positifs de ces recherches, la modélisation par la théorie de lignes est appliquée dans un domaine spécifique, tel que le transit des surtensions dans les bobinages des transformateurs.

III.7 .2.7 Modélisation par l'analyse modale

Dans cette technique, le transformateur est considéré comme une boite noire, en se basant sur des signaux d'entrée et de sortie. Par l'intermédiaire de la fonction de transfert, le signal de sortie est lié au signal d'entrée. À partir des mesures du courant d'entrée I_e et de la tension d'entrée Ve du transformateur en faisant le rapport I_e/Ve (il est du même pour chaque point de la fréquence), on obtient l'évolution de son admittance d'entrée, en fonction de la

fréquence. Ensuite, à partir des paramètres modaux de cette courbe (forme propre, fréquence propre), on obtient le circuit équivalent, ainsi que les fréquences de résonance du transformateur [33].

III.7 .2.8 Modélisation par des circuits ou des transformées

La méthode consiste à mesurer entre deux points, la fonction de transfert du transformateur (en général entre l'entrée et la sortie), le passage du plan de Laplace (s) avant le plan Z est une obligation.

Le modèle proposé était plus développé car il procède à une conception qui utilise les prototypes de la fonction de transfert. L'étude prend en considération le transformateur et les lignes avec impédances de charge [34].

III.8 circuit équivalent de l'enroulement du transformateur

Ce modèle est constitué d'une cascade de cellules RLC, ce dernier reproduit le comportement électromagnétique du transformateur dans une large gamme de fréquence du [20 Hz jusqu'à 1MHz]. Dans ce type de modèle, la précision des résultats dépend aux mesures effectuées et sur les méthodes numériques utilisées pour l'identification des paramètres du modèle.

Ce modèle est basé sur la modélisation de l'enroulement en un nombre fini de cellules, chaque cellule est représentée par son inductance propre, sa résistance et capacité. Ces paramètres peuvent être calculés suivant les caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage.

La (Figure **III.10)** représente le schéma équivalent de l'enroulement du transformateur.

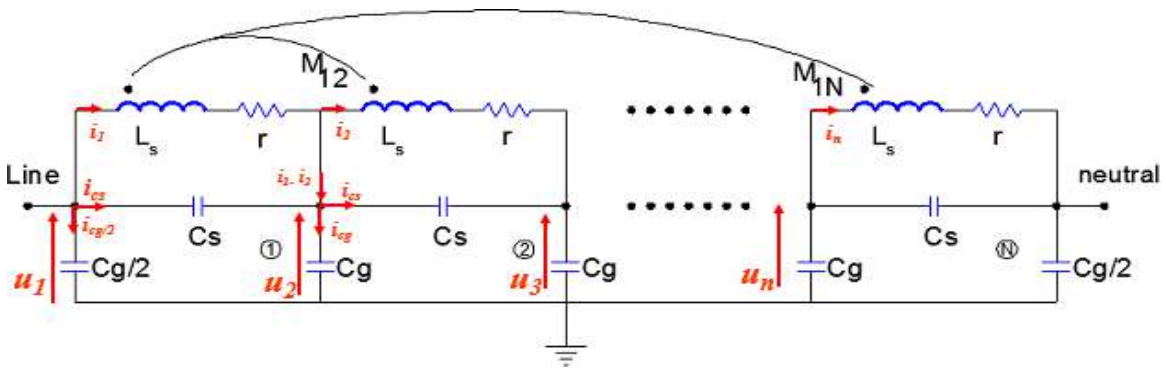


Figure. III.10 : circuit équivalent de l'enroulement du transformateur

Avec : L_s inductance propre, M_{in} les mutuelles, r résistances C_s shunt capacité, C_{gi} capacités à la terre.

III.9 Équations du schéma équivalent adopté

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la (Figure **III.10**) nous permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courants de l'enroulement, pour une discrétisation en N éléments (N représente le nombre de cellules).

III.9 .1Équations des tensions

L'expression de la tension d'entrée est donnée par l'équation suivante ;

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

Avec ;

u_0 Et i_0 sont respectivement la tension et le courant appliquées à l'entrée de l'enroulement.

r_g: La résistance interne de générateur.

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

$$U_1 - U_2 - ri_1 = l_s \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + M_{15} \frac{di_5}{dt} + M_{16} \frac{di_6}{dt} \quad \text{(III .2)}$$

$$U_2 - U_3 - ri_2 = l_s \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + M_{25} \frac{di_5}{dt} + M_{26} \frac{di_6}{dt} \quad \text{(III .3)}$$

- **Généralisation**

Pour : $1 \leq k \leq N$

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

Avec : $m \neq k$

III.9 .2 Équations des courants

Au nœud (1) à l'entrée du transformateur nous avons l'équation suivante :

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

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

Avec :

$$i_{cs}=c_s \frac{d(v1-v2)}{dt}$$
$$i_{cg/2}=c_{cg/2} \frac{dv1}{dt} \quad \text{(III .7)}$$

En introduisant (I.7) dans (I.5) on obtient :

$$i_0 - i_1=c_s \frac{dv1}{dt} - c_s \frac{dv2}{dt} + c_{g/2} \frac{dv1}{dt} = \left(c_s + c_{g/2}\right) \frac{dv1}{dt} - c_s \frac{dv2}{dt} \quad \text{(III .8)}$$

Au nœud (2) nous avons l'équation suivante :

$$i_1 - i_2=c_s \frac{dv2}{dt} - c_s \frac{dv1}{dt} + c_s \frac{dv2}{dt} - c_s \frac{dv3}{dt} + c_g \frac{dv2}{dt}$$
$$i_1 - i_2=-c_s \frac{dv1}{dt} + \left(2c_s + c_g\right) \frac{dv2}{dt} - c_s \frac{dv3}{dt} \quad \text{(III .9)}$$

- **Généralisation**

Pour $1 \leq k \leq N\text{-}1$

$$\mathrm{i_k} - \mathrm{i_{k+1}}=-\mathrm{c_s} \frac{\mathrm{du_k}}{\mathrm{dt}} + \left(2\mathrm{c_s} + \mathrm{c_g}\right) \frac{\mathrm{du_{k+1}}}{\mathrm{dt}} - \mathrm{c_s} \frac{\mathrm{du_{k+2}}}{\mathrm{dt}} \quad \text{(III.10)}$$

III.9 .3 Représentation matricielle des équations du modèle

Après avoir établi les équations régissant le schéma équivalent du transformateur, et après l'intégration des équations (I.4) et (I.10) on obtient :

-Pour l'équation des tensions :

$$\int_0^t (\mathrm{u_k} - \mathrm{u_{k+1}})dt = \int_0^t \sum_{m=1}^{N} (L_{km} i_m) + R_k \int_0^t i_k dt \quad \text{(III.11)}$$

-Pour l'équation des courants :

$$\int_0^t (\mathrm{i_k} - \mathrm{i_{k+1}})dt=\int_0^t -C_s\, \mathrm{u_k} + \left(2c_s + c_g\right)\mathrm{u_{k+1}} - C_s \mathrm{u_{k+2}} \quad \text{(III.12)}$$

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

$$\mathrm{U}=C^{-1} \int_0^t \Delta I dt \quad \text{(III.13)}$$
$$I = L^{-1} \int_0^t (\Delta U - RI)dt \quad \text{(III.14)}$$

Donc :

$$\Delta I = \mathrm{I_k} - \mathrm{I_{k+1}} \quad \text{et } \Delta U = \mathrm{U_k} - \mathrm{U_{k+1}} \quad \text{(III.15)}$$

Les paramètres U et I sont les vecteurs des tensions et des courants, ils sont présentés

comme suit :

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ . \\ . \\ . \\ U_n \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad U = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ . \\ . \\ . \\ I_n \end{bmatrix} \tag{III.16}$$

Les matrices capacité, inductance et résistance de ce modèle sont respectivement [C], [L] et [R], ils sont présentés comme suit ;

$$[C] = \begin{bmatrix} c_s + c_{g1}/2 & -c_s & \dots & \dots & 0 \\ -c_s & 2c_s + c_{g2} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 2c_s + c_{gN} \end{bmatrix} \tag{III.17}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{12} & L_2 & \dots & M_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{1N} & M_{2N} & \dots & L_N \end{bmatrix} \tag{III.18}$$

L est une matrice diagonale, tous les éléments diagonaux sont les inductances propres, et les éléments non diagonaux sont les mutuelles inductances.

$$[R] = \begin{bmatrix} r & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & r \end{bmatrix} \tag{III.19}$$

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une technique de diagnostic basée sur l'Analyse de la Réponse en Fréquence (FRA) et sur les divers modèles du transformateur de puissance.

Le modèle que nous avons trouvé le plus convenable est celui du type RLC, un tel modèle est basé sur les capacités, les résistances, les inductances propres et mutuelles, car il peut reproduire le comportement électromagnétique de l'enroulement du transformateur de puissance.

IV.1 Introduction

Ce chapitre consiste à étudier l'analyse de la réponse du gain en fonction de la fréquence par le biais de logicielle MATLAB d'un enroulement sain et avec défaut, puis l'exploiter en vue de son diagnostic.

L'objectif de ce travail est d'indiquer exactement les points des éléments endommagés et l'apparition de défaut sur une large plage de fréquence à la suite des différents types de défaillances qui peuvent survenir sur n'importe quel point de l'enroulement.

IV.2 Type de défauts de l'enroulement :

Pour étudier les différentes défaillances de l'enroulement avec la technique d'analyse fréquentielle, on a fait varier les paramètres du modèle d'un enroulement supposé sain. Les modifications des valeurs de ces paramètres dépendent du défaut à analyser

Les défauts simulés sont les suivants

- Court-circuit entre spires.
- Circuits ouverts.
- Déformations propres de l'enroulement.

IV.3 Etude de l'influence de chaque type de défaut sur la réponse fréquentielle de l'enroulement

IV.3.1 Réponse fréquentielle d'un Court-circuit au niveau impédances

La présence d'un tel défaut dans l'enroulement provoque une variation de sa réponse en fréquence, et par voie de conséquence une variation dans les éléments du circuit équivalent.

Pour étudier l'influence de chaque type de défaut sur la réponse fréquentielle consiste à introduire des défauts dans des différents endroits sur le modèle de référence, pour chaque défaut, une inspection sur sa courbe de la réponse fréquentielle pour avoir le changement des paramètres : l'inductance [L], la résistance [R] et de capacité [C] par rapport à l'état initial de référence

Ce modèle est constitué d'une cascade de cellules RLC, ce dernier reproduit le comportement électromagnétique du transformateur dans une large gamme de fréquence du [20 Hz jusqu'à 1MHz].

Ce modèle est basé sur la modélisation de l'enroulement en un nombre fini de cellules, chaque cellule est représentée par son inductance propre, sa résistance et capacité.

Ces paramètres peuvent être calculés suivant les caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage. Le modèle équivalent des enroulements d'un transformateur adopté pour cette étude est présenté par le schéma [Fig IV.1]

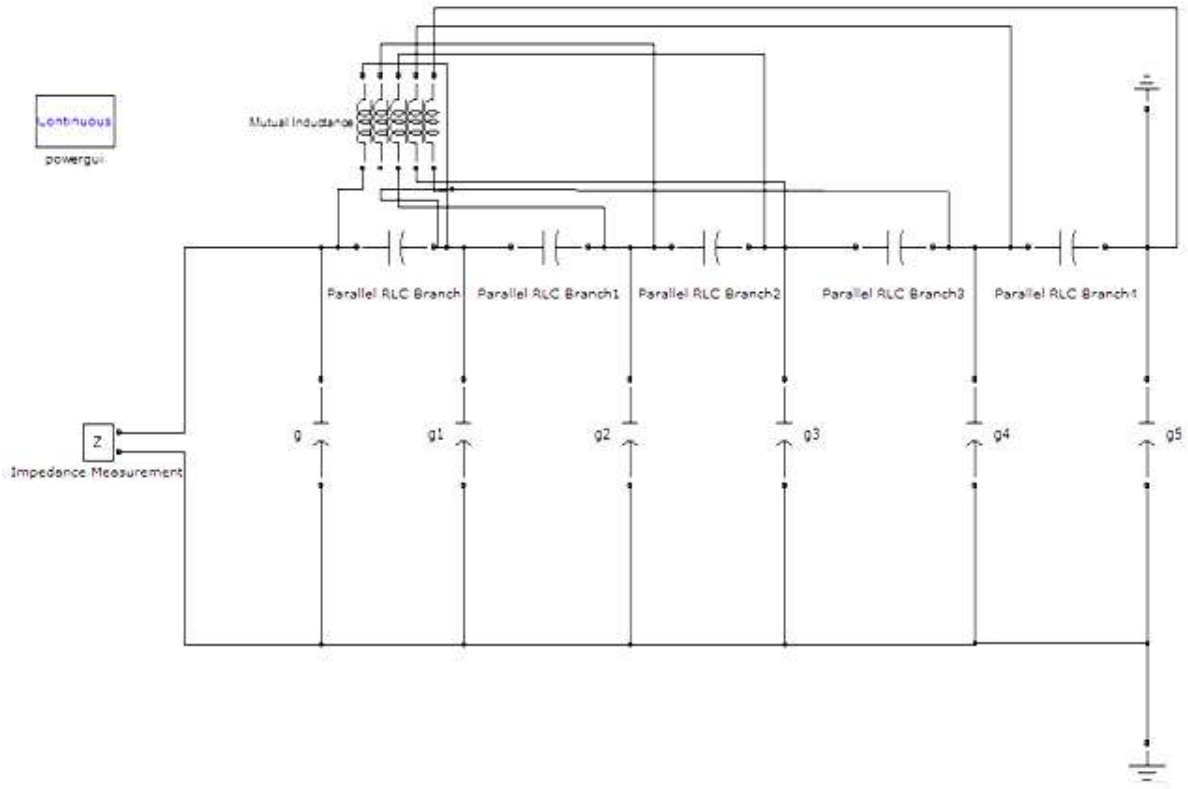


Figure IV.1 Schéma équivalent des enroulements du transformateur

A partir de ce modèle un signal de réponse à la sortie est porté sur les deux graphes **[Figure IV.2]** et les valeurs numériques sur le tableau **[Tableau IV.1]** qu'on les appels empreinte du transformateur

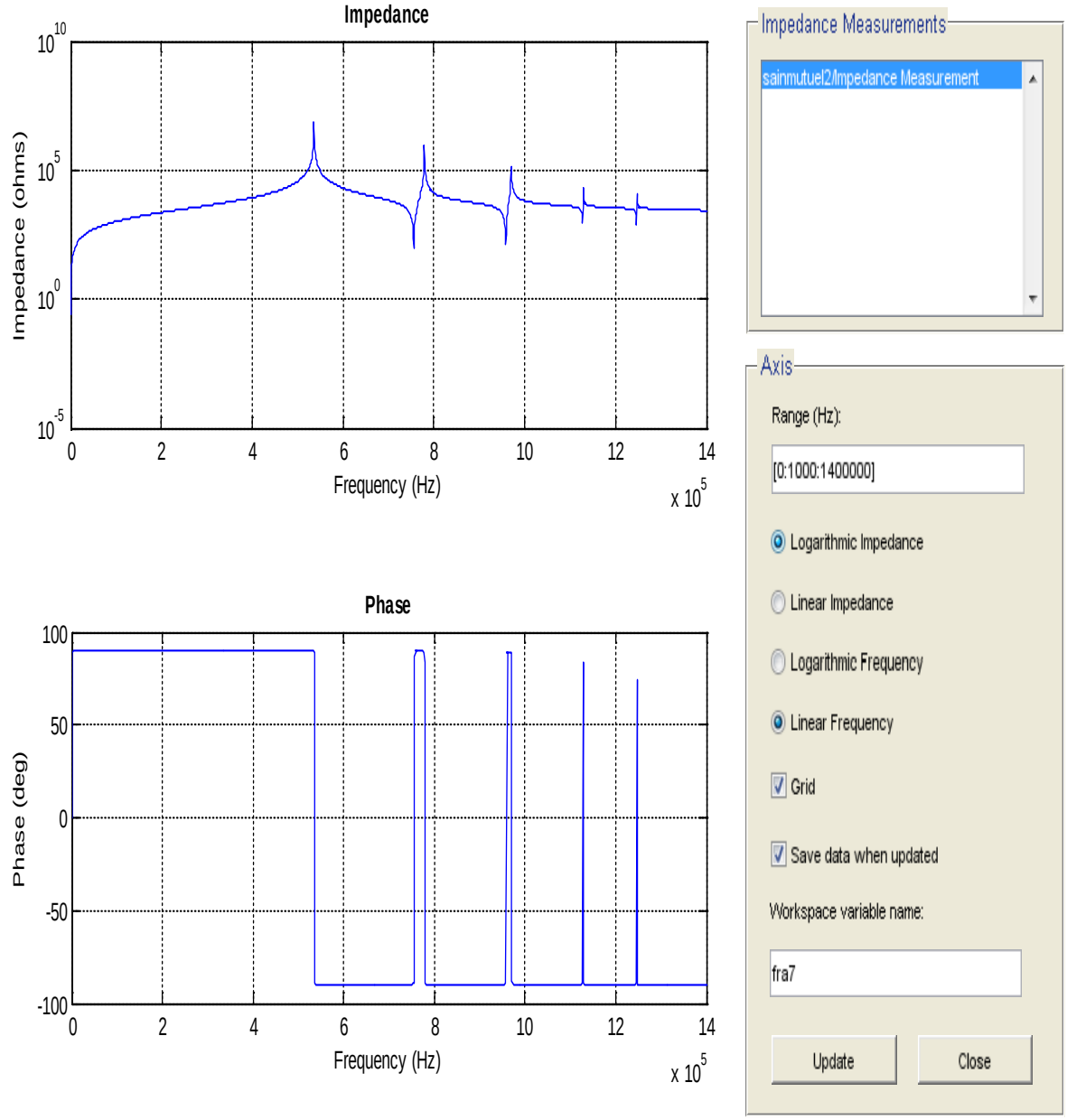


Figure IV.2 courbes de Réponse fréquentielle de l'enroulement sans défaut

FREQUENCE (Hz)	PARTIE REEL	PARTIE IMAGINAIRE	L eq
0	0,250000000	0	
1000	0,250001657	9,800391936	0,001560572
2000	0,250006630	19,60098082	0,003121175
3000	0,250014918	29,40196362	0,004681841
4000	0,250026521	39,20353733	0,006242601
5000	0,250041441	49,00589897	0,007803487
6000	0,250059679	58,80924564	0,00936453
7000	0,250081235	68,61377448	0,01092576
8000	0,250106111	78,41968273	0,012487211
9000	0,250134308	88,22716772	0,014048912
10000	0,250165829	98,03642688	0,015610896
11000	0,250200674	107,8476578	0,017173194
12000	0,250238847	117,6610581	0,018735837
13000	0,250280350	127,4768257	0,020298858
14000	0,250325184	137,2951585	0,021862286

Tableau IV.1 : Réponse fréquentielle de l'enroulement sans défaut.

Pour les transformateurs la détermination du nombre de cellule d'un circuit équivalent est un problème crucial. Dans la présente étude, mais à partir de ces graphes le nombre N de cellules du modèle de l'enroulement du transformateur est égal au nombre de fréquences de résonance de l'impédance de l'enroulement (dans ce cas N=5). Une fréquence est dite résonance si elle est significative, pour cela, la première étape dans l'analyse de la courbe de l'impédance en fonction de la fréquence (Z=f(F)) est l'élimination des pics n'ayant pas des valeurs inferieures et supérieures significatives

IV.3.1 défauts de court-circuit sur l'enroulement

Parmi les défauts les plus nuisible et fréquente rencontré au bobinage du transformateur ainsi le plus répondu et les plus dangereux pour un transformateur c'est le court-circuit des enroulements dans ce sens le modèle est celle du [Fig IV.3]

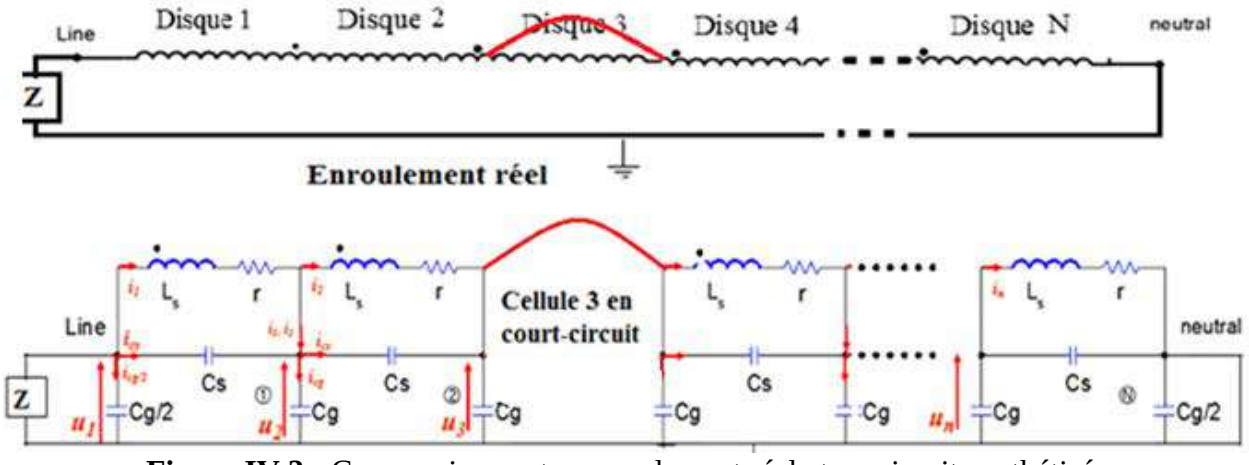


Figure IV.3 : Comparaison entre enroulement réel et un circuit synthétisé

Le court-circuit entre spire d'un enroulement peut faire diminuer la résistance de l'enroulement d'après la formule :

Req = N. r N : le nombre de cellule et r : la Résistance de cellule [IV.1]

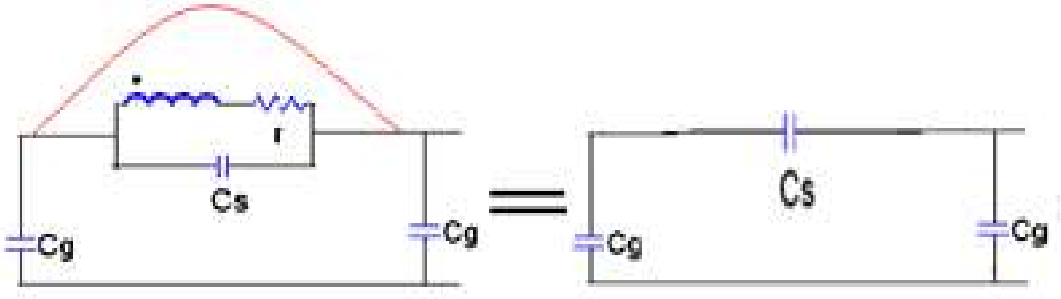


Figure IV.4 court-circuit d'une cellule

Pour base fréquence :



Figure IV.5 Courbe de la réponse en base fréquence

Dont la fonction

$$\boldsymbol{Z(f) = N.r + j.2.\pi.Leq.f} \quad \text{(IV.1)}$$

N: le nombre de cellule et r : la Résistance de cellule Leq : inductance équivalente f :la fréquence.

Avec :

$$\boldsymbol{Leq = N.Ls + 2.\Sigma(N-1).Mi,i+1} \quad \text{(IV.2)}$$

On applique à l'entrée de l'enroulement un signale sinusoïdal faible amplitude en environs de 1V une fréquence f=0 Hz avec une large bande de fréquence.

La tension d'entrée est **U(t) = A.sin (w.t) avec w =2. π. f** (IV.3)

- **1er cas fréquence nulle (f=0 Hz)**

Pour cette fréquence les condensateurs sont considérés comme des circuits ouverts, par contre pour les bobines sont comme des courts-circuits ce qui donne un modèle équivalent des enroulements schématisé par la [fig IV.6]

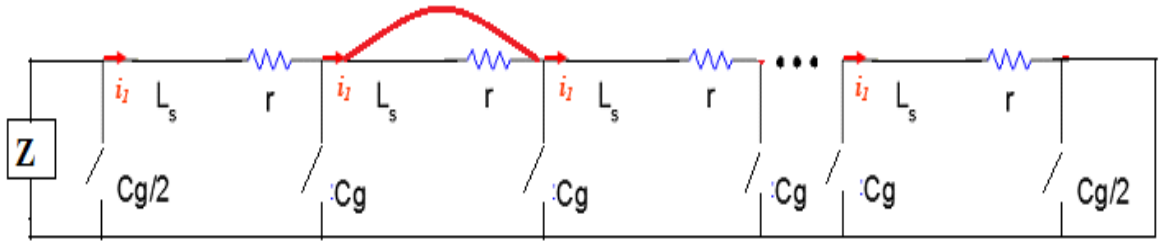


Figure IV.6 le modèle des enroulements pour la fréquence f =0 Hz

Pour le cas général on considère r =0.05 Ω et d'après l'équation (IV.1)

Req = 0.25 Ω.

La réponse Fig IV.7 sera la même que celle de l'empreinte car les enroulements ne présentent pas des courts-circuits, le transformateur est à l'état sain

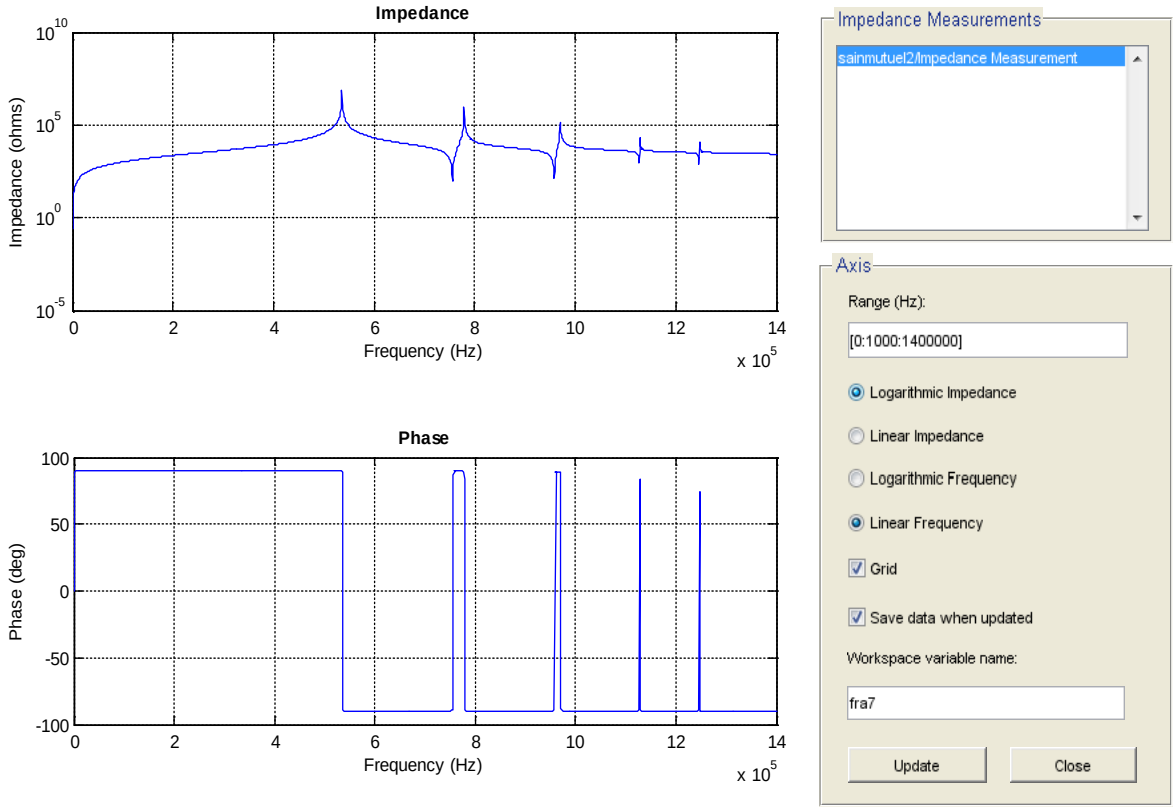


Figure IV.7 Réponse des enroulements Req=0.25 Ω état sain

FREQUENCE (Hz)	PARTIE REEL	PARTIE IMAGINAIRE	L eq
0	0,250000000	0	
1000	0,250001657	9,800391936	0,001560572
2000	0,250006630	19,60098082	0,003121175
3000	0,250014918	29,40196362	0,004681841
4000	0,250026521	39,20353733	0,006242601
5000	0,250041441	49,00589897	0,007803487
6000	0,250059679	58,80924564	0,00936453
7000	0,250081235	68,61377448	0,01092576
8000	0,250106111	78,41968273	0,012487211
9000	0,250134308	88,22716772	0,014048912
10000	0,250165829	98,03642688	0,015610896
11000	0,250200674	107,8476578	0,017173194
12000	0,250238847	117,6610581	0,018735837
13000	0,250280350	127,4768257	0,020298858
14000	0,250325184	137,2951585	0,021862286

Tableau IV.2 : Réponse fréquentielle de l'enroulement état sain

Cas d'une cellule en court-circuit

Req = (N-i).r i : nombre de cellule en court-circuit i=1

avec r = 0.05 Ω et N = 5 Req =0.20 Ω

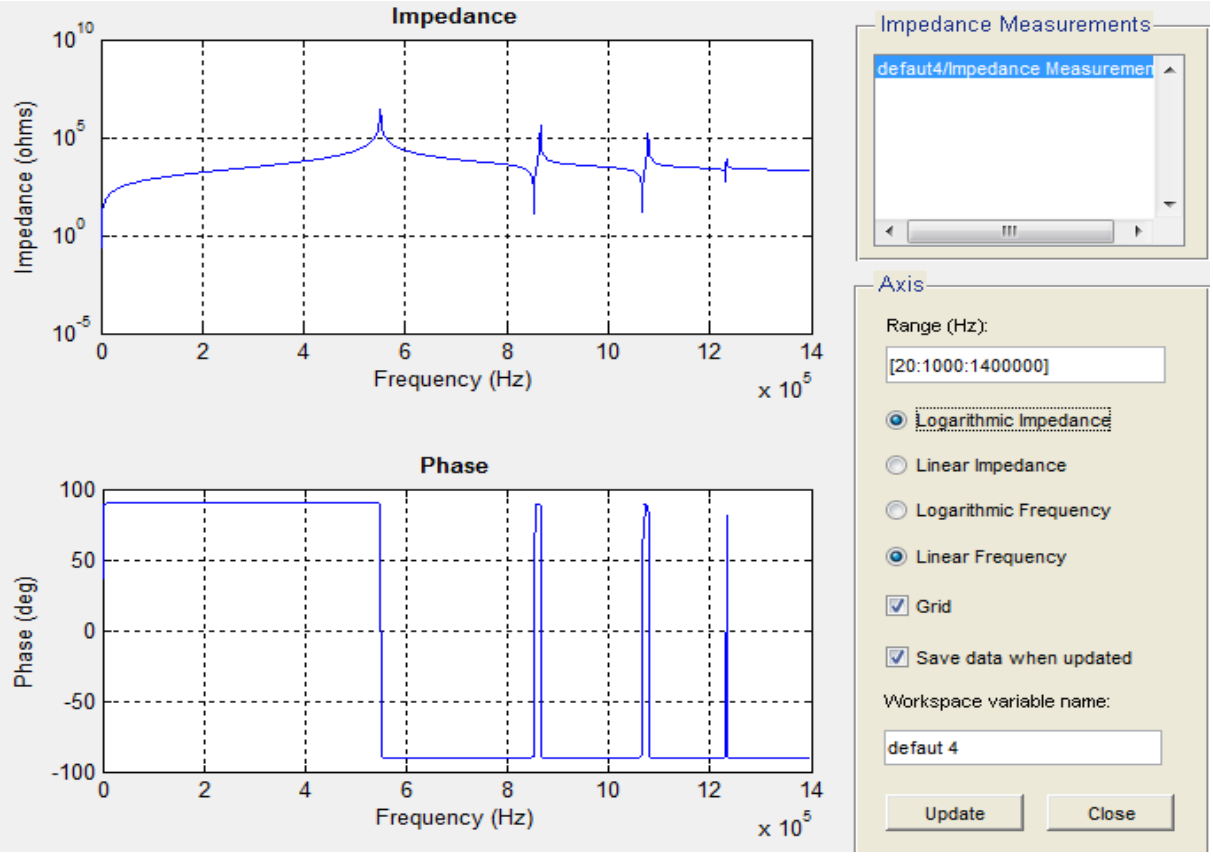


Figure IV.8 Réponse des enroulements Req=0.20 Ω cellule en court-circuit

FREQUENCE (Hz)	PARTIE REEL	PARTIE IMAGINAIRE	L eq
0	0,200000000	0	
1000	0,212637669	7,215119565	0,001148904
2000	0,212659113	14,429526	0,001148848
3000	0,250014918	21,64434531	0,001148851
4000	0,250026521	28,85955465	0,001148868
5000	0,250041441	36,0752411	0,001148883

Tableau IV.3 : Réponse fréquentielle de l'enroulement Req =0.20 Ω cellule en court-circuit.

Cas de deux cellules en court-circuit

Req = (N-2).r i : nombre de cellule en court-circuit i=2

avec r = 0.05 Ω et N = 5 Req =0.15 Ω

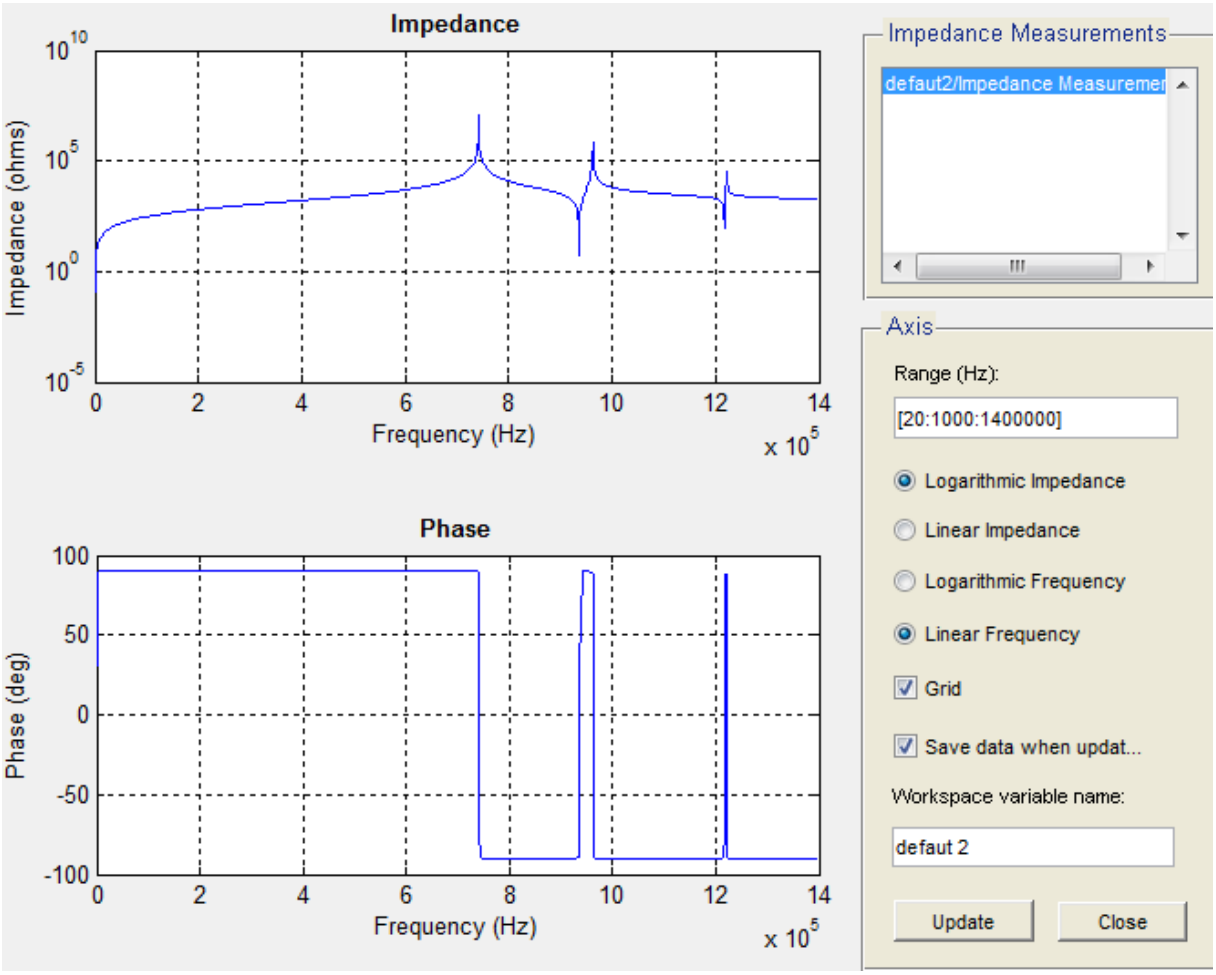


Figure IV.9 Réponse des enroulements Req=0.15 Ω /deux cellules en court-circuit

FREQUENCE (Hz)	PARTIE REEL	PARTIE IMAGINAIRE	L eq
0	0,150000000	0	
1000	0,162068152	4,95548815	0,00078909
2000	0,162094478	9,910151615	0,00089025
3000	0,162102417	14,86513814	0,00078902
4000	0,162108799	19,82036376	0,000789027
5000	0,162115705	24,77586209	0,000178904

Tableau IV.4 : Réponse fréquentielle de l'enroulement Req =0.15 Ω deux cellules en court-circuit

On récapitule avec le schéma de la [Fig.10]

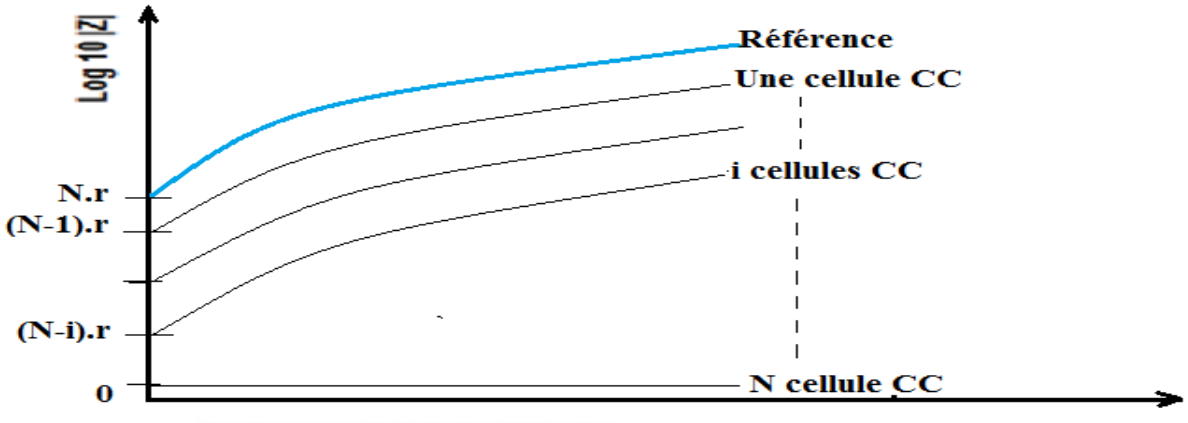


Figure IV.10 : défauts de court-circuit

D'après le graphe qui précède, On déduit qu'à chaque court circuit d'une spire dans un enroulement du transformateur la résistance équivalente diminue.

Pour les figures(IV.7, IV.8 et IV 9) avec la figure(IV.1) (enroulement sain) on constate des déplacements des pics de résonances dans la plage des fréquences avec le déplacement de défaut crée entre les différentes spires le long de l'enroulement, ainsi la disparition d'un pic de résonance qui indique l'existence d'une cellule en court-circuit

IV.3.2 Réponse fréquentielle d'un Court-circuit a l'entrée de l'enroulement :

Dans ce cas, un court-circuit d'un disque a été réalisé à l'entrée de l'enroulement par le court-circuit d'un condensateur (fig. IV.11)

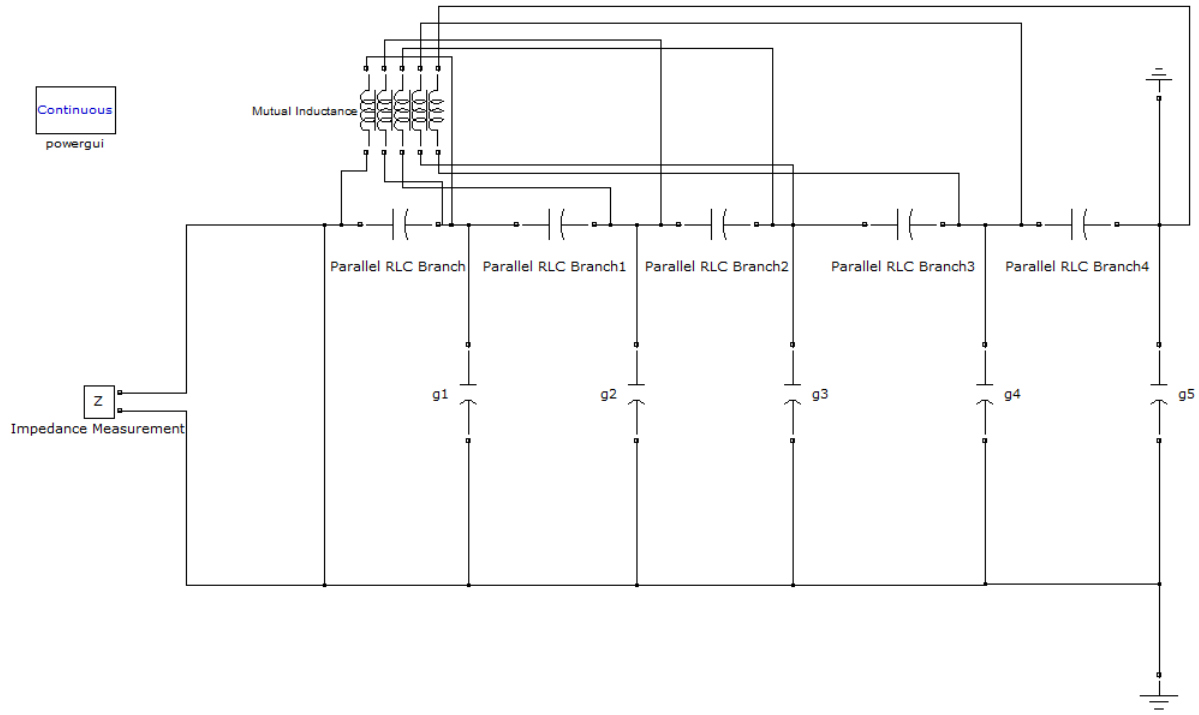


Figure.11 Défauts de court-circuit sur l'entrée de l'enroulement.

La réponse fréquentielle est présenté par la (fig IV 12) .

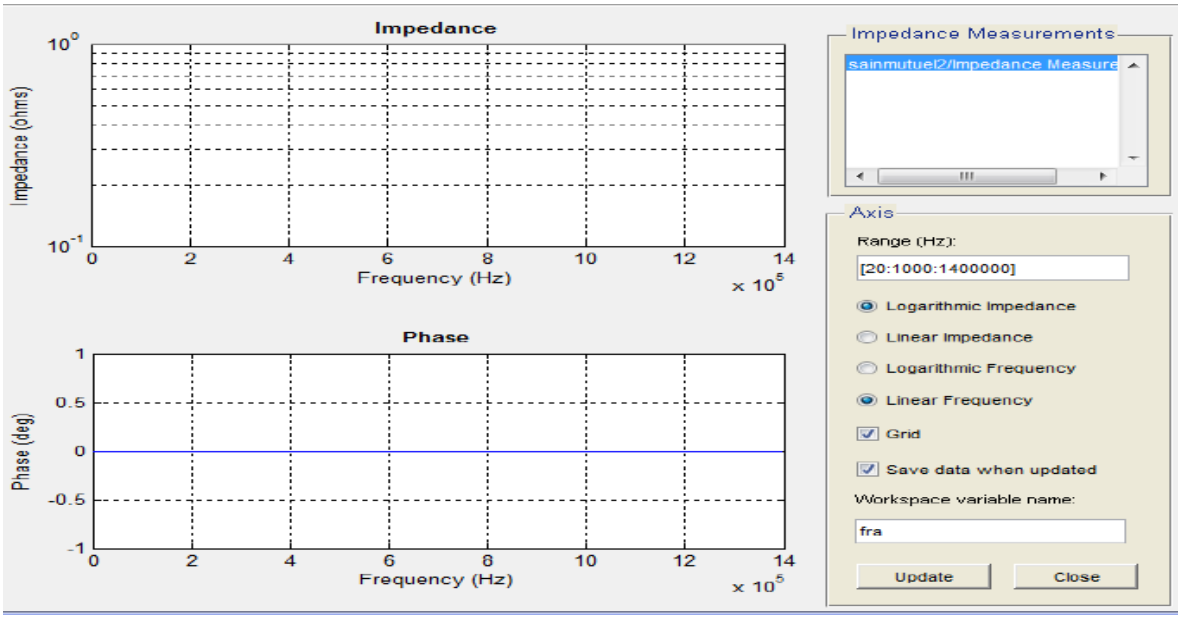


Figure IV .12 Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut à l'entée.

On constate qu'un court-circuit au niveau de l'entrée c'est un court-circuit à la terre qui provoque un blocage des enroulements de transformateur chose confirmé par l'allure de la réponse fréquentielle (fig IV.12) et (tableau IV.5)

IV.3.3 Défauts de court-circuit dans le milieu de l'enroulement :

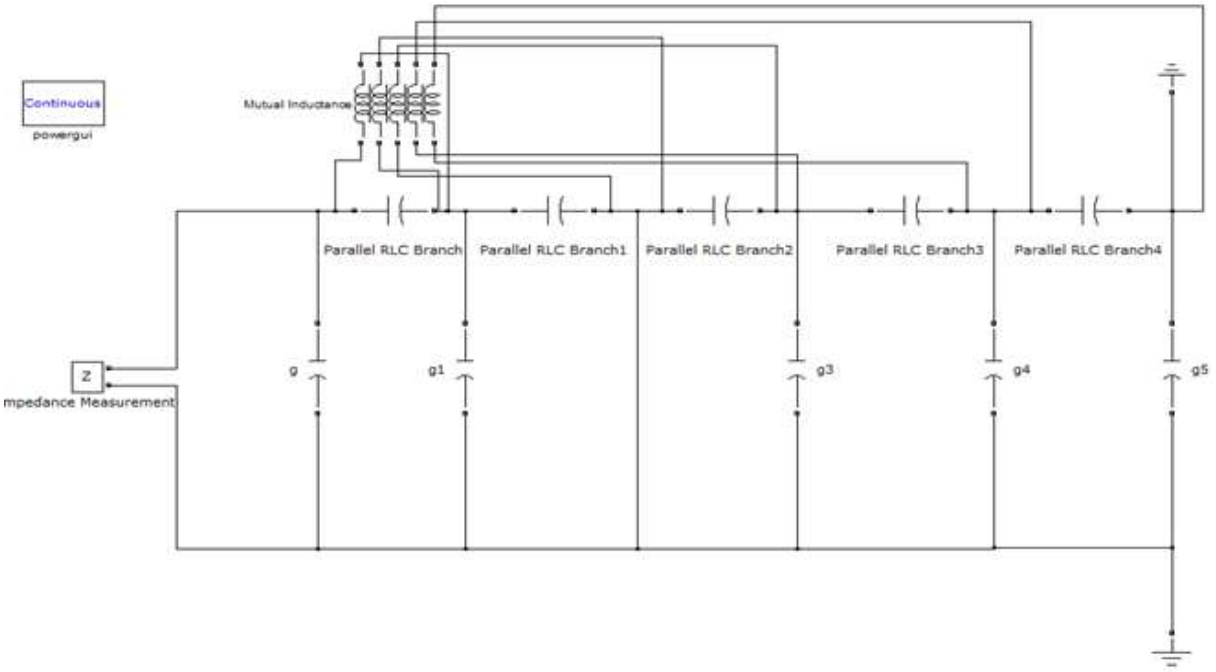


Figure IV.13 .modèle des enroulements avec défaut au milieu de l'enroulement

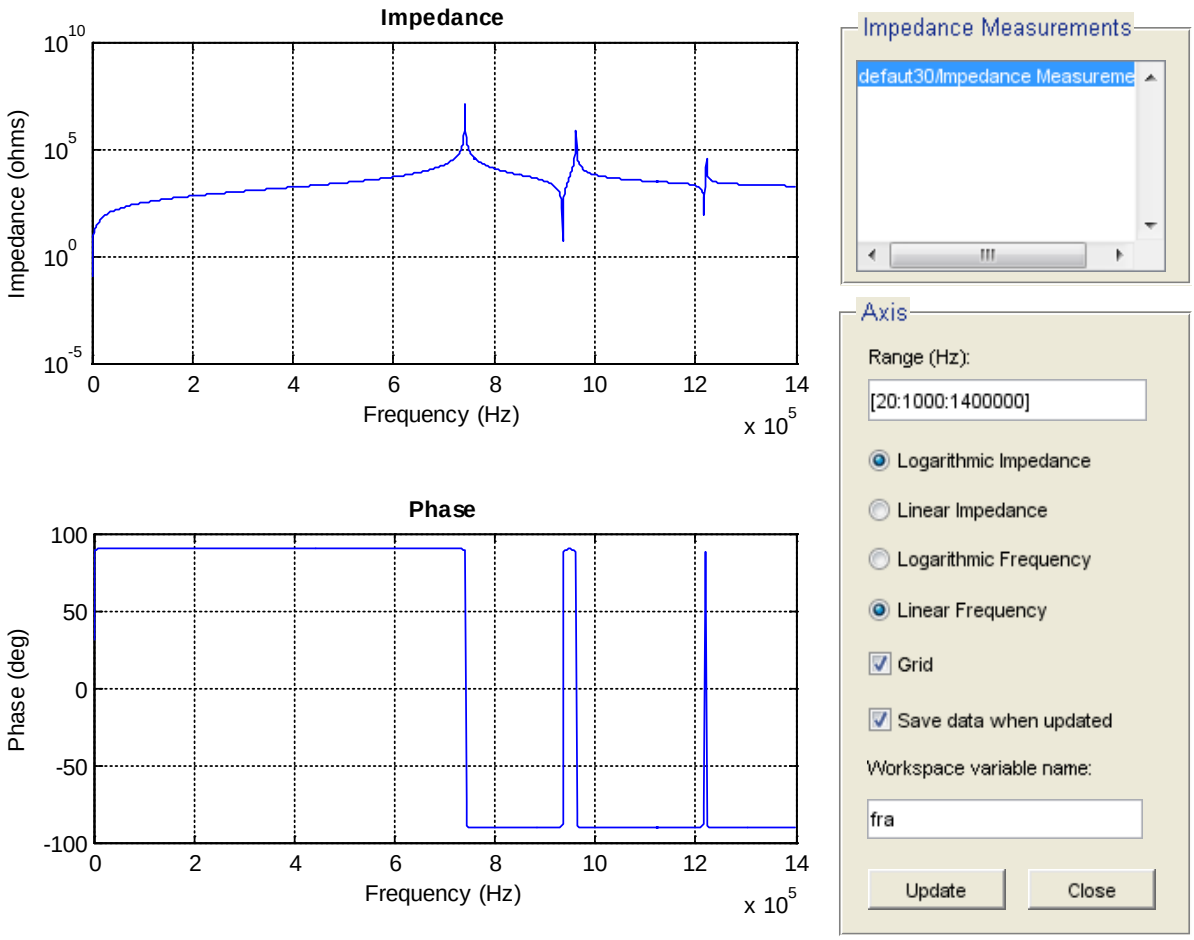


Figure IV .14 Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut au milieu.

FREQUENCE (Hz)	PARTIE REEL	PARTIE IMAGINAIRE
0	0,1	0
1000	0,103121342	2,948770063
2000	0,103124319	5,89743689
3000	0,103126433	8,846195386
4000	0,103129019	11,79505416
5000	0,10313224	14,74403968

Tableau IV.5 : Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut au milieu

IV.3.3 Défauts de court-circuit à la sortie de l'enroulement :

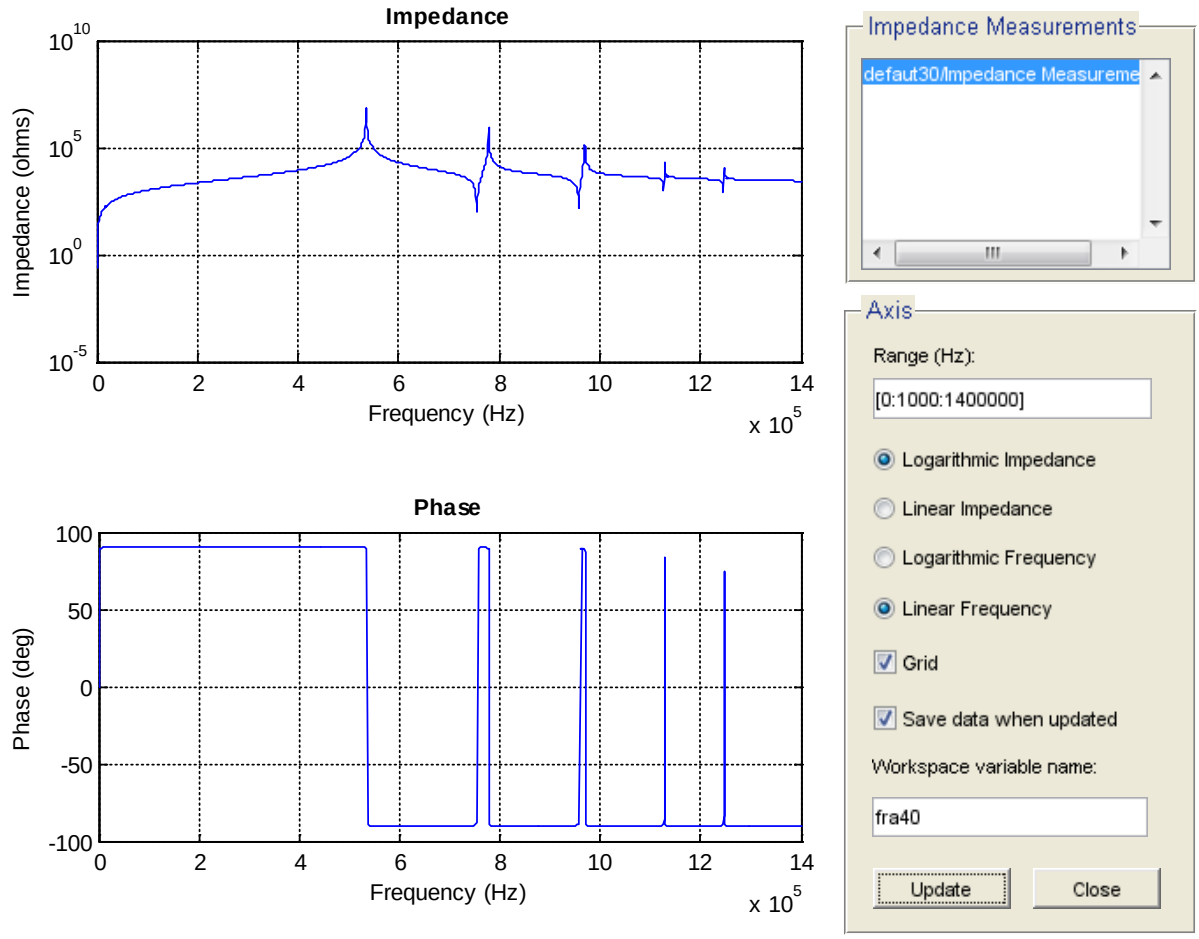


Figure IV .15 Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut à la sortie.

FREQUENCE (Hz)	PARTIE REEL	PARTIE IMAGINAIRE
0	0,25	0,25
1000	0,250001657	9,800391936
2000	0,25000663	19,60098082
3000	0,250014918	29,40196362
4000	0,250026521	39,20353733
5000	0,250041441	49,00589897

Tableau IV.6 : Réponse fréquentielle de l'enroulement avec défaut a la sortie

On peut déduire des courts-circuits à l'entrée, au milieu et à la sortie des enroulements les observations suivantes :

- Le court- circuit à l'entrée des enroulements provoque un blocage de transformateur.
- Le court-circuit au milieu des enroulements laisse seulement les cellules après

la cellule en court-circuit en fonctionnement mais les cellules avant sont en court-circuit.

- Le court- circuit à la sortie des enroulements n'infecter pas sur les cellules suite l'apparition de fréquence de résonances de chaque cellule.

IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, Les simulations faite sur notre modèle choisi nous a permis de déduire plusieurs conclusions

- Déduire le nombre de cellule d'un transformateur d'après la réponse fréquentielle empreinte, ainsi les cellules en court-circuit.
- Le court-circuit d'une cellule fait diminuer la résistance équivalente des enroulements.
- Les courts-circuits fait déplacer les fréquences de résonance.
- . Le déplacement des courts-circuits de l'entrée vers la sortie provoque des courts circuits-circuits des cellules en avale de court-circuit provoquer.

Conclusion générale

Notre travail est consacré pour la recherche et la détection des défauts dans les enroulements d'un transformateur de puissance en vue de son diagnostic par l'analyse de réponse du gain en fréquence de ces derniers.

Nous avons présenté l'intérêt des transformateurs de puissance dans un réseau de transport d'énergie électrique comme pour la distribution et surtout que les distributeurs ont toujours les yeux sur l'un des paramètres considérés comme objectifs vis-à-vis de leurs clientèle c'est la qualité de service dans ce sens la présentations des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, en termes de réduction de la probabilité de défaillance ou de dégradation du service et d'amélioration de l'espérance de vie du transformateur est devenue une nécessité . A cet effet Plusieurs modèles de transformateurs sont également développés ainsi que la méthode de diagnostic utilisée, laquelle est basée sur la technique d'analyse fréquentielle FRA.

Le modèle que nous avons jugé le plus adéquat pour notre étude est celui basé sur les inductances propres et mutuelles, car il permet de traduire les différents phénomènes qui se produisent le long des enroulements du transformateur. Ce modèle permettra de modéliser les transformateurs de grande puissance et d'étudier leurs comportements internes (le gradient de tension, les fréquences de résonance…). Cependant, il est important de trouver les bonnes procédures qui permettront le calcul des paramètres du modèle afin d'avoir une bonne précision dans les résultats.

La méthode choisie a donné des résultats par l'utilisation du MATLAB qui sont exploitées par la suite pour aboutir aux conclusions suivantes :

- Les défauts de court-circuit entre spires, se manifestent par des pics de résonance avec déplacement de ces pics en fonction des défauts le long de l'enroulement, ainsi par la diminution de la valeur de la résistance équivalente
- Les défauts liés aux ouvertures ou aux coupures de spires de l'enroulement apparaissent comme des perturbations sur la réponse en gain même aux faibles fréquences, ces perturbations sont importantes.
- Les courbes de réponse fréquentielle donne une approche très réduite sur la manifestation des enroulements d'un transformateurs pour éviter tous risques de pannes.

Et comme perspectives pour ce travail, nous suggérons les points suivants :

- Propositions des thèmes pour d'autre défauts (mécanique, thermique, électrique ainsi que chimique) .
- Réalisation d'un système sans fil (par le biais des adresses IP ou des réseaux de télécommunication sans fil), adopté par des logiciels utilisent des méthodes de diagnostique des défauts des transformateurs pour faciliter l'opération de détection, défaut de maintenance et d'intervention.

Bibliographie

[1] YAHIOU Abdeghani, « contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : cas du courant d'appel », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Sétif. Avril 2012.

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

[3] Professeur luc lasne, « exercice et problèmes d'électrotechnique notion de bases et machines électrique ».

[4] Emmanuel Sander, « la logique floue entre raisonnement humain et intelligence artificielle » Mémoire de FCS2-Raisonnement, paris Janvier 2011.

[5] Jean Sanchez, « Aide au diagnostic des défauts des transformateurs de puissance » université Grenoble alpes, 2011.

[6] Saliha Boudraa, « Analyse des gaz dissous les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, université de Batna.2005

[7] Emmanuel Sander, « la logique floue entre raisonnement humain et intelligence artificielle » Mémoire de FCS2-Raisonnement, paris Janvier 2011.

[8] Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».

[9] Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».

[10] Mr ZELLAGUI Mohamed, « Etude protection des réseaux électriques mt 30& 10 kv », mémoire de magister université de Constantine. Juillet 2010.

[11] Groupe Schneider « cahier technique n° 192 protection de transformateur MT/BT.

[12] Mme Benaicha Halima, « Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle », thèse de doctorat département d'Electrotechnique, option Réseau Electriques, université des sciences de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 2015

[13] BOUCHAOUI Lahcene, « Diagnostic des transformateurs de puissance par la méthode d'analyse des gaz dissous : application des réseaux de neurones », Mémoire de magister département d'Electrotechnique, université de Sétif. 2010

[14] Bernard Hochart, « transformateur de puissance » livre 2eme edition.1988

[15] BOUCHAOUI Lahcene, « Diagnostic des transformateurs de puissance par la méthode d'analyse des gaz dissous : application des réseaux de neurones », Mémoire de magister département d'Electrotechnique, université de Sétif. 2010

[16] IEEE Std C57.104-1991- revision of IEEE C57.104-1978 "Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers".

[17] IEEE Electrical Insulation Magazine, A review of faults Detectable by gas-in-oil analysis in transformers.

[18] Emmanuel Sander, « la logique floue entre raisonnement humain et intelligence artificielle » Mémoire de FCS2-Raisonnement, paris Janvier 2011.

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

[20] M.jose Ignacio ANGUS GOMES, Mlle Ana AZNAR BLANES « Technique de diagnostic des

transformateur de puissance », Formation sur le diagnostic des transformateurs, Ayant lieu à EL-HAMMA, Du 27/10 au 29/10/2007.

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

[22] OMICRON electronics « FRAnalyzer Manuel d‟utilisation »Référence -VESD0662 Version du manuel : FRA.FR.1, 2006.

[23] Megger « FRAX 101 Analyseur de réponse de la fréquence de balayage », FRAX101_DS_fr_V01.

[24] A.O.Soysal, A. Semlyen, "Practical transfer fonction estimation and its application to wide frequency range représentation of transformers", paper N° 92 SM 358-2 PWRD, presented at the 1992 EEEE/PES Summer Meeting.

[25] B. Heller, A. Veverka, "Les phénomènes de chocs dans les machines électriques", Ed. Dunod, Paris, 1963.

[26] Q. Su, R. E. James, D. Sutanto, "A Z-transform model of transformer a for the study of electromagnetic transients in power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, N°l, February 1990, pp. 27-33.

[27] A. Keyhani, S. W. Chua, S. A. Sebo, "Maximum likelihood estimation of transformer high frequency parameters from test data", EEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, N°2, April 1991, pp. 858-865.

[28] H. W.Dommed, "EMTP Theory Book", Bonneville, 1986.

[29] L. Hennebique, C. Flurasu, "Resel: programme conversationel pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques", EDF, Bulletin de la Direction des Edudes et Recherches, Série B, N°l, 1987, pp. 25-33.

[30] D. J. Wtlcox, M. Conlon, W. G. Hurley, "Calculation of self and mutual impédances for coils on ferromagnetic cores", IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. A, N°7, September 1988, pp. 470-476.

[31] Saroja Kanti Sahoo, S. Gopalakrishna,‟ Winding Deformation Analysis in Power Transformers using finite Element Method‟, IEEE Proceeding of the Students' Technology Symposium,pp 341- 346, 2014

[32] P. G, McLAREN, H, ORAEE, "Multiconductor transmission line model for the line-end coil of large AC machine", Proc. IEE, Vol. 132, Pt. B, N°3, May 1985, pp. 149-156.

[33] P.T.M. Vaessen, Transformer model for high frequencies, IEEE Trans. Power Deliv. 7 (January (1)) (1992) 361–369.

[34] Lin-Chuan Tsai,‟ design of triple-band impedance transformers using Z-transform techniques, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, pp 559-561, 2016

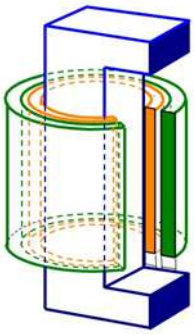
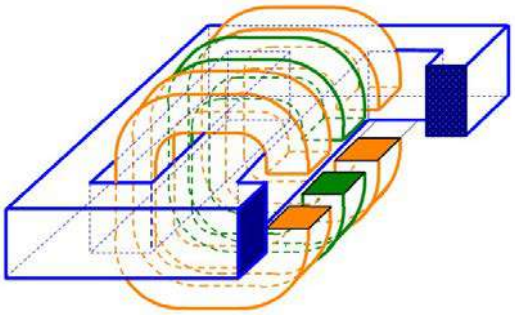
[35] F. de Leon, A. Semlyen,‟ Reduced order model for transformer transients‟, IEEE Trans. Power Deliv. 8 (July (3)) (1993) 1615–1626

[36] D.M. Sofian, Z.D. Wang, P. Jarman,‟ Interpretation of transformer fra measurement results using winding equivalent circuit modeling technique, in: Proceedings of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2005), Nashville, TN, 16–19, October 2005, pp. 613–616.

[37] P. Mukherjee, L. Satish, „Construction of equivalent circuit of a transformer winding from driving-point impedance function – analytical approach‟, IET Electr. Power Appl., 2012, 6, pp. 172–180

Enroulements : colonne, cuirassé

Deux technologies principales de constructions de la partie active existent : colonne et cuirassé.

	
Technologie colonne	**Technologie cuirassée**

La technologie colonne est constituée de bobinages de forme cylindrique qui entourent les noyaux du circuit magnétique. Les enroulements haute tension et basse tension sont imbriqués l'un dans l'autre.

A fonctions équivalentes il existe une seconde manière de réaliser les enroulements pour obtenir un transformateur de puissance, c'est la technologie cuirassée.

La technologie cuirassée est composée d'enroulements haute tension et basse tension superposés en galettes qui sont entourées par le circuit magnétique.

La technologie colonne est particulièrement répandue, et comparativement à la technologie cuirassé est plus simple à réaliser, est mieux refroidie de par un passage de l'huile naturellement aisé le long des colonnes, mais tient plus de place et tient moins bien les courts circuits à puissance équivalente.

La construction mécanique des deux technologies est vraiment différente. Cependant à puissance équivalente le choix d'une technologie particulière se décidera sur des critères technicoéconomiques.



Caractéristiques d'un transformateur de puissance

- ✓ **Caractéristiques principales**

Pour les transformateurs neufs les différents chapitres de la norme internationale IEC 60076 spécifient les garanties techniques principales que doivent respecter les fabricants de transformateurs par rapport au cahier des charges initial.

Ces normes sont très utilisées et reproduites intégralement dans de nombreuses normes nationales dans le monde, dont la France.

- ✓ **Puissance assignée**

Valeur conventionnelle de la puissance apparente électrique (en kVA ou en MVA) prévue pour transiter à travers un transformateur.

La puissance apparente est définie par le produit de la tension par le courant en courant alternatif :

$$S(VA) = U_{eff}(V) \times I_{eff}(A) \quad \textbf{(1)}$$

S : puissance apparente en Voltampères (VA)

Ueff : tension alternative efficace en Volts (V)

Ieff : courant alternatif efficace en Ampères (A)

Un transformateur transmet la puissance électrique apparente d'un réseau d'une tension donnée à un autre réseau à une tension différente, aux pertes près.

La raison d'être principale du transformateur est le transport de la puissance électrique de la centrale de production jusqu'à l'utilisateur, souvent sur de grandes distances, avec un minimum de pertes joules. Lorsqu'un courant parcourt un conducteur électrique, comme un câble haute tension, celui-ci est le siège de pertes joules définies comme suit :

$$P_{joule}(W) = R(\Omega) \times I^2(A) \quad \textbf{(2)}$$

P_{joule} : pertes joules par échauffement dans le conducteur en Watts

(W) R : résistance électrique du conducteur en Ohms (Ω)

I : intensité du courant dans le conducteur en Ampères (A)

Ces pertes joules croissent au carré de l'intensité traversante, et constituent environ 80% des pertes du réseau français (QUIQUEMPOIX, FLISCOUNAKIS, & BOURGADE, 2004).

Afin de transporter l'énergie électrique en minimisant ces pertes joules on transforme avec un transformateur, à puissance constante, un système de courant et tension, en un second de courant plus faible et de tension plus élevée.

- ✓ **Pertes**

Les pertes dans un transformateur sont mesurées lors de ces essais de réception en usine et sont distinguées comme suit :

- ➢ **Les pertes à vide**

Ce sont les pertes dans le circuit magnétique dues au courant magnétisant lui même fonction de la tension d'alimentation. Ces pertes peuvent être séparées en pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Ces pertes sont permanentes tant que le transformateur est sous tension.

Une augmentation de ces pertes à vide peut révéler un entrefer trop important dans le circuit magnétique ou des courts-circuits notables sur une colonne particulière.

- ➢ **Les pertes en charge**

Ce sont les pertes dans les résistances des enroulements primaires et secondaires dues à la charge et au courant magnétisant (à vide) du transformateur. Elles sont mesurées en usine en mettant classiquement les enroulements basse tension en court-circuit.

- ➢ **Les pertes supplémentaires**

Ce sont les pertes par courant de Foucault induits dans différents éléments de construction du transformateur.

Le rendement des transformateurs de puissance est défini par le rapport de la puissance utile fournie au secondaire sur la puissance fournie au primaire du transformateur, l'écart entre ces deux puissances étant les pertes propres du transformateur. Il est à noter que plus les transformateurs sont puissants, plus leur rendement est élevé, pouvant dépasser 99 % ! Ce qui fait des pertes allant jusqu'à quelques MW sur des transformateurs élévateurs de sortie de centrale de plusieurs centaines de MVA…

- ✓ **Tensions assignées**

Ce sont les tensions spécifiées pour être appliquées ou développées à vide entre les bornes de ligne des enroulements d'un transformateur.

Ces tensions sont en relation avec la tension des réseaux auquel le transformateur est connecté.

En France les principaux réseaux haute tension, auxquels sont connectés les transformateurs de puissance, ont les niveaux suivants : 400 kV, 220 kV, 90 kV, 63 kV et 20 kV.

Les transformateurs seront donc les principaux éléments de liaisons entre deux réseaux et devront être isolés en conséquence selon les niveaux de tensions considérés. Les transformateurs ayant le 20 kV comme haute tension sont souvent des transformateurs de distribution, ou des transformateurs industriels spéciaux.

Afin de diminuer encore plus les pertes joules dues au transport d'électricité plusieurs pays très étendus géographiquement ont adoptés des niveaux de tension AC allant jusqu'à 800 kV (Chine, Brésil, Russie, Canada…) et des projets futurs prévoient des tensions nominales jusqu'à 1200 kV AC.

- ✓ **Niveaux d'isolement (des enroulements)**

Le niveau d'isolement est l'ensemble des valeurs des tensions qui caractérisent l'isolement de chacun des enroulements d'un transformateur.

En plus de la tenue diélectrique à la tension nominale, les transformateurs neufs doivent respecter des niveaux de contraintes d'isolements normatifs tels que des valeurs de tenue en tension à fréquence industrielle (IEC 60076-3, 2000) ou à des essais de chocs de foudre et/ou de manœuvres (IEC 60076-4, 2002).

- ✓ **Isolants**

Les principaux isolants internes qui permettent de tenir les niveaux d'isolements spécifiés sont :

- ➢ **Le papier**, en isolation solide, directement sur les brins élémentaires des conducteurs. Il existe quelques alternatives au papier Kraft principalement utilisé comme le papier à performances thermiques améliorées ou les isolants de type Nomex.
- ➢ **L'huile**, très souvent minérale, en isolation liquide.

- ✓ **Fréquence**

Les fréquences usuelles sont 50 Hz, comme en France, ou 60 Hz. Il a existé des systèmes en 16 ⅔ Hz pour des réseaux ferroviaires notamment. Un transformateur est calculé généralement pour une fréquence donnée. Les transformateurs ayant les plus basses fréquences sont généralement plus imposants pour une puissance donnée, et peuvent être

utilisés à des fréquences plus élevées ; l'inverse n'étant pas vrai. Dans ce cas l'induction dans le circuit magnétique dépasserait l'induction nominale et risquerait de saturer le circuit magnétique et générer des courants harmoniques élevés.

- ✓ **Nombre de phases**

Les transformateurs de puissance sont très souvent des appareils triphasés ou monophasés. Il existe des montages de bancs triphasés composés de trois appareils monophasés.

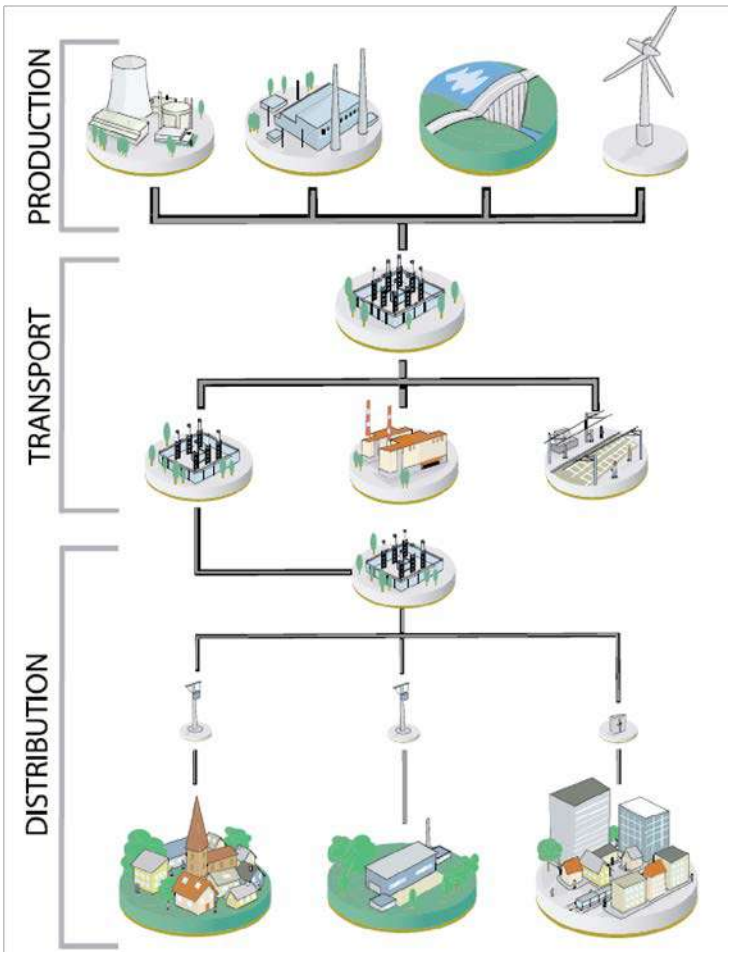
Les transformateurs comportant d'autres systèmes polyphasés sont souvent réalisés pour des applications particulières comme l'alimentation de redresseurs dans certaines industries. Il existe alors des configurations allant jusqu'à des systèmes dodécaphasés, et de plus anciennes comportant des systèmes triphasé/diphasé (Scott-Leblanc).

Contextes d'utilisation

Le réseau électrique

L'énergie électrique est transmise des sources aux utilisateurs, industriels ou domestiques, à travers un réseau électrique comprenant différents niveaux de tensions et donc de nombreux transformateurs, des lignes et des disjoncteurs.

Le réseau est classiquement découpé en trois parties principales : la production, le transport et la distribution d'électricité.



Réseau électrique type

Principes et construction

Normes sur les transformateurs

« La Commission Électrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées. Celles-ci servent de base à la normalisation nationale et de références lorsqu'il s'agit de rédiger des soumissions et des contrats internationaux. » Source : www.iec.ch

ANNEXE

IEC est l'acronyme anglais de la CEI.

Les normes représentent un consensus de plusieurs groupes d'experts sur un domaine donné. Elles servent généralement de base technique établie aux spécificateurs et aux constructeurs pour garantir certaines caractéristiques lors de la réalisation de matériels. Des normes peuvent avoir aussi des critères de recommandation sur l'utilisation de certains matériels.

Ce mémoire fera principalement référence aux normes IEC qui sont relativement reconnues mondialement, ou aux normes américaines IEEE qui couvrent aussi de très nombreux sujets relatifs aux transformateurs.

Pour les transformateurs neufs la norme IEC 60076, avec ses différents chapitres, est particulièrement répandue. Elle préconise de nombreux critères, comme des garanties : de tenue à certains essais contraignants, sur l'isolement interne ou sur les pertes en charge par rapport au cahier des charges initial du client.

D'autres normes existent sur les transformateurs de puissance comme les normes anglaises BS, les normes indiennes IS, les normes chinoises GB, etc. Les normes françaises NF, ou européennes EN, sont aujourd'hui, pour les transformateurs de puissance, pratiquement toutes des copies conformes des normes IEC concernées.

Politique de maintenance

- **Maintenance : définition**

« Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. » norme (NF EN 13306 X60-319, juin 2001)

La maintenance est déclinable en deux approches :

- ✓ Préventive : qui sera déclinée en une maintenance systématique ou conditionnelle
- ✓ Corrective : qui sera appliquée d'urgence ou en différé

- **Maintenance : application au transformateur**

Selon l'exploitation plus ou moins intensive du transformateur et sa criticité, l'espacement des actions de maintenance préventive variera dans le temps. Les actions réalisées, ainsi que leur fréquence, seront le résultat d'une politique de maintenance définie par l'exploitant. Un premier guide international relativement complet sur le sujet a été publié cette année (CIGRE TB 445, 2011). Il est possible que tout, ou partie, de ces actions soient sous-traitées à des entreprises spécialisées.

La tendance dans les politiques de maintenance des parcs de transformateurs évolue plutôt d'une maintenance systématique sur tous les appareils, à intervalles réguliers, vers une maintenance conditionnelle afin d'optimiser les coûts. Dans ce cas, il est nécessaire d'établir l'état d'un appareil, principalement par le suivi des analyses d'huile ou des conditions d'exploitation, avant d'engager des opérations, un entretien ou une réparation de celui-ci.

Les principales opérations de maintenance préventive sont :

- le prélèvement d'huile, son analyse et son suivi dans le temps ;
- le changement de joints (fuyards), ou de traversées ; □l'adaptation d'une nouvelle réfrigération ; □le resserrage de la partie active.

Les principales opérations de maintenance corrective suite à une avarie sont :

- le diagnostic après incident pour cibler l'état précis du transformateur ;
- le remplacement d'accessoires ;
- la réparation du matériel ;
- le traitement voire le remplacement d'huile selon les défauts engendrés ; ou
- l'achat d'un transformateur neuf.

La connaissance des opérations passées de maintenance, ou réparation, effectuées sur un appareil peuvent faciliter le diagnostic en expliquant ou excluant certaines faiblesses.

Du fait de leur bonne fiabilité dans le temps, il arrive parfois que les transformateurs finissent par être négligés, en surestimant leur durée de vie, et ils ne sont pas nécessairement pleinement pris en compte dans certaines politiques de gestion des risques.

Cependant certains articles réalisant des études plus locales confirment ces ordres de grandeur. Par exemple sur un échantillon de 188 transformateurs sud africains jusqu'à 765 kV (MINHAS, REYDNERS, & DE KLERK, 1999), la principale cause de défaillance est le vieillissement des appareils, ce qui implique généralement les enroulements, ensuite viennent les régleurs.

☐Taux de défaillance

Toujours selon cette étude de référence (CIGRE, 1983) les défaillances entraînant un arrêt prolongé des transformateurs de puissance dans le monde sont de l'ordre de 2 % sur la totalité des appareils en fonctionnement sur les réseaux considérés.

Sur le réseau de transport français, entre 1990 et 2004 le taux de défaillances sérieuses était de 0,61 % (BLANC, et al., 2008). Sur la même période le taux de défaillance moyen dû à des anomalies ayant entraîné un arrêt du transformateur était de 4,6 %. Dans cette même étude, une courbe en baignoire du taux de défaillance en fonction de l'âge des transformateurs est présentée.

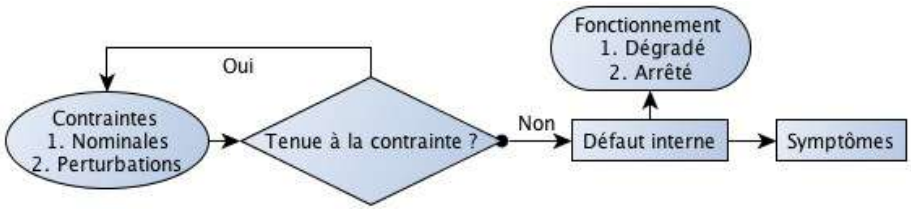
Contraintes et défauts associés

Définitions

- ✓ **Contrainte** : tout transformateur est dimensionné pour tenir un certain nombre de contraintes (mécaniques, diélectriques, thermiques) nominales et dues à des perturbations (choc de foudre, court-circuit, etc.) de différentes ampleurs, qui reflètent partiellement les conditions d'exploitation. La tenue aux niveaux de contraintes est précisée dans les normes référées dans le cahier des charges, ou font l'objet d'un accord avec le constructeur. Les essais de réception valident la tenue aux contraintes définies dans le cahier des charges en sortie d'usine.

  Certaines de ces contraintes en service pourront être à l'origine de défauts, ou impacter la durée de vie d'un transformateur.
- ✓ **Défaut** : modification accidentelle affectant un fonctionnement normal. Dans ce mémoire un défaut sera vu comme un problème physique interne identifiable visuellement par un expert, lors d'un accès à la partie active, pouvant arrêter ou ayant arrêté le fonctionnement normal de l'appareil.

- ✓ **Symptôme** : signe révélateur d'une situation matérielle. Dans ce mémoire un défaut interne donné générera un ou plusieurs symptômes. Les symptômes pourront être mis en évidence suite à l'analyse des informations disponibles.



Principe du mécanisme de défaut

Comme résumé sur un défaut sera ici le résultat d'une contrainte qui n'a pas pu être contenue. Tout défaut se manifestera par des symptômes que l'on essaiera de qualifier par différentes informations et moyens de mesure.