

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Metalbi Fethi

&

Bouhallab Hadj

pour l'obtention du diplôme de master en électrotechnique option machine électrique

---

Thème

---

# Diagnostic et localisation des défauts dans les enroulements du Transformateur

---

Proposé par : Houassine hamza & Belazzoug messaoud

Année Universitaire 2011-2012



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A l'âme du défunt de mon cher père, à ma très chère mère ;  
qu'ils trouvent ici un témoignage de toute ma reconnaissance et mon  
affection ;*

*A tous ceux qui portent le nom METALBI,  
A mes frères : Mohamed , Abdelkader, Miloud, Ahmed, Ali et Saïd et à  
mes*

*sœurs : Zohra, Khira, fatma et Arbía  
et spécialement*

*A mon cousin Abdelkader Metalbí*

*A tous mes amis, surtout Hadj, Brahim , Mohamed et Mohamed  
lahwel et Aziz pour ces moments de joie au lycée, ainsi qu'à toute ma  
classe de terminale sans exception, A mes amis à tous les Rouïbistes de  
la promo, à mes amis à Lotissement Youcef, Khíro, Mohammed et  
Otman*

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

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

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

*Metalbí Fethi*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A l'âme du défunt de mon cher père, à ma très chère mère ;  
qu'ils trouvent ici un témoignage de toute ma reconnaissance et mon  
affection ;*

*A tous ceux qui portent le nom BOUHALLAB  
A mes frères : Noureddine, Mouloud, Youcef, et Hamza et à mes  
sœurs : Houria et Louiza  
et spécialement a  
Mohamed, Ishak et Ayoub*

*A tous mes amis, surtout Fethi, Brahim, Chrif, Iadjali et Mohamed  
pour ces moments de joie au lycée, ainsi qu'à toute ma classe de  
terminale sans exception, A mes amis à tous les Rouibistes de la  
promo, à tous mes amis à Boudjare Domaine N : 12  
Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation,  
depuis le  
primaire à ce jour, en particulier mon promoteur : HOUASSINE  
HAMZA*

*A l'ensemble des étudiants de ma promotion, particulièrement ceux  
d'électrotechniques*

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

**HADJ BOUHALLAB**

# **SOMMAIRE**

|   |    |
|---|----|
| <b>Introduction générale</b> .....                      | 1  |
| <b>Chapitre I : Généralités sur les Transformateurs</b> |    |
| Introduction .....                                      | 3  |
| I.1 Le rôle d'un transformateur .....                   | 3  |
| I.2 Principe de fonctionnement .....                    | 3  |
| I.2.1 Transformateur parfait ou idéal .....             | 3  |
| I.3 Description d'un transformateur .....               | 4  |
| a- Le circuit magnétique .....                          | 4  |
| b- Les enroulements .....                               | 5  |
| I.4 Les transformatrices hautes tensions .....          | 5  |
| I.4.1 Transformateur à colonnes.....                    | 5  |
| a- Les Bobinages.....                                   | 6  |
| b- Le Circuit Magnétique.....                           | 8  |
| c- Le Couplage.....                                     | 8  |
| d-Limitations des Transformateurs à Colonnes.....       | 10 |
| I.4.2 Transformateur Cuirassé.....                      | 10 |
| a- Les Bobinages.....                                   | 11 |
| b- La Cuve.....   | 11 |
| c- Les Écrans Electrostatique.....                      | 12 |
| I.4.3 Transformateur en "double T".....                 | 12 |
| a- Les Bobinages.....                                   | 13 |

|  |    |
|--|----|
| b- Le Circuit Magnétique.....                              | 13 |
| I.4.4 Autres Transformateurs.....                          | 14 |
| I.5 L'isolation dans les transformateurs de puissance..... | 14 |
| I.5.1 Isolation Cellulosique.....                          | 14 |
| I.5.2 Isolation liquide.....                               | 15 |
| I.6 Pertes dans le Transformateur.....                     | 15 |
| I.6.1 Les pertes par effet Joule.....                      | 15 |
| I.6.2 Les pertes magnétiques.....                          | 16 |
| I.6.3 Mesures des pertes.....                              | 16 |
| conclusion.....  | 16 |

## **Chapitre II : technique de diagnostique de l'enroulement de Transformateur**

|   |    |
|---|----|
| Introduction .....  | 17 |
| II.1 Définition.....  | 17 |
| II. Constitution générale d'un transformateur.....                  | 17 |
| II.3 Les techniques de diagnostic.....                              | 18 |
| II.3.1 Analyse d' huile.....  | 18 |
| II.3.1.1 Les analyses physico-chimique.....                         | 19 |
| II.3.2 Analyse des furanes .....                                    | 22 |
| II.3.3 Analyse des gaz dissous dans l'huile .....                   | 22 |
| II.3.3.1 Formation de gaz dissous dans l'huile lors de défaut ..... | 22 |
| II.3.3.2 Méthodes d'interprétation des résultats .....              | 23 |
| II.3.4 Mesures diélectriques .....                                  | 30 |
| II.3.4.1 Mesure du facteur de puissances et de la capacité .....    | 31 |
| II.3.4.2 Mesure de résistance d'isolement en courant continue ..... | 33 |
| II.3.4.3 Type d'essais par FRA.....                                 | 35 |

|   |    |
|---|----|
| II.3.5 Mesures électriques .....                      | 37 |
| II.3.5.1 Mesure du courant d'excitation .....         | 37 |
| II.3.5.2 Mesure de rapport de transformation .....    | 38 |
| II.3.5.3 Mesure de la résistance d'enroulements ..... | 38 |
| II.3.5.4 Mesure de la réactance de fuite .....        | 39 |
| Conclusion .....                                      | 39 |

### **Chapitre 3 : Etude et modélisation d'enroulement**

|   |    |
|---|----|
| Introduction .....  | 41 |
| III.1 Les modèles mathématiques .....   | 41 |
| III.1.1 Le modèle universel EMTP .....  | 41 |
| III.1.2 Le modèle RESEL .....   | 43 |
| III.1.3 Modélisation basée sur les inductances de fuites .....                  | 44 |
| III.1.4 Modèle issu du principe de la dualité magnétique-électrique.....        | 45 |
| III.1.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles (modèle adopté) ..... | 47 |
| Conclusion.....   | 49 |

### **Chapitre IV : Localisation des défauts dans les enroulements de transformateur de puissance**

|   |    |
|---|----|
| Introduction .....  | 50 |
| IV.1 Modèle adopté pour l'enroulement transformateur.....                           | 50 |
| IV.2 Equations du schéma équivalent adopté .....                                    | 51 |
| IV.2.1 Equations des tensions .....   | 51 |
| IV.2.2 Equations des courants .....   | 52 |
| IV.2.3 Représentation matricielle des équations du modèle .....                     | 53 |
| IV.3 Caractéristiques électriques et géométriques des transformateurs étudiés ..... | 54 |
| IV.4 Synthétisation du circuit de référence .....                                   | 54 |
| IV.5 Calcul des paramètres du modèle adopté .....                                   | 55 |
| IV.5.1 Détermination des paramètres du schéma équivalent .....                      | 55 |
| IV.6 Validation du modèle à paramètres calculés .....                               | 57 |
| IV.7 Les Algorithmes Génétiques .....   | 58 |
| IV.8 Validation de modèle a paramètre à partir de l'algorithme génétique .....      | 60 |
| IV.9 Localisation des défauts de long de l'enroulement.....                         | 61 |
| IV.9.1 les différents défauts étudiés .....   | 61 |
| IV.9.2 études la réponse fréquentielle de l'impédance.....                          | 61 |

|  |    |
|--|----|
| IV.9.2.1 Défauts entre spires .....                        | 61 |
| a-court-circuit entre les spires.....                      | 62 |
| b-Ouverture de spires.....                                 | 63 |
| c-Variation de capacité (dégradation de l'isolement) ..... | 66 |
| Conclusion .....   | 69 |
| Conclusion générale.....                                   | 70 |
| Bibliographie  |    |



## المخلص

هذا العمل هو دراسة استجابة تردد للفتات محولات الكهرباء، و هذا نموذج يعكس السلوك الكهرومغناطيسي من لفائف المحولات تم اعتماده و استغلاله ثم لمنهجه التشخيصي على المحولات معتمدا على ذلك 10 اقراص، كل قرص يحتوي على 20 لفة ذو قطر متوسط 200 ملم، أعطت نتائج مرضية مقارنة مع النتائج التي تم الحصول عليها في المراجع.

مفتاح الكلمات: المحولات، التشخيص، تحليل الترددات و الصيانة الافتراضي.

## Résumé

Ce travail est une étude et modélisation d'un enroulement du transformateur en vue de son diagnostic. et cette enroulement discrétise en 10 disque chaque disque 20 tour de 200 mm. Les paramètres du model adapte sont calculer pour deux approche et validé avec des résultats expérimentaux bibliographique.

Afin d'étudier les défaillances le long de l'enroulement des défauts ont été appliqués et analysés.

Mot clés : Transformateur, Diagnostic, Analyse fréquentiel.

## Summary

This work is a study of the frequency response of the power transformers windings, a model reflecting the electromagnetic behavior our transformer was adopted and then exploited for its diagnostic. The method was applied to a transformer winding of 10 discs; each disc contains 20 rounds of 200 mm average diameter.

The results has satisfactory was compared to results obtained in the bibliography. Key words: transformer, diagnosis, frequency analysis.

## Listes des acronymes et abréviations

$U_0$  : La tension appliquée à l'entrée

$I_0$  : Le courant appliqué à l'entrée

$r_g$  : La résistance interne de générateur

$\omega$  : La pulsation

$L_s$  : Les inductances propres

$M$  : Les inductances mutuelles

$N$  : Nombre des cellules

$C_s$  : Capacité longitudinale

$C_g$  : Capacité transversale

$k$  : Matrice des capacités

$L$  : Matrice des inductances

$R_{dc}$  : Résistance mesurée au continu

$\alpha$  : Constante de distribution initiale de la tension

$L_{eq}$  : L'inductance équivalente

$C_{g\,eff}$  : La capacité au sol

$ocnf$  : Fréquence normale en circuit-ouvert

$scnf$  : Fréquence normale en court-circuit

$AG$  : Algorithme génétique



# INTRODUCTION GENERALE

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminiez l'énergie électrique de centrale de production vers le consommateur d'électricité.

Pour avoir une bonne qualité de l'énergie chez le consommateur il faut minimiser le perte par augmentation et diminution de tension et de courant, pour cela on utilise les transformateurs.

Les transformateurs sont des machines électriques statiques pour élever et abaisser la tension et le courant. Le transformateur comme les autres machines électriques peut présenter des défaillances à cause de facteurs internes et des facteurs externes.

Afin de réduire la possibilité de défaillance ou de dégradation de rendement, par conséquent augmenter la longévité du transformateur, les exploitants des réseaux électriques utilisent des méthodes de diagnostic et de prédiction d'avaries pour la surveillance permanente du transformateur et le suivi de l'évolution des défauts des leurs premiers signes d'apparition, par la suite préconiser les actions correctives.

L'objectif de ce travail est d'adopter un modèle qui représente le mieux le comportement de l'enroulement du transformateur en vue de son diagnostic.

Afin de cerne la problématique posée nous avons subdivisé notre mémoire comme suit :

Le premier chapitre consiste en une étude générale du transformateur de puissance.

L'étude des différentes méthodes de diagnostic utilisées dans le domaine de maintenance des transformateurs on fait l'objet du deuxième chapitre.

L'étude et la simulation de comportement d'un dispositif électrotechnique nécessite un modèle mathématique régissant les phénomènes existant dans ce dernier, le troisième chapitre est consacré aux différents modèles mathématiques du transformateur (schéma équivalent) existant dans littérature.

Après avoir adopté le modèle jugé plus approprié pour notre objectif. Le dernier chapitre porte sur identification des paramètres de ce modèle adopté par deux approches

## Introduction Générale

---

différentes, et puis sa validation par comparaison avec des résultats obtenus par l'auteur [24] et enfin son exploitation pour le diagnostic de défaut dans un enroulement de transformateur.

Nous terminons notre mémoire par en conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus au cours de cette étude.

# Liste des figures

## Chapitre I

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig.I.1</b> : Transformateur à colonnes à flux forcé. [2] .....  | 6  |
| <b>Fig.I.2</b> : Transformateur cuirassé. [2] .....                 | 10 |
| <b>Fig.I.3</b> : constitution de Transformateur cuirassé. [2] ..... | 11 |
| <b>Fig.I.4</b> : Transformateur Tt11. [2] .....                     | 12 |

## Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| <b>FigII.1</b> Transformateur à Cuve à Radiateur. ....  | 18 |
| <b>FigII.2</b> : Triangle du Duval. [12] .....  | 30 |
| <b>FigII.3</b> : Schéma de capacité de d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements ..... | 31 |
| <b>FigII.4</b> : Schéma d'une borne de type capacitif. ....                                   | 32 |
| <b>FigII.5</b> : Essai entre extrémités. ....   | 35 |
| <b>Fig.II.6</b> : Essai en court-circuit .....  | 36 |
| <b>FigII.7</b> : Essai capacitif entre enroulements. ....                                     | 36 |
| <b>FigII.8</b> : Essai inductif entre enroulements. ....                                      | 37 |

## Chapitre III

|  |    |
|--|----|
| <b>FigIII.1</b> : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP. [20]..... | 42 |
| <b>FigIII.2</b> : Modélisation d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP [20].....        | 42 |

**FigIII.3:** Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL [20].....44

**FigIII.4:** Modèle d'un transformateur basé sur la dualité magnétique-électrique [20].....46

**FigIII.5:** modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié.....47

## **Chapitre VI**

**FigIV.1 :** Schéma équivalent d'un bobinage de transformateur [22] .....51

**FigIV.2 :** schéma de référence. [24] .....54

**FigIV.3 :** La variation de l'impédance en fonction de la fréquence. [24] .....55

**FigIV.4 :** Calcul des inductances propres et mutuelles. [2] .....56

**FigIV.5 :** schéma de l'enroulement obtenu par calcul.....57

**FigIV.6:** La variation de l'impédance en fonction de la fréquence. ....57

**FigureIV.7 :** le vocabulaire des algorithmes génétiques. ....58

**FigIV.8** Schéma de l'enroulement identifié par L'AG .....60

**FigIV.9 :** schéma de l'enroulement obtenu par L'AG. ....60

**FigIV.10 :** Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre les 2 éléments 1 et 2 et un enroulement sain.....62

**Fig. IV .11:** les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit entre élément et celle de l'enroulement sain.....63

**FigIV.12 :** comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 1<sup>er</sup> élément et un enroulement sain.....63

**FigIV.13:** Comparaison des empreintes des enroulements affectés par ouvertures de circuit et celle d'un enroulement sain. ....64

**FigIV.14 :** comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une augmentation de capacité longitudinale ( $C_S$ ) .....66

**FigIV.15** : comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une augmentation de capacité transversale ( $C_g$ ) .....67

**FigIV.16** : représenté la comparaison entre transformateur sain et tous les défauts.....68



# Liste des tableaux

## Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau II.1:</b> Les gaz pour le diagnostic. [12] .....         | 23 |
| <b>Tableau II.2 :</b> Code de Rogers. [12].....                     | 24 |
| <b>Tableau II.3:</b> Interprétation de Rogers. [12].....            | 25 |
| <b>Tableau II.4 :</b> Interprétation de la CEI60599. [12].....      | 26 |
| <b>Tableau II.5 :</b> Exemples des Défaits typique.....             | 27 |
| <b>Tableau II.6:</b> Code pour les ratios de Doernenburg. [12]..... | 28 |
| <b>Tableau II.7 :</b> Interprétation de Doernenburg. [12].....      | 29 |
| <b>Tableau II.8 :</b> Domaine d'interprétation de PI.....           | 34 |

## Chapitre III

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau III.1:</b> Règles de passage pour la dualité magnétique-électrique. [20]..... | 46 |
|--|----|

## Chapitre VI

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.1 :</b> l'inductance propre et mutuelle de référence, Les valeurs en mH.....   | 54 |
| <b>Tableau IV.2 :</b> fréquences normale en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit (scnf).<br>[24] .....   | 55 |
| <b>Tableau IV.3 :</b> l'inductance propre et mutuelle calculées, Les valeurs en mH.....  | 56 |
| <b>Tableau IV.4 :</b> l'inductance propre et mutuelle obtenir par AG, Les valeurs en mH.....   | 59 |
| <b>Tableau IV.5 :</b> la comparaison des fréquences normale en circuit ouvert (ocnf) et celles en<br>court-circuit (scnf) de modèle de référence, mesuré et de modèle calculé et de L'AG ..... | 60 |
| <b>Tableau VI.6 :</b> Comparaisons entre l'enroulement sain et de c-circuit (1 et 2) éléments...   | 62 |
| <b>Tableau IV .7</b> Comparaison entre enroulement sain et de ouverture de 1er élément.....  | 64 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau IV.8</b> Comparaison entre enroulement sain et de ouverture de 1ère bobine<br>(l'impédance).....                                  | 65 |
| <b>Tableau IV.9</b> : comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une<br>augmentation des capacités ( $C_s$ ) ..... | 66 |
| <b>Tableau IV.10</b> : comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une<br>augmentation des capacités ( $C_g$ )..... | 67 |

## INTRODUCTION

Les centrales électrique étant souvent éloignée du consommateur, le rôle du transformateur, élément essentiel de ce réseau électrique est d'acheminer l'énergie électrique de son point de production jusqu'à son point de consommation.

Les anomalies des transformateurs sont de déférentes catégories (internes, externes).

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

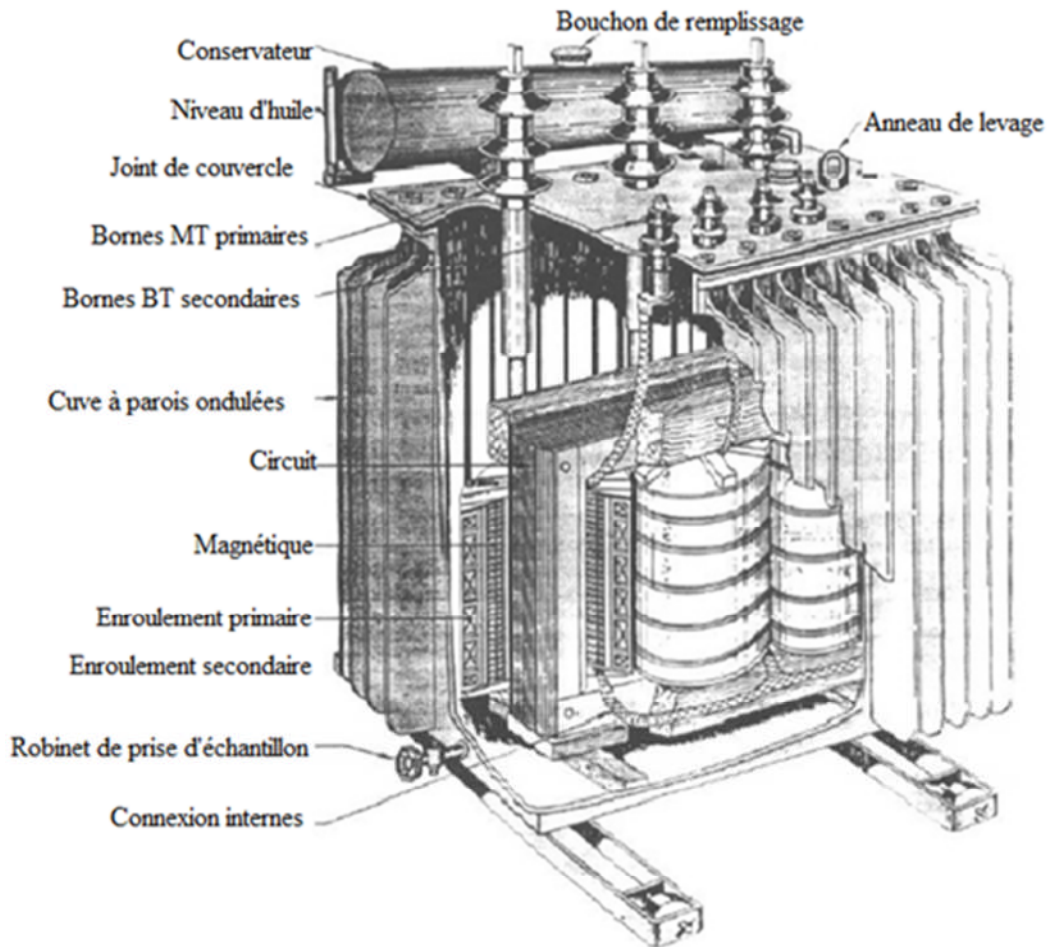
Dans ce qui suit une étude théorique détaillée de transformateur ainsi que les contraintes et les moyens de protection seront présentées.

### II.1.Définition

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitude généralement différentes a fin de l'adapte aux différent besoins d'utilisation

### II.2.Constitution générale d'un transformateur

Le transformateur de puissance figure II.1 se compose essentiellement d'un circuit magnétique et circuit électrique



**Figure II.1** Transformateur à Cuve à Radiateur

## II.3 Les techniques de diagnostic

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

### II.3.1 Analyse d'huile

Le fonctionnement dans de bonnes conditions des transformateurs, dépend dans une large mesure de la qualité des huiles minérales isolantes utilisées.

Les caractéristiques des huiles se dégradent par l'effet de la contamination, de l'humidité et du vieillissement. L'huile isolante est l'un des éléments les plus importants dans

un transformateur qui nécessite une surveillance et un entretien car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci. L'huile est un fluide qui pénètre dans toutes les parties internes du transformateur, sa circulation permet l'évacuation de la chaleur produite par les enroulements, par convection à travers la cuve du transformateur. [5]

La connaissance de l'état de l'huile et des gaz qui peuvent être dilués dans ce dernier est d'une importance fondamentale pour assurer un bon fonctionnement des transformateurs, il est par conséquent nécessaire d'effectuer une vérification régulière de l'état de l'huile [6].

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

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

### II.3.1.1 Les analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont pour but de déterminer la tenue diélectrique de l'huile et son état d'oxydation à travers les paramètres suivants. [7]

- **Aspect et couleur**

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, eau) et d'évaluer la couleur et la viscosité. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide. La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve, elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile.

Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service. [14]

Elle renseigne également sur la dégradation ou la contamination de l'huile donne lieu à une augmentation de la couleur qui évolue depuis une couleur jaunâtre presque

transparente, pour une huile nouvelle, jusqu'à un jaune rougeâtre ou rouge foncé pour une huile vieillie. [7]

- **La viscosité**

La viscosité traduit les forces qu'opposent les molécules d'huile à une force tendant à les déplacer. En d'autres termes, elle mesure les frottements dus aux mouvements internes entre les molécules du fluide. [8]

C'est un critère particulièrement important pour apprécier la qualité de l'huile.

La viscosité et sa variation avec la température sont des paramètres de première importance pour le transfert thermique. En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil, pour refroidir les parties actives chaudes. [9]

- **L'acidité (indice de neutralisation)**

La détermination de l'acidité à une grande importance.

Elle permet de suivre l'altération de l'huile, de donner une idée claire sur son degré d'oxydation et de décider du mémento ou elle doit être mise hors service. Elle est due à la présence de produits hydrocarbures acides tels que les carboxyliques et les hydroxyliques dont la formation est favorisée sous l'effet de la température, de la pression et de l'oxygène. Sa mesure se fait par un tirage acido-basique.

Elle est déterminée en mg KOH/g. d'après la norme CEI 62 021, une borne huile possède une acidité inférieure à 0.03 mg KOH/g. indice de neutralisation (mg KOH/g) : il permet de détecter la présence de composés acides produits par l'oxydation de l'huile. [10]

- **Teneur en eau (mg / kg)**

Ce paramètre permet de déterminer s'il y a condensation ou infiltration d'eau à l'intérieur du transformateur, il est très important car la présence d'eau conduit à une perte de la capacité diélectrique de l'huile.

La présence d'humidité dans l'eau permet aussi de déterminer la quantité d'eau dans la cellulose ce qui provoque le vieillissement prématuré de cette dernière. [9]

- **La teneur en soufre**

L'huile peut contenir des traces de sulfures, soit sous forme de soufre libre, soit sous forme de composés sulfurés, leur formation conduit à des défaillances dans l'isolement cellulosique. [11]

Le dérivé de soufre est diffusé à travers le papier et attaque sélectivement le cuivre en formant le  $Cu_2S$ , Ceci apporte par conséquent une augmentation de la probabilité de défaillance par manque d'isolement dans le transformateur. [12]

- **Facteur de dissipation diélectrique ( $\tan \delta$ )**

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est la présence d'un courant de fuite qui traverse le liquide sous l'effet du champ électrique.

Le facteur de dissipation diélectrique «  $\tan \delta$  » est la tangente de l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et ce courant de fuite (l'angle des pertes). Il permet de déterminer précisément l'état physico-chimique dans son rôle premier est de connaître le degré de contamination de l'huile isolante par la présence d'impuretés et de produits polaires; c'est un paramètre très significatif pour la conductibilité du diélectrique car plus le facteur de dissipation est grand moins l'huile est isolante. [7]

- **Tension de claquage (kV)**

Ce paramètre indique la capacité de l'huile à supporter la tension à laquelle elle est soumise en service. Une réduction de cette valeur est généralement due à une pollution par des particules solides ou par de l'eau en état libre. [12]

- **Analyse de particules**

La rigidité diélectrique de l'huile dépend de la concentration, de la taille, de la forme et du type de particules, ainsi que du degré d'humidité dans l'huile.

Les principales sources de particules dans les transformateurs sont la poussière, les fibres de cellulose et la saleté résiduelle.

Il est possible de trouver aussi des particules de fer, de cuivre et d'autres métaux. Pour déterminer ces sources de génération il est important d'identifier ces particules. [12]

### **II.3.2 Analyse des furanes**

La dégradation des matériaux celluloseux constituant l'isolation solide des enroulements du transformateur conduit à la formation des dérivés furaniques, leur présence dans les huiles du transformateur est un bon outil de diagnostic de l'état de l'isolation de ce dernier. [7]

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

L'analyse de composés furaniques dans l'huile est effectuée par chromatographie liquide dans le laboratoire. [12]

Les indices à analyser selon la norme CEI 61198 sont :

- 2 FAL : Furfuraldéhyde le plus significatif
- 5 HMF : 5- Hydroxyméthylfuraldéhyde
- 2 ACF : 2- Furilméthylcétone
- 5 MEF : 5- Méthylfurfuraldéhyde

Généralement les niveaux de furaniques dans les transformateurs sont en dessous de 0.1ppm. Dans des vieux équipements, ils peuvent dépasser 1 ppm, même atteindre 10 ppm

### **II.3.3 Analyse des gaz dissous dans l'huile**

#### **II.3.3.1 Formation de gaz dissous dans l'huile lors de défaut**

L'apparition de défauts d'origine thermique conduit à la dégradation de l'huile. Chaque type de défaut fait cuire l'huile ou le papier d'une manière différente, produisant des quantités relatives de gaz dissous qui caractérisent le défaut. Par conséquent, les analyses des gaz dissous permettent de suivre le comportement du transformateur à travers des analyses par chromatographie en phase gazeuse, elles permettent de :

- Détecter la présence d'anomalies dans le transformateur dès leur premier stade d'apparition et de suivre leur évolution.



- D'avoir des hypothèses sur le type de défaut (arc, point chaud, décharge partielle, mauvaise connexion d'un contact). [7]

Cette technique de diagnostic est une des méthodes prédictives plus fiables et présente l'avantage de pouvoir être effectuée sans laisser le transformateur hors service. La technique est basée sur le fait que la quantité et la distribution relative de ces gaz dépend du type et de la gravité de la détérioration et des efforts auxquels le transformateur a été soumis. [12]

Les gaz sujet au diagnostic et leur origine sont représentés dans le tableau ci-dessous (Tableau II.1). [12]

| Type                        | Gaz                  | Symbole                       | Origine   |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------------|---|
| <b>Gaz combustibles</b>     | Acétylène            | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Il apparaît par défaut électriques (décharges) de haute énergie.  |
|                             | Ethylène             | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | Ce gaz se génère par la décomposition thermique de l'huile ou de l'isolement solide.                        |
|                             | Ethane               | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | Provient de la décomposition thermique de l'huile.  |
|                             | Hydrogène            | H <sub>2</sub>                | Il se génère par défauts électriques (décharges) de basse ou de haute énergie.                              |
|                             | Méthane              | CH <sub>4</sub>               | Généralement il apparaît quand il existe des décharges partielles ou de décomposition thermique de l'huile. |
|                             | Monoxyde de Carbone  | CO                            | Proviennent de la décomposition de la cellulose des matériaux qui composent le transformateur               |
| <b>Gaz non combustibles</b> | Anhydride carbonique | CO <sub>2</sub>               | Pour vérifier la prise d'échantillon.   |
|                             | Azote                | N <sub>2</sub>                |   |
|                             | Oxygène              | O <sub>2</sub>                |   |

**Tableau II.1:** Les gaz pour le diagnostic [12].

### II.3.3.2 Méthodes d'interprétation des résultats

L'analyse des gaz dissous dans les huiles des transformateurs est une technique de diagnostic bien connue dans l'industrie et plusieurs critères ont été établis. Les critères communs les plus connus sont ceux de Rogers, Doernenburg, CEI 60599 et triangle de Duval. [13]

- **Méthode de Rogers**

Rogers a développé cette méthode dans lequel trois rapports de gaz sont employées ( $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$ ) pour produire des codes basés sur des gammes des rapports comme montré dans le Tableau II, 2.

La combinaison des codes produits, peut être liée à une interprétation diagnostic comme montré dans le Tableau II. [13].

| Rapport de gaz |                 | Type de gaz               | Type de gaz | Code |
|----------------|-----------------|---------------------------|-------------|------|
| <b>A</b>       | $C_2H_2/C_2H_4$ | <b>Acétylène/Ethylène</b> | < 0,1       | 0    |
|                |                 |                           | 0.1 à 1     | 1    |
|                |                 |                           | 1 a 3       | 1    |
|                |                 |                           | > 3         | 2    |
| <b>B</b>       | $CH_4/H_2$      | <b>Méthane/hydrogène</b>  | < 0,1       | 1    |
|                |                 |                           | 0,1 à 1     | 0    |
|                |                 |                           | 1 à 3       | 2    |
|                |                 |                           | > 3         | 2    |
| <b>C</b>       | $C_2H_4/C_2H_6$ | <b>Ethylène/ Ethane</b>   | < 1         | 0    |
|                |                 |                           | 0,1 à 1     | 0    |
|                |                 |                           | 0,1 à 1     | 1    |
|                |                 |                           | > 3         | 2    |

**Tableau II.2 : Code de Rogers [12]**

| Case | Type défaut                              | A   | B | C   | Problème trouve   |
|------|--|-----|---|-----|---|
| 0    | Sans défaut                              | 0   | 0 | 0   | Vieillessement normal   |
| 1    | Décharge partielle de base énergie       | 1   | 1 | 0   | Décharges électriques dans les bulles, provoquées par des vides d'isolation, saturation en gaz superbe dans l'huile ou la cavitation (des pompes) ou humidité élevée dans l'huile (bulles de vapeur d'eau)  |
| 2    | Décharge partielle de haute énergie      | 1   | 1 | 0   | Egal que ce qui est précédent mais avec perforation de l'isolation de cellulose par étincellement ou formation d'arcs. Ceci produit généralement CO et CO <sub>2</sub> .  |
| 3    | Décharges de base énergie, arcs          | 1-2 | 0 | 1-2 | Etincellement continu en huile entre les connexions mauvaises de potentiel différent ou au potentiel flottant ; panne de l'huile diélectrique entre les matériaux solides d'isolation.  |
| 4    | Décharges de haute énergie, arcs         | 1   | 0 | 2   | Décharges (formation d'arcs), panne par formation d'arcs de l'huile entre les enroulements, entre les enroulements et terre ou formation d'arcs à travers des contacts du régulateur pendant le fonctionnement avec l'huile fuyant au réservoir principal   |
| 5    | Défaut thermique de base T < 150°C       | 0   | 0 | 1   | Surchauffe isolée de conducteur, ceci produit généralement CO et CO <sub>2</sub> parce que ce type de défaut comporte généralement l'isolation de cellulose.  |
| 6    | Défaut thermique de T entre 150 – 300° C | 0   | 2 | 0   | Points surchauffant dans le noyau dû aux concentrations de flux. Les problèmes ci-dessous sont en règle des températures croissantes des points chauds dans le noyau. Stratifications court-circuitées dans le noyau. Surchauffe du conducteur de cuivre. Mauvais branchement dans l'enroulement ou mauvais contacts dans le régulateur. Circulation de courants dans le noyau. |
| 7    | Défaut thermique de T entre 300 – 700 °C | 0   | 2 | 1   | Ces problèmes produisent généralement CO et CO <sub>2</sub> parce qu'ils comportent généralement l'isolation de cellulose   |
| 8    | Défaut thermique de T > 700 °C           | 0   | 2 | 2   |   |

Tableau II.3: Interprétation de Rogers [12].

- **Méthode de CEI 60599**

Le critère CEI 60599 a été employé pour plusieurs décennies et une expérience considérable est accumulée dans le monde entier pour diagnostiquer les défauts naissant dans les transformateurs. Les six grandes classes de défauts sont présentées sous forme d'une table d'interprétation ci-dessous (Tableau II.4).

| Cas       | Défaut typique                    | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
|-----------|-----------------------------------|--|---------------------------------|--|
| <b>DP</b> | Décharges partielles              | NS*  | < 0,1                           | < 0,2  |
| <b>D1</b> | Décharge de baisse énergie        | > 1  | 0,1 ÷ 0,5                       | > 1  |
| <b>D2</b> | Décharge d'haute énergie          | 0,6 > ÷ 2,5  | 0,1 ÷ 1                         | > 2  |
| <b>T1</b> | Faute thermique, T < 300 °C       | NS*  | > 1 mais NS*                    | < 1  |
| <b>T2</b> | Faute thermique 300°C < T < 700°C | < 0,1  | > 1                             | 1 > ÷ 4  |
| <b>T3</b> | Faute thermique, T > 700°C        | < 0,2 **   | > 1                             | > 4  |

**Tableau II.4** : Interprétation de la CEI60599. [12]

**NS\*** : non significatif quel que soit la valeur

Le Tableau II.5 ci-dessous donne quelque défaut typique pour une recherche plus approfondie des causes de défauts ou de dégradation dans le transformateur

| Typique   | Défaut   | Exemple  |
|-----------|--|--|
| <b>DP</b> | Décharge partielle   | Décharge dans les cavités gazeuses résultant d'une imprégnation incomplète, d'une forte humidité dans le papier, de la sursaturation de l'huile ou de la cavitation, et entraînant la formation de cire-X  |
| <b>D1</b> | Décharge de faible énergie                                       | <p>Étincelle ou arc entre mauvaise connexion à potentielle différent ou à potentielle flottant en provenance d'anneau statique, de tore, de disque ou de conducteur d'enroulement adjacente, de mauvaise soudure ou de boucle fermé dans le noyau.</p> <p>Décharge entre les pièces de serrages, la traversée et la cuve, la haute tension et le tore dans les enroulements, sur la paroi de cuve.</p> <p>Cheminement dans le calage de bois, la colle des poutres d'isolation, les cales entre enroulements, claquage dans l'huile, courant de coupure dans le sélecteur.</p> |
| <b>D2</b> | Décharge de forte énergie  | <p>Contournement, cheminement ou arc de forte énergie locale pu de puissance (forte courant). Court-circuit entre basse tension et terre, connecteur, enroulement, traversées et cuve, jeux de barre et cuve, enroulement et noyau, dans le canal de l'huile, la tourelle.</p> <p>Boucle de courant entre deux conducteurs adjacente autour du flux magnétique principale entre des boulons du noyau, des anneaux métalliques serrant le noyau.</p>  |
| <b>T2</b> | Faute thermique, $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$ | Contact défectueux entre connexion boulonnée (particulièrement entre des barres omnibus en aluminium), contact glissante, contacts à l'intérieur du sélecteur (formation pyrolytique de carbone), connexion entre les câbles et le conducteur de traversée courants de circulation entre pièces de serrage défectueux dans les écrans magnétiques. Isolation endommagée entre conducteurs adjacente parallèles dans les enroulements   |
| <b>T3</b> | Faute thermique, $T > 700^{\circ}\text{C}$                       | Forts courants de circulations de la cuve et le noyau. Faible courant dans les parois de la cuve créé par un champ magnétique élevé ou compensé. Court-circuit dans les joints du noyau.   |

Tableau II.5 : Exemples des Défauts typique.

- **Méthode de Doernenburg**

Les quatre ratios utilisés dans cette méthode sont représentés dans le Tableau II.6 suivant :

| Rapport de gaz |  | Type de gaz         | Range   | Code |
|----------------|--|---------------------|---------|------|
| <b>A</b>       | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>                              | Méthane/hydrogène   | < 0,1   | 5    |
|                |  |                     | 0,1 à 1 | 0    |
|                |  |                     | 1 à 3   | 1    |
|                |  |                     | > 3     | 2    |
| <b>B</b>       | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>               | Ethane/ méthane     | < 1     | 0    |
|                |  |                     | > 1     | 1    |
| <b>C</b>       | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | Éthylène/ Ethane    | < 1     | 0    |
|                |  |                     | 1 à 3   | 1    |
|                |  |                     | > 3     | 2    |
| <b>D</b>       | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | Acétylène/ Éthylène | < 0,1   | 0    |
|                |  |                     | 0,1 à 3 | 2    |

**Tableau II.6:** Code pour les ratios de Doernenburg [12]

L'analyse de gaz Doernenburg essaye d'identifier les anomalies suivantes :

- Défauts thermique.
- Décharge partielle.
- Décharge par arc.

Présenter dans la table d'interprétation suivante (Tableau II.7) :

| A | B | C | D | Caractéristique de défaut   |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | Sans défaut, vieillissement normal                                  |
| 5 | 0 | 0 | 0 | Décharges partielles de basse énergie ; contrôler les niveaux de CO |
| 0 | 0 | 0 | 1 | Décharges partielles de haute énergie ; contrôler les niveaux de CO |
| 0 | 0 | 0 | 1 | Décharges de basse énergie ; contournement sans puissance           |

|    |   |   |    |   |
|----|---|---|----|---|
| 0  | 0 | 1 | >0 | Décharges de basse énergie ; crépitement continu à potentiel flottant   |
| 0  | 0 | 2 | >2 | Décharges de haute énergie ; arc électrique avec perforation de l'isolement et surchauffe des conducteurs   |
| 0  | 0 | 1 | 0  | Défaut thermique de basse température : <150°C  |
| >0 | 1 | 0 | 0  | Défaut thermique de température moyenne : entre 100 et 200 °C   |
| 1  | 0 | 1 | 0  | Défaut thermique de température moyenne : entre 150 et 300 °C. Surchauffe des conducteurs   |
| >0 | 0 | 2 | 0  | Défaut thermique de haute température : entre 300 et 700 °C. contacts défectueux, points chauds dans le noyau magnétique, courant de circulation dans le tonneau métallique, etc. |

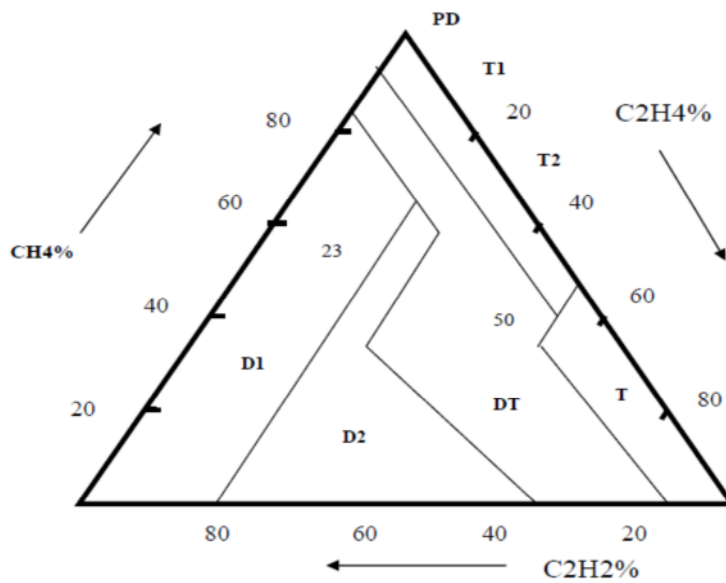
**Tableau II.7** : Interprétation de Doernenburg [12]

- **Triangle de Duval**

Un point faible des techniques de ratios est qu'elles ne couvrent pas toutes les gammes des données et négligent souvent les données qui sont des rapports en dehors des seuils déterminées dans les tables.

Duval a développé une représentation triangulaire pour dépasser ce problème [17]. Elle consiste au calcul de pourcentages de concentrations en (ppm) des trois gaz (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) par rapport au total (CH<sub>4</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>). Ces pourcentages seront tracés dans un

triangle divisé en régions indiquant le type de défaut (Figure II.2).



FigII.2 : Triangle du Duval [12].

**PD** : Décharge partielle

**D1** : Décharge de basse énergie

**D2** : Décharge de haute énergie

**T 1** : Faute thermique,  $T < 300\text{ °C}$

**T 2** : Faute thermique,  $300\text{ °C} < T < 700\text{ °C}$

**T** : Faute thermique,  $T > 700\text{ °C}$

**DT** : Mélange de fautes thermiques et électriques.

### II.3.4 Mesures diélectriques

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

L'objectif des mesures diélectriques est de détecter d'éventuelles dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenue d'un incident due à une avarie. [9]

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



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

#### II.3.4.1 Mesure du facteur de puissances et de la capacité

On applique ce type d'essai aux enroulements et aux bornes, en permettant d'identifier clairement des sources de problèmes à court terme dans le transformateur.

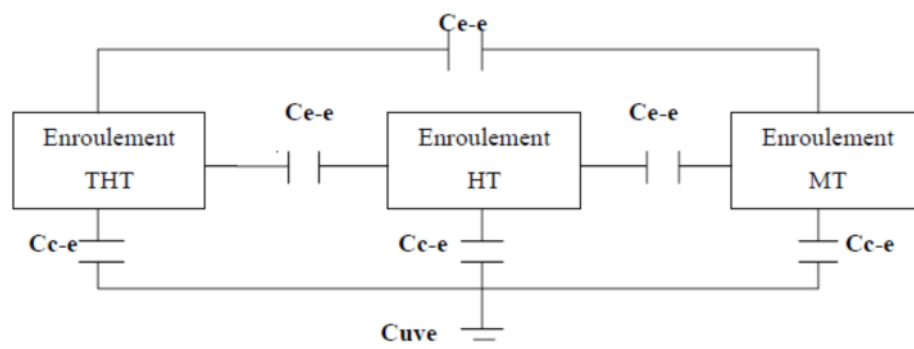
La mesure du facteur de puissance et de la capacité des enroulements est un bon outil pour déterminer la qualité et l'état de l'isolement des équipements, spécialement ceux qui incorporent dans leur fabrication de l'isolant papier ou huile.

##### • Mesure de facteur de puissance F.P

L'essai du facteur de puissance permet d'évaluer la qualité et l'intégrité de l'isolement capacitif des enroulements, en indiquant l'existence des détériorations de l'isolement (un vieillissement du papier, la présence d'eau dans le papier, un mauvais état de l'huile, décharge électrique). [7]

##### • Mesure de capacité des enroulements

La capacité fournit des informations générales sur la perte d'isolement dans le noyau ou les enroulements. La mesure de capacité se fait entre cuve et enroulement ou entre enroulement (Figure II.3).



**FigII.3** : Schéma de capacité de d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements

**C c-e** : capacité entre cuve et enroulement.

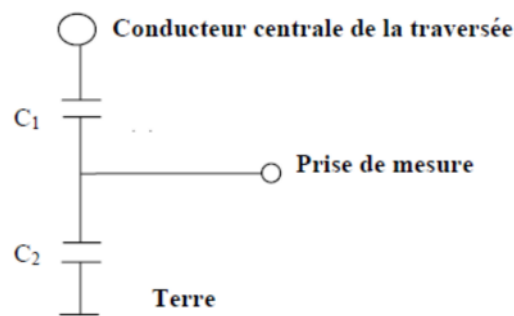
**C e-e** : capacité entre enroulements. Ainsi, une variation de la capacité d'isolement prouve l'existence de conditions anormales, comme la présence d'humidité, de sections de conducteurs Court-circuitées ou interrompues, de déformation de bobinage. [7]

• **Mesure de capacité des bornes**

Les traversées haute tension sont un accessoire important qui peut en cas d'avarie être une cause d'indispensabilité importante du transformateur ce qui fait une attention particulière doit être accordée à leur entretien.

La mesure de la capacité des bornes, peut renseigner sur l'état des bornes ce qui permettra d'éviter des avaries (explosion) de traversées.

Si les bornes sont de type capacitif, elles possèdent normalement une prise de mesure, une borne capacitive de construction typique possède deux isollements  $C_1$  et  $C_2$ , la valeur  $C_1$  représente la capacité entre le conducteur central de la borne et la prise capacitive, et  $C_2$  indique la capacité entre la prise capacitive et la terre voir Figure II.4. [7]



**FigII.4** : Schéma d'une borne de type capacitif.

Les résultats des mesures doivent être comparés aux résultats des tests effectués en Usine, permettant de déterminer le court-circuit dans les galettes capacitives de la traversée et les détériorations du corps des traversées.

Donc il est nécessaire de prendre certain précautions pour réduire les causes d'erreurs :

- réaliser les mesures si l'humidité atmosphérique est faible.
- veiller sur la dépollution des traversées avant de mesurer.

-les mesures doivent être effectuées à une température proche de celle de l'essai en usine. [7]

#### II.3.4.2 Mesure de résistance d'isolement en courant continu

Elle correspond principalement à la mesure de la conductivité superficielle de l'isolement et utilisé dans la détection d'une faille imminente.

Elle consiste à vérifier l'isolement entre enroulements, entre enroulement et cuve, entre cuve et masse.

- **Principe de mesure**

Consiste à court-circuiter toute les bornes de l'enroulement essayé et y appliquer une tension de 5000 V avec un appareil de mesure appelé Mégohmmètre et les autre enroulements sont court- circuits et raccorder à la terre. Il est recommandable de s'assurer que la cuve et le noyau sont branchés à terre. [14]

- **Interprétation**

Il existe deux méthodes d'interprétations :

- **Le rapport d'absorption**

La mesure dure 1 minute .les lectures R15 et R60 sont respectivement prises 15 et 60 secondes après avoir connecté la tension, et pour comparer avec de future mesures il convient d'enregistrer (outre la résistance) la température, la tension et l'équipement de mesure. Pour les valeurs de résistance d'isolement obtenues il n'y a pas des critères rigides d'acceptation, cependant comme règle générale aucun enroulement ne devra avoir moins de 200 MΩ et le rapport d'absorption (R60/R15). [12]

- **Indice de polarisation**

L'indice de polarisation PI est le rapport entre la mesure de la résistance d'isolement à 10 minutes et la résistance d'isolement à 1 minute. [12]

$$R = \frac{R_{10min}}{R_{1min}}$$

Les critères d'acceptation pour le PI sont :

| Indice polarisation (Mohmio 10 min/ 1 min) | Critère    |
|--|------------|
| <1   | Dangereux  |
| <1.5                                       | Pauvre     |
| 1.5 à 2                                    | Douteux    |
| 2 à 3                                      | Acceptable |
| 3 à 4                                      | Bon        |
| >4   | Excellent  |

**Tableau II.8 :** Domaine d'interprétation de PI.

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. [17]

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. [17]

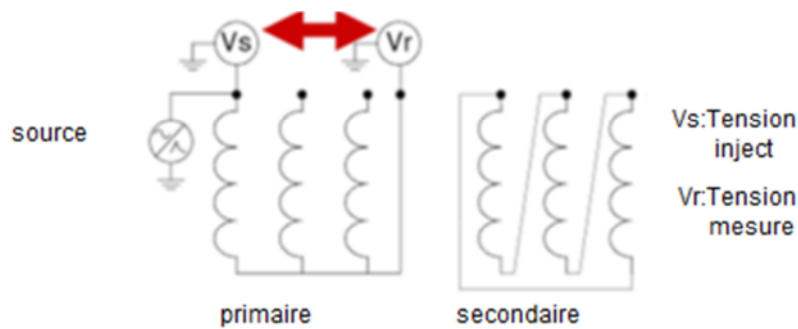
Les mesures par FRA peuvent donner des informations sur la tenue des structures géométriques des enroulements.

### II.3.4.3 Type d'essais par FRA

Les principaux types d'essais par FRA sont :

- **Essais entre extrémités**

On injecte le signal tour à tour à une extrémité de chaque enroulement et l'on mesure le signal à l'autre extrémité (figure II.5). [15]



**FigII.5** : Essai entre extrémités.

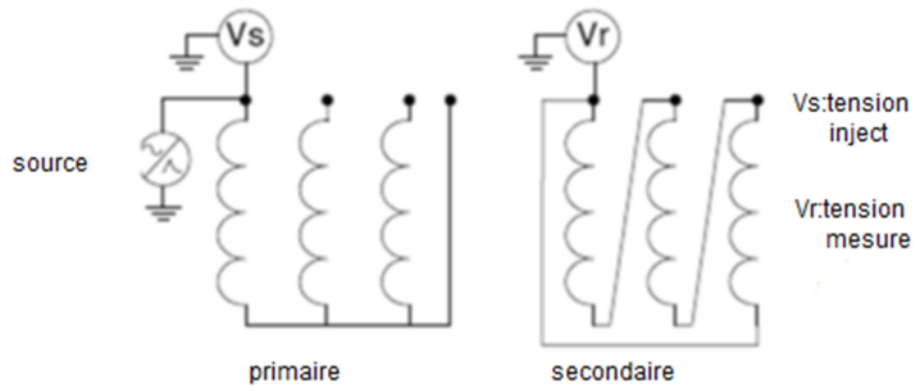
- **Essais en court-circuit**

Cet essai ressemble à la mesure entre extrémités mais avec un enroulement court-circuité sur la même phase voir Figure II.6 [15], de telles mesures permettent d'éliminer l'influence du noyau en dessous 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 élevées est similaire à celle que l'on obtient en utilisant la mesure entre extrémités.

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

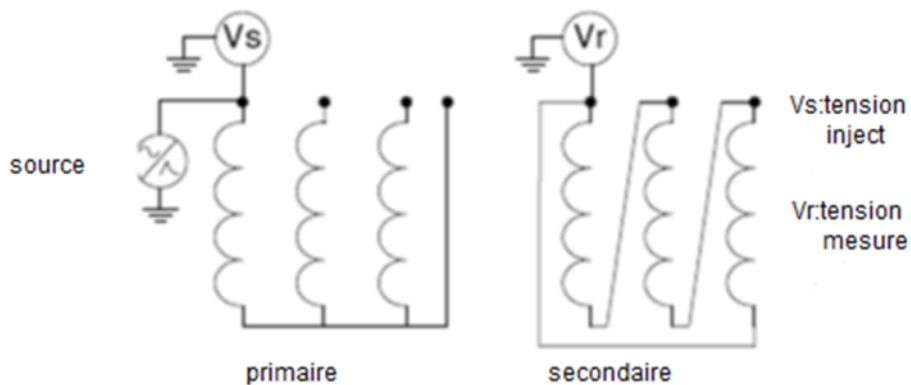
En outre, les essais de court-circuit entre extrémités peuvent être réalisés en raccordant la source soit à l'extrémité coté phase, soit à l'extrémité coté neutre. [17]



**FigII.6** : Essai en court-circuit

- **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 relié au premier) (Figure II.7). [15]

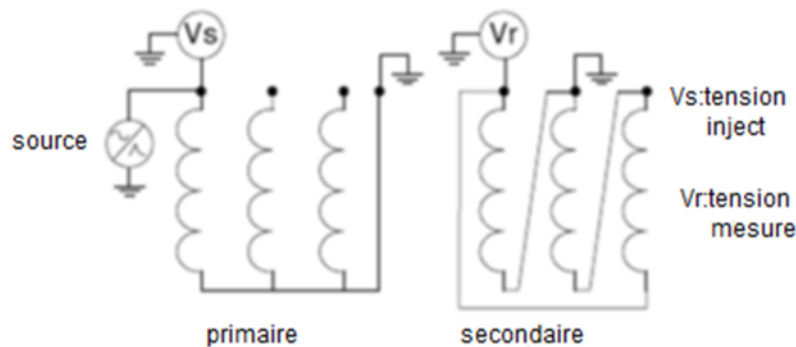


**FigII.7** : Essai capacitif entre enroulements.

- **Essai inductif entre enroulements**

On injecte le signal sur une borne coté HT, et l'on mesure la réponse sur la borne correspondante coté BT, les autres extrémités des deux enroulements étant reliées à la terre (Figure II.8). [15]

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



FigII.8 : Essai inductif entre enroulements

### II.3.5 Mesures électriques

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont:

#### II.3.5.1 Mesure du courant d'excitation

Le courant d'excitation d'un transformateur est le courant consommé lorsque l'un des enroulements est alimenté à une tension alors que le second est ouvert.

Ce courant total à vide à une composante de magnétisation et une composante de perte. [7]

L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer le circuit magnétisé du transformateur [12] -problème associé au noyau (des tôles coupées, des joints défectueux). - problème associé au bobines (des spires en court-circuité ou en circuit ouvert, des déficiences dans les dispositifs de commutation du régleur en charge)

- **Principe de mesure**

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

### II.3.5.2 Mesure de rapport de transformation

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régulateur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures.

Des déviations indiquent des courts-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régulateur. [7]

Les mesures sont effectuées :

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

La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haute tension, en mesurant les tensions résultantes dans les autres. [12]

### II.3.5.3 Mesure de la résistance d'enroulements

La mesure de la résistance a pour objectif de déterminer l'existence des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinage. Entre autre cette mesure détermine les pertes par effet joule dans les enroulements et les connexions. La mesure est effectuée par l'application du courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements afin de pouvoir ramener les valeurs mesurées vers des valeurs à la température référence. [7]

La résistance corrigée est calculé par l'équation II.2 suivante :

$$R_{COR} = R_m \left( \frac{\theta_F + \theta_{ref}}{\theta_F + \theta_m} \right)$$

**$R_m$**  : Résistance mesurée.



**$\vartheta_F$** : 235 pour le cuivre et 225 pour aluminium.

**$\vartheta_{ref}$** : Température de référence.

**$\vartheta_m$** : Température des enroulements.

Des valeurs supérieures peuvent indiquer:

- L'existence de court-circuit entre spires.
- Des irrégularités dans les circuits de régulation du transformateur (valeur de la Résistance par prise).
- Des connexions défectueuses.
- Des échauffements anormaux dans les bobines et les conducteurs. La mesure de la résistance des enroulements doit être effectuée en dernier lieu, puisqu'elle produit des problèmes de magnétisation du noyau en étant effectué l'essai avec du courant continu. [12]

#### II.3.5.4 Mesure de la réactance de fuite

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

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'intérêt des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, dans le but de réduire la probabilité de défaillances ou de dégradation du service et d'augmenter l'espérance de vie du transformateur.

Il est alors possible en fonction des résultats d'analyse de gaz dissous dans l'huile, d'identifier la présence d'une anomalie comme un point chaud à haute température, d'évaluer le degré de vieillissement de l'isolation cellulosique et diélectrique et analyser sont

degré de contamination. L'analyse de la réponse en fréquence est une méthode de diagnostic pour l'évaluation de l'état mécanique des transformateurs de puissance.

L'essai est non destructif et peut être employé comme outil autonome pour détecter des dommages d'enroulement, ou comme outil de diagnostic pour indiquer exactement des dommages détectés dans d'autres essais. Les mesures électriques et diélectriques sont à effectuer d'une manière systématique sur les transformateurs afin de connaître leur état et prévenir leurs avaries.

Afin de mieux comprendre et maîtriser les méthodes énumérées dans ce chapitre en particulier la technique FRA, il est nécessaire d'établir des méthodes mathématiques traduisant le comportement du transformateur.

Ces modèles seront discutés dans le prochain chapitre.

## INTRODUCTION

Les constructeurs de transformateurs de grande puissance maîtrisent aujourd'hui les technologies des transformateurs (colonne, cuirassé, ...). Cependant, leurs ingénieurs de recherche continuent toujours à s'intéresser au comportement des transformateurs de puissance, en régime transitoire. En effet, un transformateur relié à un réseau THT est soumis à différents types de tensions (surtensions dues aux ondes de chocs rapides ou aux oscillations internes entretenues) dont la connaissance est importante pour établir les contraintes auxquelles est soumise l'isolation. Or, leur objectif principal consiste à placer dans un volume le plus réduit possible, des enroulements capables de supporter, sans défaillance, ces surtensions. D'où l'importance d'avoir un modèle qui simule le plus fidèlement possible le comportement du transformateur en régime transitoire.

Nous présentons dans ce chapitre les principaux modèles de transformateurs de puissance qui existent dans la littérature, ainsi que leurs avantages et inconvénients, dans le but de choisir le modèle le mieux adapté à notre étude.

### III.1. LES MODELES MATHEMATIQUES

La modélisation des transformateurs de puissance, en régimes Hautes Fréquences (HF), et sous onde de choc, par un procédé expérimental (mesures), quoique précis, est relativement longue à mettre en œuvre et coûteux. C'est pourquoi on lui préfère le second modèle, plus souple, qui utilise un schéma électrique équivalent, avec des paramètres concentrés ou repartis. La précision des résultats et le coût de la modélisation sont liés au modèle choisi, ainsi qu'au degré de raffinement du schéma équivalent. Ce paragraphe décrit les différents types de modèles mathématiques existants dans la littérature. [20]

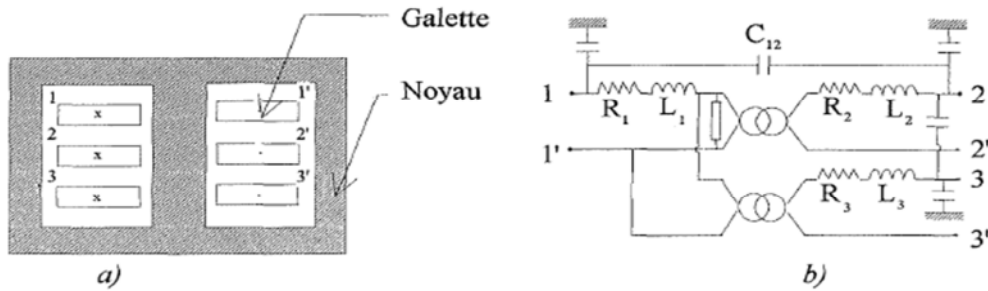
#### III.1.1. Le modèle universel EMTP

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

- des transformateurs parfaits;

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

La Figure 1 illustre un exemple de schéma équivalent d'un transformateur de type cuirassé (Annexe C), avec trois galettes, en vue de traitement par le code de calcul EMTP. [20]

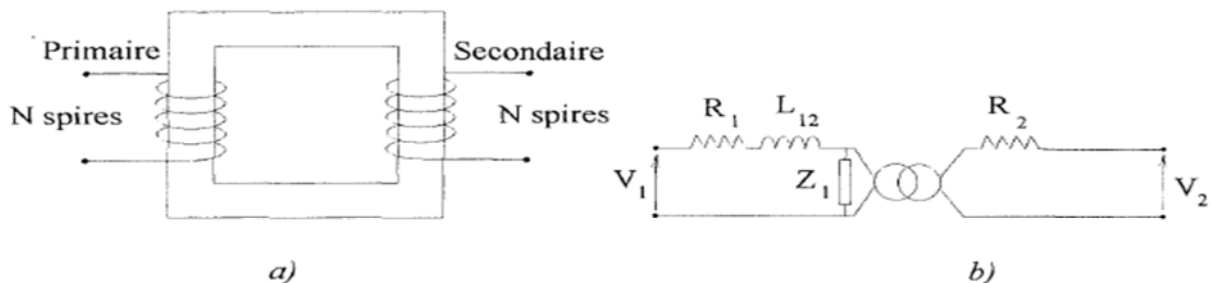


**FigIII.1:** Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP [20]

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

Les différents paramètres du schéma équivalent représenté sur la Figure 1 ( $R^{\wedge}$  résistance de la galette 1,...) sont déterminés, soit par calcul numérique ou analytique, à partir de la géométrie du transformateur, et en faisant des hypothèses simplificatrices (symétrie, perméabilité du noyau magnétique constante,...), soit par mesure (essais à vide, essais en court-circuit,...). [20]

Mais, dans certains cas, l'utilisation du code de calcul EMTP, pour modéliser un transformateur, ne représente pas la réalité. En effet, par exemple pour un transformateur monophasé à deux enroulements égaux (haute tension et basse tension), le modèle EMTP n'est pas symétrique, et l'inductance de court-circuit n'est pas la même, vue du primaire et du secondaire (Figure 2). [20]



**FigIII.2:** Modélisation d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP [20]

- a) Le transformateur
- b) Modèle EMTP

Enfin, les études que nous avons faites montrent le domaine d'utilisation du modèle EMTP: il est bien adapté pour les études des réseaux (avec une modélisation globale du transformateur), mais il ne convient pas aux études internes du transformateur. [20]

### III.1.2. Le modèle RESEL

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

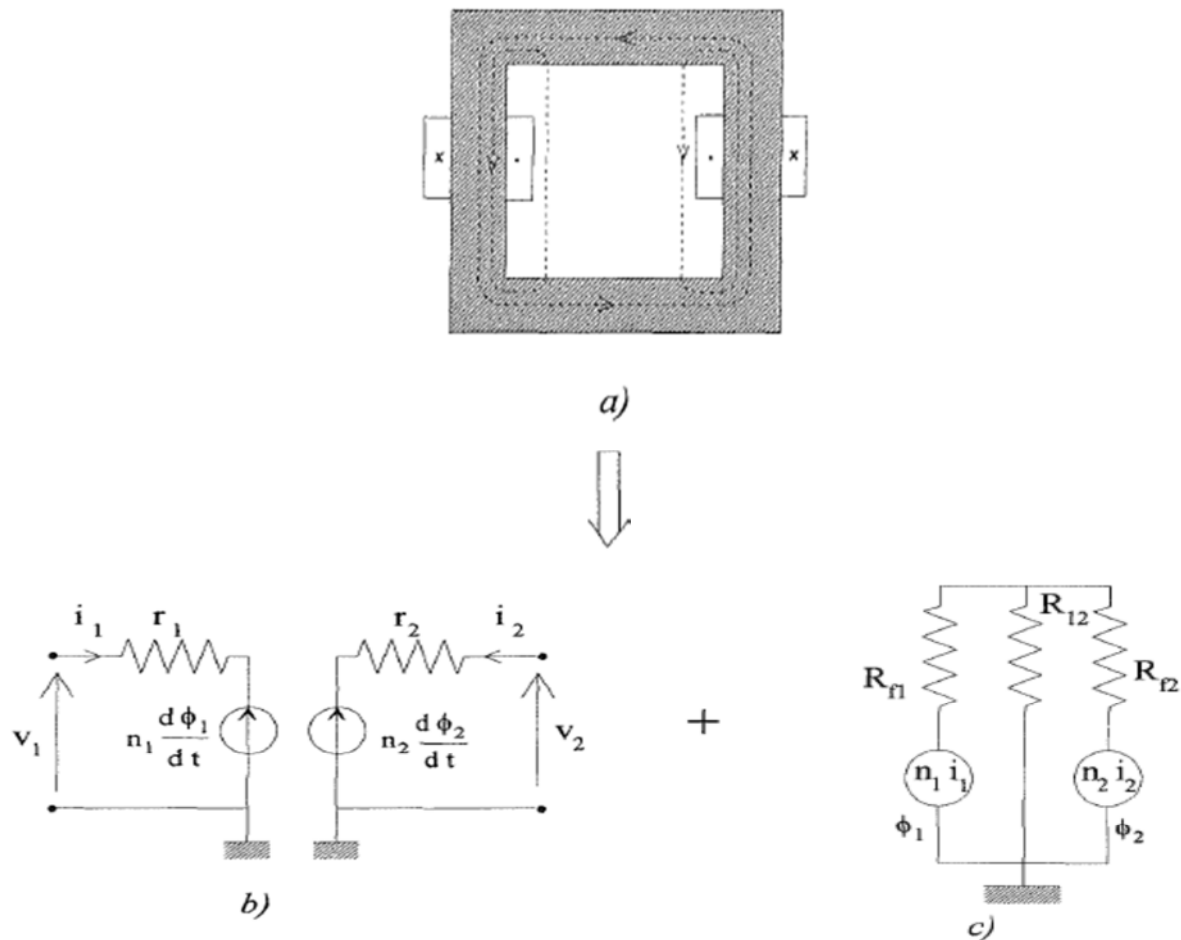
- un schéma (Figure 3b) qui traduit le comportement électrique du transformateur, composé de forces électromotrices:  $n_1 \frac{d\phi_1}{dt}$  et  $n_2 \frac{d\phi_1}{dt}$ , et de plusieurs cellules RL:  $r_1$  résistance du primaire, et  $r_2$ , résistance du secondaire (l'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateurs), et un schéma (Figure 3c) qui traduit son comportement magnétique, composé d'un réseau de réluctances ( $R_{f1}$  et  $R_{f2}$ : réluctances de fuites, et  $R_{12}$ : réluctance principale) et de forces magnétomotrices ( $n_1 i_1$  et  $n_2 i_2$ ).

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

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

Aussi, l'introduction des éléments (impédances) complexes nous permet de tenir compte de l'effet de peau. Cependant, on peut citer deux inconvénients majeurs du code de calcul RESEL: il ne traite que des éléments de réseau à constantes localisées, et comme on a précisé plus haut, ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur, mais plutôt une analyse temporelle.

La Figure 3 illustre le principe du modèle RESEL.



**FigIII.3:** Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL [20]

a) Coupe transversale d'un transformateur à 2 enroulements

b) Le circuit électrique correspondant

c) Le circuit magnétique correspondant

### III.1.3 Modélisation basée sur les inductances de fuite

On a vu dans le sous-paragraphe précédent que la présence du noyau magnétique, avec une grande perméabilité, augmente le couplage entre les bobinages. Il arrive donc que les valeurs des inductances propres soient très proches de celles des mutuelles. De même, on a vu aussi que l'évaluation exacte de la matrice inductance ne signifie pas que les effets de fuite (inductances de fuite) soient corrects. Les valeurs des inductances propres étant très proches de celles des mutuelles, le calcul des inductances de fuite, à partir de ces dernières donnera des valeurs imprécises. Par ailleurs, il arrive que le transformateur se trouve dans une situation de court-circuit, et dans ce cas ce sont les inductances de fuite qui jouent un

rôle important. Dans ces cas, il est nécessaire d'utiliser une méthode (modèle) basée sur les inductances de fuite, pour avoir une meilleure précision.

Cette approche a été initiée par Blum, et a été, par la suite, approuvée par plusieurs auteurs. Sa généralisation, pour les transformateurs triphasés, a été mise au point par Brandwajn. Dugan a ensuite utilisé la même technique, pour modéliser un transformateur cuirassé. Elle modélise assez correctement les inductances de fuite des transformateurs (en charge ou en court-circuit). Cependant, la présence du noyau magnétique n'est pas prise en compte correctement, ce qui entraîne un écart, pouvant être gênant, entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le calcul. [20]

En outre, pour calculer ces inductances de fuite, on est souvent obligé de faire des hypothèses, afin de simplifier le calcul. Par exemple, pour calculer les inductances de fuite d'un transformateur cuirassé, Kieny a supposé que le problème présente une symétrie autour de l'axe des galettes (ce qui n'est pas le cas en pratique), et que ces dernières ont la même largeur. De plus, son calcul est basé sur deux galettes alimentées par des courants de modules égaux, et de sens opposés. L'accumulation de toutes ces hypothèses induit des erreurs, surtout lorsque le transformateur se trouve dans une situation inhabituelle, comme le court-circuit. [20]

### **III.1.4 Modèle issu du principe de la dualité magnétique-électrique**

#### **a. Principe de la méthode**

La théorie de la dualité permet de passer d'un problème scientifique à un autre, et surtout peut simplifier considérablement son étude. Prenons par exemple le cas d'un problème thermique, où les équations qui régissent le phénomène sont souvent complexes et difficiles à résoudre.

La dualité thermique-électrique permet, dans certains cas, de représenter le même problème, par un circuit électrique dual. On traite le problème, en résolvant ce dernier, puis, sachant qu'à un paramètre électrique correspond un paramètre thermique dual, on revient au problème thermique initial, par dualité.

La théorie de la dualité permet donc d'établir des propositions nouvelles, à partir des propositions déjà connues: elle facilite l'étude de certains problèmes scientifiques présentant une contexture donnée, et qu'il est plus commode d'aborder le dual que le problème lui-même.

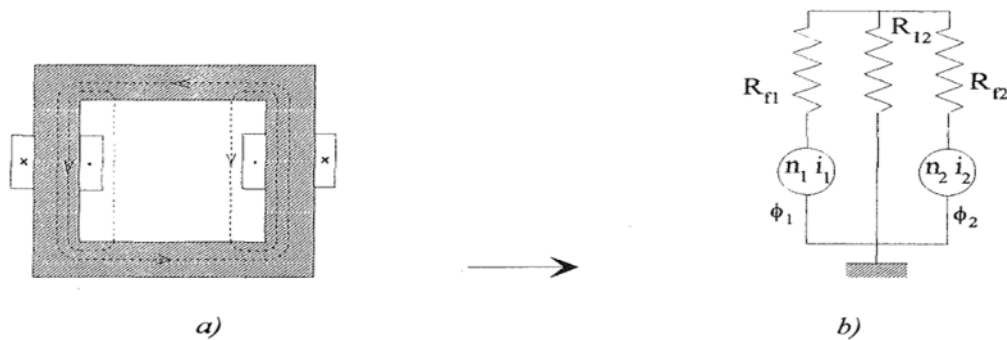
La dualité simplifie les calculs relatifs à certains circuits, en se basant sur l'identité de forme d'un certain nombre de relations, On appelle circuits correspondants par dualité, ou circuits duaux, deux circuits qui constituent deux représentations physiques différentes d'un même système d'équations différentielles. Les équations de nœuds de l'un sont les équations de mailles de l'autre, et inversement. [20]

C'est le même principe que Ton utilise, pour la dualité magnétique-électrique. On établit d'abord un schéma magnétique équivalent du transformateur, et on en déduit un schéma équivalent électrique, en utilisant les règles de passage (appelé aussi analogie de Hopkinson) résumées dans le tableau ci-dessous.

| Magnétique       | Electrique             |
|------------------|------------------------|
| Force magnétique | Tension électrique     |
| Dérivée du flux  | Courant électrique     |
| Réductance       | Inductance             |
| Nœud magnétique  | Maille électrique      |
| Ampère tour      | Transformateur parfait |

**Tableau III.1:** Règles de passage pour la dualité magnétique-électrique. [20]

La Figure 5 illustre la modélisation d'un transformateur, par cette approche, où  $R_{f1}$ ,  $R_{f2}$  et  $R_{12}$  représentent respectivement les réductances de fuite primaire, secondaire, et la réductance principale. De même,  $n_1 i_1$  et  $n_2 i_2$  sont des forces magnétomotrices.



**FigIII.4:** Modèle d'un transformateur basé sur la dualité magnétique-électrique. [20]

a) Transformateur à deux enroulements (circuit magnétique)

b) Le circuit électrique dual



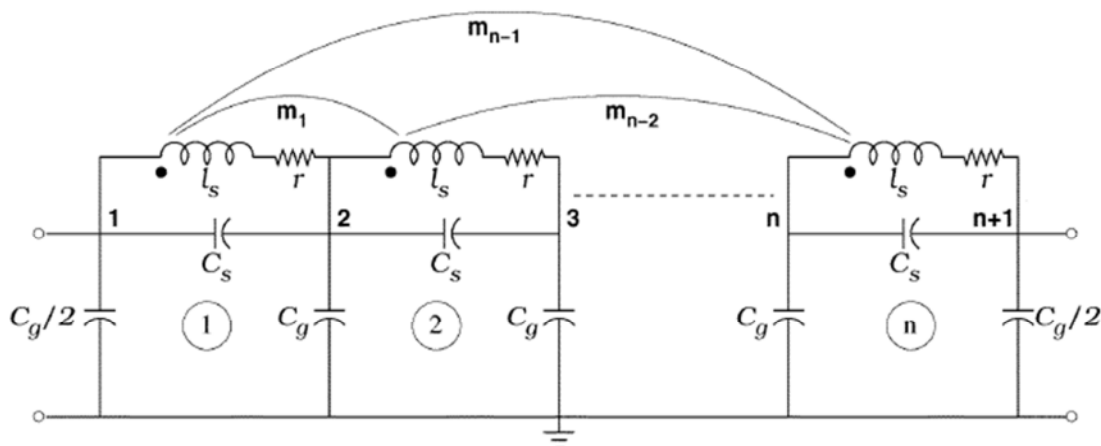
### III.1.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles (modèle adopté)

#### a. Principe de la méthode

Heller et Severka ont montré que le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc est assimilable à celui d'un système de condensateurs, de résistances, et d'inductances. C'est le principe du modèle de transformateur de puissance basé sur les inductances propres et mutuelles. Selon l'étude envisagée, c'est-à-dire selon qu'on s'intéresse au phénomène de propagation, ou aux modes de résonance du transformateur, ces paramètres peuvent être répartis ou concentrés. Cette approche peut être plus ou moins précise, et plus ou moins coûteuse en temps de calcul, suivant le degré de raffinement atteint dans la représentation des enroulements. [20]

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes (Figure 4). Au point de vue inductif, chaque élément est représenté par son inductance propre. Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément, une capacité par rapport à la masse. Ces éléments sont calculés, en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau magnétique. [20]

Ils peuvent être aussi déterminés expérimentalement.



**FigIII.5:** modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié

Les paramètres de ce modèle sont calculés dans le chapitre suivant.

**b. Intérêt de ce modèle**

Ce modèle est le plus répandu et le plus utilisé, pour modéliser un transformateur, dans le passé, et à l'heure actuelle. Pour cela, on détermine les éléments du schéma équivalent, soit par calcul (numérique ou analytique), soit par mesure (essais en court-circuit,...). [20]

Le principal intérêt de ce modèle, une fois que l'on a les éléments du schéma équivalent, est qu'il peut être traité par n'importe quel logiciel pouvant résoudre des réseaux électriques de type RLC (EMTP, ...). De plus, il est bien adapté pour le calcul de la réponse temporelle consécutive à une excitation par une onde de choc rapide. [20]

**c. Inconvénients de ce modèle**

Les principaux inconvénients de ce modèle peuvent être résumés en quatre points:

- les travaux ont montré que l'évaluation exacte de la matrice inductance ne signifie pas que la caractéristique de la fonction de transfert du transformateur, ou les effets de fuite (inductances de fuite) soient corrects. En effet, à cause de la grande valeur de la perméabilité du noyau magnétique qui augmente le couplage entre les bobinages, le calcul de l'inductance de fuite à partir des inductances propres et mutuelles ne sera pas précis, du fait que ces valeurs sont très proches. Ceci donnera l'avantage à un modèle basé sur l'inductance de fuite.
- le nombre de paramètres à déterminer est important.
- on ne peut pas calculer d'une manière précise les paramètres du schéma équivalent, à cause de la présence du noyau magnétique, ou encore de la forme particulière des bobines. En fait, en ce qui concerne le noyau magnétique, on fait souvent l'hypothèse qu'il n'influence pas les régimes transitoire du transformateur (noyau blindé en haute fréquence).
- enfin, la validité du modèle, en HF, est liée au degré de raffinement adapté, pour la représentation des enroulements, et au nombre de paramètres dont on tient compte dans le calcul. [20]

## CONCLUSION

Nous avons vu dans cette étude bibliographique les divers modèles de transformateur de puissance en Haute Fréquence, existants dans la littérature. Le modèle R, L, C basé sur les inductances propres, mutuelles, est le plus adapté à notre travail, et donc retenu pour étudier le comportement fréquentiel des transformateurs de puissance.

# *REMERCIEMENTS*

*Nous remercions nos encadreurs M : HOUASSINE HAMZA Maître de conférences à l'université de Médéa, et M : BELAZZOUG MESSAOUD Maître de conférences à l'université de BLIDA pour leurs aides, leurs encouragements, et leur patience avec laquelle ils ont bien voulu travaillé avec nous en nous guidant et nous corrigeant durant toute l'année.*

*Nous remercions également tous les membres du jury, pour avoir bien voulu évalué notre travail.*

*Nous remercions aussi tous les travailleurs de la bibliothèque et du périodique de l'université pour leurs aides et leur soutien.*

*Et finalement, nous adressons nos remerciements les plus profonds et les plus distingués à tous ceux qui ont contribué de proche ou de loin à ce modeste travail.*

## Introduction

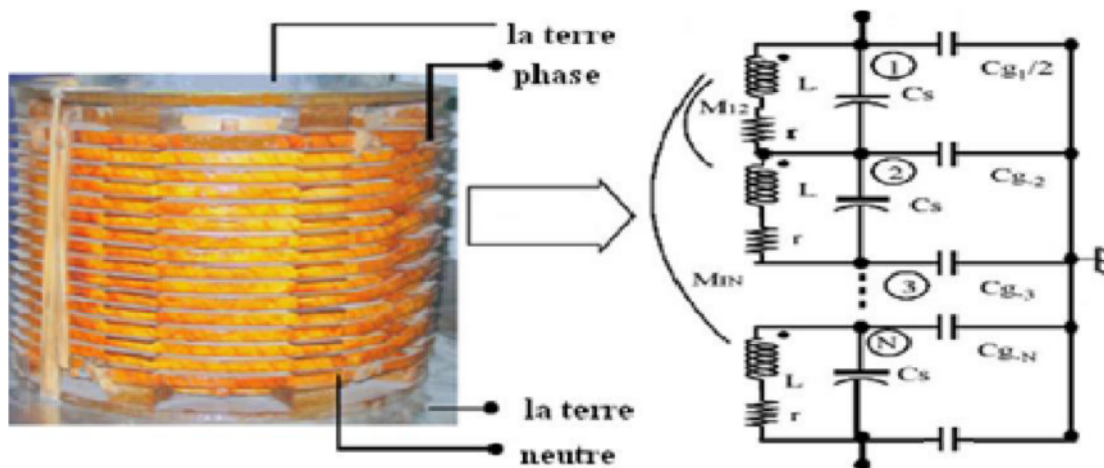
L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle du transformateur de puissance adopté en tenant compte des équations mathématiques du schéma équivalent dit traditionnel du transformateur sans tenir compte du noyau magnétique. Ensuite on présente la procédure de calcul des paramètres des enroulements du transformateur de puissance en vue d'une étude du comportement de ce dernier en régime fréquentiel, afin d'analyser la réponse de l'impédance en fonction de la fréquence, de l'enroulement sain et de l'enroulement défectueux.

L'objectif de ce travail est de déterminer la nature de défaut et sa localisation le long de l'enroulement.

### IV.1 Modèle adopté pour l'enroulement de transformateur

Heller et Veverka [21], ont assimilé le comportement d'un enroulement de transformateur soumis à une onde de choc à celui d'un système de condensateurs et d'inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances, d'inductances et de capacités. Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulation mises en œuvre. On discrétise l'enroulement par un ensemble fini de spires ou galettes ou par des bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres inductances. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse, comme on l'a montré sur la Fig.VI.1.

La Fig.IV.1 représente le schéma équivalent d'enroulements de transformateur



FigIV.1 : Schéma équivalent d'un bobinage de transformateur [22].

**Cs** : capacité série,

**Cg** : capacité shunt,

**r** : résistance,

**L** : l'inductance propre,

**M<sub>1N</sub>**: représenté les inductances mutuelles

## IV.2 Equations du schéma équivalent adopté

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la figure IV.1 nous permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courants de l'enroulement, dans ce qui suit on donnera un exemple d'un enroulement discrétisé en 6 élément et le raisonnement serait le même pour une discrétisation en n éléments, cependant le choix est limité à 6 puisque après ce nombre la précision de calcul reste sensiblement constante [23].

### IV.2.1 Equations des tensions :

$u_0$  et  $i_0$  sont respectivement la tension appliquée et le courant à l'entrée de l'enroulement soumis à cette dernière

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

Avec  $r_g$  la résistance interne de générateur.

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

$$u_1 - u_2 - ri_1 = l_s \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + M_{15} \frac{di_5}{dt} + M_{16} \frac{di_6}{dt}$$

$$u_2 - u_3 - ri_2 = l_s \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + M_{25} \frac{di_5}{dt} + M_{26} \frac{di_6}{dt}$$

- **Généralisation :**

Pour  $1 \leq k \leq 6$

$$u_k - u_{k+1} - ri_k = l_s \frac{di_k}{dt} + \sum_{m=1}^6 M_{km} \frac{di_m}{dt} \quad \text{Avec } m \neq k \quad (\text{IV. 2})$$

### IV.2.2. Equations des courants :

Au nœud (1) à l'entrée du transformateur on a :

$$i_0 = i_1 + i_{cs} + i_{cg/2} \quad (\text{IV. 3})$$

$$i_0 - i_1 = i_{cs} + i_{cg/2}$$

Avec

$$i_{cs} = c_s \frac{d(v_0 - v_1)}{dt} \quad (\text{IV. 4})$$

$$i_{cg/2} = c_{g/2} \frac{d(v_0)}{dt} \quad (\text{IV. 5})$$

En introduisant (4) et (5) dans (3) on obtient

$$i_0 - i_1 = \left( c_s + c_{g/2} \right) \frac{dv_0}{dt} - c_s \frac{dv_1}{dt}$$

Au nœud (2) correspondant à la tension on a 2 u :

$$i_1 - i_2 = -c_s \frac{dv_0}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{dv_1}{dt} - c_s \frac{dv_2}{dt}$$

- **Généralisation :**

Pour  $0 \leq k \leq 6$

$$i_k - i_{k+1} = c_s \frac{du_k}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{du_{k+1}}{dt} - c_s \frac{du_{k+2}}{dt} \quad (\text{IV. 6})$$

### IV.2.3 Représentation matricielle des équations du modèle

Après avoir établi les équations régissant le schéma équivalent d'une phase du transformateur, et après l'intégration des équations (2) et (6) on obtient :

$$\int_0^t (u_k - u_{k+1}) dt = \sum_{j=1}^{2n} M_{kj} + R_k \int_0^t i_k \quad (\text{IV.7})$$

Pour les courants :

$$\int_0^t (i_k + i_{k+1}) dt = c_s u_k - c_s u_{k+1} \quad (\text{IV. 8})$$

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

$$U = c^{-1} \int_0^t \Delta I dt \quad (\text{IV. 9})$$

$$I = M^{-1} \int_0^t (\Delta U - RI) dt \quad (\text{IV. 10})$$

Dont :

$$\Delta I = (I_k - I_{k+1}) \text{ et } \Delta U = (U_k - U_{k+1}) \quad (\text{IV. 11})$$

U et I sont les vecteurs des tensions et des courants

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

[K] et [L] sont respectivement les matrices des capacités et des inductances des enroulements.

$$[K] = \begin{bmatrix} c_g + c_{g1}/2 & -c_s & \dots & \dots & 0 \\ -c_s & 2c_s + c_{g2} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \vdots & 2c_s + c_{gN} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{12} & L_2 & \dots & M_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{1N} & M_{2N} & \dots & L_N \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$



### IV.3 Caractéristiques électriques et géométriques de l'enroulement étudié :

Dans le cadre de cette étude, on s'est intéressé à un enroulement d'un transformateur étudié par K. Ragavan et al [24]. L'enroulement étudié comporte 10 disques, chaque disque contient 20 tours de diamètre moyen 200 mm

La capacité au sol ( $C_g, \text{eff} = 5.6 \text{ nF}$ ) a été mesurée par un pont de tension résiduelle à 1 kHz, alors que la résistance ( $R_{ac} = 8 \Omega$ ) a été mesurée par un multimètre numérique, et l'inductance équivalente mesurée est égale  $L_{eq} = 6.98 \text{ mH}$ .

L'algorithme d'identification conçu par les auteurs a convergé pour un nombre de cellule de discrétisation égale à (06) et une constante de distribution initiale de tension  $\alpha$  égale à 7,4833.

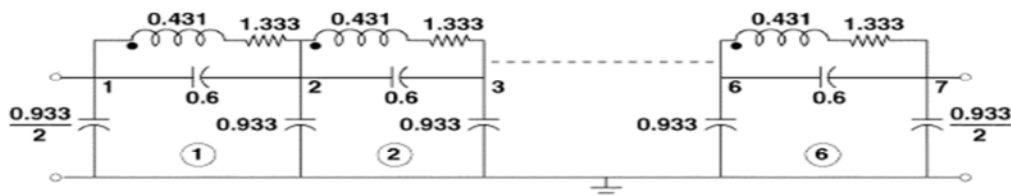
### IV.4 Synthétisation du circuit de référence

Les mesures des inductances propres et mutuelles sont données par [24]. sont regroupées dans le tableau suivant :

| $l_s$  | $m_1$  | $m_2$  | $m_3$  | $m_4$  | $m_5$  |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.4310 | 0.2392 | 0.1435 | 0.0947 | 0.0612 | 0.0496 |

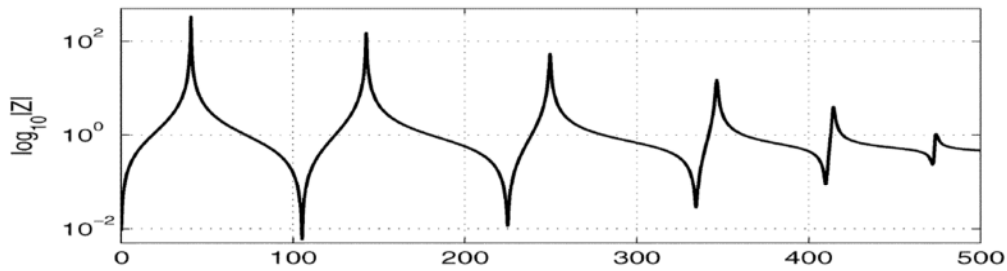
**Tableau IV.1 :** l'inductance propre et mutuelle de référence, Les valeurs en mH.

Les valeurs mesurées des inductances propres, mutuelles, les résistances et les capacités shunte- série, sont représentées dans le schéma de référence [24]:



**FigIV.2 :** schéma de référence. [24]

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence est illustrée par la fig. (IV.3).



**FigIV.3** : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence. [24]

Les fréquences normale en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit (scnf) sont illustrées dans tableau (IV.2)

| Ocnf (kHz) | Scnf (kHz) |
|------------|------------|
| 40.3       | 105        |
| 143        | 223        |
| 250.6      | 336        |
| 346        |            |

**Tableau IV.2** : fréquences normale en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit (scnf).

[24]

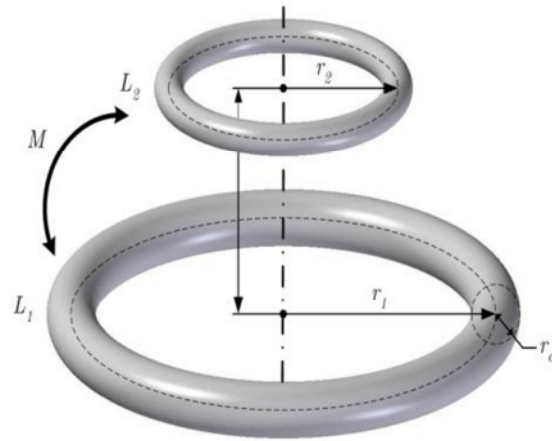
## IV.5 Calcul des paramètres du modèle adopté

### IV.5.1 Détermination des paramètres du schéma équivalent

- Calcul les inductances propres et mutuelles

Le calcul des inductances propres et mutuelles d'un enroulement quelconque représente schématiquement par 2 spires de rayons  $r_1$  et  $r_2$  respectivement, la distance entre ces 2 spires  $r$ . La formule IV.14 dite de Newman nous permet de calcule le différence inductance existent entre ces deux spires

$$M_{1.2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{dl_1 dl_2}{r} \quad (IV.14)$$



**FigIV.4** : Calcul des inductances propres et mutuelles. [2]

$L_1, L_2$  : Longueur de spire,  $r_1, r_2$  : rayon,  $M$  : mutuelle

Pour notre cas ou l'enroulement est discrétisé en 6 éléments, après la méthode de la formule IV.14, les valeurs des inductances propres et les mutuelles calculées selon sont regroupées dans le tableau IV.3 :

| $l_s$  | $m_1$  | $m_2$  | $m_3$  | $m_4$  | $m_5$  |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.4407 | 0.2203 | 0.1469 | 0.1102 | 0.0881 | 0.0734 |

**Tableau IV.3** : l'inductance propre et mutuelle calculées, Les valeurs en mH.

L'inductance totale équivalente de l'enroulement s'écrit comme suit :

$$L_{eq}(calculé) = NL_i + 2 \sum_{i=1}^{N-1} (N - 1) M_{i,i+1} \quad (IV. 15)$$

N étant le nombre d'élément de discrétisation (N=6)

Donc :  $L_{eq} = 7.18 \quad [mH]$

- **Calcul des capacités shunt  $c_g$ , séries  $c_s$  et la capacité équivalente  $c_{eq}$**

Les capacités shunt  $c_g$ , et séries  $c_s$ , sont déterminées à partir de la valeur de la capacité au sol mesurée et les valeurs de nombre d'éléments et de la constante de distribution initiale de la tension déduite par l'algorithme d'identification. [24]

$$C_g = \frac{C_{g,eff}}{N} = 0.9333 \quad [nF]$$

$$C_s = \frac{C_{g,eff} \cdot N}{\alpha^2} = 0.6 \quad [nF]$$

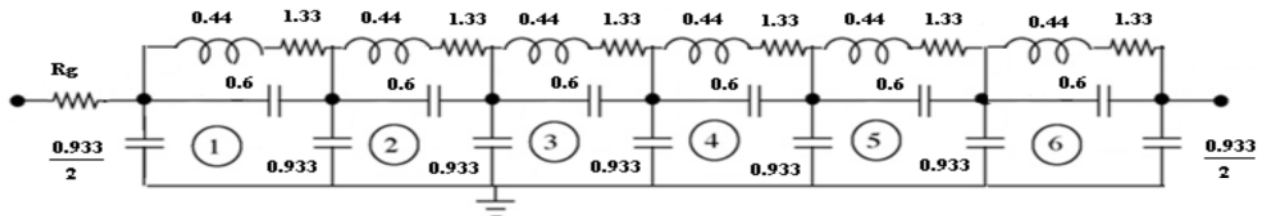
$$C_{eq} = \frac{C_g}{2} + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_{g+\frac{1}{\frac{1}{C_s}+\dots}}}} = 0.8829 \quad [nF]$$

- **Calcul de la résistance r**

Les résistances  $r$ , sont déterminées à partir de la valeur de la résistance mesurée et les valeurs de nombre d'éléments de discrétisation, déduite par identification

$$r = \frac{R_{dc}}{N} = 1.333 \quad [\Omega]$$

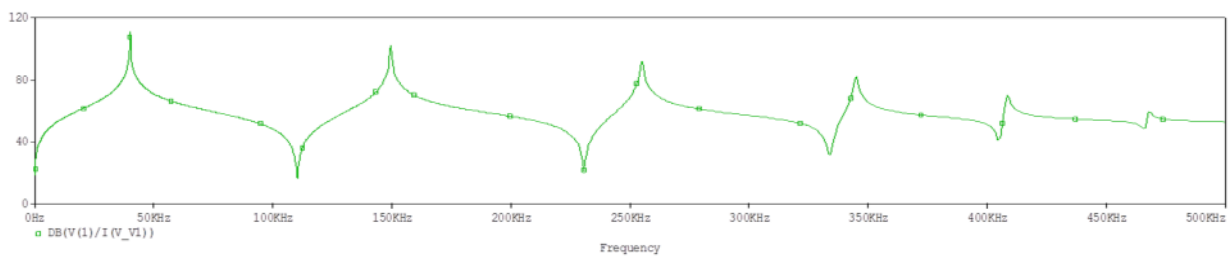
Le schéma suivant représente l'enroulement du transformateur dont les paramètres sont calculés par la méthode présentée ci-dessus :



FigIV.5 : schéma de l'enroulement obtenu par calcul.

## IV.6 Validation du modèle à paramètres calculés

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence est donnée par la figure IV.6.



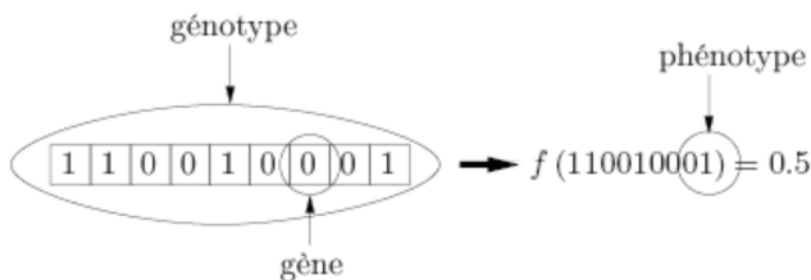
FigIV.6: La variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

## IV.7 Les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques sont dans la famille des algorithmes métaheuristiques dont le but d'obtenir une solution convenable dans un temps acceptable, et de concevoir des systèmes artificiels possédant des propriétés similaires aux systèmes naturels, voici quelques mots de vocabulaire relatifs à la génétique :

- *Individu* : correspond au codage sous forme de gènes d'une solution potentielle à un problème d'optimisation.
- *Génotype* ou *chromosome* : c'est une autre façon de dire « individu ».
- *Gène* : un chromosome est composé de gènes. Dans le codage binaire, un gène vaut soit 0 soit 1.
- *Phénotype* : Chaque génotype représente une solution potentielle à un problème d'optimisation. La valeur de cette solution potentielle est appelée phénotype.

Tous ces éléments sont illustrés à la figure suivante :

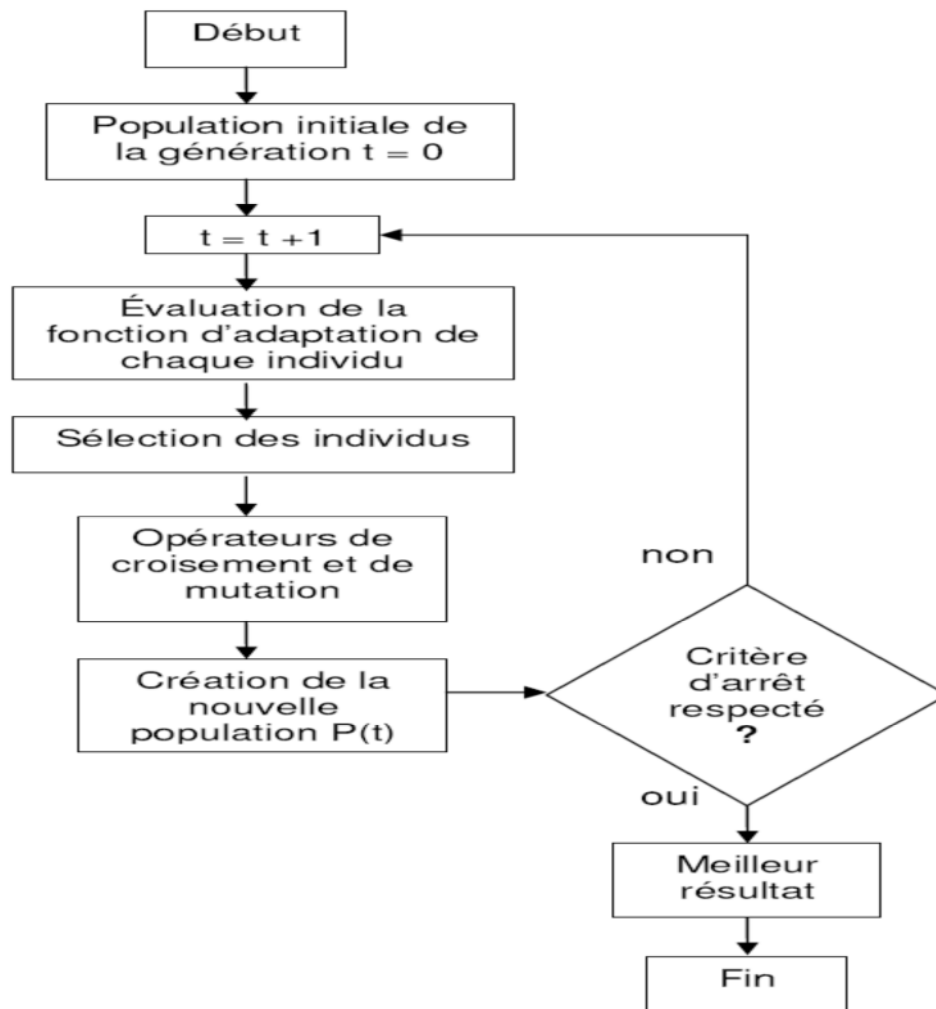


**Figure IV.7** : le vocabulaire des algorithmes génétiques.

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivantes : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population  $P(t)$  et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération  $(t)$  à la génération  $(t+1)$ , chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt.

L'AG présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents.

L'organigramme suivant représente les différents étapes suivies dans un code des AG



Après avoir utilisé l'algorithme génétique adopté à notre étude, les valeurs des inductances propres et les mutuelles obtenues sont regroupées dans le tableau IV.4 :

| $l_s$ | $m_1$ | $m_2$ | $m_3$ | $m_4$ | $m_5$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.451 | 0.243 | 0.154 | 0.114 | 0.088 | 0.079 |

**Tableau IV.4 :** l'inductance propre et mutuelle obtenir par AG, Les valeurs en mH.

Le schéma suivant représente l'enroulement du transformateur dont les paramètres sont identifiés en utilisant les AG :

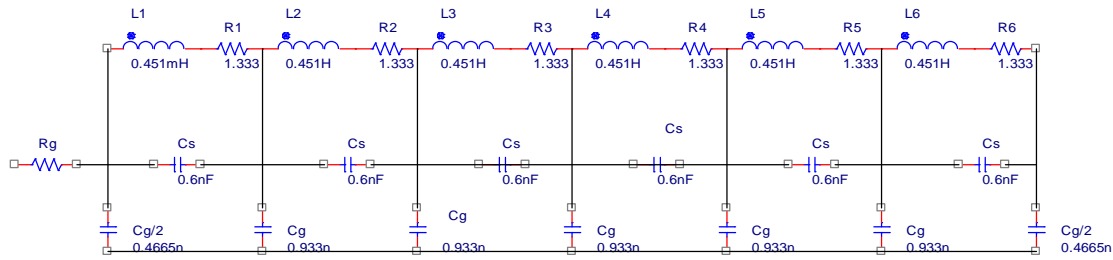
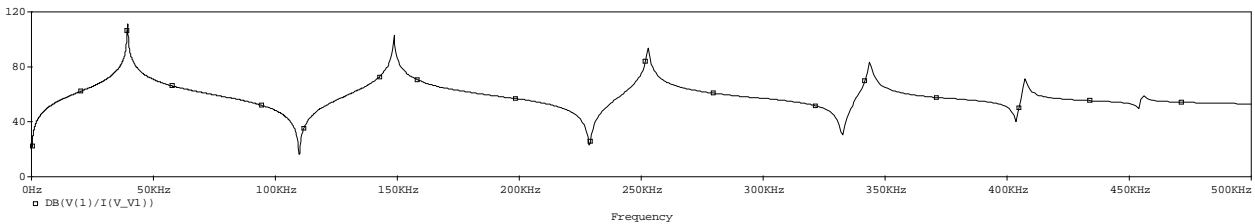


Fig. IV.8 Schéma de l'enroulement identifié par L'AG

**IV.8 Validation du modèle à paramètres à partir de l'algorithme génétique :**



FigIV.9 : schéma de l'enroulement obtenu par L'AG.

Le tableau IV.4 représenté La comparaison des fréquences normales en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit (scnf) obtenues par le modèle de référence, mesuré, calculé et celui obtenu à partir de l'algorithme génétique

| Les valeurs de référence |            | Les valeurs mesurées   |            | Les valeurs calculées  |            | Les valeurs de l'AG    |            | Erreur* |
|--------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|---------|
| Ocnf (kHz)               | Scnf (kHz) | Ocnf (kHz)             | Scnf (kHz) | Ocnf (kHz)             | Scnf (kHz) | Ocnf (kHz)             | Scnf (kHz) |         |
| 40.3                     | 105        | 40.48                  | 105.19     | 40.087                 | 110.408    | 39.903                 | 109.144    | <5%     |
| 143                      | 223.8      | 142.58                 | 224.79     | 149.624                | 230.675    | 149.194                | 229.435    |         |
| 250.6                    | 336        | 249.42                 | 334.44     | 255.27                 | 334.195    | 253.226                | 333.065    |         |
| 346                      |            | 346.41                 | 410.09     | 345.144                | 404.675    | 344.350                | 403.629    |         |
|                          |            | 414.34                 | 472.42     | 408.319                | 465.586    | 408.468                | 454.589    |         |
| $L_{eq} = 6.98[mH]$      |            | $L_{eq} = 7.03[mH]$    |            | $L_{eq} = 7.18[mH]$    |            | $L_{eq} = 7.562$       |            |         |
| $C_{eq} = 0.8819 [nF]$   |            | $C_{eq} = 0.8819 [nF]$ |            | $C_{eq} = 0.8819 [nF]$ |            | $C_{eq} = 0.8819 [nF]$ |            |         |

Tableau IV.5 : la comparaison des fréquences normale en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit (scnf) de modèle de référence, mesuré et de modèle calculé et de L'AG

- L'erreur est calculée selon la formule suivant :

$$* \text{erreur } \% = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur estimée}}{\text{valeur mesurée}} \times 100 \quad (\text{IV.16})$$

D'après cette comparaison on a constaté que l'erreur entre les deux approches n'excède pas 5%, ce qui valide notre démarche.

## IV.9 Localisation des défauts de long de l'enroulement

### IV.9.1 les différents défauts étudiés

Après avoir validé le modèle adopté par 2 approches différentes, nous allons exploiter pour une étude de diagnostic 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 les spires ou élément.
- Ouverture d'une partie de l'enroulement.
- Variation de capacité .

### IV.9.2 études la réponse fréquentielle de l'impédance

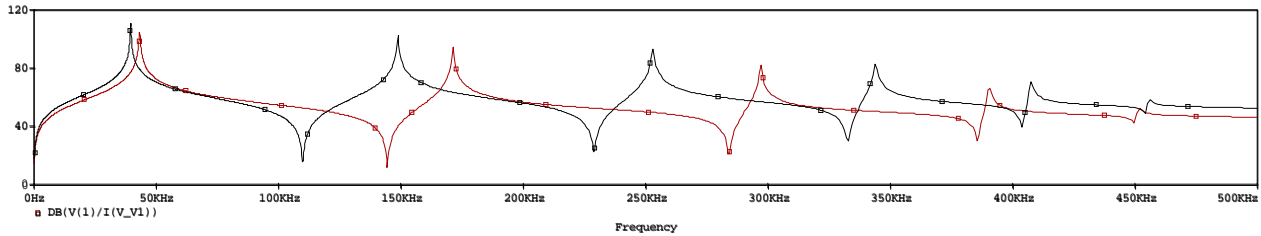
#### IV.9.2.1 Défauts entre spires

Les défauts entre spires de l'enroulement correspondent au mode de défaillance le plus fréquent et également le plus difficile à détecter [24]. Ils résultent de la dégradation locale de l'isolant du conducteur, par contrainte thermique ou diélectrique. La manifestation immédiate se réduit à une faible augmentation du courant primaire, du fait de la modification du rapport de transformation d'une part, et de l'apparition d'un phénomène de spire en court-circuit sur l'enroulement concerné.



**a) court-circuit entre les spires**

La figure suivante représente la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement présentant un défaut de court-circuit entre deux éléments adjacents 1 et 2 superposé avec celle d'un enroulement sain.



**FigIV.10 :** Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre les 2 éléments 1 et 2 et un enroulement sain.

- Court-circuit entre les éléments 1 et 2
- Enroulement sain

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

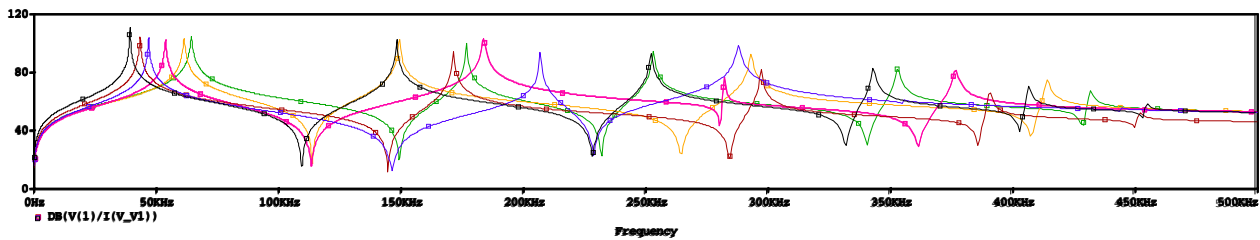
| enroulement sain |           | enroulement c-circuit |           | Décalage  |           |
|------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ)        | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ)             | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 39.903           | 109.144   | 43.451                | 144.212   | 3.548     | 35.068    |
| 149.194          | 229.435   | 171.370               | 284.274   | 22.176    | 54.839    |
| 253.226          | 333.065   | 297.166               | 385.484   | 43.94     | 52.419    |
| 344.350          | 403.629   | 390.725               | 449.999   | 46.375    | 46.37     |

**Tableau VI.6 :** Comparaisons entre l'enroulement sain et de c-circuit (1 et 2) éléments

● **Interprétation des résultats :**

A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un court-circuit entre les 2 éléments voisins 1 et 2, nous avons observés un déplacement des fréquences (ocnf) et de (scnf) d'environ 40 et 50khz respectivement. La déformation de l'impédance commence à apparaitre à partir de 5khz. Dans le but de localiser le point de défaut court-circuit entre élément adjacent nous avons simulé le déplacement du point de court-circuit.

La figure suivante représente les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit



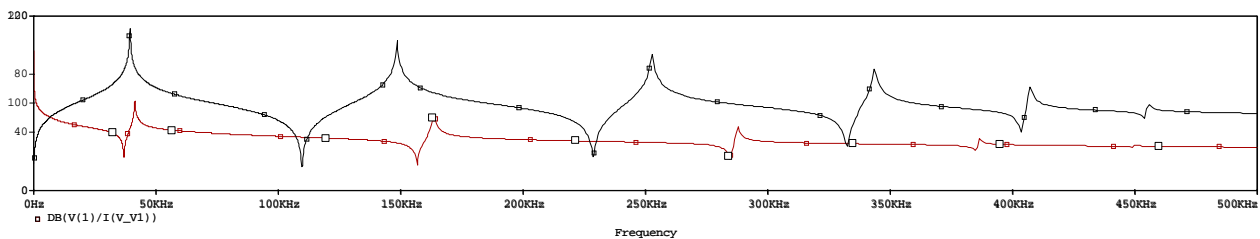
**Fig. IV .11:** les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit entre élément et celle de l'enroulement sain.

- Enroulement sain
- Enroulement en c-circuit (1-2)
- Enroulement en c-circuit (2-3)
- Enroulement en c-circuit (3-4)
- Enroulement en c-circuit (4-5)
- Enroulement c-circuit (5-6)

Nous avons constaté que les (ocnf) et (scnf) dévient de 10kHz avec le déplacement du point de défaut.

### b) Ouverture de spires

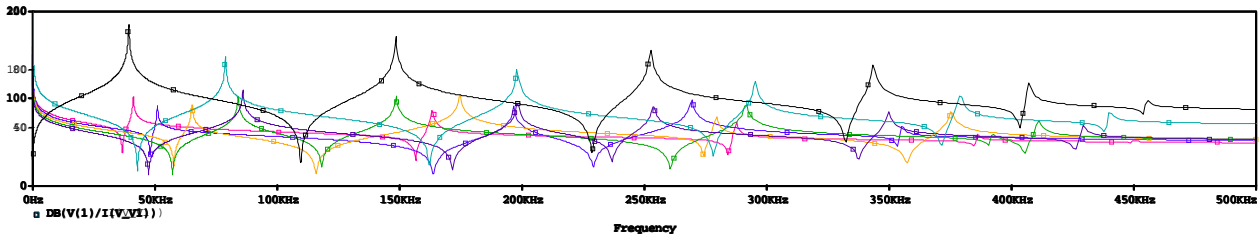
La figure suivante représente la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire entre deux éléments adjacents 1 et 2 superposé avec celle d'un enroulement sain



**FigIV.12 :** comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 1<sup>er</sup> élément et un enroulement sain.

- Enroulement sain
- Ouverture de 1ere spire

La figIV.13 représente la comparaison entre la réponse fréquentielle d'un enroulement sain et l'ouverture des éléments (1, 2, 3, 4,5et6).



**FigIV.13:** Comparaison des empreintes des enroulements affectés par ouvertures de circuit et celle d'un enroulement sain.

- Enroulement sain
- Ouverture de 1<sup>ère</sup> spire
- Ouverture de 2eme spire
- Ouverture de 3eme spire
- Ouverture de 4eme spire
- Ouverture de 5eme spire
- Ouverture de 6eme spire

Les résultats obtenus représentent dans le tableau suivant :

| enroulement sain |           | Enroulement en ouverture de spire |           | Décalage  |           |
|------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ)        | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ)                         | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 39.903           | 109.144   | 41.495                            | 37.068    | 1.595     | 72.076    |
| 149.194          | 229.435   | 163.307                           | 156.675   | 14.113    | 72.76     |
| 253.226          | 333.065   | 288.307                           | 284.677   | 35.081    | 48.388    |
| 344.350          | 403.629   | 386.694                           | 385.081   | 42.344    | 18.548    |

**Tableau IV .7** Comparaison entre enroulement sain et de ouverture de 1ère élément

Le tableau suivant représente le différent résultats entre les impédances :

| enroulement sain |                  | enroulement en ouverture de spire |                  | La différence d'impédance |                  |
|------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| Zmax( $\Omega$ ) | Zmin( $\Omega$ ) | Zmax( $\Omega$ )                  | Zmin( $\Omega$ ) | Zmax( $\Omega$ )          | Zmin( $\Omega$ ) |
| 111.227          | 17.154           | 98.5                              | 44.626           | 12.727                    | 27.472           |
| 103.183          | 24.356           | 87.024                            | 29.898           | 16.159                    | 5.542            |
| 90.82            | 30.334           | 73.321                            | 37.5             | 17.499                    | 7.166            |
| 83.360           | 40.480           | 58.577                            | 47.866           | 24.783                    | 7.386            |

**Tableau IV.8** Comparaison entre enroulement sain et de ouverture de 1ère bobine (l'impédance)

- **Interprétation des résultats :**

Après cette investigation, nous avons remarqué que  $z(f)$  se déforme à partir 0HZ comparativement à la réponse de l'enroulement sain, et à fréquence 0HZ l'impédance présente un ocnf.

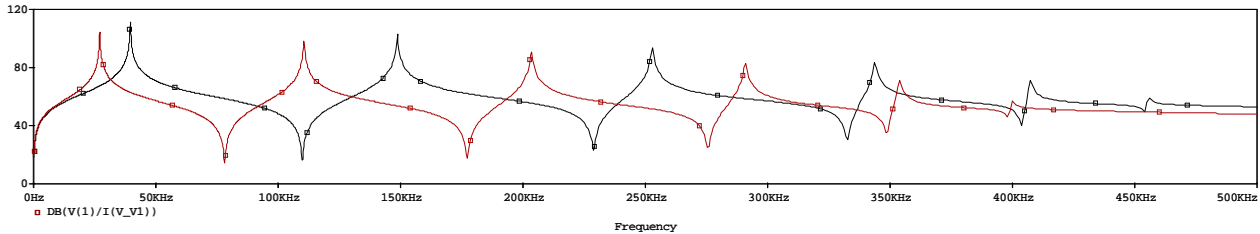
La comparaison entre ocnf et scnf des enroulements sains et présents une ouverture au niveau du 1<sup>er</sup> élément, montre que les ocnf et scnf associée à l'enroulement défectueux se décalent d'une manière significative de celle d'enroulement sain.

On a également remarqué que les fréquences ocnf et scnf se décalent en fonction de déplacement de défaut d'environ 10KHZ par élément.

**c) Variation de capacité (dégradation de l'isolement) :**

- **Augmentation de capacité longitudinale  $C_S$**

La figIV.14, représenté la comparaison entre la réponse fréquentielle de l'enroulement sain et un enroulement présentant une augmentation de capacité  $C_S$



**FigIV.14 :** comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une augmentation de capacité longitudinale ( $C_S$ ) .

- Enroulement sain
- Augmentation de capacité  $C_S$

Les résultats obtenus représentent dans le tableau suivant

| enroulement sain |           | enroulement en augmentation des capacités ( $C_S$ ) |           | Décalage  |           |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ)        | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ)   | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 39.903           | 109.144   | 27.416  | 78.163    | 12.487    | 30.981    |
| 149.194          | 229.435   | 110.408   | 177.419   | 38.786    | 52.034    |
| 253.226          | 333.065   | 203.629   | 275.807   | 49.597    | 57.258    |
| 344.350          | 403.629   | 291.072   | 348.790   | 53.278    | 54.839    |
| 408.468          | 454.589   | 353.629   | 397.983   | 54.839    | 56.606    |

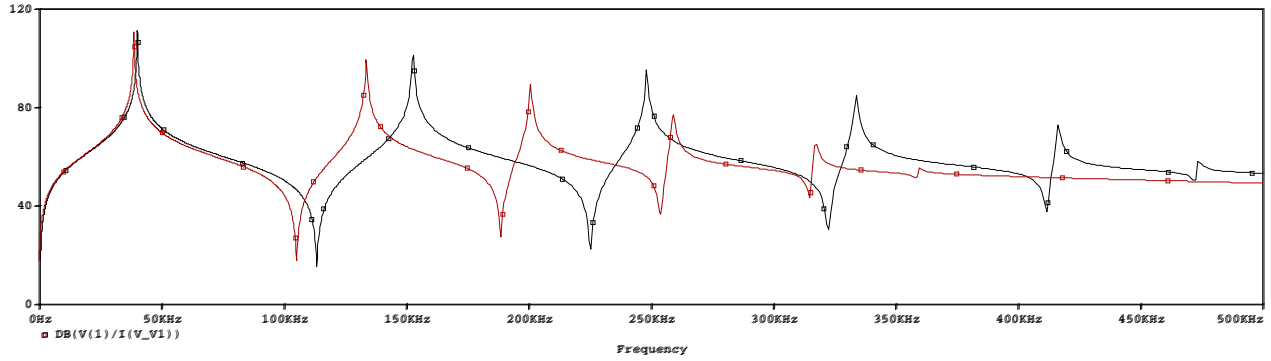
**Tableau IV.9 :** comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une augmentation des capacités ( $C_S$ )

- **Interprétation des résultats**

D'après la signature de l'impédance de l'enroulement qui a une variation de la capacité longitudinale en remarque que les ocnf et scnf se décalent vers la gauche d'environ 50KHZ.

- **Augmentation de capacité transversale  $C_g$**

La figIV.14, représenté la comparaison entre la réponse fréquentielle de l'enroulement sain et un enroulement présentant une augmentation de capacité ( $C_g$ )



**FigIV.15** : comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une augmentation de capacité transversale ( $C_g$ ) .

- Enroulement sain
- Augmentation de capacité  $C_g$

Les résultats obtenus représentent dans le tableau suivant

| enroulement sain |           | enroulement en augmentation des ( $C_g$ ) |           | Décalage  |           |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ)        | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ)                                 | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 39.903           | 109.144   | 38.637                                    | 104.713   | 1.293     | 4.431     |
| 149.194          | 229.435   | 133.87                                    | 188.307   | 15.324    | 41.128    |
| 253.226          | 333.065   | 201.201                                   | 254.350   | 52.025    | 78.715    |
| 344.350          | 403.629   | 259.27                                    | 315.325   | 85.08     | 88.304    |

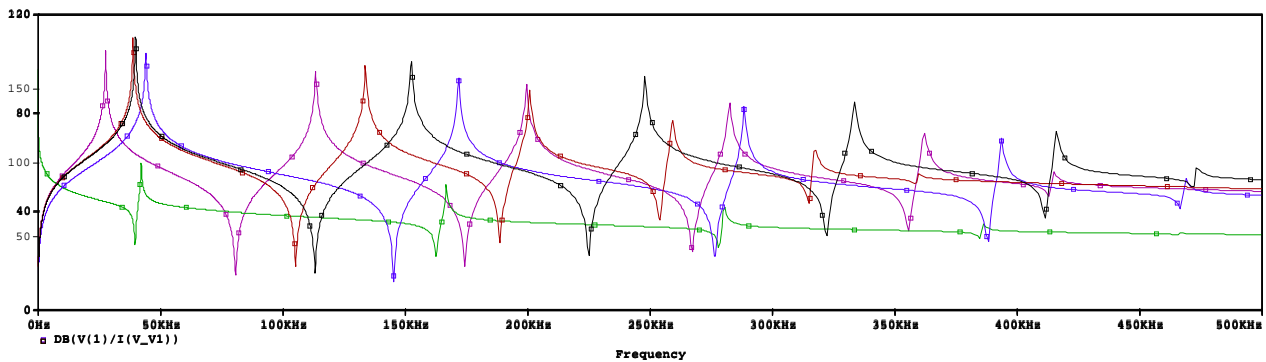
**Tableau IV.10** : comparaison de la réponse fréquentielle entre un enroulement sain et une augmentation des capacités ( $C_g$ )

- **Interprétation des résultats**

D'après la signature de l'impédance de l'enroulement qui a une variation de la capacité ( $C_g$ ) en remarque que les  $\omega_{cnf}$  et  $\omega_{scnf}$  se décalent vers la gauche, et le défaut apparait a partir de 150KHZ.

- **Comparaison entre les défauts et enroulement sain**

La figIV.16 représenté la comparaison entre enroulement sain et tous les défauts



**FigIV.16** : représenté la comparaison entre transformateur sain et tous les défauts

- Enroulement sain
- Ouverture de spire
- Augmentation de  $C_g$
- Augmentation de  $C_s$
- Court-circuit entre élément adjacent

- **Interprétation des résultats**

A partir de comparaison entre les défauts et enroulement sain nous avons exprimés les conclusions suivant :

- Court-circuit : le défaut apparait à partir de 5KHZ avec décalage de 40KHZ pour  $\omega_{cnf}$  et de 50KHZ pour  $\omega_{scnf}$ .
- Ouvrage de bobine : le défaut apparait à partir de 0KHZ et On remarque que les fréquences  $\omega_{cnf}$  et  $\omega_{scnf}$  se décalent en fonction de déplacement de défaut d'environ 10KHZ par élément.

- Augmentation de  $C_s$ : le défaut apparait à partir de 3KHZ avec décalage à gauche de 60KHZ pour ocnf et de 70KHZ pour scnf
- Augmentation de  $C_g$ : le défaut apparait à partir de 105KHZ avec décalage à gauche

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons identifié le paramètre de l'enroulement, pour cela nous avons utilisé deux méthodes, la première est axée sur un calcul analytique des inductances et la seconde est une identification à partir de la mesure pour les AG.

Nous avons vérifié que la seconde méthode utilisée est plus rapide est plus efficace, c'est pour cette raison qu'on l'adopte le modelé dont les paramètres sont calculées par les AG en vue du diagnostic de défaut le long de l'enroulement.

D'après la simulation effectuée nous avons constatés que l'analyse fréquentielle de l'impédance peut être un outil de détection de la nature et localisation d'un défaut qui survient le long de l'enroulement.



## CONCLUSION GENERALE

Les transformateurs sont des machines électriques statiques très utilisés dans tous les domaines de l'électricité, cependant cette machine peut présenter des défaillances à cause de certains facteurs intrinsèques ou extrinsèques.

Pour assurer une longue durée de vie du transformateur, le diagnostic et la maintenance sont des éléments indispensables durant son exploitation.

Afin de maîtriser les techniques de diagnostic ainsi que le fonctionnement des transformateurs, plusieurs modèles mathématiques ont été développés.

Le modèle que nous avons jugé le plus adéquat pour notre étude est celui basé sur discrétisation de enroulement par une cascade de cellules comportant les inductances propres et mutuelle et les différentes capacités, car il permet de traduire les différents phénomènes qui se produisent le long d'enroulement du transformateur.

Notre travail consiste à identification des paramètres du modèle choisi de cette machine, pour cela nous avons utilisé deux méthodes : la première est un calcul analytique des inductances et la seconde est calcul numérique par algorithmes génétiques.

La méthode proposée a été ensuite testée sur un enroulement de transformateur de puissance les conclusions suivantes sont tirées :

- Court-circuit : le défaut apparaît à partir de 5KHZ avec décalage de 40KHZ pour ocnf et de 50KHZ pour scnf.
- Ouverture de bobine : le défaut apparaît à partir de 0HZ et On remarque que les fréquences ocnf et scnf se décalent en fonction de déplacement de défaut d'environ 10KHZ par élément.
- Augmentation de  $C_s$ : le défaut apparaît à partir de 3KHZ avec déplacement à gauche de 60KHZ pour ocnf et de 70KHZ pour scnf.

## Conclusion Générale

---

- Augmentation de  $C_g$ : le défaut apparaît à partir de 105KHZ avec décalage à gauche.  
Comme perspectives pour ce travail, nous proposons les points suivants :
  - ✓ Tenir compte du noyau afin d'avoir un modèle complet du transformateur.
  - ✓ Faire des mesures au laboratoire sur un transformateur réel afin de valider les résultats théoriques.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Audrey BOURGEOIS, «Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance», institut national polytechnique de Grenoble. Thèse de doctorat.
- [2] Anthony LEFEVRE, «contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs», université de Nantes, Thèse de doctorat.
- [3] Tai Chee Kheng «Impact of Moisture on the Strength of Paper- Insulated Conductor» Department of Computer Science & Electrical Engineering The University of Queensland, St. Lucia, Brisbane, Queensland 4072 Australia, 20 October 2000.
- [4] SHIH -HUA (Patrick) Kuo «Diagnostics of Transformer Condition by Polarization Current and Oil Conductivity Measurements» Undergraguade Thesis, School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland, October 2002.
- [5] C.Andrieu, E. Dauphant D. Boss, « A Frequency-Dependant Model For a MV/LV Transformer» International Conference on Power Systems Transients (IPST), Budapest, Hungary, June 20-24, 1999.
- [6] B.Gustavsen, A. Semlyen. « Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients ». IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.
- [7] T.Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, «Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies», IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
- [8] MUFIDZADA N.A, OTMANE-CHRIF T, «Etude de l'Influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur», IEEE conference Porto page1-23, 2009.
- [9] Xose M. L.F and Casimiro A.M., « Computation method for transients in power transformers With lossy windings» IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, N°. 3, March 2009, pp 1863-1866.
- [10] MERLET.R, « Technologie d'électricité générale et professionnelle », édition Dunod paris, 1969.

- [11] M.J. Manyahi, M. Leijon, R. Thouttappillil, «Transient response of transformer with XPLE insulation cable winding design», *Electrical power & energy systems*, Vol 27 pp. 69-80
- [12] B.Gustavsen, A. Semlyen. « Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients ». *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 3, July 1998.
- [13] N.Aouchar, C.Bekhaled « Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur », *Projet de fin d'études*, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.
- [14] M. Belkacem « Comportement de l'huile de transformateur 'Borak 22' sous tension alternative 50 Hz », *Mémoire de Magister*, Département du Génie Electrique, Option : Réseaux Electriques et Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Soutenu publiquement le 16/05/2007.
- [15] OMICRON electronics « FRAnalyzer Manuel d'utilisation »Référence -VESD0662 Version du manuel : FRA.FR.1, 2006.
- [16] E. Cottens « *Introduction à la FRA* », SONEGAZ, DEPT GRTE Formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance, Janvier 2008.
- [17] ELECTRA articles : 237 Avril 2008 Brochure Thématique GT A2.26.
- [18] A.Morched, L.Marti, J Ottevangers« A high frequency transformer model for EMTP ». *IEEE Transaction on Power Delivery* Vol. 8, No. 3, July 1993.
- [19] S. Boudraa «Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », *Mémoire de Magister*, Université de Batna, 2005.
- [20] ANDRIANIRINA RAKOTOMALALA «Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences», *Thèse de Doctorat*, L'école centrale de Lyon, 1992.
- [21] Gueller.B, Veverka.A, «Processus impulsionnelles dans les machines électriques», Energya, Moscou, 1973.
- [22] L. Satish, Subrat K. Sahoo, « Locating faults in a transformer winding», HV Lab, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560012, Karnataka, India.
- [23] Otmane-Cherif T, N.Mufidzada, N.Benamrouche «Influence of the Number of the nodes in the Windings Equivalent circuit o the Surge voltages in transformers», *International Review on Modelling and Simulation*, Italy, Vol. 1, N°2, pp 78-84, October 2008.

[24] K. Ragavan and L. Satish, «Localization of Changes in a Model Winding Based on Terminal Measurements», IEEE transaction on power delivery ,vol.22,NO.3, july 2007.

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

***CHAPITRE I***  
***GENERALITES SUR LES***  
***TRANSFORMATEURS***

***CHAPITRE II***  
***TECHNIQUE DE***  
***DIAGNOSTIQUE DES***  
***ENROULLEMENTS DE***  
***TRANSFORMATEUR***



***CHAPITRE III***  
***ETUDE ET***  
***MODELISATION***  
***D'UN ENROULMENT***

***CHAPITRE IV***  
***LOCALISATION DE***  
***DEFAUT DANS LES***  
***ENROULLEMENT DE***  
***TRANSFORMATEUR DE***  
***PUISSENCE***

***CONCLUSION***

***GENERALE***

# ***BIBLIOGRAPHIE***

## Introduction

Les transformateurs sont des machines électriques statiques dont la fonction est d'élever ou d'abaisser les valeurs de la tension et de l'intensité d'entrée. Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance, en transformant les valeurs de la tension et l'intensité auxquelles, est abordable techniquement et économiquement le transport depuis les centres de production aux centres de consommation.

Comme premier chapitre, nous avons fait une description générale sur les transformateurs citant les différents composants et puis nous avons distingué et défini les types de cette machine.

### I.1 Le rôle d'un transformateur

Un transformateur électrique est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. Il est constitué d'un noyau ferromagnétique, sur lequel sont bobines deux enroulements.

L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique. [1]

### I.2 Principe de fonctionnement

#### I.2.1 Transformateur parfait ou idéal

On appelle transformateur idéal un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels.

Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances. Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux magnétique sont négligées, le rapport du nombre de spires primaires ( $N_1$ ) au nombre de spires secondaires ( $N_2$ ) détermine totalement le rapport de transformation du transformateur.

[1]

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1)$$

Avec  $U_1$  la différence de potentiel aux bornes du primaire, et  $U_2$  la différence de potentiel aux bornes du secondaire.

Les pertes étant négligées, la puissance est transmise intégralement.

Si on note  $I_1$  le courant du primaire et  $I_2$  le courant du secondaire, on a :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1.2)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} \quad (1.3)$$

### I.3 Description d'un transformateur

Dans le cas d'un transformateur monophasé, le circuit magnétique, formé de tôles magnétiques empilées, porte deux enroulements conducteurs en cuivre. [1]

#### a- Le circuit magnétique

Il est composé essentiellement de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, contenant 3% de silicium.

Le circuit magnétique est formé de deux parties dans le but de faciliter la mise en place lors de la construction : le noyau et les culasses.

Le noyau, de sections carrées ou circulaire suivant le type de transformateur et la forme adoptée pour les bobines, est constitué de tôles mises en paquets de cinq à dix millimètres d'épaisseur.

Des canaux de refroidissement à l'intérieur des noyaux sont prévus sur les gros transformateurs. Les culasses sont situées au-dessus et en-dessous des noyaux et permettent de fermer le circuit magnétique.

Elles sont imbriquées dans les tôles magnétiques du noyau. [2]

### **b- Les enroulements**

Ils sont constitués de fils conducteurs en cuivre isolés entre eux par du papier Kraft, dénommé papier d'enrubannage ou de guipage. Les enroulements du primaire et du secondaire sont rassemblés autour du même noyau pour limiter les fuites magnétiques.

Chaque enroulement du primaire doit être correctement isolé des enroulements du secondaire. De ce fait, des écrans protecteurs (généralement en carton) sont disposés entre les enroulements.

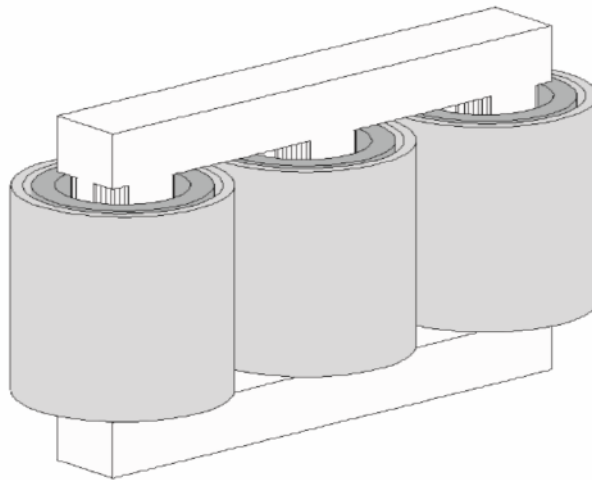
Des cales, en bois ou en bois lamellé bakéliné, sont disposées entre chaque enroulement ainsi qu'entre les bobines et le circuit magnétique, de manière à obtenir un ensemble très rigide et ainsi limiter les contraintes mécaniques. Des canaux verticaux sont aménagés entre les cales pour permettre un bon refroidissement par circulation du liquide caloporteur à travers la bobine.

## **I.4 Les transformatrices hautes tensions**

Il existe deux technologies de transformateur utilisées dans la haute tension : la technologie «colonne» et la technologie «cuirassé».

### **I.4.1 Transformateur à colonnes**

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mises en jeux.



**Fig. I.1** : Transformateur à colonnes à flux forcé. [2]

Le transformateur triphasé ainsi constitué est donc composé de trois paires de bobinages indépendantes et par la suite connectées entre elles selon différents schémas récurrents. Ces couplages permettent notamment l'adaptation des niveaux de courant et de tension aux caractéristiques nominales du transformateur au sein de son réseau.

On retrouve ainsi des couplages dits en "étoile", en "triangle", ou en "zig-zag", voire d'autres, dérivés de ceux-ci et permettant la compensation de certains courants harmoniques. [2]

### **a- Les Bobinages**

Les enroulements sont conçus par une juxtaposition de couches radiales et successives, composées elles-mêmes de multiples spires jointives ou de feuillards. Pour des contraintes électriques et économiques, les couches extérieures et intérieures sont généralement et respectivement associées aux bobinages haute et basse tensions. Les nombres de spires primaire et secondaire sont quant à eux imposés, par les niveaux de tension utilisés, en corrélation avec la valeur d'induction dans le circuit magnétique, la section de celui-ci, la fréquence et le rapport de transformation.

Ce dernier est ajustable selon les conditions d'utilisation au moyen d'un jeu de prises de raccordement situées à différentes hauteurs du bobinage primaire. [2]

Les conducteurs sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autres pour leurs bonnes propriétés conductive, thermique, massique et économique.



Ils se présentent sous différents aspects selon la puissance du transformateur.

On les retrouve sous la forme de fils massifs, de section circulaire, carrée ou de type méplat, ou encore laminés en fines feuilles.

Pour des gammes de petites puissances, l'emploi de conducteurs filaires et de faibles sections autorise un cintrage plus facile. Les spires s'aménagent alors en sections rectangulaires, agencées le plus proche possible du noyau, afin de minimiser le volume de matériau utilisé.

La topologie de la spire rectangulaire n'est pas envisageable sur certains plus gros transformateurs. En effet, le cintrage important engendrerait des diminutions de section, voire des micros fissures au niveau de coudes.

Des points chauds à ces endroits pourraient alors provoquer une défaillance prématurée des isolants. Le rayon de courbure des conducteurs est pour ces cas plus grand et conduit à des spires de sections circulaires composant un enroulement essentiellement cylindrique.

Dans ces conditions, l'utilisation d'un noyau de type cruciforme limite l'augmentation volumique excessive de matériaux conducteurs. [2]

Lorsque la puissance du transformateur augmente, les flux de fuite magnétique ainsi que la section du conducteur suivent la même évolution.

Par conséquent, à fréquence nominale, le comportement de l'impédance interne du transformateur devient majoritairement inductif. Un compromis fixe alors le dimensionnement des conducteurs ainsi que l'organisation des bobinages.

Ce compromis repose sur une chute de tension acceptable à charge nominale, une limitation du pouvoir de coupure des protections amont, une valeur acceptable du courant d'appel, une densité de courant raisonnable dans les conducteurs, ainsi qu'un refroidissement suffisant des bobinages. [2]

Pour les transformateurs de forte puissance, des tirants permettent de contenir les efforts électrodynamiques intervenant lors de surcharges ou de manœuvres d'enclenchement.

Des brides similaires associées à des plaques de serrage se retrouvent au niveau du circuit magnétique pour en préserver la tenue mécanique et limiter les forces magnétostrictives. [2]

### **b- Le Circuit Magnétique**

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, isolées électriquement entre elles, afin de limiter le développement des courants de Foucault. Leur épaisseur de quelques dixièmes de millimètres ainsi que leurs découpes astreignantes conduisent à un assemblage fastidieux dont dépendent les performances du futur noyau.

Des joints enchevêtrés et orthogonaux effectuent la liaison entre les colonnes et les culasses sur les transformateurs de petite puissance. Des coupes obliques leurs sont préférées pour des transformateurs plus puissants. L'espace délimité par deux colonnes successives et les culasses est dénommé "fenêtre magnétique" et accueille donc les bobinages.

Il existe des circuits à trois colonnes pour un fonctionnement à "flux forcé" ou à cinq colonnes lors d'une utilisation à "flux libre" permettant de réduire la hauteur des culasses pour un volume de fer identique, ce qui facilite notamment le transport. [2]

Les tôles utilisent des matériaux dits de type "doux". Ainsi ils présentent un cycle d'hystérésis peu prononcé, pour réduire les pertes associées.

Dans les dernières décennies, de gros progrès ont été réalisés sur les alliages, pour minimiser les pertes massiques globales malgré des plus grandes valeurs d'induction atteintes. Ainsi l'induction dans le noyau est généralement comprise entre des valeurs de 1.3 à 2 Teslas et le point de fonctionnement se situe alors plus ou moins dans le coude de saturation de la caractéristique d'aimantation du matériau. [2]

### **c- Le Couplage**

Le triangle (D), l'étoile (Y), ou le zig-zag (Z), sont les connexions couramment utilisées dans les réseaux électriques. Plusieurs combinaisons distinctes de ces couplages sont disponibles pour les enroulements primaires et secondaires.

Les plus courantes pour le continent européen sont les couplages  $Yy0$ ,  $Dy11$ ,  $Yz11$ ,  $Yd11$  où le nombre traduit l'indice horaire, image du déphasage entre les tensions primaires et secondaires.

Il en est sensiblement de même pour le continent américain avec des variantes sur les indices horaires utilisés. [2]

Le couplage triangle offre l'intérêt de piéger des harmoniques de séquence homopolaire et ainsi d'empêcher leur propagation sur le réseau électrique.

De plus, en cas de détérioration d'un des enroulements, le transformateur reste opérationnel.

Son fonctionnement, dénommé en "triangle ouvert", ne dispose plus cependant que de 58% de la puissance nominale.

Le couplage étoile permet, quant à lui, de disposer d'un conducteur de neutre. [2]

Lorsqu'il est utilisé au primaire et sans conducteur de neutre distribué, celui-ci peut créer des problèmes lors de l'alimentation de charges déséquilibrées.

Dans ce cas, le point neutre peut se déplacer en entraînant alors des surtensions modérées mais prolongées aux bornes des enroulements.

Le couplage zig-zag est une combinaison des deux précédents couplages.

Il est réalisé grâce à l'utilisation d'enroulements fractionnés, selon un rapport permettant d'ajuster l'indice horaire.

Comme le couplage étoile, un neutre est disponible et par rapport au couplage triangle, les courants harmoniques de séquence homopolaire sont ici directement éliminés.

A l'instar du couplage en zig-zag, il existe également des transformateurs possédant des enroulements multiples, dont une association judicieuse permet un filtrage des courants harmoniques jusqu'à des rangs élevés. [2]

Certaines de ces connexions sont également mises à contribution lors d'applications industrielles spécifiques telles que des transformateurs de mise à la terre.

Les différents types de couplage exposés précédemment sont également applicables à des transformateurs triphasés cuirassés. [2]

#### d- Limitations des Transformateurs à Colonnes

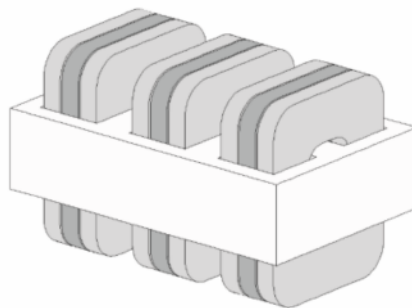
La réluctance du circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grande que celle d'un type cuirassé et diffère selon la phase considérée.

Par conséquent, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. De plus, dans ces transformateurs, l'organisation géométrique employée pour les enroulements provoque un gradient de tension important entre les couches successives.

Les sollicitations diélectriques résultantes sont donc importantes et justifie alors l'utilisation d'une topologie d'enroulement différente pour des niveaux de tension importants. [2]

#### I.4.2 Transformateur Cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement le bobinage, ce qui lui confère un fonctionnement à "flux libre". La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. En contrepartie, le confinement résultant rend plus difficile le refroidissement de l'ensemble. [2]



**Fig I.2 :** Transformateur cuirassé. [2]

Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes, voire dévastateurs de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages. [2]

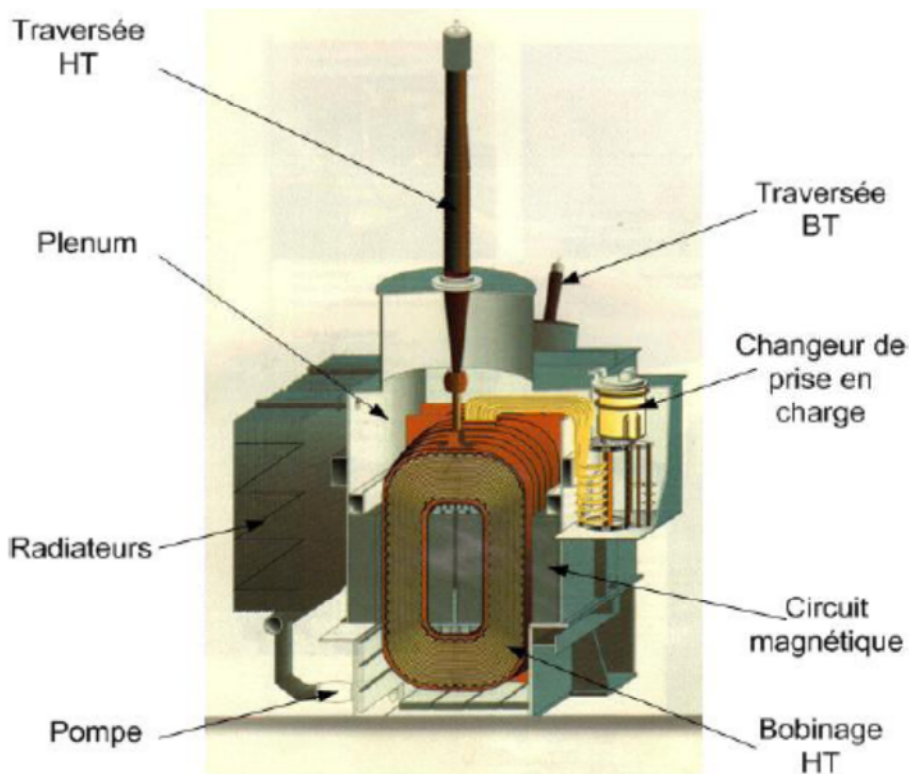
### a- Les Bobinages

Les enroulements sont répartis en plusieurs sous-groupes de bobines. Ces bobines sont appelées "galettes" ou "disques" à cause de leur géométrie en forme de spires concentriques et de faibles hauteurs.

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

### b- La Cuve

En plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Elle épouse naturellement le contour de la partie active et minimise ainsi le volume d'huile donc également les coûts et la masse du transformateur. Enfin, à la base de celle-ci des shunts magnétiques permettent de canaliser partiellement les flux de fuites. [2]



**Fig I.3** : constitution de Transformateur cuirassé. [2]

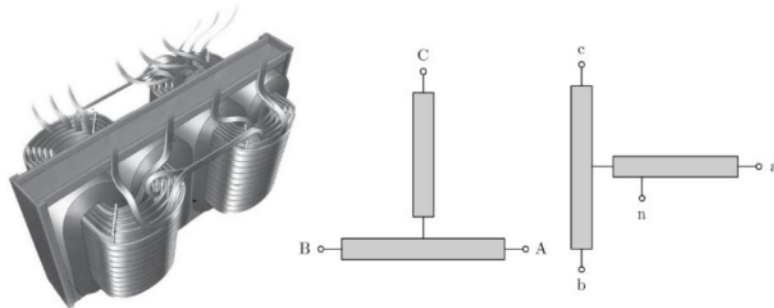
### c- Les Écrans Électrostatiques

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

Les deux types de transformateurs que nous venons de présenter ne sont néanmoins pas les seuls. Ainsi, sur le continent nord-américain, un autre type de transformateur dénommé en "double T" se rencontre dans les réseaux de distribution basse tension. Celui-ci est triphasé mais présente la particularité de n'utiliser que deux noyaux magnétiques distincts. [2]

### 1.4.3 Transformateur en "double T"

Le transformateur en "double T" équivaut à placer en série deux transformateurs utilisant la connexion Scott afin de réaliser une conversion électrique, de triphasée à diphasée et vice versa. Il existe trois types de connexions disponibles selon l'indice horaire souhaité : Tt0, Tt1 et Tt11. [2]



**Fig 1.4** : Transformateur Tt11. [2]

Il est de plus possible de superposer les deux noyaux magnétiques de manière à obtenir un transformateur de type "colonnes" apprécié sous certaines contraintes de pose et d'encombrement.

### **a- Les Bobinages**

Les conducteurs utilisés restent semblables à ceux utilisés sur un transformateur à colonnes. Cependant, chacun des bobinages présente une dissymétrie dans l'imbrication des enroulements primaire et secondaire (figure I.3).

Ce déséquilibre inhérent à la conception se retrouve donc au niveau de l'échauffement du transformateur, ainsi qu'au niveau de ses impédances internes par phase.

L'inégalité est certes faible mais peut engendrer certains désagréments, comme par exemple, un courant de séquence inverse additionnel dans le cas de l'alimentation d'une machine asynchrone, ou encore une différence de la durée d'empiètement par phase lors de l'alimentation de redresseur [2]

Enfin, contrairement à un transformateur triphasé à colonnes ou cuirassé la puissance nominale ne se répartit pas de manière égale sur chacune des phases. Le transformateur en "double T" doit donc être surdimensionné (7.75%) par rapport à la puissance réelle nominale.

### **b- Le Circuit Magnétique**

Un autre mode de conception du circuit magnétique que celui par assemblage de tôles prédécoupées est également possible. Ainsi, chacun des deux noyaux est composé d'un empilement de tôles en ruban formant un double anneau ferromagnétique englobant les bobinages.

Les problèmes d'entrefer inhérents au niveau des jonctions de tôles obliques ou orthogonales que l'on retrouve sur un transformateur "classique" sont ainsi supprimés.

De plus, le flux parcourt toujours le circuit magnétique dans le sens du laminage pour une perméabilité d'usage maximale.

Les pertes à vide sont moindres et donc les coûts d'utilisation réduits. [2]

### **I.4.4 Autres Transformateurs**

Les différents modes de conception présentés précédemment pour ces trois types de transformateur ne leurs sont pas systématiquement réservés.

Il est par exemple possible de rencontrer des transformateurs à colonnes pour lesquels les enroulements sont bobinés en disque, ou encore des circuits magnétiques de transformateurs cuirassés composés de tôles enrubannées.

Quel que soit la topologie de transformateur et malgré tous les efforts des différents manufacturiers, les transformateurs demeurent des équipements imparfaits. Ils sont le siège de pertes qui restent acceptables lors d'un fonctionnement en régime linéaire, mais croissent pour des applications modernes générant des distorsions et des non linéarités.

[2]

## **I.5 L'isolation dans les transformateurs de puissance**

### **I.5.1 Isolation Cellulosique**

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, le papier comprimé, 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.

Dans la plupart des applications industrielles, les isolations cellulosiques sont rarement utilisées en dehors de l'imprégnation avec un autre matériel isolant.

Le but principal de l'imprégnation est de protéger l'isolation diélectrique de la cellulose contre les effets diélectriques de l'humidité absorbée et d'augmenter son BIL (Basic Impulse Level). Pour l'utilisation en basse tension comme dans le cas du fonctionnement de certains moteurs électriques et condensateurs, les papiers isolants sont souvent imprégnés avec de la cire et le vernis.

Quand ils sont utilisés pour l'équipement à haute tension, ils seront imprégnés avec des isolants liquides tels que les huiles diélectriques. [3]



### **I.5.2 Isolation liquide**

L'huile de transformateur est souvent une huile minérale qui est faite d'un mélange d'alcane, de naphènes, 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 lorsqu'elle est parfaitement achevée, peut rapporter les caractéristiques de l'huile minérale aux spécifications exigées. Son rôle fondamental 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 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. [4]

## **I.6 Pertes dans le Transformateur**

### **I.6.1 Les pertes par effet Joule**

Les pertes par effet Joule dans les enroulements sont appelées pertes cuivre. Elles dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse. Avec une bonne approximation, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité. [1]

### **I.6.2 Les pertes magnétiques**

Les pertes dans le circuit magnétique sont également appelées pertes fer. Elles dépendent de la fréquence et de la tension d'alimentation. A fréquence constante, elles peuvent être considérées comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation.

Ces pertes ont deux origines physiques : les pertes par courants de Foucault et les pertes par hystérésis. [1]

### **I.6.3 Mesures des pertes**

Il est possible de mesurer les deux types de perte séparément.

Les pertes par effet Joule sont mesurées quand le transformateur est soumis à un fort courant et une faible tension (pertes magnétiques faibles).

Cela est réalisé par la mise en court-circuit du transformateur (essai en court-circuit) avec une alimentation en tension réduite. Les pertes du transformateur sont alors quasiment égales aux pertes Joules. Les pertes magnétiques sont mesurées quand le transformateur est soumis à une tension élevée et un faible courant (pertes par effet Joule faibles). Cela est réalisé quand le transformateur fonctionne à vide (essai à vide), c'est à dire sans récepteur relié au secondaire. Les pertes du transformateur sont alors quasiment égales aux pertes magnétiques. [1]

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons réalisés une présentation générale sur les transformateurs utilisés dans les réseaux. Dans les réseaux d'exploitation, les transformateurs de puissance sont soumis à des nombreuses contraintes naturelles lors de leur fonctionnement. Une surveillance et une maintenance permanente sont nécessaires pour assurer la fiabilité de leur fonctionnement.

Les différentes méthodes de diagnostic des transformateurs seront développées dans le second chapitre