

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en électromécanique

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance Fiabilité et Qualité

### Thème

# Etude et simulation des défaillances des transformateurs électriques

Présenté et soutenu publiquement par :

Boussaid Mohamed et Benefissa Noureddine

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ARBI MAACHIA	MCB	Université d'Oran2/IMSI	Président
HAIMOUR RACHIDA	MCB	Université d'Oran2/IMSI	Encadreur
AOUIMER YAMINA	MAA	Université d'Oran2/IMSI	Examineur

Année 2020/2021

# Dédicaces

*A celle qui m'a donné la vie, celle qui m'a tout appris à part à vivre sans elle, celle qui m'a épaulée et aidée à mieux avancer, celle qui a su être une amie, une maman exemplaire Elle fait partie de moi, elle est mon âme, mon cœur, ma flamme, mon bonheur, mon sang, mes yeux, mon ange précieux, elle est tout ce que j'ai de plus cher au monde ... Ma raison d'être, ma raison de vivre, près d'elle je serai jusqu'à la dernière seconde ...*

*Celle qui donne un sens à ma vie, ma source de tendresse et d'énergie, l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi ...*

*Sans ces sacrifices et sa patience avec moi je ne serai jamais arrivé là où je suis, sans elle je ne serai personne au moment présent, je ne saurai comment te remercier chère mère. Ce travail est le fruit des sacrifices qu'elle a consentis pour mon éducation et ma formation ...*

*JE T'AIME à l'infini MAMAN ... Que Dieu te procure bonne santé et longue vie ...*

*A celui qui s'est sacrifié jour et nuit pour mon bonheur et mon bien être, mon exemple éternel mon cher père, j'espère rester toujours fidèle aux valeurs morales qu'il m'a transmis. Grâce à lui j'ai appris à vivre positivement, il est pour moi un modèle et une source d'inspiration, Je t'aime de tout mon cœur ... Que Dieu lui procure bonne santé et longue vie ...*

*Notre professeur, Dr Mme Haimour. Merci pour tous les conseils et les astuces que vous nous donnez. Je vous souhaite tout le meilleur dans votre vie, et que Dieu vous bénisse santé et bien-être*

*Sans oublier mon cher camarade et binôme, au début de notre première année j'ai cru rencontrer un nouveau ami à la fin de notre parcours je me suis trouvé un frère ...*

*Aux membres de ma famille et mes amis veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère ...*

*Merci tout le monde...*

**B.MOHAMED**

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être.*

*A mes chers parents, ABI et OMI je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et les prières tout au long de mes études et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Puisse ALLAH, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

*A Notre professeur, Dr Mme Haimour Je vous suis très reconnaissant et je ne vous remercierai jamais assez pour votre générosité, et votre aide précieuse.*

*A DJAMEL, MADJID, LHADI, NAJM et tous mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

*Merci d'être toujours là pour moi ...*

***B.NOUREDDINE***

# Remercîment

*En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant, qui nous a donné le courage, la forcé la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions notre professeur, Dr Mme Haimour Rachida qui a suivi de très près ce travail, pour son aide, ses orientations sa disponibilité et tous les conseils qu'elle nous a prodigués pendant toute la durée de ce travail.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.*

*Nous adressons également un grand merci aux enseignants et à tous nos professeurs qui nous ont permis d'acquérir ce niveau d'instruction.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, de près ou de loin, par un mot ou par un geste, nous exprimons notre très grande reconnaissance à notre famille, à nos proches pour nous avoir encouragés nous vous remercions infiniment.*

## Abréviations & Symboles

$R_{eq}$	Résistance équivalente
$\Phi$	Flux magnétique
$N_1$	Nombre des spires primaires
$I_1$	Courant primaire
$U_1$	Tension primaire
$N_2$	Nombre des spires secondaires
$I_2$	Courant secondaire
$U_2$	Tension secondaire
$m$	Rapport de transformation
OH	Surchauffement
N I	Non identifié
$\cos(\varphi)$	Facteur de puissance
$R_f$	Résistance shunt
$X_m$	Réactance shunt
$Z_{eq}$	L'impédance équivalente
EN	Etats Normale
$X_{eq}$	Réactance équivalente
$P_{cc}$	Puissance en court-circuit
$V_{cc}$	Tension en court-circuit
$I_{cc}$	Courant en court-circuit
$P_{J1}$	Pertes joule au primaire
NR	Non Remarquable
$P_{J2}$	Pertes joule au secondaire
$P_{fer}$	Pertes ferromagnétique
$P_2$	Puissance utile
$\eta$	Rendement
HT	Haute tension
BT	Bas tension
Tc	Transformateur de courant
$\tan(\delta)$	Facteur de dissipation

# Sommaire

Introduction générale .....	1
Chapitre I .....	3
Généralités sur les transformateurs de puissance .....	3
I.1 Introduction .....	3
I.2 Historique .....	3
I.3 Définition de transformateur .....	3
I.4 Principe de fonctionnement.....	5
I.4.1 Schéma électrique équivalent .....	5
I.4.2 Bilan de puissance .....	7
I.4.3 Rendement.....	8
I.5 Utilisations de transformateur de puissance.....	8
I.6 Technologies de construction de transformateur de puissance.....	9
I.6.1 Partie active.....	10
I.6.2 Cuve.....	12
I.6.3 Traversées.....	13
I.6.4 Equipement .....	13
I.7 Exploitations d'un transformateur de puissance.....	16
I.8 Vieillessement .....	16
I.9 Fiabilité d'un transformateur .....	16
I.10 Age du transformateur .....	17
I.11 Conclusion.....	17
Chapitre II.....	18
Les types des transformateurs .....	18
II.1 Introduction.....	19
II.2 Types de transformateur .....	19
II.3 Selon la position des enroulements concernant le noyau .....	19
II.3.1 Type de noyau Transformateur .....	19
II.3.2 Type de coque Transformateur.....	20
II.4 Selon le rapport de transformation .....	21
II.4.1 Transformateurs élévateurs .....	22
II.4.2 Transformateurs abaisseurs.....	22
II.5 Selon la base de l'offre.....	23
II.5.1 Transformateurs monophasés.....	23
II.5.2 Transformateurs triphasés.....	24
II.6 Selon le type de service.....	24

II.6.1 Autotransformateur et transformateur conventionnel .....	24
II.6.2 Les transformateurs de puissance et de distribution.....	26
II.6.3 Les transformateurs de courant et de tension .....	27
II.7 Selon le système de refroidissement.....	28
II.7.1 Transformateur immergé.....	28
II.7.2 Transformateurs secs .....	29
II.8 Autre type de transformateur.....	29
II.8.1 Transformateur d'isolement.....	29
II.8.2 Transformateur d'impédance .....	30
II.9 CONCLUSION .....	31
Chapitre III .....	32
Les défaillances de transformateur électrique .....	32
III.1 Introduction .....	33
III.2 Défauts dans les transformateurs : .....	34
III.3 Type des défauts .....	34
III.3.1 Les surtensions .....	34
III.3.2 Court-circuit.....	35
III.3.3 Surcharges .....	35
III.4 Défauts retenus dans cette étude.....	36
III.4.1 Défaut d'isolement de la partie active .....	37
III.4.2 Amorçage diélectrique entre spires .....	38
III.4.3 Court-circuit entre spires.....	38
III.4.4 Amorçage du corps insérable du régleur en charge.....	38
III.4.5 Décharges Partielles .....	39
III.4.6 Point chaud interne au transformateur.....	39
III.4.7 Coupure du circuit électrique .....	40
III.4.8 Déformation géométrique des enroulements.....	40
III.4.9 Défaillance des traversés (bushings) :.....	41
III.5 Les contraintes du transformateur .....	41
III.5.1 Contraintes diélectriques et surtensions.....	41
III.5.2 Contraintes électrodynamiques et surintensités.....	42
III.5.3 Contraintes électriques : mauvais contacts .....	43
III.5.4 Contraintes thermiques : surcharges, points chauds et vieillissement .....	44
III.5.5 Contraintes électromagnétiques et courants de Foucault.....	46
III.5.6 Contraintes mécaniques : vibrations, fuites et transport.....	47
III.6 Protection et surveillance de transformateur de puissance.....	48
III.6.1 Différents types de protections .....	48

<b>III.7 Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>Chapitre IV .....</b>	<b>53</b>
<b>Modalisation et simulation du défaut de court circuit .....</b>	<b>53</b>
<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.2 Modélisation d'un court-circuit entre spires dans un transformateur de puissance .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.2.1 Modèle d'un transformateur de puissance .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.2.2 Modélisation de court-circuit entre spires.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.2.3 Equation de démarrage.....</b>	<b>63</b>
<b>IV.3 Tension d'alimentation et Couplage Harmonique.....</b>	<b>64</b>
<b>IV.4 Description du dispositif.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.5 Défaut de Court-circuit.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.6 Localisation de la phase en défaut de court-circuit .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.7 Conclusion.....</b>	<b>73</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>75</b>

## Liste des figures

Figure I- 1 Transformateur monophasé.....	3
Figure I- 2 Transformateur triphasé.....	3
Figure I- 3 Symbole de transformateur de puissance.....	4
Figure I- 4 Schéma d'un transformateur monophasé.....	4
Figure I- 5 Schéma d'un transformateur triphasé de type colonne.....	4
Figure I- 6 Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.....	5
Figure I- 7 Schéma électrique monophasé.....	6
Figure I- 8 Schéma de bilan de puissance d'un transformateur.....	7
Figure I- 9 Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique [6].....	8
Figure I- 10 Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.....	9
Figure I- 12 Partie active vue coté BT.....	10
Figure I- 11 Partie active vue coté HT.....	10
Figure I- 13 Enroulement d'un transformateur.....	11
Figure I- 14 La cuve d'un transformateur de puissance.....	12
Figure I- 15 Traverse condensateur.....	13
Figure I- 16 Traversé porcelaine.....	13
Figure I- 17 Changeur de prise en charge.....	14
Figure II- 1 Transformateur de type noyau.....	20
Figure II- 2 Circuit magnétique d'un transformateur de type noyau.....	20
Figure II- 3 Transformateur de type coque.....	21
Figure II- 4 Circuit magnétique d'un transformateur de type coque.....	21
Figure II- 5 Transformateur élévateur.....	22
Figure II- 6 Transformateur abaisseur.....	23
Figure II- 7 Signal et schéma du transformateur monophasé.....	24
Figure II- 8 Signal et schéma du transformateur triphasé.....	24
Figure II- 9 Autotransformateur.....	25
Figure II- 10 Transformateur conventionnel.....	26
Figure II- 11 Transformateurs de courant.....	27
Figure II- 12 Transformateurs de tension.....	28
Figure II- 13 Transformateur immergé dans l'huile.....	28
Figure II- 14 Transformateur sec.....	29
Figure III- 1 Conduction d'un cycle de vie d'un transformateur.....	33
Figure III- 2 Amorçage entre enroulements.....	37
Figure III- 3 Amorçage entre spires, sans court- circuit entre-elles.....	38
Figure III- 4 Court-circuit entre spires.....	38
Figure III- 5 Amorçage du corps insérable d'un régleur en charge.....	38
Figure III- 6 Décharges partielles sur des cales.....	39
Figure III- 7 Point chaud sur le sélecteur d'un régleur en charge.....	39
Figure III- 8 Coupure suite à la fusion d'un conducteur.....	40
Figure III- 9 Déformation mécanique d'un enroulement.....	40
Figure III- 10 Amorçage franc entre spires.....	41
Figure III- 11 Effort électrodynamique franc.....	43
Figure III- 12 Point chaud sur connexion boulonnée.....	44
Figure III- 13 Echauffement excessif d'un enroulement.....	45
Figure III- 14 Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM).....	46
Figure III- 15 Problème de transport.....	47

Figure III- 16 Joint de traversée écrasé	47
Figure III- 17 Schéma de fonctionnement de Relais BUCHHOLZ.	49
Figure III- 18 Protection masse cuve.	50
Figure III- 19 Placement de TC tore.	50
Figure III- 20 Dispositif DGBT	50
Figure III- 21 Eclateur.	51
Figure III- 22 Parafoudre.	51
Figure III- 23 Schéma de fonctionnement de la protection différentielle.	52

Figure IV- 1 Modèle complet du transformateur	55
Figure IV- 2 Découpage des conducteurs en éléments	56
Figure IV- 3 Schéma électrique équivalent pour les enroulements HT et BT [MEZ-2011]	57
Figure IV- 4 Calcul d'inductances de spires circulaires et coaxiales	59
Figure IV- 5 Présentation du défaut sur une bobine	61
Figure IV- 6 Présentation du défaut en deux bobines différentes	62
Figure IV- 7 Dimension du transformateur Source:[E.E.I-2008].	66
Figure IV- 8 Court-circuit entre spires	67
Figure IV- 9 Simulation du cassain pour un transformateur de puissance	69
Figure IV- 10 Simulation d'un court-circuit de 05% de la phase. A	69
Figure IV- 11 Simulation d'un court-circuit de 05% de la phase.B.	70
Figure IV- 12 Simulation d'un court-circuit de 05% de la phase.C.	70
Figure IV- 13 Simulation d'un court-circuit de 80% de la phase.A.	71
Figure IV- 14 Simulation d'un court-circuit de 40% des phases.B. et.C.	71
Figure IV- 15 Simulation d'un court-circuit de 30% phase. A. et 70% phase. B.	72
Figure IV- 16 Simulation d'un court-circuit de 70% phase. B. et 30% phase. C.	72
Figure IV- 17 Simulation d'un court-circuit de 10% phase. A. 60% phase. B. et 40% phase. C.	73

## Liste des tableaux

Tableau I- 1 Essais à vide.....	6
Tableau I- 2 Essai en court-circuit.....	7
Tableau II- 1 Types de transformateur.....	19
Tableau III- 1 Défauts retenus et leurs codes associés.....	36
Tableau IV- 1 Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles.....	64
Tableau IV- 2 Caractéristiques du dispositif Source:[E.E.I-2008]. .....	65
Tableau IV- 3 Dimension géo métrique du transformateur.....	65
Tableau IV- 4 Caractéristique physique des matériaux .....	66
Tableau IV- 5 Différents cas possible pour un défaut de court-circuit d'un transformateur de puissance .....	68

# Introduction générale

# ***Introduction générale***

## **Introduction générale**

Le système énergétique est l'un des systèmes les plus importants et les plus complexes construits par la civilisation humaine. Le système électrique joue un rôle majeur dans la société moderne. Le transformateur est l'un des composants les plus importants de tout système d'alimentation.

L'industrie de l'énergie électrique est habituellement divisée en trois sections fonctionnelles, y compris la production, le transport et la distribution. Les transformateurs de puissance, les changeurs de prises en charge, les disjoncteurs, les transformateurs de mesure, les batteries de sous-station et l'appareillage de connexion sont les principaux dispositifs d'une infrastructure de transport et de distribution qui permettent de transférer l'énergie des centrales électriques au consommateur. Ces dispositifs sont des actifs critiques, s'ils tombent en panne ils peuvent entraîner l'interruption du service de l'approvisionnement en électricité, des risques personnels et environnementaux et des coûts de réparation élevés. Par conséquent, ces actifs critiques doivent être surveillés de près et de manière continue afin d'évaluer leurs conditions d'exploitation et d'assurer leur disponibilité maximale. En particulier, les gros transformateurs de puissance immergés dans l'huile font partie des actifs les plus coûteux des réseaux de transport et de distribution d'électricité.

En termes d'investissement, ces équipements représentent près de 60 % du prix d'un poste de transformation. En conséquence, en tant qu'équipement majeur dans les systèmes électriques, son bon fonctionnement est indispensable pour permettre une exploitation efficace et fiable des réseaux électriques. De cet état de fait et des contraintes économiques actuelles, les compagnies d'électricité sont par conséquent obligées de s'inquiéter de la maintenance des transformateurs de puissance. Pour faire face à ce problème, ces compagnies ont changé leurs stratégies de maintenance et la gestion de ses parcs des transformateurs en abandonnant la maintenance régulière au profit de la stratégie de maintenance centrée sur la fiabilité (maintenance centrée sur la fiabilité RCM), ou la maintenance basée sur l'état de l'équipement (condition basé maintenance), dans le but de prolonger la durée de service des transformateurs.

En d'autres termes, profiter du service des transformateurs jusqu'au dernier moment de leurs vies avec le minimum de maintenance tout en prévoyant leur arrêt. Le but premier de la stratégie de maintenance basée sur l'évaluation de l'état du transformateur est de détecter les tout premiers signes de défauts et de surveiller le développement du vieillissement. Dans cette stratégie, pour faire le diagnostic il faut d'abord que le transformateur présente une anomalie, qui se traduit par des symptômes. Cela se fait à travers les techniques dites « Hors ligne ». Dans le cas de surveillance, les méthodes « On-line » sont utilisées pour répondre aux questions suivantes :

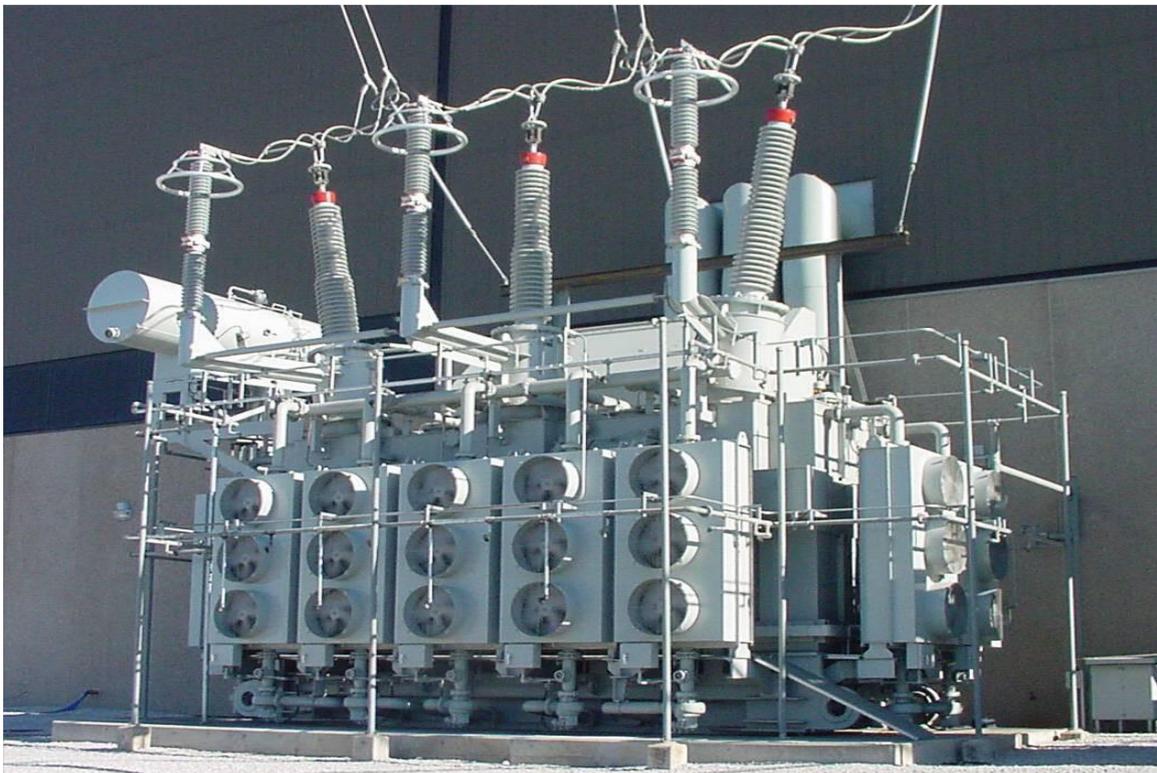
## ***Introduction générale***

1. Est-ce que ça fonctionne correctement ?
2. Y a-t-il un défaut ?
3. Le défaut est-il grave ?
4. Est-ce que le transformateur peut rester en service ?

Des moyens de surveillance et de diagnostic fiables constituent donc un outil économique de planification de l'entretien du réseau électrique. Ces dernières années, des changements et des développements rapides ont été observés dans le domaine de la surveillance et de l'évaluation de l'état des transformateurs. Les performances et la fiabilité des transformateurs peuvent être grandement améliorées en utilisant des systèmes avancés de diagnostic de pannes en ligne et hors ligne. L'analyse de l'huile à l'instar des analyses sanguines pour les êtres humains, notamment celle des gaz dissous représente l'une des techniques les plus précises et les plus riches en information. Elle peut être considérée comme outil de diagnostic Hors ligne à travers une analyse et interprétation détaillée des différents gaz ou on-line en provoquant une alarme lorsque les limites admissibles de la quantité des gaz totale ou individuelle est dépassée. De nos jours, grâce au progrès en matériels informatiques et des logiciels d'exploration de données basés essentiellement sur l'intelligence artificielle, l'analyse approfondie de divers phénomènes affectant le fonctionnement des transformateurs est devenue possible.

# ***Chapitre I***

## ***Généralités sur les transformateurs de puissance***



# ***Généralités sur les transformateurs de puissance***

## **I.1 Introduction**

Le premier chapitre présente d'abord le contexte de l'application des transformateurs de puissance. Ensuite, il y a les principaux composants et leurs appareils de mesure et de protection interne et externe. Ensuite, il y a le fonctionnement du transformateur (vieillesse, vieillissement de fiabilité).

## **I.2 Historique**

En 1820, le physicien danois Hans Christian Oersted découvrit qu'un conducteur transportant un courant électrique génère un champ magnétique. Quelques années plus tard, en 1830, Joseph Henry incarnait les concepts d'induction et d'auto-induction. En 1831, le Britannique Michael Faraday a utilisé un appareil composé d'anneaux de fer et d'enroulements de fil de cuivre isolé dans une série d'expériences. En 1832, Lucien Gaulard (1850-1880), jeune électricien français et chimiste bien formé, offrit à la Compagnie française des électriciens un « générateur secondaire » appelé Transformateur. [1]

## **I.3 Définition de transformateur**

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



**Figure I- 1 Transformateur monophasé.**



**Figure I- 2 Transformateur triphasé.**

# Généralités sur les transformateurs de puissance

## ➤ Symbole de transformateur

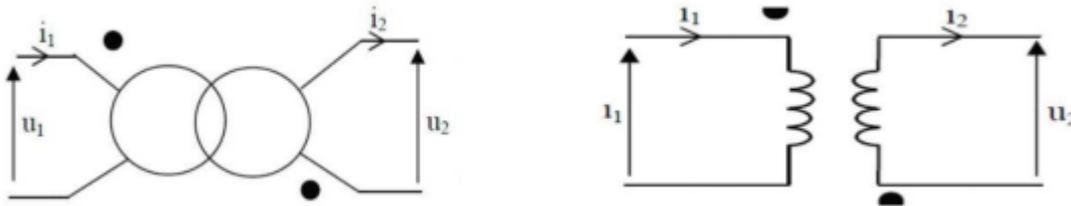


Figure I- 3 Symbole de transformateur de puissance.

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

## ➤ Schéma

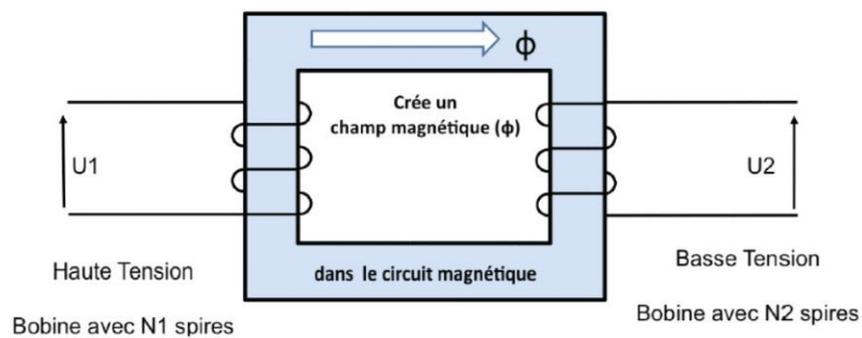


Figure I- 4 Schéma d'un transformateur monophasé.

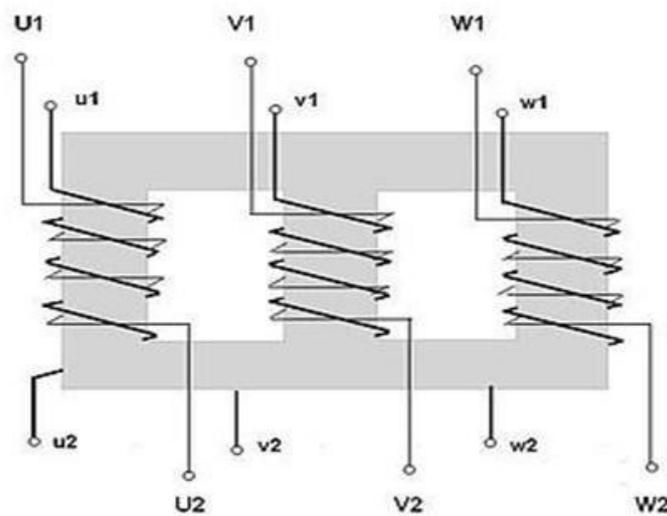


Figure I- 5 Schéma d'un transformateur triphasé de type colonne.

# Généralités sur les transformateurs de puissance

## I.4 Principe de fonctionnement

Un transformateur se compose essentiellement de deux circuits montés sur un circuit magnétique. Un circuit appelé enroulement primaire comprend  $N_1$  spires connectées à une source de tension alternative  $U_1$ . Le courant  $I_1$  traversant cet enroulement est dans le circuit magnétique. Ce flux magnétique induit une force électromotrice dans un deuxième enroulement appelé "enroulement secondaire", et les  $N_2$  spires de cet enroulement présentent une tension  $U_2$  à ses bornes. [4]

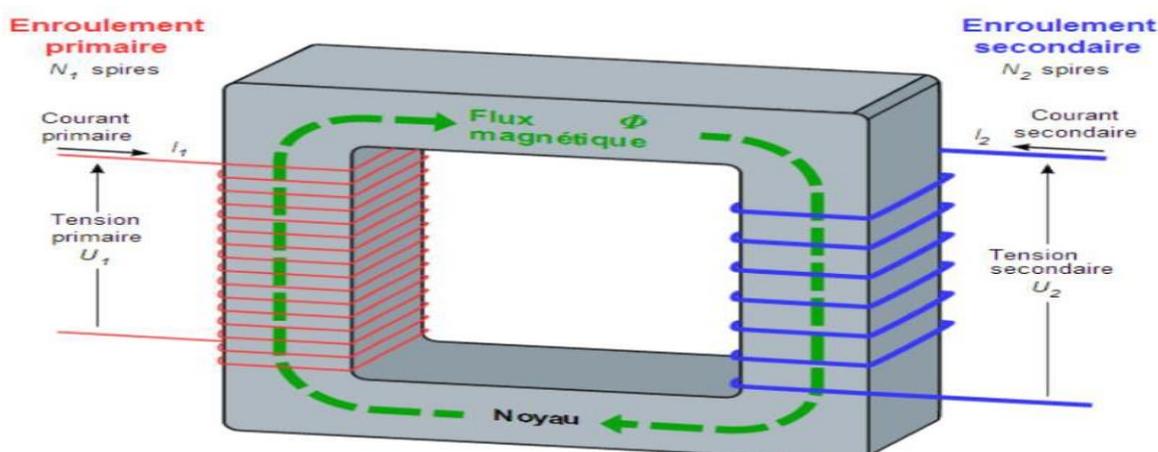


Figure I- 6 Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

Le fonctionnement d'un transformateur électrique se base sur le principe de l'induction magnétique, à savoir : quand un courant électrique passe dans un fil, il génère un champ magnétique autour de lui. Or quand ce champ magnétique se trouve autour d'un autre fil, il génère à son tour un courant électrique à l'intérieur du fil en question. C'est ce qu'il se passe dans un transformateur. Le courant entre dans la première bobine (bobine primaire), puis passe à l'autre (bobine secondaire) par induction magnétique.

C'est le nombre d'enroulements (c'est-à-dire de tours que fait le fil) de chaque bobine qui déterminera si le transformateur augmente ou diminue la tension du courant. Si la bobine primaire a un nombre d'enroulements inférieur à la bobine secondaire, le transformateur augmentera la tension et vice-versa. C'est pour cela que l'on parle de tension primaire et secondaire d'un transformateur, la tension n'étant pas la même à l'entrée de la bobine primaire qu'à la sortie de la bobine secondaire.

### I.4.1 Schéma électrique équivalent

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

#### I.4.1.1 Essais sur les transformateurs

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

## Généralités sur les transformateurs de puissance

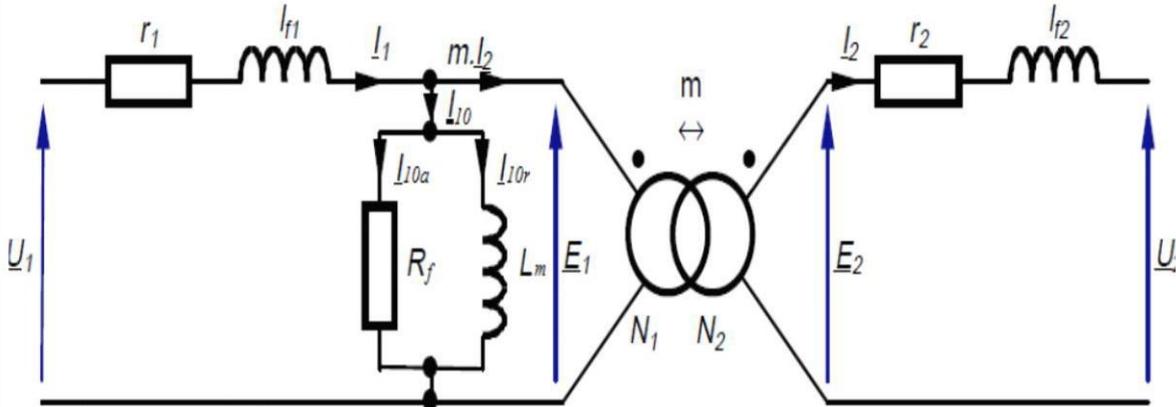


Figure I- 7 Schéma électrique monophasé.

### I.4.1.2 Essais à vide

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

Le montage de mesure utilisé sont résumés dans le tableau (I.1).

	Cas monophasé	Cas triphasé
<b>Circuit de teste</b>		
<b>Facteur de puissance</b>	$\cos \varphi = \frac{P_0}{V_0 I_0}$	$\cos \varphi = \frac{P_0}{\sqrt{3} V_0 I_0}$
<b>Résistance e shunt</b>	$\frac{1}{R_f} = \frac{I_0}{V_0} \cos \varphi$	$\frac{1}{R_f} = \frac{I_0 - phase}{V_0 - phase} \cos \varphi$
<b>Réactance shunt</b>	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_0}{V_0} \sin \varphi$	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_0 - phase}{V_0 - phase} \sin \varphi$

Tableau I- 1 Essais à vide.

### I.4.1.3 Essais en court-circuit

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

# Généralités sur les transformateurs de puissance

Le montage de mesure utilisé sont résumés dans le tableau (I.2).

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

Tableau I- 2 Essai en court-circuit.

Les paramètres équivalent série peuvent être calculés en les ramenant au côté primaire ou secondaire.

## I.4.2 Bilan de puissance

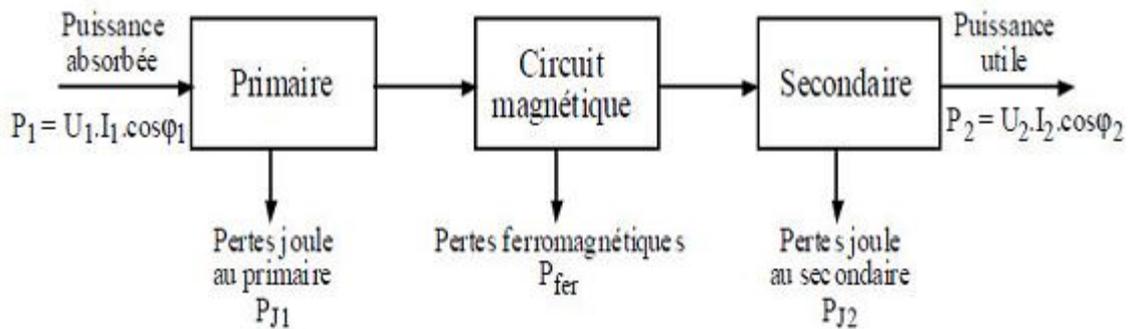


Figure I- 8 Schéma de bilan de puissance d'un transformateur.

Bilan de puissance égale

$$P_1 = P_{j1} + P_{fer} + P_{j2} + P_2$$

# Généralités sur les transformateurs de puissance

## I.4.3 Rendement

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{puissance fournie par le secondaire}}{\text{puissance primaire}}$$

## I.5 Utilisations de transformateur de puissance

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

- La sortie des centrales électriques,
- Transport d'énergie électrique,
- Distribution d'énergie électrique,
- Les applications industrielles (transformateur de four et sous-station ferroviaires).

Un transformateur peut assurer des fonctions:

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

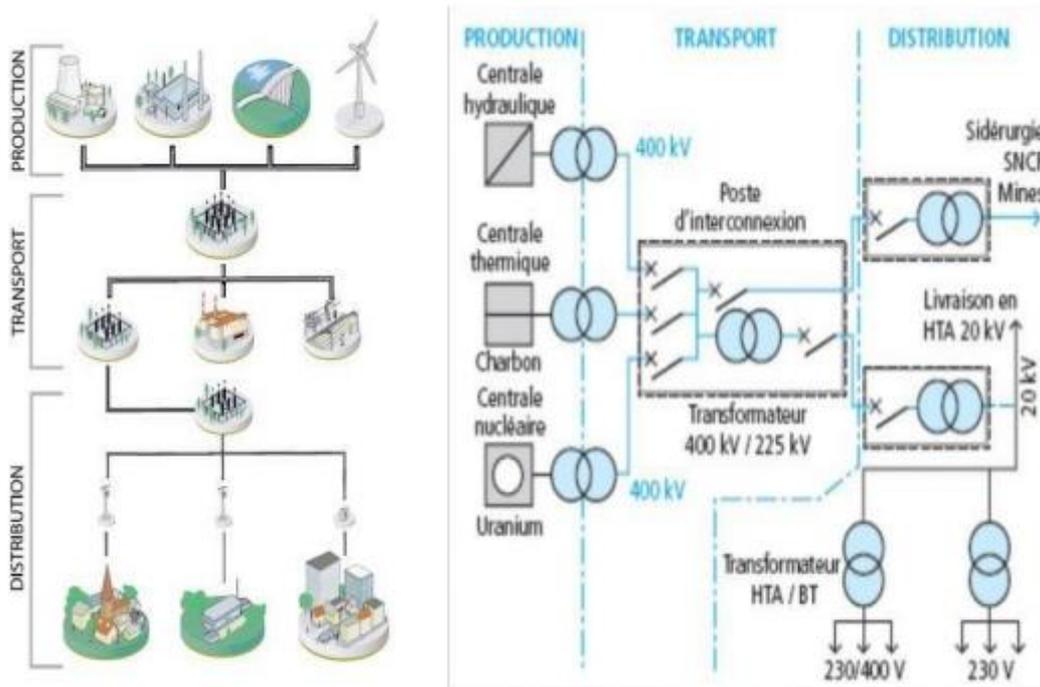


Figure I- 9 Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique [6]

# Généralités sur les transformateurs de puissance

## Le transformateur dans le réseau électrique

On a trois types de transformateur électrique important pour transporter l'énergie

### •Transformateur élévateur :

Les générateurs fournissent de l'énergie à des tensions, généralement de quelques kilovolts. Pour réduire les pertes sur les lignes, la tension doit être la plus élevée possible, afin de réduire les courants de passage, généralement à 400 kV ou 220 kV.

### •Transformateurs abaisseurs :

Ils adaptent la tension du réseau électrique de transport, 220 kV par exemple, aux différentes tensions des réseaux de distribution : 90 kV, 63 kV et 30 kV principalement. Ces transformateurs sont situés dans des postes de transformation.

### •Transformateurs de distribution :

Ces transformateurs de faible puissance (quelques centaines de kVA) sont en général utilisés pour abaisser la tension 30 kV du réseau de distribution et l'adapter à un utilisateur final à des fins domestiques ou industrielles, le plus souvent en 400 V triphasé. A la différence des transformateurs précédents, plutôt imposants, ces transformateurs sont construits en série, et ont tendance à être remplacés lorsqu'ils sont défectueux.

## I.6 Technologies de construction de transformateur de puissance

La figure I10 suivant montre la constitution d'un transformateur de puissance triphasé. [7]

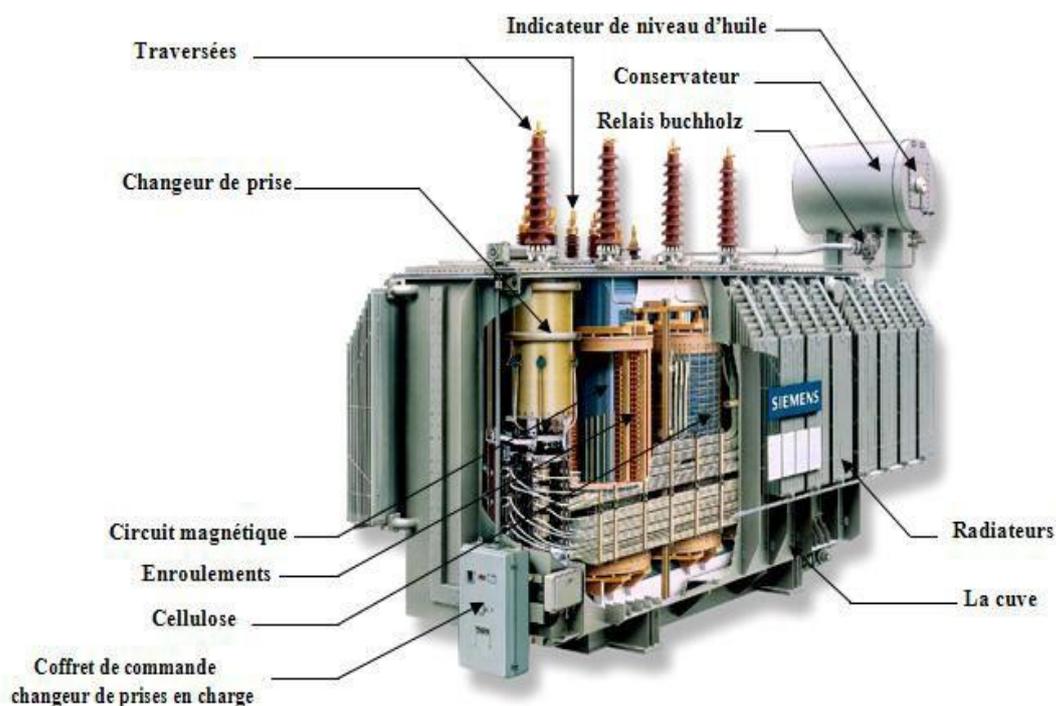


Figure I- 10 Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.

# Généralités sur les transformateurs de puissance

## I.6.1 Partie active

Elle est composée principalement de trois éléments (circuit magnétique, enroulements, isolants) Comme il est indiqué sur les figures I.11 et I.12 suivantes :

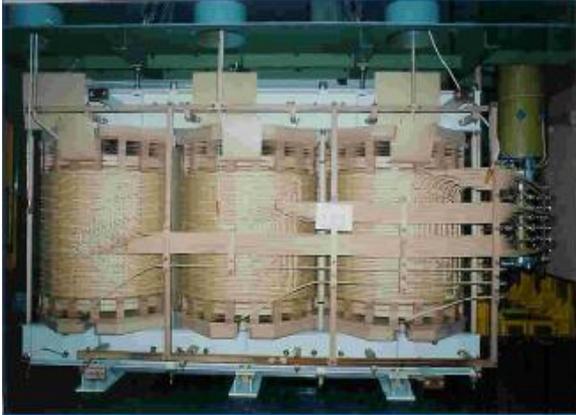


Figure I- 11 Partie active vue côté HT



Figure I- 12 Partie active vue côté BT

### I.6.1.1 Circuit magnétique

#### a) Constitution :

Son rôle essentiel est de canaliser le flux.

Pour augmenter la perméabilité magnétique et donc la diminution de la f.é.m et du courant nécessaire pour maintenir le flux voulu ; on utilise un acier spécial: l'acier au silicium (à grains orientés). Pour diminuer les pertes par courants de Foucault on utilise des tôles isolées les unes des autres :

- Par phosphatation : dépose par traitement thermochimique
- Par vernis synthétique : application d'une résine en solution dans l'alcool qui se polymérise et durcit sous l'action de la chaleur

Résistance de l'isolant : 10 à 20 C/cm<sup>2</sup>

Epaisseur de la tôle : 0.30 à 0.35 mm

#### b) Types de circuits magnétiques :

Dans le circuit magnétique on distingue les colonnes sur lesquels reposent les bobines, de culasses fermantes le circuit.

Suivant l'emplacement de ces deux composants on distingue trois types de circuits

- Circuit magnétique cuirassé : on aura
  - Circuit à 5 colonnes : on aura le flux magnétique de retour à un module très faible devant
  - Circuit à 3 colonnes : c'est le type le plus utilisé.

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 permettant la compensation de certains courants harmoniques.

# Généralités sur les transformateurs de puissance

## I.6.1.2 Enroulements

Sur la Figure I.14 on peut observer un enroulement seul, avec plusieurs spires qui



Figure I- 13 Enroulement d'un transformateur

seront connectées par la suite aux connexions finales du transformateur.

## I.6.1.3 Isolation

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

### A. Isolation cellulosique

Les matériaux isolants solides appliqués tels que 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.

### B. Isolation liquide

L'huile du 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. Le raffinage lorsqu'il est parfaitement achevé, peut rapporter les caractéristiques de l'huile minérale aux spécifications exigées. Le rôle fondamental de l'huile est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement du transformateur. Les huiles modernes procurent plus de stabilité à la dégradation, et elles sont dépourvues du soufre en corrosif.

## ***Généralités sur les transformateurs de puissance***

Au plus, elles devraient avoir les caractéristiques suivantes:

- Point d'inflammabilité élevée,
- Point de congélation bas,
- Rigidité diélectrique élevée,
- Basse viscosité,
- Bonne résistance à l'électrification statique.

### **I.6.2 Cuve**

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

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

- Réservoir d'huile,
- Assurer la résistance en court-circuit,
- Maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuite produit par le courant dans les enroulements. [8,9]



**Figure I- 14 La cuve d'un transformateur de puissance.**

# Généralités sur les transformateurs de puissance

## I.6.3 Traversées

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

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

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



Figure I- 16 Traversé porcelaine



Figure I- 15 Traverse condensateur

## I.6.4 Equipement

### I.6.4.1 Changeurs de prise

Le changeur de prise en charge (figure. I 17), permet de modifier le rapport de transformation lorsque le transformateur est en fonctionnement, c'est un régulateur de tension.

Le changeur de prises en charge est utilisé pour le réglage en charge du rapport de tension sans interruption de service. C'est l'équipement le plus contraint du transformateur et il est la principale cause de défaillance des transformateurs en exploitation.

## Généralités sur les transformateurs de puissance



Figure I- 17 Changeur de prise en charge

### I.6.4.2 Refroidissement

De nombreux aspects sont à prendre en compte pour la conception des transformateurs :

- Circuit magnétique,
- Enroulements,
- Conducteurs,
- Isolation,
- Système de refroidissement.

Par ailleurs, le transformateur est indissociable d'autres composants qui doivent être conçus en même temps comme le changeur de prises, les traversées isolées, les protections et leurs capteurs. Le transformateur doit être capable de résister sans dommage à la fois aux aléas du réseau électrique : surtensions, courts-circuits, courants d'enclenchement et surcharges ; et aux autres contraintes mécaniques liées le tout dans des conditions météorologiques diverses.

Les transformateurs ont le défaut d'être bruyants, de pouvoir prendre feu et de causer des pertes, même si elles sont faibles en proportion. Les recherches actuelles tentent de remédier à ces problèmes et de réduire leurs pertes, leur bruit et leur impact écologique général. Les nouveaux types d'huile et les matériaux supraconducteurs sont des pistes à l'étude.

Les transformateurs ont le défaut d'être bruyants, de pouvoir prendre feu et de causer des pertes, même si elles sont faibles en proportion. Les recherches actuelles

## ***Généralités sur les transformateurs de puissance***

tendent de remédier à ces problèmes et de réduire leurs pertes, leur bruit et leur impact écologique général. Les nouveaux types d'huile et les matériaux supraconducteurs sont des pistes à l'étude.

Il faut comprendre que même si les transformateurs de puissance ont des rendements allant de 99,5 à 99,8 %, les puissances les traversant sont tellement grandes que les pertes représentent dans l'absolu de grandes valeurs. Ainsi pour un transformateur de 800 MVA, on a, avec 99,8 % de rendement, des pertes de 1,6 MW, sous forme de chaleur difficile à évacuer.

Ainsi, un système de refroidissement est toujours mis en place pour maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier en fonction des paramètres suivants :

- Pertes à évacuer,
- Température ambiante extérieure,
- Contraintes de bruit,
- Contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur,
- Et bien sûr le coût.

### **I.6.4.3 Conservateur**

Le conservateur est un réservoir d'huile surplombant le transformateur. La température de l'huile n'étant pas constante : elle dépend de la température extérieure et de la charge du transformateur, elle se dilate plus ou moins selon les circonstances. Ainsi une augmentation de la température de 100 °C entraîne une augmentation du volume d'huile de l'ordre de 7 à 10 %<sup>161</sup>. Il est donc nécessaire en cas de forte température de stocker le surplus, dans le cas des transformateurs dit « respirant » ce rôle est rempli par le conservateur. [9]

### **I.6.4.4 Coffret des auxiliaires**

Le coffret des auxiliaires contient :[9]

- Appareillage de commande et de protection des ventilateurs des pompes,
- Borniers de raccordement des contacts des appareils de mesure et de protection,
- Résistance de chauffage.

### **I.6.4.5 Coffret de commande du changeur de prise en charge**

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

# ***Généralités sur les transformateurs de puissance***

## **I.7 Exploitations d'un transformateur de puissance**

Le fabricant fabrique le transformateur selon les spécifications initiales établies par le client. Afin de garantir un certain nombre de caractéristiques, le transformateur passe des tests de réception potentiellement destructifs (principalement supérieurs à la tension nominale). Tous ces tests garantissent que le transformateur fonctionne normalement lorsqu'il quitte l'usine et est utilisé comme mesure de référence pendant la durée de vie restante de l'équipement. La durée de vie d'un transformateur est liée à sa résistance à ces contraintes, à la surveillance et à la compréhension de son environnement de fonctionnement.

## **I.8 Vieillessement**

La définition du vieillissement du transformateur est la dégradation irréversible de la capacité de service du transformateur, qui change généralement à mesure que la probabilité conditionnelle de défaillance se produit au fil du temps (par exemple, en raison de la dégradation des matériaux isolants). Dans certains cas, la capacité de service peut également être en raison de contraintes économiques et Les changements dans les contraintes stratégiques se sont réduits.[11]

## **I.9 Fiabilité d'un transformateur**

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

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

# ***Généralités sur les transformateurs de puissance***

## **I.10 Age du transformateur**

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

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

## **I.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu du transformateur et décrivons les principaux composants qui composent le transformateur, leur rôle et leur importance dans la machine stationnaire. À la fin de ce chapitre, différents systèmes et modes de protection des transformateurs sont présentés pour mieux comprendre leur fonctionnement.

# *Chapitre II*

## *Les types des transformateurs*



# Les types des transformateurs

## II.1 Introduction

Il existe de nombreux types de transformateurs utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique, qui sont utilisés à différentes fins telles que la production, la distribution, la transmission et l'utilisation d'électricité. Les différents types de transformateurs sont : les transformateurs élévateurs et les transformateurs abaisseurs, les transformateurs de puissance, les transformateurs de distribution, les transformateurs de mesure, y compris les transformateurs de courant et les transformateurs de tension, les transformateurs monophasés et triphasés, les transformateurs automatiques, etc.

## II.2 Types de transformateur

On peut classer les transformateurs selon plusieurs choses :

 Selon la position des enroulements concernant le noyau	<ul style="list-style-type: none"><li>Type de noyau</li><li>Type de coque</li></ul>
 Selon le rapport de transformation ou le nombre de tours dans les enroulements	<ul style="list-style-type: none"><li>Élévateur</li><li>Abaisseur</li></ul>
 Selon la base de l'offre	<ul style="list-style-type: none"><li>Monophasé</li><li>Triphasé</li></ul>
 Selon le type de service	<ul style="list-style-type: none"><li>Transformateur conventionnel<ul style="list-style-type: none"><li>Transformateur de puissance</li><li>Transformateur de distribution</li><li>Transformateur d'instrument</li><li>Transformateur de courant</li><li>Transformateur de potentiel</li></ul></li><li>Auto transformateur</li></ul>
 Selon le système de refroidissement	<ul style="list-style-type: none"><li>Transformateur sec</li><li>Transformateur immergé</li></ul>

Tableau II- 1 Types de transformateur

## II.3 Selon la position des enroulements concernant le noyau

Une des différences majeures entre le type de base et les transformateurs à coque sont ceux du transformateur à noyau, l'enroulement entoure le noyau, alors que, dans le transformateur à coque, le noyau entoure l'enroulement du transformateur. Certaines autres différences entre elles sont expliquées ci-dessous.[12]

### II.3.1 Type de noyau Transformateur

Le noyau magnétique du transformateur est constitué de stratifications pour former un cadre rectangulaire. Les lamelles sont découpées sous la forme de bandes en forme de "L" illustrées dans la figure ci-dessous. Pour éviter les fortes réticences au niveau des joints

## Les types des transformateurs

lorsque les lamelles sont en butée les unes contre les autres, la couche alternative est empilée différemment pour éliminer les joints continus.

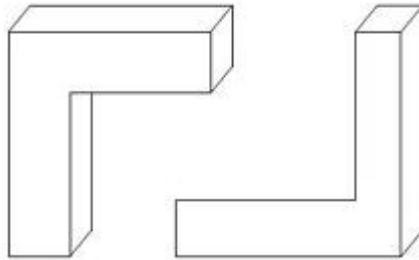


Figure II- 1 Transformateur de type noyau

L'enroulement primaire et secondaire sont entrelacés pour réduire le flux de fuite. La moitié de chaque enroulement est placée côte à côte ou concentriquement sur la jambe du noyau, comme indiqué dans la figure ci-dessous. Pour simplifier, les enroulements primaire et secondaire sont situés sur les membres distincts du noyau.

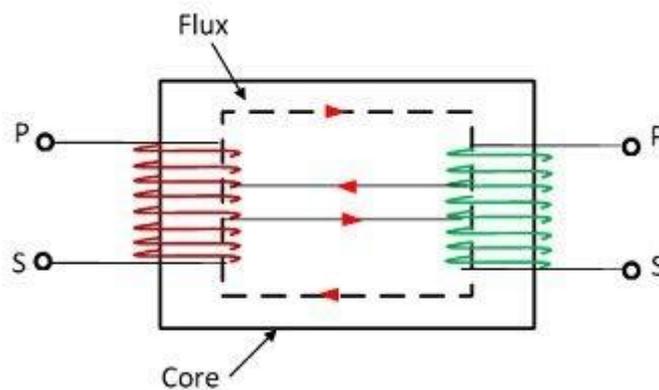


Figure II- 2 Circuit magnétique d'un transformateur de type noyau

La couche isolante est prévue entre le noyau et enroulement inférieur et entre l'enroulement primaire et secondaire. Pour réduire l'isolation, le bas enroulement est toujours placé près du noyau. L'enroulement est cylindrique et la stratification est insérée plus tard.

### II.3.2 Type de coque Transformateur

Les laminassions sont coupées sous la forme d'une longue comme le montre la figure ci-dessous. Afin de réduire les fortes réticences au niveau des joints lorsque les stratifications sont aboutées les unes aux autres, les couches alternées sont empilées différemment pour éliminer les joints continus.

## Les types des transformateurs

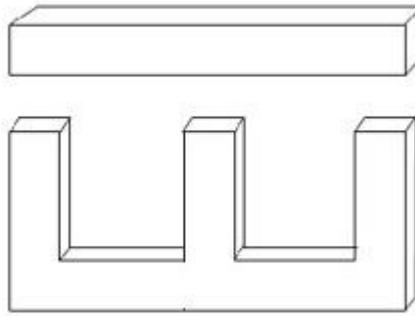


Figure II- 3 Transformateur de type coque

Le transformateur à coque a trois branches ou jambes. Le membre central porte la totalité du flux et le membre latéral la moitié. Par conséquent, la largeur du membre central est sur le point de doubler par rapport à celle des membres extérieurs.

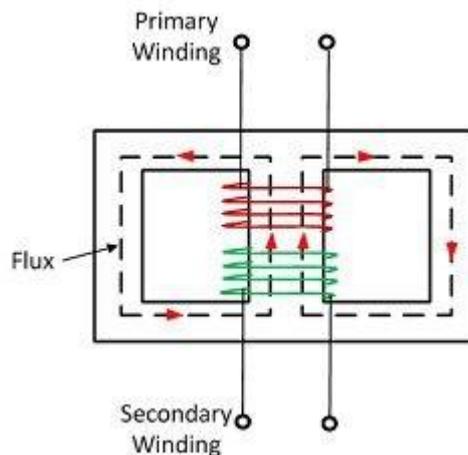


Figure II- 4 Circuit magnétique d'un transformateur de type coque

L'enroulement primaire et secondaire sont placés sur les membres centraux. L'enroulement basse tension est placé près du noyau et l'enroulement haute tension est placé à l'extérieur de l'enroulement basse tension afin de réduire le coût de l'isolation placée entre le noyau et l'enroulement basse tension. Les enroulements sont cylindriques et les lamelles du noyau y sont insérées.

### II.4 Selon le rapport de transformation

Un transformateur est un appareil statique qui transfère le courant alternatif d'un circuit à un autre à la même fréquence, mais le niveau de tension change généralement. Pour des raisons économiques, l'énergie électrique doit être transmise sous haute pression, et d'un point de vue sécurité, elle doit être utilisée sous basse pression. Cette augmentation de la tension de transmission et cette diminution de la tension de fonctionnement ne peuvent être obtenues qu'en utilisant des transformateurs éleveurs et abaisseurs.

## Les types des transformateurs

La principale différence entre un transformateur élévateur et un transformateur abaisseur est que le transformateur élévateur augmente la tension de sortie, tandis que le transformateur abaisseur diminue la tension de sortie. D'autres différences sont expliquées ci-dessous sous forme de tableau comparatif, en tenant compte des facteurs suivants : tension, bobinage, nombre de spires, épaisseur du conducteur et application.[13]

### II.4.1 Transformateurs élévateurs

Lorsque la tension côté sortie est élevée, le transformateur est appelé transformateur élévateur. Dans ce type de transformateur, le nombre de spires de l'enroulement secondaire est toujours supérieur au nombre de spires de l'enroulement primaire, car une haute tension est générée du côté secondaire du transformateur.

L'électricité est généralement générée à 11kv. Pour des raisons économiques, le courant alternatif est transmis sur de longues distances à des tensions très élevées (220kv-440kv). Par conséquent, les transformateurs élévateurs sont utilisés dans les centrales électriques.

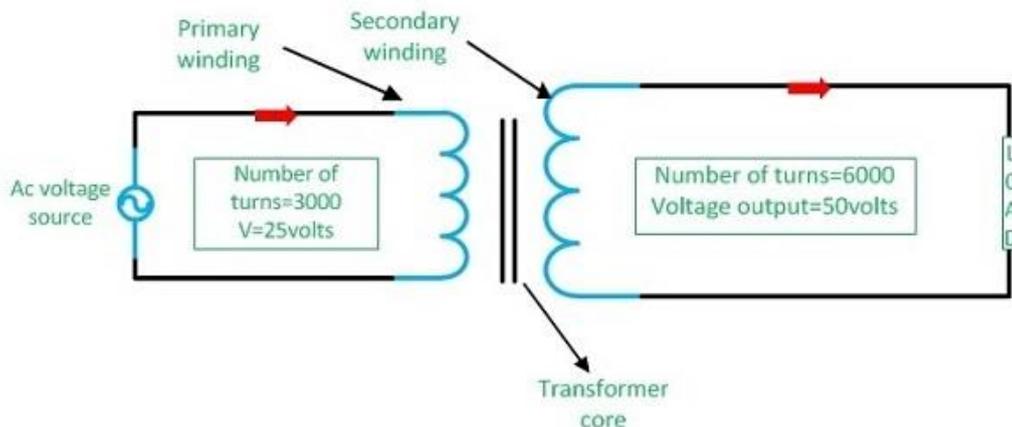


Figure II- 5 Transformateur élévateur

### II.4.2 Transformateurs abaisseurs

Un transformateur abaisseur réduit la sortie tensions ou en d'autres termes, il convertit une alimentation haute tension et basse intensité en une alimentation basse tension et haute intensité. Par exemple, notre circuit d'alimentation transporte 230-110v, mais la sonnette ne nécessite que 16v. Donc, un transformateur abaisseur doit être utilisé pour réduire la tension de 110v ou 220v à 16v.

Pour alimenter différentes zones, les tensions sont augmentées jusqu'à 440v / 230v pour des raisons de sécurité. Ainsi, le nombre de spires sur l'enroulement secondaire est inférieur à celui de l'enroulement primaire ; moins de tension est induite à la sortie(secondaire) du transformateur.

## Les types des transformateurs

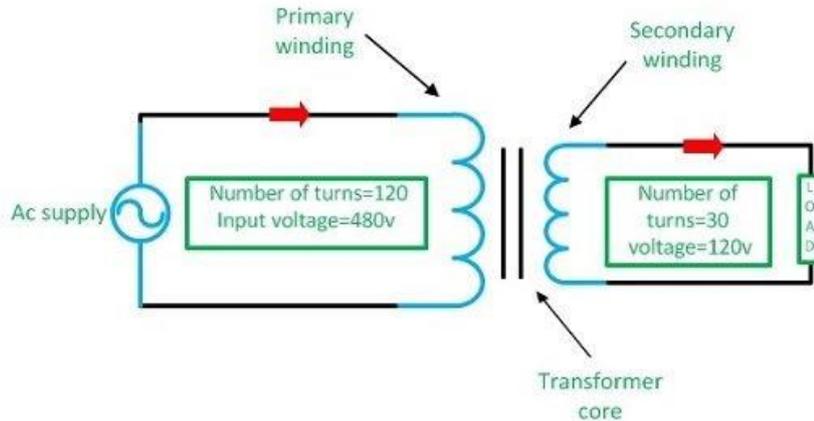


Figure II- 6 Transformateur abaisseur

### Note :

Le même transformateur peut être utilisé comme accélérateur ou un transformateur abaisseur. Cela dépend de la façon dont il est connecté dans le circuit. Si l'alimentation en entrée est fournie sur l'enroulement basse tension, il devient alors un transformateur élévateur. Alternativement, si l'alimentation en entrée est fournie sur l'enroulement haute tension, le transformateur devient un abaisseur.

## II.5 Selon la base de l'offre

Le système d'alimentation est principalement classé en deux types, à savoir monophasé et triphasé. Le monophasé est utilisé dans un endroit où moins d'énergie est requise et pour faire fonctionner les petites charges. Les trois phases sont utilisées dans les grandes industries, les usines et dans l'unité de fabrication où une grande quantité d'énergie est requise.

Une des différences majeures entre le single phase et phase est que la phase comprend un conducteur et un fil neutre alors que l'alimentation triphasée utilise trois conducteurs et un fil neutre pour compléter le circuit. Quelques autres différences entre elles sont expliquées ci-dessous dans le tableau de comparaison. [14]

### II.5.1 Transformateurs monophasés

La phase unique nécessite deux fils pour complétant le circuit, c'est-à-dire le conducteur et le neutre. Le conducteur transporte le courant et le neutre est la voie de retour du courant. Le monophasé fournit la tension jusqu'à 230 volts. Il est principalement utilisé pour faire fonctionner les petits appareils tels qu'un ventilateur, un refroidisseur, une meuleuse, un appareil de chauffage, etc.

## Les types des transformateurs

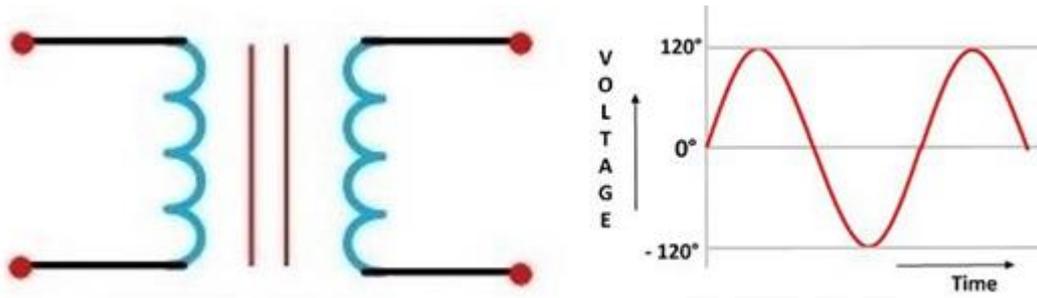


Figure II- 7 Signal et schéma du transformateur monophasé

### II.5.2 Transformateurs triphasés

Le système triphasé se compose de quatre fils, trois conducteurs et un neutre. Les conducteurs sont déphasés et les espaces sont distants de  $120^\circ$ . Le système triphasé est également utilisé comme système monophasé. Pour la charge faible, une phase et le neutre peuvent être extraits de l'alimentation triphasée.

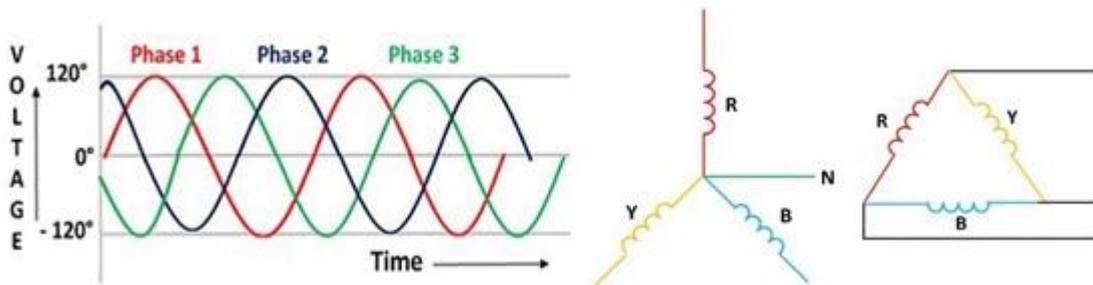


Figure II- 8 Signal et schéma du transformateur triphasé

## II.6 Selon le type de service

### II.6.1 Autotransformateur et transformateur conventionnel

Il existe plusieurs différences entre l'autotransformateur et le transformateur conventionnel. Une des différences majeures entre eux est que l'autotransformateur n'a qu'un seul enroulement, alors que le transformateur classique a deux enroulements séparés. Les autres différences entre elles sont expliquées ci-dessous. [15]

#### II.6.1.1 L'autotransformateur

Un transformateur dont un seul enroule une partie de qui agit comme un enroulement primaire et l'autre comme secondaire s'appelle un autotransformateur. Les enroulements de l'autotransformateur sont connectés magnétiquement et électriquement.

Lorsque la tension primaire est supérieure à la secondaire, le transformateur est appelé autotransformateur abaisseur, et lorsque la tension primaire est inférieure à celle du secondaire, il est appelé autotransformateur élévateur.

## Les types des transformateurs

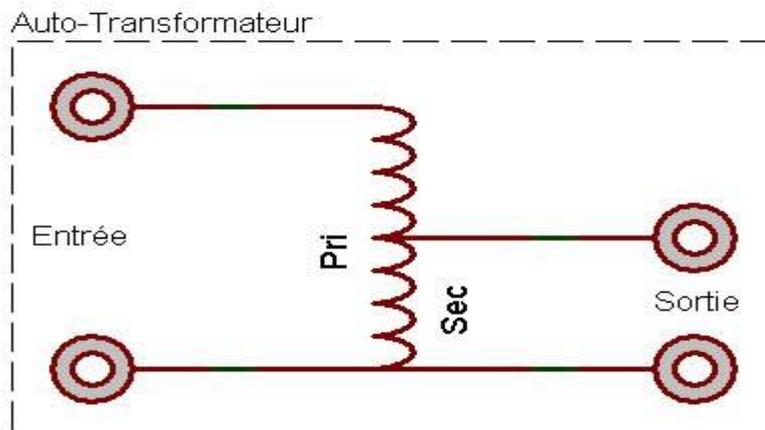
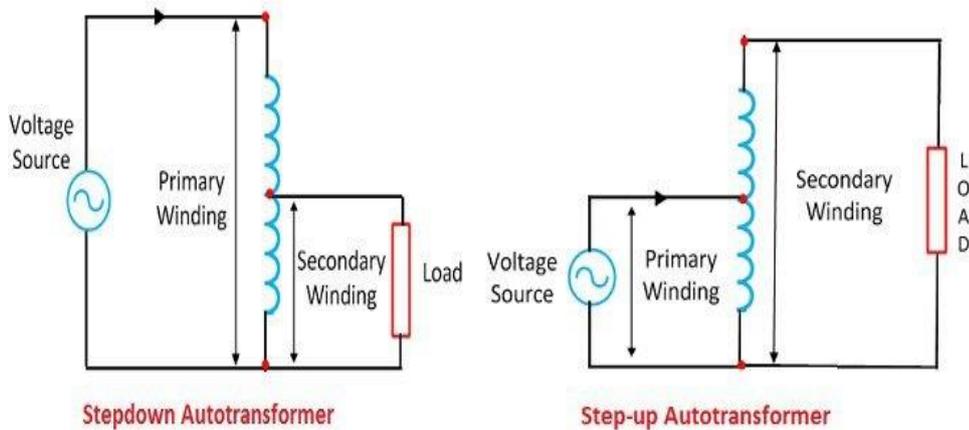


Figure II- 9 Autotransformateur

L'autotransformateur a un faible coût, meilleure régulation et faibles pertes. L'inconvénient de l'autotransformateur est que l'enroulement primaire de l'autotransformateur n'est pas isolé du secondaire. Ainsi, si la basse tension provient de la haute tension, alors la tension maximale est arrivée à la borne secondaire, ce qui est dangereux pour la charge et l'opérateur.

L'autotransformateur n'est pas utilisé pour l'interconnexion des systèmes haute tension et basse tension. Il est utilisé dans les endroits où une légère variation est requise.

### II.6.1.2 Transformateur conventionnel

Un transformateur conventionnel est un appareil statique qui transfère de l'énergie électrique d'un circuit à un autre à la même fréquence mais avec une tension différente. Cela fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique, à savoir que la force électromotrice est induite dans le circuit fermé en raison du champ magnétique variable qui l'entoure. Les enroulements du transformateur conventionnel sont isolés électriquement, mais connectés magnétiquement.

## Les types des transformateurs

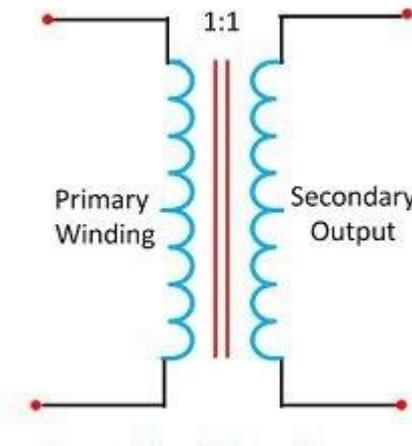


Figure II- 10 Transformateur conventionnel

Un transformateur conventionnel a deux enroulements, l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire. L'enroulement primaire prend l'entrée de l'alimentation et l'enroulement secondaire est connecté à une charge et alimente la charge.

Lorsque la tension de sortie du transformateur est supérieure à la tension d'entrée, ce type de transformateur est appelé transformateur élévateur ; lorsque la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée, il est appelé transformateur abaisseur. Un transformateur dans lequel la tension de réception et la tension d'envoi est identique, ce type de transformateur est appelé transformateur un à un.

### II.6.2 Les transformateurs de puissance et de distribution

Il y a plusieurs différences entre Transformateur de puissance et Transformateur de distribution. La différence est catégorisée sur des facteurs tels que le type de réseau utilisé où ils sont installés et utilisés, que ce soit pour des tensions basses ou élevées. Les différentes cotes dans lesquelles les transformateurs de puissance et de distribution sont disponibles sur le marché. L'efficacité conçue et la conception de leur noyau, les types de pertes survenant dans le transformateur, leurs conditions de fonctionnement et diverses applications. [16]

#### II.6.2.1 Transformateurs de puissance

Le Transformateur de puissance est installé dans diverses centrales pour génération et transmission de puissance. Il agit comme un transformateur élévateur ou abaisseur pour augmenter et diminuer le niveau de tension selon les besoins et sert également d'interconnexion entre deux centrales.

#### II.6.2.2 Transformateurs de distribution

Le Transformateur de distribution est utilisé pour abaisser ou réduire la tension et le niveau actuel d'une ligne de transmission à un niveau prédéfini, appelé niveau de sécurité pour le consommateur final, à des fins domestiques et industrielles.

## Les types des transformateurs

### II.6.3 Les transformateurs de courant et de tension

Les instruments électriques ne sont pas directement connectés aux compteurs ou appareils de contrôle de haute tension à des fins de sécurité. Les transformateurs de mesure, tels que le transformateur de tension et le transformateur de courant, sont utilisés pour connecter les instruments électriques aux instruments de mesure. Ces transformateurs réduisent la tension et le courant de la valeur les plus élevées à la valeur la plus basse, mesurables par les instruments conventionnels.

La construction du courant et de la tension du transformateur est similaire car les deux circuits ont un circuit magnétique dans leurs enroulements primaire et secondaire. Mais ils sont différents dans leur façon de travailler. Il existe plusieurs types de différences entre un transformateur de tension et un transformateur de courant.

Une des différences majeures entre eux est que le transformateur de courant convertit la valeur haute du courant en valeur basse alors que le transformateur de potentiel ou de tension convertit la valeur haute des tensions en tension basse. D'autres différences entre le transformateur de courant et le transformateur de potentiel sont expliqués ci-dessous. [17]

#### II.6.3.1 Transformateurs de courant

Un transformateur de courant est un appareil utilisé pour la transformation du courant à une valeur supérieure à une valeur inférieure au potentiel de la terre. Il est utilisé avec les instruments à courant alternatif pour mesurer la valeur élevée du courant.

Le courant de ligne est trop élevé, et il est très difficile de les mesurer directement. Ainsi, le transformateur de courant utilisé réduit la valeur élevée du courant en une valeur fractionnelle facile à mesurer par l'instrument.

Le primaire du transformateur de courant est connecté directement à la ligne dont la valeur doit être mesurée. Le secondaire du transformateur de courant est connecté à l'ampèremètre ou au compteur qui a mesuré la valeur de la ligne concernant les fractions.

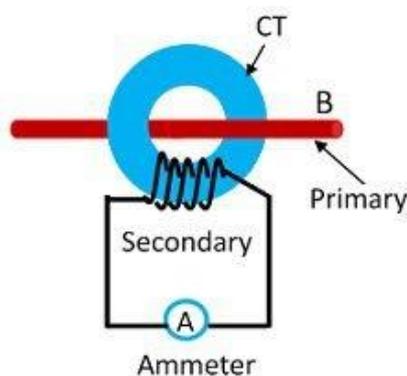


Figure II- 11 Transformateurs de courant

## Les types des transformateurs

### II.6.3.2 Transformateurs de tension (potentiel)

Un transformateur de tension est le type de transformateur d'instrument utilisé pour transformer la tension d'une valeur supérieure à une valeur inférieure.

La borne primaire du transformateur de potentiel est connectée à la ligne pour mesurer la tension de ligne. Le transformateur de potentiel a réduit la valeur haute de la tension en une valeur faible qui peut facilement être mesurée par le voltmètre ou le mètre.

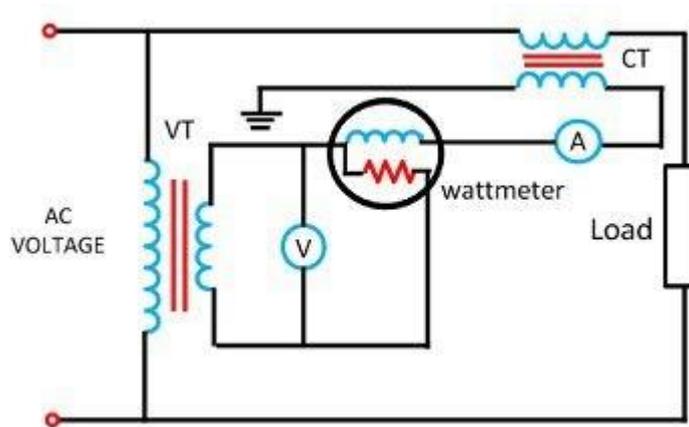


Figure II- 12 Transformateurs de tension

## II.7 Selon le système de refroidissement

### II.7.1 Transformateur immergé

Le transformateur est disposé dans un bain d'huile qui assure l'isolement et le refroidissement. Ce transformateur est moins onéreux et a des pertes moindres que le transformateur sec. [18]



Figure II- 13 Transformateur immergé dans l'huile

# Les types des transformateurs

## II.7.2 Transformateurs secs

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

Le transformateur sec présente les meilleures garanties de sécurité contre la pollution (pas de fuite de liquide, pas de vapeurs nocives en cas d'incendie).[18]



Figure II- 14 Transformateur sec

## II.8 Autre type de transformateur

Dans la partie précédente, nous avons détaillé les transformateurs les plus couramment utilisés, mais il existe un autre type de transformateur qui a des utilisations spécifiques telles que

### II.8.1 Transformateur d'isolement

Le câblage électrique monophasé traditionnel se compose d'un conducteur de phase, d'un fil neutre et d'un fil de terre. Lorsque plusieurs dispositifs physiquement séparés partagent une ligne électrique commune, des boucles de masse peuvent se créer en raison de dispositifs ayant des potentiels de masse différents. Ces boucles de masse sont particulièrement problématiques dans les dispositifs médicaux et peuvent être gênantes pendant le test des dispositifs. Pour les concepteurs, il est difficile de mesurer les boucles de masse avec des dispositifs qui utilisent des tensions de ligne redressées. Les équipements de test mis à la terre, comme les oscilloscopes, peuvent par inadvertance court-circuiter l'alimentation dans ces dispositifs. En outre, du bruit haute fréquence peut circuler sur les lignes CA, causant des problèmes pour les transducteurs et les instruments sensibles.

Tous ces problèmes peuvent être évités par l'application correcte de transformateurs d'isolement entre l'entrée d'alimentation et le dispositif.

## ***Les types des transformateurs***

Les transformateurs d'isolement assurent la séparation de la connexion à la terre de la ligne électrique pour éliminer les boucles de masse et la mise à la terre accidentelle des équipements de test. Ils suppriment également le bruit haute fréquence circulant dans la source d'alimentation.

### **II.8.1.1 Fonctionnement des transformateurs d'isolement**

Les transformateurs d'isolement fournissent une isolation galvanique entre les lignes CA (secteur) et le dispositif alimenté. Cela signifie qu'il n'y a pas de chemin de courant continu entre les deux enroulements. Ils servent trois objectifs principaux :

- ✚ Le premier consiste à isoler le secondaire de la terre (masse)
- ✚ Le deuxième consiste à fournir un abaissement ou une élévation des tensions de ligne (secteur)
- ✚ Le troisième consiste à réduire le bruit de ligne transmis du primaire au secondaire ou inversement

Les transformateurs d'isolement sont d'abord des transformateurs, et ils partagent les caractéristiques communes des transformateurs. Les enroulements primaires et secondaires sont enroulés sur un noyau ferromagnétique commun.

### **II.8.2 Transformateur d'impédance**

Le transformateur est toujours un transformateur d'impédance, mais les électroniciens donnent ce nom aux transformateurs qui ne sont pas utilisés dans des circuits d'alimentation.

Le transformateur d'impédance est principalement destiné à adapter l'impédance de sortie d'un amplificateur à sa charge. Ce genre de transformateur était en particulier employé :

- Dans la restitution sonore, pour adapter la sortie d'un amplificateur audio à lampes (haute impédance), avec les haut-parleurs destinés à la restitution du son et caractérisés par une impédance basse.
- En électronique audio professionnelle, on utilise toujours des transformateurs pour les entrées et sorties d'appareils haut de gamme, ou bien dans la fabrication de « Di-box » ou boîte de direct. Le transformateur est alors utilisé, non seulement pour adapter l'impédance et le niveau de sortie des appareils (synthétiseurs, basses électriques...) aux entrées micro de la console de mixage mais en outre pour symétriser la sortie des appareils connectés.
- En technique des hautes fréquences, on utilise également des transformateurs dont le circuit magnétique est en ferrite ou sans circuit magnétique (aussi appelé transformateur sans noyau) pour adapter les impédances de sortie d'un

## ***Les types des transformateurs***

amplificateur, d'une ligne de transmission et d'une antenne. En effet, pour un transfert optimal de puissance de l'amplificateur vers l'antenne, il faut que le rapport d'ondes stationnaires (ROS) soit égal à 1.

De tels montages présentent en outre l'avantage de rendre les appareils connectés beaucoup plus résistants aux perturbations électromagnétiques par une augmentation significative du CMRR (Common Mode Rejection Ratio) ou taux de réjection du mode commun.

### **II.9 CONCLUSION**

Le transformateur est un appareil qui est conçu en divers types. Ceci se justifie par la diversité des appareils auxquels il se lie. Dans ce chapitre, nous étudions les différents types de transformateurs électriques, objectifs et la différence entre eux.

# ***Chapitre III***

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

# Les défaillances de transformateur électrique

## III.1 Introduction

Les transformateurs de puissance sont généralement très fiables, avec une durée de vie prévue de 20 à 35 ans. En fait, s'il est correctement entretenu et utilisé, il peut être utilisé jusqu'à 60 ans. Cependant, toute défaillance d'un transformateur peut entraîner des coûts élevés pour la réparation ou le remplacement d'un autre transformateur. Son utilisation continue ou spéciale dans des conditions de surcharge pour alimenter un grand nombre de personnes le fera vieillir prématurément et continuera à raccourcir sa durée de vie, augmentant ainsi considérablement le risque de panne. Les pannes sont généralement causées par des conditions sévères, telles que la foudre, la manipulation du réseau, les courts-circuits ou d'autres accidents.

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

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

Souvent, quatre états apparents (courbe de vie figure III.1) sont connus dans le cas des transformateurs et qui sont :

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

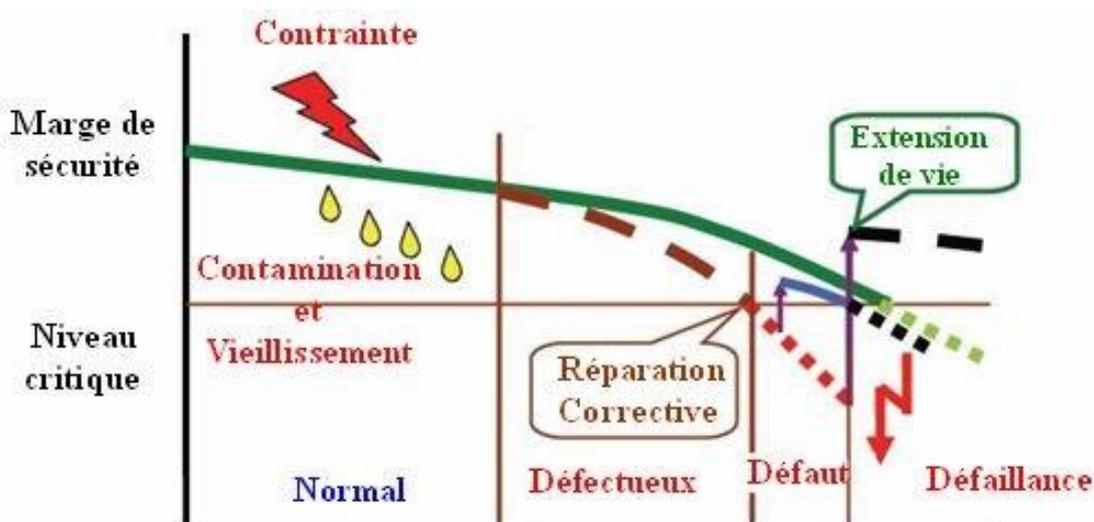


Figure III- 1 Conduction d'un cycle de vie d'un transformateur

## **III.2 Défautes dans les transformateurs :**

Les transformateurs sont dimensionnés pour résister aux contraintes de fonctionnement, conformément aux normes en vigueur. Certaines contraintes pourraient être à l'origine des dysfonctionnements qui impacteraient non seulement les performances, mais aussi la durée de vie des transformateurs.

Un tel défaut peut résulter d'un court-circuit ou d'un circuit ouvert au niveau du bobinage primaire ou secondaire. Un court-circuit provoque une augmentation de la température à l'intérieur de transformateur, ce qui conduit à la détérioration des isolants des conducteurs. Le transformateur est donc déséquilibré.

## **III.3 Type des défauts**

### **III.3.1 Les surtensions**

Les surtensions sont dangereuses dans un réseau de distribution car elles soumettent les isolants à des contraintes qui risquent de les détruire ou du moins de les vieillir. [19]

#### **III.3.1.1 Les surtensions peuvent être causées par**

- Contact avec une ligne de plus forte tension ;
- Coupure brutale d'une ligne ;
- Coups de foudre directs ou indirects ;

#### **III.3.1.2 Les conséquences des surtensions sont**

- Dans le cas où la surtension persiste, elle risque d'entraîner des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs ;
- En cas de claquage de l'isolant, elles ont pour conséquence immédiate un court-circuit même s'il s'agit seulement d'un arc dans l'air, celui-ci persiste sur les réseaux de tension supérieure à quelques milliers de Volts, même après disparition de la surtension ;

On a alors le courant de suite qui ne sera coupé que par isolement de la ligne ou de l'appareil atteint.

- Les surtensions de longue durée augmentent le courant magnétisant des transformateurs, d'autant plus que leur circuit magnétique est saturé.

# ***Les défaillances de transformateur électrique***

## **III.3.2 Court-circuit**

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolement relatif de deux conducteurs de tensions différentes à la même source, sans interposition d'une Impédance convenable. [20]

### **III.3.2.1 Le court-circuit peut être causé par**

- Installations intérieures : frottement ; écrasement ; rupture de conducteur contact avec le conducteur voisin ;
- Lignes aériennes : coup de foudre ; balancement de conducteur chutés de branches ;
- Lignes souterraines : mouvement de terrain, infiltration d'humidité, coup de pioche ;
- Postes : avarie d'un appareil ; vieillissement, détérioration ou claquage des isolants.

### **III.3.2.2 Les conséquences des surintensités sont**

- La chaleur de l'arc ou celle dépensée dans le contact imprévu, peut faire fondre les métaux environnants, carboniser les isolants et même déclencher les incendies ;
- Les efforts électrodynamiques des courants de court-circuit sont très dangereux, les enroulements des transformateurs sont véritablement secoués. Ils peuvent même causer un décalage de galettes ;
- L'échauffement de tous les conducteurs traversés par le courant de court-circuit est très important, il concentre ses effets sur les points faibles (bornes des transformateurs) ;
- Les effets de la chute de tension, s'ils font courir moins de danger au matériel, n'en sont pas moins gênants, la tension devient quasi-nulle au voisinage du court-circuit.

## **III.3.3 Surcharges**

La surcharge est principalement due à l'augmentation de la demande d'énergie, mais parfois aussi à des dimensions incorrectes de l'équipement qui constitue l'installation électrique.

La caractéristique de la surcharge est que le courant est supérieur au courant maximal admissible. Si ces courants durent trop longtemps, d'une part, le matériau isolant sera endommagé, et d'autre part, le conducteur sera rompu du fait de la diminution de sa résistance mécanique. [21]

### **III.3.3.1 Les conséquences des surcharges sont :**

Un régime de charge d'un transformateur au-delà des valeurs de la plaque signalétique a les conséquences suivantes :

- Les températures des enroulements, des calages, des connexions, des isolants et de l'huile vont augmenter, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables.

## Les défaillances de transformateur électrique

- L'induction magnétique du flux de fuite en dehors, du circuit magnétique augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courant de Foucault dans les parties métalliques embrassées par le flux de fuite.
- Comme la température varie, les taux d'humidité et teneur en gaz dans l'isolation et dans l'huile sont modifiés.
- Les traversées, les changeurs de prises, les connexions d'extrémités de câble et les transformateurs de courant sont également soumis à des contraintes plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.
- Par conséquent il y a un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolation du transformateur sur de nombreuses années.

### III.4 Défauts retenus dans cette étude

Ce paragraphe présente les huit types de défauts uniques utilisés par la suite. Un défaut, tel qu'entendu dans cette étude, est interne au transformateur.

Catégorie de défaut	Type de défaut
<b>Diélectrique</b>	Isolement de la partie active
	Amorçage diélectrique entre spires, sans court-circuit
	Court-circuit entre spires
	Amorçage du corps insérable du régleur en charge
<b>Electrique</b>	Décharges Partielles
	Point chaud interne au transformateur
<b>Mécanique</b>	Coupure du circuit électrique
	Déformation géométrique des enroulements

Tableau III- 1 Défauts retenus et leurs codes associés

Souvent des combinaisons de ces défauts surviennent :

**Remarque 1 :** Cette liste de défauts est seulement une image des types de défauts expertisés dans le cadre de cette thèse, et ne représente certainement pas la totalité des défauts possibles ou ayant déjà existés sur les transformateurs de puissance.

Néanmoins cette liste constitue un échantillon relativement typique des principaux défauts des transformateurs de puissance nécessitant une réparation. De plus, ces défauts couvrent l'essentiel des défauts relevés dans l'étude (CIGRE, 1983) où les défauts diélectriques sur : les régulateurs en charge, les enroulements et les traversées forment environ 79 % (41 + 26 + 12) des défauts majeurs sur les transformateurs.

**Remarque 2 :** Certains défauts susceptibles d'apparaître sur d'autres éléments du transformateur tels que le circuit magnétique, le système de refroidissement ou les fixations internes n'ont pas été retenus et représentent un faible pourcentage des défauts nécessitant un arrêt du transformateur. Une partie de ces défauts, tels que des problèmes

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

de réfrigération, est directement détectée et gérée par les exploitants sur site. Les autres problèmes internes, comme sur le circuit magnétique ou les fixations internes, sont très rares sur des transformateurs en exploitation et donc il n'existe qu'un retour d'expérience anecdotique. De plus, ces défauts nécessiteraient des travaux de remise en état de la partie active très conséquents pour retrouver un état normal, et ne justifient qu'exceptionnellement leur coût vis-à-vis des risques éventuellement encourus. L'appareil continuera de fonctionner alors souvent en mode dégradé, ou sera retiré du service.

**Remarque 3 :** Les causes des différents défauts ne seront évoquées qu'au cas par cas, si elles ont été identifiées dans le cadre de l'expertise ; ou si une explication théorique semble appropriée.

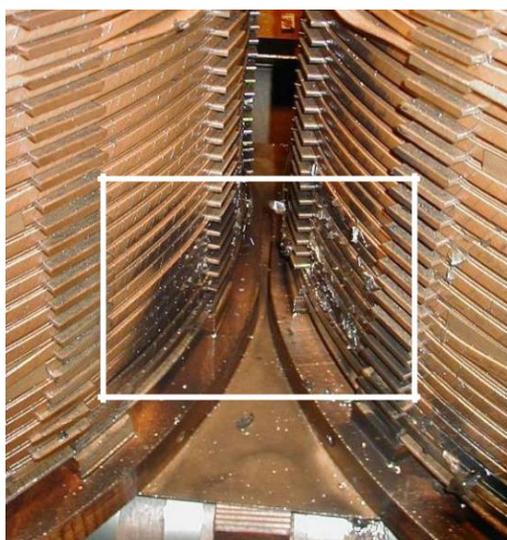
Les causes des défauts peuvent être diverses, souvent méconnues (à minima du réparateur), et peuvent être étalées dans le temps. Ainsi, seule une analyse fine des retours d'expériences de l'exploitant des transformateurs en défaut, pourrait à priori établir une étude factuelle sur les causes initiales réelles des défauts de transformateurs.

### **III.4.1 Défaut d'isolement de la partie active**

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

Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes :

- Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux (Figure III.2).
- Amorçage entre la masse (la cuve ou le circuit-magnétique typiquement) et un enroulement, une connexion ou une traversée



**Figure III- 2 Amorce entre enroulements**

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

### **III.4.2 Amorçage diélectrique entre spires**

C'est un amorçage entre spires (voir Contraintes diélectriques et surtensions) d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux (Figure III.3). L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement.



**circuit entre-elles**

### **III.4.3 Court-circuit entre spires**

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement (voir Contraintes diélectriques et surtensions) qui devraient être normalement isolées entre elles (Figure III.4)

Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements.

Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas.

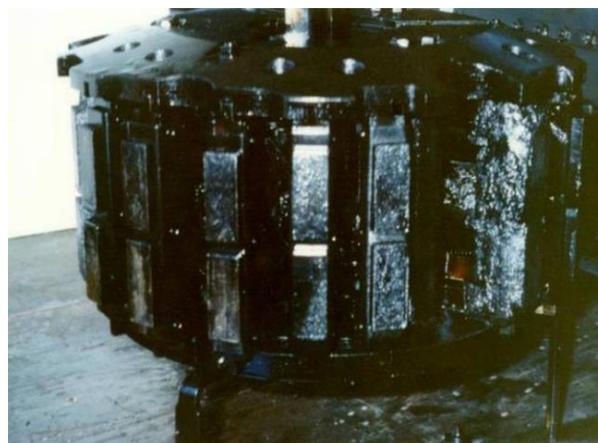


**Figure III- 4 Court-circuit entre spires**

### **III.4.4 Amorçage du corps insérable du régleur en charge**

L'amorçage du corps insérable (Figure III.5), ou commutateur, d'un régleur en charge provoque généralement des courts-circuits importants dans un petit volume, normalement hermétique de la cuve principale du transformateur.

Ce défaut est en général destructeur pour le régleur en charge à minima, et jusqu'à l'ensemble du transformateur dans certains



**Figure III- 5 Amorçage du corps insérable d'un régleur en charge**

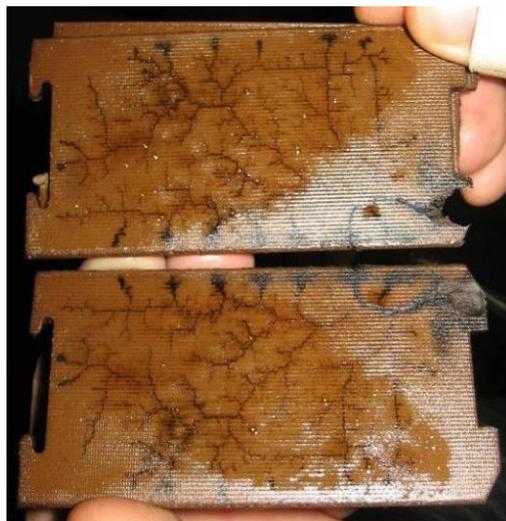
## ***Les défaillances de transformateur électrique***

cas. L'amplitude des dégâts dépend fortement de la rapidité et du réglage des protections.

### **III.4.5 Décharges Partielles**

Les décharges partielles (voir Contraintes diélectriques et surtensions), sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l'isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible sur la Figure III.6.

Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage.



**Figure III- 6 Décharges partielles sur des cales**

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

### **III.4.6 Point chaud interne au transformateur**

Un point chaud est caractérisé par l'échauffement local interne d'une connexion précise du transformateur (voir Contraintes électriques : mauvais contacts). Après une coloration sombre, les points chauds peuvent classiquement former des morceaux solides de carbone, qui sont conducteurs.



**Figure III- 7 Point chaud sur le sélecteur d'un régleur en charge**

Typiquement les points chauds peuvent venir de mauvais contacts du circuit électrique chauffant alors anormalement, comme sur des connexions au niveau des brasures, ou sur des contacts mobiles du régleur en charge (Figure III.7), ou du régleur hors tension. Ils peuvent être aussi provoqués par des courants de Foucault induits anormaux circulant dans des pièces non prévues pour cela, qui chauffent alors anormalement, comme : des tôles du circuit magnétique ou des isolants en défaut de la partie active, hors enroulements.

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

### **III.4.7 Coupure du circuit électrique**

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

- Un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur.
- Un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact (Figure III.8).
- Un mauvais alignement d'un régleur.



**Figure III- 8 Coupure suite à la fusion d'un conducteur**

### **III.4.8 Déformation géométrique des enroulements**

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des courts-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés (voir Contraintes électrodynamiques et surintensités), qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes (Figure III.9, à noter sans amorçages entre spires, ni courts-circuits internes !).

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



**Figure III- 9 Déformation mécanique d'un enroulement**

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

### **III.4.9 Défaillance des traversés (bushings) :**

Les défaillances de traversés se produisent par deux modes importants qui sont :

- L'entrée de l'eau libre provoquant en occurrence l'ionisation critique à la partie inférieure de la traversée.
- Le vieillissement du système papier-huile, avec l'augmentation excessive des pertes diélectriques, ce qui conduira à l'instabilité thermique.

Cependant, la traversée du côté HT reste l'un des composants du transformateur le plus sensible, responsable de plus de 30% de défaillance sur le transformateur.

### **III.5 Les contraintes du transformateur**

#### **III.5.1 Contraintes diélectriques et surtensions**

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

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

##### **III.5.1.1 Contraintes normales**

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

##### **III.5.1.2 Contraintes anormales**

Les deux contraintes diélectriques normalisées les plus importantes sont les chocs de foudre (1425 kVen1, 2 $\mu$ s) et les chocs de manœuvre (1050kVen200 $\mu$ s) qui sont des phénomènes très haute tension très brève, donc à très haute fréquence.

##### **III.5.1.3 Défauts possibles dus aux contraintes diélectriques**

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

- Un amorçage des pièces sous tension:
  - Entre elles, comme entre enroulements ou entre spires (Figure III.10)
  - Avec la masse, comme l'amorçage d'une traversée ou d'un enroulement à la cuve ou



**Figure III- 10 Amorçage franc entre spires**

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

au circuit magnétique.

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

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

### **III.5.2 Contraintes électrodynamiques et surintensités**

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

#### **III.5.2.1 Contraintes normales**

Au courant nominal ( $I_{\text{nominal}}$ ) les efforts mécaniques sont négligeables par rapport aux efforts liés aux courants de court-circuit ( $I_{\text{cc}}$ ) (environ 100 fois plus importants), pour lequel le transformateur est dimensionné mécaniquement. [22]

#### **III.5.2.2 Contraintes anormales**

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

Les surintensités se présentent principalement dans les cas suivants :

- **Court-circuit:**  $I_{\text{cc}}$  de 6 à 25  $I_{\text{nominal}}$  environ;  $I_{\text{cc}}$  est limité par la tension de court-circuit. Les courts-circuits peuvent être externes, venant du réseau, ou internes, suite à un défaut.
- **Mise sous-tension des transformateurs:** Courant transitoire à vide ( $I_0$ ) de quelques fois le courant nominal.
- **Démarrage des moteurs:** Idémarrage de 3 à 7  $I_{\text{nominal}}$ .

# Les défaillances de transformateur électrique

## III.5.2.3 Défauts possibles dus aux surintensités

Les conséquences de ces surintensités sont de trois ordres :

- **Efforts électrodynamiques** dus aux forces de Laplace dans les bobinages entraînant des contraintes mécaniques élevées. Ces efforts peuvent être particulièrement significatifs lors des efforts de court-circuit, jusqu'à quelques centaines de tonnes. Le livre [23] est particulièrement complet sur le sujet. Un exemple franc de déformation mécanique d'enroulement est visible sur la Figure III.11. Pour s'en affranchir en partie, les enroulements en usine sont serrés jusqu'à plusieurs centaines de tonnes, pour les empêcher d'avoir un degré de liberté malgré les efforts développés.



Figure III- 11 Effort électrodynamique franc

- **Echauffements** élevés des enroulements, dégradant les isolants solides en particulier.
- **Chute de tension** au secondaire, perturbant la stabilité du réseau.

## III.5.3 Contraintes électriques : mauvais contacts

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

### III.5.3.1 Contraintes normales

Selon la conception, une certaine densité de courant est autorisée dans le mode nominal de ces composants. En raison de la densité de courant anormale, le courant doit traverser tout le circuit sans chauffage local spécifique.

### III.5.3.2 Contraintes anormales

Si certains contacts se dégradent avec le temps, ils permettent au courant de circuler à travers une surface d'écoulement efficace réduite par rapport à la structure d'origine. En conséquence, la densité de courant locale augmente, ce qui peut provoquer des dysfonctionnements.

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

### **III.5.3.3 Défautes électriques possibles**

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

- **Connexions dans certains changeurs de prises en charge**, en particulier les contacts mobiles de l'inverseur s'ils sont peu manipulés, alors qu'ils voient passer en permanence le courant de charge du transformateur.
- **Connexions des changeurs de prise hors tension**. Les contacts mobiles sur les positions en service qui ne sont jamais bougés peuvent se dégrader avec le temps.
- **Connexion entre le cuivre des enroulements et une connexion interne**, Quant au réglage du robinet ou de la connexion à travers le manchon. Ces différentes connexions sont brasées, serties ou boulonnées, et selon la qualité des contacts et les conditions de fonctionnement, certaines connexions peuvent s'échauffer anormalement. Un point chaud très avancé sur le contact du boulon est visible sur la figure III.12.



**Figure III- 12**Point chaud sur connexion boulonnée

La formation de points chauds, constitués de particules de carbone solides dues à la décomposition de l'huile, peut dans certains cas provoquer la dégradation d'isolants. Dans les stades les plus avancés, la formation de carbone sous forme solide peut diminuer des distances diélectriques internes, allant jusqu'à un amorçage interne dans le pire des cas.

### **III.5.4 Contraintes thermiques : surcharges, points chauds et vieillissement**

#### **III.5.4.1 Contraintes normales**

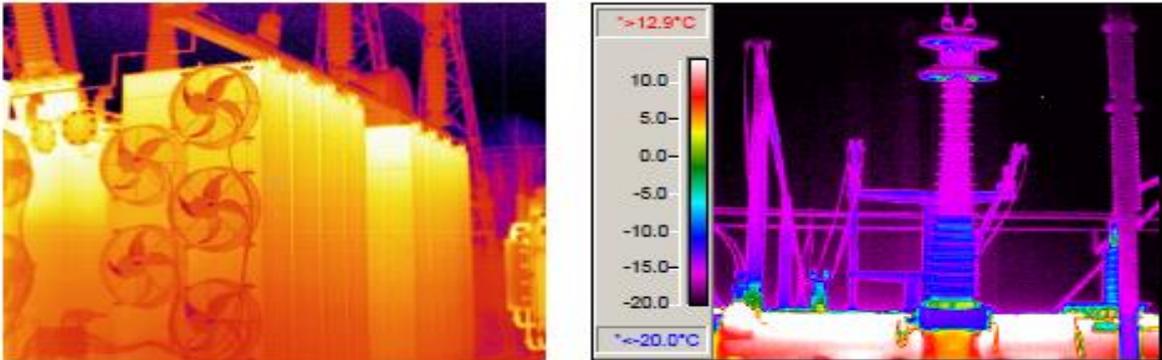
Les contraintes thermiques sont dues principalement aux pertes Joule liées au passage du courant dans les enroulements, puis à l'évacuation de ces pertes via la réfrigération.

Deux normes internationales principales régissent les contraintes thermiques en régime nominal : une sur les échauffements admissibles dans le transformateur, et un guide de charge normatif pour les transformateurs immergés dans l'huile. [24]

# Les défaillances de transformateur électrique

## III.5.4.2 Contraintes anormales

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



Visualisation d'un transformateur en caméra IR (a)

Détection d'un niveau d'huile bas sur une traversée HT (b)

[source: [www.thethermographiclibrary.com](http://www.thethermographiclibrary.com) & US Department of Labor]

## III.5.4.3 Défaits possibles dus aux contraintes thermiques

Dans tous les cas ces contraintes thermiques provoquent le vieillissement :

- **Des papiers isolants**, et la dégradation de leurs propriétés diélectriques par voie de conséquence. Ceux-ci sont d'autant plus critiques qu'ils ne sont pas, sauf reconstruction, remplaçables au long de la vie d'un transformateur. Par exemple dans le cas extrême de la Figure III.13 toute la bobine est noircie de l'intérieur à cause d'un fonctionnement à des températures excessives.
- **De l'huile isolante**. La température, l'humidité et l'oxygène accélèrent le vieillissement de l'huile, qui perd donc ses qualités d'origine, ce qui peut mener à un défaut.



Figure III- 13 Echauffement excessif d'un enroulement

# Les défaillances de transformateur électrique

## III.5.5 Contraintes électromagnétiques et courants de Foucault

### III.5.5.1 Contraintes normales

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

### III.5.5.2 Contraintes anormales

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

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

### III.5.5.3 Défauts possibles dus aux contraintes électromagnétiques

En cas de mises à la masse en plusieurs points du circuit magnétique (Figure III.14), ou des éléments métalliques de serrage de la partie active, on peut avoir comme défauts typiquement des points chauds dus à :

- Des courants de Foucault induits, anormalement importants;
- Des dégradations d'isolants internes dus à ces courants de Foucault anormaux.

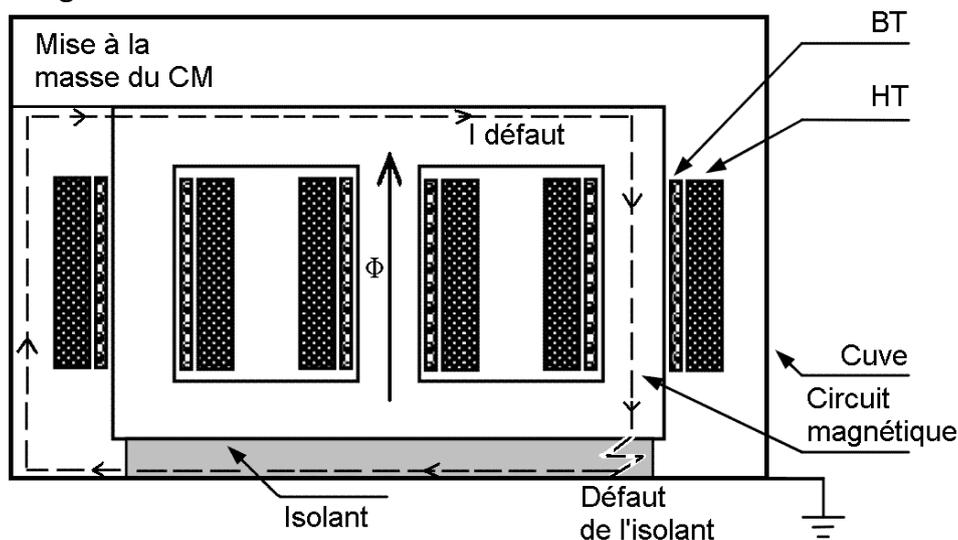


Figure III- 14 Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM)

# Les défaillances de transformateur électrique

## III.5.6 Contraintes mécaniques : vibrations, fuites et transport

### III.5.6.1 Contraintes normales

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

### III.5.6.2 Contraintes anormales

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

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

### III.5.6.3 Défauts possibles dus aux contraintes mécaniques

Les principaux défauts liés aux contraintes mécaniques sont :

- **Des points chauds sur des régleurs de prises** si ceux-ci sont mécaniquement mal alignés.
- **La diminution de distances diélectriques**, dues au déplacement interne massif d'un circuit magnétique de plusieurs centimètres, suite à un choc mécanique comme lors de la chute d'un transformateur (Figure III.15).
- **Des dégradations d'isolants internes** dues à des vibrations anormales, elles-mêmes dues à un manque de serrage interne à la construction, ou suite à des chocs importants.
- **Les fuites de joints** mécaniquement trop serrés et/ou chauffés (Figure III.16) lors de leur installation puis leur exploitation.



Figure III- 15 Problème de transport



Figure III- 16 Joint de traversée écrasé

## ***Les défaillances de transformateur électrique***

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

### **III.6 Protection et surveillance de transformateur de puissance.**

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

#### **III.6.1 Différents types de protections**

Le transformateur est un élément particulièrement important d'un réseau électrique. Il est nécessaire de le protéger efficacement contre tous les défauts susceptibles de l'endommager qu'ils soient internes ou externes. [8]

##### **III.6.1.1 Protections internes:**

###### **A. Relais BUCHHOLZ**

Dans le domaine de la distribution et de la transmission l'électricité, un relais Buchholz est un dispositif de sécurité monté sur les transformateurs et inductances de puissance à bain d'huile. Le relais Buchholz est utilisé sur ce type de systèmes comme dispositif de protection sensible aux événements qui se produisent lors d'un défaut diélectrique (défaut d'isolement) à l'intérieur de l'équipement.

Quand un arc électrique ou une surchauffe se développe à l'intérieur des enroulements, il y a dégagement de gaz par vaporisation de l'huile. Ce phénomène précède un changement dans les valeurs électriques, courant ou tension, de l'appareil. Un relais Buchholz réagit à ce dégagement de gaz et protège ainsi le transformateur de potentiels dégâts

Le relais Buchholz est placé dans le tube reliant la cuve principale du transformateur et son conservateur d'huile. Le transformateur doit être conçu de telle manière que tout gaz se formant dans la cuve principale doit remonter rapidement vers le conservateur en passant par le relais Buchholz. Autrement dit, le gaz ne doit pas être piégé dans la cuve. Des tubes supplémentaires doivent parfois être montés, par exemple entre les tourelles des traversées électriques et le conservateur, pour assurer une bonne collecte du gaz.

Les relais Buchholz sont munis en général de deux contacts : un pour l'alarme et un pour le déclenchement :

Sur une accumulation lente de gaz, due probablement à une surcharge, le gaz s'accumule dans la partie supérieure du relais tandis que le niveau d'huile diminue. Une

## Les défaillances de transformateur électrique

détection par flotteur est utilisée dans ce cas pour générer un signal d'alarme. Ce système détecte aussi les fuites d'huile.

Si un arc se forme, l'accumulation de gaz est rapide, et l'huile s'écoule rapidement dans le conservateur. Cet écoulement d'huile actionne un commutateur fixé à une palette située dans le chemin de circulation d'huile. Ce commutateur actionnera normalement un disjoncteur pour arrêter (isoler) l'appareil avant que le défaut ne crée plus de dommages.

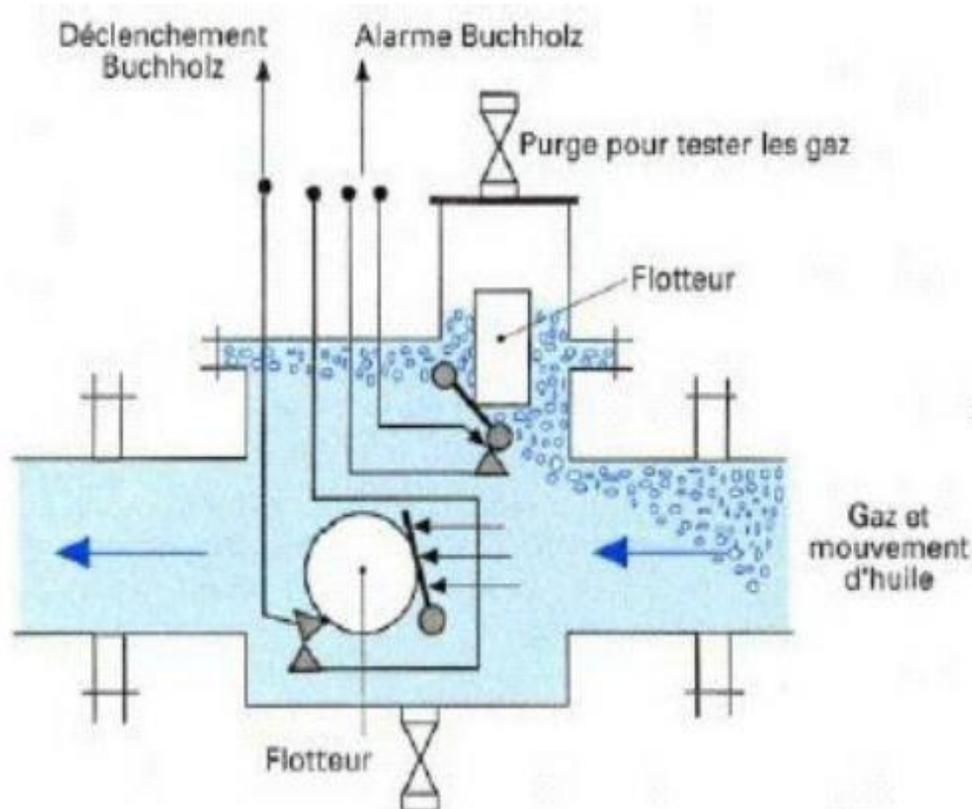


Figure III- 17 Schéma de fonctionnement de Relais BUCHHOLZ.

### B. Protection masse cuve

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

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

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

## Les défaillances de transformateur électrique

Une protection de cuve sera prévue contre les défauts à la terre qui se produisent à l'intérieur du transformateur. La cuve du transformateur doit être isolée de la terre. [8]



Figure III- 18 Protection masse cuve.

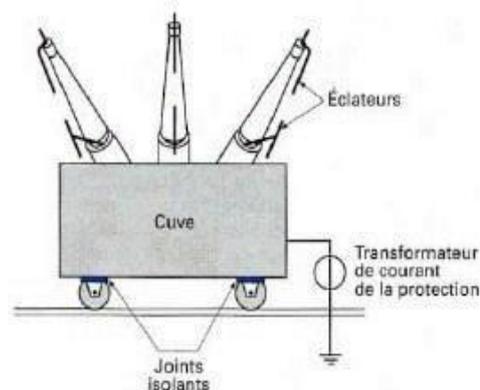


Figure III- 19 Placement de TC tore.

### C. Protection par DGPT

Le DGPT (Détecteur Gaz, Pression et Température) est un dispositif de protection utilisé pour les transformateurs à isolement liquide. Ce dispositif détecte les anomalies au sein du diélectrique liquide telles qu'émission de gaz, élévation de pression ou de température, et provoque la mise hors tension du transformateur. Il est principalement destiné à la protection des transformateurs immergés étanches à remplissage total.



Figure III- 20 Dispositif DGBT

### D. Protection thermique

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

#### III.6.1.2 Protection externes

##### A. Protection des surtensions

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

- **Eclateur:** est un dispositif simple constitué de deux électrodes dans l'air. La Limitation de tension aux bornes est effectuée par l'amorçage d'intervalle d'air.

## Les défaillances de transformateur électrique

- **Parafoudre** : permettent de se débarrasser de ce comportement néfaste car ils présentent un comportement réversible. Ce sont des résistances fortement non-linéaires qui présentent une diminution importante de leur résistance interne au-dessus d'une certaine valeur de tension aux bornes. [10]



Figure III- 21 Eclateur.



Figure III- 22 Parafoudre.

### B. Protection à maximum d'intensité

Des relais reliés à des transformateurs de courant (équivalents d'un ampèremètre en haute tension) déclenchent le transformateur suite à une surintensité temporaire, fixée selon un seuil. Ces unités de protection agiront contre le défaut externe (défaut entre les phases et défaut entre phase et terre)

- Trois relais à maximum de courant de phase à deux seuils (seuils bas et seuils haut) temporisés pour la protection contre les défauts entre les phases.
- Un relais à maximum de courant homopolaire à deux seuils (seuils bas et seuils haut) temporisé, désensibilisé à l'harmonique trois pour la protection contre les défauts de la terre. [5,8]

### C. Protection différentielle

La protection différentielle est obtenue en comparant la somme du courant primaire et la somme du courant secondaire. Dans le temps supérieur à  $t_0$ , la déviation de ces courants ne doit pas dépasser la valeur  $i_0$ , et le déclenchement se produira si ce temps est dépassé. Ce type de protection a une sélectivité absolue et doit être très stable contre les défauts externes. Le principe de fonctionnement de la protection est basé sur la comparaison du courant d'entrée et du courant de sortie du transformateur.

Cette protection s'utilise:

- Pour détecter des courants de défaut inférieurs au courant nominal,

## Les défaillances de transformateur électrique

- Pour déclencher instantanément puisque la sélectivité est basée sur la détection et non sur la temporisation.

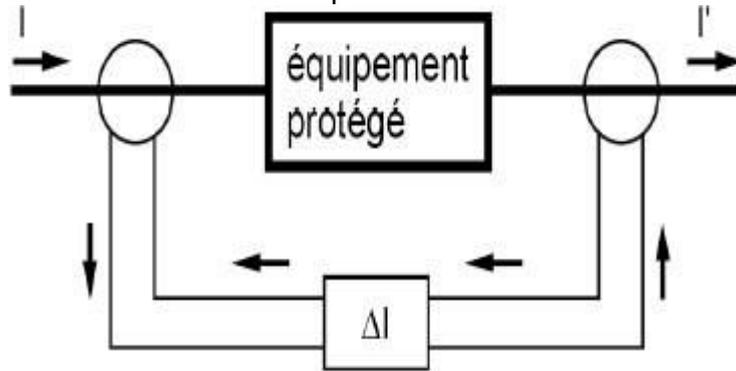


Figure III- 23 Schéma de fonctionnement de la protection différentielle.

### III.7 Conclusion

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

# ***Chapitre IV***

## ***Modalisation et simulation du défaut de court circuit***

# ***Modalisation et simulation du défaut de court circuit***

## **IV.1 Introduction**

Le réseau électrique est constitué de plusieurs composants pour assurer une bonne transmission de l'énergie vers différents utilisateurs. Parmi ces composants, on trouve le transformateur. Ce dernier doit être dimensionné selon le besoin et selon les événements rencontrés.

Ce chapitre nous présente, les formulations des équations électromagnétiques pour la modélisation d'un transformateur de puissance et le court-circuit entre spire, des différentes méthodes d'analyses sont conçus pour détecter la présence des signatures des défauts et des harmoniques dans le réseau électrique, dans ce chapitre on s'intéressera à l'étude par simulation numérique du défaut de court circuit au bobinage primaire et secondaire.

## **IV.2 Modélisation d'un court-circuit entre spires dans un transformateur de puissance**

### **IV.2.1 Modèle d'un transformateur de puissance**

Notre dispositif est un transformateur triphasé à colonne, on utilise la méthode numérique de la discrétisation pour la mise en équation mathématique des enroulements. Cette méthode consiste à exprimer les effets inductifs propres et mutuels entre des multiples spires. Comme nous avons ici des spires de géométrie simple, ces inductances sont calculées par des expressions analytiques. La résolution analytique de telles équations nécessite généralement des hypothèses simplificatrices.

#### **IV.2.1.1 Hypothèse de départ**

Les hypothèses simplificatrices pour la résolution d'un algorithme sont toujours basées sur les phénomènes physiques. Pour la modélisation mathématique d'un transformateur de puissance, des hypothèses ont été faites :

- La géométrie étudiée est à asymétrie de révolution
- Les enroulements sont concentriques.
- Les pertes fer sont négligées.
- L'effet d'extrémité des têtes des bobines est négligé.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
- Le circuit magnétique est linéaire

Pour une spire donnée, les effets mutuels sont essentiellement dus aux spires situées sur la même colonne

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

### IV.2.1.2 Modèle triphasé ou modèle complet

La modélisation des transformateurs consiste à établir une structure mathématique qui décrit l'ensemble des phénomènes électromagnétiques. Un schéma équivalent complet décrit bien le fonctionnement du transformateur qu'on peut présenter sur la fig. IV-1: [25].

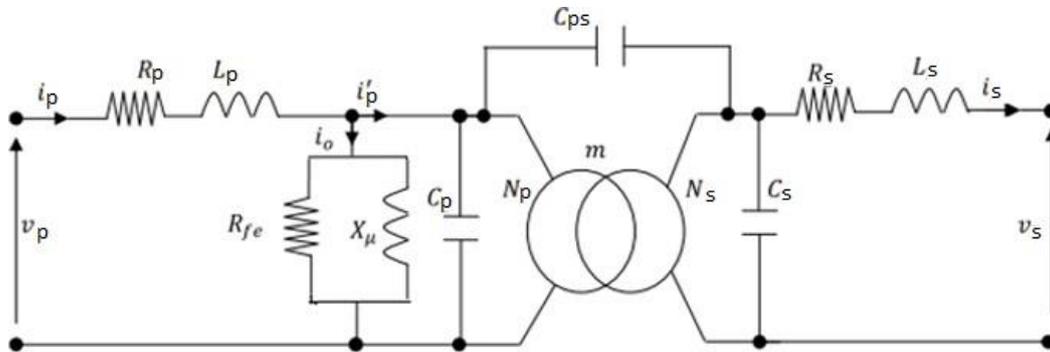


Figure IV- 1 Modèle complet du transformateur

En désignant par  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $L_p$ ,  $L_s$  les résistances et inductances de fuites des enroulements primaire de  $N_p$  spires et du secondaire de  $N_s$  spires ;  $R_{fe}$  résistance du circuit magnétique et  $X_\mu$  est la réactance de magnétisation du circuit magnétique correspondant à ce flux.  $C_p$ ,  $C_s$ , et  $C_{ps}$  sont des capacités parasites qui apparaissent en hautes fréquences. Le transformateur est alimenté sous une tension  $v_p$  variable, délivrant une tension  $v_s$  et traversé par les courants  $i_p$  au primaire et  $i_s$  au secondaire. Un transformateur réel est fondamentalement caractérisé par le système d'équations ci-dessous [26]:

$$[V_p] = [R_p][i_p] + \frac{d[\phi_p]}{dt}$$

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt}$$

$$N_p[i_p] = N_s[i_s] = R\phi$$

Où :  $[V_p]$  Le vecteur des tensions du primaire

$[V_s]$  Le vecteur des tensions du secondaire

$[i_p]$  Le courant traversant l'enroulement primaire.

$[i_s]$  Le courant traversant l'enroulement primaire.

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

Dans les enroulements, les phénomènes magnétiques peuvent être résumés par un coefficient d'inductance liant le flux au courant qui lui donne naissance

$$[\Phi_p] = [L_p][i_p] + [M_{ps}][i_s]$$

$$[\Phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sp}][i_p]$$

Avec  $[R_p]$ ,  $[L_p]$ ,  $[R_s]$ ,  $[L_s]$  sont les matrices des résistances et des inductances respectivement du primaire et du secondaire. Pour mieux comprendre le fonctionnement du transformateur, on va étudier le comportement d'un élément dans une spire dans deux enroulements HT et BT

La reluctance est l'analogie magnétique de la notion de la résistance. Elle vaut classiquement pour un tube de flux de longueur  $l$  et de section  $S$  constante :

$$\mathcal{R} = \frac{\mu l}{S}$$

### IV.2.1.3 Discrétisation d'un enroulement

La modélisation consiste à subdiviser le conducteur en éléments de circuits circulaires et coaxiaux fictifs, dont la forme et les dimensions sont telles que la densité de courant peut être supposée constante dans chacun de ces éléments. La subdivision peut se faire en mailles non régulières selon la pièce modélisée, zone de forte variation des grandeurs physiques, effet de peau important [27].

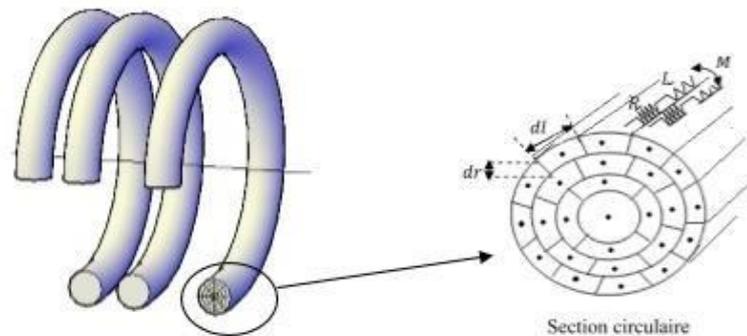


Figure IV- 2 Découpage des conducteurs en éléments



## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

$$V_1^S = R_{n_2 1} I_{n_2 1} + L_{n_2 1} \frac{dI_{n_2 1}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, n_2 1} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n_2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_2 1, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

Dans la spire 2 :

$$V_2^P = R_{12} I_{12} + L_{12} \frac{dI_{12}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq 12}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, 12} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{12, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

$$V_2^P = R_{n_1 2} I_{n_1 2} + L_{n_1 2} \frac{dI_{n_1 2}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq n_1 2}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, n_1 2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_1 2, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

$$V_2^S = R_{12} I_{12} + L_{12} \frac{dI_{12}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, 12} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ kl \neq 12}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{12, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

$$V_2^S = R_{n_2 2} I_{n_2 2} + L_{n_2 2} \frac{dI_{n_2 2}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, n_2 2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n_2 2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_2 2, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

Dans la spire N :

$$V_N^P = R_{1N} I_{1N} + L_{1N} \frac{dI_{1N}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq 1N_1}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, 1N_1} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{1N_1, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

$$V_N^P = R_{n_1 N_1} I_{n_1 N_1} + L_{n_1 N_1} \frac{dI_{n_1 N_1}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq n_1 N_1}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, n_1 N_1} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_1 N_1, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

$$V_N^S = R_{1N_2} I_{1N_2} + L_{1N_2} \frac{dI_{1N_2}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, 1N_2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ kl \neq 1N_2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{1N_2, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

$$V_N^S = R_{n_2 N_2} I_{n_2 N_2} + L_{n_2 N_2} \frac{dI_{n_2 N_2}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, n_2 N_2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n_2 N_2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_2 N_2, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}$$

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

### IV.2.1.5 Expressions des inductances propres, mutuelles et les résistances

Considérons le cas de la figure suivante, dans le vide (ou l'air), composé de deux spires circulaires coaxiales de rayon moyen  $r_1$  et  $r_2$ . Celles-ci sont constituées de conducteurs de section circulaire et de rayon  $r_c$ .

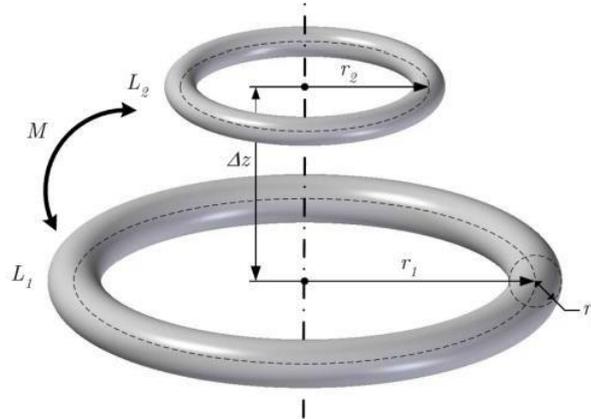


Figure IV- 4 Calcul d'inductances de spires circulaires et coaxiales

On utilise le théorème de Stokes le flux d'induction magnétique. Le potentiel vecteur  $A$  du champ électromagnétique entre deux nœuds émetteur  $i$  et récepteur  $k$  est défini par l'expression loi de Biot et Savart (tous les calculs de démonstrations sont présentés dans l'annexe) et en fin l'inductance mutuelle est donnée par l'équation suivante :

$$M = \frac{2\mu_0\sqrt{r_1r_2}}{k} \left[ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) E_1(k) - E_2(k) \right] \text{ Avec } k = \sqrt{\frac{4r_1r_2}{(r_1+r_2)^2 + \Delta z^2}}$$

Et les équations  $E_1(k)$  et  $E_2(k)$  sont les intégrations elliptiques de première et seconde espèce :

$$E_1(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{\partial\theta}{\sqrt{1-k^2(\sin\theta)^2}} \quad \text{Et} \quad E_2(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2(\sin\theta)^2} d\theta$$

L'inductance propre est définie si on connaît le rayon de la spire  $r_1$  et le rayon du fil conducteur  $r_c$  qui constitue la spire, il s'exprime par :

$$L = \frac{\mu_0 r_1}{2\pi} \left[ \ln \frac{3r_1}{4r_c} + \frac{1}{4} \right]$$

La résistance est calculée par le produit de la longueur de la spire et la résistivité électrique, on divise par sa section :

$$R_1 = 2\pi r_1 \frac{\rho}{S_1}$$

Dans le but de diminuer la taille de système d'équations à résoudre et comme on ne s'intéresse qu'aux densités de courant, on élimine les tensions élémentaires, par conséquent on réduit le système matriciel.

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

La matrice d'un enroulement primaire devient comme suivante [28,29] :

$$n_1 U^p = [R_p][I_p] + [L_{pp}] \frac{d}{dt} [I_p] + [M_{sp}] \frac{d}{dt} [I_s]$$

$$[R_p] = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & R_{n1} & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 & R_{12} & 0 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & R_{nN} \end{bmatrix}$$

$$[L_{pp}] = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{21}^p & \dots & M_{n_1 1}^p & M_{12}^p & \dots & M_{n_1 N_1}^p \\ M_{11}^p & L_{21} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & M_{21}^p & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & L_{n_1 1} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & L_{12} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & M_{n_1 N_1}^p \\ M_{11}^p & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & L_{n_1 N_1} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sp}] = \begin{bmatrix} M_{11}^s & M_{21}^s & \dots & M_{n_2 1}^s & M_{12}^s & \dots & M_{n_2 N_2}^s \\ M_{11}^s & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{11}^s & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & M_{n_2 N_2}^s \end{bmatrix}$$

Le secondaire a la même forme que la matrice du primaire, si on regroupe les deux équations du primaire et du secondaire en une seule on aura :

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_p] \\ [R_s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{pp}] \\ [L_{ss}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [M_{sp}] \\ [M_{ps}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s \\ I_p \end{bmatrix}$$

Dans le cas sain ou le régime est équilibré, les effets des autres enroulements sont négligeables car la somme des flux magnétiques produit par les trois phases est nulle, donc la modélisation des enroulements d'une seule colonne s'avère donc un choix suffisant, permettant de limiter le nombre d'inconnu du modèle électromagnétique. La somme canalisée par les trois noyaux s'exprime par [30] :

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c = 0$$

# Modalisation et simulation du défaut de court circuit

## IV.2.2 Modélisation de court-circuit entre spires

Lors d'un court-circuit entre spires, la somme des flux magnétiques produit par les trois phases n'est plus nulle donc il y a une apparition de flux homopolaire donc tous les enroulements des trois colonnes sont mis en jeux.

$$\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c \neq 0$$

On va étudier le cas d'un court-circuit qui se produit dans un seul enroulement, on suppose que le court- circuit se produit dans l'enroulement primaire (Haute Tension) de la phase A.

La figure (IV-5) représente une bobine d'un enroulement élémentaire dont l'entrée et la sortie sont notées respectivement A et X. Sur cette bobine apparait un court-circuit entre spires aux points de contact a1 et a2. Pour modéliser le court-circuit entre spires, on isole les spires en court-circuit, pour former une nouvelle bobine et la bobine en défaut ou la bobine mère a un nombre de spires diminué du nombre de spires en court-circuit ici on va le noter  $n_{cc}$ . Puis dans ces spires en court-circuit, apparait un courant qu'on appelle, courant de circulation ou courant de court-circuit noté  $i_{cc}$ , illustré par la figure (IV-6). Afin de modéliser l'apparition d'un court- circuit entre spires, entre les deux points de contact, on va y insérer une résistance de contact notée  $R_d$  [28,31].

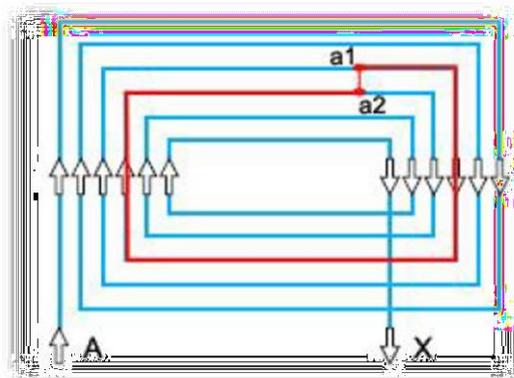


Figure IV- 5 Présentation du défaut sur une bobine

On représente l'enroulement primaire par  $A$ ,  $B$  et  $C$  et pour le secondaire  $a$ ,  $b$  et  $c$ . On considère un transformateur couplé en étoile. Par conséquent, afin de prendre en compte le défaut de court-circuit entre spires sur la phase A, il est commode de diviser la phase A en deux. L'enroulement sain est noté  $A$  et les spires en court-circuit sont notées  $cc$ . Par conséquent, le primaire est ainsi constitué de quatre enroulements ( $A$ ,  $cc$ ,  $B$  et  $C$ ) figure (IV-6). Le modèle reste le même que le court-circuit soit aux enroulements secondaires ou qu'il soit aux enroulements primaires.

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

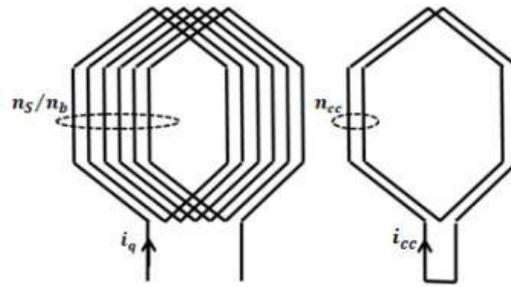


Figure IV- 6 Présentation du défaut en deux bobines différentes

Afin de prendre en compte l'effet du court-circuit, l'équation des enroulements du transformateur devient comme suit :

$$[V] = [V_A \quad V_B \quad V_C \quad V_{cc} \quad V_a \quad V_b \quad V_c]$$

$$[I] = [I_A \quad I_B \quad I_C \quad I_{cc} \quad I_a \quad I_b \quad I_c]$$

$$[R] = \text{diag}[R_A \quad R_B \quad R_C \quad R_{cc} \quad R_a \quad R_b \quad R_c]$$

[R] est une matrice diagonale [32]

$$[L] = \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 & M_{A-cc} & M_{A-a} & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 & 0 & 0 & M_{B-b} & 0 \\ 0 & 0 & L_C & 0 & 0 & 0 & M_{C-c} \\ M_{A-cc} & 0 & 0 & L_{cc} & M_{cc-a} & 0 & 0 \\ M_{A-a} & 0 & 0 & M_{cc-a} & L_a & 0 & 0 \\ 0 & M_{B-b} & 0 & 0 & 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & M_{C-c} & 0 & 0 & 0 & L_c \end{bmatrix}$$

[L] La matrice des inductances.

Comme le court-circuit se trouve sur la phase A du primaire, les différents paramètres du transformateur deviennent :

$$R_A = (1 - n_{cc})R_p \quad \text{Et } R_B = R_C = R_p$$

$$R_{cc} = n_{cc}R_p$$

$$R_a = R_b = R_c = R_s$$

Pour les inductances propres on a :

$$L_A = (1 - n_{cc})^2 L_{pp}$$

$$L_{cc} = n^2 L_{pp}$$

$$L_B = L_C = L_{pp}$$

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

$$L_a = L_b = L_c = L_r$$

Avec  $n_{cc}$  est le taux de spire en court-circuit.

$$n_{cc} = \frac{N_{scc}}{N_s}$$

Avec  $N_{scc}$  le nombre de spires en court-circuit et  $N_s$  le nombre total de spires dans une phase. Les inductances mutuelles sont essentiellement dues aux spires situées sur la même colonne, leurs expressions sont les suivantes [27] :

$$M_{A-cc} = n_{cc}(1 - n_{cc})M_{sp}$$

$$M_{A-a} = (1 - n_{cc})M_{sp}$$

$$M_{cc-a} = n_{cc}M_{sp}$$

$$M_{B-b} = M_{C-c} = M_{sp}$$

L'avantage de ce modèle est qu'il reste inchangé ; peu importe où le défaut se situe, c'est à dire que ce soit dans le primaire ou dans le secondaire.

### IV.2.3 Equation de démarrage

Pendant le démarrage, le courant d'appelle est de quatre à huit fois le courant nominal. Ce phénomène est modélisé par l'équation. Au démarrage le courant est nul :

$$E = RI + L \frac{dI}{dt} + M \frac{dI}{dt}$$

On pose  $L + M = L_p$

$$\frac{dI}{E - RI} = \frac{1}{L_p} dt$$

On fait le primitif et après l'exponentiel de membre à membre on a

$$\ln(E - RI) = \frac{1}{L_p} t + Cte$$

$$I = \frac{E - e^{\frac{1}{L_p} t} K}{R}$$

A  $t=0, I=0$   $E=K$

$$I(t) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{\frac{1}{L_p} t} \right)$$

## ***Modalisation et simulation du défaut de court circuit***

### **IV.3 Tension d'alimentation et Couplage Harmonique**

A l'origine, ce sont les récepteurs non linéaires qui appellent des courants déformés qui sont des sources de courants harmoniques. Les courants harmoniques circulant dans les conducteurs et les appareillages électriques rencontrent donc des impédances propres à ces composants et suivant la loi d'Ohm, engendrent des tensions harmoniques. La valeur de chaque tension harmonique, pour les différents rangs dépendra de l'amplitude du courant harmonique à l'origine et de l'impédance rencontrée pour le rang considéré.

Dans le cadre de la fourniture d'électricité, les taux de courant harmoniques ne doivent pas dépasser les valeurs précisées dans le tableau suivant. Ces valeurs représentent des taux individuels calculés par rapport au fondamental qui est à 50Hz dans notre cas, sachant que le taux global d'harmoniques en courant ne doit pas dépasser 8% dans une installation de distribution basse tension.

<b>Rang de l'harmonique</b>	<b>Taux en%</b>
<b>3</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>5</b>
<b>9</b>	<b>1,5</b>
<b>11</b>	<b>3,5</b>
<b>13</b>	<b>3</b>
<b>15</b>	<b>0,3</b>
<b>17</b>	<b>2</b>
<b>19</b>	<b>1,5</b>
<b>21</b>	<b>0,2</b>

**Tableau IV- 1 Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles**

La pollution en harmoniques, dans une installation électrique est moindre, lorsque l'équipement pollueur est de puissance faible par rapport à la puissance disponible sur le réseau considéré. Le courant déformé appelé par la charge, présente dans ce cas, une amplitude faible et rencontre une impédance faible. Le produit courant-impédance donne alors naissance à une tension harmonique pouvant ainsi être considérée comme négligeable et n'affectant pas l'onde sinusoïdale de tension du réseau. C'est l'accumulation de charges déformantes, produisant des courants harmoniques importants sur un réseau électrique, qui conduira à un niveau de pollution jugé inquiétant. Ceci est d'autant plus vrai, si les impédances présentées par les sources (transformateurs, groupes électrogènes, etc.) et par les onduleurs de lignes, sont élevées. Pour effectuer l'analyse en harmoniques d'une installation électrique, deux types de mesures interviendront : La mesure des tensions harmoniques et La mesure des courants harmoniques

En effet, afin de quantifier une installation électrique, en termes de pollution harmonique, c'est le taux harmonique en tension qui sera relevé aux bornes du secondaire du transformateur de distribution, pour évaluer si la pollution est présente ou non sur l'installation considérée. D'autre part, c'est la mesure des courants harmoniques qui

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

permettra de déterminer quelle est ou quelles sont là où les sources perturbatrices sur un réseau électrique. La mesure des courants harmoniques apparaît donc comme solution adaptée, dès lors qu'il s'agit de détecter et de localiser des sources d'harmoniques et établir un diagnostic sur les nuisances ainsi créées.

### IV.4 Description du dispositif

Notre dispositif est d'un transformateur triphasé de distribution à trois colonnes à refroidissement par huile. Il est fabriqué et commercialisé par l'entreprise Electro-industries [E.E.I-2008]. Les enroulements haute tension (HT) sont connectés en triangle et comportent chacun 3000 spires réparties sur 14 couches, et les enroulements basse tension (BT) connectés en étoile comportent chacun 22 spires réparties sur deux couches.

Caractéristiques	Valeur	Unité
Puissance apparente( $S_n$ )	630	kVA
Fréquence	50	Hz
Tension nominale de l'enroulement HT( $U_n$ )	30	kV
Tension nominale de l'enroulement BT( $U_n$ )	0,4	kV
Groupe de couplage	Dyn	

Tableau IV- 2 Caractéristiques du dispositif Source:[E.E.I-2008].

Composante	valeur	Unité
Diamètre intérieur de l'enroulement BT( $\varnothing_{int\_BT}$ )	198	Mm
Diamètre extérieur de l'enroulement BT( $\varnothing_{ext\_BT}$ )	239	Mm
Diamètre intérieur de l'enroulement HT( $\varnothing_{int\_HT}$ )	265	Mm
Diamètre intérieur de l'enroulement HT( $\varnothing_{ext\_HT}$ )	356	Mm
Hauteur des enroulements( $h_{enr}$ )	436	Mm
Epaisseur de l'enroulement BT( $e_{enBT}$ )	20,5	Mm
Epaisseur de l'enroulement HT( $e_{enHT}$ )	43	Mm
Diamètre du noyau( $\varnothing_n$ )	180	Mm
Hauteur du noyau( $h_n$ )	810	Mm
Diamètre du fil nu ( $\varnothing_{fil}$ )	15	Mm
Diamètre du fil avec isolation ( $\varnothing_{fil-iso}$ )	16	Mm
Section de fil( $S_{fil}$ )	$\pi*(7,5)^2$	Mm

Tableau IV- 3 Dimension géo métrique du transformateur

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

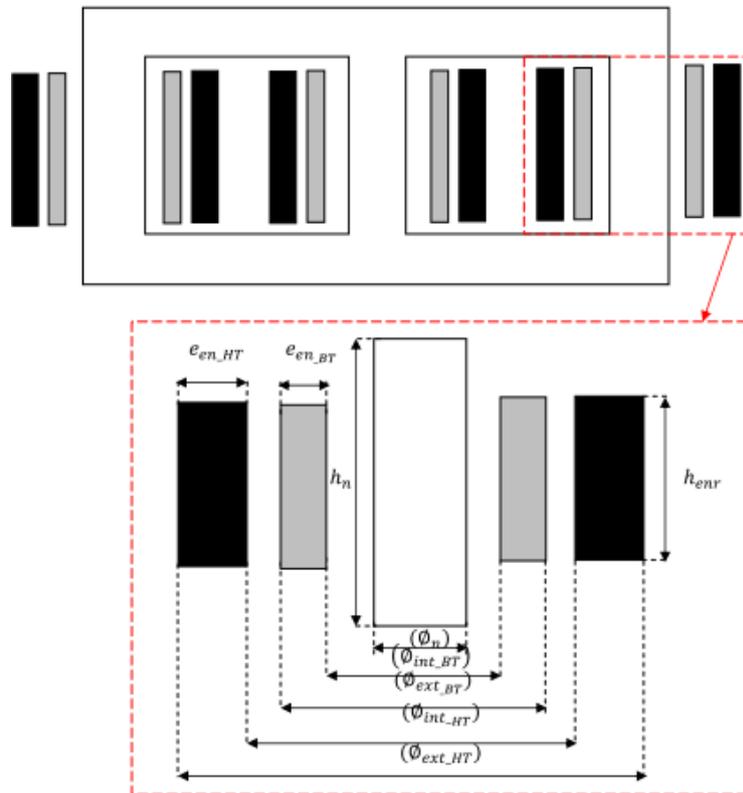


Figure IV- 7 Dimension du transformateur Source:[E.E.I-2008].

Caractéristiques Physique et milieu	Conductivité électrique		Perméabilité magnétique
Air	$\sigma=0$	$[S.m^{-1}]$	$\mu=\mu_0=4\times 10^{-7}[H.m^{-1}]$
Enroulement	$\sigma_e=56* 10^7$		$\mu=\mu_0=4\times 10^{-7}, \mu_r=1$

Tableau IV- 4 Caractéristique physique des matériaux

### IV.5 Défaut de Court-circuit

Le court-circuit de spires est donc le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au bobinage du transformateur, même si les risques d'ouverture de phase (conducteur coupé) demeurent physiquement réalisables. En effet, on a vérifié expérimentalement que le courant circulant dans les spires en court-circuit est dix fois plus important que le courant nominal. L'augmentation de la température qui s'en suit entraîne la destruction en cascade des isolants et par effet cumulatif, la destruction complète de transformateur.

Comme les fils en cuivre sont dimensionnés pour une certaine gamme de puissance, un échauffement anormal peut être à l'origine d'une destruction des isolants mettant ainsi en court-circuit plusieurs spires de la bobine. Ce défaut est de loin le plus répandu et le plus dangereux dans le cas de la bobine d'un transformateur.

Au contraire du défaut précédent qui a pour effet de réduire simplement le nombre de spires de la bobine, un court-circuit est à l'origine d'un nouveau bobinage court-circuité parcouru par un fort courant induit noter  $i_{cc}$ . Il en résulte un champ magnétique additionnel  $H_{cc}$  dans la bobine ayant la même direction que le champ nominal. Il apparaît donc deux bobinages :

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

- Le bobinage principal dont le nombre de spires se trouve réduit à  $N_s - N_{cc}$  spires (où  $N_{cc}$  est le nombre de spires en court-circuit). Ce bobinage est parcouru par un courant noté  $i$  à l'origine du champ principal (mode commun),
- Le bobinage de  $N_{cc}$  spires en court-circuit avec une excitation magnétique notée  $H_{cc}$  (mode différentiel), orienté selon le même axe que l'excitation principale.

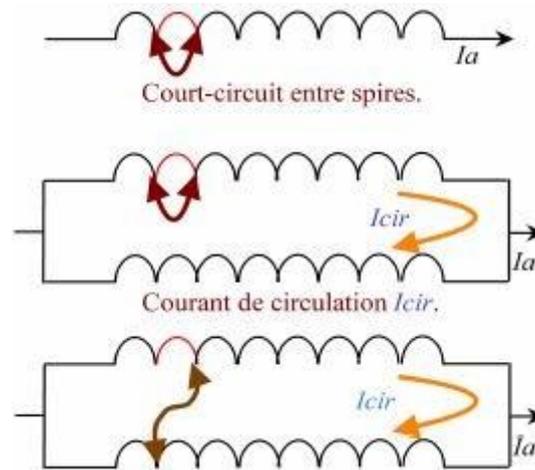


Figure IV- 8 Court-circuit entre spires

### IV.6 Localisation de la phase en défaut de court-circuit

A partir du système triphasé des courants :

$$i_A(t) = I_{mA} \sin(\omega t)$$

$$i_B(t) = I_{mB} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_C(t) = I_{mC} \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

Sachant que :  $I_{mA} = I_A + \Delta I_A$

$$I_{mB} = I_B + \Delta I_B$$

$$I_{mC} = I_C + \Delta I_C$$

$\Delta I_A, \Delta I_B, \Delta I_C$ : les valeurs de courant ajouté suite au défaut de court-circuit

En calculant le courant **Homopolaire** :

$$i_{H0} = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t)$$

Après simplification on a la formule générale (3.3) qui fait apparaître le défaut de court-circuit du bobinage d'un transformateur de puissance :

$$i_{H0} = (\Delta i_A - 0.5 * \Delta i_B - 0.5 * \Delta i_C) * \sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} * (\Delta i_B - \Delta i_C) * \cos(\omega t)$$

## **Modalisation et simulation du défaut de court circuit**

Si on fait le changement des variables suivant :

$$A = \rho * \cos(\beta) = (\Delta i_A - 0.5 * \Delta i_B - 0.5 * \Delta i_C)$$

$$B = \rho * \sin(\beta) = -\frac{\sqrt{3}}{2} * (\Delta i_B - \Delta i_C)$$

Cela implique que :  $\rho = \sqrt{A^2 + B^2}$

$$\text{Et : } \beta = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$

**ρ** : Le module du courant Homopolaire nous informe sur la gravité du défaut

**β** : Le déphasage du courant Homopolaire nous précise la phase en défaut

Pour l'étude et la détection de défaut de court-circuit on a procédé à la conception d'un programme de simulation par le logiciel « MATLAB » pour les différents cas possibles de ce type de défaut : voir Tableau 3.1

Différents Cas de Simulation	Cas Sain	Cas de court circuit une seule phase				Cas de court circuit deux phases			Trois phases en court circuit	
		Légère défaut		Grand défaut						
Phase A	00%	05%	00%	00%	80%	00%	30%	00%	10%	20%
Phase B	00%	00%	05%	00%	00%	40%	70%	70%	60%	20%
Phase C	00%	00%	00%	05%	00%	40%	00%	30%	40%	20%

**Tableau IV- 5 Différents cas possible pour un défaut de court-circuit d'un transformateur de puissance**

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

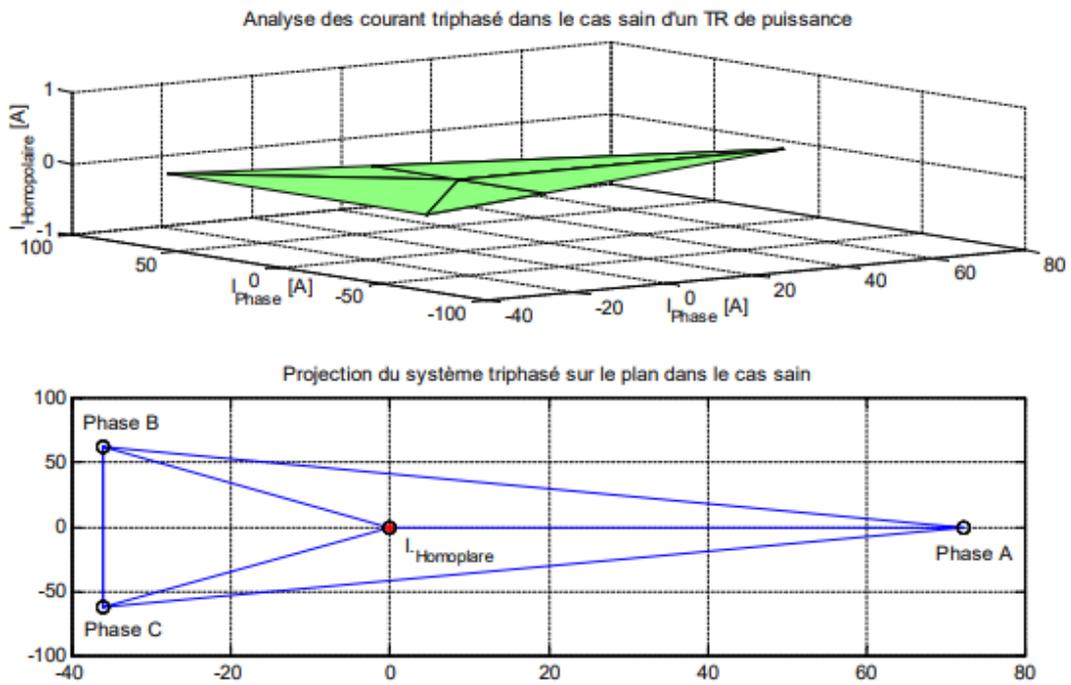


Figure IV- 9 Simulation du cassain pour un transformateur de puissance

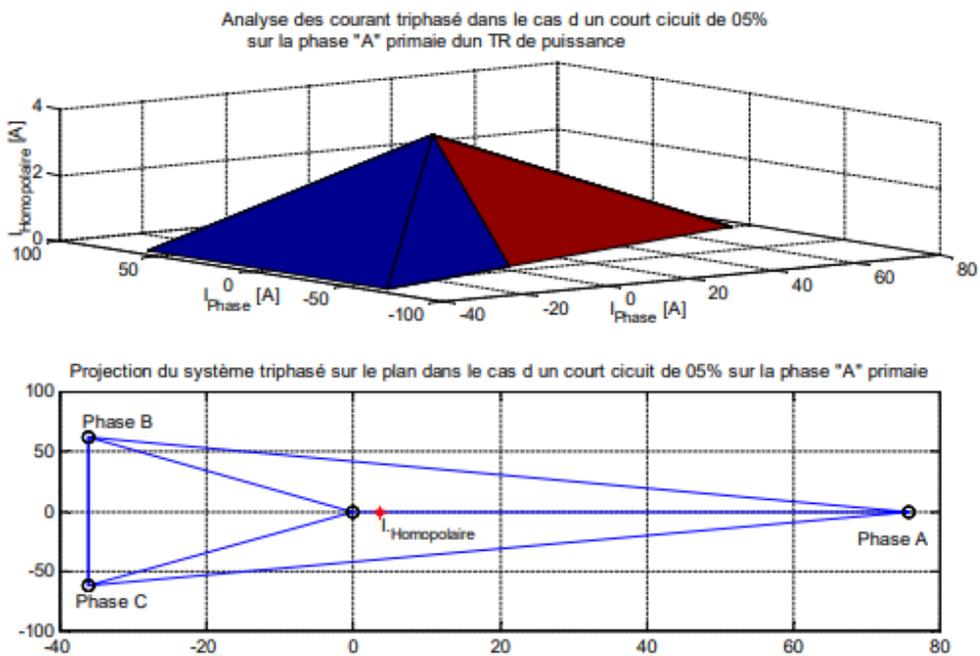


Figure IV- 10 Simulation d'un court-circuit de 05% de la phase. A

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

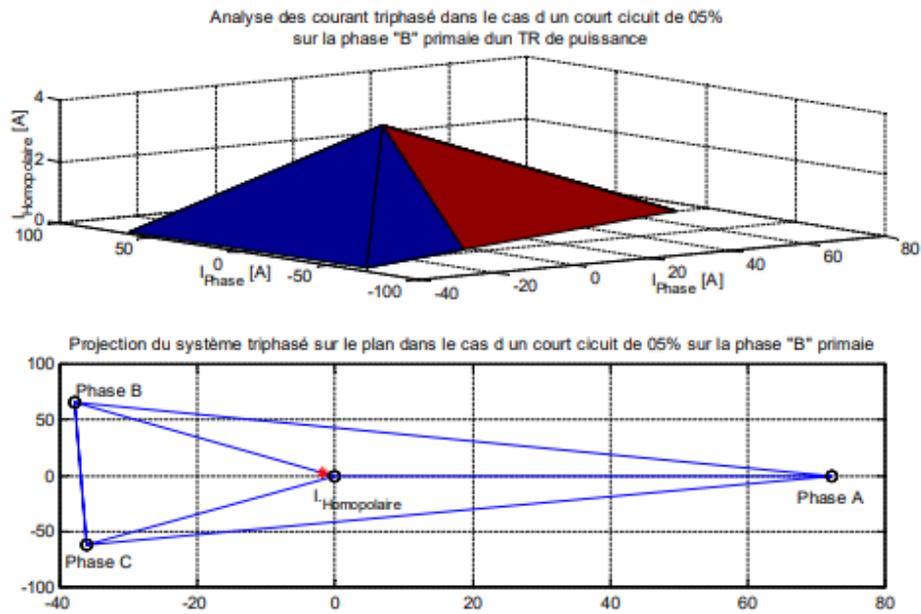


Figure IV- 11 Simulation d'un court-circuit de 05% de la phase.B.

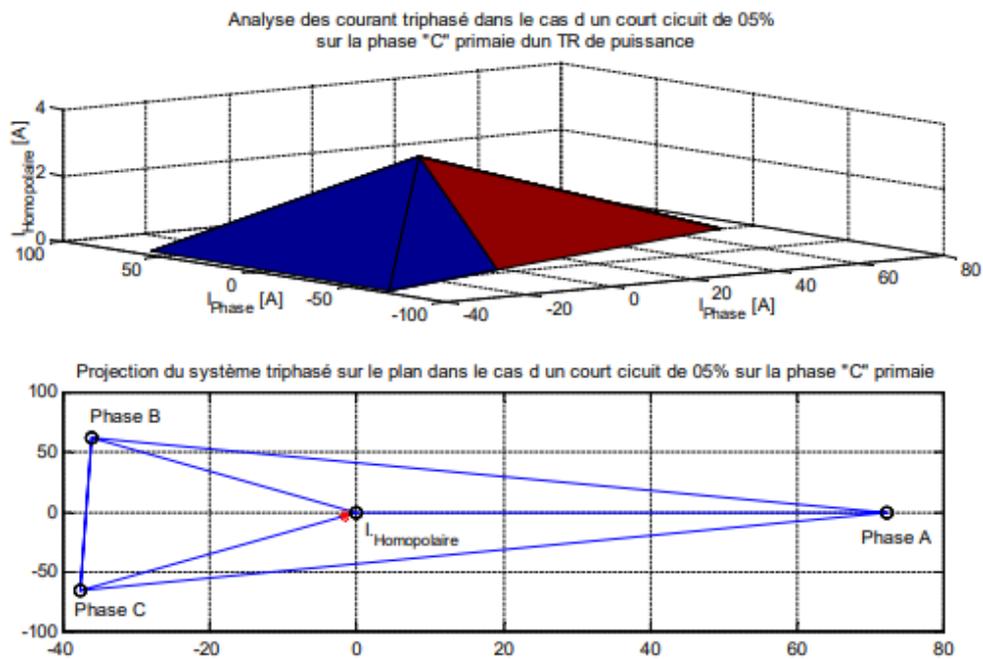


Figure IV- 12 Simulation d'un court-circuit de 05% de la phase.C.

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

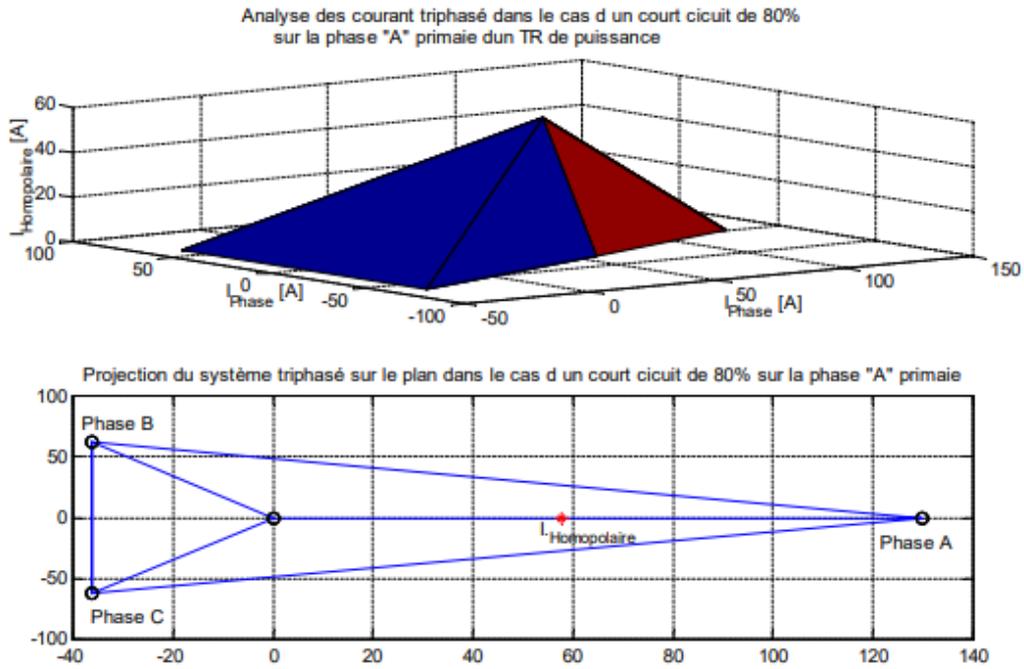


Figure IV- 13 Simulation d'un court-circuit de 80% de la phase.A.

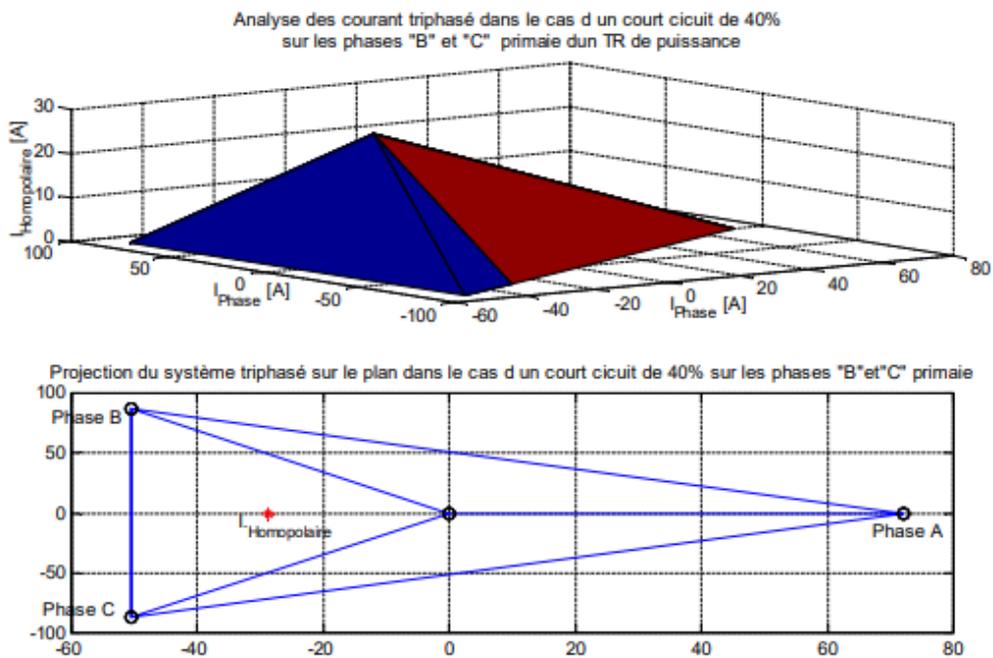


Figure IV- 14 Simulation d'un court-circuit de 40% des phases.B. et.C.

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

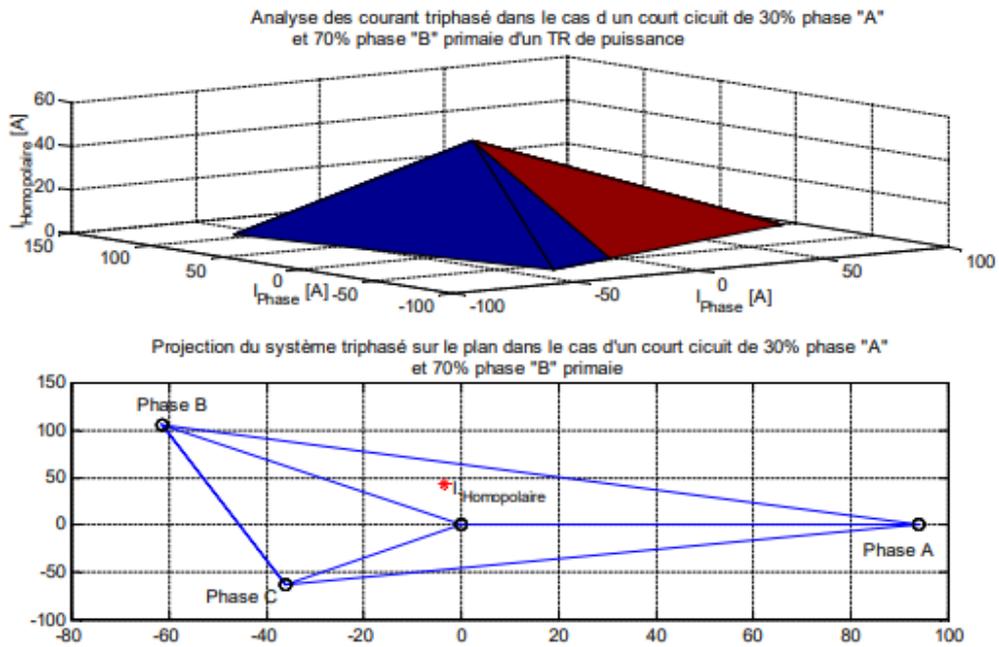


Figure IV- 15 Simulation d'un court-circuit de 30% phase. A. et 70% phase. B.

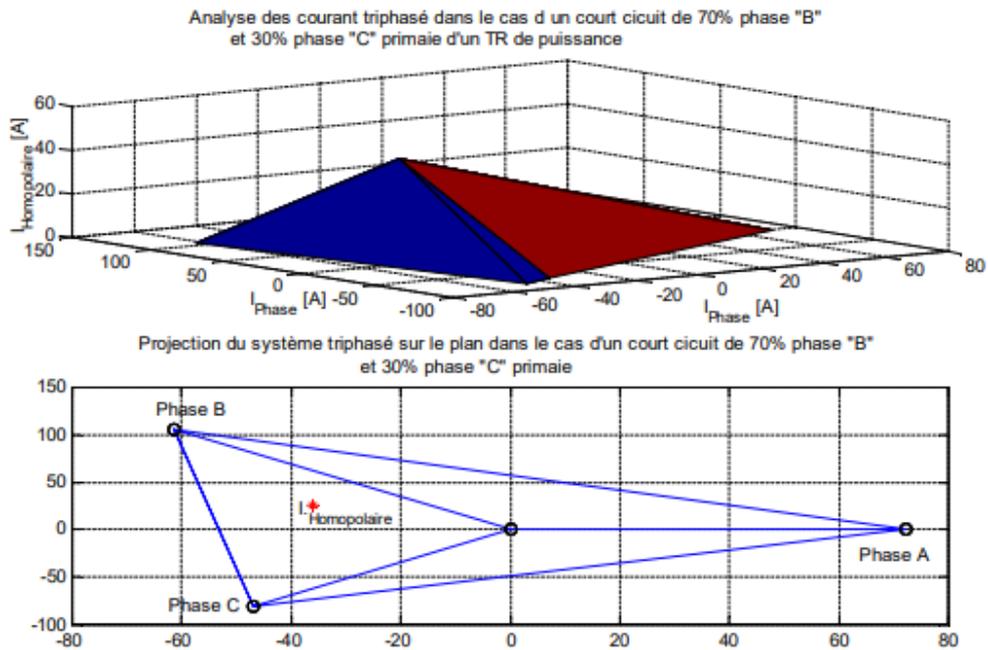


Figure IV- 16 Simulation d'un court-circuit de 70% phase. B. et 30% phase. C.

## Modalisation et simulation du défaut de court circuit

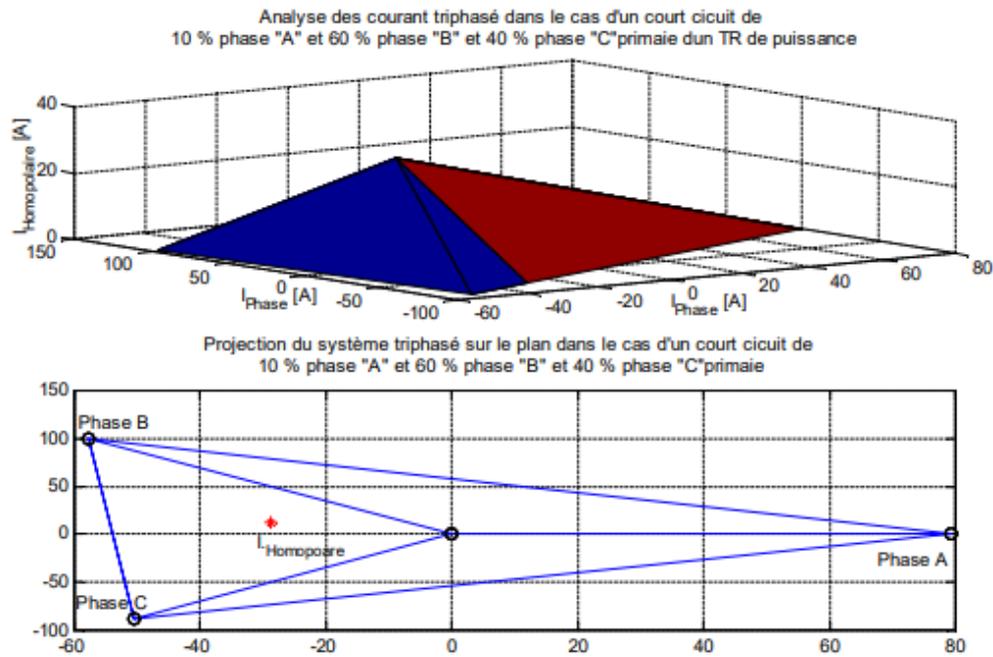


Figure IV- 17 Simulation d'un court-circuit de 10% phase. A. 60% phase. B. et 40% phase. C.

### IV.7 Conclusion

Ce chapitre introduit la modélisation et la simulation de transformateur, et après cette analyse nous introduisons le calcul des paramètres des transformateurs dans les systèmes d'exploitation (court-circuit), ce qui nous permet de développer notre propre modèle de transformateur.

La modélisation des transformateurs est un domaine très vaste et généralement les modèles sont employés pour la simulation des comportements transitoires. Une représentation exacte de chaque situation transitoire exige un modèle convenable pour une gamme de fréquences allant de 0 à plusieurs mégahertz. Des modèles de transformateurs peuvent être développés pour être précis pour une gamme spécifique de fréquence.

La présence d'un tel défaut dans transformateur de puissance impose une variation de courant donc des inductances de valeurs différentes en fonction de nombre de spires en court-circuit et leurs positions par apport à un axe de référence. Ainsi, on a modélisé la fonction de potentiel vecteur et calculer analytiquement les inductances propres et mutuelles primaires et secondaires.

# Conclusion Générale

## ***Conclusion Générale***

### **Conclusion Générale**

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de grandeurs variables à un autre système des courants et des tensions généralement différentes mais de même fréquence. Le transformateur c'est l'élément essentiel dans un réseau électrique. D'après cette étude nous avons présenté théoriquement l'importance du transformateur dans un réseau électrique, avec son rôle et sa nécessité pour le transport.

Le diagnostic de défauts, et d'état, des transformateurs est encore en plein développement dans le monde. En effet, le parc mondial est principalement composé d'appareils vieillissant sensiblement, de plus en plus exploités et donc contraints. De plus, les experts en transformateurs se font de moins en moins nombreux. Ainsi de telles méthodes systématiques et pratiques de diagnostic ont tout à fait leur place dans le monde de l'électrotechnique d'aujourd'hui et de demain.

## Bibliographie

- [1] YAHIOU Abdeghani, « contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : cas du courant d'appel », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Sétif. Avril 2012.
- [2] MEZARI Naouel, « Diagnostic des transformateurs de puissances », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011
- [3] Professeur luclasne, « exercice et problèmes d'électrotechnique notion de bases et machines électrique ».
- [4] Notice technique sur les centrales thermiques « fascicule n° 21 le transformateur » électricité de France.
- [5] Jean Sanchez, « Aide au diagnostic des défauts des transformateurs de puissance » université Grenoble alpes, 2011.
- [6] Document réf. Transformateur : odt, version du 26 janv. 2010.
- [7] Theodore Wild, « Electrotechnique », 3eme Edition de Boeck Université, Bruxelles, 1999
- [8] Mr ZELLAGUI Mohamed, « Etude protection des réseaux électriques mt 30& 10 kv », mémoire de magister université de Constantine. Juillet 2010
- [9] Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».
- [10] Groupe Schneider « cahier technique n° 192 protection de transformateur MT/BT.
- [11] Mme Benaicha Halima, « Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle », thèse de doctorat département d'Electrotechnique, option Réseau Electriques, université des sciences de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 2015
- [12] Difference Between Core Type and Shell Type Transformer by CIRCUIGLOBE.com
- [13] Step-up & Step-down Transformers Step-up Transformer by CIRCUIGLOBE.com
- [14] Difference Between Single Phase and Three Phase Power Supplies by ELECTONICSHUB.com
- [15] Difference between Autotransformer and Conventional Transformer by ELECTRICALACADEMIA.com
- [16] The Difference Between Power and Distribution Transformers by CRITTERGUARD.com

- [17] Difference between Current Transformer and Potential Transformer by ELECTRICALACADEMIA.com
- [18] Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».
- [19] Tenue des transformateurs en cas de défauts internes, Raux / Leconte / Gibert, CIRED 89.
- [20] MEZARI Naouel, « Diagnostic des transformateurs de puissances », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011
- [21] BOURGEOIS.A, « Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance », Institut national polytechnique de Grenoble, Février 2007.
- [22] (2006). Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit.
- [23] ABB. (2007). Short-circuit Duty of Power Transformers.
- [24] (1993). Transformateurs de puissance - Partie 2: Echauffement.
- [25] Bernard Multon « Modèles électriques du transformateur électromagnétique », revue 3EI, 1997, pp.31-36, Février 2012.
- [26] Madjid MEZIANI « Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance » pp : 1-16, 43 ; Memoire Magister, Décembre 2011.
- [27] Anthony Lefevre « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs » p.p. 78-94, 48-66 Université de Nantes, 2006.
- [28] Brice AUBERT « Détection des courts-circuits inter-spires dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents : Méthodes basées modèles et filtre de Kalman étendu- Application à un canal de génération électrique en aéronautique » pp : 26-33, Thèse Doctorat, Mars 2014
- [29] Thierry VAN CUTSEM « Le transformateur de puissance » pp : 1-10 Notes théoriques du cours ELEC0014, Novembre 2016.
- [30] Ecole Nationale Supérieur Maritime « TRANSFORMATEURS », Cours et Problèmes O1MM 2<sup>e</sup> année, septembre 2014.
- [31] Tsivalalaina David Razafimahefa « Diagnostic des systèmes de production d'énergie à source éolienne » pp : 34-91 Thèse décembre 2016.
- [32] Mladen Kezunovic, Senior Member, IEEE, « Modeling and Simulation of the Power Transformer Faults and Related Protective Relay Behavior » pp: 44-56, Janvier 2000.