



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du **DIPLOME** de **MASTER**

Titre : Ingénieur

Mention : Génie électrique

Parcours : Machines électriques, Réseaux d'énergie électriques
et Energie renouvelable

**DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES
ENROULEMENTS D'UN TRANSFORMATEUR CONNECTE SUR UN
RESEAU POLLUE**

Soutenu par : ANDRIATSIMINDRAMBOLA Nomenjanahary

Directeur de mémoire : ANDRIANAHARISON Yvon

Année universitaire 2015-2016

Date de soutenance : 15 Février 2019



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du DIPLOME de MASTER

Titre : Ingénieur

Mention : Génie électrique

Parcours : Machines électriques, Réseaux d'énergie électriques
et Energie renouvelable

**DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES
ENROULEMENTS D'UN TRANSFORMATEUR CONNECTE SUR UN
RESEAU POLLUE**

Soutenue par : ANDRIATSIMINDRAMBOLA Nomenjanahary

Président de jury : Monsieur RAMAROZATOVO Vonjy, Maître de conférences

Membre de jury : Monsieur RANDRIAMORA Edmond, Maître de conférences

Monsieur RABENJARIVELO Patrice, Maître de conférences

Monsieur RAKOTONIAINA Solofohery, Maître de conférences

Directeur de mémoire : ANDRIANAHARISON Yvon, Professeur titulaire

Année universitaire 2015-2016

Date de soutenance : 15 Février 2019

TENY FISAORANA

Misaotra an'Andriamanitra lehibe noho ny fahasoavany ,fitiavany ary ny nanomezany hery sy fahasalamana.

Manaraka izany dia misaotra indrindra an'i andriamatoa ANDRIANAHARISON Yvon, Filohan'ny Sekoly ambony Politekinika Vontovorona, izy moa no nanampy sy nanorolalana tamin'ny fanatontosana izao asa izao koa mankasitraka indrindra tompoko.

Isaorana ihany koa andriamatoa RAMAROZATOVO Vonjy, mpitantana ny sampam-pianarana « Génie électrique » no filoha amin'ny fitsarana izao asa izao

Tsy adino ihany koa ianareo mpampianatra izay hitsara izao asa izao dia :

Mr RANDRIAMORA Edmond

Mr RABENJARIVELO Patrice

Mr RAKOTONIAINA Solofohery

Misaotra indrindra anareo tompoko noho ny fahatongavanareo hanatontosa izao asa izao.

Ianareo mpampianatra no niotazana

Ny fanabeazana.

Ny ray aman-dreny no niandraikitra mafy

Ny amin'ny vatsy

Ny havana sy namana no niaranikolo

Ka nampijoro

Koa misaotra indrindra e!

TABLE DES MATIERES

TENY FISAORANA	I
TABLE DES MATIERES	II
NOMENCLATURE	V
ABREVIATIONS	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<i>Chapitre I : Etat de l'art sur la pollution du réseau</i>	<i>3</i>
I.1. Introduction.....	3
I.2. Taux de distorsion harmonique	3
I.3. Source d'harmoniques	4
I.3.1. Convertisseur statique	4
I.3.2. Fours à arc	5
I.3.2.1. Cas du four à arc à courant alternatif	5
I.3.2.2. Cas du four à arc à courant continu	5
I.3.3. Lampe à décharge	6
I.3.4. Influence du condensateur.....	6
I.4. Conséquences des harmoniques	7
I.4.1. Effets instantanés	7
I.4.2. Effets à terme.....	7
I.4.3. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance F_p	8
I.5. Les solutions traditionnelles	9
I.5.1. Transformateur à couplage spécial	9
I.5.2. Surdimensionnement des installations électriques	9
I.5.3. Utilisation d'une inductance (selfs) série.....	9
I.5.4. Filtres passifs d'harmoniques	9
I.5.4.1. Filtre résonant	10
I.5.4.2. Filtre amorti	11
I.6. Solutions modernes de dépollution	11
I.6.1. Filtrage actif	11
I.6.2. Filtre actif parallèle	12
I.6.3. Filtre actif série	13
I.6.4. Combinaison parallèle série actif	13
I.6.5. Les redresseurs MLI	14
I.6.5.1. Redresseur de tension	14
I.6.5.2. Redresseur de courant.....	14
I.7. Limites normalisées.....	15
I.8. Conclusion	16

<i>Chapitre II : Méthodologie de détection des défauts</i>	17
II.1. Introduction.....	17
II.2. Généralités sur le transformateurs de puissances.....	V
II.2.1. Définition	V
II.2.2. Le circuit magnétique	VI
II.2.2.1.Type cuirassé.....	VI
II.2.2.2.Type à colonnes.....	VI
II.2.3. Circuit électrique	VII
II.2.3.1.Bobinage concentrique simple	VII
II.2.3.2.Bobinage concentrique double	VII
II.2.3.3.Bobinage à galette	VIII
II.2.4. La cuve.....	VIII
II.2.5. Réservoir d’huile	VIII
II.3. Quelque type de défaut	17
II.3.1. Amorçage diélectrique entre spires	17
II.3.2. Court-circuit entre spires.....	18
II.3.3. Coupure du circuit électrique	18
II.3.4. Déformation géométrique des enroulements.....	19
II.4. Les méthodes de détection des défauts.....	19
II.4.1. Détection des défauts à l’aide d’un transformateur de courant	20
II.4.1.1.Description	20
II.4.1.2.Mode de détection de défaut sur un transformateur de puissance.....	21
II.4.2. Détection de défaut par les capteurs thermiques	21
II.4.2.1.Thermomètre à résistance de platine	21
II.4.3. Analyse des gaz dissous dans l’huile.....	22
II.4.3.1.Formation de gaz dissous dans l’huile lors de défaut.....	22
II.4.3.2.Méthode de Rogers.....	23
II.4.3.3.Méthode de Doernenburg	25
II.4.3.4.Triangle de Duval	26
II.5. Système de détection de défaut de court-circuit entre spire	27
II.5.1. Analyse en composante principales (ACP).....	27
II.5.1.1.Principe de l’ACP.....	28
II.5.1.2.Détection de défaut par ACP.....	29
II.5.2. Détection de défaut par réseaux de neurones	30
II.5.2.1.Réseau de neurone :	30
II.5.2.2.Le perceptron multicouche:	30
II.5.3. Analyse fréquentiel.....	32
II.5.4. Analyse par transformée en ondelette.....	32
II.5.4.1.Théorie de la transformée en ondelettes (TO).....	32
II.5.4.2.La transformée en ondelettes continue (TO).....	33
II.6. Conclusion	34
<i>Chapitre III : Modélisation de défauts de court-circuit et système de détection</i>	35
III.1. Introduction.....	35

III.2. Modélisation d'un court-circuit entre spires dans un transformateur de puissance	35
III.2.1. Modèle d'un transformateur de puissance	35
III.2.1.1. Hypothèse de départ	36
III.2.1.2. Modèle triphasé ou modèle complet	36
III.2.1.3. Discrétisation d'un enroulement	37
III.2.1.4. Interaction entre les éléments du circuit électrique	38
III.2.1.5. Expressions des inductances propres, mutuelles et les résistances	40
III.2.2. Modélisation de court-circuit entre spires	42
III.2.3. Equation de démarrage	45
III.3. Tension d'alimentation et Couplage Harmonique	45
III.4. Description du dispositif	47
III.5. Conclusion	49
<i>Chapitre IV : Application des méthodes de diagnostic des défauts de court-circuit entre spire d'un enroulement d'un transformateur connecté à un réseau pollué.....</i>	<i>50</i>
IV.1. Introduction	50
IV.2. Représentation du système	50
IV.2.1. Résultat de simulation en cas sain	51
IV.2.2. Simulation en défaut de court-circuit entre spire de taux de court-circuit 5% avec harmonique	54
IV.3. Diagnostique de court-circuite entre spire d'un enroulement d'un transformateur	57
IV.3.1. Analyse en composent principale ACP	57
IV.3.1.1. Fonctionnement sain	57
IV.3.1.2. Fonctionnement défaille:	59
IV.3.1.3. Discussions du ACP :	60
IV.3.2. Application de réseau de neurone pour la détection de défaut	60
IV.3.2.1. La base de données :	60
IV.3.2.2. Architecture du réseau de neurone:	61
IV.3.2.3. Le teste de généralisation:	67
IV.3.3. Analyse du signal par Transformer D'ondelette Continue (TOC):	68
IV.3.3.1. En cas sain:	68
IV.3.3.2. En cas de défaut :	68
IV.4. Discussions sur les approches proposées	69
IV.5. Conclusion	70
CONCLUSION GENERALE	71
BIBLIOGRAPHIE	I
ANNEXE A : CALCUL DES INDUCTANCES	III
ANNEXE B : CODAGE EN MATLAB	IX
ANNEXE C : LES CIRCUITS SIMULINK	XI

Nomenclature

a : Facteur de dilatation « Echelle ».

b : Représente l'échelle de la STFT.

c : Facteur de translation.

$C_p, C_s, et C_{ps}$ Sont des capacités parasites qui apparaissent en hautes fréquences [F].

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

F_{dis} : Facteur de distorsion.

i_p : Courant au primaire [A].

i_s : Courant au secondaire [A].

l : La longueur du fil [m].

L_p : L'inductance de fuites des enroulements du primaire [H]

L_s : L'inductance de fuites des enroulements primaire [H]

M : L'inductance mutuelle [H].

n : Le nombre de discrétisation.

n_{cc} : Le taux de spire en court-circuit.

N_p : Nombre de spires du primaire.

N_s : Nombre de pires du secondaire.

P : la puissance active.

Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

r_1 : Le rayon d'une spire [m].

r_c : Le rayon du fil conducteur [m].

R_p : La résistance de fuites des enroulements du primaire [Ω]

R_s : La résistance de fuites des enroulements du secondaire [Ω]

R_0 : La résistance d'une pièce de platine à 0 °C

R_θ : La résistance d'une pièce de platine en fonction de la température

R_{fe} : Résistance du circuit magnétique [Ω]

S : La section du fil [m^2].

S : la puissance apparente.

STFT : La Transformée de Fourier à fenêtre glissante

THD : Taux de distorsion harmonique [%]

TF : La Transformée de Fourier Rapide

v : reprenant la fréquence du TF

v_p : Tension du primaire [V]

v_s : Tension du secondaire [V].

$W(c, a)$: La transformer en Ondelette.

X_μ : La réactance de magnétisation du circuit magnétique correspondant à ce flux [Ω]

y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale

y_n : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques

φ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

θ : La température du platine [$^{\circ}C$]

μ : Perméabilité magnétique absolue [H/m]

ρ : Densité de charge volumique [C/m^3]

\mathcal{R} : La reluctance du circuit magnétique

$E_1(k)$ et $E_2(k)$ sont les intégrations elliptiques de premier et second espèce

\emptyset : Le flux du champ magnétique

$\psi_{(a,c)}$: Ondelette mère.

$\psi\left(\frac{t-c}{a}\right)$: Ondelettes enfants.

$\frac{1}{\sqrt{a}}$: Facteur de normalisation de l'énergie.

Abréviations

FAP : Le filtre actif parallèle

FAS : Le filtre actif série

GTO : Gate Turn-Off Thyristor

IGBT: Insulated Gat Bipolar transistor

STFT : Transformée de Fourier à fenêtre glissante

TF : Transformée de Fourier Rapide (fft).

THD : taux de distorsion harmonique

TO : transformée en ondelettes

UPQC: Unified Power Quality Conditioner

Introduction générale

L'énergie est principalement produite dans des centrales électriques, transportée par des fils électriques et distribuée sous la forme d'un système triphasé sinusoïdal. La conservation de la qualité, la lutte contre les pertes énergétiques et pertes matérielles sont un enjeu crucial pour le transport d'énergie électrique. L'analyse du régime non-sinusoïdal a mis une importance durant la dernière décennie, surtout à cause de l'essor des applications de l'électronique de puissance. La démarche a été dirigée vers la résolution des problèmes pratiques. L'augmentation du niveau de pollution harmonique dans le réseau a commencé à prouver ses effets négatifs. Cela nécessite des mesures pratiques pour limiter les conséquences.

On a longtemps mise sur la détermination et la caractérisation par mesures des paramètres des transformateurs réels. On se rend compte que cette méthode est très coûteuse, d'autant plus qu'il est très difficile de reproduire en laboratoire les mêmes sollicitations rencontrées dans la pratique. C'est pourquoi, la modélisation des transformateurs de puissance a occupé beaucoup d'attention, le grand intérêt porté à l'étude de ces derniers a permis de réaliser un développement remarquable dans le domaine de la conversion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. La compréhension des phénomènes électromagnétiques qui régissent leur fonctionnement et la détermination des différentes pertes et les paramètres électriques constituent une étape déterminante pour une meilleure exploitation de ces dispositifs. Ce qui permet également de prédire son comportement aux différentes contraintes pour éviter sa détérioration, et élargir sa durée de vie en vue de minimiser le coût de son exploitation.

La défaillance la plus fréquente dans un transformateur est le court-circuit entre spires, cela nous conduit à étudier sur le thème qui s'intitule le « Diagnostic des défauts de court-circuit dans les enroulements d'un transformateur connecté sur un réseau pollué ». Pour avoir plus d'information, élaborons ce thème en le répartissant en quatre chapitres dont nous allons citer ci-dessous.

En premier lieu, nous allons approfondir « l'état de l'art sur la pollution de réseau » ; ce qui constitue le premier chapitre. Il nous renseigne sur les différentes sources des harmoniques du réseau. De plus, nous allons étudier la solution traditionnelle comme les condensateurs et le self ; puis la solution moderne comme les filtres passif ou actif qui utilise l'électronique de puissance et le MLI ; et on terminera par la norme internationale des harmoniques dans le réseau.

Le second chapitre est « la méthode de détection de défaut ». Ici nous nous intéressons à la constitution du transformateur de puissance avec leurs avantages et inconvénients, les types de défaillance du transformateur de puissance et les bases des méthodes de conception des capteurs, transducteurs et analyses d'huile pour la détection de défaut, avec les méthodes mathématiques pour la diagnostic du défaut du transformateur.

Le troisième chapitre s'intitule « modélisation de défaut de court-circuit et système de détection ». Tout d'abord nous allons modéliser le transformateur de puissance en cas sain par des équations mathématiques qui consiste à discrétiser les enroulements. Puis, on introduit le modèle de court-circuit entre spires d'un enroulement.

Le dernier chapitre présente tous les résultats de la simulation qui s'intitule « Application des méthodes de diagnostic des défauts de court-circuit entre spires d'un enroulement d'un transformateur connecté à un réseau pollué ». On utilise le logiciel Matlab pour le calcul des paramètres du transformateur et la simulation de court-circuit entre spires avec l'application de différentes analyses comme l'analyse en composante principale. D'autres méthodes comme les réseaux de neurone et le transformer en ondelette ont été proposées.

Chapitre I : Etat de l'art sur la pollution du réseau

I.1. Introduction

L'énergie électrique distribuée sous la forme d'un système triphasé sinusoïdal permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux équipements et matériels de l'électrotechnique. C'est particulièrement l'aspect sinusoïdal de la tension d'origine qu'il est nécessaire de conserver, afin de lui préserver ses qualités essentielles pour la transmission de la puissance utile aux équipements terminaux.

Lorsque la forme de l'onde de tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre alors des perturbations qui génèrent des dysfonctionnements et des échauffements des récepteurs et appareillages raccordés sur un même réseau d'alimentation électrique. L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la dégradation de la tension d'alimentation [MAN-1998].

I.2. Taux de distorsion harmonique

Le calcul du THD est une solution qui permet de connaître le taux d'harmonique présent dans le réseau. Il se présente sous deux formes : la forme en tension (apparue à la source) et celle en courant (due aux charges). Si le réseau ne contient pas d'harmonique alors nous avons une valeur du THD nulle. Ce taux de distorsion harmonique correspond au rapport de la valeur réelle efficace de l'harmonique d'un signal (U ou I) par sa valeur efficace à la fréquence fondamentale, d'où la formule suivante :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n y_n^2}}{y_1} \cdot 100 \quad (I.1)$$

y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension)

y_n : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension)

I.3. Source d'harmoniques

I.3.1. Convertisseur statique

Les applications de l'électronique de puissance ont connu un grand essor ces dernières années. Les convertisseurs sont utilisés actuellement pour la commande des entraînements à vitesse variable, la conversion de l'énergie (photovoltaïque, éolienne), le transport en courant continu, l'alimentation des cuves d'électrolyse, des fours à arc, de l'éclairage électrique, des appareils domestiques et tant d'autres. Généralement les ponts redresseurs et les convertisseurs statiques (diodes et thyristors figure I-1) sont générateurs de courants harmoniques.

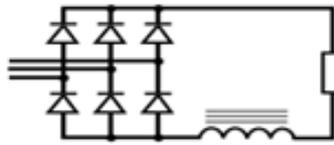


Figure I-1 : Pont redresseur

Ainsi, le courant continu parfait débité, impose un courant alternatif non sinusoïdal. Il est composé d'une part de créneaux lorsque la charge est fortement inductive, ou d'autre part de pointe lorsque le pont des diodes est suivi d'un condensateur comme la plupart des cas que la figure I-2 nous indique :

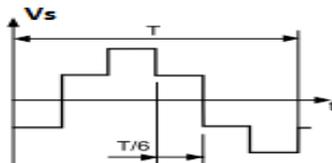


Figure I-2 : Signal carré

Le signal carré peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue éventuelle (théorème de Fourier). Ce sont le spectre de la tension de sortie V_s (figure I-3)

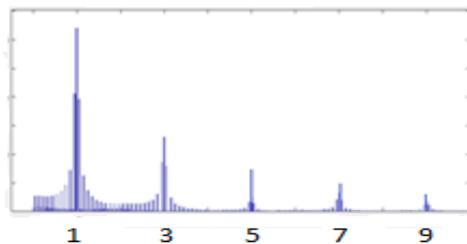


Figure I-3 : Signal carré en décomposition fréquentiel

I.3.2. Fours à arc

Les fours à arc utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu.

I.3.2.1. Cas du four à arc à courant alternatif

L'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Un four à arc à courant alternatif est présenté par la figure I-4

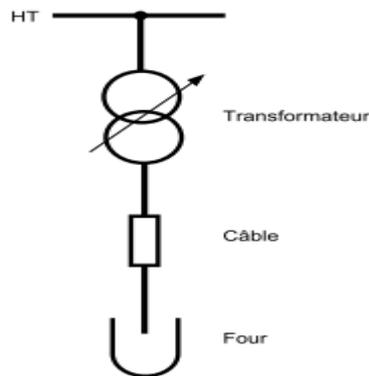


Figure I-4 : Alimentation du Four à arc en courant alternatif

Le niveau spectral (figure I-5) est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise

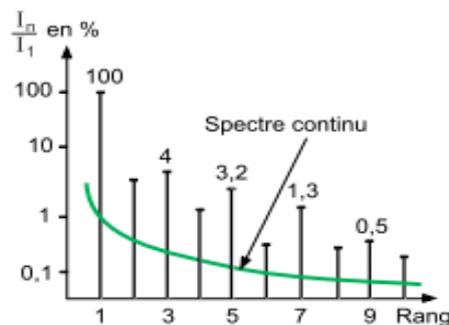


Figure I-5 : Décomposition fréquentiel du courant d'alimentation du Four à arc

I.3.2.2. Cas du four à arc à courant continu

L'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à celui d'un redresseur, un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif. Le schéma du four à arc à courant continu est donné par la figure I-6.

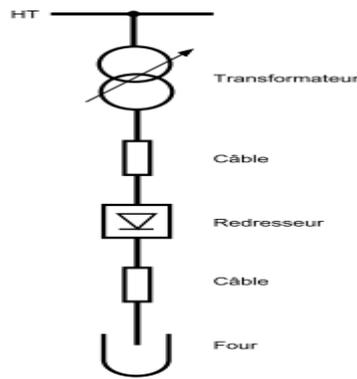


Figure I-6 : Alimentation du Four à arc en courant continu

I.3.3. Lampe à décharge

Concernant les sources de pollution harmonique, les lampes à décharges sont incluses dans les plus anciennes. Diverses études ont été faites sur leurs injections harmoniques et l'effet sur les consommateurs voisins. On considère la lampe comme une résistance non-linéaire "à puissance variable" lorsqu'elle est contrôlée par un ballast série. La résistance instantanée de l'arc est déterminée par la tension de la source, les caractéristiques du ballast et par ses processus physiques internes. . Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

I.3.4. Influence du condensateur

Localement: le courant dans le condensateur est calculé par la dérivée de la tension; le taux de distorsion du courant sera donc toujours supérieur au taux de distorsion de la tension (l'impédance du condensateur diminue avec l'ordre harmonique)

Globalement: la présence des condensateurs peut conduire à des conditions de résonance, pour certaines fréquences harmoniques (résonance de courant, de tension ou ferrorésonance).

De plus, ces deux perspectives (locale et globale) sont liées car l'introduction d'un condensateur en un point du réseau ne modifie pas seulement les paramètres locaux mais conduit à une modification globale des paramètres d'état du réseau, principalement les potentiels harmoniques (sauf si on considère de réseau de puissance infinie).

I.4. Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques, qui se propagent dans les réseaux électriques, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par les mêmes réseaux. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme [MAR-2010] [SAL-2014] [VIA-2011].

I.4.1. Effets instantanés

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

Pertes énergétiques : les courants harmoniques provoquent dans les conducteurs et équipements des pertes supplémentaires par effet Joule

Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques: en présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils, dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électrique peuvent être affectés.

Trouble fonctionnel des micro-ordinateurs: les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires, des moteurs d'entraînement de disque.

Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électriques : certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecture supplémentaires en présence des harmoniques.

Vibrations et bruits: les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques.

I.4.2. Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet le plus important est de nature thermique, il se traduit par un échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel des lignes et amène à un déclassement des équipements :

Echauffement des câbles et des équipements: ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à

quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège de aux échauffements du neutre et les éléments bobinés (transformateurs, moteur ...).

Echauffement des condensateurs : l'échauffement est causé par les pertes due au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques .Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :

Echauffements causés par les pertes dans les stators des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

1.4.3. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance F_p

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par rapport entre la puissance P et puissance apparente S . En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P , réactive Q et déformante D , cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que $I=I_f+I_h$.

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.2)$$

Où Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

P : la puissance active

$$\text{Où } \begin{cases} P = 3 \cdot U \cdot I_1 \cos \varphi_1 \\ Q = 3 \cdot U \cdot I_1 \sin \varphi_1 \\ D = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sum_{h=2}^n I_h^2 \end{cases} \quad (1.3)$$

φ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

Finalement le facteur de puissance est donné par l'expression:

$$F_p = \frac{P}{S} = F_{dis} \cos \varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.4)$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

I.5. Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [MAR-2010].

I.5.1. Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques.

I.5.2. Surdimensionnement des installations électriques

Cette stratégie consiste à surdimensionner les équipements du réseau de telle sorte à supporter les surtensions produites par les harmoniques.

I.5.3. Utilisation d'une inductance (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux.

I.5.4. Filtres passifs d'harmoniques

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang

d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. L'efficacité de ces filtres se trouve dégradée par la présence de certains facteurs:

Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.

Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.

La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.

Equipements volumineux.

I.5.4.1. Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur montré par la figure (I-7). Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11ème

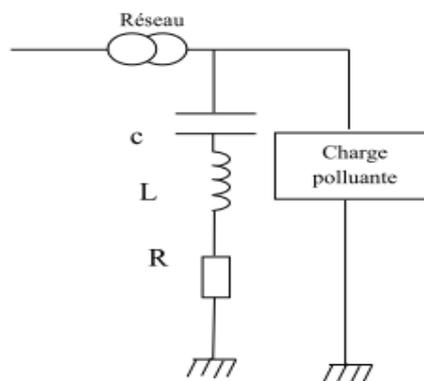


Figure I-7 : Filtre résonant

I.5.4.2. Filtre amorti

La figure (I-8) montre le montage de ce type de filtre, ainsi que son impédance en fonction de la fréquence. En plus de difficulté de dimensionnement des filtres et à coût globale donné, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de $h=13$).

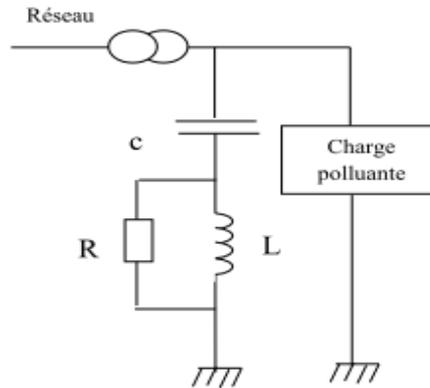


Figure I-8 : filtre amorti

I.6. Solutions modernes de dépollution

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

I.6.1. Filtrage actif

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques). La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la fore

d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir. Nous citerons les configurations possibles des filtres actifs

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive;
- Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension;
- La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

I.6.2. Filtre actif parallèle

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure (I-9). Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension.

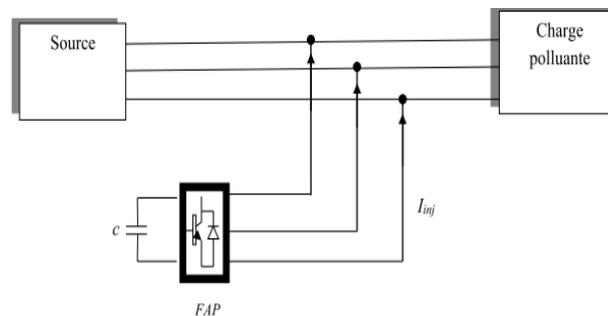


Figure I-9 : Filtre actif parallèle

I.6.3. Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau le montré la figure 10. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

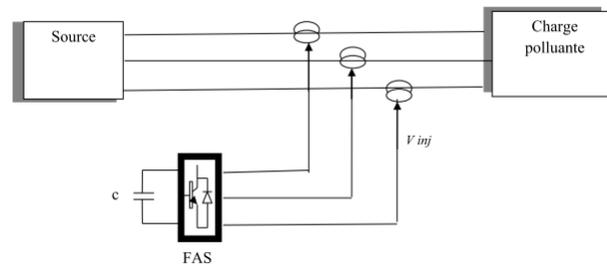


Figure I-10 : Filtre actif série

I.6.4. Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I-11). Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais Unified Power Quality Conditioner (UPQC). Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré ci-dessous, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

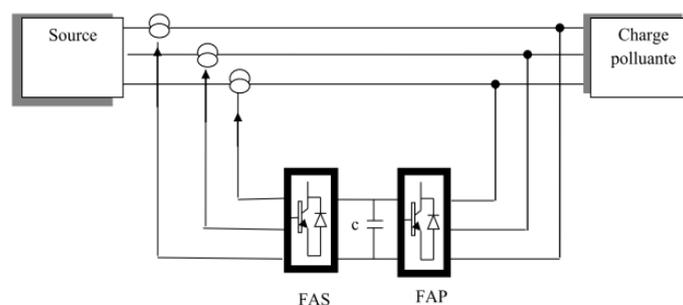


Figure I-11 : Filtre combinaison parallèle série actif

I.6.5. Les redresseurs MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives. On distingue deux structures, la structure courant et la structure tension. Elles sont développées dans les paragraphes ci-après.

I.6.5.1. Redresseur de tension

Son schéma de principe est présenté sur la figure (I-12). Les composants de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant I_d le sera également. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée U_d . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension.

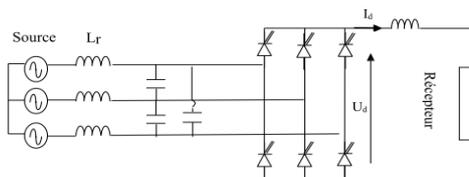


Figure I-12 : Redresseur de tension

I.6.5.2. Redresseur de courant

La tension U_d étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant I_d , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau. Les inductances L_r servent dans la figure (I-13) à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension. .

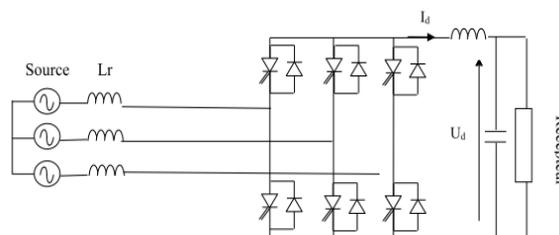


Figure I-13 : Redresseur de courant

I.7. Limites normalisées

La série des normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) définissent certaines limites concernant les harmoniques, notamment : CEI 61000-3-2 qui définit des limites d'émission de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16 A par phase (sauf certaines catégories d'appareils). Le cas des appareils consommant au-delà de 16 A est examiné dans le rapport technique CEI 61000-3-4 et devrait être précisé par une norme CEI 61000-3-12 en préparation. CEI 61000-2-2 qui définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension (tableau I-1). CEI 61000-2-4 qui définit les niveaux de compatibilité dans les réseaux d'installations industrielles. Rappelons qu'un niveau de compatibilité n'est pas une limite absolue ; il peut être dépassé avec une faible probabilité. D'autre part, la norme EN 50160 concerne les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution [Coll-1999].

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique N	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+0,5 \times 25/n$				

Tableau I-1 : Norme CEI 61000-2-2

Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (CEI 61000-2-2)

I.8. Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de voir comment dans la littérature les auteurs ont interprété le problème des harmoniques, encore, comprendre l'origine et les effets des courants harmoniques dans les réseaux de distribution. Il nous conduit surtout à mieux saisir l'importance du maintien de la qualité de l'onde nécessaire. Pas seulement pour le distributeur, mais aussi pour le consommateur.

De plus, il nous a admis de passer en revue les méthodes connus pour la compensation des harmoniques dans les réseaux électriques. Ainsi, nous avons vu les méthodes traditionnelles, surtout avec l'usage des filtres passifs qui présentent l'inconvénient englobé par l'inadaptation aux variations du réseau tel que le réaménagement des installations, ou encore aux variations des charges polluantes. De ce fait, les filtres actifs se présentent comme étant une solution moderne qui est l'avantage de pouvoir rentrer en combinaison avec d'autres filtres actifs et passifs afin de former des filtres hybrides encore plus efficaces. Ils apportent la réponse à tous ces inconvénients. D'un autre côté, ils risquent d'apparaître le problème d'encombrement; ce qui est peu agréable pour les espaces à exploiter.

Chapitre II : Méthodologie de détection des défauts

II.1. Introduction

Les centrales électriques étant souvent éloignées du consommateur. Le transformateur de puissance a un rôle d'acheminer l'énergie électrique de son point de production jusqu'à son point de consommation, c'est le composant le plus critique et le plus cher des éléments du transport de l'énergie électrique.

Concernant le transformateur défaillant, il conduit à des situations parfois très lourdes en conséquence : techniques, financières, commerciales, environnementales. D'où la nécessité de détecter et d'identifier le défaut dès sa naissance. Dans ce chapitre, nous présentons le transformateur, les types de défauts, les appareils de détections et les méthodes de diagnostic de notre système.

II.2. Quelques types de défauts

II.2.1. Amorçage diélectrique entre spires

C'est un amorçage entre spires (Contraintes diélectriques et surtensions) d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux. L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement (figure II-4) [Sanc-2011].



Figure II-1 : Amorçage diélectrique entre spire

II.2.2. Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement (Contraintes diélectriques et surtensions) qui devraient être normalement isolées entre elles (figure II-5). 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 II-2 : Court-circuit entre spires

II.2.3. Coupure du circuit électrique

La plupart des cas de coupure d'un circuit électrique (figure II-6) sont le résultat d'un défaut interne, provoqué par :

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.

Un mauvais alignement d'un régleur.



Figure II-3 : Coupure du circuit électrique

II.2.4. 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, qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes 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 à 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 II-4 : Déformation géométrique des enroulements

II.3. Les méthodes de détection des défauts

Pour détecter les défauts, un transformateur est équipé des transducteurs. Le transducteur, un composant qui fournit comme signal de sortie une grandeur physique utilisable en réponse à une autre grandeur physique spécifiée comme signal d'entrée. Les capteurs, senseurs ou détecteurs qui fournissent comme signal de sortie une quantité électrique utilisable en réponse à une grandeur, une propriété ou une condition physique à mesurer. Les principes de ces transductions sont basés sur l'existence de divers effets physiques ou chimiques. On peut distinguer six grandes classes de signaux [Mari-2011] :

Electriques : tension, courant, charge, résistance, inductance, capacitance, constante diélectrique, polarisation, champ électrique, fréquence, moment dipolaire, potentiel, etc.

Thermiques : température, chaleur, frois, entropie, flux de chaleur, état de la matière, etc.

Chimiques : composition, concentration, vitesse de réaction, pH, oxydation, réduction, etc.

Magnétiques : intensité du champ, densité du flux, moment magnétique, perméabilité, etc.

Optiques : intensité, longueur d'onde, polarisation, reflectance transmittance, réfraction, etc.

Mécaniques : longueur, surface, volume, vitesse linéaire ou angulaire, accélération, flux de masse, force, couple, pression, longueur d'onde et intensité acoustique, etc.

On va voir les détails sur les signaux magnéto-électrique (transformateur de courant), thermique (thermomètre à résistance de platine) et chimique (formation de gaz dissous dans l'huile)

II.3.1. Détection des défauts à l'aide d'un transformateur de courant

II.3.1.1. Description

Un transformateur de courant est un transformateur de mesure dans lequel le courant secondaire est pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasé par rapport à celui-ci d'un angle voisin de zéro pour un sens approprié des connexions. Dans les réseaux haute tension où des courants de plusieurs kiloampères transitent, la mesure de ces courants élevés est difficile. Pour la faciliter, les transformateurs de courant ont pour rôle de diviser la valeur du courant à mesurer par un facteur constant. Cette démarche permet également de standardiser les équipements de mesure du courant et de les isoler diélectriquement du réseau haut tension. Le transformateur de courant prendra la forme d'un tore, traversé par le circuit électrique (figure II-8). Il n'y aura donc pas de bobinage primaire à proprement parler : la spire est constituée par le passage du circuit électrique à l'intérieur du circuit magnétique torique [RITZ-2014].

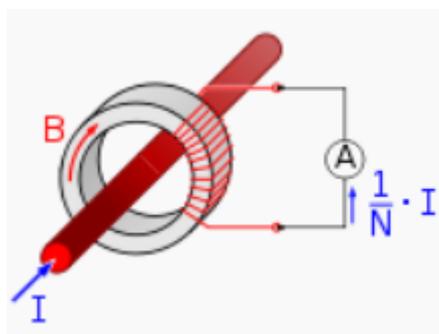


Figure II-5 : Schéma de principe de transformateur de courant

II.3.1.2. Mode de détection de défaut sur un transformateur de puissance

Sur les transformateurs de grande puissance, il y a souvent un transformateur de courant de mesure par phase, et plusieurs de protection pour chaque phase et le neutre. Les transformateurs de courant de mesure permettent de mesurer le courant traversant le transformateur. On compare les mesures de courant qui entre dans le transformateur aux courants qui sort du transformateur compte rendu du rapport de transformation et du rendement de transformateur, on peut détecter instantanément s'il y a de court-circuit entre spire ou coupure du circuit électrique ou d'autre défaut qui perturbe le transformation de l'énergie.

II.3.2. Détection de défaut par les capteurs thermiques

II.3.2.1. Thermomètre à résistance de platine

Le thermomètre à résistance de platine est un dispositif permettant de mesurer la température. Il est basé sur le fait que la résistance électrique du platine varie selon la température.



Figure -II-6 : Thermomètre à résistance de platine

Le type le plus courant, appelé Pt100, a une résistance de 100 ohms à 0 °C et 138,5 ohms à 100 °C. Sa fonction de transfert est le suivant. Si R_0 est la résistance d'une pièce de platine à 0 °C, alors à la température θ (en degrés Celsius), un modèle linéaire de la résistance de cette pièce donne.

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta) \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Avec } \alpha = 3,87 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Il existe également des modèles plus précis, comme ce modèle d'ordre 4

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma(\theta - 100)\theta^3) \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Avec } \alpha = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } \text{K}^{-1}$$

$$\beta = -5,775 \cdot 10^{-2} \text{ } \text{K}^{-2}$$

$$\gamma = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } \text{K}^{-4} \text{ pour } \theta < 100^{\circ}\text{C}, \text{ et } 0 \text{ si } \theta > 100^{\circ}\text{C}$$

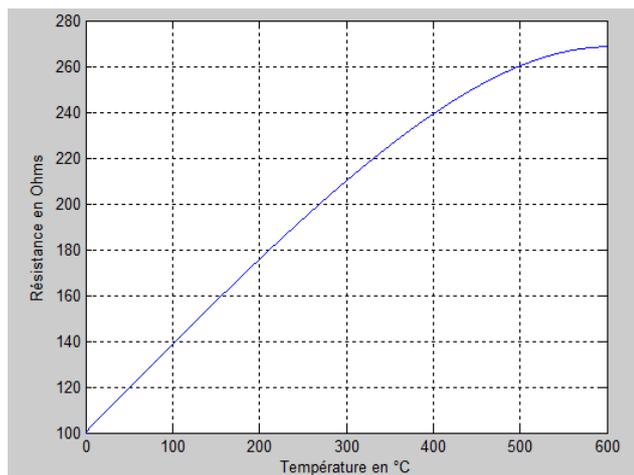


Figure II-7: courbe de la résistance de la laine en fonction de la température

Une température trop élevée à l'intérieur du transformateur, qu'elle soit provoquée par les pertes cuivre ou fer, accélère le vieillissement de l'isolation. Celle-ci déterminant la durée de vie du transformateur, il est particulièrement important de connaître la température maximale qu'atteignent les différentes parties du transformateur, à savoir : enroulement, huile, isolation. La durée de vie du transformateur est de l'ordre de 20 ans ou de 30 ans selon les sources, la charge durant son exploitation influence fortement cette valeur. Le point le plus chaud des enroulements appelé « point chaud », se trouve en général dans la partie haute de ceux-ci. Il est en général difficile de déterminer son emplacement avec précision. Par ailleurs, lors d'un événement de court-circuit la température des enroulements augmente subitement à cause du fort courant apparaissant pour une durée de 1 s maximum. Cette durée est très faible en comparaison des constantes de temps thermiques, la chaleur n'a pas le temps de s'évacuer dans l'isolation. Il faut donc qu'à la fois les enroulements et l'isolation adjacente soient prévus pour résister à ces pics de température de courte durée.

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

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

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

Détecter la présence d'anomalies dans les transformateurs dès leur premier stade d'apparition et de suivre leur évolution.

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

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

La combinaison des codes produits, peut être liée à une interprétation diagnostic comme montré dans le tableau II-2. L'analyse des gaz dissous dans les huiles des transformateurs est une technique de diagnostic bien connu dans l'industrie et plusieurs critères ont été établis. Les critères communs les plus connues sont ceux de Rogers, Doernenburg et triangle de Duval [Naou-2009] [Bouc-2010]. On va voir sur la technique de diagnostic selon ces critères

II.3.3.2. Méthode de Rogers

Rogers a développé cette méthode dans lequel trois rapports de gaz sont employées (C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆) pour produire des codes basés sur des gammes des rapports comme montré dans le tableau II-1.

Rapports de gaz		Type de gaz	Rang	code
A	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Acétylène/Ethylène	< 0,1	0
			0,1 à 1	1
			1 à 3	1
			> 3	2
B	CH ₄ /H ₂	Méthane/hydrogène	< 0,1	1
			0,1 à 1	0
			1 à 3	2
			> 3	2
C	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Ethylène/Ethane	< 0,1	0
			0,1 à 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2

Tableau II-1 : Code de Rogers

Source : [Bouc-2010].

Cas	Défaut typique	A	B	C	Problème trouvé
0	Sans défaut	0	0	0	Vieillesse normale
1	Décharge partielle de base énergie	1	1	0	Décharges électrique dans les bulles, provoquées par des vides d'isolation, saturation en gaz superbe dans l'huile ou la cavitation (des pompes) ou humidité élevée dans l'huile (bulles de vapeur d'eau)
2	Décharge partielle de haute énergie	1	1	0	Egal à ce qui est précédent mais avec perforation de l'isolation de cellulose par étincellement ou formation d'arcs. Ceci produit généralement du CO et CO2
3	Décharge de base énergie, arcs	1/2	0	1/2	Etincellement continu en huile entre les connexions mauvaises de potentiel différent ou au potentiel flottant ; panne de l'huile diélectrique entre les matériaux solides d'isolation.
4	Décharge de haute énergie, arcs	1	0	2	Décharges (formation d'arcs), panne par formation d'arcs entre les enroulements, entre les enroulements et terre ou à travers des contacts du régulateur pendant le fonctionnement avec l'huile fuyant au réservoir principale.
5	Défaut thermique de base $T < 150^{\circ}\text{C}$	0	0	1	Surchauffe isolée de conducteur, ceci produit généralement de CO et CO2 parce que ce type de défaut comporte généralement l'isolation de cellulose.
6	Défaut thermique de $150^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$	0	2	0	Points surchauffant dans le noyau dû aux concentrations de flux. Les problèmes ci-dessous sont en règle des températures croissantes des points chauds dans le noyau. Stratifications court-circuitées dans le noyau. Surchauffe du conducteur de cuivre. Mauvais branchement dans le régulateur. Circulation de courant dans le noyau. Ces problèmes produisent généralement l'isolation de cellulose
7	Défaut thermique de $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$	0	2	2	
8	Défaut thermique de $T > 700^{\circ}\text{C}$				

Tableau II-2 : Interprétation de Rogers

Source : [Bouc-2010].

II.3.3.3. Méthode de Doernenburg

Les quatre ratios utilisés dans cette méthode sont représentés dans le Tableau

Rapport des gaz		Type de gaz	Rang	Code
A	CH ₄ /H ₂	Méthane/hydrogène	< 0,1	5
			0,1 à 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2
B	C ₂ H ₆ /CH ₄	Ethane/méthane	< 1	0
			> 1	1
C	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Ethylène/Ethane	< 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2
D	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Acétylène/Ethylène	< 0,1	0
			0,1 à 3	2

A	B	C	D	Caractéristiques de défaut
0	0	0	0	Sans défaut, vieillissement normal
5	0	0	0	Décharges partielles de basse énergie, contrôler les niveaux de CO
0	0	0	1	Décharges partielles de haute énergie, contrôle les niveaux de CO
0	0	1	>0	Décharges de basse énergie, contournement sans puissance
0	0	2	>2	Décharges de basse énergie, crépitements continus à potentiel flottant
0	0	1	0	Décharges de haute énergie, arc électrique avec perforation de l'isolement et surchauffe des conducteurs
1	0	0	0	Défaut thermique de basse température : < 100°C
>0	1	0	0	Défaut thermique de température moyenne : entre 100 et 200°C
1	0	1	0	Défaut thermique de température moyenne : entre 150 et 300°C surchauffe des conducteurs
>0	0	2	0	Défaut thermique de haute température : entre 300 et 700°C contacts défectueux, points chauds dans le noyau magnétique, courant de circulation dans le tonneau métallique, etc.

Tableau II-3: Interprétation de Doernenburg

Source : [Naou-2009]

II.3.3.4. Triangle de Duval

Un point faible des techniques de ratios est qu'elles ne couvrent pas toutes les gammes des données et négligent souvent les données qui sont des rapports en dehors des seuils déterminés dans les tables. Duval a développé une représentation triangulaire pour dépasser ce problème. Elle consiste au calcul de pourcentages de concentrations en des trois gaz (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2) par rapport au total ($\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2$).

Ces pourcentages seront tracés dans un triangle divisé en régions indiquant le type de défaut

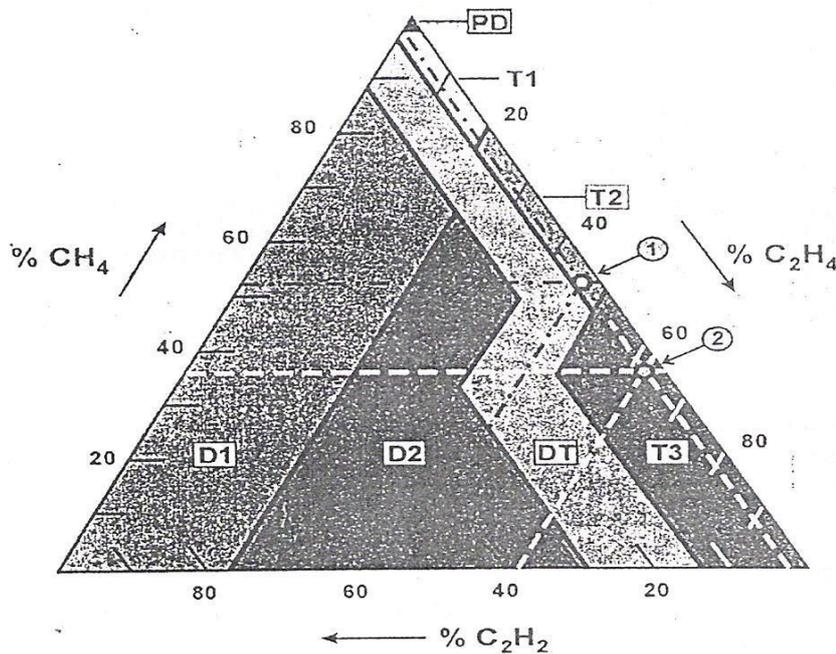


Figure II-8: Triangle de Duval

PD : Décharge partielle

D1 : Décharge de basse énergie

D2 : Décharge de haute énergie

T 1 : Faute thermique, $T < 300\text{ }^\circ\text{C}$

T2 : Faute thermique, $300^\circ\text{C} < T < 700^\circ\text{C}$

T : Faute thermique, $T > 700^\circ\text{C}$

DT : Mélange de fautes thermiques et électriques.

Source : [Naou-2009]

II.4. Système de détection de défaut de court-circuit entre spires

Les défaillances liées aux enroulements du transformateur, impliquent majoritairement, une modification topologique du circuit magnétique considérée, avec la présence du court-circuit entre spires. Elles peuvent apparaître à différents endroits des enroulements. Quand un défaut de court-circuit apparaît, il y a un courant appelé, courant de circulation, qui circule dans les spires en court-circuit. Ce courant va aussi générer un champ électromagnétique qui viendra perturber le champ transmis au secondaire. Généralement, l'effet d'un court-circuit est de perturber la répartition du flux magnétique. D'une part, cela conduit à des oscillations du couple électromagnétique, et il s'en suit des vibrations mécaniques, et des effets destructeurs des organes mécaniques environnant peuvent apparaître, si ces vibrations sont fortes. D'autre part, le courant circulant dans les spires en court-circuit peut atteindre des valeurs élevées, le flux homopolaire du champ magnétique va se dissiper par effet thermique, Il en résulte rapidement une destruction du matériau isolant recouvrant le noyau et les conducteurs appartenant à ces spires en court-circuit, qui va se propager vers les autres spires de l'enroulement du transformateur. L'analyse du courant électrique nous permet d'avoir rapidement la signature court-circuit entre spire d'un enroulement, donc nous allons procéder à des différentes analyses, les résultats sont présentés dans la quatrième chapitre de ce mémoire [Per-2005].

II.4.1. Analyse en composante principales (ACP)

L'Analyse en composantes principales (ACP) est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multi-variée, elle fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles, qui consiste à transformer des variables corrélées entre elles en nouvelles variables dé-corrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées "composantes principales", ou axes principaux. Elle permet de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante. Il s'agit d'une approche à la fois géométrique (les variables étant représentées dans un nouvel espace, selon des directions d'inertie maximale) et statistique (la recherche portant sur des axes indépendants expliquant au mieux la variabilité, la variance et des données). Dans la mesure où ce sont des méthodes descriptives, elles ne s'appuient pas sur un modèle probabiliste, mais elles dépendent d'un modèle géométrique [Todi-2017].

II.4.1.1. Principe de l'ACP

Les données sont les mesures effectuées sur n individus $\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$. Les p variables quantitatives qui représentent ces mesures sont $\{1, 2, \dots, j, \dots, p\}$. Le tableau des données brutes a la forme suivante :

	X^1	X^2	...	X^j	...	X^p
1	x_1^1	x_1^2	...	x_1^j	...	x_1^p
2	x_2^1	x_2^2	...	x_2^j	...	x_2^p
...
i	x_i^1	x_i^2	...	x_i^j	...	x_i^p
...
n	x_n^1	x_n^2	...	x_n^j	...	x_n^p

Tableau II-4: Représentation des variables et individus

Il est noté que $n \geq p \geq 2$

L'ACP est une méthode descriptive. Son objectif est de représenter sous forme graphique l'essentiel de l'information contenue dans un tableau de données quantitatif. Dans un tableau de données à j variables, les individus se trouvent dans un espace à j dimensions. Quand le repère est à deux dimensions nous pouvons représenter facilement les données sur un plan, ensuite avec trois dimensions nous avons un peu de difficulté pour la représentation, enfin avec un repère au-delà de trois dimensions il est impossible de représenter les données ou même de les visualiser. Nous avons l'habitude de dessiner ou photographier la réalité. Naturellement nous passons d'un espace à 3 dimensions à un espace à 2 dimensions. Selon le point de vue, l'information retenue ne sera pas la même.

L'ACP nous propose un point de vue permettant de voir au mieux les individus d'un tableau. Lorsqu'on projette les données sur un plan, on obtient un graphique déformé de la réalité. Le rôle de l'ACP est de réduire le dimension d'un repère (en deux ou trois dimensions) mais en minimisant les déformations. Ce plan est appelé le plan principal. Il est constitué de deux droites perpendiculaires. La méthode consiste à calculer la première droite D1 de façon à maximiser les carrés des distances de projection des points sur la droite. Les droites D1 et D2 sont des caractères synthétiques obtenus par des combinaisons linéaires avec les variables d'origines. Ces droites sont appelées composantes principales, ou axes principaux.

La première composante principale doit "capturer" le maximum d'information du tableau des données. La variance des individus doit être maximale. Il reste un résidu non

expliqué par cette première composante. C'est sur ce résidu qu'est calculée la deuxième composante principale. Cette deuxième composante est un complément, une correction de la première. Elle doit avoir une corrélation linéaire nulle avec la première (orthogonalité). Il n'y a pas de redondance d'information entre deux composantes principales.

On calcule les autres composantes de la même manière. La composante C^1 est le vecteur renfermant les coordonnées des projections des individus sur l'axe D1, et C^2 pour l'axe D2. Pour obtenir ces coordonnées, chaque composante principale s'écrit comme une combinaison linéaire de variables initiales (équation **)

$$C^1 = a_1^1 X^1 + a_1^2 X^2 + \dots + a_1^p X^p \quad (II.3)$$

$$C^2 = a_2^1 X^1 + a_2^2 X^2 + \dots + a_2^p X^p$$

...

II.4.1.2. Détection de défaut par ACP

Nous parlons de la mise en œuvre de la détection de défaut de court-circuit entre d'un enroulement d'un transformateur. Pour faire un inventaire des individus décrits par des variables quantitatives à étudier s'impose. Nous nous intéressons principalement aux grandeurs électriques dont la tension, le courant et la puissance.

L'objectif est de voir d'une façon symétrique, la ressemblance de ces variables, c'est-à-dire, voir les variables qui apportent des informations à peu près identiques. Cela nous amène à voir la liaison entre ces variables, grâce à l'étude de leur corrélation. Par ailleurs, l'importance de cette approche est de pouvoir les visualiser sur un graphe beaucoup plus explicite, et interpréter l'ensemble des données formées par chaque individu.

Pour la suite, nous appliquons cette méthode après la simulation de court-circuit entre spires dans le quatrième chapitre de ce livre.

II.4.2. Détection de défaut par réseaux de neurones

II.4.2.1. Réseau de neurone :

Les neurones artificiels sont utilisés dans plusieurs applications, sous forme d'architectures variées afin de doter un système quelconque d'une certaine intelligence. Cette dernière est acquise après un processus d'apprentissage artificiel [Amel-2017].

Les réseaux de neurones sont une formulation mathématique simplifiée des neurones biologiques. Ils ont la capacité de mémorisation, de généralisation et surtout d'apprentissage qui est le phénomène le plus important. Dans ce type de réseau de neurones, chaque neurone a d'abord le rôle de sommer les différentes entrées pondérées par leurs poids respectifs selon l'expression suivante :

$$a(i) = \sum_{j=1}^n W(i,j) \cdot p(j) \quad (\text{II.4})$$

Puis faire passer la somme obtenue dans une fonction F linéaire ou non linéaire et finalement, de transmettre le résultat aux neurones de la couche suivante. Le modèle mathématique d'un neurone i est donné par l'équation suivante :

$$T(i) = F(b + \sum_{j=1}^n W(i,j) \cdot p(j)) \quad (\text{II.5})$$

Les variables n, T(i), F, p(j), b et W désignent respectivement le nombre d'entrées du réseau de neurones, le vecteur de sortie du réseau, la fonction d'activation, le vecteur des entrées du réseau de neurones, la valeur du biais et la matrice des poids

II.4.2.2. Le perceptron multicouche:

a. Principe :

Un réseau perceptron multicouche (en anglais MLP) est constitué de neurones reliés entre eux par des liens pondérés. Il se compose d'une couche d'entrée, d'une couche de sortie et d'une ou plusieurs couches cachées. A l'heure actuelle, il n'existe pas de règles ou lois régissant le nombre de couches et le nombre de neurones par couche à utiliser. Le choix reste heuristique et il est établi en fonction de l'utilisation du réseau. Le but est d'obtenir le réseau le

plus simple possible afin de limiter le temps de calcul, mais suffisamment élaboré pour répondre aux critères de discrimination désirés.

L'utilisation d'un tel réseau pour la classification impose le nombre de neurones pour la couche d'entrée. En effet, cette couche correspond au vecteur de mesure ou vecteur d'entrée. La couche d'entrée aura alors un nombre de neurones équivalent au nombre de composantes du vecteur d'entrée. En ce qui concerne la couche de sortie, un des choix possibles est de faire correspondre le nombre de neurones au nombre des sorties estimées. Pour gérer les neurones, les fonctions d'activation permettent de définir l'état de leur sortie en fonction de leurs entrées. En effet, chaque neurone est relié à tous les neurones de la couche précédente et chacune des connexions est affectée d'un poids w pondérant la sortie du neurone précédent. La somme des entrées est alors introduite dans une fonction d'activation qui décide de l'état de sortie du neurone

Dans le perceptron multicouche, chaque neurone à l'intérieur d'une couche reçoit des signaux provenant de la couche précédente, effectue un calcul et transmet le résultat à la couche suivante, si elle est présente. Il n'existe pas d'interconnexions entre les neurones situés à l'intérieur d'une même couche : les activations des différents neurones sont seulement propagées de la couche d'entrée vers la couche de sortie à travers tous les neurones constitutifs du réseau. Théoriquement, un MLP doté d'une couche cachée est capable de résoudre tous les problèmes de classification à condition que le nombre d'exemples nécessaires à son apprentissage soit suffisant [LATR-2014].

b. L'algorithme d'apprentissage:

L'algorithme d'apprentissage est une activité essentielle à la base même de toute évolution. C'est un processus calculatoire qui doit être capable d'amener à une certaine prédiction et à une certaine généralisation, son but est de découvrir les règles qui gouvernent et régissent des formes. L'apprentissage des réseaux de neurones est la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau, afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée.

Les réseaux de neurones utilisant un apprentissage par rétro-propagation sont constitués de plusieurs couches (multicouches) qui comportent chacune plusieurs neurones. Ces derniers sont reliés entre eux par des matrices de poids qui caractérisent le réseau.

La rétro-propagation est un algorithme basé sur l'apprentissage supervisé. Elle procède à l'adaptation des poids neurone par neurone en commençant par la couche de sortie afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie obtenue.

II.4.3. Analyse fréquentiel

Afin de bien valider notre modèle, et s'assurer de la présence d'un défaut, nous devons faire une autre analyse. Pour cela, nous avons choisi de faire une analyse fréquentielle sur les courants en utilisant la Transformée de Fourier Rapide (TF). La théorie de Fourier permet de décomposer un signal en une série de sinusoides à différentes fréquences, sa définition est le suivant :

Si la fonction f est périodique de période T

$$C_n(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) e^{-2i\pi \frac{n}{T}x} dx \quad (\text{II. 6})$$

Si f définie sur \mathbb{R} , on appelle transformée de Fourier de f la fonction TF

$$TF(v) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-2i\pi vx} dx \quad (\text{II. 7})$$

v : reprenant la fréquence

L'analyse en fréquence nous permet de visualiser ou de distinguer toutes les fréquences qui existent sur le signal, mais n'informe pas sur la localisation temporelle du changement de régime dans le signal, donc on procède à une autre analyse qui affiche le temps et la fréquence dans la même fenêtre.

II.4.4. Analyse par transformée en ondelette

II.4.4.1. Théorie de la transformée en ondelettes (TO)

Une ondelette est une forme d'onde qui a une valeur moyenne zéro et une durée limitée. La transformée en ondelettes est un outil mathématique qui décompose un signal en fréquences en conservant une localisation spatiale. Le signal de départ est projeté sur un ensemble de fonctions de base qui varient en fréquence et en espace. Ces fonctions de base s'adaptent aux

fréquences du signal à analyser. Cette transformation permet donc d'avoir une localisation en temps et en fréquence du signal analysé.

La transformée en ondelettes a la capacité de changer la taille de la fenêtre à différentes résolutions de temps-fréquence. Les fonctions de base d'ondelettes peuvent être étirées ou comprimées dans la fenêtre d'analyse. Ceci permet d'analyser le signal à différentes échelles.

L'analyse en ondelettes adopte une fonction de prototype d'ondelettes connue sous le nom de "Ondelettes mère". Cette Ondelette mère génère un ensemble de fonctions de base connues sous le nom "Ondelettes enfants" par des translations et dilatations récursives.

La définition de l'ondelette mère est donnée par l'équation suivant :

$$\psi_{(a,c)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-c}{a}\right) \quad (\text{II. 8})$$

Où :

c : facteur de translation, a : facteur de dilatation « Echelle », $\psi_{(a,c)}$: ondelette mère, $\psi\left(\frac{t-c}{a}\right)$ ondelettes enfants, $\frac{1}{\sqrt{a}}$ Facteur de normalisation de l'énergie afin que le signal transformé ait la même énergie à toutes les échelles.

II.4.4.2. La transformée en ondelettes continue (TOC)

La transformée en ondelettes permet une analyse des différentes fréquences avec diverses résolutions; haute résolution fréquentielle en basses fréquences et haute résolution temporelle en hautes fréquences. La transformation en ondelettes (TO) revient à projeter le signal à analyser sur une base de fonctions déduites par décalage temporel et dilatation ou compression d'une fonction initiale appelée ondelette mère. La transformée en ondelettes continue est donnée par :

$$W(c, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-c}{a}\right) dx \quad (\text{II. 9})$$

Avec $\psi(c)$ est l'ondelette mère qui doit être « passe-bande », de moyenne nulle et de densité spectral d'énergie très inférieure à $\frac{1}{\sqrt{|f|}}$ et a est l'échelle de la décomposition. Le scalogramme est définie comme étant le carré du module de la TO, c'est-à-dire que $[W(c, a)]^2$.

C'est une distribution d'énergie temps-échelle. En considérant que les représentations temporelle et fréquentielle de l'ondelette mère sont concentrées autour, respectivement, de l'instant 0 et d'une fréquence f_0 appelée fréquence centrale, la transformation en ondelettes peut être interprétée comme une représentation temps-fréquence ; la variable échelle est alors liée à la fréquence f par la relation :

$$a = \frac{f_0}{f} \quad (\text{II.10})$$

Le scalogramme obéit également au principe d'incertitude d'Heisenberg-Gabor, malgré son caractère multi-résolution, la résolution temporelle s'améliore et la résolution fréquentielle se dégrade pour les termes en hautes fréquences. Par ailleurs, l'inconvénient majeur de la TO vient de l'absence de critère de choix sur le type d'ondelette mère à utiliser.

II.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les intérêts des informations qui peuvent apporter l'utilisation des techniques de détection des défauts dans les transformateurs de puissance. Ceux qui a pour but de réduire la probabilité de défaillances ou de dégradation du service et d'augmenter l'espérance de vie du transformateur.

Les mesures électriques et thermiques sont à effectuer d'une manière systématique sur les transformateurs afin de connaître leur état et prévenir leurs avaries. Les éléments chimiques résultats d'analyse de gaz dissous dans l'huile peuvent aussi identifier la présence d'une anomalie comme un point chaud à haute température, d'évaluer le degré de vieillissement de l'isolation cellulosique et diélectrique, enfin d'analyser son degré de contamination.

L'analyse en composant principal, L'analyse fréquentiel, le réseau de neurone et le transformée en ondelette sont des outils mathématiques destinés au diagnostic des grandeurs électrique du transformateur du fait que, l'analyse de courant donne des informations sur l'état de notre système le plus rapide possible.

Chapitre III : Modélisation de défauts de court-circuit et système de détection

III.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.

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.

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.

III.2. Modélisation d'un court-circuit entre spires dans un transformateur de puissance

III.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.

III.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

III.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. III-1: [Mul-2012].

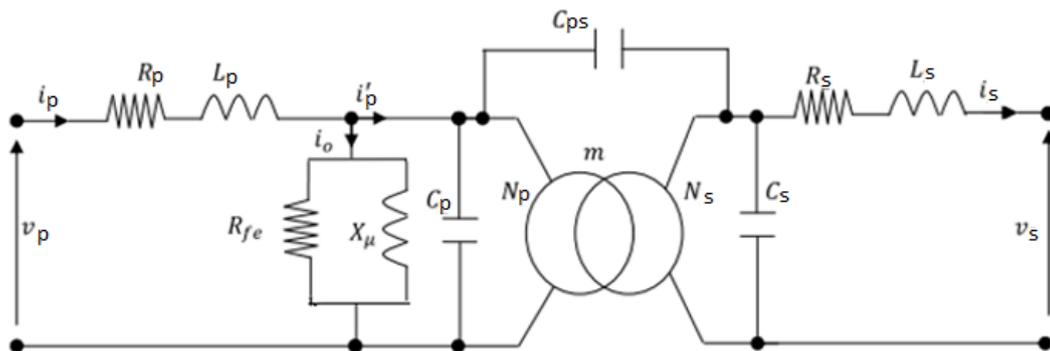


Figure III-1: Modèle complet du transformateur

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_μ 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 [MEZ-2011]:

$$\begin{cases} [V_p] = [R_p][i_p] + \frac{d[\phi_p]}{dt} \\ [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \\ N_p[i_p] = N_s[i_s] = \mathcal{R}\phi \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Ou : $[V_p]$ 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.

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

$$\begin{cases} [\phi_p] = [L_p][i_p] + [M_{ps}][i_s] \\ [\phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sp}][i_p] \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

Avec $[R_p], [L_p], [R_s], [L_s]$ sont les matrices des résistances et des inductances respectivement du primaires et du secondaires. 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 :

$$\mathcal{R} = \frac{\mu S}{l} \quad (\text{III. 3})$$

III.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 [Lef-2006].

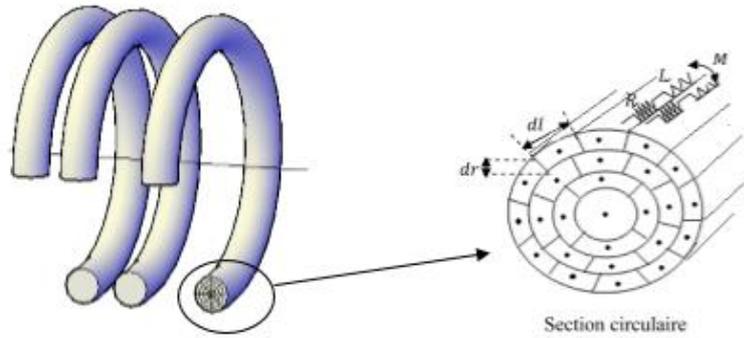


Figure III-2: Découpage des conducteurs en éléments

III.2.1.4. Interaction entre les éléments du circuit électrique

Chaque élément du circuit électrique est représenté par sa résistance électrique et son inductance, ces éléments forment entre eux un système de circuits mutuellement. La discrétisation est représentée dans la Figure(III-2), où tout conducteur d'une bobine est formée de « N » spires principales en série et chacune de ces spires est constituée de « n » spires élémentaires en parallèles.

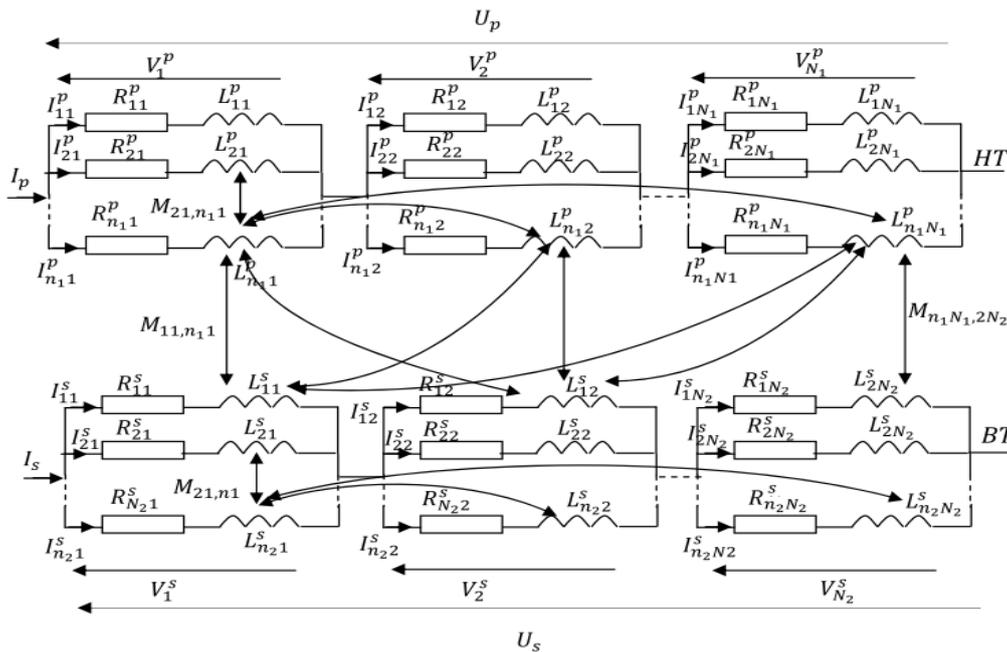


Figure III-3: Schéma électrique équivalent pour les enroulements HT et BT [MEZ-2011]

Le système résultant est alors régi par « $n \times N$ » équations, à « $n \times N$ » inconnues qui sont « n » courants et les « N » tensions « V_i ». Chaque spire élémentaire est soumise à une tension identique à la tension à laquelle est soumise la spire principale. L'application de la loi de Kirchhoff au schéma équivalent de la figure (III-3) nous permet d'écrire [MEZ-2011]:

Dans la spire 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 V_1^P = R_{11}I_{11} + L_{11} \frac{dI_{11}}{dt} + \sum_{i=2}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,11} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{11,kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
 \vdots \\
 V_1^P = R_{n_1 1} I_{n_1 1} + L_{n_1 1} \frac{dI_{n_1 1}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n_1}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, n_1 1} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_1 1, kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
 V_1^S = R_{11}I_{11} + L_{11} \frac{dI_{11}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,11} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=2}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{11,kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
 \vdots \\
 V_1^S = R_{n_2 1} I_{n_2 1} + L_{n_2 1} \frac{dI_{n_2 1}}{dt} + \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{i=1}^{N_1} M_{ij, n_2 1} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n_2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_2 1, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}
 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad (\text{III. 4})$$

Dans la spire 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 V_2^P = R_{12}I_{12} + L_{12} \frac{dI_{12}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq 12}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,12} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{12,kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
 \vdots \\
 V_2^P = R_{n_1 2} I_{n_1 2} + L_{n_1 2} \frac{dI_{n_1 2}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq n_1 2}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij, n_1 2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_1 2, kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
 V_2^S = R_{12}I_{12} + L_{12} \frac{dI_{12}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,12} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ kl \neq 12}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{12,kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
 \vdots \\
 V_2^S = R_{n_2 2} I_{n_2 2} + L_{n_2 2} \frac{dI_{n_2 2}}{dt} + \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{i=1}^{N_1} M_{ij, n_2 2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ kl \neq n_2 2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_2 2, kl} \frac{dI_{kl}}{dt}
 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad (\text{III. 5})$$

Dans la spire N :

$$\left\{ \begin{array}{l}
V_N^P = R_{1N} I_{1N} + L_{1N} \frac{dI_{1N}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq 1N_1}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,1N_1} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{1N_1,kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
\vdots \\
V_N^P = R_{n_1 N_1} I_{n_1 N_1} + L_{11} \frac{dI_{n_1 N_1}}{dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ ij \neq n_1 N_1}}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,n_1 N_1} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{k=1}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_1 N_1,kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
\vdots \\
V_N^S = R_{1N_2} I_{1N_2} + L_{1N_2} \frac{dI_{1N}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,1N_2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ kl \neq 1N_2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{1N_2,kl} \frac{dI_{kl}}{dt} \\
\vdots \\
V_N^S = R_{n_2 N_2} I_{n_2 N_2} + L_{n_2 N_2} \frac{dI_{n_2 N_2}}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{N_1} M_{ij,n_2 N_2} \frac{dI_{ij}}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ kl \neq n_2 N_2}}^{n_2} \sum_{l=1}^{N_2} M_{n_2 N_2,kl} \frac{dI_{kl}}{dt}
\end{array} \right. \quad \text{et (III. 6)}$$

III.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 .

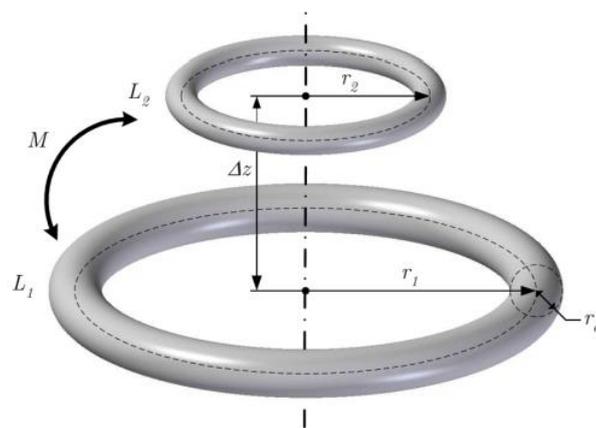


Figure III-4: Calcul d'inductances de spires circulaires et coaxiales

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 donné par l'équation suivante :

$$M = \frac{2\mu_0\sqrt{r_1r_2}}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) E_1(k) - E_2(k) \right] \text{ avec } k = \sqrt{\frac{4r_1r_2}{(r_1 + r_2)^2 + \Delta_z^2}} \quad (\text{III. 7})$$

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

$$E_1(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{\partial\theta}{\sqrt{(1 - k^2\sin^2\theta)}} \text{ et } E_2(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{(1 - k^2\sin^2\theta)} . d\theta \quad (\text{III. 8})$$

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 (annex A), il s'exprime par :

$$L = \frac{\mu_0 r_1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{3r_1}{4r_c}\right) + \frac{1}{4} \right] \quad (\text{III. 9})$$

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

$$R_1 = 2\pi . r_1 \frac{\rho}{S_1} \quad (\text{III. 10})$$

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.

La matrice d'un enroulement primaire devient comme suivante [VAN-2016] [Aub-2014]:

$$n_1 U^p = [R_p][I_p] + [L_{pp}] \frac{d}{dt} [I_p] + [M_{sp}] \frac{d}{dt} [I_s] \quad (\text{III. 11})$$

$$[R_p] = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & R_{n1} & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 & R_{12} & 0 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & R_{nN} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 12})$$

$$[L_{pp}] = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{21}^p & \dots & M_{n_1 1}^p & M_{12}^p & \dots & M_{n_1 N_1}^p \\ M_{11}^p & L_{21} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & M_{21}^p & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & L_{n_1 1} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & L_{12} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & M_{n_1 N_1}^p \\ M_{11}^p & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & L_{n_1 N_1} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 13})$$

$$[M_{sp}] = \begin{bmatrix} M_{11}^s & M_{21}^s & \dots & M_{n_2 1}^s & M_{12}^s & \dots & M_{n_2 N_2}^s \\ M_{11}^s & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{11}^s & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & M_{n_2 N_2}^s \end{bmatrix} \quad (\text{III. 14})$$

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 :

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_p] \\ [R_s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{pp}] \\ [L_{ss}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [M_{sp}] \\ [M_{ps}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s \\ I_p \end{bmatrix} \quad (\text{III. 15})$$

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 canalisé par les trois noyaux s'exprime par [ENSM-2014]:

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c = 0 \quad (\text{III. 16})$$

III.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.

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c \neq 0 \quad (\text{III.17})$$

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 (III-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 (III-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 [Raz-2016] [Bad-2008] [Aub-2014].

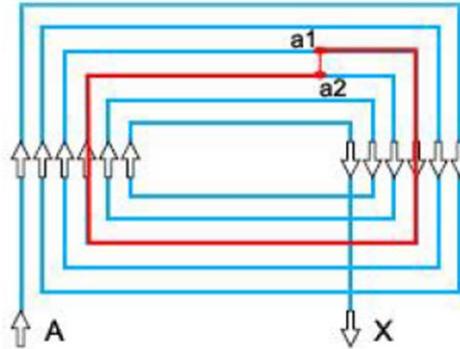


Figure III-5: Présentation du défaut sur une bobine

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 (III-6). Le modèle reste le même que le court-circuit soit aux enroulements secondaires ou qu'il soit aux enroulements primaires.

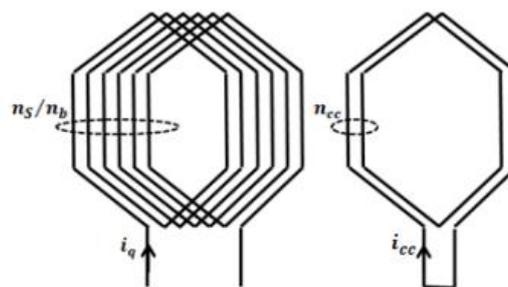


Figure III-6: Présentation du défaut en deux bobines différentes

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

$$[V] = [V_A \ V_B \ V_C \ V_{cc} \ V_a \ V_b \ V_c] \quad (III.18)$$

$$[I] = [I_A \ I_B \ I_C \ I_{cc} \ I_a \ I_b \ I_c] \quad (III.19)$$

$$[R] = \text{diag}[R_A \ R_B \ R_C \ R_{cc} \ R_a \ R_b \ R_c] \quad (\text{III.20})$$

[R] est une matrice diagonale [Kez-2000]

$$[L] = \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 & M_{A-cc} & M_{A-a} & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 & 0 & 0 & M_{B-b} & 0 \\ 0 & 0 & L_C & 0 & 0 & 0 & M_{C-c} \\ M_{A-cc} & 0 & 0 & L_{cc} & M_{cc-a} & 0 & 0 \\ M_{A-a} & 0 & 0 & M_{cc-a} & L_a & 0 & 0 \\ 0 & M_{B-b} & 0 & 0 & 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & M_{C-c} & 0 & 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

[L] La matrice des inductances.

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

$$R_A = (1 - n_{cc})R_p \text{ et } R_B = R_C = R_p \quad (\text{III.22})$$

$$R_{cc} = n_{cc}R_p \quad (\text{III.23})$$

$$R_a = R_b = R_c = R_s \quad (\text{III.24})$$

Pour les inductances propres on a :

$$L_A = (1 - n_{cc})^2 L_{pp} \quad (\text{III.25})$$

$$L_{cc} = n_{cc}^2 L_{pp} \quad (\text{III.26})$$

$$L_B = L_C = L_{pp} \quad (\text{III.27})$$

$$L_a = L_b = L_c = L_r \quad (\text{III.28})$$

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

$$n_{cc} = \frac{N_{scc}}{N_s} \quad (\text{III.29})$$

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 [Lef-2006] :

$$M_{A-cc} = n_{cc}(1 - n_{cc})M_{sp} \quad (\text{III.30})$$

$$M_{A-a} = (1 - n_{cc})M_{sp} \quad (\text{III.31})$$

$$M_{cc-a} = n_{cc}M_{sp} \quad (\text{III.32})$$

$$M_{B-b} = M_{C-c} = M_{sp} \quad (\text{III.33})$$

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.

III.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 (III.40). Au démarrage le courant est nul :

$$E = RI + L \frac{dI}{dt} + M \frac{dI}{dt} \quad (\text{III.34})$$

On pose $L + M = Lp$

$$\frac{dI}{E - RI} = \frac{1}{Lp} dt \quad (\text{III.35})$$

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

$$\ln(E - RI) = \frac{1}{Lp} t + Cte \quad (\text{III.36})$$

$$I = \frac{E - e^{\frac{1}{Lp}t} K}{R} \quad (\text{III.37})$$

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

$$I(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{\frac{1}{Lp}t} \right) \quad (\text{III.38})$$

III.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.

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

Tableau III-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 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.

III.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 (Sn)	630	kVA
Fréquence	50	Hz
Tension nominale de l'enroulement HT (Un)	30	kV
Tension nominale de l'enroulement BT (Un)	0,4	kV
Groupe de couplage	Dyn	

Tableau III-2: Caractéristiques du dispositif

Source : [E.E.I-2008].

Composante	valeur	Unité
Diamètre intérieur de l'enroulement BT (ϕ_{int_BT})	198	Mm
Diamètre extérieur de l'enroulement BT (ϕ_{ext_BT})	239	Mm
Diamètre intérieur de l'enroulement HT (ϕ_{int_HT})	265	Mm
Diamètre extérieur de l'enroulement HT (ϕ_{ext_HT})	356	Mm
hauteur des enroulements (h_{enr})	436	Mm
Epaisseur de l'enroulement BT (e_{en_BT})	20,5	Mm
Epaisseur de l'enroulement HT (e_{en_HT})	43	Mm
Diamètre du noyau (ϕ_n)	180	Mm
hauteur du noyau (h_n)	810	Mm
Diamètre du fil nu (ϕ_{fil})	15	Mm
Diamètre du fil avec isolation ($\phi_{fil-iso}$)	16	Mm
Section de fil (S_{fil})	$\pi * (7,5)^2$	Mm

Tableau III-3: Dimension géométrique du transformateur

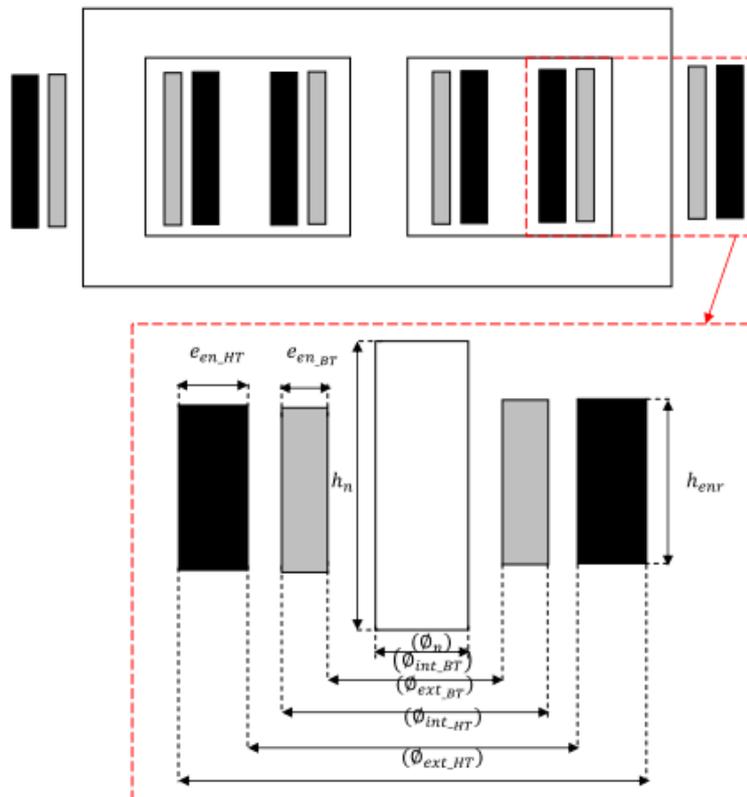


Figure III-7: Dimension du transformateur

Source : [E.E.I-2008].

caractéristiques Physiques 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 III-4: Caractéristique physique des matériaux

III.5. Conclusion

Pour la modélisation mathématique du transformateur de puissance, on a besoin de comprendre tous les phénomènes électriques et magnétiques pour avoir une modèle de schématique complet illustrant les paramètres mise en jeux. Cette la modélisation est très utile pour des nombreuses applications. Dans ce chapitre, nous appliquons pour la modélisation de court-circuit entre spire d'un enroulement.

L'enroulement en court-circuit est considéré comme un autre enroulement, son inductance propre et mutuelle ne se comporte pas comme les autres par l'apparition de courant qu'on appelle courant de circulation . Donc, on insère dans la modèle mathématique les équations régis ce fait.

Chapitre IV : Application des méthodes de diagnostic des défauts de court-circuit entre spire d'un enroulement d'un transformateur connecté à un réseau pollué

IV.1. Introduction

Ce chapitre est destiné à la simulation numérique d'un transformateur de puissance en cas sain et puis en défaut de court-circuit entre spire. Plus précisément, nous cherchons des méthodes pour savoir la signature de défaut de court-circuit entre spire dans un transformateur. Les résultats de différentes analyses nous indiquent le taux de défaillance.

Nous appliquons tous les méthodes d'analyse mathématiques et traitement de signal citez dans la deuxième chapitre pour la diagnostique de notre système. Nous rappelons qu'ils sont compose de l'analyse an composantes principales, les réseaux de neurones artificiels et le transformer en ondelette continue

Les modèles dans le chapitre III sont ensuite implantés dans le logiciel MATLAB dans le but de simuler le transformateur en fonctionnements sain et défaillant afin de détecter la présence de défauts sur les variables d'état du transformateur de puissance.

IV.2. Représentation du système

Pour la simulation, nous utilisons le logiciel Matlab Simulink. Notre dispositif est composé d'une source d'alimentation sinusoïdal de 630 kVA, d'un transformateur et d'une charge de 2,4 k Ω (figure IV-1), le schéma détaillé du transformateur se trouve dans l'annexe C, les ampèremètres sont placés à l'intérieur du transformateur, nous mettons deux voltmètres pour mesurer la tension, et deux oscilloscopes pour visualiser les signaux de sortie de l'ampèremètre et du voltmètre. Le tableau suivant nous montre les résultats de calcul :

	Enroulement primaire	Enroulement secondaire
Résistance R	46,8 Ω	1 m Ω
Inductance propre L	4,5 mH	22,1 μ H
Inductance mutuel M	15,7 H	263,6 μ H

Tableau IV-1 : Les résultats de calcul de R, L et M

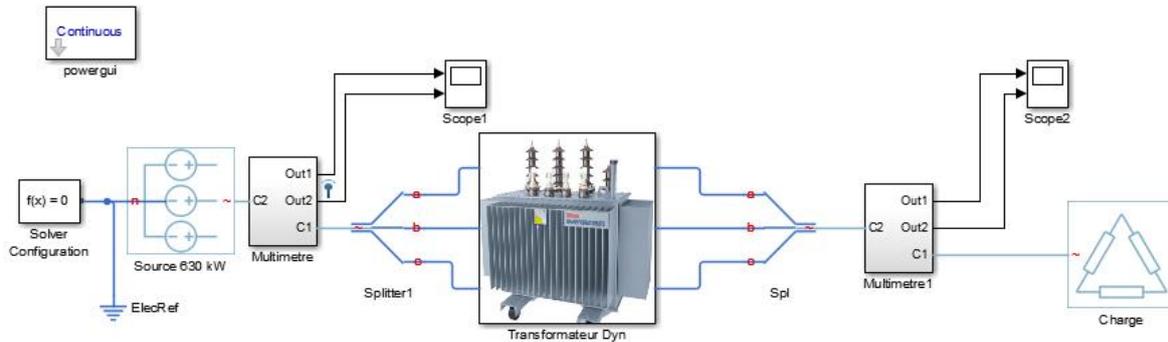


Figure IV-1: Simulation du transformateur triphasé en Simulink

La simulation du transformateur triphasé se déroule comme suivant : Le transformateur est démarré à vide à l'instant $t=0$; à l'instant $t=2s$, une charge de 2,4 k Ω est introduite et à $t=4s$, nous arrêtons la simulation.

IV.2.1. Résultat de simulation en cas sain

En cas sain, le réseau est sinusoïdal de fréquence 50 Hz. Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur sont donnés par les figures IV-2 et IV-3 ci-dessous,

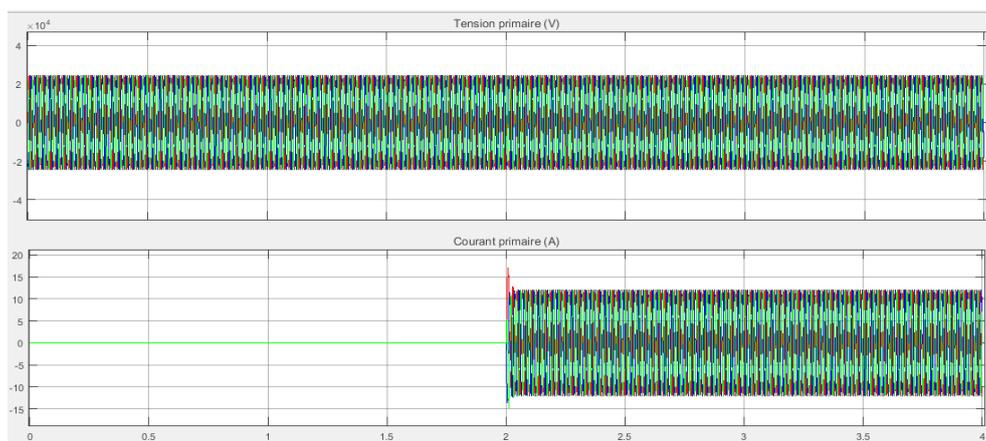


Figure IV-2: Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur en cas sain

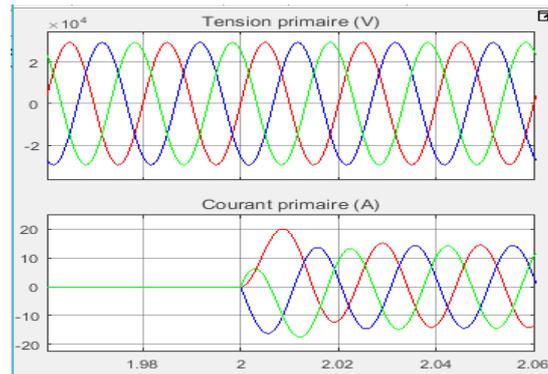


Figure IV-3: Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur en cas sain agrandie

La tension primaire a la même amplitude de 30 kV pendant la simulation, mais il n'y a pas de courant à l'enroulement primaire entre 0 et 2 seconde, puis nous constatons une pic de courant de 21 A au voisinage de 2 seconde, et entre 2 et 4 seconde le courant prend la valeur de 15 A. La figure IV-4 montre les résultats de l'analyse fréquentiel par le transformeur de fourrier.

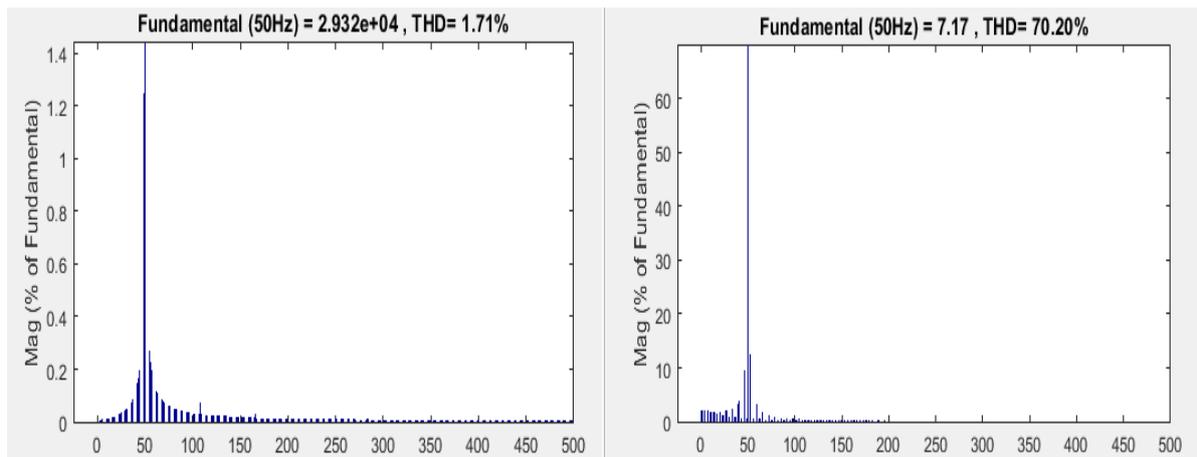


Figure IV-4: les fréquences de la tension et le courant en cas sain à l'entrée du transformateur

L'analyse fréquentiel de la tension (la figure à gauche) montre la stabilité du réseau ; la fréquence est à 50 Hz. Pour le courant (la figure à droite), on perçoit qu'au voisinage de $t = 0$, il existe des fréquences de faible amplitude, elles sont dues à l'appelle de courant lors du contact à la charge. A l'enroulement secondaire, la tension et le courant sont présentés sur les figures IV-5 et IV-6

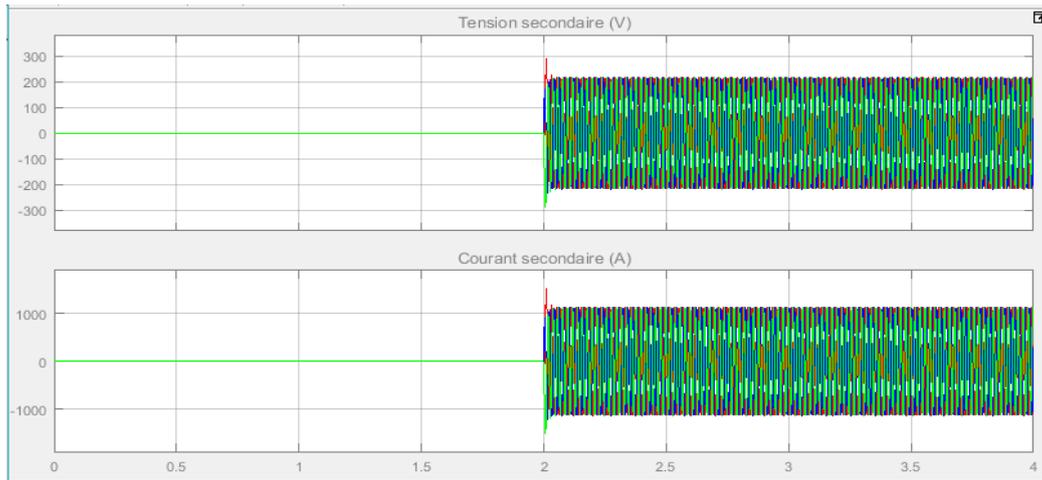


Figure IV-5: Les tensions et les courants à la sortie du transformateur en cas sain

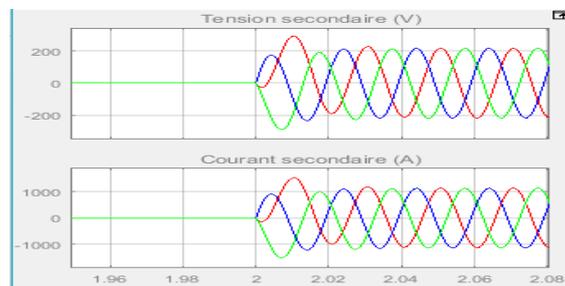


Figure IV-6: Les tensions et les courants à la sortie du transformateur en cas sain agrandie

Les signaux de la tension et du courant ont la même allure au secondaire du transformateur. Entre 0 à 2 secondes de la simulation, ils prennent la valeur 0. Puis, un pic de tension de 300V et de courant 1500A apparaît au voisinage de 2 seconde. Ensuite, la tension prend sa valeur nominale de 220V et le courant 1000A. La figure IV-7 montre l'analyse fréquentiel des signaux.

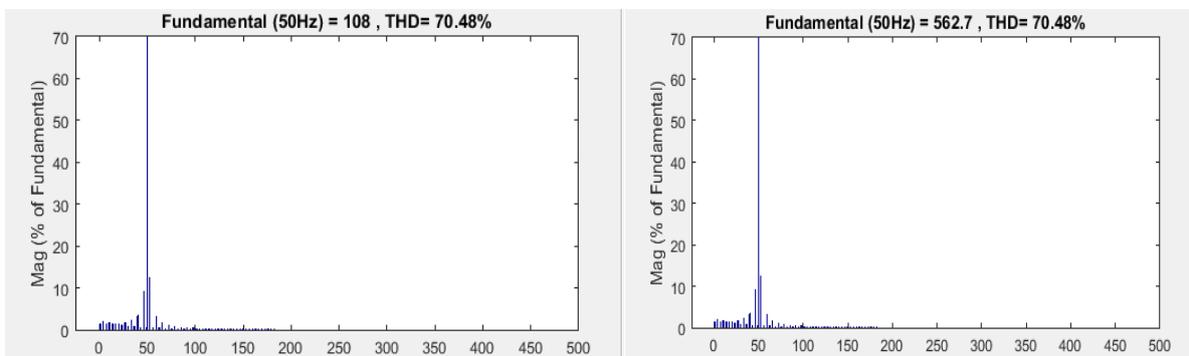


Figure IV-7: les fréquences de la tension et le courant en cas sain à la sortie du transformateur

IV.2.2. Simulation en défaut de court-circuit entre spire de taux de court-circuit 5% avec harmonique

La simulation du court-circuit entre spire d'un enroulement du transformateur se déroule de la même façon que la simulation de transformateur en cas sain précédemment, tout en ajoutant un court-circuit entre spire dans l'enroulement primaire de la première phase avec un taux de court-circuit de 5%. De plus, des pollutions harmoniques impaires de rang 5 à 17 sont introduites dans le réseau. Les résultats de la simulation sont données par les figures IV-8 et IV-9 ci-dessous :

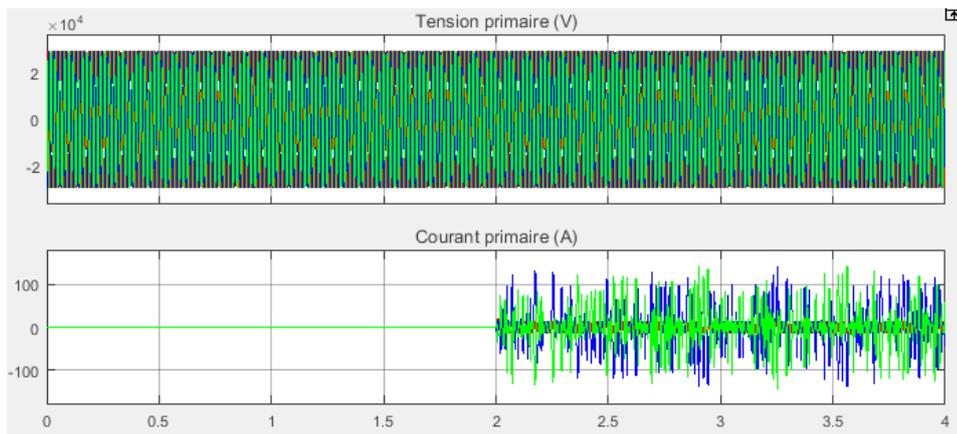


Figure IV-8: Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur en défaut de 5%

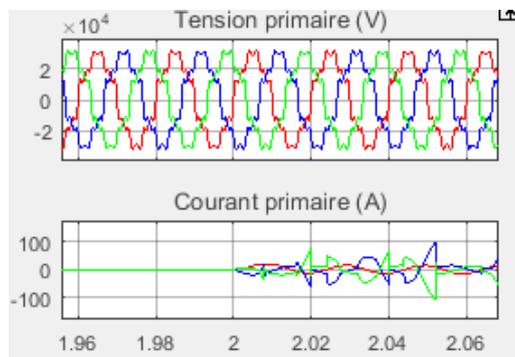


Figure IV-9: Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur en défaut de 5% agrandie

Les figures montrent que la tension à l'entrée du transformateur reste intacte par court-circuit entre spire d'un enroulement primaire, mais sa forme sinusoïdale est modifiée par la pollution du réseau. Nous constatons que le courant n'est plus sinusoïdal. Le courant de court-circuit circule dans les autres enroulements et crée des pics de courant de 50 A, le courant nominal de 10 A n'est plus lisible. L'intervention de l'analyse fréquentiel par la transformation de fourrier permet d'avoir plus d'information à ce phénomène présenté par la figure IV-10.

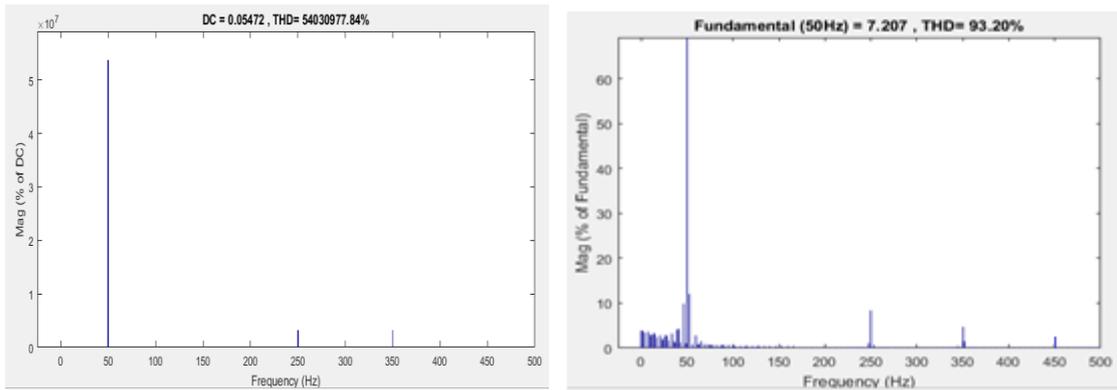


Figure IV-10: les fréquences de la tension et le courant en défaut à l'entrée du transformateur

L'analyse fréquentiel de la tension est la figure à gauche et le courant à droite. Le nombre de période de signal à analyser est de 20 qui se trouvent à un temps compris entre 1,8 à 2,2 secondes de la simulation. Le but est d'avoir les détails des harmoniques présents dans le réseau. Nous constatons la présence des harmoniques 5 et 7 dans la tension ; et 5, 7 et 9 dans le courant ; de plus, le courant a d'autre harmonique au voisinage de la fréquence 50 Hz et 150 Hz. Les figures IV-11 et IV-12 suivantes sont les résultats des signaux à la sortie du transformateur.

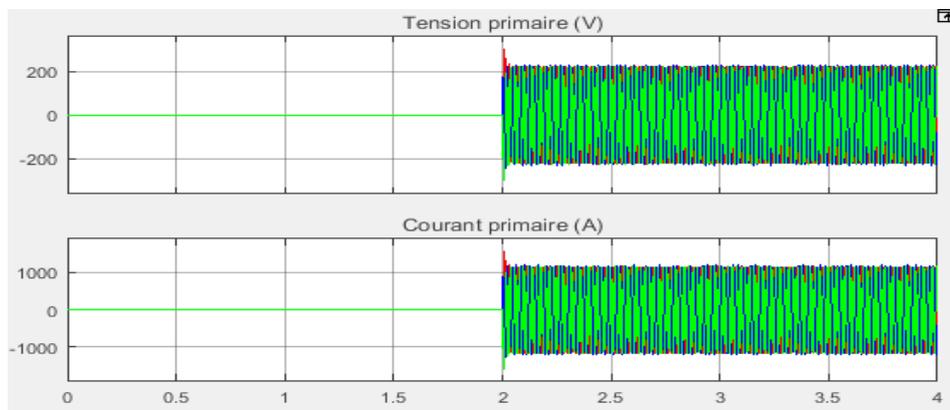


Figure IV-11: Les tensions et les courants à la sortie du transformateur en défaut

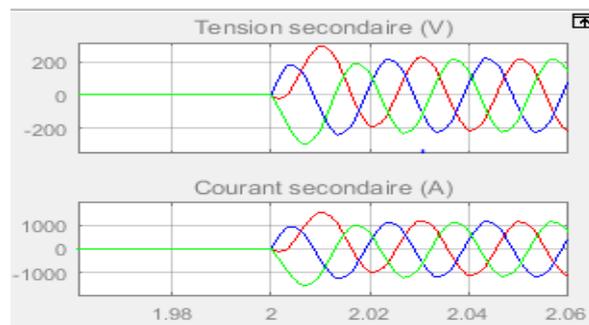


Figure IV-12: Les tensions et les courants à la sortie du transformateur en défaut agrandie

Nous constatons sur la figure ci-dessus que la tension et le courant à la sortie du transformateur ne sont pas contaminés par la pollution de réseau ni par la déformation de courant primaires, car le couplage du transformateur en triangle-étoile et le conducteur de champ magnétique isole tous les pollutions dans la partie amont du transformateur. Mais nous observons des petites distorsions à chaque sommet du signal sinusoïdal. La figure IV-13 suivante est les résultats de leur analyse fréquentiel.

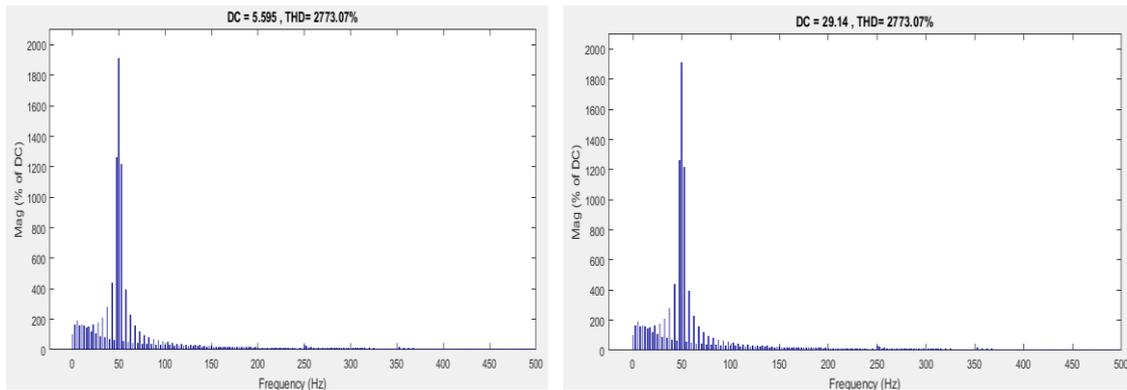


Figure IV-13: les fréquences de la tension et le courant en défaut à la sortie du transformateur

D'après la figure IV-13 ci-dessus, le courant et la tension ont la même allure fréquentiel mais d'amplitude différent. Nous remarquons d'autres fréquences aux alentours de 50 Hz et nous constatons des petites fréquences à 250 Hz et 350 Hz, donc la pollution circulant dans la secondaire est de rang 5 et 7 mais de très faible amplitude.

Cette partie est destinée à présenter le phénomène de court-circuit entre spire, notre transformateur est constitué fondamentalement par des enroulements électriques qui se trouvent dans Matlab Simulink>Simscape> Power Systems>Simscape Components> Passives Devices >Transformers. Nous utilisons l'interrupteur « Single-Phase Two-Way Switch » pour modéliser le court-circuit entre spire. La représentation détaillée du transformateur se trouve dans l'annexe c ; nous modifions le nombre d'enroulement pour varié le taux de court-circuit.

La suite, nous appliquons toutes les méthodes de diagnostic de court-circuit entre spire d'un enroulement d'un transformateur (présenté dans le chapitre : II). Ils sont composés de l'Analyse en Composante Principale (ACP), le réseau de neurone formelle et la méthode des ondelettes. Notre diagnostic se focalise sur les signaux électriques donc nous ne considérons pas les autres signaux même le circuit magnétique.

IV.3. Diagnostic de court-circuite entre spire d'un enroulement d'un transformateur

IV.3.1. Analyse en composant principale ACP

IV.3.1.1. Fonctionnement sain

Notre analyse se focalise sur l'ensemble des données collectées pendant quatre second de chaque simulations de court-circuit entre spires du transformateur avec un pas d'échantillonnage de $1 / 29556 \text{ s}^{-1}$ au minimum. Le pourcentage de court-circuit entre spires pour la collecte des données sont 0%, 20%, 40%, 60% et 80% ; nous les appliquons avec et sans harmonique. Le code de la simulation est représenté ci-dessous.

```
Donnees = sain % Entré des donnés

[vect_propres,scores,val_propres,t2] = princomp(zscore(Donnees));

% le graphe des valeurs propres.

figure('Name','Spectre des valeurs propres','NumberTitle','off');
bar(val_propres);
cumsum(val_propres)./sum(val_propres);

% carte factorielle des individus sur les deux axes principaux.

figure('Name','individus','NumberTitle','off');
plot(scores(:,1),scores(:,2),'bp');
a = axis; xl = a(1);xu = a(2);
yl = a(3);yu = a(4);
xlabel('1ère Composante Principale')
ylabel('2nde Composante Principale')
hold on
line([xl xu],[0 0])
line([0 0],[yl yu])

% cercle des corrélations variables sur les deux axes principaux.

figure('Name','Variables','NumberTitle','off');
plot(vect_propres(:,1),vect_propres(:,2),'mp');
hold on
[x,y,z] = cylinder(1,200);
plot(x(1,:),y(1,:))
hold on
line([-1 1],[0 0])
line([0 0],[-1 1])
axis equal
```

Le graphe des valeurs propres est donné par la figure IV-14 suivante [Todi-2017].

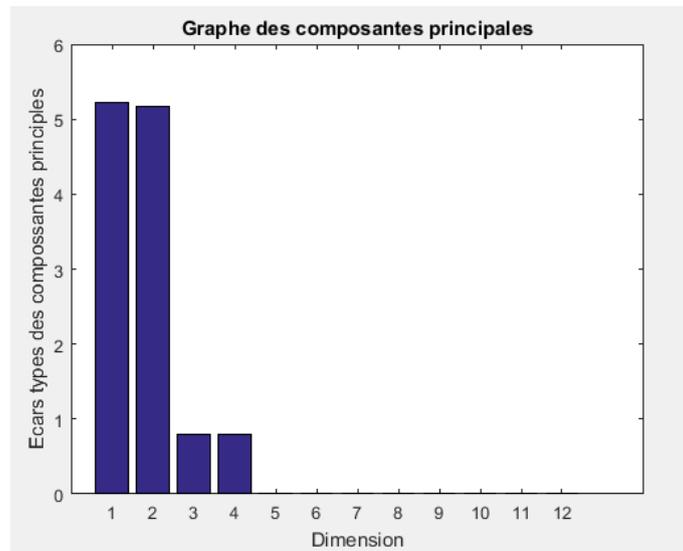


Figure IV-14: Graphe des valeurs propres

D'après cette figure, on peut dire que les projections sur les deux axes plus grands suffisent pour atteindre $\sim 89,16\%$ de l'information. En effet, le pourcentage d'inertie expliqué par la première dimension vaut $44,65\%$. Cela signifie que $44,65\%$ des informations sont représenté par l'axe 1, la seconde dimension constitue $44,51\%$, la troisième dimension $5,52\%$, et la quatrième dimension exprime $5,31\%$. Comme la difficulté de la représentation en trois ou quatre dimensions nous conduit à rester en deux dimensions, dans ce cas, il reste $10,84\%$ d'informations ne sont pas récupérées et $89,16\%$ de l'information sont exploitées pour la diagnostic de notre système.

Le résultat de l'ACP sur l'ensemble des données est donné par les figures IV-15 et IV-16

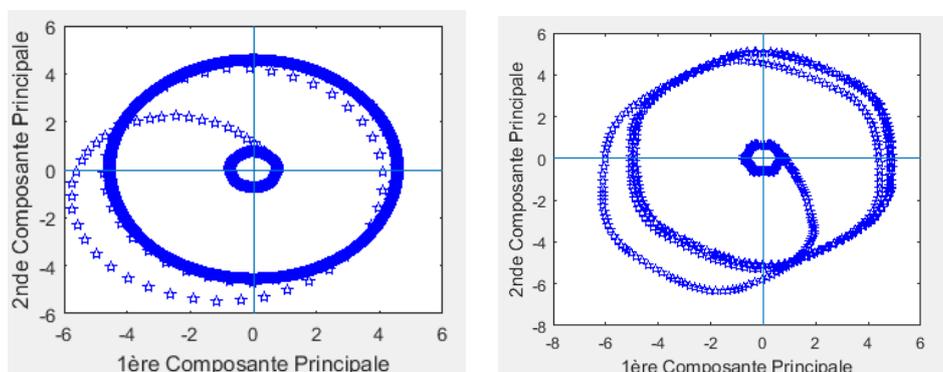


Figure IV-15: Graphe des individus en fonctionnement sain (sans harmonique à gauche et avec harmonique à droite)

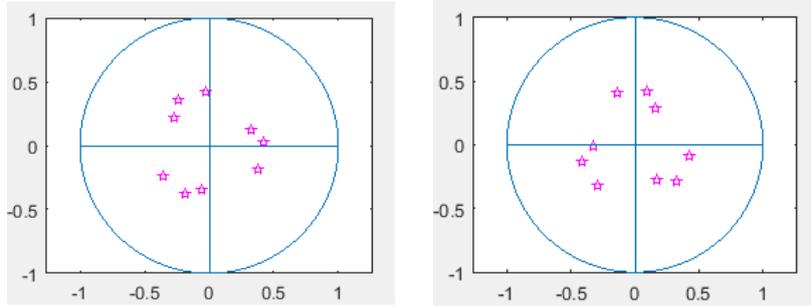


Figure IV-16: Graphe des variables en fonctionnement sain (sans harmonique à gauche et avec harmonique à droite)

Les individus sont les nuages des points qui constituent les deux cercles en gras. Dans notre cas, le système fonctionne pendant 4s ; dont les deux premières secondes où le transformateur fonctionne à vide est représenté par le petit cercle au milieu et les deux dernières secondes où notre système fonction en charge est représenté par le grand cercle. La présence des harmoniques dans le réseau déforme la présentation des individus en une sorte de polygone.

IV.3.1.2. Fonctionnement défailtent:

Dans cette partie, nous allons utiliser deux cas dont l'un sans harmonique et l'autre à sa présence. Pour observer la manière dont le système réagira, nous avons mis en œuvre quatre types de taux de défaut (20%, 40%, 60% et 80%) de court-circuit entre spires. Les figures IV-17 et IV-18 suivantes nous montrent la projection des individus selon la méthode ACP :

a. Cas sans harmonique :

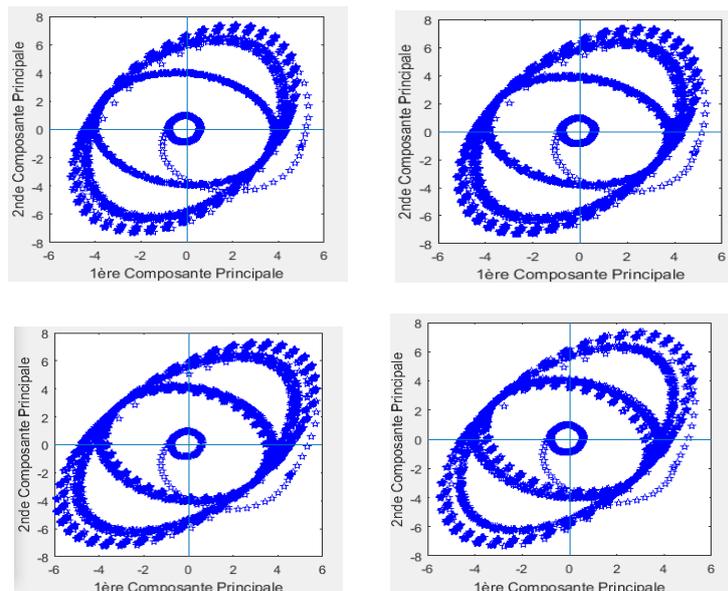


Figure IV-17:Graphe des individus en fonctionnement en défaut sans harmonique

b. Cas avec harmonique :

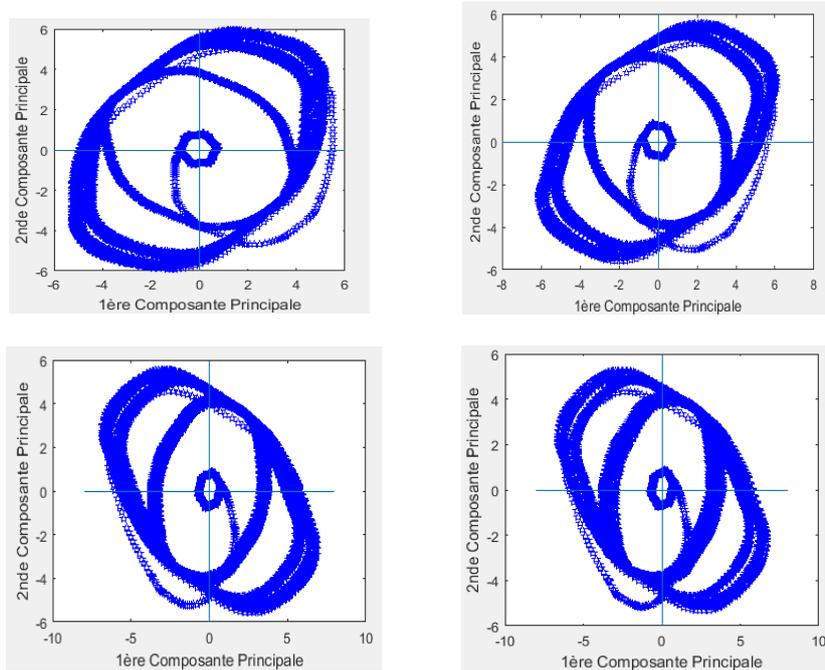


Figure IV-18: Graphe des individus en fonctionnement en défaut avec harmonique

IV.3.1.3. Discussions du ACP :

Dans le cas sans harmonique, la forme de la représentation des individus prend la forme ovale. Le petit cercle au centre est constitué par les individus du courant (tension) secondaire du transformateur, les deux formes ovales à l'extérieur représentent les deux phases du primaire du transformateur et les formes ovales qui se trouvent entre le milieu et l'extérieur représentent la phase du court-circuit entre spires. Les deux phases à l'extérieur ne sont pas superposées, ceci est dû au court-circuit entre spires d'un enroulement qui déséquilibre le champ magnétique. La phase où se trouve le court-circuit nous intéresse le plus. Au fur et à mesure que le pourcentage de court-circuit augmente, la représentation de ces individus tend à se disperser pour se diviser en deux. En présence des harmoniques, l'observation est la même que celle sans harmoniques mais la forme est ovale et le cercle subit des déformations avec un changement d'orientation.

IV.3.2. Application de réseau de neurone pour la détection de défaut

IV.3.2.1. La base de données :

Dans cette étude, nous avons enregistré les valeurs du courant et de la tension à l'entrée et à la sortie du transformateur pendant les quatre secondes de chaque simulation. Nous avons modifié à chaque simulation le taux de court-circuit entre spires. Pour les données

d'apprentissage de notre réseau de neurone, nous avons utilisé les données qui se situent aux environs de 3 et 3,8 secondes de chaque simulation. La simulation en cas de la présence des harmoniques sert uniquement pour la détection de sa présence. Le tableau IV-2 résume l'assemblage de notre base de données [Maher-2011] [ELMIR-2016] [LATR-2014].

Input	Target		
	Taux de court-circuit	Harmonique	
		sans	avec
0%	0	0	1
5%	5	0	1
10%	10	0	1
15%	15	0	1
20%	20	0	1
25%	25	0	1
30%	30	0	1
35%	35	0	1
40%	40	0	1
45%	45	0	1
50%	50	0	1
55%	55	0	1
60%	60	0	1
65%	65	0	1
70%	70	0	1
75%	75	0	1
80%	80	0	1
85%	85	0	1
90%	90	0	1
95%	95	0	1

Tableau IV-2: Configuration de l'input et de la Target du RNA

IV.3.2.2. Architecture du réseau de neurone:

Nous avons utilisé la commande `nstart` du logiciel Matlab pour la création de notre réseau de neurone. La configuration de notre réseau de neurone est de [12-12-2], c'est la configuration par défaut. L'architecture de notre RNA a été choisie avec 12 neurones dans la couche d'entrée, 12 neurones non linéaires dans la couche cachée et 2 neurones linéaires dans la sortie illustrée par la figure IV-19.

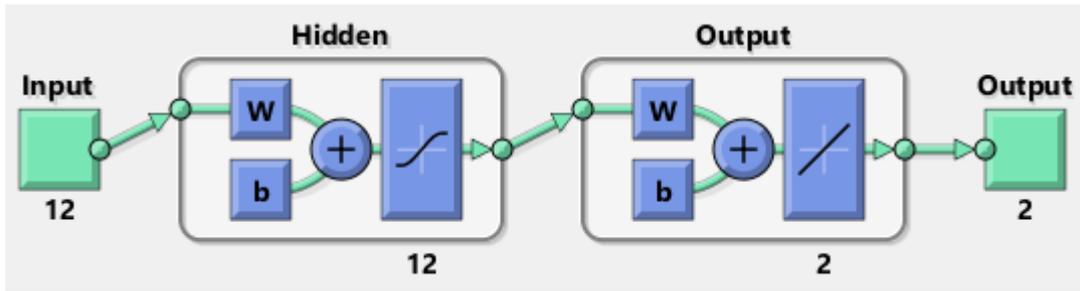


Figure IV-19: L'architecture du RNA (12-10-1)

Il doit être noté que le nombre d'itérations exigées pour le processus d'apprentissage étaient 865, et que l'erreur quadratique moyenne réalisée à la fin du processus d'apprentissage était 0,529 montré par la figure IV-20.

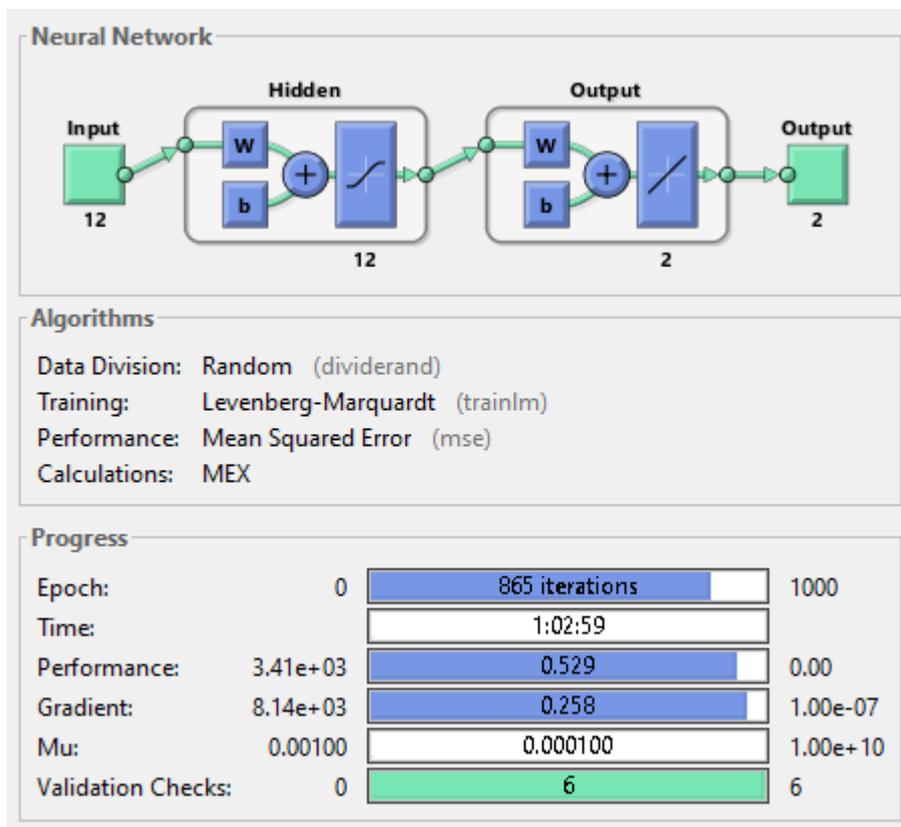


Figure IV-20: Vue générale d'ensemble du RNA (12-10-1)

La formation s'est arrêtée quand l'erreur de validation a atteint six itérations, ce qui se fera à l'itération 865 de l'époque. Le résultat est raisonnable à cause des considérations suivantes : L'erreur carrée moyenne finale est petite, l'erreur de l'ensemble test et l'erreur de l'ensemble validation ont des caractéristiques semblables.

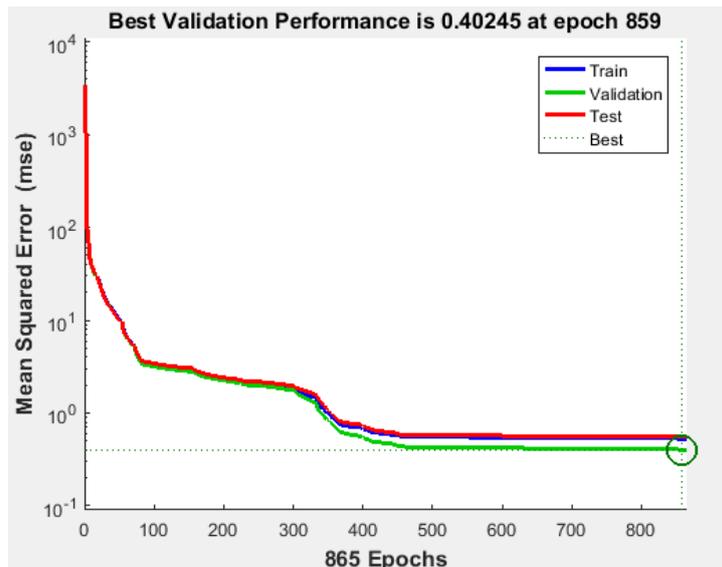


Figure IV-21: Les performances d'erreur quadratique moyenne du réseau (12-10-1)

La figure IV-21 indique qu'on peut noter qu'après la diminution de l'erreur quadratique moyenne (MSE) réalisée à la fin du processus d'apprentissage, la meilleure exécution du (MSE) pour l'étape de validation par ce réseau neurologique est 0,40245 après 859 itérations.

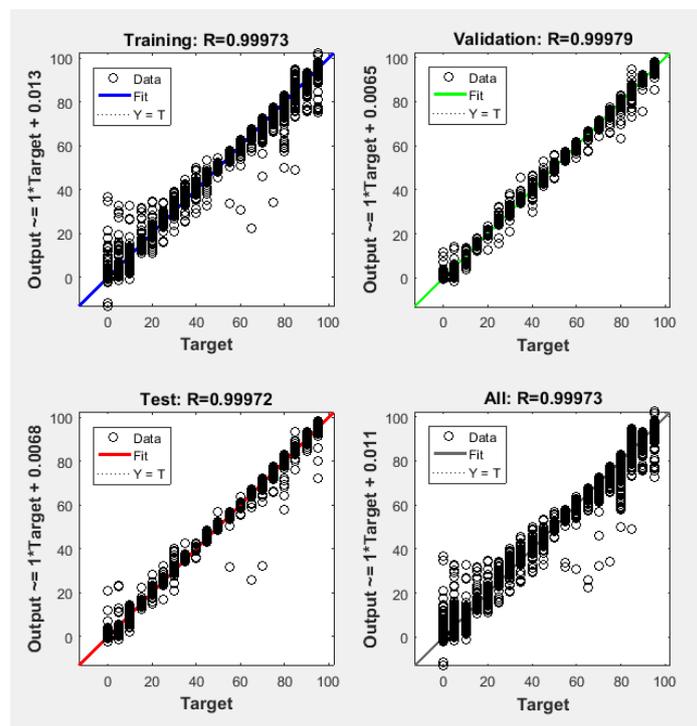


Figure IV-22: Ajustement de régression des sorties par rapport aux sorties désirées

La figure IV-22 ci-dessus montre la performance de réseau. Les représentations de régression montrent les productions de réseau en respectant les cibles formés, la validation et les tests des ensembles. Pour une régression parfaite, les données devraient chuter le long de 45

degré, où les productions de réseau sont égales aux cibles. Pour ce problème, la régression est raisonnablement bonne pour tous les ensembles de données, avec des valeurs de R de 0.99973 dans chaque cas.

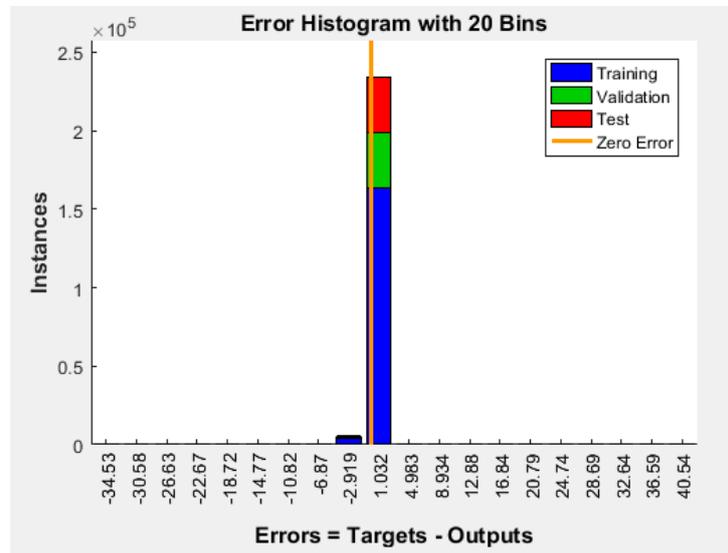


Figure IV-23: Histogramme des erreurs entre la Target et la sortie du RNA

Les barres bleues représentent des données de formation, les barres vertes représentent des données de validation et les barres rouges représentent des données de test. L'histogramme peut nous donner une indication d'outliers, qui sont des points de données où la crise est significativement plus mauvaise que la majorité de données. Dans ce cas, nous pouvons voir que la plupart d'erreurs chutent entre -6 et 5. Nous avons un meilleur résultat sur l'apprentissage de ces réseaux de neurone. Le code de ces derniers obtenu est présenté ci-dessous.

```
function [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1)

%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.

load('x1.mat') % signal Input

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1.xoffset =
[1.12505143672434;0.643531568583459;0.240759935533362;1.34686201818113e-
05;0.00167033464190514;0.0108727042448997;0.0199382021558656;0.045328148483
0802;0.00414087503164011;0.00382813481374455;0.00870300450822015;0.00079504
8006144044];
x1_step1.gain = [6.37779135000781e-05;6.377734729181e-05;6.37761267741584e-
05;0.137127964703546;1.42396159481993e-05;1.42393068789621e-
05;0.0014891206878411;0.00107141365521708;0.0014283818450363;0.007755836915
83907;0.00558027945425564;0.00743948877623071];
x1_step1.ymin = -1;
```

% Layer 1

```
b1 = [16.582530177974434;-57.997912818285059;16.457913190095496;-  
56.373336795676245;3.9903032819335387;0.25009133341900269;432.1184482524822  
1;-19.466601453135613;-76.34133673433243;-31.632806812223961;-  
415.82853786957855;-6.4368246923959278];  
IW1_1 = [-0.080698063434130829 0.078091648601208832 0.12433605683244439  
0.31039941016063577 -15.907461617247414 30.482595059749396  
0.28455130365460607 1.3304939059569854 0.50106215660560305  
0.074724773848328332 -0.027384020811075559 -0.14800505344101927;-  
0.073129194203465794 -2.4265803838125195 -2.0252158776112132 -  
155.07817609723094 92.398502255130353 -93.12961178592208 94.25404665053064  
-61.772563617751828 6.2284688717989081 95.206417816157696 -60.4974463371382  
5.8405782798804822;-0.094409773301088976 0.090034092595900339  
0.14290279764140329 0.34061020841707318 -9.8627526501674367  
24.841907170611709 0.54758562145563849 1.2623493356450817  
0.099874415927362209 -0.14823862426253898 0.16838178069566331  
0.29395065028800033;0.75469777107269942 -1.9829769993864632 -  
2.6268309260992502 -151.10081003880128 83.928255005768236 -  
84.66723389336795 96.011750021214937 -59.623359388900731 2.9297908308990359  
95.573143029107555 -59.588113942022332 2.598877565887634;-  
0.019188279463276978 -0.0063757760987847153 -0.0088428557018250444 -  
0.04572422234504175 26.250042412297091 -24.489031965796059 -  
0.067201618862563803 -0.48984070770215921 -0.73266973345448472 -  
0.0032128834077831642 0.37355503546505214  
0.66468548029025187;0.083910463174700009 0.016380448904850312  
0.0087986506097071718 0.085760647949357213 50.61872661159294 -  
49.762421475823366 -0.39788316671890861 -0.64918704234924174  
0.26541620052714887 0.62298857174498568 -0.18537600882933242 -  
0.065360052767789376;-0.3008355073858443 0.18752730423726691  
0.84688054102421073 0.30546011480176949 90.704610906964774  
339.20303800498681 0.44277427052217694 1.2521052491779936 -  
0.2776212990408945 -0.38964231830139673 1.2676600987130056  
0.15095379675230833;9.7586003476363707 3.8331320358312886 -  
8.9763565922593802 -71.364326344598865 -171.17579086724137  
170.34902926271062 107.57859845314613 -26.016872411352534 -  
58.797634891857562 108.15920465348437 -25.447255907218253 -  
59.429493254673652;104.81055018524245 17.96779188707826 -79.005148419191968  
19.703122923491552 -21.170471869967539 21.291926737155698 -  
3.655448629546274 -51.023195403427231 76.476696548546471 -  
3.3393281317901509 -51.481971792483577  
77.640678081205024;81.995675341957096 63.551912582438703 36.698855000357618  
69.609931116084297 0.10094707312388472 -0.031397533707636718  
0.83694247907152441 18.153203426014546 -28.27136338884862  
1.0894608845093279 18.185131774221077 -  
28.240699969313319;0.28159936049056683 -0.18364158875252659 -  
0.80036014016175261 -0.28495759122160425 -90.118259860198165 -  
323.03169251513975 0.41128098133702184 -0.76148771503526935 -  
0.02565052622417327 -0.46920265742658401 -1.6339062112642666  
0.12715905612826961;-0.020867713421203877 -0.22971513515042269 -  
0.47325821373895233 -1.800446960114521 -102.73127184714566  
103.18389147133388 -0.37116284893717111 -3.5617200488420466  
1.3631021279003444 -0.554795338267421 -2.2223967678795171  
1.1215162283910929];
```

% Layer 2

```
b2 = [-122.24926564753387;-1.9165577292483744];  
LW2_1 = [170.35106571734264 -343.28227683582037 -55.564555573259824  
373.68993759336615 37.12711646580869 0.41509360940056167 -  
68.216541891154876 -30.580061919322223 -0.17168041113325724  
0.00011612436048864749 -188.84378461717679  
149.53053352083958;5.0642699536039615 -9.8200877926812122 -
```

```

1.8615479276495954 10.090034500037692 -5.9379770124269884
0.15528037865833144 -2.1074131103569802 -0.22175528428177216
0.40548418126129404 0.60604314627629474 -5.0702295144388128 -
1.5868501396173402];

% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = [0.0210526315789474;2];
y1_step1.xoffset = [0;0];

% ===== SIMULATION =====

% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples

% Input 1
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);

% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);

% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end

% ===== MODULE FUNCTIONS =====

% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end

% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

L'architecture des réseaux de neurone est présentée sur la figure IV- 24. Pour faciliter la mise en forme des réseaux, nous avons utilisé des valeurs à dix puissance moins deux près de la valeur du poids et du biais des réseaux de neurone, mais ses valeurs exactes se trouvent dans le code au-dessous.

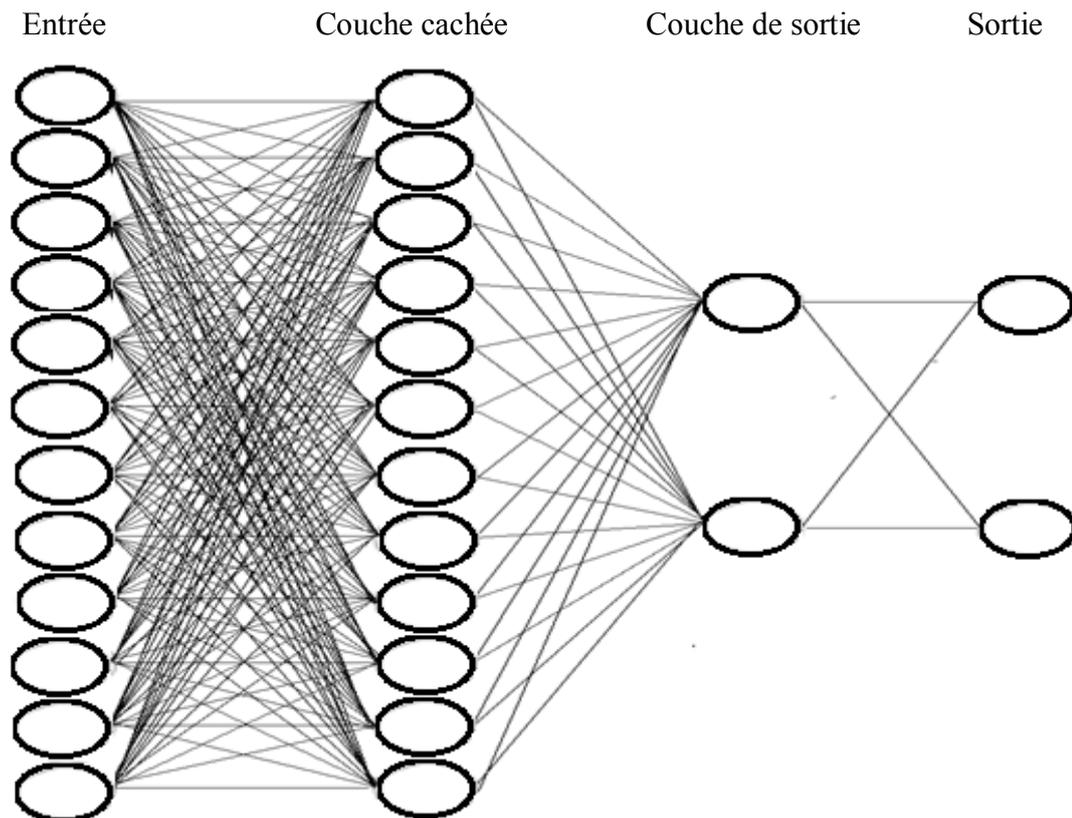


Figure IV-24: Architecture des réseaux de neurone

Chacune de ces connections correspond à une valeur qui constitue le poids $LW2_1$ des réseaux de neurone. Les entrées sont configurées par des valeurs avant d'être traitées par le réseau, de même sur les sorties avant d'avoir les résultats désirés. Les valeurs de configuration sont dans le code ci-dessus.

IV.3.2.3. Le teste de généralisation:

La deuxième étape dans le processus d'application est le teste. Cette étape consiste à tester notre RNA par un ensemble séparé de l'ensemble d'apprentissage appelées l'ensemble de teste pour analyser la capacité de généralisation et l'efficacité du réseau neurologique choisi.

Sortie désirée (taux de spire en court-circuit %)	Sortie du RNA	Erreur moyenne de détection
7	6.7436	0.2564
11	11.1832	-0.1832
23	22.9334	0.0666
31	31.2542	-0.2542
43	43.0833	-0.0833
57	57.0627	-0.0627
71	70.8766	0.1234
89	89.0197	-0.0197

Tableau IV-3: Résultat de la teste du RNA (12-10-1)

IV.3.3. Analyse du signal par Transformée D'ondelette Continue (TOC):

IV.3.3.1. En cas sain:

Le CWT ou transformation en ondelette est une des méthodes pour analyser le signal du courant afin d'avoir toutes les fréquences de ce signal par rapport au temps, la commande utilisée est CWT, nous obtenons la figure IV-24 suivant en cas sain :

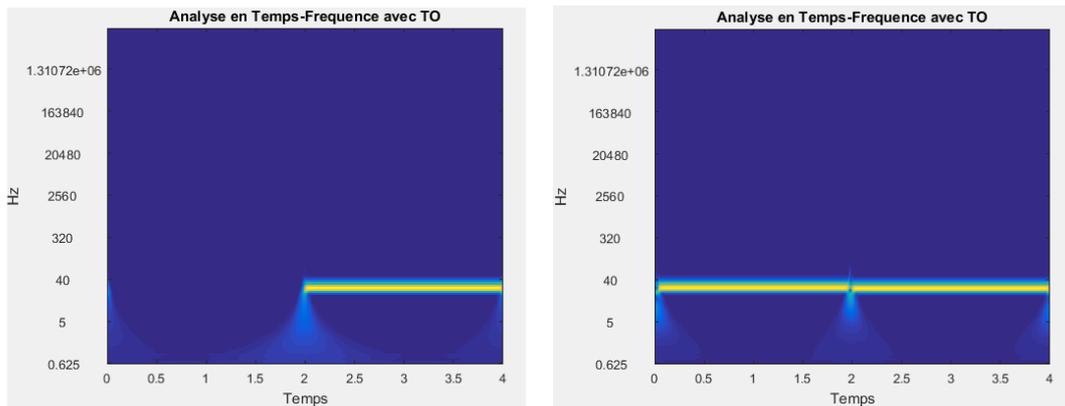


Figure IV-25: Transformée en ondelette du courant et tension en cas sain

En cas sain, l'analyse du courant sur les trois phases a la même allure, donc une seule phase suffit.

IV.3.3.2. En cas de défaut :

Rappelons que nous avons un transformateur triphasé et le défaut de court-circuit entre spire se passe dans l'un des trois enroulements. Posons que a , b et c sont les trois enroulements et le court-circuit entre spire se passe dans l'enroulement a . Les résultats d'analyse en ondelette du courant de chaque phase sont les figures IV-25, IV-26 et IV-27 :

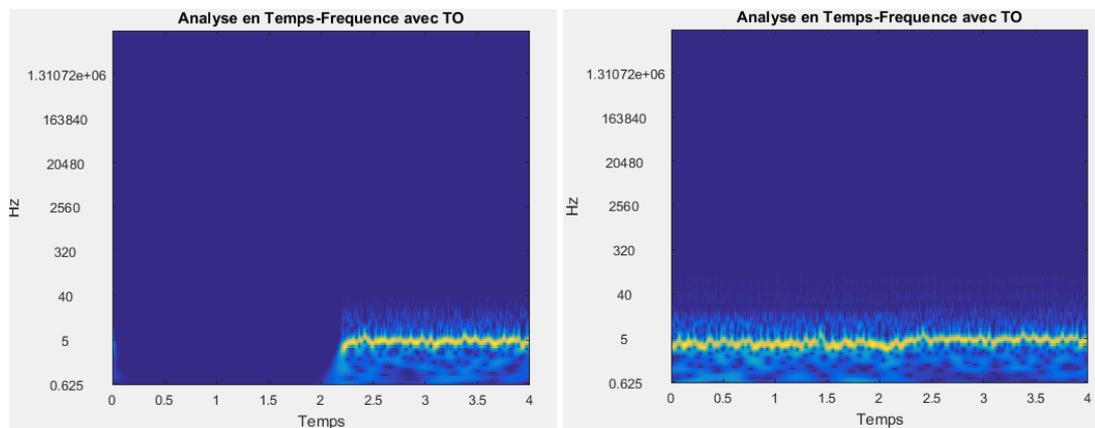


Figure IV-26: TOC du courant et tension en défaut de l'enroulement a (taux 10%)

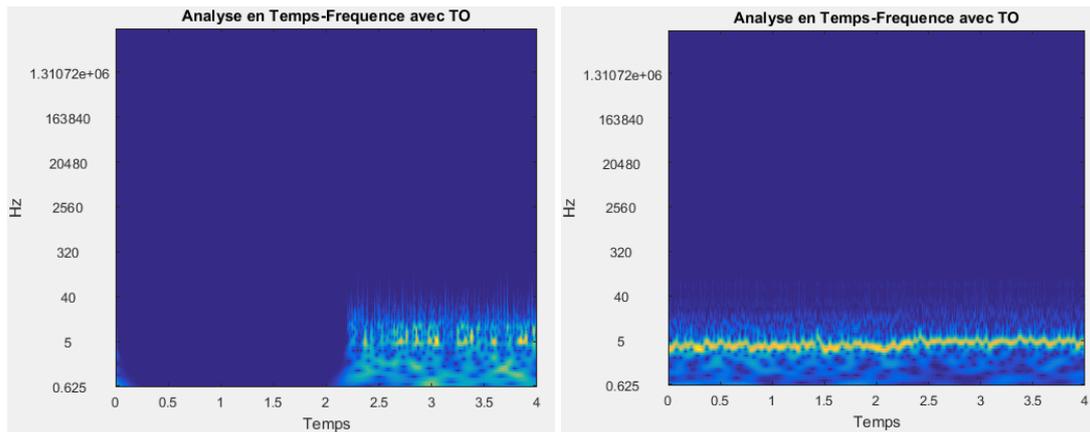


Figure IV-27: TOC du courant et tension en défaut de l'enroulement b (taux 10%)

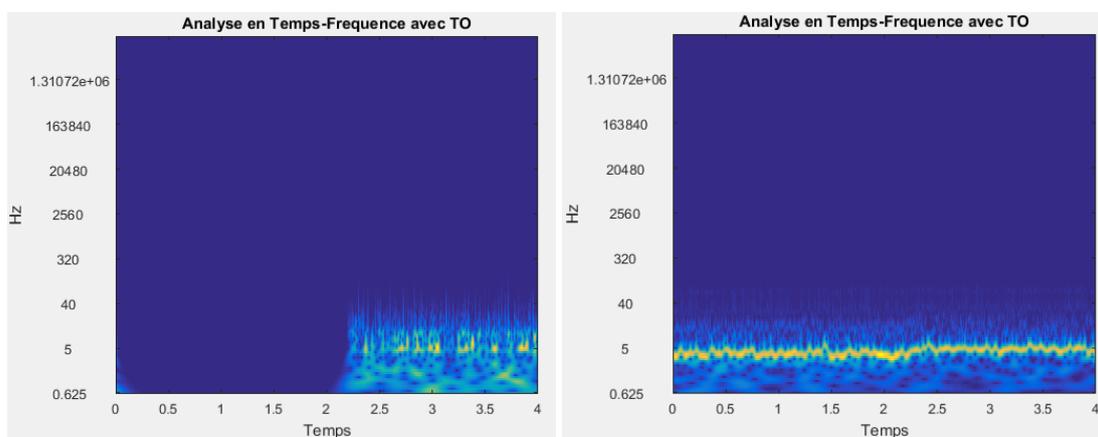


Figure IV-28: TOC du courant et tension en défaut de l'enroulement c (taux 10%)

On observe moins d'information sur la tension du réseau. Le courant qui se trouve dans l'enroulement où se passe le court-circuit entre spire a l'allure la plus visible.

IV.4. Discussions sur les approches proposées

Les différentes méthodes d'analyses nous permettent le diagnostic de défaut de court-circuit entre spires dans l'enroulement primaire du transformateur. Ces méthodes ont chacun son propre avantage. Pour le cas d'analyse en composantes principales, elle admet à afficher le nuage des points et de distinguer l'harmonique aux signaux provenant du défaut de court-circuit. Pour les réseaux de neurones artificiels, ils donnent directement le taux de court-circuit entre spires et la présence des harmoniques dans le réseau électrique. Le transformateur en ondelette permet de visualiser les différentes fréquences existant dans le réseau électrique sur un temps bien déterminé et même les signaux de défauts.

IV.5. Conclusion

Cette partie consiste sur une analyse de performances des techniques temps-fréquence, temps-échelle pour le diagnostic des défauts dans un transformateur en utilisant l'approche proposée dans la troisième partie. Les résultats obtenus indiquent que les approches proposées permettent de détecter le défaut dans un environnement hautement pollué et que toutes les techniques permettent de visualiser les défaillances. Cependant leur résolution temps-fréquence, ainsi que leur coût calculatoire peuvent varier significativement suivant la méthode utilisée.

L'analyse en composantes principales, les réseaux de neurones et les représentations temps-fréquence sont des outils compliqués, demandant des connaissances avancées pour l'ajustement des paramètres de chaque technique. De plus, ces représentations ne sont qu'une première étape dans la mise en place d'un algorithme de diagnostic complet. En effet, pour établir une décision sur l'état du transformateur, il faudrait extraire des paramètres à partir de ces représentations, pour obtenir une mesure de la sévérité du défaut.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de connaître les maintenances du réseau et du transformateur. Il conduit à la modélisation et détection de défaut de court-circuit entre spire dans un enroulement d'un transformateur de puissance en vue de diagnostic.

Nous sommes axés dans le premier chapitre sur les problèmes du réseau électrique, les équipements électriques et électroniques modernes possèdent un système de contrôle de puissance. Il en résulte une charge non linéaire ou apparition des harmoniques. La solution traditionnelle comme l'utilisation des selfs et des condensateurs ne peut plus le résoudre, donc les filtres actifs et les MLI prennent une place importante dans la dépollution du réseau.

Le second chapitre nous a permis de constater les défauts d'un transformateur. Nombreux sont les appareils qui permettent de détecter ces défauts. Ils sont tirés par des phénomènes physiques ou chimique présent dans un transformateur, les données obtenues sont traitées par différentes méthodes d'analyse mathématique que nous proposons dans ce chapitre.

Nous avons vu dans le troisième chapitre le modèle mathématique complet d'un enroulement dans un transformateur avec les matrices des résistances et inductances. Puis, nous avons traité le modèle triphasé d'un transformateur.

Dans le dernier chapitre, les résultats de la simulation sont analysés par des différentes méthodes pour détecter la signature de défaut. La programmation et la simulation sont réalisées par le logiciel MATLAB 2016a. Nous pouvons affirmer que tous les traitements des données sont complémentaires et ont une vision très claire sur le diagnostic du transformateur.

Mais la programmation et la simulation ne définissent pas ce qui se passe réellement, il nécessite toujours de comparer à des fait réels.

Bibliographie

- [Aub-2014] 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
- [Amel-2017]. BABA HAMED Amel née BENSEMAIN « Vers un modèle de classification neuronale des données médicales à base de la technologie FPGA » Thèse Docteur en Sciences Biomédical, 2017
- [Bad-2008] Rekik Badri « Etude et modélisation des défauts des transformateurs de puissance » Mémoire Magister, Année 2008.
- [Bouc-2010] Bouchaoui Lahcene « Diagnostic des transformateurs de puissance par la méthode d'analyse des gas dissous: application des réseaux de neurones » pp : 43-57, Mémoire Magister, Janvier 2010.
- [Boi-2005] Patrice Boissoles « A propos des intégrales elliptiques » pp : 6,17 ; décembre 2005.
- [Coll-1999] C. Collombet, J.M. Lupin, J. Schonek « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement » Cahier technique n° 152, Schneider Electric, 1999.
- [ELMIR-2016] ELMIR. Yasmina, BOUTELLI. Halima « Détermination de la tension de seuil d'initiation de la couronne dans le mélange SF₆-N₂ par réseaux neurones artificiels » mémoire Sciences et technologies, 01/06/2016
- [ENSM-2014] Ecole Nationale Supérieur Maritime « TRANSFORMATEURS », Cours et Problèmes O1MM 2^é année, septembre 2014.
- [Kez-2000] Mladen Kezunovic, Senior Member, IEEE, « Modeling and Simulation of the Power Transformer Faults and Related Protective Relay Behavior » pp: 44-56, Janvier 2000.
- [LATR-2014]. LATRECHE Yaaqoub « Diagnosticdes lignes de transmission par la methode des réseaux de neurones artificiels » Mémoire Master en Electrotechnique, promotion 2013/2014
- [Lef-2006] Anthony Lefevre « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs » p.p. 78-94, 48-66 Université de Nantes, 2006.
- [Maher-2011] Maher Helaoui « Travaux Pratiques : Intelligence Artificielle » coure ISIMa 2011
- [MAN-1998] Leonardo-Geo MANESCU «L'étude du régime non-sinusoidal dans les systèmes électriques », pp : 31-62, Thèse, Juillet 1998.
- [MAR-2010] Marcel Daniel Epanya, «Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique », pp : 28-37, Mémoire, Septembre 2010.

[Mari-2011] D. Mari « Transducteurs et capteurs I » Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, November 2011.

[Matt-2013] Matthieu Rigaut « Electromagnétisme » p.p. 58-93, Fiche de revision-2013.

[MEZ-2011] Madjid MEZIANI « Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance » pp : 1-16, 43 ; Memoire Magister, Décembre 2011.

[Mul-2012] Bernard Multon « Modèles électriques du transformateur electromagnétique », revue 3EI, 1997, pp.31-36, Février 2012.

[Naou-2009] Mezari Naouel « Diagnostique des transformateurs de puissances » Mémoire de magister

[Per-2005] Valérie Perrier « Application de la théorie des ondelettes » Enseignement UNESCO, mars 2005

[Raz-2016] Tsivalalaina David Razafimahefa « Diagnostic des systèmes de production d'énergie à source éolienne » pp : 34-91 Thèse décembre 2016.

[RITZ-2014] RITZ « Transformateurs de courant et de tension Moyenne Tension » Instrument transformers, Rev_2014-01 JSW.

[SAL-2014] SALAMI GOUYA Nassirou, ELMAALMY Youness « Etude et Analyse des harmoniques générées dans le réseau électrique » Projet de Fin d'Etudes, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, Juin 2014.

[Sanc-2011] Jean SANCHEZ « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance » Université de Grenoble, Thèse soutenue publiquement le 21 juin 2011.

[Todi-2017]. ANDRIANAJAINA Todizara « Diagnostic des systèmes de production de l'énergie à source solaire » Thèse : docteur en « Sciences et Technologie », 14-12-2017

[VAN-2016] Thierry VAN CUTSEM « Le transformateur de puissance » pp : 1-10 Notes théoriques du cours ELEC0014, Novembre 2016.

[VIA-2011] VIALIS, WB / ORD-TE « Harmoniques » Référentiel Technique, Version V0 du 01-09-2011.

ANNEXE A : Calcul des inductances

L'inductance mutuelle

L'inductance mutuelle est tirée par le théorème de Stokes des flux d'induction magnétique, pour avoir sa définition exacte, d'abord on cherche à calculer le potentiel vecteur après on utilise l'équation suivante :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\psi_{ij} = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{ds} = \oint_C \vec{A} \cdot \vec{dl} = M_{ij} I \quad (\text{A.2})$$

$$M_{ij} = \frac{1}{I} \oint_C \vec{A} \cdot \vec{dl} \quad (\text{A.3})$$

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 donnée par l'équation [Att-2015]:

$$\vec{A}(i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{V_i} \frac{\vec{j}(i) \cdot dV_i}{\|\vec{R}\|} \quad (\text{A.4})$$

Dans une configuration axisymétrique, le potentiel vecteur magnétique et la densité de courant électrique sont réduits à leurs composants angulaires.

$$\vec{A}(r, z) = \frac{\mu_0 \cdot dr \cdot dz}{4\pi} \oint_{C_i} \frac{\vec{j}(i) \cdot dl}{\|\vec{R}\|} \quad (\text{A.5})$$

Calculons $\|\vec{R}\|$

$$a = r_{ij} \sin\theta \quad \text{et} \quad b = r_{kl} - r_{ij} \cos\theta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 = (r_{ij} \sin\theta)^2 + (r_{kl} - r_{ij} \cos\theta)^2 = r_{ij}^2 + r_{kl}^2 - 2r_{ij}r_{kl} \cos\theta$$

$$R^2 = c^2 + \Delta_z^2 = r_{ij}^2 + r_{kl}^2 + \Delta_z^2 - 2r_{ij}r_{kl} \cos\theta = (r_{ij} + r_{kl})^2 + \Delta_z^2 - 2r_{ij}r_{kl}(1 + \cos\theta)$$

$$\text{Posant } \theta = 2\phi + \pi, \quad D^2 = (r_{ij} + r_{kl})^2 + \Delta_z^2 \quad \text{et} \quad k = \sqrt{\frac{4r_{ij}r_{kl}}{(r_{ij}+r_{kl})^2 + \Delta_z^2}} = \sqrt{\frac{4r_{ij}r_{kl}}{D^2}}$$

$$1 + \cos\theta = 1 + \cos(2\phi + \pi) = 1 - \cos 2\phi = 2\sin^2\phi$$

$$R^2 = D^2(1 - k^2 \sin^2\phi)$$

$$\text{Or } d\theta = 2d\phi \quad \text{et} \quad dl = r_{ij}d\theta \quad \text{donc} \quad dl = 2r_{ij}d\phi$$

Le réarrangement de l'équation (A.5) nous permet d'écrire :

$$\begin{aligned}
A &= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I \int_0^{2\pi} \frac{2r_{ij} d\phi}{\sqrt{D^2(1-k^2 \sin^2 \phi)}} \\
&= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{4r_{ij}\sqrt{r_{ij}\sqrt{r_{kl}}}} d\phi}{\sqrt{D^2 \cdot \sqrt{r_{kl}} \sqrt{(1-k^2 \sin^2 \phi)}}} \\
&= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I \cdot k \cdot \sqrt{\frac{r_{ij}}{r_{kl}}} \int_0^{2\pi} \frac{d\phi}{\sqrt{(1-k^2 \sin^2 \phi)}} \\
&= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{4r_{ij}\sqrt{r_{ij}\sqrt{r_{kl}}}} (k \sin^2 \phi - k) d\phi}{k \cdot \sqrt{D^2 \cdot \sqrt{r_{kl}} \sqrt{(1-k^2 \sin^2 \phi)}}} \\
&= \frac{\mu_0}{2\pi k} \cdot I \sqrt{\frac{r_{ij}}{r_{kl}}} \int_0^{2\pi} \frac{(k^2 \sin^2 \phi - k^2 + 2 - 1) d\phi}{\sqrt{(1-k^2 \sin^2 \phi)}}
\end{aligned}$$

Le potentiel vecteur généré en m ne possède qu'une composante azimutale non nulle dont après calcul l'expression est la suivante :

$$M = \frac{2\mu_0 \sqrt{r_{ij} r_{kl}}}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) E_1(k) - E_2(k) \right] \text{ avec } k = \sqrt{\frac{4r_{ij} r_{kl}}{(r_{ij} + r_{kl})^2 + \Delta_z^2}} \quad (\text{A. 6})$$

$E_1(k)$ et $E_2(k)$ sont des intégrales elliptiques de premier et de seconde espèce

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

Inductance propre

L'inductance propre est la somme de deux termes. Un premier "interne", que nous dénommerons L_i , est associé au flux traversant la section du conducteur. Un second L_e , "externe", traduit le flux partiel embrassé par le fil.

$$L = L_e + L_i$$

En supposant que le rayon du conducteur est faible devant le "rayon moyen" de la spire, l'inductance L_i se ramène alors à celle, d'un cylindre, de longueur indéfinie l_1 soit $\frac{\mu_0 l}{8\pi}$. Celle externe peut être approchée par l'expression suivante :

$$L_e = \frac{\mu_0 l_1}{2\pi} \ln \left(\frac{3l_1}{4r_c} \right)$$

On obtient finalement la formule semi-empirique suivante de l'inductance propre et partielle de ce conducteur :

$$L = \frac{\mu_0 l_1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{3l_1}{4r_c} \right) + \frac{1}{4} \right]$$

Généralités sur le transformateurs de puissances

Définition

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisateur.

Il se compose de deux ou plusieurs enroulements de fil enroulés autour d'un noyau ferromagnétique commun. Habituellement, ces enroulements ne sont pas reliés électriquement. Ils sont reliés par le flux magnétique commun confiné dans le noyau

Seuls les transformateurs de puissance permettent de minimiser les pertes en ligne, en assurant le transport de l'énergie à longue distance sous tension élevée (200kV et 400kV et plus entre phase), puis d'abaisser en suite cette tension, étape par étape, pour alimenter les réseaux de distribution régionaux et locaux, jusqu'à la tension d'alimentation domestique.

Constitution générale d'un transformateur :

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

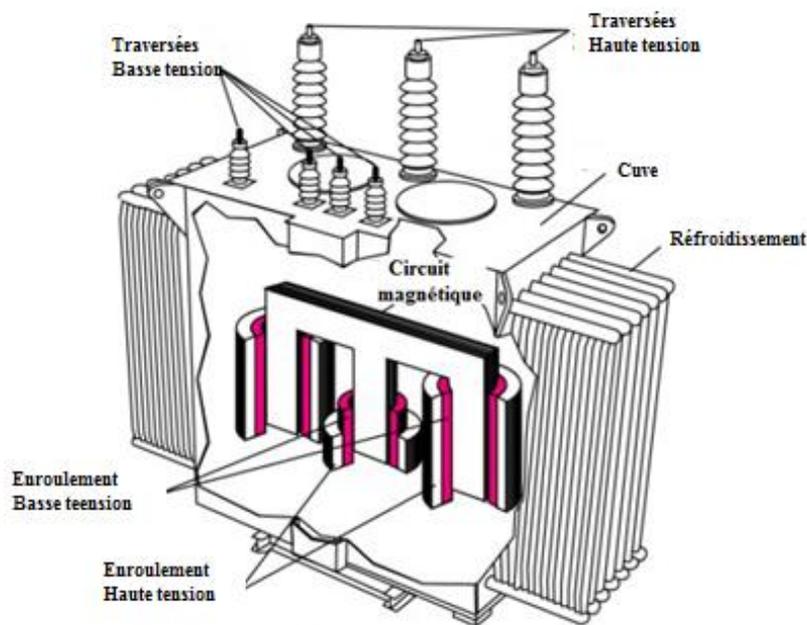


Figure IV-29 : Transformateur de puissance partiellement sectionné

Le circuit magnétique

Un circuit magnétique est un circuit généralement réalisé en matériau ferromagnétique au travers duquel circule un flux de champ magnétique. Le champ magnétique est généralement créé soit par des enroulements enserrant le circuit magnétique et traversés par des courants, soit par des aimants contenus dans le circuit magnétique. Le concept du circuit magnétique est de confiner le flux produit par des enroulements. La densité du flux doit être aussi haute que possible sans que le noyau entre en saturation. On a deux types de circuit magnétique : le type cuirassé et le type à colonnes

Type cuirassé

Ce type de transformateur avec un circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés. La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité (figure II-2). À cause de la meilleure protection magnétique produite par le montage cuirassé, celui-ci est utilisé dans le cas où la tension est faible et le courant très élevé, typiquement dans les fours à arc électrique.

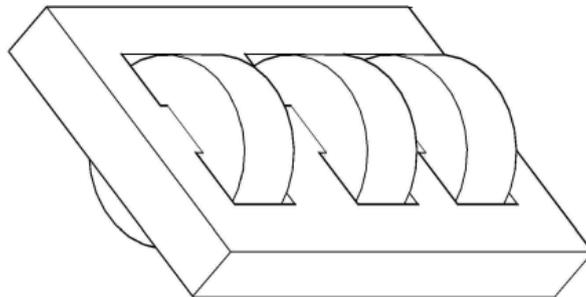


Figure IV-30 : Circuit magnétique type cuirassé

Type à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se renferme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique (figure II-3). Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé. Si le

déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à cinq colonnes, dont trois colonnes bobinées au centre et deux latérales non bobinées de section inférieure à celles bobinées, les colonnes non bobinées servent de chemin de retour des flux de fuite.

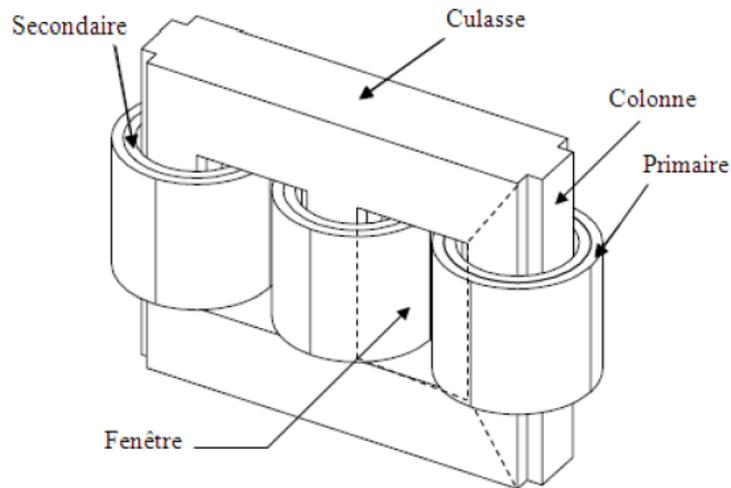


Figure IV-31 : Circuit magnétique type colonne

Circuit électrique

Pour les transformateurs de basse tension et de faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en file de cuivre émaillé, chaque couche étant isolée de la suivante par du papier. Pour les appareils à haute tension et grande puissance, les bobines, quelque fois fractionnées en galettes, sont constituées par du fil rond ou méplat isolé au carton imprégné et séparées par des isolants tels que fibre, mica,...

On distingue trois dispositions principales des bobines sur les noyaux :

Bobinage concentrique simple

Le bobinage basse tension est enroulé sur le noyau et après isolement est recouvert par le bobinage haute tension.

Bobinage concentrique double

La moitié du bobinage basse tension est enroulé sur le noyau et isolée, puis on enroule le bobinage haut tension et on isole et enfin, on termine par la deuxième moitié du bobinage basse tension. Autrement dit, le bobinage haut tension est en sandwich entre les deux moitiés basses tensions.

Bobinage à galette

Les bobinages hauts et bas sont fractionnés et constitués par des couronnes ou galettes qui sont enfilées alternativement sur les noyaux. Parfois pour les transformateurs à forte intensité, les bobinages sont calés à l'aide de ressorts permettant de légers déplacements dans le cas de fortes actions électrodynamiques.

En distribution, les transformateurs sont à bobinage concentrique simple.

La cuve

La constitution de la cuve du transformateur est liée aux calculs thermiques du transformateur. Elle a pour rôles de :

Réservoir d'huile

Assurer la résistance au court-circuit (pour les transformateurs Cuirassé uniquement). Maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuite produit par le courant dans les enroulements. Elle sert aussi à la protection de la partie active du transformateur. Elle est ajourée pour permettre la circulation naturelle de l'air autour du transformateur.

Pour les transformateurs dont la puissance dépasse 25kVA, la surface lisse de la cuve devient insuffisante pour évacuer les pertes dans les conditions normales d'échauffement; il faut alors prévoir une cuve de surface ondulée.

ANNEXE B : Codage en Matlab

Analyse en Composantes Principales (ACP)

```
%=====Analyse en Composantes Principales=====

x1=vonto;[nligne1 ncol1]=size(x1);moy1=mean(x1)';ect1=std(x1)';
vunit1=linspace(1,1,nligne1)';y1=x1-vunit1*moy1';ds1=diag(ect1)^-1;
z1=y1*ds1;v1=(z1'*z1)/nligne1;[f1 h1]=eig(v1);coord1=z1*f1;
[pc1, zscores1, pcvars1]=princomp(coord1);
cumsum(pcvars1./sum(pcvars1)*100)

f1=figure(1)
scatter(zscores1(:,1),zscores1(:,2));
xlabel('Premier Componente Principale ');
ylabel('Second Componente Principale ');
title('Composent Principal Scatter Plot')

f2=figure(2)
bar(pcvars1);xlabel('Dimension');
ylabel('Ecars types des composantes principales');
title('Graphe des composantes principales')
```

Apprentissage des réseaux de neurone

```
%=====Apprentissage ARN=====

x = input'; % input - input data.
t = target'; % target - target data.

trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt backpropagation.

% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = 12;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t);

% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)

% View the Network
view(net)
```

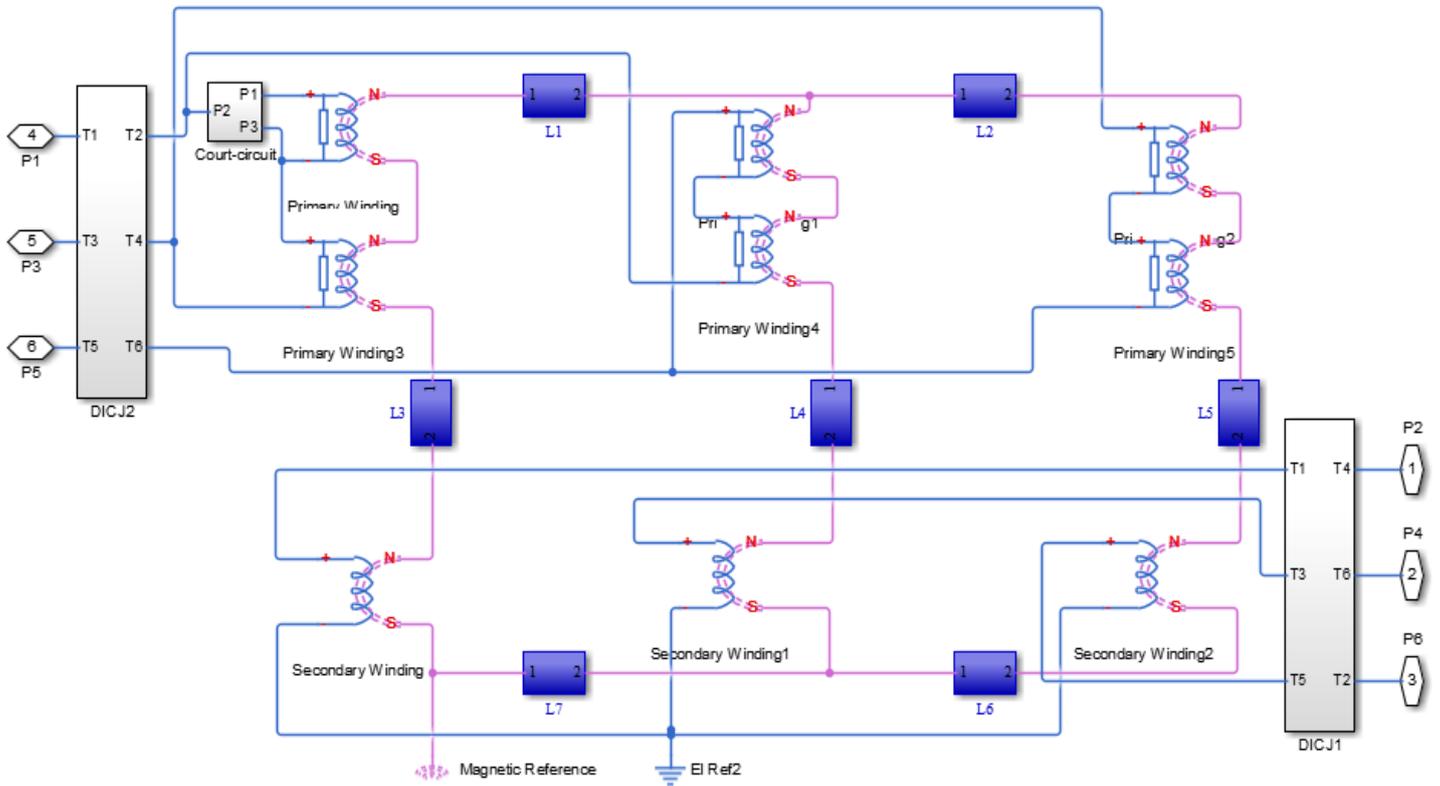
Transformer en Ondelette Continue (TOC)

```
%=====Analyse par Ondelette 2D=====

t = 0:0.001:4;
N=1024;
dt =1/(N-1);
s0 = 0.000104788*dt;
ds = 0.150;
NbSc = 160;
wname = 'morl';
SCA = {s0,ds,NbSc};
cwtSIG = cwtft({R,dt},'scales',SCA,'wavelet',wname);
MorletFourierFactor = 4*pi/(6+sqrt(2+6^2));
Scales = cwtSIG.scales.*MorletFourierFactor;
Freq = 1./Scales;
imagesc(t,[],abs(cwtSIG.cfs));
indices = get(gca,'ytick');
set(gca,'yticklabel',Freq(indices));
xlabel('Temps'); ylabel('Hz');
title('Analyse en Temps-Frequence avec TO');
```

ANNEXE C : Les circuits Simulink

Modèle de transformation en court-circuit entre spire de l'enroulement primaire de la première phase



Auteur : ANDRIATSIMINDRAMBOLA Nomenjanahary

Adresse : Lot 0 47 P 48 Mahazoarivo Sud

ANTSIRABE 110

Contact : +261 33 32 311 70

E-mail : njanaharytsimindr@gmail.com

Rapporteur : Professeur ANRIANAHARISON Yvon

Titre : Diagnostic des défauts de court-circuit dans les enroulements d'un transformateur connecte sur un réseau pollue

Nombre de pages : 61

Nombre de figures : 46

Résumé

Cet ouvrage consiste à la maintenance du réseau électrique à Madagascar. Il indique les étapes ou analyses à prendre pour la diagnostique d'un transformateur. Les études établies dans cet ouvrage peuvent servir de base pour l'amélioration de transport de l'énergie électrique à Madagascar. Elles présentent l'état de l'art sur la pollution de réseau, le transformateur de puissance avec les méthodes de détecté de leur défaut, modélisation de défaut de court-circuit entre spire et la simulation sous Matlab du système générateur, transformateur et charge. Néanmoins, elles nécessitent des données pratiques pour confirmer son fiabilité.

Mots-clés : Transformateur, court-circuit, Simulation, Matlab, Fréquence.

Abstract

This book consists of the maintenance of the electricity network in Madagascar. It indicates the steps or analyzes to be taken to detect the fault signature of a transformer within a short time. The studies established in this book can serve as a basis for improving the transport of electrical energy in Madagascar. They present the state of the art on the network pollution, the power transformer with the methods of detected of their defect, modelization of short-circuit fault between turn and the simulation under Matlab of the system generator, transformer and load. Nevertheless, they require practical data to confirm its reliability.

Keywords: Transformer, short circuit, Simulation, Matlab, Frequency.