

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique



N°d'ordre:M...../GE/2023

MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

**MASTER EN ELECTROTECHNIQUE**

**Spécialité : électrotechnique industrielle**

Présenté par :

- Belmerdja Baya
- Bendehiba Hind

**Intitulé du sujet :**

**Etude et maintenance des transformateurs de puissance**

Soutenu le : 26/06/2023

devant le jury composé de :

Président :	BENTOUMI MOHAMED	Grade MCB	Université de MOSTAGANEM
Examineur :	SOUAG SLIMANE	Grade MCB	Université de MOSTAGANEM
Encadrant :	GHOMRI LEILA	Grade MCA	Université de MOSTAGANEM

Année Universitaire 2022/2023

## Remerciements

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

*Travail.*

*Nous d'abord remercier Mme « **Ghomri Leila** », Professeur*

*Au département de génie électrique, d'avoir accepté la direction scientifique de ces travaux de recherche. On la exprimer toute notre gratitude pour son expérience, sa compétence multidisciplinaire, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines.*

*Sans oublier de remercier Monsieur « **MAKHLOUFI ABDELKADER** » et tous les membres de groupe industrielle SIDI BENDEHIBA (GISB) pour leurs aides.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du*

*Jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs*

*De notre mémoire.*

*Enfin, un grand merci à tous les enseignants du département Génie*

*Électrique qui ont participé à notre formation durant tout notre cycle universitaire ainsi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

**MERCI**

## Dédicaces

Je dédie ce travail :

- ❖ *A Mon père que j'ai perdu depuis 7 ans, je souhaite que tu sois avec moi ce jour. Mais il n'y a rien à faire, je veux que tu sois fier de moi ! J'ai fait de ton rêve une réalité.*

*Papa, ta main directrice sur mon épaule restera avec moi pour toujours. Repose en paix je t'aime mon héros et tu me manques beaucoup.*

- ❖ *A ma chère maman, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle Je n'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau .Que Dieu puisse la garder éternellement heureuse .Merci du fond du cœur.*
- ❖ *A mon encadrant Madame **GHOMRI LEILA** merci d'avoir accepté de me guider et de me motivé je suis fier de vous connaître j'aimerais être un bon professeur comme vous un jour*
- ❖ *A mes sœurs, mon frère, mes nièces et mon neveu **MOHAMED** merci d'avoir être à mes cotés dans mes jours durs et mauvais*
- ❖ *A ma binôme **BENDEHIBA HIND** qui été à mes cotés dans mes jours durs et fier d'avoir travaillé avec vous. je vous souhaite le bon courage*
- ❖ *A ma promotion **ELT\_ INDUSTRIELLE** merci pour tous je vous souhaite tout le meilleur et le bonheur. Aussi je veux que vous soyez tous dans votre meilleure version dans un futur proche.*
- ❖ *A mon cher frère et ami **BENKORICH MOHAMED** merci pour votre motivation votre efforts et votre conseils en or je vous souhaite que du bonheur Je veux que tous tes rêves deviennent réalité.*
- ❖ *A mes chères amies **Fatima, Amina, Lina, Maroua, Amina, Imene, Ikram, Khadidja, Yasmine et chahrazed***

*Je ne peux pas trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

**BAYA**

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

- *A mes très chers parents qui ont été toujours là pour moi, et qui ont Donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère Qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout Mon amour.*
- *A mes très chers frères **DJALLAL** et **ZOHIR***
  - *A ma très chère sœur **CHAIMA***
- *A mes chères amies et sœur **AICHA, HAFCA, AMINA***
  - *A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui*
    - *Je dois de l'amour et de la reconnaissance.*
- *A mes chers amis et chères amies pour tous les moments de joie et de Peine qu'on a passée ensemble.*
- *A ma collègue BAYA Merci pour être à mes côtés dans mes durs jours merci pour la motivation et tes conseils en or*

**HIND**

## Liste des symboles et abréviations :

**AI** : intelligence artificielle

**BT** : base tension

**CBM** : surveillance basée sur l'état (condition based maintenance)

**CEI** : Commission électrotechnique internationale

**CM** : condition maintenance

**DEF** : define (définie) :

**DF** : data frame

**DGPT** : détection gaz pression température

**HT** : haute tension

**MT** : moyenne tension

**STD** : standard

**TBCM** : time based condition maintenance

**TC** : transformateur de courant

## **Le résumé :**

Le transformateur de puissance est un constituant électrique haute tension important et essentiel au fonctionnement des réseaux électriques. Selon la Commission électrotechnique internationale, la définition est la suivante : un dispositif statique à deux enroulements ou plus, qui, par induction électromagnétique, convertit simultanément un système de tension et de courant alternatif en un autre système de tension et de courant, de fréquence généralement différente, pour le objet de Transport d'énergie électrique. [2]

Dans ce travaille, nous avons traité une étude générale sur le transformateur de puissance. On a présenté et indiquer comment protéger et maintenir les transformateurs. En parlons sur quelques méthodes de diagnostic pour détecter les différents défauts tels que l'analyse de gaz dissous dans l'huile, méthodes de mesures possibles, la protection différentielle, et application des méthodes intelligentes pour la détection des défauts

## **Mots clés :**

Transformateurs de puissance, réseaux électriques, maintenance, diagnostic, méthode intelligentes

**Abstract:**

The power transformer is an important and essential high voltage electrical component for the operation of electrical networks. According to the International Electro technical Commission, the definition is as follows: a static device with two or more windings, which, by electromagnetic induction, simultaneously converts one system of voltage and alternating current into another system of voltage and current, of frequency generally different, for the purpose of Transport of electrical energy. [2]

In this work, we have treated a general study on the power transformer. We presented and indicated how to protect and maintain the transformers. Let us talk about some diagnostic methods to detect different faults such as analysis of gases dissolved in oil, possible measurement methods, differential protection, and application of intelligent methods for fault detection

**Keywords:**

Power transformers, electrical network, stability, maintenance, diagnostic, intelligent methods

## الملخص:

يعد محول الطاقة مكونًا كهربائيًا مهمًا وضروريًا للجهد العالي لتشغيل الشبكات الكهربائية. وفقًا للجنة الكهرو تقنيّة الدولية، فإن التعريف هو: جهاز ثابت مع لفتين أو أكثر، والذي يقوم، عن طريق الحث الكهرومغناطيسي، بتحويل نظام واحد للجهد والتيار المتردد إلى نظام آخر للجهد والتيار، وعادة ما يكون تردد مختلف، من أجل الغرض من نقل الطاقة الكهربائية. [2] في هذا العمل، قمنا بمعالجة دراسة عامة عن محول الطاقة. قدمنا وأوضحنا كيفية حماية المحولات وصيانتها. لتحدث عن بعض طرق التشخيص لاكتشاف العيوب المختلفة مثل تحليل الغازات الذائبة في الزيت، وطرق القياس الممكنة، والحماية التفاضلية، وتطبيق الأساليب الذكية لاكتشاف الأعطال.

## الكلمات المفتاحية:

محولات الطاقة، الصيانة، التشخيص، الأعطال، الأساليب الذكية

# *Sommaire*

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>I.1.Introduction</b> : .....	4
<b>I.2. Définition de transformateur de puissance</b> : .....	4
<b>I.3 constitution générale du transformateur</b> :.....	5
<b>I3.1 circuit magnétique</b> :.....	6
<b>I3.2.circuit électrique</b> : .....	8
<b>I3.3. La cuve</b> :.....	8
<b>I.4. Principe de fonctionnement</b> : .....	9
<b>I.5 couplage- rapport de transformation- indice horaire</b> : .....	10
<b>I.5.1. le couplage</b> : .....	10
<b>I.5.2 indice horaire h</b> : .....	11
<b>I.5.3 rapport de transformation</b> :.....	12
<b>I.6 Les pertes dans le transformateur triphasé</b> :.....	12
<b>I.6.1. les pertes électrique</b> : .....	12
<b>I.6.2 Les pertes fer</b> :.....	12
<b>I.6.3 les Pertes par hystérésis</b> : .....	12
<b>I.6.4 Les Perte par courant de Foucault</b> :.....	12
<b>I.7.schéma électrique équivalent</b> :.....	13
<b>I.8. les différents essais d'un transformateur triphasé</b> : .....	13
<b>I.8.1 essai à circuit secondaire ouvert (Essai à vide)</b> : .....	13
<b>I.8.2. Essai en court-circuit</b> :.....	14
<b>I.9.Bilan de puissance</b> :.....	16
<b>I.9.1.le rendement</b> :.....	17
<b>I.9.2 : la chute de tension</b> : .....	17
<b>I.10.Marche en parallèle des transformateurs de puissance</b> : .....	18
<b>I.11. La plaque signalétique</b> : .....	18
<b>I.12. Utilisations des transformateurs de puissance</b> :.....	20
<b>I.13. les différents types d'un transformateur de puissance</b> :.....	20
<b>I.13.1 transformateur sec</b> :.....	21
<b>I.13.2 Transformateur immergés</b> :.....	22
<b>I.14.L'isolation d'un transformateur de puissance</b> :.....	23
<b>I.14.1 isolation cellulosique</b> :.....	23
<b>I.14.2 isolation liquide</b> : .....	23
<b>I.15. Echauffement et refroidissement des transformateurs</b> :.....	23
<b>I.15.1 L'échauffement</b> : .....	23

<b>I.15.2 refroidissement :</b> .....	24
<b>I.16. protection et surveillance de transformateur de puissance :</b> .....	24
<b>I.16.1différents types de protections :</b> .....	24
<b>I.17. conclusion :</b> .....	28
<b>II.1. Introduction :</b> .....	30
<b>II.2.la définition de la maintenance :</b> .....	30
<b>I.3. l'objectif de maintenance :</b> .....	30
<b>II.4 l'importance de la maintenance :</b> .....	30
<b>II.5. stratégies de maintenance des transformateurs :</b> .....	31
<b>II.6. quelques types de défauts :</b> .....	33
<b>II.6.1. composants du transformateur et leurs défauts détectables :</b> .....	33
<b>II.6.2 amorçage diélectrique entre spire :</b> .....	34
<b>II.6.3. court-circuit entre spires :</b> .....	34
<b>II.6.4. coupure du circuit électrique :</b> .....	34
<b>II.6.5.déformation géométrique des enroulements :</b> .....	35
<b>II.7. les différents types de maintenance :</b> .....	36
<b>II.7.1 la maintenance corrective :</b> .....	36
<b>II.7.2. la maintenance préventive :</b> .....	37
<b>II.8. les opérations de la maintenance :</b> .....	38
<b>II.8.1. les opérations de la maintenance préventive :</b> .....	38
<b>II.8.2.les opérations de la maintenance corrective :</b> .....	39
<b>II.8.3 les niveaux de maintenance :</b> .....	39
<b>II.9. mise en œuvre de la maintenance des transformateurs :</b> .....	39
<b>II.9.1 maintenance des composants externes du transformateur :</b> .....	40
<b>II.9.2. maintenance des composants internes du transformateur :</b> .....	41
<b>II.10. conclusion :</b> .....	43
<b>III.1.introduction :</b> .....	45
<b>III.2. Présentation du processus de diagnostic :</b> .....	45
<b>III.3. Technique de diagnostic de transformateur de puissance :</b> .....	47
<b>III.3.1. Analyse des gaz dissous dans l'huile :</b> .....	47
<b>III.3.2. Méthodes de mesures possibles :</b> .....	50
<b>III.4. Conclusion :</b> .....	52
<b>IV.1 : introduction :</b> .....	54
<b>IV.2.composants du système :</b> .....	54
<b>IV.3. La simulation :</b> .....	56
<b>IV.4. l'utilisation des méthodes intelligentes pour le diagnostic des défauts :</b> .....	61

<b>IV.5. Analyses des données à l'aide de python :</b> .....	61
<b>IV.5.1. Définition de logiciel PYTHON :</b> .....	61
<b>IV.5.2. la relation entre Python et data science :</b> .....	61
<b>IV.6 l'application :</b> .....	61
<b>IV.7. conclusion :</b> .....	67
<b>Conclusion générale</b> .....	70
<b>Bibliographie</b> .....	73

# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1: Essai à vide [5] .....</b>	<b>14</b>
<b>Tableau I.2: essai en court- circuit [5].....</b>	<b>15</b>
<b>Tableau I.3: expressions des puissances en triphasé.....</b>	<b>16</b>
<b>Tableau I.4: groupes de transformateur avec indice horaire compatible.....</b>	<b>18</b>
<b>Tableau II.1 : Actions de maintenance sur les composantes externes d'un transformateur et leur périodicité .....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau II.2:Analyses d'huile de transformateurs et leur périodicité .....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau III.1Les gaz pour le diagnostic .....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau III.2:Code de Rogers .....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau III.3:Interprétation de Rogers .....</b>	<b>50</b>

# Liste des figures

<i>Figure I.1: Transformateur de puissance à la sortie d'une centrale électrique [2]</i> .....	4
<i>Figure I.2: transformateur à cuve à radiateur [3]</i> .....	5
<i>Figure I.3: Circuit magnétique</i> .....	6
<i>Figure I.4: Transformateur cuirassé</i> .....	7
<i>Figure I.5: transformateur à colonnes à flux forcé</i> .....	7
<i>Figure I.6: La cuve d'un transformateur de puissance</i> .....	9
<i>Figure I.7: couplage de primaire</i> .....	10
<i>Figure I.8: Couplage du secondaire</i> .....	11
<i>Figure I.9: Schéma électrique équivalent</i> .....	13
<i>Figure I.10: Schéma du bilan de puissance d'un transformateur.</i> .....	16
<i>Figure I.11: La Plaque signalétique</i> .....	19
<i>Figure I.12: emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique</i> .....	20
<i>Figure I.13: transformateur sec imprégnés</i> .....	21
<i>Figure I.14: transformateur sec enrobés</i> .....	21
<i>Figure I.15: Transformateur immergés hermétiques</i> .....	22
<i>Figure I.16: Transformateur immergés respirant</i> .....	22
<i>Figure I.17: relais BUCHHOLZ [6]</i> .....	24
<i>Figure I.18: protection masse cuve [6]</i> .....	25
<i>Figure I.19: dispositif DGPT</i> .....	26
<i>Figure I.20: l'éclateur</i> .....	27
<i>Figure I.21: Parafoudre</i> .....	27
<i>Figure II.1: Opérations et cycle de maintenance du transformateur [8]</i> .....	32
<i>Figure II.2: Composant du transformateur et leurs défauts détectables</i> .....	33
<i>Figure II.3: amorçage diélectrique entre spire</i> .....	34
<i>Figure II.4: Court-circuit entre spires</i> .....	34
<i>Figure II.5: Coupure du circuit électrique</i> .....	35
<i>Figure II.6: Déformation géométrique des enroulements</i> .....	35
<i>Figure II.7: Les différents types de maintenance</i> .....	36
<i>Figure II.8: la maintenance corrective</i> .....	37
<i>Figure II.9: la maintenance préventive</i> .....	38
<i>Figure III.1: Principe général du processus de diagnostic</i> .....	46
<i>Figure IV.1 :Modèle Simulink d'un transformateur triphasée Avec la protection différentielle</i> .....	55
<i>Figure IV.2: relais différentiel sous Matlab Simulink</i> .....	55
<i>Figure IV.3: Courant Primaire sans défaut</i> .....	56
<b>Figure IV.4: courant secondaire sans défaut</b> .....	<b>56</b>
<b>Figure IV.5: Tension primaire avec défaut externe</b> .....	<b>57</b>
<b>Figure IV.6: Tension secondaire avec défaut externe</b> .....	<b>57</b>
<b>Figure IV.7: courant primaire avec défaut externe</b> .....	<b>58</b>
<b>Figure IV.8: Courant secondaire avec défaut externe (dans les trois phases)</b> .....	<b>58</b>
<b>Figure IV.9: Le signal de sortie d'un relais</b> .....	<b>59</b>
<b>Figure IV.10: Courant primaire pour chaque phase</b> .....	<b>59</b>
<b>Figure IV.11: Courant primaire pour chaque phase</b> .....	<b>60</b>
<b>Figure IV.12: Signal de sortie de relais dans un défaut interne</b> .....	<b>60</b>

<b>Figure IV.13: Dans un fonctionnement normal.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV.14: Données traité dans le fonctionnement normal .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.15: fonctionnement avec défaut.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.16: Données traité lors d'un défaut.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.17: schémas de transformateurs de puissance sous Matlab Simulink.....</b>	<b>63</b>

# *Introduction générale*

### *Introduction générale*

Les transformateurs de puissance sont des équipements coûteux qui sont essentiels à la bonne marche des réseaux électriques. Ils jouent un rôle important dans le transport et la distribution de l'électricité. Or, même s'ils sont fiables, des pannes peuvent survenir. Au fil des ans, les techniques d'évaluation de l'état des transformateurs ont considérablement évolué. Aujourd'hui, le vieillissement des transformateurs en service et la demande croissante d'électricité constituent les principaux moteurs d'avancement des techniques d'évaluation de l'état des transformateurs [1]

Pour assurer la fiabilité du système électrique, les ingénieurs doivent déterminer l'état des transformateurs en fonctionnement et prendre des décisions concernant leur fonctionnement, leur protection, leur maintenance, leur réparation ou leur remplacement. C'est ce qu'on appelle le diagnostic du transformateur.

Ce dernier consiste à détecter une modification anormale du comportement ou de l'état d'un système et à en déterminer la cause. Les systèmes de diagnostic peuvent être effectués pendant le fonctionnement ou pendant les phases normales d'arrêt. En exploitation, l'objectif est d'assurer l'intégrité et la continuité du service et d'enregistrer les événements utiles à la maintenance corrective ou au retour d'expérience. Lors d'un arrêt, l'objectif est d'évaluer le degré d'obsolescence de certains éléments, de décider d'un processus de maintenance préventive ou curative

La stratégie de maintenance des outils de production doit être cohérente avec la politique de gestion de la production. Il est clair que la gestion de la production joue un rôle important pour assurer la satisfaction du client dans les délais. En effet, un bon réglage de la cadence de production permet de répondre au mieux aux demandes du client.

L'intelligence artificielle ouvre d'énormes opportunités pour l'industrie. Il rend la production plus efficace, flexible et fiable que jamais. Avec la numérisation croissante de l'industrie, l'entreprise numérique est devenue une réalité. Les données sont générées, traitées et analysées en continu.

L'étude faite dans ce travail de fin d'étude est basée sur la protection et la maintenance pour la localisation et le diagnostic des différents défauts de transformateurs de puissance mais pour achever et normaliser le progrès de diagnostic. Ce travail est élaboré de quatre chapitres :

## Introduction Générale

---

Dans le chapitre I, nous allons étudier des généralités sur les transformateurs de puissances et ces principes de fonctionnements ainsi les différents composants de cette machine.

Dans le chapitre II, nous présentons les généralités de la maintenance en indiquant ses différents types et ses stratégies.

Dans le chapitre III, nous abordons les différents types de défauts de transformateurs de puissances ainsi savoir connaître les méthodes de diagnostics.

Dans le chapitre IV. Nous avons étudié la protection différentielle de transformateur en faisant une simulation dans les trois modes de fonctionnement tels que fonctionnement normal ; fonctionnement avec défaut externe ; et un fonctionnement avec un défaut interne et aussi nous allons appliquer des méthodes intelligentes pour le diagnostic des transformateurs de puissance

En fin de compte ; nous mettons un point final avec une conclusion générale.

*Chapitre 01 :*  
*Etude des transformateurs*  
*triphases*

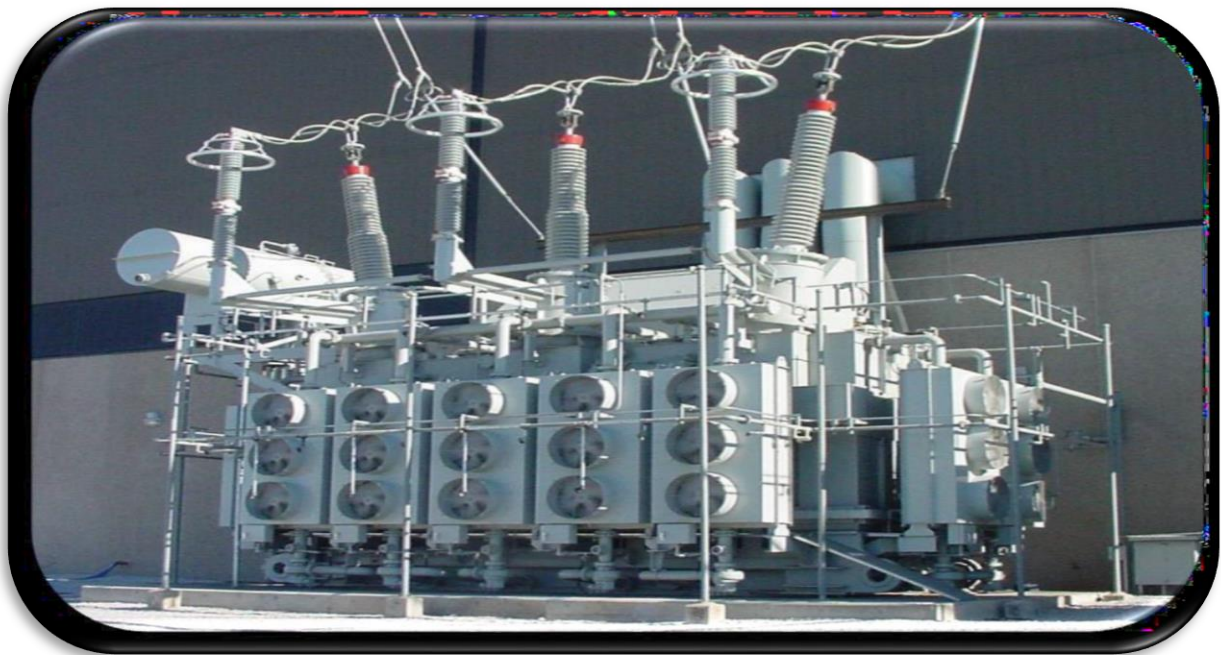
## I.1.Introduction :

la modélisation des transformateurs de puissance triphasée, a traditionnellement un grand intérêt depuis de nombreuses années, et en raison de leur importance dans les systèmes électriques, un grand intérêt pour l'études de ces derniers a permis le développements significatifs dans le domaine de la conversion, de la transmission et la distribution de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre on va étudier les transformateur de puissance triphasée tels que la constitution, le principe de fonctionnement, types de transformateurs, les différents types de couplage ainsi que l'indice horaire et le bilan de puissance...

## I.2. Définition de transformateur de puissance :

Le transformateur de puissance est un appareil fixe à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs différentes en gardent la même fréquence tout ça dans le but de transmettre de la puissance électrique « norme (IEC 60076-1, 2000) [2]



**Figure I.1:** Transformateur de puissance à la sortie d'une centrale électrique [2]

## I.3 constitution générale du transformateur :

Le transformateur de puissance se compose essentiellement d'un circuit magnétique et un circuit électrique. [3]

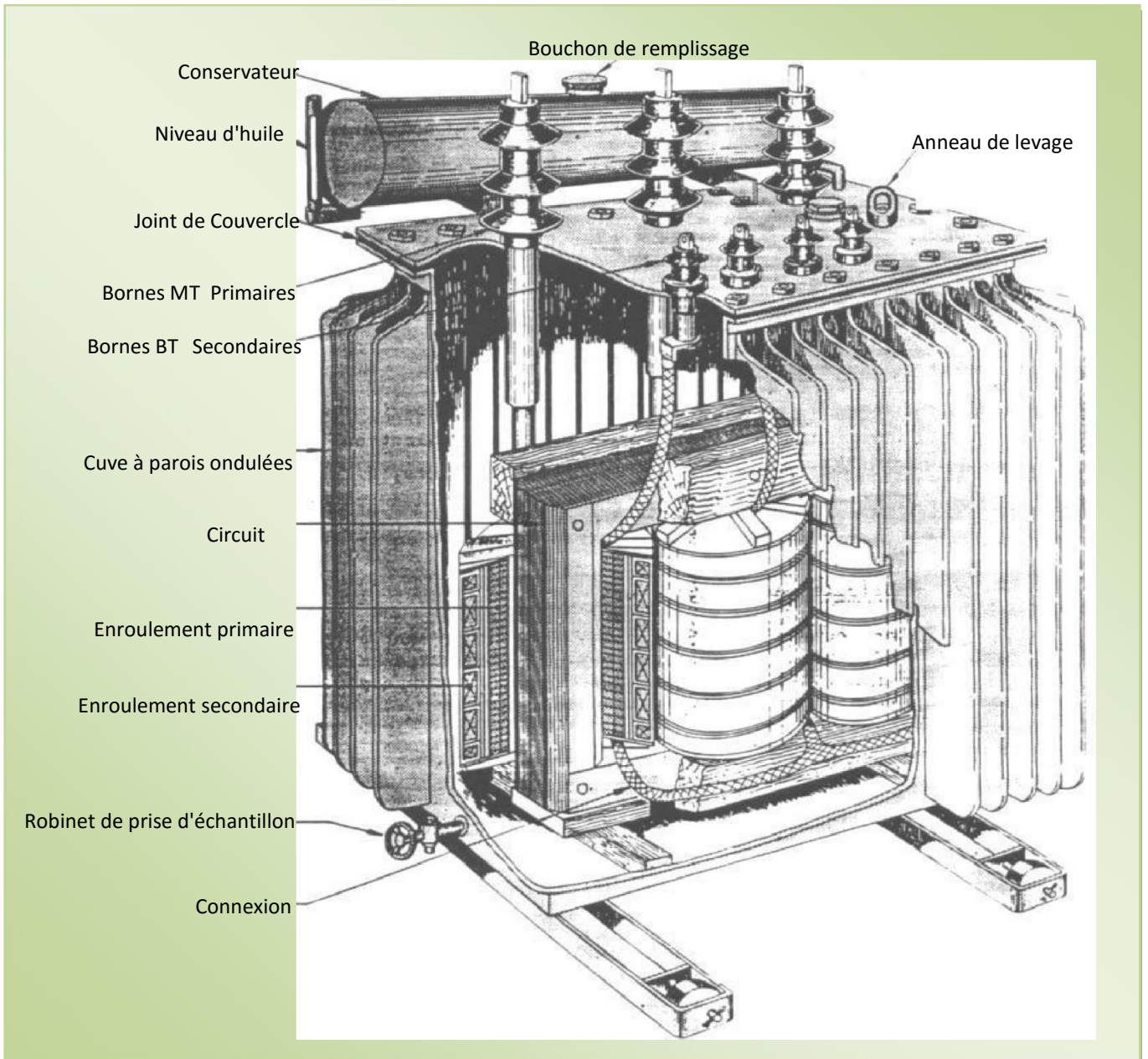
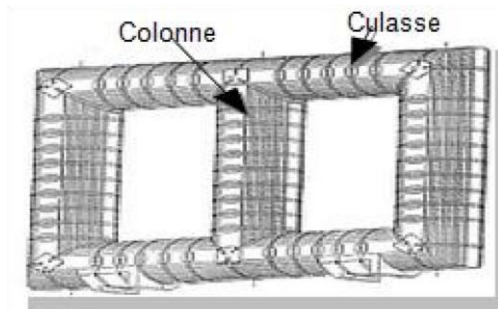


Figure I.2: transformateur à cuve à radiateur [3]

## I3.1 circuit magnétique :

Le noyau est constitué d'un empilement de feuilles ferromagnétiques à haute perméabilité à cristaux orientés, isolées électriquement les unes des autres. Il doit être Conçu de manière à réduire les pertes dues aux courants de Foucault et à l'hystérésis qui se produisent lors de variations du flux magnétiques. Ce problème peut être résolu en prenant des mesures à savoir :

- Acier magnétique doux avec petite zone de boucle d'hystérésis et faible perte d'hystérésis
- Utiliser de l'acier spécial à haute résistivité électrique

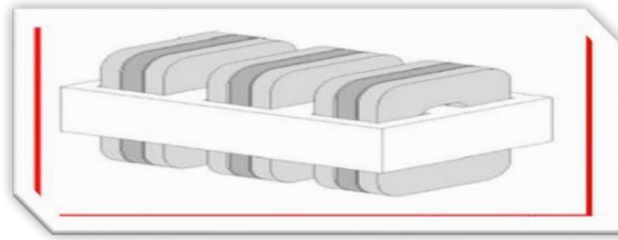


**Figure I.3:** Circuit magnétique

On distingue deux dispositions principales suivant la forme du circuit magnétique qui sont :

### I3.1.1. Type cuirassé :

Pour ce type de transformateur, le 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. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés à fin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages [3]



**Figure I.4: Transformateur cuirassé**

### I3.1.2. Type colonnes :

Cette technologie est constituée de bobinages de forme cylindrique qui entourent les noyaux du circuit magnétique.

Les enroulements haute tension et basse tension sont imbriqués l'un dans l'autre. Ces derniers 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 les 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. [2]



**Figure I.5: transformateur à colonnes à flux forcé**

## **I3.2.circuit électrique :**

Pour les transformateurs de basse tension et faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en file de cuivre émaillé, chaque couche sera isolée de la suivante par le papier. D'autre part 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 la fibre....etc. [3]

On a trois dispositions principales des bobines sur les noyaux :

### **I.3.2.1 bobinage concentrique simple :**

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

### **I.3.2.2 bobinage concentrique double :**

La moitié du bobinage basse tension est enroulée 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.

### **I.3.2.3. 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.

## **I3.3. La cuve :**

La constitution de la cuve du transformateur est liée aux calculs thermiques du transformateur elle a pour le but 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 à la protection de la partie active du transformateur. Elle est ajourée pour permettre la circulation naturelle de l'air autour du transformateur. [3]



**Figure I.6:** La cuve d'un transformateur de puissance

### I.4. Principe de fonctionnement :

Un transformateur à deux enroulements, l'un appelé primaire, qui reçoit une puissance active de la source, l'autre s'appelle le secondaire, restitue la même puissance de charge.

Les bobinages sont montés sur un seul circuit magnétique. Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est inférieure à celle fournie par le secondaire, le transformateur fonctionnera en élévateur, sinon il fonctionnera en abaisseur.

Les transformateurs triphasés utilisent l'effet d'induction magnétique. Ses deux enroulements ont un flux magnétique commun. L'enroulement primaire, alimenté par une source alternative, engendre un flux dans le circuit magnétique.

L'enroulement secondaire contient ce flux et c'est là que se trouve la f.é.m. induite cela va induire un courant alternatif dans celui-ci qui va alimenter le récepteur de puissance connecté à ses bornes. Le flux principal  $\Phi$  génère une force électromotrice dans le bobinage :

$$e_1 = -n_1 \left( \frac{d\Phi}{dt} \right) \quad [I.1]$$

$$e_2 = -n_2 \left( \frac{d\Phi}{dt} \right) \quad [I.2]$$

$n_1$  et  $n_2$  sont respectivement le nombre de spires primaire et secondaire

# Chapitre I : étude des transformateurs triphasés

## Remarque :

- De par son principe, le transformateur ne peut pas fonctionner en régime de tension continue puisque les f.é.m. dans les bobinages sont induites par les variations du flux

Le transformateur est réversible ; chaque bobinage peut jouer le rôle du primaire ou du secondaire

## I.5 couplage- rapport de transformation- indice horaire : [4]

### I.5.1. le couplage :

Les enroulements primaires et secondaires sont couplés en étoile, en triangle ou en Zigzag

Si on indique par Y, D et Z les couplages respectivement en étoile, en triangle et en zigzag des enroulements primaires

Par y, d et z les couplages respectivement en étoile, triangle, zigzag des enroulements secondaires

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

Y-y : étoile –étoile

Y-d : étoile- triangle

Y-z : étoile- zigzag

D-y : triangle – étoile

D-d : triangle-triangle

D-z : triangle-zigzag

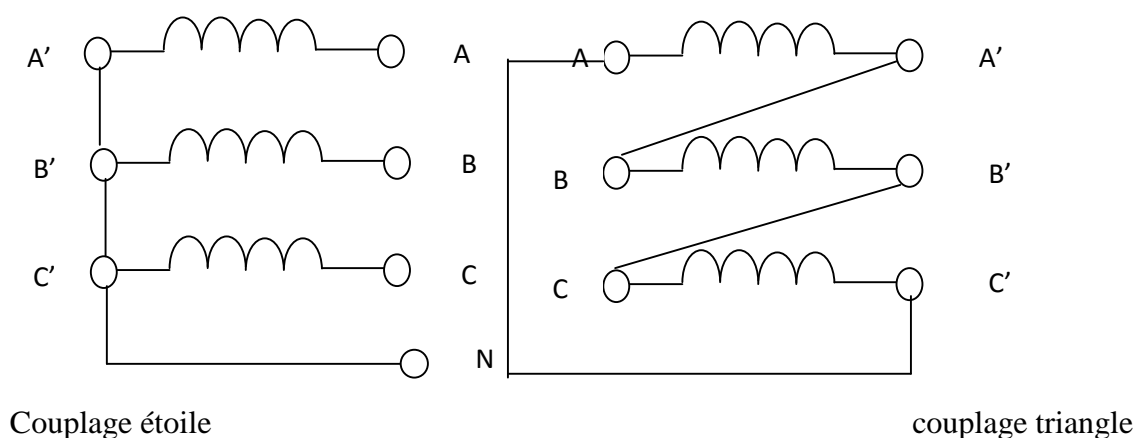
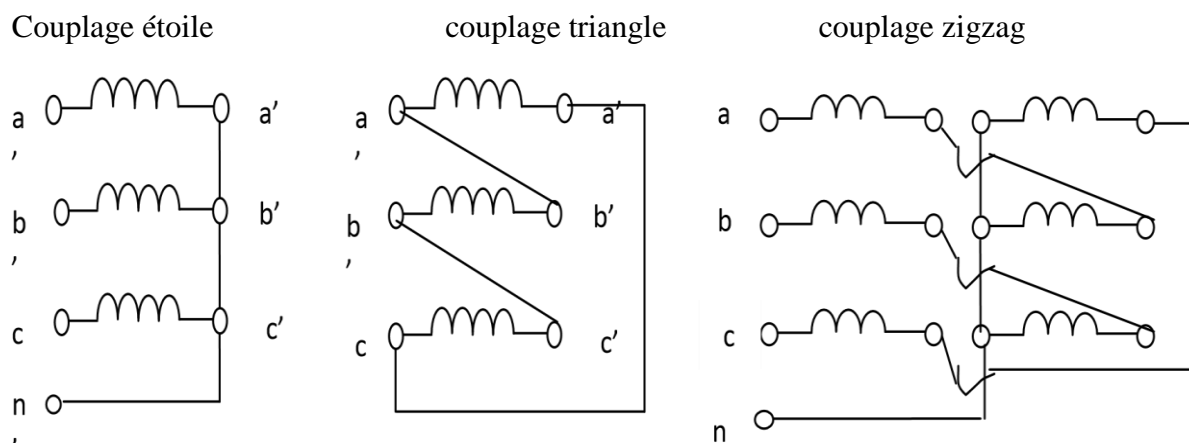


Figure I.7: couplage de primaire



**Figure I.8:** Couplage du secondaire

- Les couplages les plus utilisés sont :
  - Couplage Dy11 il est considéré comme élévateur de tension à la sortie des centrales électrique.
  - Le couplage Yy0 utilisé comme abaisseur de tension en le réseau HT-B et un réseau HT-A

## I.5.2 indice horaire h :

L'indice horaire est le déphasage entre une tension primaire et une autre au secondaire (bornes homologue)

C'est un nombre entier compris entre 0 et 11 défini par le rapport suivant

$$h = \frac{\theta}{30^\circ}$$

H : dépend du mode de couplage, du sens d'enroulement des bobinages, de la permutation des tensions d'alimentation.

On peut déterminer  $\theta$  :

- Soit à partir du schéma des connections
- Soit pratiquement par des essais

## I.5.3 rapport de transformation :

Par définition, le rapport de transformation  $m$  est donné par :

$$\mathbf{m} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad [\mathbf{I}, \mathbf{3}]$$

Le rapport de transformation triphasé dépend de  $N_1$  et  $N_2$  les nombres de spires au primaire et au secondaire et du couplage.

## I.6 Les pertes dans le transformateur triphasé :

### I.6.1. les pertes électrique :

Ces derniers sont des pertes par effet joule, elles dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse.

### I.6.2 Les pertes fer :

Ces derniers comportent les pertes par hystérésis et par courant de Foucault. Elles dépendent de la fréquence et de l'induction maximale.

### I.6.3 les Pertes par hystérésis :

Elle s'explique par un retard de l'induction sur le champ magnétique appliqué du circuit magnétique. Ce retard obtient une perte d'énergie sous forme de chaleur.

### I.6.4 Les Perte par courant de Foucault :

Ils produisent par effet joule sous forme de chaleur au sein du circuit magnétique. Pour les réduire on empile les tôles et puis on isole entre elle.

## I.7. schéma électrique équivalent : [2]

En compte des différentes pertes, le schéma monophasé équivalent ramené au secondaire d'un transformateur triphasé :

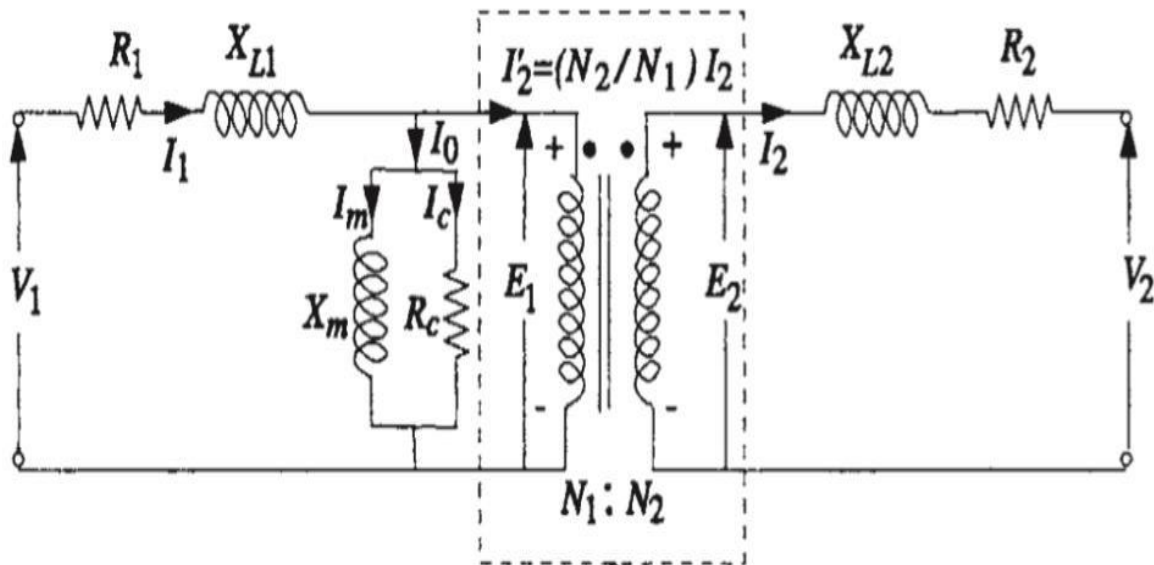


Figure I.9: Schéma électrique équivalent

## I.8. les différents essais d'un transformateur triphasé : [5]

### I.8.1 essai à circuit secondaire ouvert (Essai à vide) :

Il n'a pas de charge branché au secondaire, l'intensité  $I_2=0$

On règle  $U_{10}$  à sa valeur nominale

On mesure ;  $U_{20}$ ,  $I_{10}$ ,  $P_{10}$

Et calculé :  $m$ ,  $\cos(\phi_{10})$ ,  $R_p$

Ce dernier permet de déterminer les pertes magnétiques  $P_{fer}=P_{10}$  car les pertes joule primaire à vide sont négligeable

## Chapitre I : étude des transformateurs triphasés

	Cas monophasé	Cas triphasé
<b>Circuit de teste</b>		
<b>Facteur de puissance</b>	$\cos(\varphi) = \frac{P0}{V0 I0}$	$\cos(\varphi) = \frac{P0}{\sqrt{3} V0 I0}$
<b>Résistance shunt</b>	$\frac{1}{Rf} = \frac{I0}{V0} \cos(\varphi)$	$\frac{1}{Rf} = \frac{I0 - phase}{V0 - phase} \cos(\varphi)$
<b>Réactance shunt</b>	$\frac{1}{Xm} = \frac{I0}{V0} \sin(\varphi)$	$\frac{1}{Xm} = \frac{I0 - phase}{V0 - phase} \sin(\varphi)$

**Tableau I.1:** Essai à vide [5]

### I.8.2. Essai en court-circuit :

Dans cet essai on :

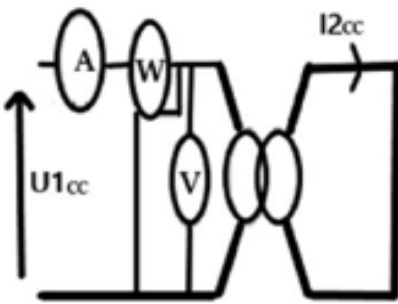
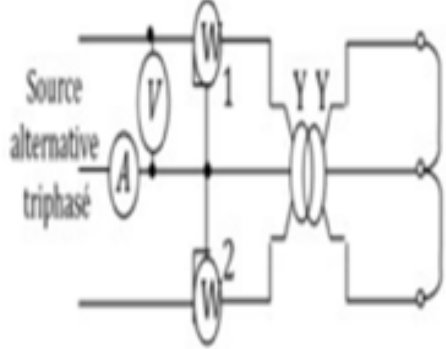
Règle :  $I_{2cc}$  à sa valeur nominale

On mesure ;  $U_{2cc}$ ,  $I_{1cc}$ ,  $P_{1cc}$

On calcule :  $Z_s$ ,  $R_s$ ,  $X_s$

L'essai en court-circuit permet de calculer la résistance totale  $R_s$  ramenée dans chaque phase au secondaire

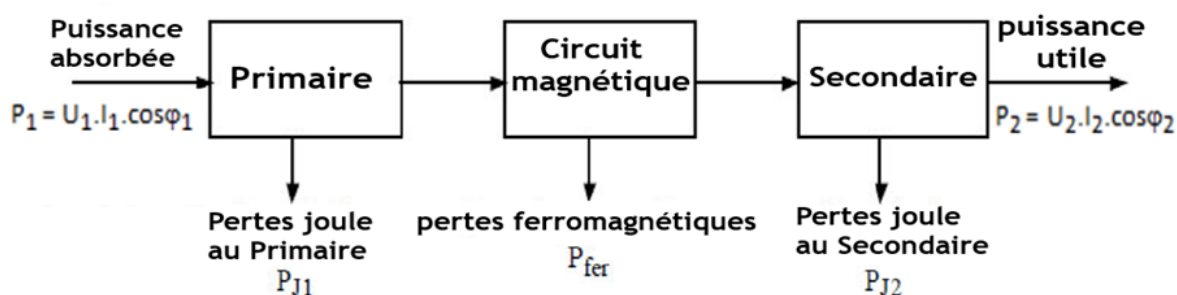
## Chapitre I : étude des transformateurs triphasés

	Cas monophasé	Cas triphasé
<b>Circuit de teste</b>		
<b>Facteur de puissance</b>	$\cos(\varphi) = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{cc}}$	$\cos(\varphi) = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} I_{cc}}$
<b>L'impédance Equivalente</b>	$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \cos(\varphi)$	$Z_{eq} = \frac{I_{cc} - \text{phase}}{V_{cc} - \text{phase}} \cos(\varphi)$ $R_{eq} = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2}$
<b>Réactance Série</b>	$X_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \sin(\varphi)$	$X_{eq} = \sqrt{Z^2_{eq} - R^2_{eq}}$

**Tableau I.2:** essai en court- circuit [5]

## I.9. Bilan de puissance : [5]

Le bilan de puissance nous permet d'indiquer les différentes puissances, les pertes, et le facteur de puissance



**Figure I.10:** Schéma du bilan de puissance d'un transformateur.

On distingue les expressions de puissance en triphasée :

	<b>Expressions en triphasée</b>
<b>Puissance active P(W)</b>	$P=3 \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi$
<b>Puissance réactive Q(Var)</b>	$Q=3 \cdot V \cdot I \cdot \sin\phi$
<b>Puissance apparente S(VA)</b>	$S=3 \cdot V \cdot I$ $S=\sqrt{P^2 + Q^2}$
<b>Facteur de puissance</b>	$\cos\phi = \frac{P}{S}$

**Tableau I.3:** expressions des puissances en triphasé

## Chapitre I : étude des transformateurs triphasés

---

### I.9.1. le rendement :

On dit que le rendement d'un transformateur est le rapport entre la puissance fournie (obtenue) au secondaire et la puissance absorbée au primaire il est défini par :

$$\eta = \frac{Pu}{Pu + Pertes} \quad \text{En (\%)} \quad [I, 4]$$

Avec :  $Pu = \sqrt{3} U_s \cdot I_s \cdot \cos(\varphi_s)$  [I, 5]

Pertes : perte fer + perte joule

Donc :

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_s}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_s + P_{10} + 3 R_s \cdot I_s^2} \quad [I, 6]$$

### I.9.2 : la chute de tension :

C'est la variation de la tension au secondaire en vide et en charge. Elle est fonction de l'importance de la charge et le facteur de puissance. Si on a une charge capacitive la chute de tension peut devenir négative

$$\Delta = U_{20} - U_2 \quad [I, 7]$$

$$\Delta = R_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad [I, 8]$$

Avec :  $U_{20}$  : tension secondaire à vide

$U_2$  : tension secondaire en charge

### I.10. Marche en parallèle des transformateurs de puissance :

Dans le but des raisons économiques et technique il peut être parfois intéressant de brancher plusieurs transformateurs en parallèle plutôt qu'un seul de plus forte puissance mais en prend en considération quelques conditions :

- Les transformateurs doivent être alimentés par même tension primaire
- Avoir même rapport de transformation
- Avoir le même indice horaire ou l'indice compatible

On peut définir quatre groupes de transformateurs qu'ils ont un indice horaire compatible :

Groupe	L'indice horaire
<b>1</b>	0/4/8
<b>2</b>	2/6/10
<b>3</b>	1/5
<b>4</b>	7/11

**Tableau I.4:** groupes de transformateur avec indice horaire compatible

### I.11. La plaque signalétique :

La plaque signalétique permet d'indiquer les caractéristiques et les branchements du transformateurs plus précisément les valeurs de la puissance, des tensions (primaire et secondaires), la fréquence utilisé, les courants et les couplages des enroulements ainsi que la tension de court-circuit en %

L'indication de couplage des enroulements nous permet d'effectuer le branchement en cas de mise en parallèle de plusieurs transformateurs.

# Chapitre I : étude des transformateurs triphasés

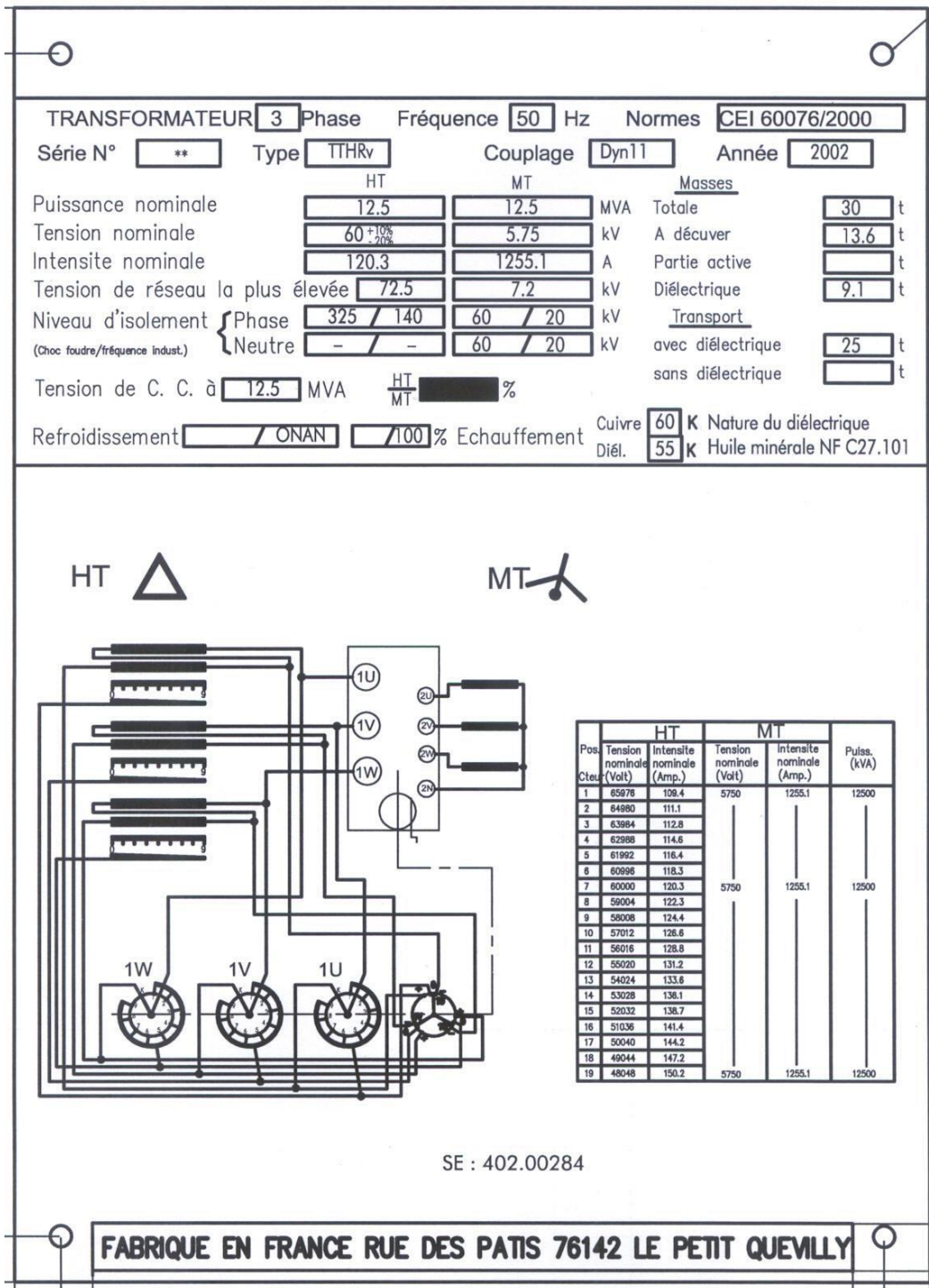


Figure I.11: La Plaque signalétique

## I.12. Utilisations des transformateurs de puissance :

Les transformateurs de puissance sont utilisés dans les réseaux de transmissions à haute tension. Ils sont conçus pour une efficacité maximale de 100%, ils sont plus gros que les transformateurs de distribution

Ils sont installés dans :

- Les centrales électriques
- Les postes d'interconnexion
- Sur les poteaux
- Dans l'transport d'énergie électrique
- Il assure l'isolation entre deux réseaux électriques (isolation galvanique entre deux réseaux électrique)

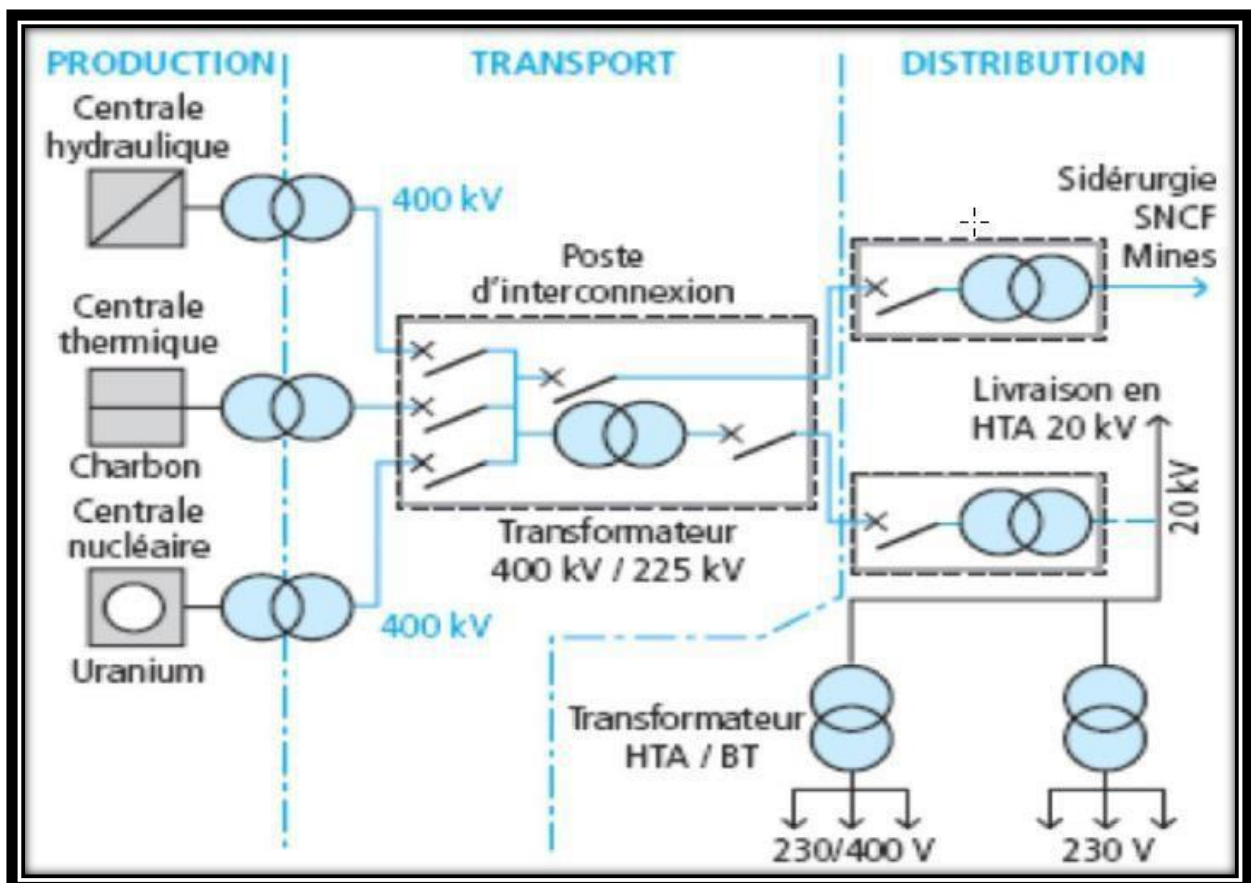


Figure I.12: emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique

## I.13. les différents types d'un transformateur de puissance :

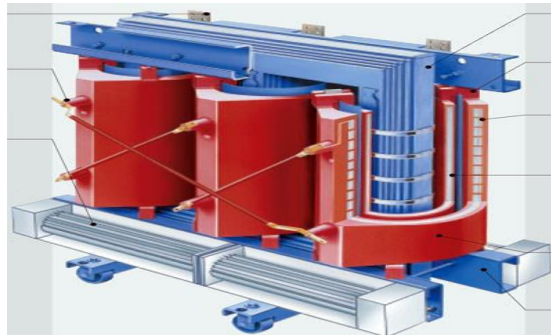
### I.13.1 transformateur sec :

Dans le transformateur sec les noyaux et les enroulements sont dans un milieu isolant fait d'un composé gazeux ou sec

Il existe deux types de ce dernier :

#### I.13.1.1 transformateur sec imprégnés :

Il est destinés à installés dans un local sec et ventilé



**Figure I.13:** transformateur sec imprégnés

#### I.13.1.2 transformateur sec enrobés :

Ce dernier permet de transformer le niveau de tension HTA du réseau de distribution en basse tension



**Figure I.14:** transformateur sec enrobés

## I.13.2 Transformateur immergés :

Ce types il est utilisés pour :

- ❖ Les postes non surveillés car ils ne nécessitent par un entretien
- ❖ Les ambiances sévères si le revêtement de la cuve es adapté
- ❖ Il a une meilleure efficacité énergétique ainsi que une longue durée de vie
- ❖ Ils sont utilisés dans les installations extérieures en raison des possibilités de fuites d'huile avec un risque d'incendie élevé.
- ❖ Il est principalement de la porcelaine

On distingue deux types de ce dernier :

### I.13.2.1 : Transformateur immergés hermétiques :



**Figure I.15:** Transformateur immergés hermétiques

### I.13.2.2 transformateur immergés respirant :



**Figure I.16:** Transformateur immergés respirant

## **I.14.L'isolation d'un transformateur de puissance :**

La partie active d'un transformateur contient deux types d'isolation :

### **I.14.1 isolation cellulosique :**

Les isolants solides tels que le papier, les cylindres isolants compressés et le carton sont constitués des matériaux cellulosiques et représentent le meilleur compromis technique et économique pour l'isolation des systèmes imprégnés dans les transformateurs de puissance.

### **I.14.2 isolation liquide :**

L'huile de transformateur est généralement une huile minérale, fabriqué à partir d'un mélange d'alcane, de naphtènes et d'aromatiques dérivés du pétrole brut. Les processus de raffinage peuvent comprendre un traitement à l'acide, une extraction par solvant, un hydrotraitement ou une combinaison de ces méthodes.

Lorsque le raffinage est terminé, les propriétés de l'huile minérale peuvent être restaurées aux spécifications. Le rôle fondamental de l'huile est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement des transformateurs. Les huiles modernes sont plus stables à la dégradation et ne contiennent pas de soufre corrosif.

Ils doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- Haute rigidité diélectrique
- Point bas de congélation
- Bonnes propriétés antistatiques

## **I.15. Echauffement et refroidissement des transformateurs :**

### **I.15.1 L'échauffement :**

Pendant le fonctionnement du transformateur, un échauffement se produit en raison de la perte d'énergie électrique dans la partie active due à :

- Perte par effet joule
- Perte d'hystérésis
- Perte par courant de Foucault
- Les effets de ce chauffage incluent
- Perte d'énergie
- Effet de la chaleur sur les métaux

Pour éviter cela, les transformateur doit être refroidies.

## I.15.2 refroidissement :

Les causes d'échauffement du transformateur et les solutions utilisées font toutes la différence phénomène de réchauffement remarquable. Ceci est nécessaire pour éviter la détérioration du transformateurs utiliser les moyenne de refroidissement contenant :

- Refroidissement par air
- Refroidissement à l'huile
- Refroidissement par un radiateur à l'huile
- Refroidissement artificiel à huile

## I.16. protection et surveillance de transformateur de puissance : [6]

La protection et la conservation est un problème à aborder d'un point de vue économique, en tenant compte de la possibilité d'un défaut, des conséquences de sa manifestation éventuelle (Perte de production, couts de réparation, dommage matériels) et des couts d'efficacité destinés à des prévenir ou à les limiter [6]

### I.16.1 différents types de protections :

#### I.16.1.1. protections internes :

##### a) Relais BUCHHOLZ :

Il détecte

- La présence de gaz (alarme)
- Un mouvement brutal de l'huile de la cuve de l'appareil vers le conservateur



Figure I.17.:relais BUCHHOLZ [6]

# Chapitre I : étude des transformateurs triphasés

## b) protection masse cuve :

Fournir une protection de mise à la terre du réservoir pour empêcher l'amorçage du transformateur entre les pièces sous tension et le réservoir

L'action de cette protection est instantanée. Son seuil de fonctionnement est choisi égal à 5% du courant de défaut monophasé du primaire (coté HT) du transformateur [6]

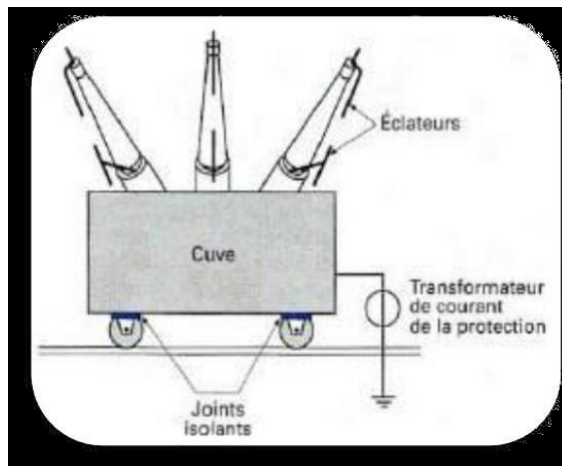


Figure I.18: protection masse cuve [6]

## c) protection par DGPT :

Le DGPT (gaz, pression and température detector) est un dispositif de protection pour les transformateurs à isolation liquide. L'appareil détecte les conditions dans le diélectrique liquide, telles que les émissions de gaz, les augmentations de pression ou de température, et provoque l'arrêt du transformateur. Il est principalement utilisé pour protéger les transformateurs submersibles étanches entièrement remplis pour les défauts graves, le dégagement de gaz est collecté au point haut du relais et une accumulation excessive provoque une alarme.



**Figure I.19:** dispositif DGPT

### **d) protection thermique :**

Plusieurs thermomètres et images thermiques ont été attachés au transformateur pour obtenir une image de la température de cuivre. Ces dernières années, des fibres optiques ont également été intégrées aux enroulements, permettant une mesure plus précise et plus rapide de cette température.

### **I.16.1.2. protection externes :**

#### **a) protections des surtensions :**

Les deux grands moyens de protection contre les surtensions sont utilisées sont : les éclateurs et les parafoudres.

##### **❖ Les éclateurs :**

Les éclateurs de protection sont moins fidèles que les parafoudres, en ce sens que la dispersion des tensions d'amorçage en fonction des conditions atmosphériques, ou de la forme de l'onde, est bien supérieure à celle des parafoudres.

##### **❖ Parafoudre :**

Ce sont des résistances fortement non- linéaires qui présentent une diminution importante de leur résistance interne au-dessus d'une certaine valeur de tension aux bornes.



**Figure I.20:**l'éclateur



**Figure I.21:** Parafoudre

### **b) protection à maximum d'intensité :**

Des relais liés à des transformateurs de courant 'TC' déclenchent le transformateur après une surintensité momentanée réglée en fonction du seuil. Ces unités de protection fonctionnent contre un défaut externe (défaut entre phase et entre phase et terre)

- Relais à maximum de courant triphasé à deux seuils avec temporisation pour la protection contre les défauts entre phases.
- Relais temporisé à maximum de courant homopolaire à deux étages (seuils bas et haut) temporise désensibilisé à l'harmonique pour la protection contre les défauts de la terre.

### **I.17. conclusion :**

Les transformateurs de puissances sont des dispositifs qui sert à transmettre de la puissance électrique et permet aussi le transport, distribution et l'utilisation de énergie électrique.

Dans ce chapitre fournit une étude générale sur les transformateurs de puissance, nous avons vu les différents éléments qui composent cette machine.

*Chapitre 02 :*

*Maintenance des  
transformateurs de puissances*

## **Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances**

### **II.1. Introduction :**

Longtemps considérée comme un mal nécessaire, la maintenance est devenue un vrai problème dans l'entreprise. Elle s'affirme comme un véritable enjeu concurrentiel, que ce soit en les performances de disponibilité des équipements existants ne sont garanties qu'en termes de sécurité, qualité et cout

L'objectif de notre chapitre est d'insister sur les notions de maintenance, son importance et diffère des pratiques existantes en fonction de l'échelle et de la productivité de l'entreprise.

### **II.2.la définition de la maintenance :**

La maintenance recouvre toutes les activités destinées à maintenir dans un état de fonctionnement bien destiné à accomplir une fonction d'usage requise la norme NF X 60-010. [7]

### **I.3. l'objectif de maintenance :**

La maintenance a pour l'objectif de :

- Garantir les normes de qualité des produits fabriqués
- Améliorer la productivité
- Optimiser le nombre de pannes
- Réduire la pollution et préserver l'environnement
- Diminuer les couts de la maintenance

### **II.4 l'importance de la maintenance :**

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres :

- Augmentation du coût de productions
- Diminution de la marge du profit
- Rupture du stock
- Retard des livraisons
- Ajout des heures supplémentaires
- Absence des sécurités des opérateurs

## **Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances**

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences.

Pour ce faire, la partie suivante comprend des stratégies de maintenances. [7]

### **II.5. stratégies de maintenance des transformateurs :**

Les transformateurs sont des équipements robustes, construits avec une bonne fiabilité. Toutefois, les exploitants doivent mettre en œuvre des stratégies de maintenance qui leur assurent une disponibilité et une fiabilité continues. Une bonne stratégie de maintenance assure aux transformateurs, une durée de vie à un coût relativement maîtrisé. Elle doit intégrer un ensemble d'actions qui permettent de suivre l'état du transformateur dès sa mise en fonctionnement jusqu'à sa fin de vie. Il existe plusieurs méthodes qui peuvent rentrer dans une stratégie de maintenance d'un transformateur. Chaque méthode ou groupes de méthodes combinées doit aboutir à l'évaluation de l'état réel du transformateur. Il sera déclenché une action de maintenance corrective ou une évaluation poussée, selon les résultats de cette évaluation. La figure II.1ci-dessous résume les opérations et le cycle de maintenance d'un transformateur de sa mise en service à sa fin de vie, telle que propose la référence. Elle organise les différents types de maintenances préventives (systématique et conditionnelle) et propose une mise en œuvre qui guide l'exploitant dans l'évaluation de l'état du transformateur. Ces différentes techniques sont présentées ci-dessous.

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

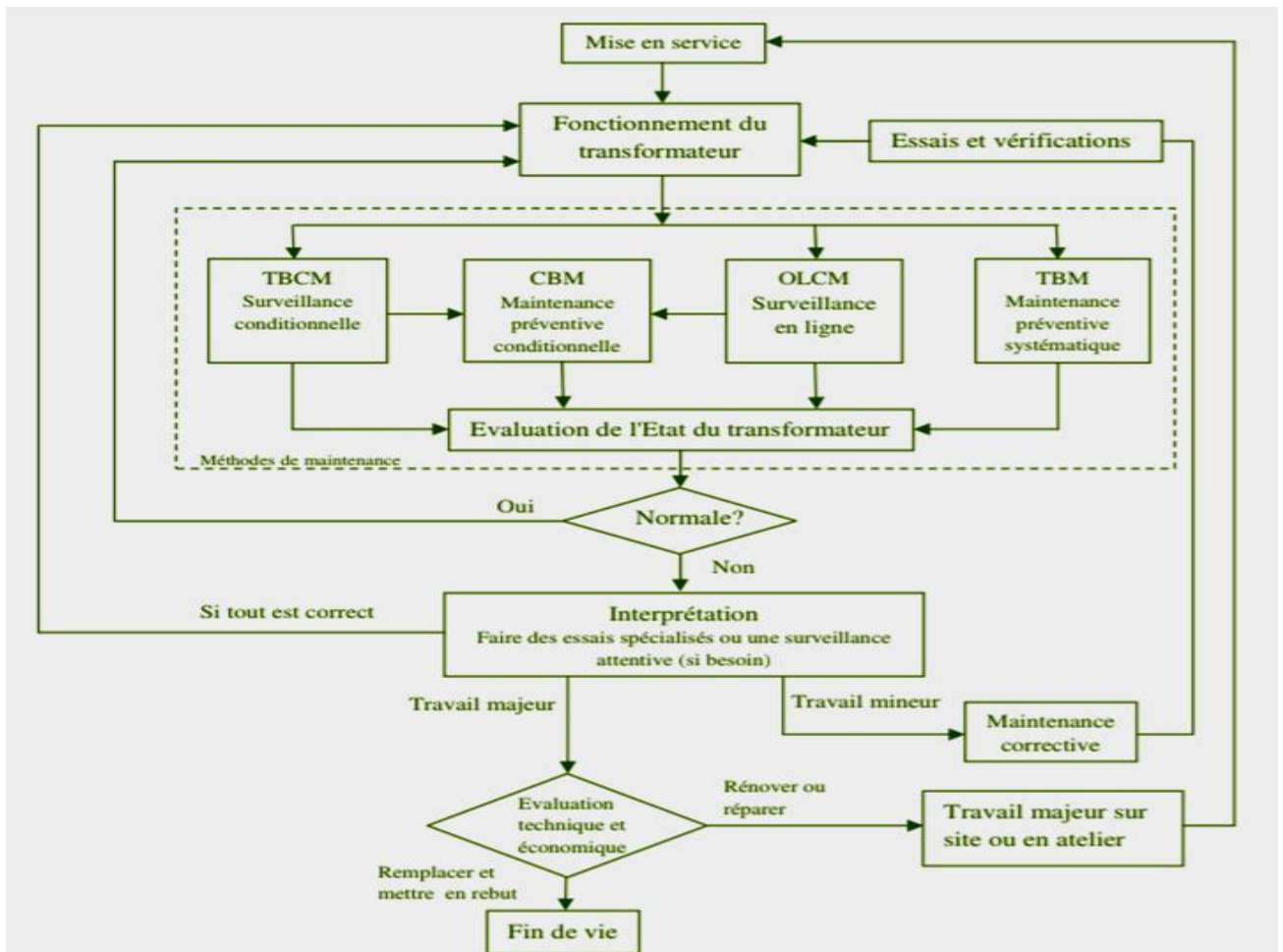
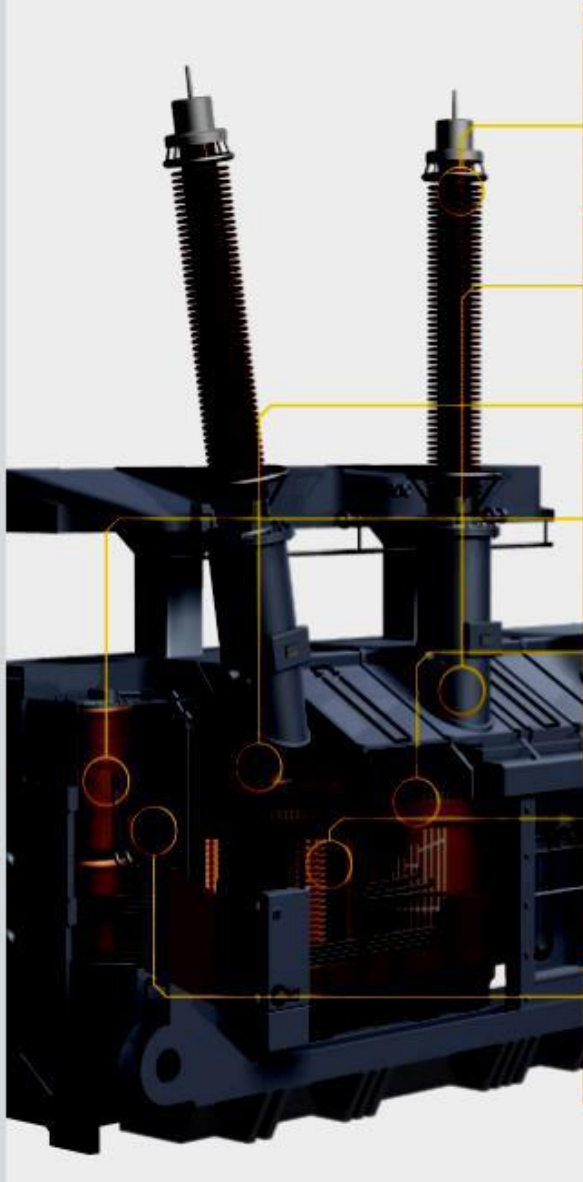


Figure II.1 : Opérations et cycle de maintenance du transformateur [8]

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

### II.6. quelques types de défauts :

#### II.6.1. composants du transformateur et leurs défauts détectables :



Composant	Défauts détectables
Traversées	Claquage partiel entre les couches capacitives de répartition, fissures dans l'isolation enduite de résine
	Vieillessement et pénétration d'humidité
	Connexion de la prise de mesure ouverte ou défectueuse Décharges partielles dans l'isolation
TC	Erreur de rapport de courant ou de déphasage en tenant compte de la charge, magnétisme résiduel excessif, non-conformité à la norme IEEE ou CEI applicable
	Rapport de courant et déphasage dépendant de la charge
	Spires en court-circuit
Connexions internes	Problèmes de contact
	Déformation mécanique
Changeur de prises	Problèmes de contact au niveau du sélecteur de prise et du commutateur
	Circuits ouverts, spires en court-circuit, ou connexions fortement résistives dans les réactances du Changeur de Prises en Charge
	Problèmes de contact dans le Changeur de Prise hors charge
Isolation	Humidité dans l'isolation solide
	Vieillessement, humidité, contamination des liquides isolants
	Décharges partielles
Enroulements	Court-circuits entre les enroulements ou entre les spires
	Courts-circuits entre les conducteurs
	Circuits ouverts dans les conducteurs parallèles
	Court-circuit à la terre
	Déformation mécanique
	Problèmes de contact, circuits ouverts
Circuit magnétique	Déformation mécanique
	Terre du circuit magnétique flottante
	Tôles du circuit magnétique en court-circuit
	Magnétisme résiduel

Figure II.2 Composant du transformateur et leurs défauts détectables

[9]

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

### II.6.2 amorçage diélectrique entre spire :

C'est l'amorçage entre spires (contrainte diélectrique et surtension) d'un même enroulement sans court-circuit entre conducteurs. De ce fait, l'isolation entre ces spires sera localement dégradée voire détruite



Figure I.3 : amorçage diélectrique entre spire

### II.6.3. court-circuit entre spires :



Figure II.4 :Court-circuit entre spires

### II.6.4. coupure du circuit électrique :

La plupart des cas où un circuit est coupé sont le résultat d'un défaut interne, causé par :

- Alimenter l'allumage entre les spires, les fusionner et couper les conducteurs.
- Des points chauds dégradés, au niveau de la soudure des connexions internes, pouvant aller du dessoudage à la fusion des contacts.
- Ajusteur mal aligné.

## **Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances**



**Figure II.5 : Coupure du circuit électrique**

### **II.6.5.déformation géométrique des enroulements : [10]**

Une déformation mécanique des enroulements du transformateur est possible, généralement des forces de Laplace très importantes après un court-circuit externe provoquant des courants extrêmement élevés, notamment il n'y a pas d'amorçage entre les spires et pas de court-circuit dans le circuit interne.

Les enroulements peuvent se déformer, ce qui fragilise inévitablement le papier isolant qu'il touche avec les conducteurs, sans avoir à tirer entre les spires ou la terre. Un transformateur avec cette déformation mécanique peut fonctionner à sa vitesse nominale sous certaines conditions. Pourtant, il est faible, et il n'y a absolument aucun moyen d'être sûr qu'il puisse donc supporter un court-circuit ou une surtension ultérieure sans perturbation dès le démarrage.

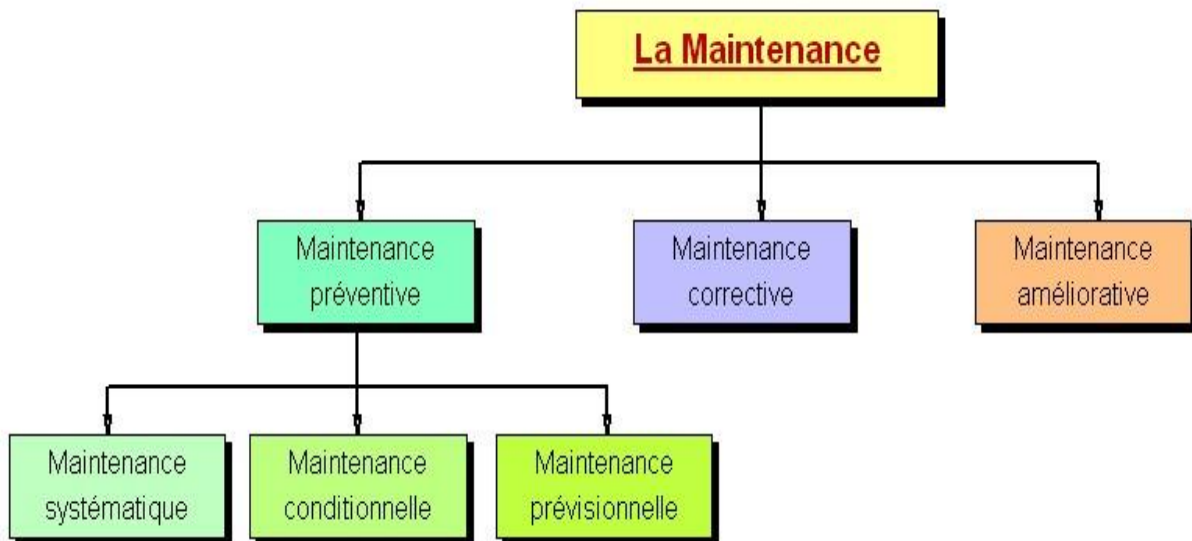


**Figure II.6. Déformation géométrique des enroulements**

[10]

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

### II.7. les différents types de maintenance :



**Figure II.7 : Les différents types de maintenance**

[11]

#### II.7.1 la maintenance corrective :

Elle regroupe des activités réalisées après une défaillance elle représente 60% de les interventions cette maintenance a des opérations essentielles :

- Le dépannage.
- Répartition.
- La surveillance.
- Les visites.
- Les contrôles.
- Les révisions.
- Les échanges standards.

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

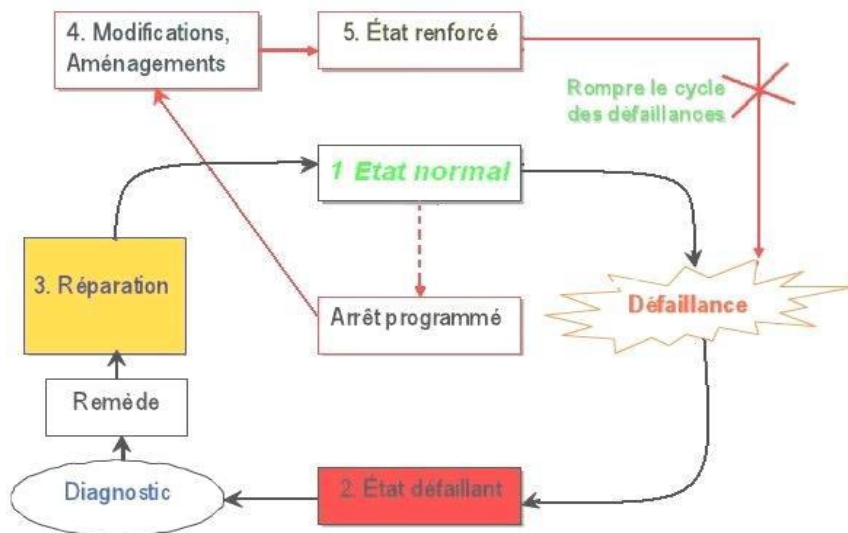


Figure II.8 : la maintenance corrective

[7]

### II.7.2. la maintenance préventive :

Cette maintenance a pour l'objectif de réduire les probabilités des défaillances en intervenant sur les outils de production avant une dégradation éventuelle des composants.

Cette dernière peut être :

- ❖ Systématique
- ❖ Conditionnelle
- ❖ Prévisionnelle

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

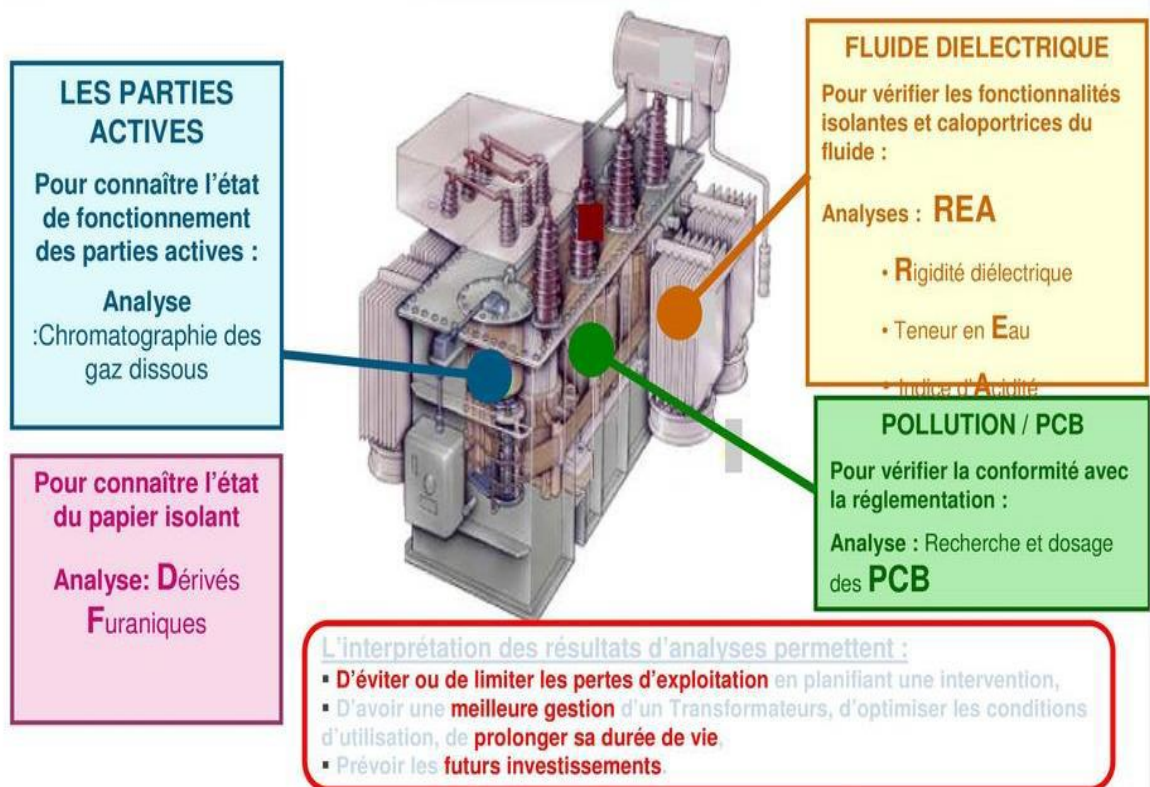


Figure II.9 : la maintenance préventive [11]

### II.7.2.1. la maintenance préventive systématique :

La maintenance préventive systématique s'effectue suivant un échéancier ou calendrier établi dans le temps.

### II.7.2.2.maintenance préventive conditionnelle :

La maintenance conditionnelle est subordonnée à des mesures suivant l'état de la dégradation de la machine en utilisant des capteurs

## II.8. les opérations de la maintenance :

### II.8.1. les opérations de la maintenance préventive :

Cette dernière a des opérations qui sont effectuées de manière continue :

➤ On distingue :

- **L'inspection** : Il s'agit d'une activité de surveillance réalisée dans le cadre des tâches établies. Elle ne se limite pas nécessairement à des comparaisons avec des données préétablies. En particulier, l'activité peut être réalisée par rondes.
- **Le contrôle** : C'est une vérification du respect de données préétablies suivie d'un jugement.

## **Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances**

- **La visite :** C'est une opération qui comprend des inspections détaillées et programmées de tout (accès général) ou de parties (accès limité) des différents éléments de la propriété et peut impliquer des opérations d'entretien primaire.

### **II.8.2.les opérations de la maintenance corrective :**

On distingue :

- **Dépannage :** Il s'agit d'une opération effectuée sur un article défectueux afin de le remettre en état de fonctionnement. Les opérations de réparation peuvent être réalisées sous réserve de résultats intermédiaires, en l'occurrence après réparation.
- **Répartition :** c'est une intervention définitive après une défaillance

### **II.8.3 les niveaux de maintenance :**

Ces niveaux sont déterminés par rapport :

- A la qualification de l'intervenant
  - Aux moyens mis en œuvre norme NF X 60-010
- **Niveau01 :** intervention de réglages simple
- **Niveau 02 :** intervention d'échanges standards
- **Niveau03 :** il s'agit d'une intervention qui permet de diagnostiquer une panne suite à une défaillance
- **Niveau04 :** il s'agit de travaux importants et de longue durée de la maintenance corrective ou préventive sur un ouvrage à l'exception d'une rénovation ou d'une reconstruction.
- **Niveau 05 :** il s'agit de travaux importants et de longue durée pour rénover ou reconstruire pour réparer un équipement [12]

### **II.9. mise en œuvre de la maintenance des transformateurs :**

Le transformateur est un système complexe constitué de composantes interconnectées. Chaque composante a une fonction bien précise et joue un rôle dans le fonctionnement de l'ensemble. Certaines composantes peuvent remplir des fonctions importantes ou critiques plus que d'autres. Les composantes d'un tel système peuvent être catégorisées selon un point de vue opérationnel en composantes « essentielles » ou « non-essentielles ». La maintenance de ces composantes pourra aussi dans une certaine mesure tenir compte de cette criticité. En effet, un composant « essentiel » désigne tout composant dont la défaillance conduit à une indisponibilité du transformateur. Autrement dit,

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

l'altération ou la cessation de l'aptitude de la composante à accomplir son rôle conduit à l'indisponibilité de tout le système. Un composant « non-essentiel » désigne toute composante d'un système dont la défaillance conduit à un fonctionnement d'exception ou dégradé. Dans ce cas, la défaillance est rendue tolérable grâce à l'intégration des techniques de reconfiguration réactive. La mise en œuvre de la maintenance consiste à opérationnaliser la politique de maintenance établie. Elle consiste à l'application de différentes stratégies de maintenance évoquées ci-dessus. Dans l'opérationnalisation de la maintenance d'un transformateur, les actions s'articulent autour de ses composantes. Dans cet ordre d'idée, les composantes d'un transformateur peuvent se distinguer en deux groupes, les composantes externes et les composantes internes. [8]

### II.9.1 maintenance des composants externes du transformateur : [8]

Composantes	Parties	Actions de maintenance	Périodicité	Observations
Système de ventilation	Moteur, pompe	Suivre les indications du constructeur	Annuelle	Un nettoyage par air ou par eau est possible suivant les recommandations du constructeur
Traversées		Inspection	Annuelle	Niveau d'huile, étanchéité, cassure des ailettes sont à contrôler
Parafoudre	- Compteurs ; - Mise à la terre	Inspection	Mensuelle Annuelle	Vérification de la propreté, des connexions.
Assécher d'air	Silicagel et autres	Remplacement des charges de silicagel.  Vérification du niveau d'huile dans l'sécheur, et des joints	Annuelle ou selon la coloration	Empêche l'humidité de l'air d'être en contact avec l'huile quand la charge ou la température changent.
Changeur de prises	Sélecteurs ; Commutateur.	-Inspection -Analyse d'huile	Annuelle	Toutes les 50 000 manœuvres (ou 5 ans), révision complète du régleur avec échange des pièces suivant besoin (contact, résistance de passage).
Connexion de puissance	Commutateurs	Inspection thermographique	Annuelle	Manœuvrer hors tension

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

Appareillage de protection	- Différents capteurs, - Relais Buchholz, Disjoncteurs et éléments de signalisation	Inspection	Annuelle	Vérification de fonctionnement
Armoires auxiliaires	Matériels électriques	Inspection	Annuelle	Contrôle des connexions, d'échauffement anormal, intrusion diverses etc.

**TableauII.1 : Actions de maintenance sur les composantes externes d'un transformateur et leur périodicité**

[8]

### **II.9.2. maintenance des composants internes du transformateur :**

Les composants internes du transformateur comprennent : le noyau magnétique, les enroulements et le système d'isolation. Le noyau magnétique et l'enroulement peuvent être soumis à des courts-circuits et à d'autres contraintes mécaniques qui déforment leur structure. Les activités de maintenance sont suffisantes pour vérifier ces types d'erreurs. Ces actions sont généralement réalisées à la suite d'alarmes analytiques issues de l'analyse des informations Relatives au système d'isolement. Le système d'isolation, composé d'une partie solide et d'une partie liquide, est exposé à des contraintes électriques qui peuvent provoquer des dommages pouvant entraîner la défaillance du transformateur. En effet, la partie liquide est constituée d'huile isolante dans laquelle baignent tous les autres composants internes du transformateur. En lien avec le fonctionnement, c'est un rappel des pannes affectant les parties internes du transformateur. Les différentes contraintes auxquelles est soumis le transformateur laissent donc des traces dans cette huile. De ce fait qu'il est analysé, il montré des défauts qui peuvent mentionner l'état interne du transformateur.

Le deuxième tableau2 résume les différentes analyses à effectuer dans le cadre du diagnostic du transformateur, notamment la recherche de défauts (signaux) pouvant déclencher des mesures préventives ou d'autres formes d'investigation. Le diagnostic du transformateur est basé sur un certain nombre de méthodes utilisées dans le cadre de la politique de maintenance. Ces procédures sont définies dans des normes qui fournissent des orientations générales.

La partie fixe de l'isolateur est constituée de papier ou de couches de papier placées entre les enroulements et la cuve et entre les bobines. Il se mouille dans l'huile et se décompose lorsqu'il est exposé à la chaleur, produisant des produits chimiques qui peuvent être détectés par analyse. Ces relations indiquent l'état de la carte dans le transformateur. Il est également possible d'analyser le degré de polymérisation sur un échantillon de papier. Dans ce cas,

## Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances

l'échantillonnage nécessite l'arrêt du transformateur. Le degré de polymérisation du papier peut être estimé en analysant les composés d'uranium.

Analyses d'huile	Détails	Périodicité	Observations
Analyses physico-chimiques	-Rigidité diélectrique Teneur en eau - Colorimétrie Indice d'acidité	Annuelle	La périodicité peut être réduite si une des grandeurs s'approche des seuils limites admissibles. (CEI 60 422)
Analyse Chromatographique Des Gaz Dissous	Les gaz sont séparés et les concentrations analysées par des méthodes bien connues. Généralement, chaque gaz ou groupe de gaz est lié à un type de défaut. (CEI 60599)	Initialement annuelle, elle peut être bi ou tri-annuelle en fonction des résultats et de l'âge du transformateur	Il est réalisé, le matériel étant de préférence en service, le plus rapidement possible après la mise hors tension. La température d'huile au moment du prélèvement doit être notée.
Analyse des Furfurals	Les composés Furaniques renseignent sur l'état du papier	Pour les appareils de plus de 10 ans, tous les 2 ans	Interprétation et actions selon la norme CEI 1198.
Analyses Complémentaires	Il est recommandé de faire : – les analyses de sédiment (en cas de boue) – les analyses des métaux (point chaud haute température) – le comptage de particules (pour transformateur > 400 kV)	Au vu des résultats des analyses physico-chimiques et chromatographiques	

**Tableau II.2 : Analyses d'huile de transformateurs et leur périodicité**

[8]

## **Chapitre II : maintenance des transformateurs de puissances**

### **II.10. conclusion :**

Dans de nombreuses industries, le mot "maintenance" fait de plus en plus référence à des opérations modernes qui suivent les impératifs de qualité absolue, de production et de ponctualité. Une attention particulière doit être portée à la mise en place d'une stratégie de maintenance adaptée aux opérations de l'entreprise et à son potentiel de croissance afin de répondre aux besoins des clients et des consommateurs et d'augmenter la rentabilité.

L'aptitude d'un transformateur à exposer utilement son rôle dans un réseau électrique concernant des différentes mesures prises pour garantir sa disponibilité. La maintenance élaborer toutes les mouvements qui contribuer à cet effet.

Dans ce chapitre, nous avons fourni quelques informations générales sur la maintenance industrielle, le but de la maintenance et les différents types de maintenance. Les travaux d'entretien ont ensuite été présentés. Nous avons ensuite évoqué les niveaux de maintenance attendus et l'objectif principal de la politique de maintenance est d'assurer la meilleure disponibilité possible de l'outil de production et les coûts les plus bas possibles.

*Chapitre 03 :*

*Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissances*

## **Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance**

### **III.1.introduction :**

Les entreprises impliquées dans la production et la distribution d'énergie électrique, telles que LA SONELGAZ, doivent prendre en compte les préoccupations des grands utilisateurs primaires qui ne peuvent tolérer les coupures de courant non planifiées, notamment celles nécessitant des réparations prolongées, comme les transformateurs de puissance endommagés. Ces événements ont entraîné des retards dans les ventes d'énergie. C'est pourquoi la détection et le diagnostic des différents défauts des transformateurs de puissance revêtent une importance primordiale, ce qui a motivé la mise en place de plusieurs laboratoires de recherche spécialisés dans ce domaine. [13].

### **III.2. Présentation du processus de diagnostic :**

Le processus de diagnostic consiste à déterminer une cause d'avarie à partir de données d'entrée (symptômes, mesures, divers paramètres...), comparées à des critères de tolérance. Ces derniers peuvent être empiriques (alimentation d'une base de donnée, retours d'expérience, historiques...), ou fixés par des référentiels (la norme NF EN 60076 pour les transformateurs).

Le diagnostic n'intervient pas uniquement en cas de suspicion d'avarie, mais également dans le cas d'une volonté d'évaluer l'état général de la machine [14].

## Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance

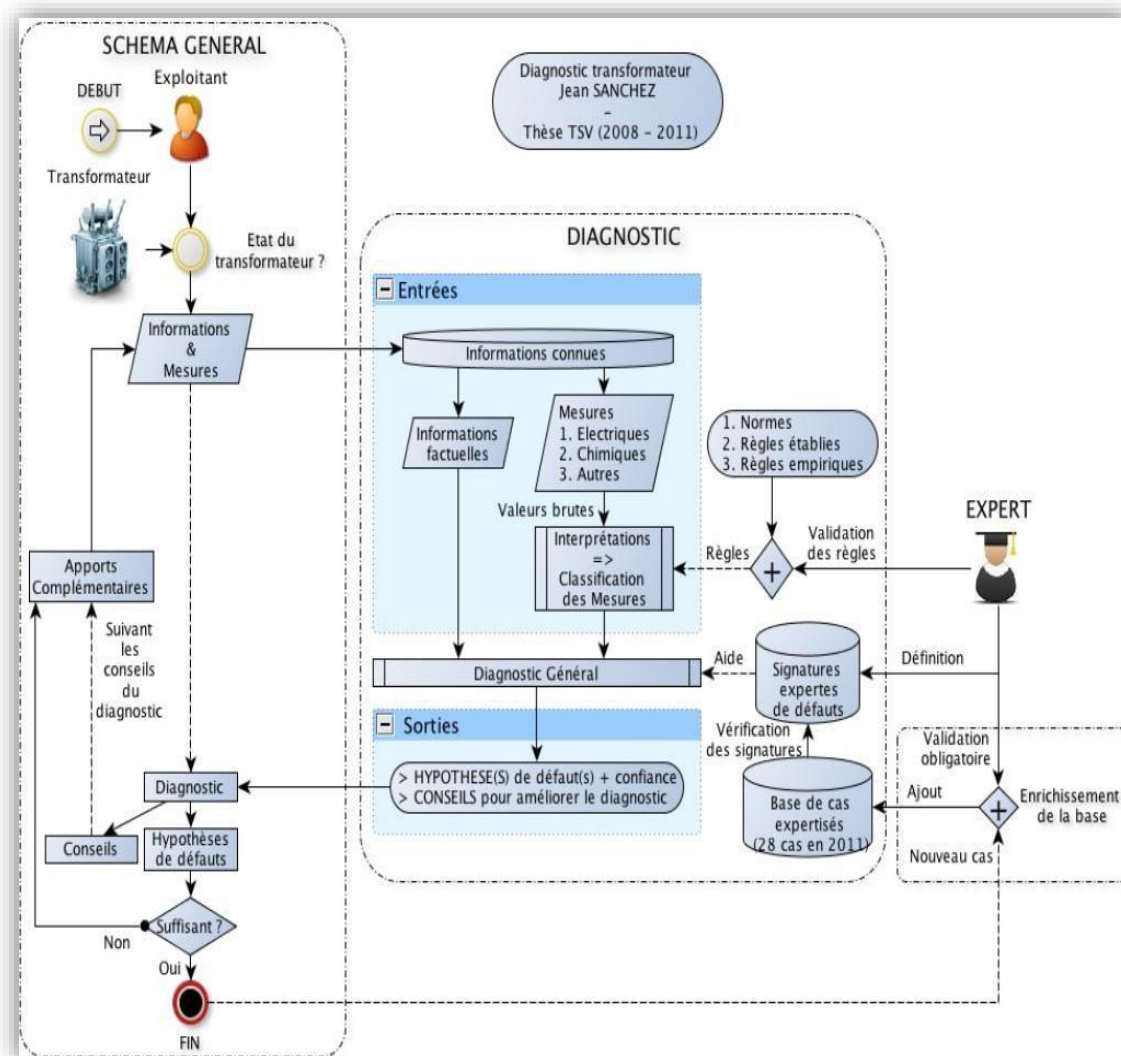


Figure III.1 : Principe général du processus de diagnostic

[14]

## **Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance**

### **III.3. Technique de diagnostic de transformateur de puissance :**

#### **III.3.1. Analyse des gaz dissous dans l'huile :**

L'apparition de défauts d'origine thermique conduit à la dégradation de l'huile. Chaque type de défaut fait cuire l'huile ou le papier d'une manière différente, produisant des quantités relatives de gaz dissous qui caractérisent le défaut.

Par conséquent, les analyses des gaz dissous permettent de suivre le comportement du transformateur à travers des analyses par chromatographie en phase gazeuse, elles permettent de :

- Détecter la présence d'anomalies dans le transformateur dès leur premier stade d'apparition et de suivre leur évolution.
- des hypothèses sur le type de défaut (arc, point chaud, décharge partielle, mauvaise connexion d'un contact).

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

Les gaz sujet au diagnostic et leur origine sont représenté dans le tableau ci-dessous [15].

Type	Gaz	Symbole	Origine
<b>Gaz combustibles</b>	<b>Acétylène</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	<b>Il apparait par défaut électriques (décharges) de haute énergie.</b>
	<b>Ethylène</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	<b>Ce gaz se génère par la décomposition thermique de l'huile ou de l'isolement solide.</b>
	<b>Ethane</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	<b>Provient de la décomposition thermique de l'huile.</b>
	<b>Hydrogène</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>Il se génère par défauts électriques (décharges) de basse ou de haute énergie.</b>
	<b>Méthane</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Généralement il apparait quand il existe des décharges partielles ou de décomposition thermique de l'huile.</b>
	<b>Monoxyde de Carbone</b>	<b>CO</b>	

## Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance

<b>Gaz non combustibles</b>	<b>Anhydride carbonique</b>	<b>CO2</b>	<b>Proviennent de la décomposition de la cellulose des matériaux qui composent le transformateur</b>
	<b>Azote</b>	<b>N2</b>	
	<b>Oxygène</b>	<b>O2</b>	<b>Pour vérifier la prise d'échantillon.</b>

**Tableau III.1 : Les gaz pour le diagnostic**

[15]

### III.3.1.1. Méthodes d'interprétation des résultats :

L'analyse des gaz dissous dans l'huile de transformateur est une méthode de diagnostic bien connu la plus particulièrement Rogers.

### III.3.1.2. Méthode de Rogers : [15]

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

La combinaison des codes produits, peut être liée à une interprétation diagnostic comme montré dans le Tableau III.2.

Rapport de gaz		Type de gaz	Rang	Code
<b>A</b>	<b><math>C_2H_2/C_2H_4</math></b>	<b>Acétylène/Ethylène</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0</b>
			<b>0,1 à 1</b>	<b>1</b>
			<b>1 à 3</b>	<b>1</b>
			<b>&gt; 3</b>	<b>2</b>
<b>B</b>	<b><math>CH_4/H_2</math></b>	<b>Méthane/hydrogène</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>1</b>
			<b>0,1 à 1</b>	<b>0</b>
			<b>1 à 3</b>	<b>2</b>
			<b>&gt; 3</b>	<b>2</b>
<b>C</b>	<b><math>C_2H_4/C_2H_6</math></b>	<b>Ethylène/ Ethane</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>0</b>
			<b>0,1 à 1</b>	<b>0</b>
			<b>0,1 à 1</b>	<b>1</b>

## Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance

			> 3	2
--	--	--	-----	---

Tableau III .2: Code de Rogers

[15]

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

## Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance

<b>7</b>	<b>Défaut thermique de T entre 300 – 700 °C</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>Ces problèmes produisent généralement CO et CO2 parce qu'ils comportent généralement l'isolation de cellulose</b>
<b>8</b>	<b>Défaut thermique de T &gt; 700 °C</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	

**Tableau.III.3 : Interprétation de Rogers**

[15]

### III.3.2. Méthodes de mesures possibles : [16]

#### III.3.2.1. Mesures diélectriques

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

L'objectif des mesures diélectriques est de déceler d'éventuelle dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenu d'un incident due à une avarie.

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

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

#### III.3.2.2. Mesures électriques :

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont :

##### a) Mesure de courant à vide :

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

L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer le circuit magnétisé du transformateur.

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

## **Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance**

### **a-1) Principe de mesure :**

La technique d'essai consiste à injecter une tension alternative de valeur réduite (Jusqu'à 12 kV) de différents niveaux, et réaliser une mesure du courant de magnétisation.

### **b) Mesure de rapport de transformation :**

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures. Des déviations indiquent des courts-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régleur.

- Les mesures sont effectuées :

A la mise en service.

Lors d'un entretien détaillé.

En cas d'une défaillance.

- Après une réparation.

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

### **c) Mesure de la résistance d'enroulements :**

La mesure de la résistance a pour objectif de déterminer l'existence des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinages. Entre autre cette mesure détermine les pertes par effet joule dans les enroulements et les connexions.

La mesure est effectuée par l'application du courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements afin de pouvoir ramener les valeurs mesurées vers des valeurs à la température référence.

### **d) Mesure de la réactance de fuite :**

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

## **Chapitre III : Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance**

### **III.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons introduit des méthodes de diagnostic des transducteurs. Nous nous sommes familiarisés avec deux techniques de diagnostic : l'analyse des gaz dissous dans l'huile et la méthode des mesures possibles.

L'analyse des gaz dissous est l'une des techniques les plus efficaces de surveillance de l'état des transformateurs. En raison de la nature et de la concentration des gaz, un défaut sous-jacent ou un mode de défaut affectant le transformateur peut être déterminé par simple échantillonnage.

## *Chapitre 04 :*

# *Simulation et diagnostic des défauts des transformateurs de puissances par les méthodes intelligentes*

### **IV.1 : introduction :**

La protection différentielle est une partie importante de la protection des transformateurs, et le but de ce chapitre est de mieux comprendre son fonctionnement dans différentes conditions. Les courts-circuits sont les principaux défauts qui affectent les transformateurs et provoquent des courants élevés, la protection comprend des mécanismes pour détecter et isoler tous les défauts à l'intérieur du transformateur.

L'intelligence artificielle ouvre d'énormes opportunités pour l'industrie. Il rend la production plus efficace, flexible et fiable que jamais. Avec la numérisation croissante de l'industrie, l'entreprise numérique est devenue une réalité. Les données sont générées, traitées et analysées en continu.

### **IV.2.composants du système :**

Cette approche est mise en œuvre grâce à l'environnement MATLAB qui permet de simuler des systèmes électriques dans différents modes de fonctionnement afin d'obtenir une méthode et d'analyser les phénomènes physiques correspondant à ces systèmes.

Simulink est un programme de Matlab pour la simulation des systèmes, c'est une plate-forme de simulation multi-domaine des systèmes dynamiques, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas bloc (diagramme structurel). Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes, Simulink possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme graphiques ou de valeurs numériques. [17]

Le système suivant est composé de :

- Source de tension triphasée (11KV/500MVA)
- Un transformateur élévateur (11KV/33KV ; 200MVA)
- 2 disjoncteurs triphasés en amont et en aval de transformateur
- Outil de mesure triphasé de tension et courant
- La protection différentielle
- La charge (RLC) représente la consommation nominale

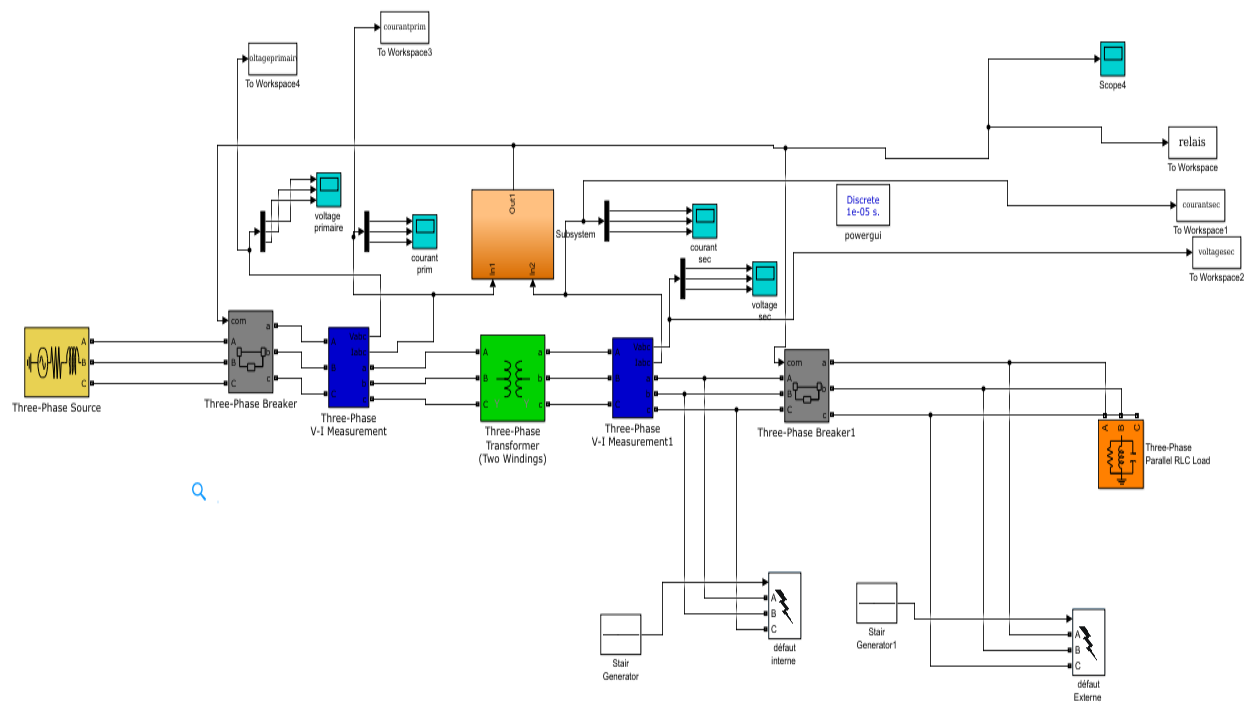
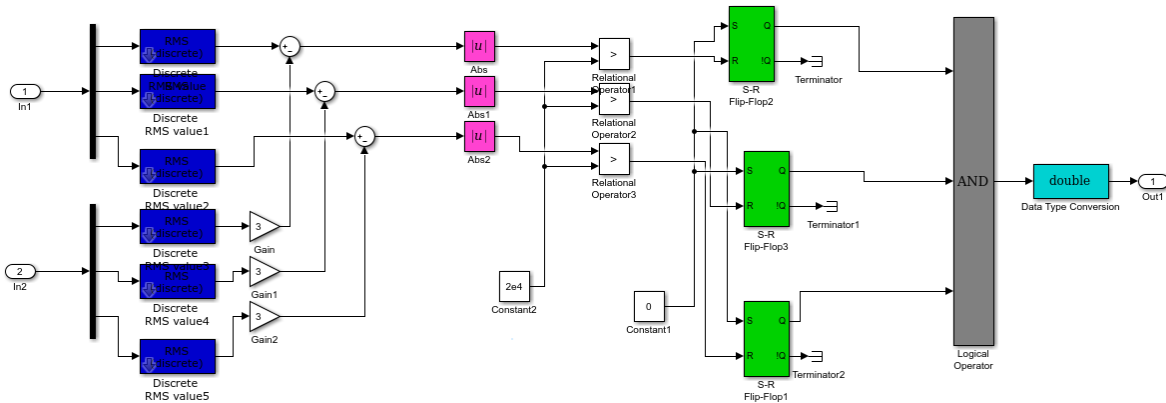


Figure IV.1 : Modèle Simulink d'un transformateur triphasée Avec la protection différentielle

La figure IV.2 ci-dessous présente le schéma de relais différentiel dans un programme MATALAB Simulink.



FigureIV.2 : relais différentiel sous Matlab Simulink

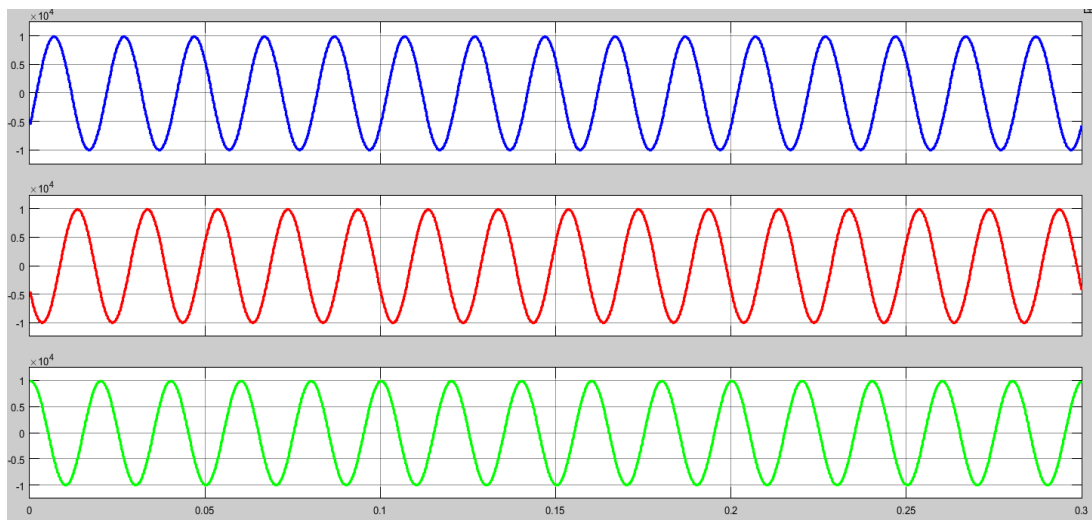
Le relais différentiel fonctionne dans ces trois cas :

- Fonctionnement normal
- Défaut Externe
- Défaut Interne

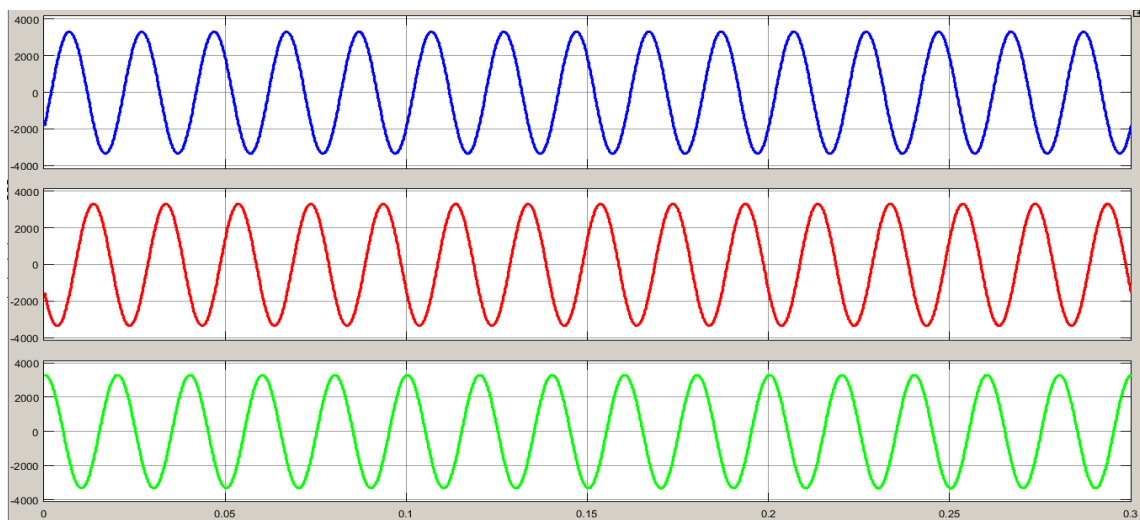
### **IV.3. La simulation :**

#### **a) Fonctionnement normal :**

Dans ce cas en vas voir les graphes de courant sans défaut :



**Figure IV.3 :** courant primaire sans défaut

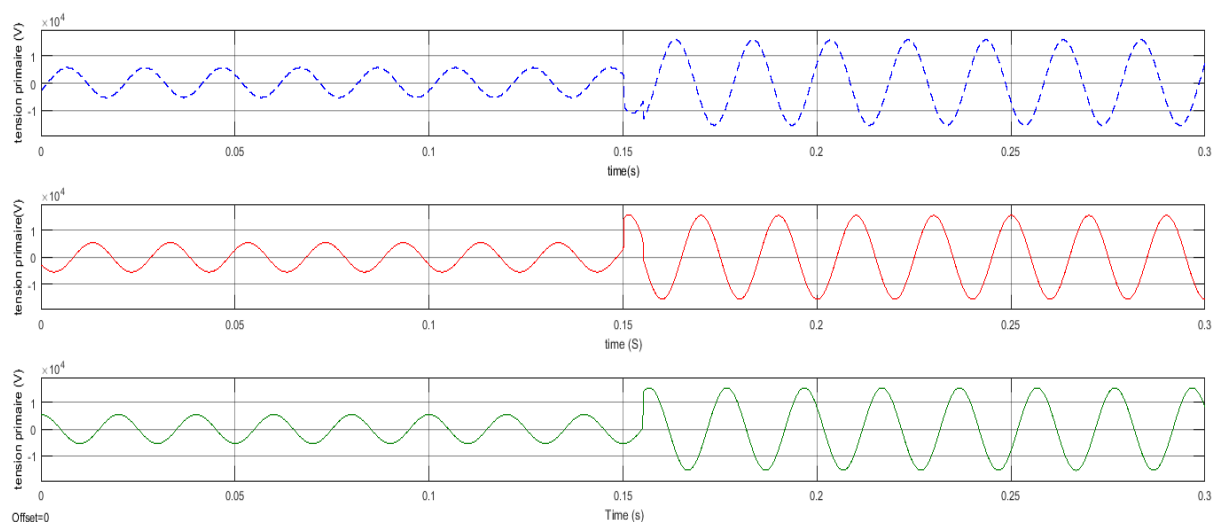


**FigureIV.4 :** courant secondaire sans défaut

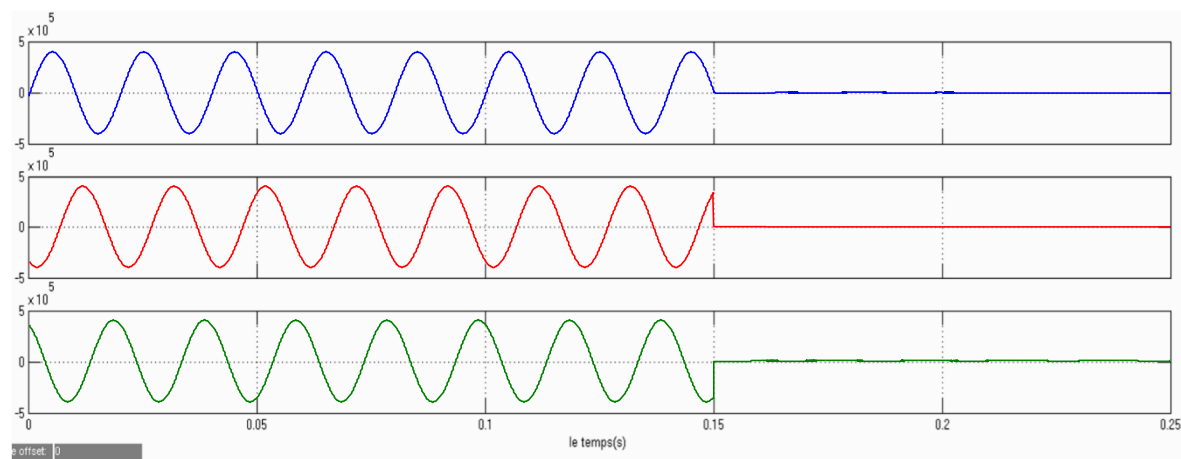
D'après la figure (IV.3) et la figure (IV.4) nous montrent le courant dans le primaire et le secondaire sans défaut

**b) Défaut Externe :**

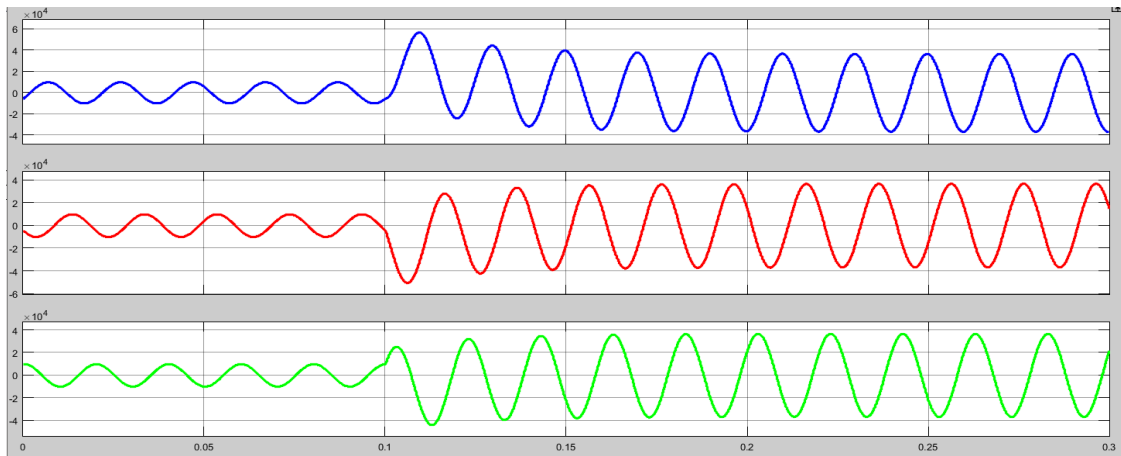
On applique maintenant le défaut hors zone de protection, en amont ou en aval du transformateur, le défaut est appliqué pendant  $t=0,15$



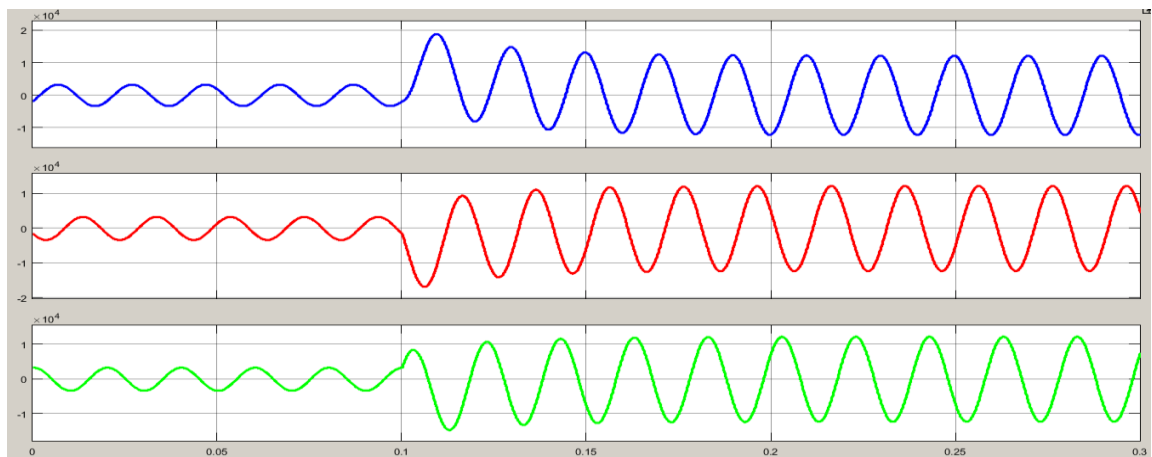
**Figure IV.5 : Tension primaire avec défaut externe**



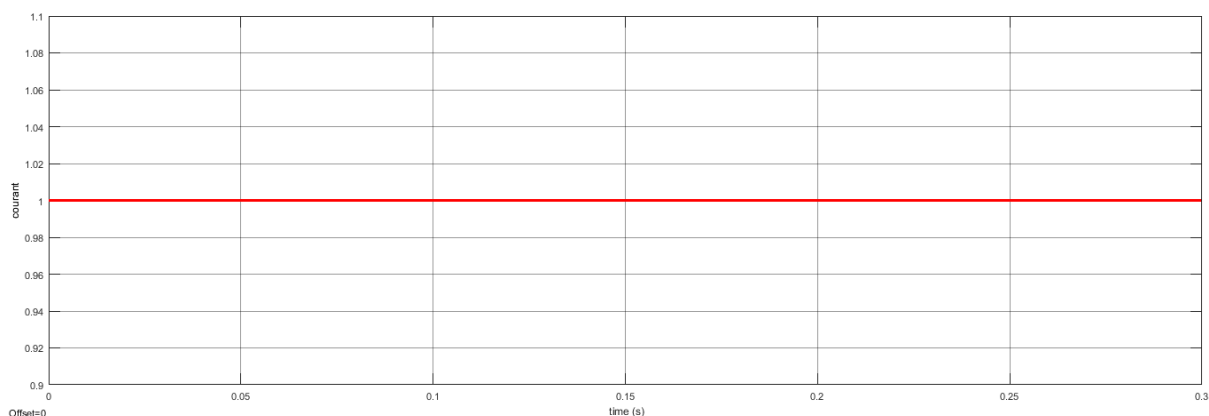
**Figure IV.6 : Tension secondaire avec défaut externe**



**FigureIV.7 : courant primaire avec défaut externe**



**Figure IV.8 : Courant secondaire avec défaut externe (dans les trois phases)**



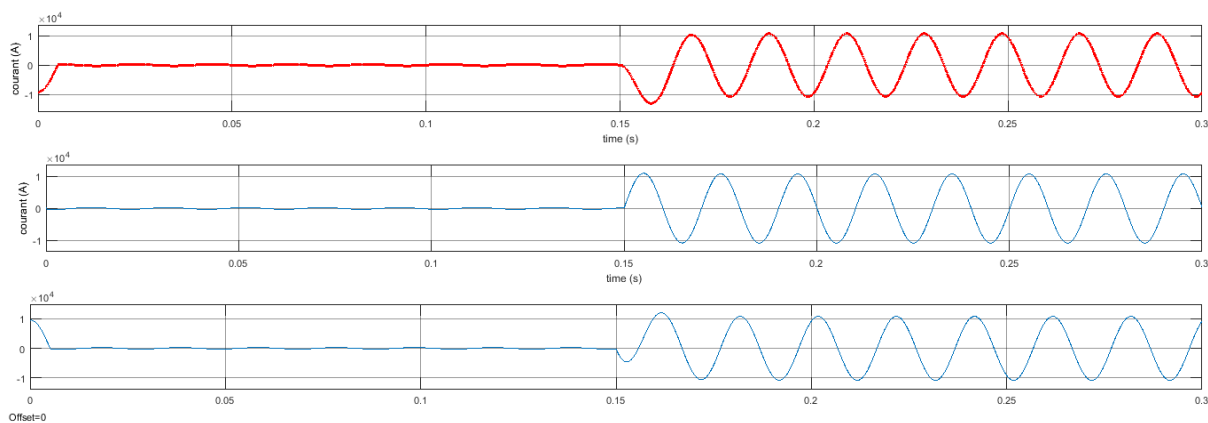
**FigureIV.9 :** Le signal de sortie d'un relais

**Remarque :**

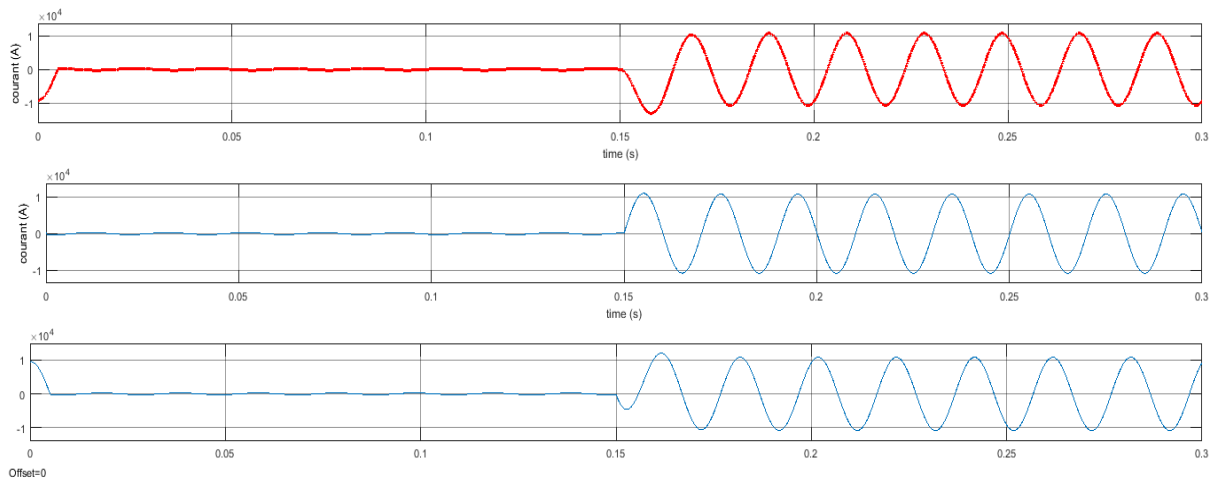
Dans ce cas, la protection à maximum de courante phase doit fonctionner pour protéger le transformateur des défauts externes, car le transformateur ne peut pas supporter cette valeur de courant, ce qui entraîne la dégradation de certaines caractéristiques du transformateur.

**c) Défaut interne :**

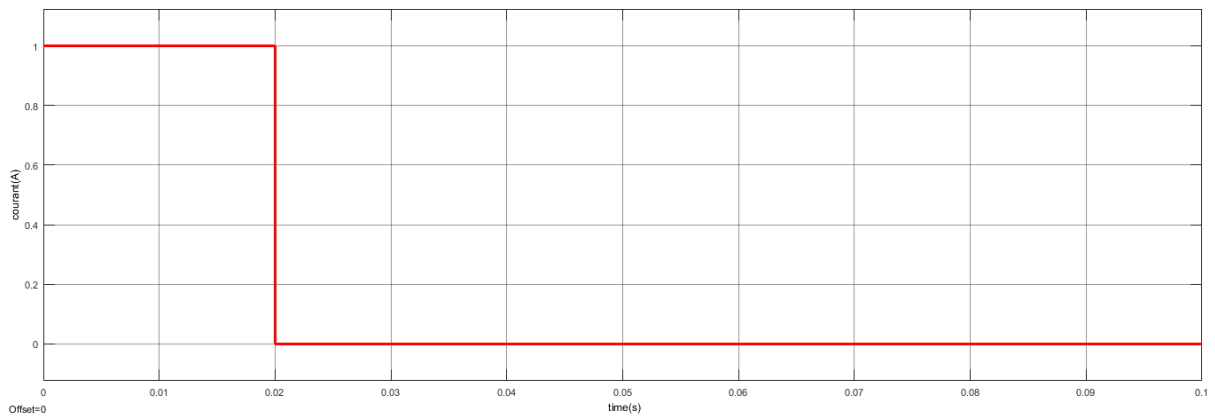
On applique un défaut interne au secondaire de transformateur à l'instant  $t=0.15s$



**FigureIV.10 :** Courant primaire pour chaque phase



**Figure IV. 11 : Courant primaire pour chaque phase**



**Figure IV.12 : Signal de sortie de relais dans un défaut interne**

**Remarque :**

Lors d'un défaut interne, la valeur du courant résiduel est trop importante et dépasse le niveau de déclenchement, ce qui signifie que la protection différentielle ou le disjoncteur s'ouvre pour isoler le transformateur, cette protection assure la stabilité lors des défauts externes

#### **IV.4. l'utilisation des méthodes intelligentes pour le diagnostic des défauts :**

La méthode intelligente fournit une méthode avancée et efficace pour la détection des défauts des transformateurs de puissance. Ils améliorent la précision du diagnostic, réduisent les coûts de maintenance, permettent une surveillance en temps réel et contribuent à une meilleure gestion de la durée de vie des transformateurs.

#### **IV.5. Analyses des données à l'aide de python :**

##### **IV.5.1. Définition de logiciel PYTHON :**

Python est un langage de programmation interprété, multi-paradigme et multiplateformes. Il préconise une programmation impérative structurée, fonctionnelle et orientée objet. [18]

##### **IV.5.2. la relation entre Python et data science :**

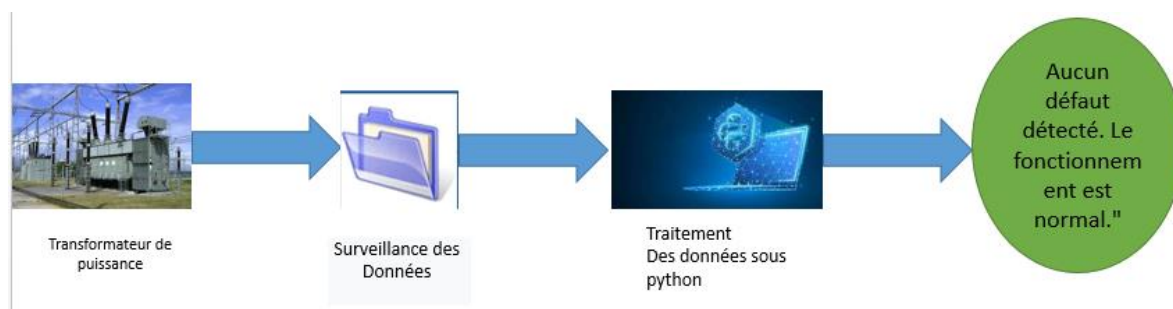
Python est un langage de programmation polyvalent et riche en bibliothèques qui facilite la mise en œuvre de tâches de science des données. Il est devenu un choix populaire pour les professionnels de l'analyse de données en raison de sa facilité d'utilisation, de sa flexibilité et de sa puissance. [19]

#### **IV.6 l'application :**

On a traité un programme sur python qui porte deux fichiers Excel avec données obtenues à travers une simulation sous « MATLAB » de transformateur de puissance dans un fonctionnement normal et l'autre dans un fonctionnement sous défaut.

Voici les étapes de travail :

Dans un fonctionnement normal :

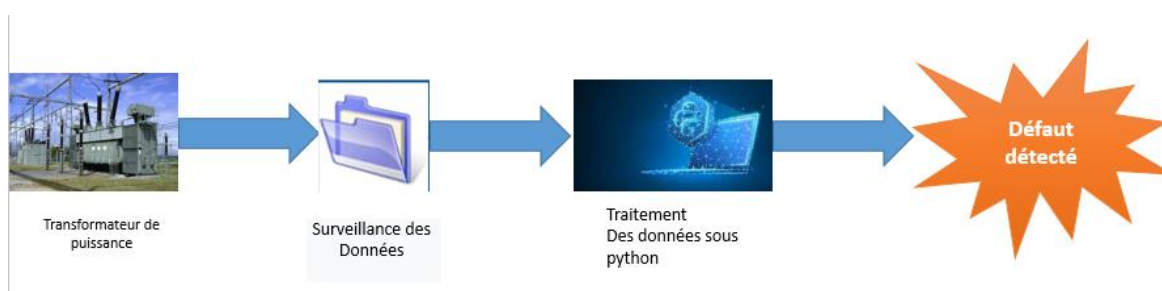


**FigureIV.13 :** Dans un fonctionnement normal

temps	Ph1	ph2	ph3
0	0	86,6025404	-86,6025404
apres 1min	173,750553	-164,736548	-9,01400485
apres 1min	193,02056	-124,053536	-68,9670237
apres 1min	193,392841	-71,2274232	-122,165418
apres 1min	174,830959	-11,4292047	-163,401754
apres 1min	139,15188	49,4876531	-188,639533
apres 1min	89,8481207	105,560184	-195,408304
apres 1min	31,7458775	151,299617	-183,045495
apres 1min	-29,4673975	182,228659	-152,761262
apres 1min	-87,7997221	195,319759	-107,520037
apres 1min	-137,541122	189,29147	-51,7503478

Figure IV. 14 : Données traité dans le fonctionnement normal

Dans la présence d'un défaut :

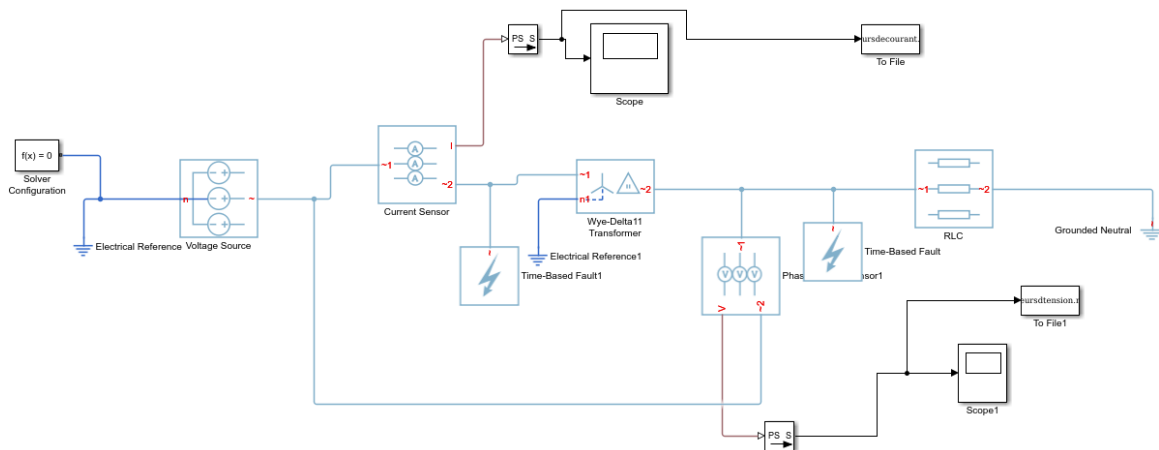


FigureIV.15 : fonctionnement avec défaut

temps	Ph1	ph2	ph3
0	0	86,6025404	-86,6025404
apres 1 min	173,750553	-164,736548	-9,01400485
apres 1 min	193,02056	-124,053536	-68,9670237
apres 1 min	193,392841	-71,2274232	-122,165418
apres 1 min	174,830959	-11,4292047	-163,401754
apres 1 min	-99,7798903	49,9995284	49,7803618
apres 1 min	-94,8697289	20,8892093	73,9805196
apres 1 min	79,2712107	201,384401	-280,655612
apres 1 min	-29,4589532	182,231714	-152,77276
apres 1 min	-87,7912105	195,322782	-107,531572
apres 1 min	-137,532547	189,294483	-51,7619364

Figure IV.16 : Données traité lors d'un défaut

Ces dernières données sont obtenues à travers la simulation sous Matlab Simulink :



**FigureIV.17** : schémas de transformateurs de puissance sous Matlab Simulink

**Remarque 01 :**

Cette simulation présente un transformateur de puissance avec un capteur de tension et un capteur de courant. L'utilisation de capteurs dans le traitement des données des transformateurs de puissance permet une surveillance en temps réel, une maintenance prédictive, une optimisation des performances et une prise de décision éclairée. Cela contribue à augmenter la fiabilité, la durée de vie et l'efficacité du transformateur tout en réduisant les menaces associées à son fonctionnement.

**Remarque 02 :**

Le programme traité compare deux fichiers Excel (dataTrnormal.xlsx et dataTrdefault.xlsx) en utilisant la bibliothèque pandas. Voici un résumé des étapes effectuées :

- Les données du premier fichier Excel sont lues et stockées dans le bloc de données df1.

- Les données du deuxième fichier Excel sont lues et stockées dans une trame de données df2.
- Utilisez la fonction print () pour afficher le contenu des blocs de données df1 et df2.
- La méthode pandas equals () est utilisée pour comparer deux dataframes df1 et df2 pour l'égalité. Utilisez la fonction print () pour afficher les résultats.
- La méthode compare () de pandas est utilisée pour comparer les données des dataframes df1 et df2. Le résultat est affiché à l'aide de la fonction print (). Les différences entre les valeurs des dataframes df1 et df2 sont calculées en soustrayant df2 de df1. La moyenne de la colonne 'Ph1' du dataframe df1 est calculée en utilisant la méthode mean (). la fonction print () permet de nous afficher les résultats . Les statistiques descriptives des colonnes du dataframe « df1 » sont calculées en utilisant la méthode describe(). Les statistiques descriptives pour « df2 » sont également calculées et affichées. La forme du dataframe df1 (nombre de lignes et de colonnes) est affichée en utilisant la méthode shape.
- Si DataFrame « diff » est vide (c'est-à-dire qu'aucune différence n'est détectée entre les fichiers), le message "Aucune défaillance détectée. Fonctionnement normal." est affiché. Cela montre que les deux fichiers sont identiques et qu'il n'y a pas d'erreur d'exécution.
- Si le « diff » DataFrame n'est pas vide (c'est-à-dire qu'il y a des différences entre les fichiers), le message « Des défauts ont été détectés dans : » s'affiche. Les détails des différences sont ensuite affichés en imprimant le DataFrame « diff »
- . Cela indique exactement où les écarts ont été trouvés, fournissant ainsi des informations sur les défaillances de fonctionnement.

Voici les résultats obtenue après l'exécution :

Temps	Ph1	ph2	ph3
0	0.000	0.000000	86.602540 -86.602540
1	0.001	173.750553	-164.736548 -9.014005
2	0.002	193.020560	-124.053536 -68.967024
3	0.003	193.392841	-71.227423 -122.165418
4	0.004	174.830959	-11.429205 -163.401754

*Chapitre IV : Simulation et diagnostic des défauts des transformateurs de puissances par les méthodes intelligentes*

---

5 0.005 139.151880 49.487653 -188.639533  
 6 0.006 89.848121 105.560184 -195.408304  
 7 0.007 31.745877 151.299617 -183.045495  
 8 0.008 -29.467397 182.228659 -152.761262  
 9 0.009 -87.799722 195.319759 -107.520037  
 10 0.010 -137.541122 189.291470 -51.750348

Temps Ph1 ph2 ph3

0 0.000 0.000000 86.602540 -86.602540  
 1 0.001 173.750553 -164.736548 -9.014005  
 2 0.002 193.020560 -124.053536 -68.967024  
 3 0.003 193.392841 -71.227423 -122.165418  
 4 0.004 174.830959 -11.429205 -163.401754  
 5 0.005 -99.779890 49.999528 49.780362  
 6 0.006 -94.869729 20.889209 73.980520  
 7 0.007 79.271211 201.384401 -280.655612  
 8 0.008 -29.458953 182.231714 -152.772760  
 9 0.009 -87.791210 195.322782 -107.531572  
 10 0.010 -137.532547 189.294483 -51.761936

False

Ph1 ph2 ph3  
 Self other self other self other

5 139.151880 -99.779890 49.487653 49.999528 -188.639533 49.780362  
 6 89.848121 -94.869729 105.560184 20.889209 -195.408304 73.980520  
 7 31.745877 79.271211 151.299617 201.384401 -183.045495 -280.655612  
 8 -29.467397 -29.458953 182.228659 182.231714 -152.761262 -152.772760  
 9 -87.799722 -87.791210 195.319759 195.322782 -107.520037 -107.531572  
 10 -137.541122 -137.532547 189.291470 189.294483 -51.750348 -51.761936

Temps Ph1 ph2 ph3

0 0.0 0.000000 0.000000 0.000000

*Chapitre IV : Simulation et diagnostic des défauts des transformateurs de puissances par les méthodes intelligentes*

---

```

1  0.0  0.000000  0.000000  0.000000
2  0.0  0.000000  0.000000  0.000000
3  0.0  0.000000  0.000000  0.000000
4  0.0  0.000000  0.000000  0.000000
5  0.0  238.931770 -0.511875 -238.419895
6  0.0  184.717850 84.670974 -269.388824
7  0.0 -47.525333 -50.084784  97.610117
8  0.0 -0.008444 -0.003055  0.011499
9  0.0 -0.008512 -0.003023  0.011534
10 0.0 -0.008575 -0.003013  0.011589

```

**67.35750448465262**

	Temps	Ph1	ph2	ph3
<b>Count</b>	11.000000	11.000000	11.000000	11.000000
<b>Mean</b>	0.005000	67.357504	53.485743	-120.843247
<b>Stud</b>	0.003317	118.930185	129.396800	61.788205
<b>Min</b>	0.000000	-137.541122	-164.736548	-195.408304
25%	0.002500	-14.733699	-41.328314	-173.223624
50%	0.005000	89.848121	86.602540	-122.165418
75%	0.007500	174.290756	166.764138	-77.784782
<b>Max</b>	0.010000	193.392841	195.319759	-9.014005

	Temps	Ph1	ph2	ph3
<b>Count</b>	11.000000	11.000000	11.000000	11.000000
<b>Mena</b>	0.005000	33.166709	50.388904	-83.555613
<b>St</b>	0.003317	132.681218	133.411282	100.730287
<b>Min</b>	0.000000	-137.532547	-164.736548	-280.655612
25%	0.002500	-91.330470	-41.328314	-137.469089
50%	0.005000	0.000000	49.999528	-86.602540
75%	0.007500	174.290756	185.763098	-30.387971
<b>Max</b>	0.010000	193.392841	201.384401	73.980520

(11, 4)

**Défaut détecté aux emplacements suivants :**

	Ph1		ph2		ph3	
	Self	other	self	other	self	other
5	139.151880	-99.779890	49.487653	49.999528	-188.639533	49.780362
6	89.848121	-94.869729	105.560184	20.889209	-195.408304	73.980520
7	31.745877	79.271211	151.299617	201.384401	-183.045495	-280.655612
8	-29.467397	-29.458953	182.228659	182.231714	-152.761262	-152.772760
9	-87.799722	-87.791210	195.319759	195.322782	-107.520037	-107.531572
10	-137.541122	-137.532547	189.291470	189.294483	-51.750348	-51.761936

**IV.7. conclusion :**

Dans un défaut interne, le courant résiduel est trop élevé et dépasse les niveaux de déclenchement, ce qui signifie que la protection différentielle se déclenche ou que les disjoncteurs s'ouvrent pour isoler le transformateur. Cette protection garantit la stabilité en cas de défauts externes, mais en cas de défauts externes provoqués par un courant, la protection contre les surintensités se déclenche pour protéger le transformateur. Cette approche a permis de mieux comprendre le fonctionnement des relais de protection et d'utiliser l'identification des zones de protection pour se protéger contre les défauts internes et externes.

Python est un langage de programmation polyvalent et riche en bibliothèques qui facilite la mise en œuvre de tâches de science des données. Il est devenu un choix populaire pour les

professionnels de l'analyse de données en raison de sa facilité d'utilisation, de sa flexibilité et de sa puissance.

# *Conclusion Générale*

### Conclusion générale

Le transformateur de puissance est un élément déterminant. Ils sont soumis à des nombreuses contraintes nécessitent une surveillance et un suivi réguliers. Un transformateur défectueux produit des situations peuvent parfois avoir des conséquences très graves : techniques, financières, commerciales et d'environnement, donc l'absence de possibilité de détection et d'identification est requise.

Notre travail était composé de quatre chapitres, nous avons commencé dans le premier chapitre en donnant une vision globale du transformateur de puissance tels que (principe de fonctionnement, les types, bilan de puissance, domaine d'utilisation et aussi les types de protections)

Dans le deuxième chapitre, nous avons discuté sur la maintenance des transformateurs de puissance en donnant une compréhension générale sur les types de maintenance le plus utilisées aussi en indiquant les 5 niveaux et que la maintenance a un rôle plus important dans le fonctionnement des transformateurs de puissance elle garantir la plus grande disponibilité des équipements.

Dans le troisième on a discuté sur Analyse du diagnostic de défaut du transformateur de puissance Gaz dissous dans l'huile. La technique est l'un des outils de diagnostic les plus utilisés pour la Détection des pannes et évaluation de l'état. Il permet, par nature et concentration gaz pour déterminer la présence de défauts potentiels ou de modes de défaillance affectant les transformateurs prélèvements automatiques simples et on a parlé sur les méthodes de mesures possibles

Dans le quatrième chapitre on a traité la simulation de protection différentielle des transformateurs de puissance cette dernière détermine la différence de courant aux bornes du transformateur. Elle est faisable à travers un relais différentiel qui fonctionne dans 3 cas : fonctionnement normal, dans un défaut externe, et dans un défaut interne nous avons consacré cette simulation à travers logiciel MATLAB et aussi on a utilisé la méthode intelligente pour analyser et comparer les données à l'aide de logiciel PYTHON car il est devenu un choix

populaire pour les professionnels de l'analyse de données en raison de sa facilité d'utilisation, de sa flexibilité et de sa puissance.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] : CIGRE canada «Etude de cas d'analyse de la réponse en fréquence (FRA) pour l'évaluation de l'intégrité d'un transformateur usagé suite à une réparation », Mémoire de magister, Université de Québec à Chicoutimi, 2019.
- [2] : Jean Sanchez « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance », mémoire de doctorat université de GRENOBLE, 21 Juin 2011.
- [3] : Mezari Naouel, « Diagnostic des transformateurs de puissance », Mémoire de Magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi-ouzou.
- [4] : AMARI MANSOUR chapitre 03 « transformateur triphasé »
- [5] :Mr. BENADDA Abdellah & Mr. BENAHMED Abderrazzak « Contribution à l'étude de maintenance d'un transformateur MT/BT au niveau de l'entreprise SNVI / C.I.T Aïn-bouhekif Tiaret » Université Ibn Khaldoun de Tiaret
- [6] : Dr Mohamed ZELLAGUI « protection transformateur de puissance » institut de formation de l'électricité et du gaz (IFEG) Ain M'lila
- [7] : Benaicha Halima «Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de Production industrielle», mémoire de doctorat, université des sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf, 2015.
- [8] : Samuel Eke «Stratégie d'évaluation de l'état des transformateurs esquisse des Solutions pour gestion intégrée des transformateurs vieillissants», mémoire de Doctorat, université de Lyon, 2018.
- [9] : OMICON « Tests de diagnostic et surveillance des transformateurs de puissance », mars 2020.
- [10] : ANDRIATSIMINDRAMBOLA «Diagnostic des défauts de court-circuit dans Les enroulements d'un transformateur connecte sur un réseau pollue », Mémoire de Master, Université d'Antananarivo, date de soutenance 15 Février 2019.
- [11] : <https://www.legarrec.com/entreprise/type-maintenance-industrielle>

- [12] : [http://efst.univ-mosta.dz/pluginfile.php/14621/mod\\_resource/content/1/Chapitre%2001.pdf](http://efst.univ-mosta.dz/pluginfile.php/14621/mod_resource/content/1/Chapitre%2001.pdf)
- [13] : Rekik Badri «Etude et modélisation des défauts des transformateurs de Puissance», Mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar-Annaba, 2008
- [14] : Nilly Didier, « Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance », Mémoire de Fin d'Etude En vue de l'obtention du diplôme de d'ingénieur CNAM En systèmes électriques, 12 janvier 2017.
- [15] : Metalbi Fethi et Bouhallab Hadj, «Diagnostic et localisation des défauts dans Les enroulements du transformateur », Mémoire de master, Université de Saad Dahlab de Blida, 2012.
- [16] Mouhous Youghorta et Debbi Farid «Méthodologie de diagnostic de défaillances des transformateurs de puissance au niveau de la GRTE», Mémoire de master, Université de Akli Mohand Oulhadj-Bouira, 2019.
- [17] : Djaouti Saad Allah&Serradj Mohamed « Etude de la protection d'un transformateur principal 533MVA » mémoire de master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2017
- [18] : <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7217>
- [19] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Python\\_\(langage\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Python_(langage))

# Les annexes

## La symbolisation d'un transformateur :

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur à deux enroulements
		Transformateur à deux enroulements avec indicateurs des polarités instantanées des tensions
		Transformateur à trois enroulements
		Autotransformateur
		Inductance
		Transformateur de courant

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur triphasé à prises multiples avec commutateur de prises pour manœuvre en charge, couplage étoile - triangle
		Transformateur triphasé couplage étoile zig-zag neutre sorti au secondaire

### EXEMPLES D'AUTOTRANSFORMATEURS

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Autotransformateur monophasé
		Autotransformateur triphasé, couplage étoile
		Autotransformateur monophasé à réglage progressif de la tension

### EXEMPLES DE TRANSFORMATEUR À ENROULEMENTS SÉPARÉS

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur monophasé à deux enroulements avec écran
		Transformateur à prise médiane sur un enroulement
		Transformateur à couplage réglable
		Transformateur triphasé, couplage étoile-triangle
		Transformateur triphasé à quatre prises (non compris la prise principale) couplage étoile-étoile
		Groupe de trois transformateurs monophasés, couplage étoile-triangle

### TRANSFORMATEURS DE MESURE ET D'IMPULSION

		Transformateur de tension
		Transformateur de courant
		Transformateur de courant sans primaire bobiné avec 5 passages du conducteur primaire
		Transformateur de courant à plusieurs primaires pour détection différentielle
		Transformateur d'impulsion avec indicateur de polarité instantanée des tensions



## Programme sur python pour analyser et comparer les données dans un fonctionnement normal et dans un fonctionnement dans un défaut :

```
import pandas as pd
from matplotlib import pyplot as plt
df1 = pd.read_excel('C:\\Users\\baya\\Desktop\\PFE 2023\\PFE
Power TR\\pandas\\myenv\\dataTrnormal.xlsx')
df2 = pd.read_excel('C:\\Users\\baya\\Desktop\\PFE 2023\\PFE
Power TR\\pandas\\myenv\\dataTrdéfaut.xlsx')
print(df1)
print(df2)
are_equal= df1.equals(df2)
print(are_equal)
are_equal = df1['Ph1'].equals(df2['Ph1'])
# Comparer les données des deux fichiers
diff= df1.compare(df2)
print(diff)
#calculate the differences
diff = df1 - df2
print(diff)
mean1= df1['Ph1'].mean()
print(mean1)
statistics1 = df1.describe()
statistics2 = df2.describe()
print(statistics1)
print(statistics2)
df1.shape
print(df1.shape)
def compare_analyze_excel_files(normal_file, defect_file):
    # Lecture des fichiers Excel
    df_normal = pd.read_excel(normal_file)
    df_defect = pd.read_excel(defect_file)

    # Comparaison des fichiers
    diff = df_normal.compare(df_defect)

    # Analyse des différences
    if diff.empty:
        print("Aucun défaut détecté. Le fonctionnement est
normal.")
    else :
        print ("Défaut détecté aux emplacements suivants :")
        print (diff)

# Exemple d'utilisation
normal_file = "C:\\Users\\baya\\Desktop\\PFE 2023\\PFE Power
TR\\pandas\\myenv\\dataTrnormal.xlsx"
defect_file = "C:\\Users\\baya\\Desktop\\PFE 2023\\PFE Power
TR\\pandas\\myenv\\dataTrdéfaut.xlsx"
```

compare\_analyze\_excel\_files (normal file, defect\_file)