

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Option : Maintenance Industrielle

Thème

Contribution à l'étude de maintenance d'un transformateur MT/BT au niveau de l'entreprise SNVI / C.I.T Aïn-bouchekif Tiaret

Préparé par :

Mr. BENADDA Abdellah & Mr. BENAHMED Abderrazzak

Soutenu publiquement le : / / 2020, devant le jury composé de :

Mr. MADANI Ahmed	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Mr. AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. BEY Mohamed	Maître Assistant "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Dr. SLIMANI Halima	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciements

En premier lieu, on remercie Allah le tout puissant qui nous a donné la force et la volonté d'arriver à terme pour achever nos études en master, et de soutenir notre mémoire de fin d'études dans de bonnes et meilleures conditions.

*En second lieu nous remercions vivement notre encadreur **Dr. SLIMANI HALIMA** pour sa disponibilité, ses orientations, ses précieux conseils, ainsi que pour sa patience envers nous durant les longues séances de consultation tenues avec elle.*

Nos vifs remerciements aux membres du jury, sans lesquels notre soutenance n'aurait pas pu avoir lieu, et aussi pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leurs propositions.

Aussi, on n'oublie pas d'adresser nos remerciements à l'administration du Génie Mécanique à sa tête le chef de département et au personnel du secrétariat et du service de scolarité d'avoir bien voulu veillé au bon fonctionnement pédagogique et administratif du département.

Nous n'oublions pas de remercier aussi tous nos camarades et amis de la promotion Maintenance Industrielle 2020 pour leur aide et soutien moral.

Enfin, nous remercions à toutes personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Dédicaces

*À L'AIDE D'ALLAH J'AI PU RÉALISER CE
TRAVAIL QUE JE DÉDIE
À MA MÈRE, QUI M'A ENCOURAGÉ D'ALLER EN
AVANT ET QUI M'A DONNÉE TOUT SON AMOUR
POUR REPRENDRE MES ÉTUDES
À MON PÈRE QUI M'A DONNÉ SON SOUTIEN
PERMANENT DURANT TOUTES MES ANNÉES
D'ÉTUDES
À MES FRÈRES ET MES SŒURS
À MON BINÔME ABDELLAH ET TOUS MES AMIS
SANS EXCEPTION
À TOUS CEUX, QUI DE PRÈS OU DE LOIN ONT
CONTRIBUÉ À LA RÉALISATION DE CE MÉMOIRE.*

Abderrazzak

Dédicaces

JE DÉDIE CE MÉMOIRE :

- À MA TRÈS CHÈRE MÈRE ET À MON CHER PÈRE
POUR LEUR BIEN VAILLANCE ET LEUR

ABNÉGATION DE

M'AVOIR ENCOURAGÉ À TERMINER MES ÉTUDES
DANS DE BONNES CONDITIONS.

- À MES FRÈRES ET À MES TRÈS CHÈRES SŒURS

- À TOUTE MA FAMILLE.

- À TOUS MES AMIS CHACUN DE SON NOM.

- ENFIN, JE LE DÉDIE À MON BINÔME

ABDERRAZZAK ET À TOUS MES CAMARADES DE
CLASSE CHACUN DE SON NOM.

Abdellah

SOMMAIRE

Abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I: Notions générales sur la maintenance

I.1 Introduction	5
I.2 Présentation de la maintenance.....	5
I.2.1 Définition de la maintenance.....	5
I.2.2 Objectif de la maintenance.....	5
I.2.3 Evolution de la maintenance	6
I.3 Importance de la maintenance par rapport à l'activité de l'entreprise	7
I.4 Situation de la fonction maintenance au sein de l'entreprise.....	7
I.4.1 La centralisation	7
I.4.2 La décentralisation	7
I.5 Les différents types de maintenance	8
I.5.1 Maintenance préventive.....	8
I.5.1.1 Maintenance préventive systématique (périodique).....	9
I.5.1.2 Maintenance préventive prévisionnelle.....	10
I.5.1.3 Maintenance préventive conditionnelle.....	11
I.5.2 Maintenance corrective	11
I.5.2.1 Maintenance curative	12
I.5.2.2 Maintenance palliative	13
I.6 Opérations de la maintenance	13
I.6.1 Opérations de la maintenance préventive	13
I.6.2 Opérations de la maintenance corrective	14

I.7 Niveaux de maintenance.....	15
I.8 Les stratégies et les décisions associées.....	16
I.9 Conclusion.....	18

Chapitre II : Présentation des transformateurs électriques

II.1 Introduction.....	20
II.2 Définition	20
II.3 Historique.....	21
II.4 Utilisations de transformateur de puissance	22
II.5 Principe de fonctionnement	23
II.5.1 Schéma électrique équivalent	24
II.5.2 Essais sur les transformateurs	24
II.5.2.1 Essais à vide	25
II.5.2.2 Essais en court-circuit.....	26
II.5.3 Bilan de puissance.....	27
II.5.4 Rendement	27
II.6 Mode de couplage et groupe de couplage.....	27
II.7 Les types des transformateurs des puissances.....	29
II.7.1 Classification des Transformateurs selon leur utilisation.....	29
II.7.2 Classification des Transformateurs selon la méthode de refroidissement.....	31
II.7.3 Classification des Transformateurs selon le milieu isolant	32
II.7.4 Classification des Transformateurs selon la construction du corps (circuit magnétique)	34
II.8 Exploitations d'un transformateur de puissance.....	36

II.8.1 Vieillessement	37
II.8.2 Age du transformateur.....	37
II.8.3 Fiabilité d'un transformateur	37
II.9 Conclusion.....	38

Chapitre III : Maintenance du transformateur MT/BT

III.1 Introduction.....	40
III.2 Définition de SNVI	40
III.2.1 Activité d'entreprise.....	41
III.3 Définition de Transformateur à huile 10/0.4 KV.....	41
III.3.1 Constitution.....	42
III.3.2 Protection.....	43
III.4 Les principaux défauts sur un transformateur.....	43
III.4.1 Défauts mécaniques.....	43
III.4.2 Défauts diélectriques.....	44
III.4.3 Défauts électromagnétiques.....	45
III.4.4 Défauts thermiques.....	46
III.4.5 Défauts électriques.....	47
III.5 Maintenance préventive de transformateur à huile	47
III.5.1 Inspecter l'état général du transformateur	48
III.5.2 Inspection thermique et ventilation.....	48
III.5.3 Resserrer les boulons et les vis des buses mécaniques et des bornes.....	48
III.5.4 Purification et filtrage de l'huile diélectrique	49
III.6 Maintenance corrective de transformateur à huile	49
III.6.1 Réparation de l'équipement.....	49
III.6.2 Remplacement de l'équipement.....	49
III.6.3 Différentes actions de maintenance corrective pour les transformateurs.....	50
III.7 Diagnostique de défauts par la méthode de l'arbre de défaillances.....	50
III.7.1 Définition.....	50

III.7.2 Principe	51
III.7.3 Objectifs.....	51
III.7.4 Logiciel Arbre-Analyste.....	51
III.7.5 Construction d'un arbre de défaillances.....	52
III.7.6 Historique de défaillance du transformateur.....	53
III.7.7 Elaboration de l'arbre de défaillance d'un transformateur MT/BT.....	55
III.8 Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	64
Bibliographie	
Annexe	
Résumé	

Liste des Abréviations

BT	Basse tension
CM	Circuit Magnétique
I₀	Courant à vide
I₁	Courant primaire
I₂	Courant secondaire
I_{cc}	Courant en court-circuit
MT	Moyenne tension
N₁	Nombre de spire primaire
N₂	Nombre de spire secondaire
ONAF	Oil Natural Air Forced
OFAN	Oil Forced Air Natural
OFAF	Oil Forced Air Forced
OFWF	Oil Forced Water Forced
ODAF	Oil Directed Air Forced
ODWF	Oil Directed Water Forced
P_{cc}	Puissance en court-circuit
P_{J1}	Pertes joule au primaire
P_{J2}	Pertes joule au secondaire
P_{fer}	Pertes ferromagnétique
P₀	Puissance à vide
P₁	Puissance primaire
P₂	Puissance utile
Req	Résistance équivalente
Rf	Résistance de fuite de circuit magnétique.

TA	Temps d'arrêt
TBF	Temps de bon fonctionnement
U₁	Tension primaire
U₂	Tension secondaire
V₀	Tension à vide
V_{cc}	Tension en court-circuit
X_{eq}	Réactance équivalente
X_m	Réactance de fuite de circuit magnétique.
Z_{eq}	L'impédance équivalente
ϕ	Flux magnétique
Cos(ϕ)	Facteur de puissance
1/R_f	Résistance shunt
1/X_m	Réactance shunt
η	Rendement
θ	Déphasage

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I-1	Objectif de la maintenance	6
Figure I-2	Evolution de la maintenance de puis 1940	6
Figure I-3	Les différentes politiques de maintenance	8
Figure I-4	Schématisation de la maintenance préventive	9
Figure I-5	Cycle de maintenance préventive systématique	10
Figure I-6	Schématisation de la maintenance préventive prévisionnelle	10
Figure I-7	Schématisation de la maintenance préventive conditionnelle	11
Figure I-8	Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement	12
Figure I-9	Maintenance curative ou réparation	12
Figure I-10	Maintenance palliative	13
Figure I-11	Les éléments relatifs au développement d'une action de maintenance (Knezevic et al., 1997)	16

Chapitre II

Figure II-1	Transformateur monophasé	20
Figure II-2	Transformateur triphasé	20
Figure II-3	Symbole de transformateur de puissance	21
Figure II-4	Schéma d'un transformateur monophasé	21
Figure II-5	Schéma d'un transformateur triphasé	21
Figure II-6	Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique	22
Figure II-7	Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance	24
Figure II-8	Schéma électrique monophasé	24
Figure II-9	Schéma du bilan de puissance d'un transformateur	27
Figure II-10	Couplage étoile-triangle.	27
Figure II-11	Couplage zigzag	28
Figure II-12	Transformateur de distribution	29
Figure II-13	Transformateur de puissance	29
Figure II-14	Autotransformateur	30

Figure II-15	Transformateur essai (Mesure)	30
Figure II-16	Transformateur de puissance spéciale	30
Figure II-17	Transformateur d'instrument	31
Figure II-18	Transformateur de télécommunication	31
Figure II-19	Transformateur à type immergée	33
Figure II-20	Transformateur à type sec	33
Figure II-21	Transformateur de type résine époxy	34
Figure II-22	Circuit magnétique type colonnes	34
Figure II-23	Circuit magnétique type cuirassé	35
Figure II-24	Circuit magnétique avec trois branches	35
Figure II-25	Circuit magnétique avec cinq branches	35
Figure II-26	Section des colonnes	36

Chapitre III

Figure III-1	Vue générale de l'entreprise SNVI Tiaret	41
Figure III-2	Échantillons de produits de l'entreprise SNVI succursale Tiaret	41
Figure III-3	Transformateur à huile 10/0.4 KV	42
Figure III-4	Vue intérieure d'un transformateur 10/0.4KV	42
Figure III-5	Chute d'un transformateur	44
Figure III-6	Joint de traversée écrasé	44
Figure III-7	Amorçage franche entre spires	44
Figure III-8	Effort électrodynamique franche	45
Figure III-9	Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM)	46
Figure III-10	Échauffement excessive d'un enroulement	46
Figure III-11	Point chaud sur connexion boulonnée	47
Figure III-12	Différents événement de l'arbre analyste	52
Figure III-13	Arbre de défaillance du transformateur MT/BT	56
Figure III-14	Arbre de défaillance du transformateur (Défauts Diélectriques)	57
Figure III-15	Arbre de défaillance du transformateur (Défauts électriques)	58
Figure III-16	Arbre de défaillance du transformateur (Défauts Thermiques)	59
Figure III-17	Arbre de défaillance du transformateur (Défauts Électromagnétiques)	60
Figure III-18	Arbre de défaillance du transformateur (Défauts Mécaniques)	61

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I-1 Classification des actions de maintenance **15**

Tableau I-2 Prise de décisions pour les stratégies de maintenance **17**

Chapitre II

Tableau II-1 Essais à vide **25**

Tableau II-2 Essai en court-circuit **26**

Chapitre III

Tableau III-1 Extrait relatif au transformateur **54**

Tableau III-2 Cas supplémentaires de défauts identifiés par l'inspection de
l'équipement en service **55**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Selon l'exploitation plus ou moins intensive du transformateur et sa criticité, l'espacement des actions de maintenance variera dans le temps. Les actions réalisées, ainsi que leurs fréquences, seront le résultat d'une politique de maintenance définie par l'exploitant. Il est possible que tout, ou partie, de ces actions soient sous-traitées à des entreprises spécialisées. Pour cela, notre travail repose sur la maintenance du transformateur MT/BT au niveau de l'entreprise SNVI / C.I.T à Aïn-Bouchekif – Tiaret et apporter une disponibilité maximale de la distribution de l'énergie électrique.

Le choix du cas d'études n'était pas facile du moment où le monde entier passe par une période sanitaire très critique, connue par la propagation de la pandémie du COVID19.

Cette période a connu un confinement partiel et même totale pendant certaine période de l'année pédagogique en cours. Ce qui nous a empêchés de prospecter le secteur industriel de la région, et donc faire le stage pratique de fin d'étude était une chose impossible.

Dans ces conditions, le seul issu qu'on a eu est d'essayer d'au moins avoir un historique sur les défaillances de transformateur étudié par la référence [33], et de le prospérer pour pouvoir le rendre adéquat avec l'objectif de notre thème d'étude. Tandis que les transformateurs de puissance est l'élément clé dans le réseau électrique, sa non fiabilité n'affecte pas uniquement la disponibilité en énergie électrique, mais aussi, elle conduit à des pénalités technico-économiques, très lourdes en conséquences (techniques, financières, commerciales, environnementales), Par conséquent, pour gérer et prolonger la vie du transformateur et réduire ses pannes, quelques mesures sont adoptées. Ceci est nommé le diagnostic de transformateur.

Le diagnostic consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou dans l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Les systèmes de diagnostic peuvent être mis en œuvre en cours d'exploitation (en ligne) ou pendant les phases normales d'arrêt d'exploitation. En cours d'exploitation, le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience. En arrêt d'exploitation (hors ligne), l'objectif est d'évaluer le degré de vieillissement de certains éléments, de décider d'une opération de maintenance préventive ou curative. Les signaux mesurables tels que les courants, les tensions, les vibrations ou bien encore la température peuvent fournir des informations significatives sur les défauts

et ainsi servir à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du transformateur. A partir de ces paramètres, la mise en place de méthodes décisionnelles peut permettre de concevoir des systèmes de diagnostic performants.

Pour mieux arborer notre travail, ce manuscrit est structuré sous forme de trois chapitres :

Dans le premier chapitre on a présenté une mise en valeur de la maintenance comme impérative nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours en faveur d'un meilleur rendement de la production et de l'économie. Quelques définitions concernant la maintenance, d'une manière générale un chapitre coutumiers dans la spécialité.

Le contexte du second chapitre est consacré pour une présentation générale des transformateurs leur définition, sont principe de fonctionnement, ainsi que leur différentes classifications.

Enfin, le troisième et dernier chapitre, est considéré comme la pièce maitresse de ce travail. Il est entièrement consacré à la diagnostique de défauts par la méthode de l'arbre de défaillances qui a été bien détaillé dans cette partie, à l'aide de cette méthode et à la base de l'historique apporté de la référence [33], on a réussi d'établir l'arbre de défaillance du transformateur selon cinq mode de défaut et de précisé la cause principale de l'arrêt dans chaque type de défaut. Et bien-sûr on clôture ce manuscrit par une conclusion générale qui donne un aperçu global de tout le travail réalisé dans ce projet.

Chapitre 01

Notions générales sur la maintenance

I.1 Introduction

Les installations et les équipements ont tendance à se détériorer au fil du temps sous l'influence de causes multiples telles que l'usure et la déformation dues au fonctionnement. Ces détériorations peuvent provoquer l'arrêt de fonctionnement, diminuer les capacités de production, mettre en péril la sécurité des biens et des personnes [1]. La maintenance des équipements de production est une question fondamentale de productivité de l'usine et de qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels. L'objectif de ce chapitre est de mettre en relief la notion de maintenance, son importance et les différentes pratiques existantes selon la taille et la productivité de l'entreprise.

I.2 Présentation de la maintenance

I.2.1 Définition de la maintenance

D'après l'Afnor (NF X 60-010) : « La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé [2]. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût optimal. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management [3] ». Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc...) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité.

I.2.2 Objectif de la maintenance

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la (Figure I-1) sont nombreux [4] :

- ✓ la disponibilité et la durée de vie du bien,
- ✓ la sécurité des hommes et des biens,
- ✓ assurer la qualité des produits,
- ✓ la protection de l'environnement,
- ✓ assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais,
- ✓ l'optimisation des coûts de maintenance,
- ✓ consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple : améliorer la productivité).

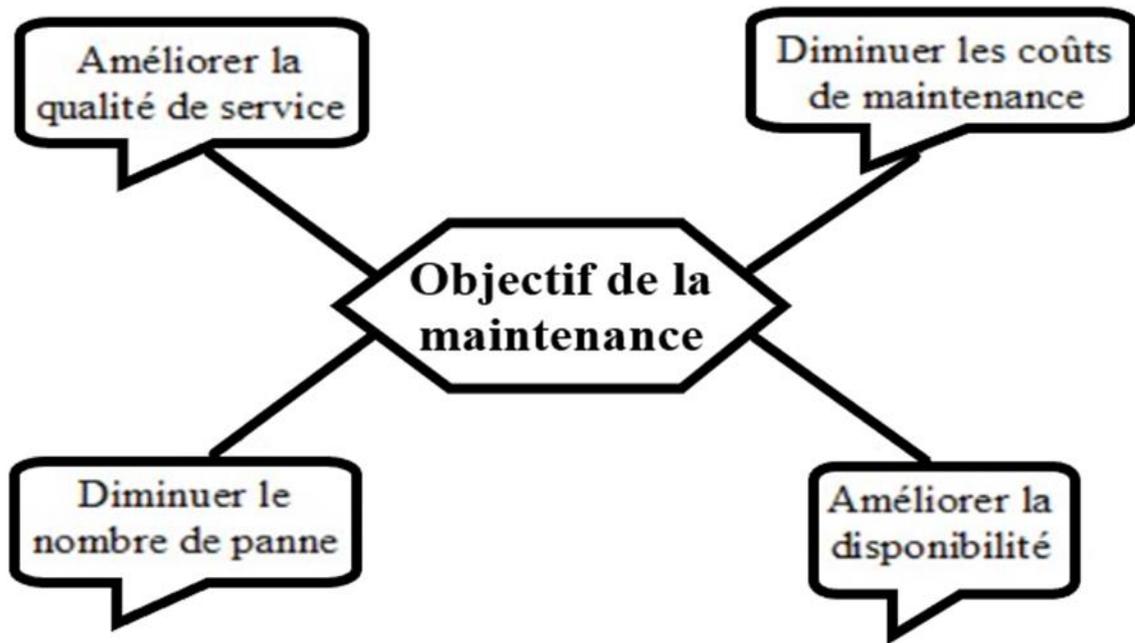


Figure I-1 Objectif de la maintenance.

I.2.3 Evolution de la maintenance

Dans un contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes. Depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (Figure I-2) [5].

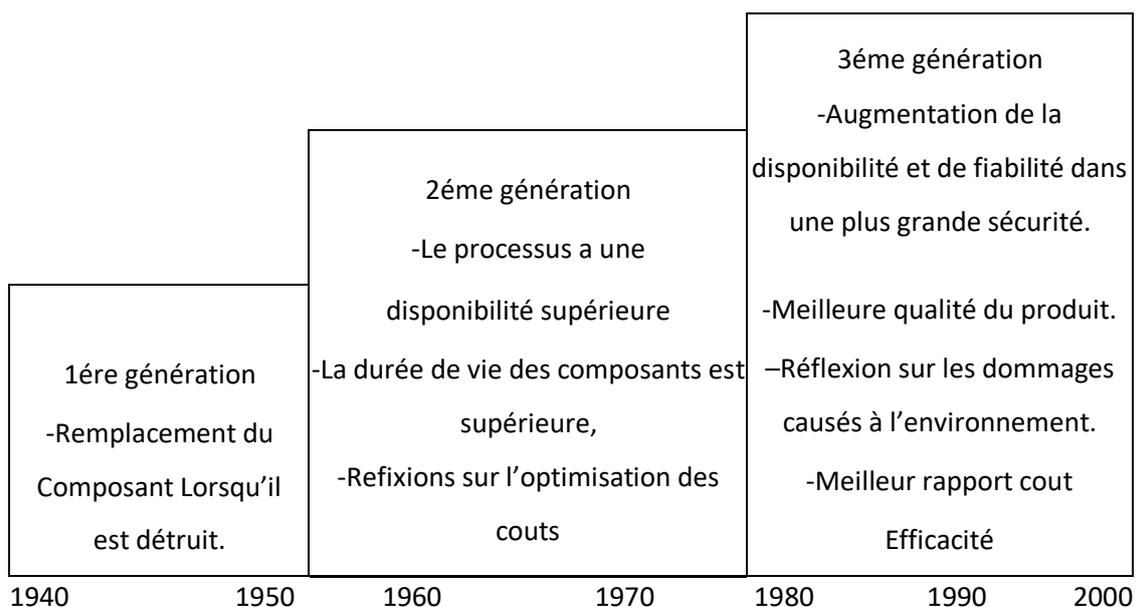


Figure I-2 Evolution de la maintenance depuis 1940 [5].

I.3 Importance de la maintenance par rapport à l'activité de l'entreprise

L'importance de la maintenance diffère selon le secteur d'activité. La préoccupation permanente de la recherche de la meilleure disponibilité, suppose que tout devra être mis en œuvre, afin d'éviter toute défaillance. La maintenance sera donc inévitable et lourde dans les secteurs où la sécurité est capitale [2].

- ✓ Importance fondamentale : nucléaire, pétrochimie, chimie, transports.
- ✓ Importance indispensable : entreprises à forte valeur ajoutée.
- ✓ Importance moyenne : industries de constructions diversifiées, équipement semi automatiques.
- ✓ Importance secondaire : entreprises sans production de série, équipements variés.
- ✓ Importance faible ou négligeable : entreprise manufacturière, faible valeur ajoutée.

I.4 Situation de la fonction maintenance au sein de l'entreprise

Il existe deux tendances quant au positionnement de la maintenance dans l'entreprise [3]:

I.4.1 La centralisation

Toute la maintenance est assurée par un service. D'où les avantages sont [6]:

- ✓ Standardisation des matériels et des méthodes facilitée,
- ✓ Uniformisation des procédures, des codifications des systèmes de gestion de l'information,
- ✓ Utilisation des investissements lourds (en outillage) facilitée,
- ✓ Optimisation de l'emploi des ressources plus aisée,
- ✓ Suivi budgétaire global plus rapide.

I.4.2 La décentralisation

La maintenance est confiée à plusieurs services, de dimension proportionnellement plus modeste, et liés à chacun des services de l'entreprise. D'où les avantages sont [6]:

- ✓ Facilité de constitution d'équipes polyvalentes,
- ✓ Facilité des contacts maintenance- production,
- ✓ Amélioration de la motivation et de la responsabilité du personnel de maintenance,
- ✓ Incitation à la " fixation " de la compétence,
- ✓ Meilleure mise en œuvre de la TPM (Total Productive Maintenance).

I.5 Les différents types de maintenance

La maintenance se divise en deux catégories : Corrective et Préventive [2].

La maintenance préventive consiste en la prévention d'une défaillance pour des raisons de sûreté de fonctionnement ou des raisons économiques ou pratiques, par exemple si le système à entretenir ne peut être entretenu à tout moment. Il existe trois types de maintenance préventive : la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle.

La maintenance corrective est l'intervention effectuée suite à une défaillance. Elle consiste soit en une maintenance curative, soit en une maintenance palliative.

Nous récapitulons ces différentes divisions de la maintenance dans le schéma suivant (Figure I-3).

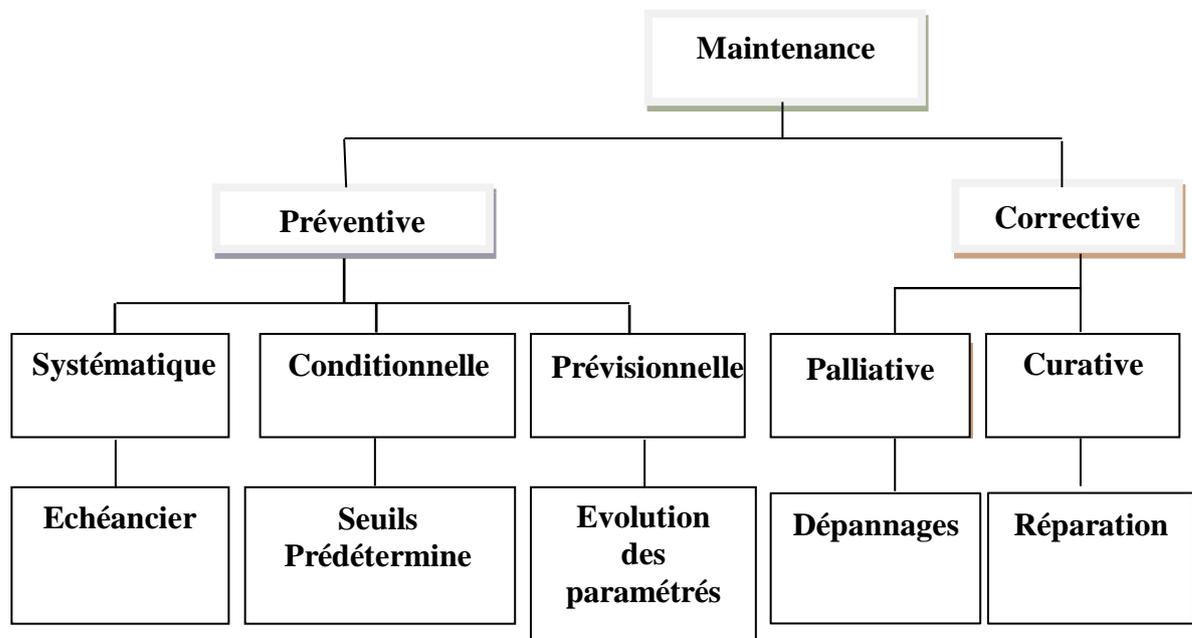


Figure I-3 Les différentes politiques de maintenance [3].

I.5.1 Maintenance préventive

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu (Figure I-4).

Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation [1].

L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Buts de la maintenance préventive [3] :

- ✓ augmenter la fiabilité d'une machine;
- ✓ améliorer la disponibilité de l'atelier de production;
- ✓ augmenter la durée de vie efficace d'une machine;
- ✓ améliorer l'ordonnancement des travaux;
- ✓ faciliter la gestion des stocks;
- ✓ assurer la sécurité, etc.

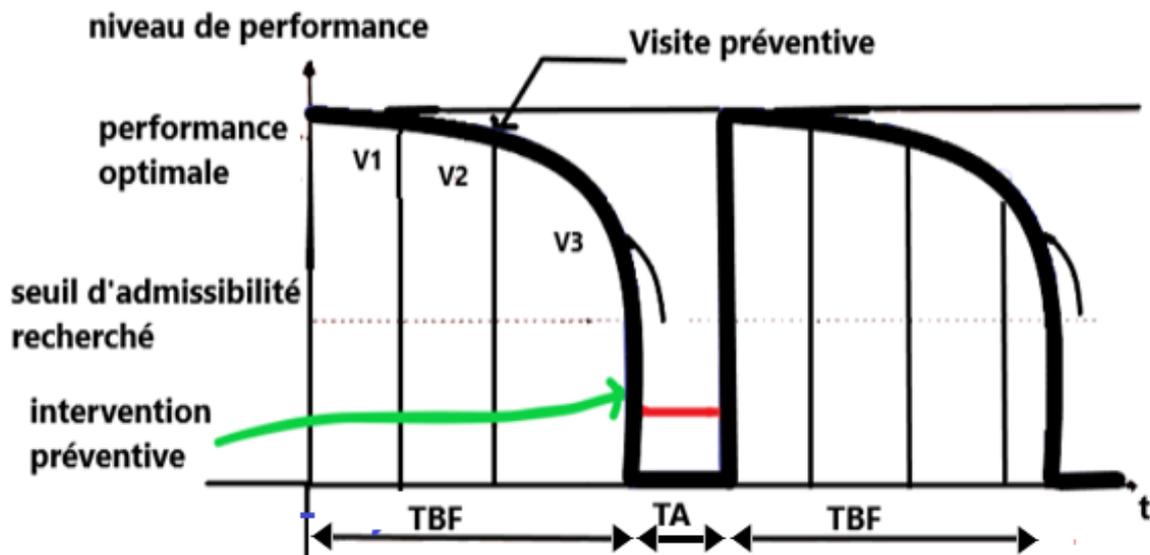


Figure I-4 Schématisation de la maintenance préventive [3].

I.5.1.1 Maintenance préventive systématique (périodique)

Selon la Norme AFNOR X 60-000 La maintenance préventive systématique inclut les actions de maintenance requises par les dispositions légales et/ou réglementaires. Elle inclut au minimum la planification formelle (Figure I-5), la description claire et précise du travail à effectuer (lubrification, changement de filtres, remplacement des roulements, etc.) et l'enregistrement du travail accompli.

La maintenance préventive systématique s'applique à des mécanismes de dégradation dont l'évolution est globalement connue. Ceci explique qu'elle n'inclut pas d'observation préalable de l'état du bien [7].

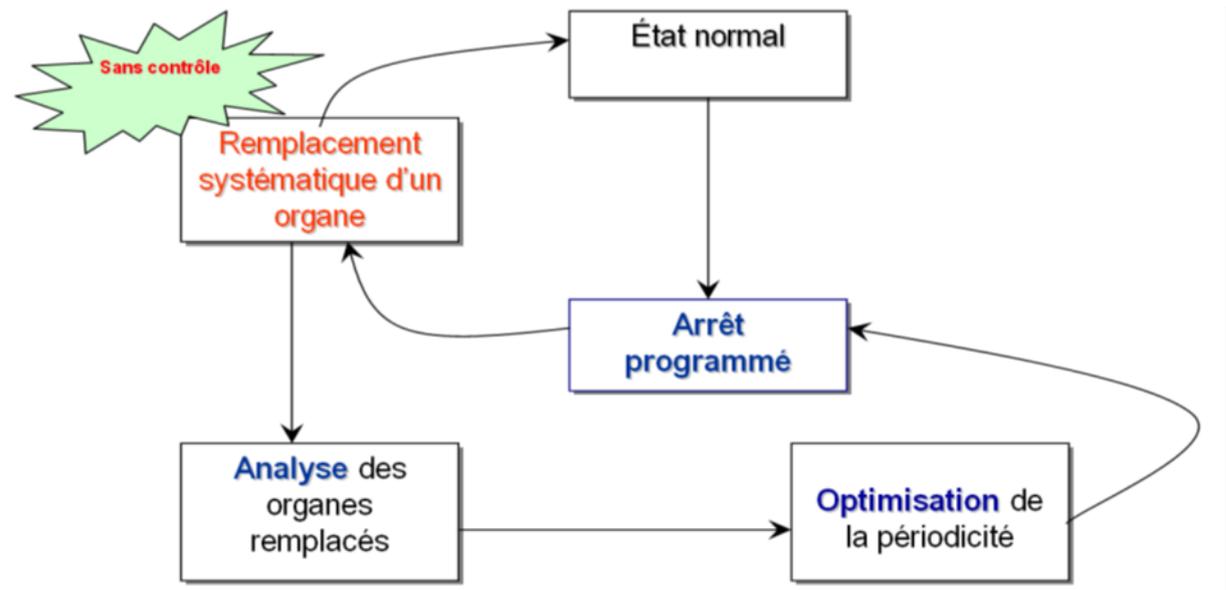


Figure I-5 Cycle de maintenance préventive systématique [4].

I.5.1.2 Maintenance préventive prévisionnelle

Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle, schématisée par la (Figure I-6). Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection [3].

Elle consiste à extrapoler la courbe de dégradation d'un organe pour prévoir une intervention.

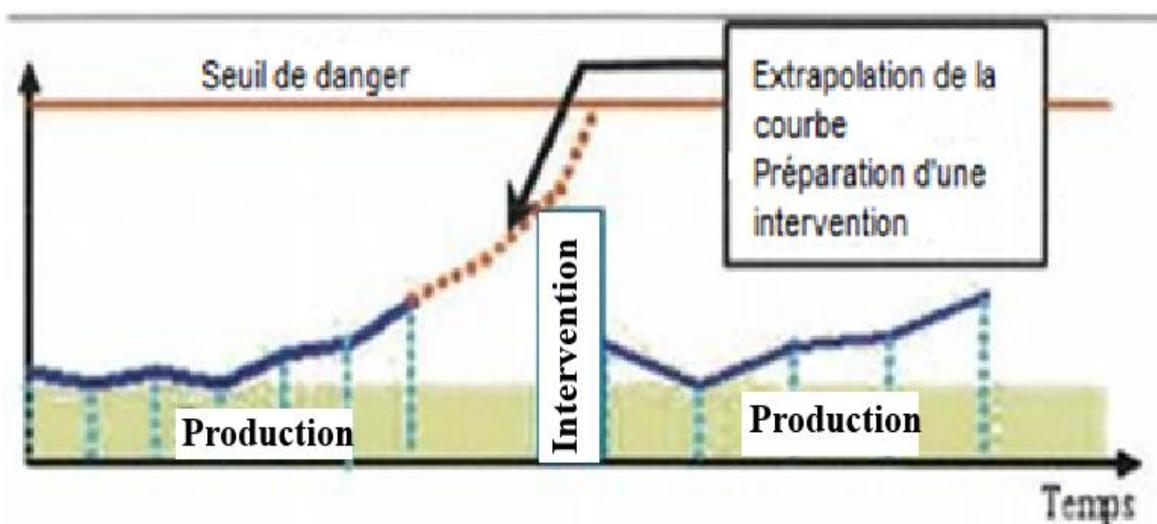


Figure I-6 Schématisation de la maintenance préventive prévisionnelle [3].

I.5.1.3 Maintenance préventive conditionnelle

Selon la Norme AFNOR X 60-000 « Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service ».

Maintenance préventive conditionnelle : « Les remplacements ou les mises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les mises en état nécessaires.» on arrive à optimiser les interventions de maintenance préventive en intervenant uniquement lorsque cela s'avère nécessaire (Figure I-7) [2].

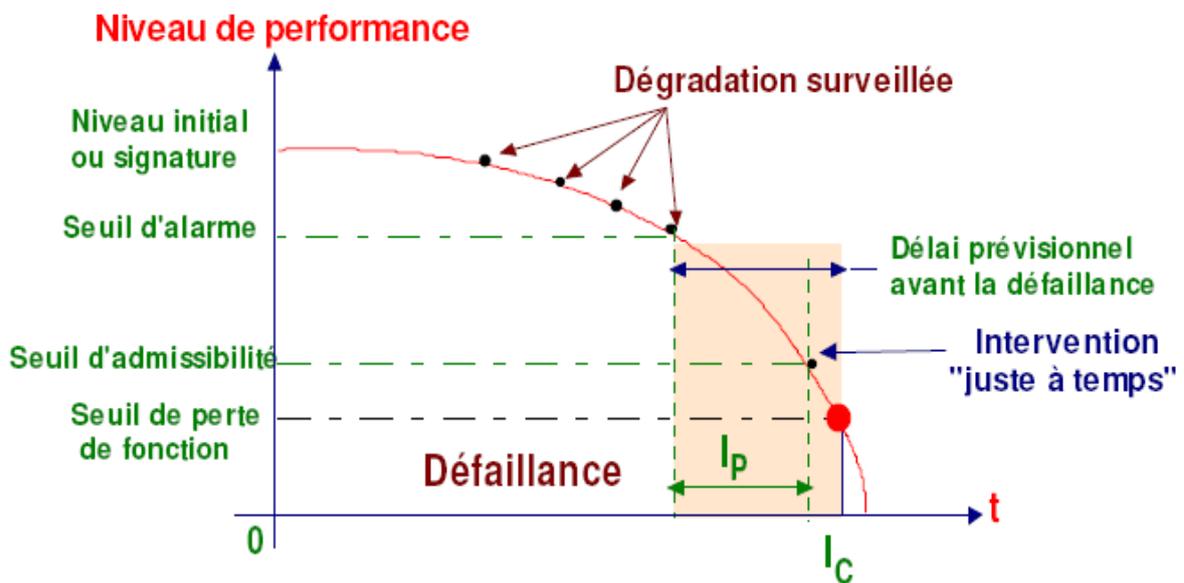


Figure I-7 Schématisation de la maintenance préventive conditionnelle [1].

I.5.2 Maintenance corrective

La maintenance corrective (ou accidentelle) exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)). Elle est la stratégie possédant la règle de décision la plus simple : attendre le constat de la défaillance (Figure I-8). Toutefois l'occurrence d'une défaillance présente des risques sur les trois axes de la performance globale [8] :

✓ économique : perte de disponibilité pouvant impacter l'ensemble de l'entreprise, atteinte de la qualité du produit fabriqué, dégradation des composants environnant, création des retards de livraison...

- ✓ social : situation accidentelle pour le personnel d'exploitation et situation dangereuse pour le personnel de maintenance qui intervient sur un site dont l'état n'est pas maîtrisé,
- ✓ environnemental : situation accidentelle créant une pollution par exemple.

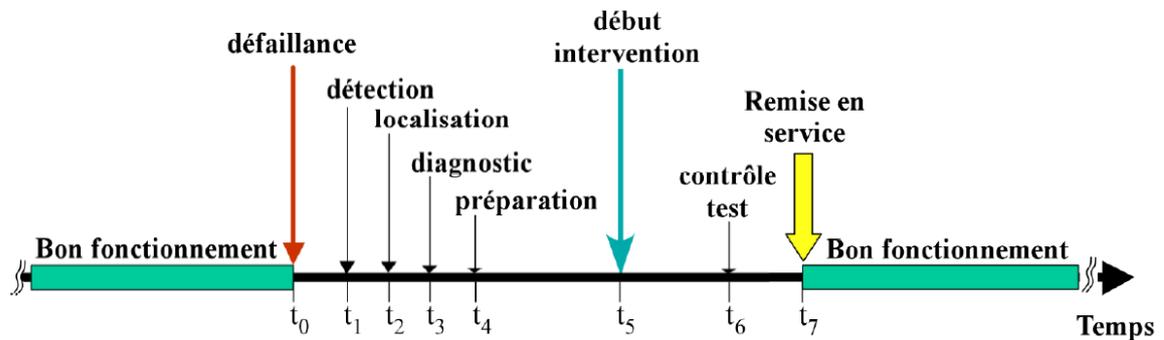


Figure I-8 Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement [5].

I.5.2.1 Maintenance curative

La maintenance curative regroupe les activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise (Figure I-9). Ces activités du type réparation, modification ou amélioration doivent présenter un caractère permanent [2].

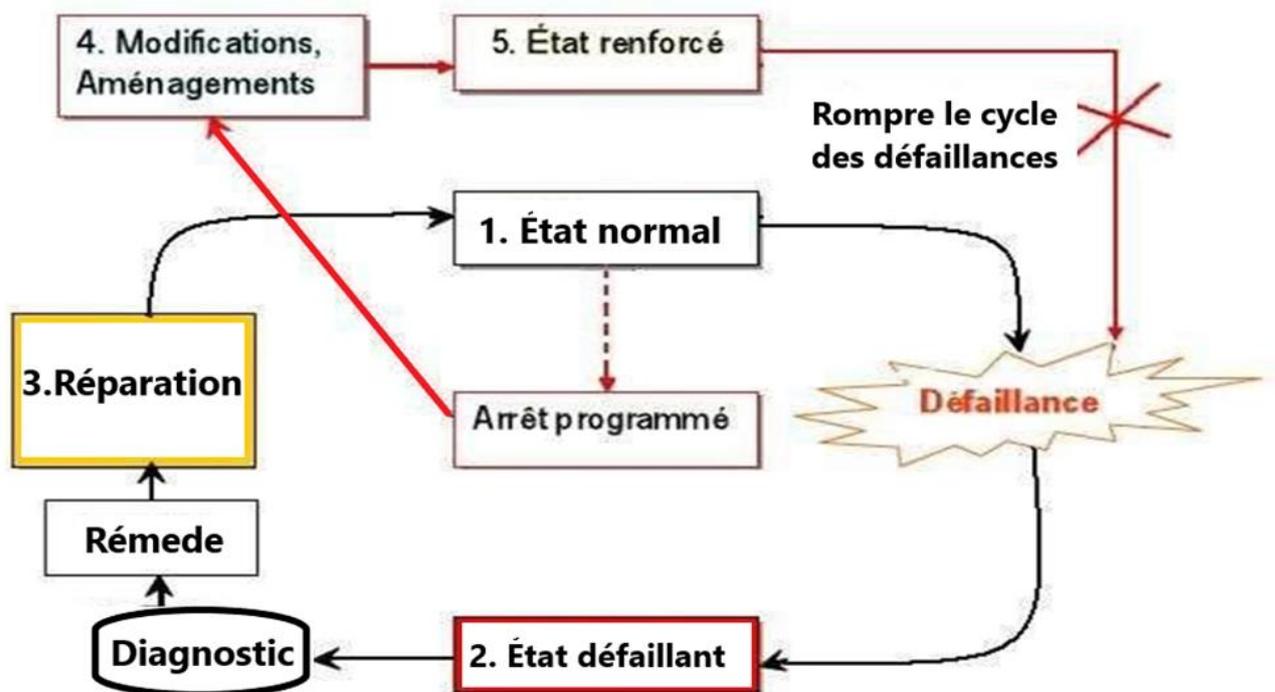


Figure I-9 Maintenance curative ou réparation [3].

I.5.2.2 Maintenance palliative

La maintenance palliative revêt un caractère temporaire, provisoire (Figure I-10) [3]. AFNOR (X 60-000) « Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment «dépannage», la maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui doivent être suivies d'actions curatives » [2] [7].

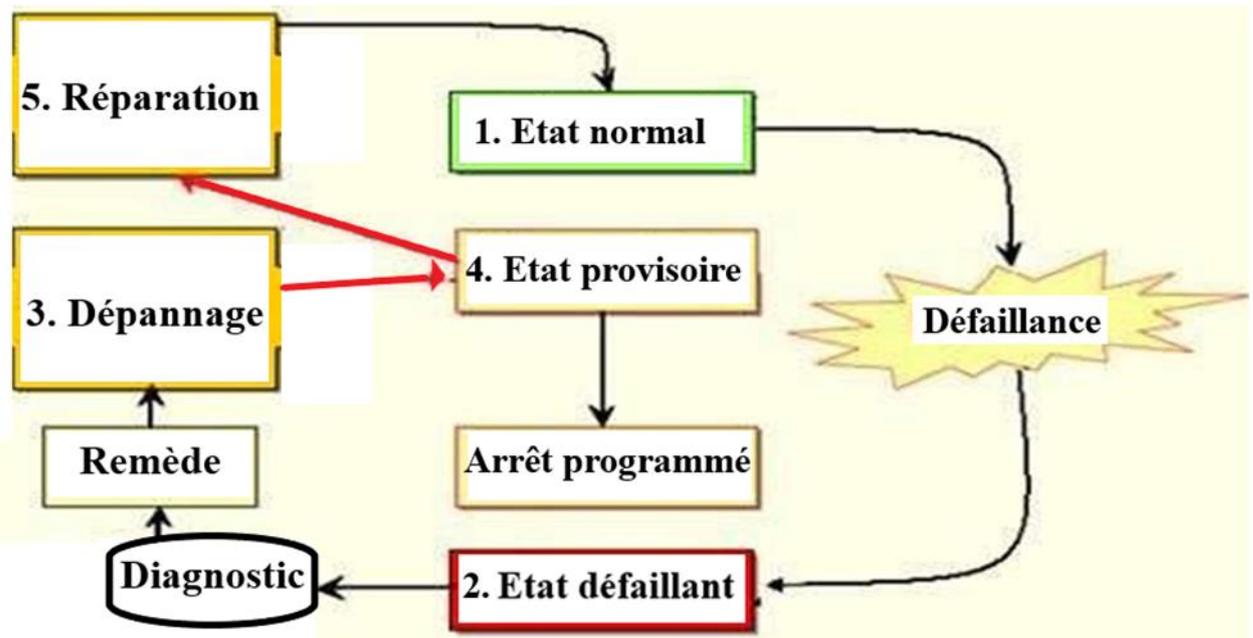


Figure I-10 Maintenance palliative [3].

I.6 Opérations de la maintenance

Il existe des définitions normatives des différentes opérations de maintenance.

I.6.1 Opérations de la maintenance préventive [1]

- **Inspection** : activité de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements (pas de démontage).
- **Contrôle** : vérification de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut :
 - ✓ Comporter une activité d'information;
 - ✓ Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement;
 - ✓ Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

➤ **Visite** : opération de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

➤ **Les opérations de surveillance** : (contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

➤ **Autres opérations** :

✓ **Révision** : ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les deux cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous-ensembles. Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections.

Les deux types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4ème niveau de maintenance.

✓ **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.

I.6.2 Opérations de la maintenance corrective

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) [3] :

- ✓ **test** : c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence.
- ✓ **détection** ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- ✓ **localisation** ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- ✓ **diagnostic** ou identification et analyse des causes de la défaillance.
- ✓ **dépannage, réparation** ou remise en état (avec ou sans modification).
- ✓ **contrôle** du bon fonctionnement après intervention.
- ✓ **amélioration éventuelle** : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- ✓ **historique** ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

I.7 Niveaux de maintenance

La norme AFNOR X 60-010 propose un classement des actions de maintenance en cinq niveaux de complexité (**Tableau I-1**) [9].

Tableau I-1 Classification des actions de maintenance [9].

Niveaux	Détails par niveau des actions selon la norme AFNOR	Définitions simplifiées
1^{er} Niveau	Intervention de réglage simple, prévu par le constructeur Remplacement de consommables Échange d'équipements accessibles en toute sécurité Reprise légère (de peinture)	Action s'effectuant sur le matériel
2^{eme} Niveau	Dépannage par échange standard Contrôle de bon fonctionnement Intervention mineure de maintenance préventive Concept du LRU (Lowest Replaceable Unit) : matériel à maintenir en urgence	
3^{eme} Niveau	Intervention hors matériel réalisée dans l'atelier ordinaire Identification et diagnostic de pannes Réparation par échange de composants fonctionnels Réparation mécanique mineure	Action s'effectuant en d'hors du matériel
4^{eme} Niveau	Intervention de type spécialisé Réglage d'instruments de mesure Vérification d'étalons	
5^{eme} Niveau	Travaux importants de rénovation ou de reconstruction Retour en usine ou en atelier central de maintenance Intervention de grande maintenance Remise à neuf	Intervention de grande maintenance

I.8 Les stratégies et les décisions associées

Cet espace de décision est construit sur l'ensemble des réponses possibles aux questions données par (Knezevic *et al.*, 1997) (Figure I-11).

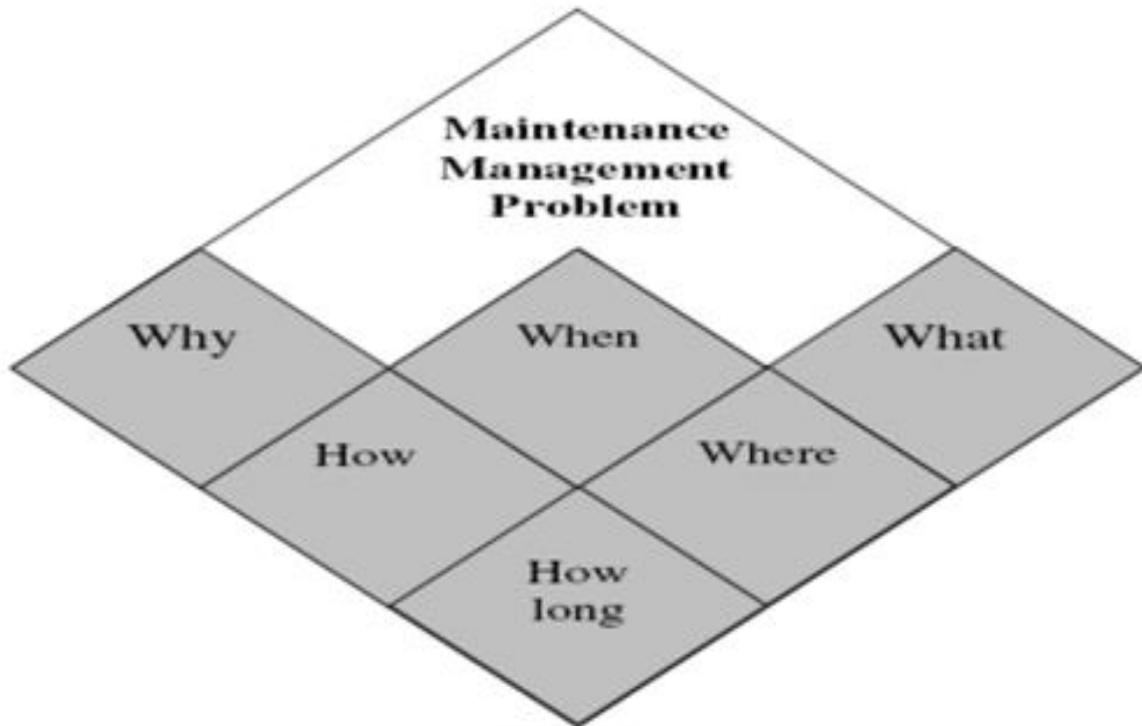


Figure I-11 Les éléments relatifs au développement d'une action de maintenance
(Knezevic *et al.*, 1997) [9].

Les questions POURQUOI, QUAND, QUOI et OÙ sont les questions essentielles auxquelles une décision de maintenance doit répondre. En effet les questions comment et combien de temps, d'ordre opérationnel, sont caractéristiques de l'action envisagée et peuvent être données par le plan de maintenance. Toutefois les réponses peuvent être considérées comme des contraintes sur les actions envisagées. Ainsi le (tableau I-2) synthétise les différents contextes de la décision à partir des définitions issues de (Cho et Parlar, 1991 ; Wang, 2002 ; Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)) à travers les réponses aux questions POURQUOI, QUAND, OÙ et QUOI [8].

Tableau I-2 Prise de décisions pour les stratégies de maintenance [8].

	POURQUOI ?	QUAND ?	OÙ ?	QUOI ?
Maintenance corrective	Corriger une défaillance	Après le constat de la défaillance	Composant défaillant (résultat du diagnostic)	Dépannage ou Réparation
Maintenance préventive	Eviter une défaillance	Avant la défaillance qui est déterminée par le franchissement (présent ou futur) d'un seuil représentatif de la défaillance par un indicateur	Composant associé à un indicateur ou résultat d'un diagnostic	Défini par le plan de maintenance ou par l'expert
Maintenance systématique	Eviter une Défaillance	Un indicateur d'usage	Composant Associé	Défini par le plan de maintenance
Maintenance Conditionnelle	Eviter une défaillance en optimisant le risque d'action Superflue	Un indicateur surveillé atteint un seuil représentatif d'un niveau de dégradation	Composant associé à l'indicateur surveillé ou résultat d'un diagnostic	Défini par le plan de maintenance
Maintenance prévisionnelle	Eviter une défaillance en agissant au meilleur moment vis-à-vis de la dégradation et des performances du composant ou système	Un indicateur prédit de dégradation atteint un seuil	Composant associé à l'indicateur prédit ou résultat d'un diagnostic	Issue d'un processus d'aide à la décision rationalisant les performances du composant ou système

Les stratégies recensées dans le tableau I-2 ont le point commun de se focaliser sur des objectifs de fiabilité ou de disponibilité.

I.9 Conclusion

Pour de nombreuses industries, le mot «maintenance» désigne de plus en plus des activités modernes qui progressent avec des impératifs de qualité totale, de production et de ponctualité. Une attention particulière doit être accordée à la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance qui s'adapte à l'activité de l'entreprise et à son potentiel de développement, afin de répondre aux besoins des consommateurs et d'augmenter la rentabilité. Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur la maintenance industrielle, le but de la maintenance et les différents types de maintenance. Puis nous avons procédé à la présentation des opérations de maintenance. Par la suite nous avons parlé sur les niveaux de maintenance considérés, et l'objectif principal de la politique de maintenance est de rendre l'outil de production dans la meilleure disponibilité et le coût le plus bas.

Chapitre 02

**Présentation des transformateurs
électriques**

II.1 Introduction

Le transformateur est un appareil électrique très simple, mais il est très important dans un réseau électrique car c'est une machine de base pour le transport d'énergie électrique.

Le transformateur permet de modifier la tension et le courant dans un circuit, grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons.

Le contexte de ce chapitre est consacré pour une présentation générale des transformateurs leurs définition, sont leur principe de fonctionnement, ainsi que leurs différentes classifications.

II.2 Définition

Le transformateur de puissance est appareil statique 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 généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique [10]. Il existe des transformateurs monophasé (Figure II-1) et triphasé (Figure II-2).



Figure II-1 Transformateur monophasé [11]. **Figure II-2** Transformateur triphasé [11].

➤ Symbole

La figure (II-3) montre le symbole de transformateur.



Figure II-3 Symbole de transformateur de puissance [12].

➤ Schéma

Les deux Figures (II-4) et (II-5) présentent un schéma d'un transformateur monophasé et triphasé.

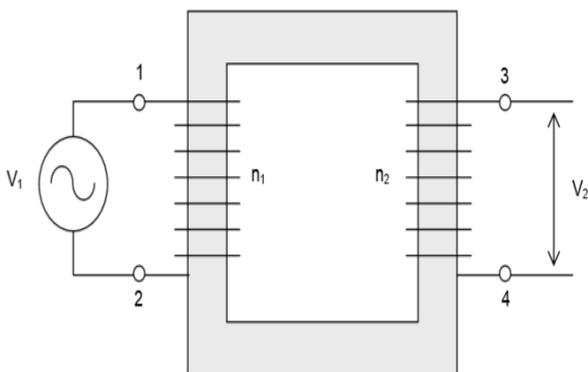


Figure II-4 Schéma d'un transformateur monophasé.

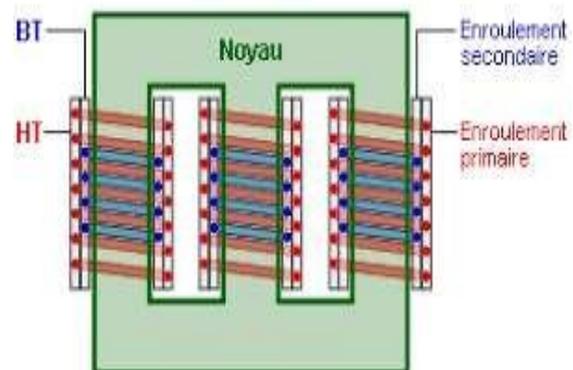


Figure II-5 Schéma d'un transformateur triphasé.

II.3 Historique

Le principe de l'induction électromagnétique est découvert indépendamment par Michael Faraday et Joseph Henry en 1831. Mais Faraday ayant publié le premier ses résultats expérimentaux, le crédit de la découverte lui revient.

Dans les années 1870, des générateurs électriques en courant alternatif apparaissent. On se rend compte qu'en l'utilisant dans une bobine d'induction le système d'ouverture du circuit devient inutile. Le premier système à circuit magnétique en fer est exposé par Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs à Londres en 1882, qui le dénomment générateur secondaire.

En automne 1884, la société Ganz, venu à la conclusion que les circuits magnétiques ouverts ne sont pas la solution pour les usages pratiques et pour réguler la tension, Toujours en automne 1884, la société Ganz réalise le premier transformateur à haut rendement et le livre le 16 septembre 1884.

En 1889, le russe Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski construit le premier transformateur triphasé chez AEG, une société allemande. [13]

II.4 Utilisations de transformateur de puissance

Les transformateurs sont des appareils très employé dans les réseaux électriques et les applications industriels [11].

- la sortie des centrales électriques,
- transport d'énergie électrique,
- distribution d'énergie électrique,
- les applications industrielles (transformateur de four et sous-station ferroviaires).

Un transformateur peut assurer deux fonctions :

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

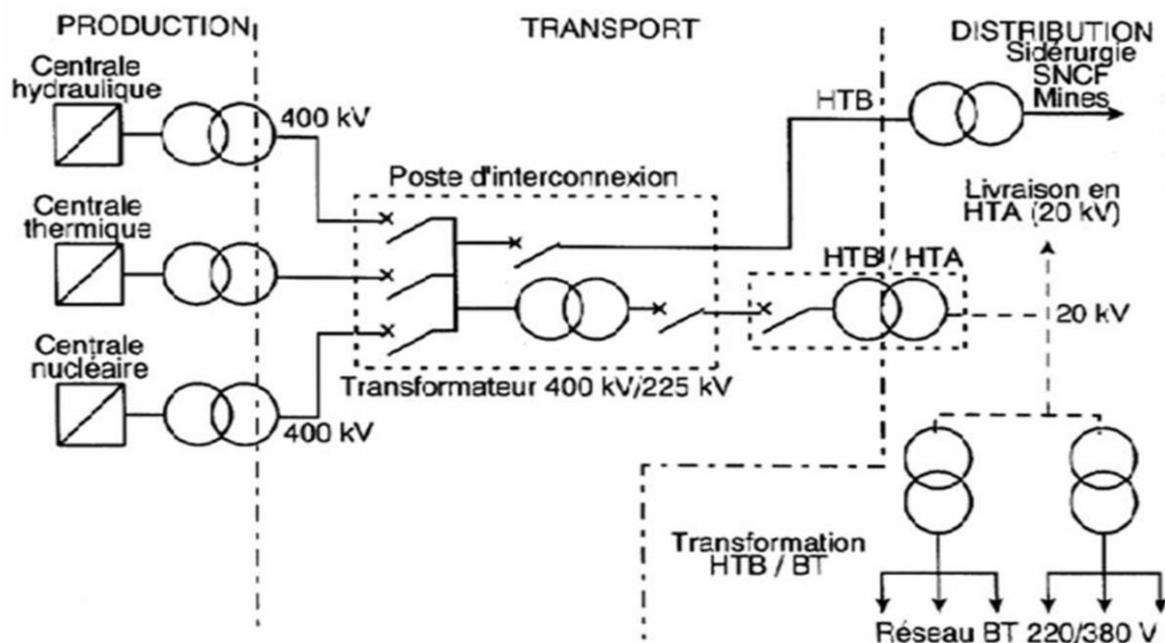


Figure II-6 Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique [14].

II.5 Principe de fonctionnement

L'un des deux bobinages joue le rôle de primaire, il est alimenté par une tension variable et donne naissance à un flux magnétique variable dans le circuit magnétique. Le circuit magnétique conduit avec le moins de réluctance possible les lignes de champ magnétique créées par le primaire dans les spires de l'enroulement secondaire. D'après la loi de Faraday, ce flux magnétique variable induit une force électromotrice dans le deuxième bobinage appelé secondaire du transformateur. Le transformateur ne peut pas fonctionner s'il est alimenté par une tension continue, le flux doit être variable pour induire une f.é.m. au secondaire, il faut donc que la tension primaire soit variable. Le transformateur est réversible, chaque bobinage peut jouer le rôle de primaire ou de secondaire.

Le transformateur peut être abaisseur ou élévateur de tension. La (Figure II-6) représente le schéma électromagnétique du transformateur généralisé, qui constitue la base de l'analyse de n'importe quel transformateur :

- Un circuit magnétique fermé, son rôle est de transmettre le plus efficacement possible l'énergie magnétique du primaire, qui la génère, au secondaire. Il doit donc être :
 - de perméabilité magnétique aussi haute que possible.
 - d'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes.
 - feuilleté (tôles de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur) afin de limiter les courants de Foucault.
 - de résistance électrique aussi élevée que possible, toujours dans le but d'affaiblir les courants de Foucault, à cette fin on utilise des aciers au silicium.
- Deux enroulements :
 - Le primaire alimenté par un générateur de tension alternative de tension U_1 et comportant N_1 spires. Il absorbe un courant I_1 . Le primaire transforme l'énergie électrique reçue en énergie magnétique.
 - Le secondaire comporte N_2 spires ; il fournit, sous la tension U_2 , un courant I_2 au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique reçue du primaire en énergie électrique [15].

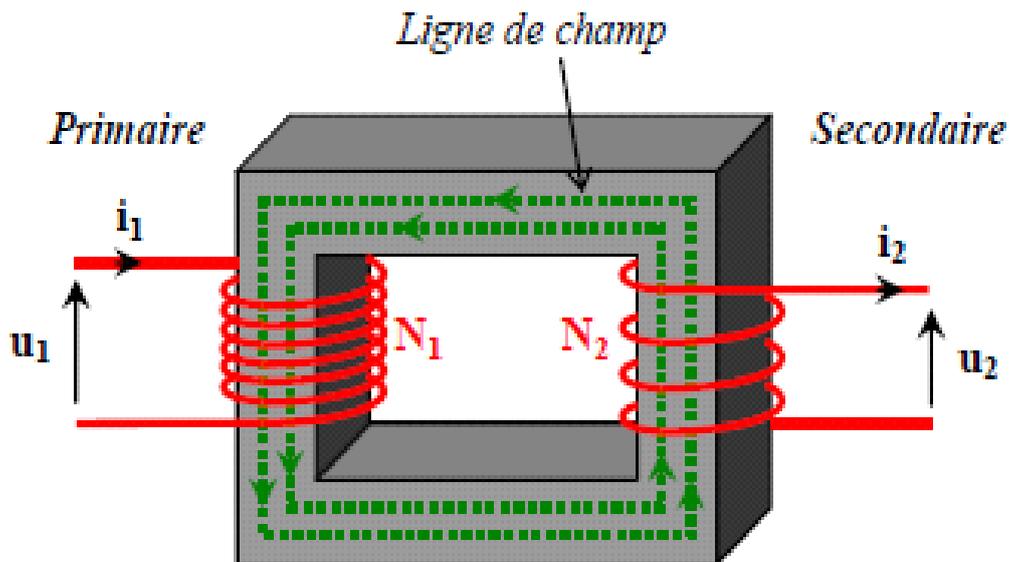


Figure II-7 Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance [16].

II.5.1 Schéma électrique équivalent

Schéma électrique monophasé de transformateur réel représenté ci-dessous.

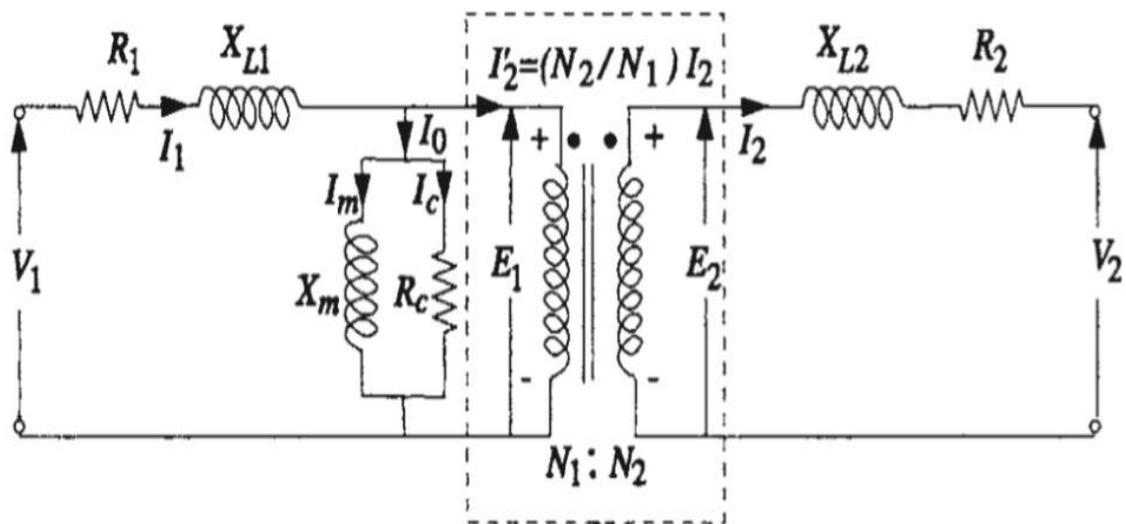


Figure II-8 Schéma électrique monophasé [17].

II.5.2 Essais sur les transformateurs

On peut déterminer à partir de ces essais les paramètres du circuit équivalent des transformateurs représentés dans la (figure II-7). Il s'agit des essais suivants :

II.5.2.1 Essais à vide

L'essai à vide consiste à appliquer la tension nominale au primaire en gardant le secondaire à vide. La mesure du courant, de la puissance et de la tension permet la détermination des paramètres shunts du circuit équivalent. La méthode de calcul de ces paramètres et le montage de mesure utilisé sont résumés dans le tableau (II-1) [12].

Tableau II-1: Essais à vide [11].

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

II.5.2.2 Essais en court-circuit

L'essai en court-circuit consiste à appliquer la tension réduite (valeur minimale) au primaire en gardant le secondaire en court-circuit. Puis on augmente la tension primaire jusqu'à le courant secondaire atteint sa valeur nominale. On mesure la tension, le courant et la puissance de court-circuit [12].

Les montages de mesure utilisés sont résumés dans le tableau (II-2).

Tableau II-2 : Essai en court-circuit [11].

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

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

II.5.3 Bilan de puissance

Le bilan de puissance du transformateur montré par la figure II-8 suivante.

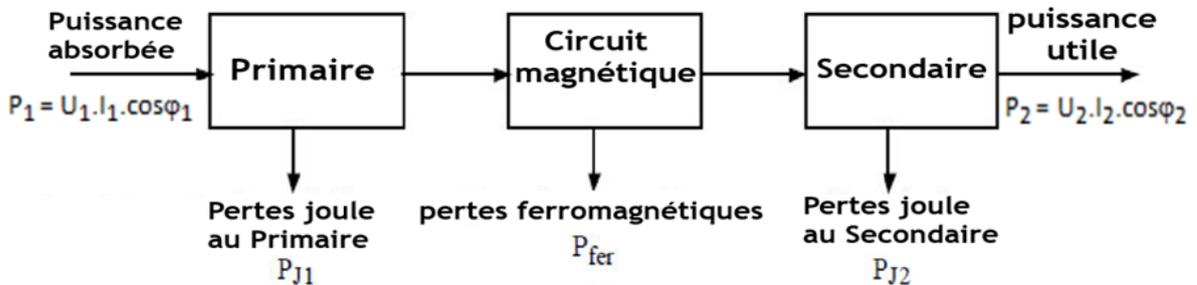


Figure II-9 Schéma du bilan de puissance d'un transformateur.

Bilan de puissance égale :
$$P_1 = P_J + P_{fer} + P_2 \quad (1)$$

II.5.4 Rendement

L'essai à vide donne les pertes fer et l'essai en court-circuit donne les pertes Joule. Numériquement, le rendement est très élevé pour un transformateur industriel ($\eta > 95\%$). le rendement est [15] :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_J + P_{fer} + P_2} \quad (2)$$

II.6 Mode de couplage et groupe de couplage [18]

a. Couplage

Il existe plusieurs façons de connecter les enroulements, pour les transformateurs triphasés de puissance, on rencontre surtout les couplages étoile triangle (figure II-10).

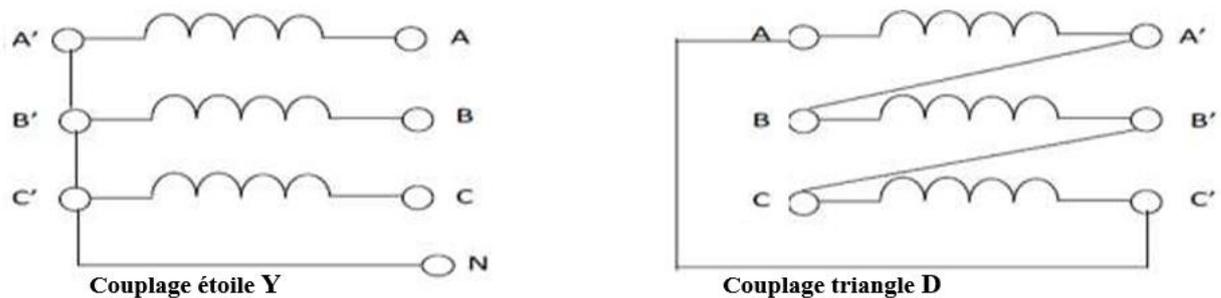


Figure II-10 Couplage étoile-triangle.

Par ailleurs, pour certains transformateurs de distribution, les enroulements du « zigzag » (figure II-11). Dans ce cas, chaque bobinage est divisé en deux moitiés sur deux noyaux différents et mises en série en sens inverse.

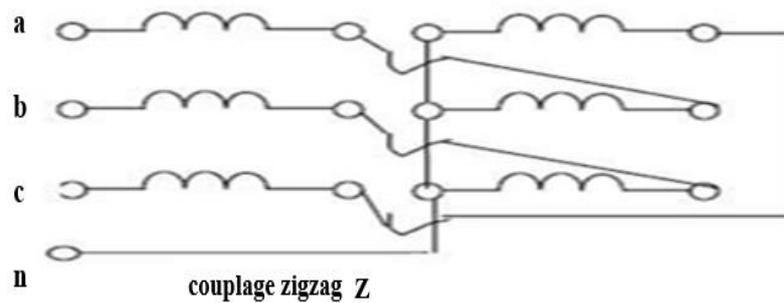


Figure II-11 couplage zigzag.

b. L'indice horaire

L'indice horaire h représente un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduit le déphasage θ entre deux tensions primaire et secondaire homologues avec : $h = \theta/6$

On peut déterminer θ comme suit :

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

c. Conditions de couplage

- Puissance : La puissance totale disponible est la somme des puissances des transformateurs. Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois la puissance du plus petit.
- Réseau : Les transformateurs sont alimentés par le même réseau.
- Connexions et indices horaires : Mêmes longueurs de connexion surtout côté BT. Même indice horaire de couplage.
- Tensions : Les tensions de court-circuit égales à 10 % près ; tensions secondaires très peu différentes selon la charge (0,4%).

d. Choix du couplage

- Le couplage en étoile au primaire et au secondaire (Yy) est utilisé surtout pour les transformateurs de très haute tension.
- Le couplage en étoile au primaire et en triangle au secondaire (Yd) est utilisé pour connecter les générateurs de centrales électriques et de machines industrielles.
- Dans les réseaux de distribution électrique un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (Yz) est courant.

II.7 Les types des transformateurs de puissances

Les transformateurs sont classés en différentes catégories en fonction de leur [19] :

- Utilisation
- Méthode de refroidissement
- Milieu isolant
- Construction de base

II.7.1 Classification des transformateurs selon leur utilisation [19]

Les transformateurs sont classés en fonction de leur utilisation dans les catégories suivantes:

1. Transformateurs de distribution

Ils sont utilisés dans les réseaux de distribution de manière à transmettre de l'énergie à partir du réseau de moyenne tension (MT) sur le réseau basse tension (BT) des consommateurs.

Leur puissance nominale varie généralement de 50 à 1600kVA.



Figure II-12 Transformateur de distribution [20].

2. Transformateurs de puissance

Ils sont utilisés dans les centrales de forte puissance pour éleveur de tension et dans les postes de transmission pour éleveur ou abaisseur de tension. Habituellement, ils sont de puissance supérieure à 2MVA.



Figure II-13 Transformateur de puissance [20].

3. Autotransformateur

Ils sont utilisés pour la transformation de tension au sein de la relativité petite limites, pour le raccordement de systèmes d'énergie électrique de différentes tensions, pour le démarrage des moteurs à courant alternatif, etc.

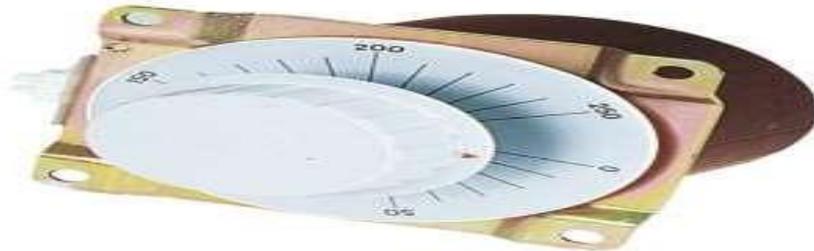


Figure II-14 Autotransformateur [21].

4. Transformateurs essai (Mesure)

Ils sont utilisés pour l'exécution des tests de performance avec une haute ou ultra-haute tension.



Figure II-15 Transformateur essai (Mesure) [21].

5. Transformateurs de puissance spéciale

Ils sont utilisés pour des applications spéciales, par exemple, dans des fours et de soudage.



Figure II-16 Transformateur de puissance spéciale [20].

6. Transformateurs d'instrument

Ils sont utilisés pour la mesure précise de la tension ou de courant.



Figure II-17 Transformateur d'instrument [20].

7. Transformateur de télécommunication

Ils sont utilisés dans des applications de télécommunication destinées à la production d'un signal fiable sur une large plage de fréquence et de tension.



Figure II-18 Transformateur de télécommunication [20].

II.7.2 Classification des transformateurs selon la méthode de refroidissement

L'identification des transformateurs immergés dans l'huile selon le procédé de refroidissement est exprimée par un code de quatre lettres [22].

- La première lettre désigne le fluide de refroidissement interne : **O** pour l'huile minérale (99 % des cas), **K** pour les liquides isolant ayant un point de feu > 300°C, **L** pour les liquides à point de feu non mesurable.

- La seconde lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement interne : **N** pour naturel, **F** pour forcer (présence d'une pompe, mais l'huile circule librement), **D** pour forcer et dirigé (pompe et l'huile est forcée et dirigée à travers les enroulements).
- La troisième lettre indique le fluide de refroidissement externe : **A** pour air, **W** pour eau.
- Enfin la quatrième lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement externe : **N** pour naturel, **F** pour forcer (ventilateurs).

Par exemple, si le milieu de refroidissement interne est une huile minérale, qui est distribué par écoulement naturel, et le milieu de refroidissement externe est de l'air, qui est distribué par convection naturelle, cette méthode de refroidissement est codée comme ONAN (huile naturelle air naturel).

Dans les transformateurs de puissance, diverses méthodes de refroidissement sont utilisées, y compris la circulation d'huile par des pompes ou circulation forcée de l'air par des ventilateurs, ou les deux de ce qui précède. En conséquence, les procédés de refroidissements suivants existent :

- **ONAF** : Oil Natural Air Forced
- **OFAN** : Oil Forced Air Natural
- **OFAF** : Oil Forced Air Forced
- **OFWF** : Oil Forced Water Forced
- **ODAF** : Oil Directed Air Forced
- **ODWF** : Oil Directed Water Forced

Pour transformateurs à sec :

- **AN** : Air Natural
- **AF** : Air Forced

II.7.3 Classification des transformateurs selon le milieu isolant

Les transformateurs sont classés en fonction de leur milieu isolant dans les catégories suivantes:

1. Les transformateurs immergés dans l'huile (Oil-Immersed Transformers):

Le milieu isolant est l'huile minérale ou synthétique (silicium) d'huile.



Figure II-19 Transformateur à type immergée [21].

2. Transformateurs à type secs (Dry type transformer)

Le refroidissement est mis en œuvre avec circulation naturelle d'air et les enroulements sont habituellement isolés avec des matériaux de la classe H ou F. Les matières de la classe H sont conçues pour fonctionner dans des conditions normales, à des températures allant jusqu'à 180 ° C et les matières de la classe F à des températures allant jusqu'à 155 °C.



Figure II-20 Transformateur à type sec [21].

3. Transformateurs à type résine (Résine type transformés)

Le transformateur de type résine est un transformateur de type sec isolé avec une résine époxy coulée sous vide.



Figure II-21 Transformateur de type résine époxy [20].

II.7.4 Classification des transformateurs selon la construction du corps (circuit magnétique) [19]

a. Formes de circuits magnétiques

1. Soit à 2 colonnes formées par un empilage de tôles décalées (couche 1 puis couche 2 et ainsi de suite)

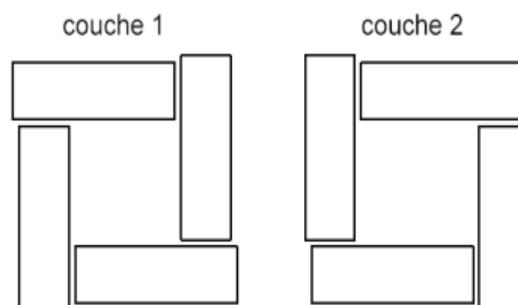


Figure II-22 Circuit magnétique type colonnes.

2. Soit de forme cuirassée c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux magnétique Φ [Wb] se referme par chacun des côtés qui forment la cuirasse.

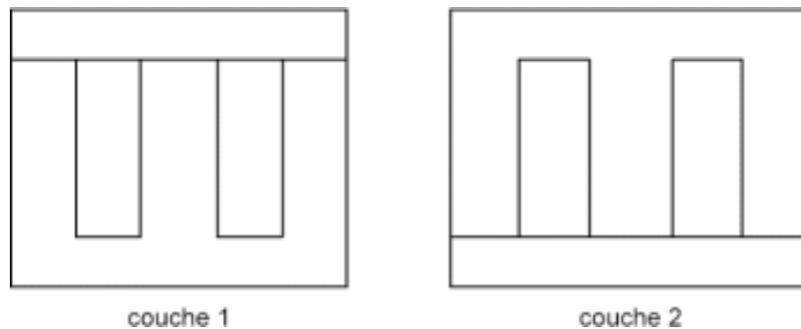


Figure II-23 Circuit magnétique type cuirassé.

b. Différent types de circuits magnétiques

1. **Avec trois branches** (with three legs-vertical limbs-) : Le flux magnétique d'une jambe doit circuler dans les deux autres jambes et aussi le flux passe par les bobines de autres phases, c'est-à-dire le transformateur n'a pas un retour libre du flux.

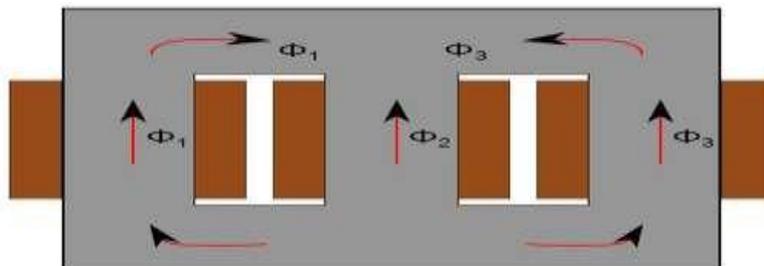


Figure II-24 Circuit magnétique avec trois branches.

2. **Avec cinq branches** (With five legs -vertical limbs-) : Un retour libre du flux par la jambe extérieure.

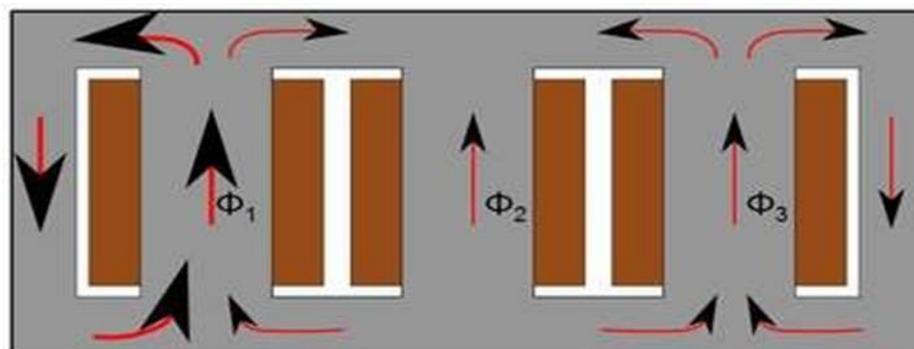


Figure II-25 Circuit magnétique avec cinq branches.

c. Différent types de section des colonnes

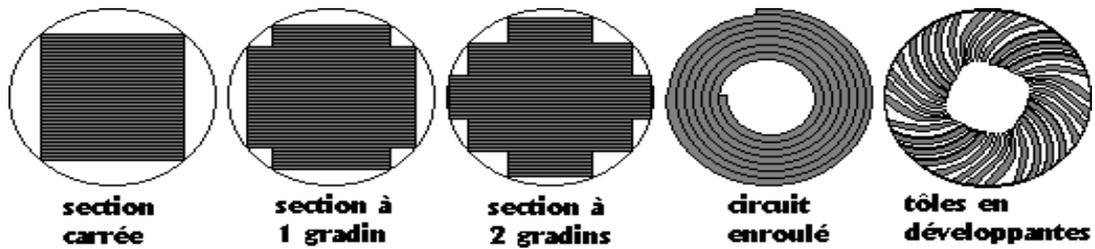


Figure II-26 Section des colonnes [19].

d. Deux matériaux différents sont utilisés pour la construction du noyau [19]

1. Feuille de silicone d'acier (Silicon steel sheet) : La feuille d'acier au silicium qui est utilisé pour la construction de base c'est un alliage constitué de 97% de fer et 3% de silicium. Ce matériau est cristallin. Les tôles d'acier au silicium ont une épaisseur 0,18 à 0,5 mm. Il y'a aussi des feuilles d'acier au silicium pour le fonctionnement à haute induction magnétique (Hi-B).

2. Feuille de métal amorphe (Amorphous metal sheet) : La feuille de métal amorphe qui est utilisé pour la construction de base c'est un alliage constitué de 92% de fer, 5% de silicium et 3% de bore. Ce matériau n'est pas cristallin. Il a 70% inférieur à perte sans charge que l'acier au silicium. L'épaisseur de la feuille de métal amorphe est de 0,025mm, c'est-à-dire, il est environ 10 fois inférieure à l'épaisseur typique de la feuille d'acier au silicium.

II.8 Exploitations d'un transformateur de puissance

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

La durée de vie d'un transformateur est liée à sa résistance à ces contrainte, le suivit, la connaissance de son contexte d'exploitation [17].

II.8.1 Vieillessement

Le vieillissement d'un transformateur est défini par la dégradation irréversible de la capacité de service d'un transformateur, en générale altérée par l'augmentation de la probabilité conditionnelle de défaillance avec le temps (due par exemple à la dégradation des matériaux isolants), dans certains cas la capacité de service peu également diminuer en raison de la modification des contraintes économiques et stratégiques [11].

II.8.2 Age du transformateur

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

La qualité de l'huile est dépendante du cycle de service et du régime de maintenance qui lui sont appliqués. La durée de vie avant défaillance des gros transformateurs est autour de 50 ans. De telles informations pourraient sembler indiquer que les défaillances sont relativement rares dans les 25 premières années mais que le taux de défaillance augmente de façon significative après 40 ans d'utilisation [11].

II.8.3 Fiabilité d'un transformateur

Le transformateur de puissance est un appareil relativement fiable. Sa durée de vie est de l'ordre de quarante ans, dans des conditions normales d'exploitation.

L'ordre de grandeur du nombre de transformateurs de puissance en exploitation dans le monde est introuvable dans la littérature. Plusieurs estimations ont été faites par différents experts internationaux, sur un forum spécialisé, sur un sujet ouvert pour cette thèse.

Le nombre de plusieurs centaines de milliers d'unités apparaissait plusieurs fois selon différentes méthodes de calcul. Les pannes importantes sont rares mais souvent problématiques, en particulier par rapport à l'indisponibilité du matériel. Bien que des actions de maintenance préventive existent, comme les analyses d'huile, il n'existe pas encore de maintenance prédictive qui donne l'état futur d'un appareil [17].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs, son principe de fonctionnement, ces différentes classification, suivi par leurs exploitations (Age, fiabilité et vieillissement).

Vu l'importance de la disponibilité du transformateur dans le domaine industriel notre prochain chapitre sera consacré pour à l'étude des défaillances et leurs différents types de maintenance.

Chapitre 03

**Maintenance du transformateur
MT/BT**

III.1 Introduction

La longue utilisation du transformateur provoque la décroissance de son fiabilité car l'âge à une incidence importante sur l'occurrence des défauts et des défaillances.

La vie d'un transformateur dépend principalement de celle de son système d'isolation, lequel est constitué de l'huile et du papier. Le papier est utilisé pour isoler les enroulements et divers autres composants. Contrairement à l'huile, il ne peut être facilement remplacé. Sa durée de vie est donc directement liée à celle du transformateur et son état de santé est fonction de sa qualité, de celle l'huile, de la température de fonctionnement et la charge du transformateur, mais aussi des variations brusques auxquelles le transformateur est exposé. Durant son fonctionnement, le système d'isolation du transformateur subit des contraintes qui affectent sa qualité. La qualité du système de fonctionnement d'un transformateur est donc dépendante de son cycle de service et de la stratégie de maintenance mis en place par les gestionnaires.

Pour cette raison on a choisi d'étudier dans ce dernier chapitre la maintenance d'un transformateur MT/BT au niveau de l'entreprise SNVI / C.I.T a Aïn-Bouchekif –Tiaret utilisons la méthode de l'arbre de défaillances, Afin d'atteindre le dernier problème qui peut provoquer l'arrêt du transformateur électrique.

III.2 Définition de SNVI

Présentation de la SNVI L'Entreprise Nationale des Véhicules Industriels (SNVI), Entreprise Publique Economique constituée en société par actions depuis mai 1995, produit et commercialise des véhicules industriels.

L'Entreprise nationale de véhicules industriels (SNVI) a pour vocation la conception, la fabrication, la commercialisation et le soutien après-vente d'une importante gamme de produits. Au capital social de 2.200.000.000 DA, détenu en totalité par l'Etat algérien, la SNVI construit des camions et camions-tracteurs, autocars, des autobus, des équipements de carrosserie industrielle et des équipements ferroviaires [23].



Figure III-1 Vue générale de l'entreprise SNVI / C.I.T a Aïn-Bouchekif – Tiaret [23].

III.2.1 Activité d'entreprise

Production de carrosseries industrielles, utilisant les techniques et procédés de chaudronnerie, spécialisée dans la conception et la fabrication de carrosseries industrielles portés et tractés dans les gammes suivantes : Plateaux, Bennes, Citernes à eau, Citernes hydrocarbures, cocottes à ciment, Portes engins, Fourgons frigorifiques/standards et véhicules spéciaux.



Figure III-2 Échantillons de produits de l'entreprise SNVI, succursale Tiaret [23].

III.3 Définition de Transformateur à huile 10/0.4 KV

Un Transformateur abaisseur de sous-station électrique d'une usine industrielle SNVI, triphasé 1600 KVA, 10/0.4 kV, dans le centre de consommation d'énergie électrique présenté dans la (figure III-3).

Pour prévenir l'action néfaste de l'air sur l'isolation des bobines et améliorer le refroidissement du transformateur, on place le noyau magnétique avec les enroulements dans une cuve remplie d'huile minérale.



Figure III-3 Transformateur à huile 10/0.4 KV.

La Figure III-4 suivante montre la constitution d'un transformateur triphasé.

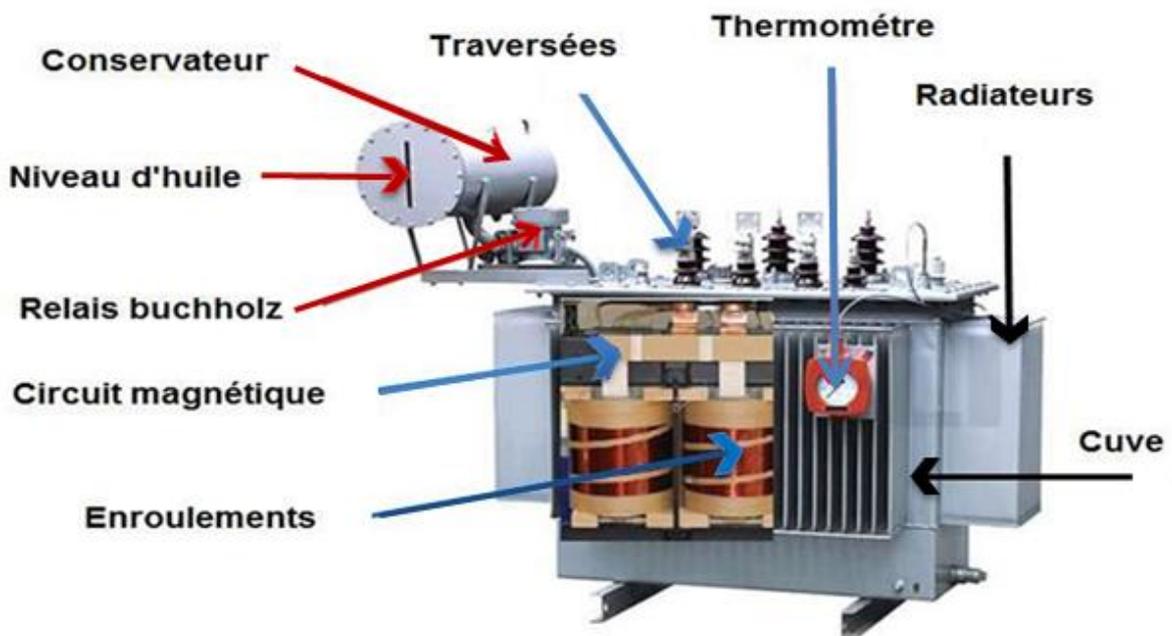


Figure III-4 Vue intérieure d'un transformateur 10/0.4 KV.

III.3.1 Constitution : [Annexe A]

Quelle que soit sa catégorie, le transformateur se compose essentiellement des organes suivants :

- **La partie active** : comprenant le noyau de fer qui a pour fonction de canaliser le flux magnétique et les enroulements bas et moyenne tension dont leur fonction est de produire respectivement un flux variable au primaire et de créer une tension induite au secondaire.
- **Les traversées** sont utilisées pour raccorder les enroulements du transformateur aux lignes électriques à travers la cuve.

- **Le système de refroidissement**, pour dissiper la chaleur et maintenir le transformateur à des températures acceptables. Le mode de refroidissement varie d'un transformateur à un autre selon le niveau de puissance, les exigences et l'utilisation du client.
- **Système d'isolation** : Huile et papier.
- **Divers accessoires** thermomètres, relais Buchholz, des sécateurs, réservoir d'expansion, etc...

III.3.2 Protection

Ils sont classés selon leur principe de fonctionnement et leur mode d'action :

- **Ceux qui agissent directement sur les perturbations** :
Parafoudres, éclateurs, fusibles, vase d'expansion.
- **Ceux qui mesurent des grandeurs caractéristiques du défaut et actionnent des dispositifs d'alarme ou de mise en hors circuit du transformateur** :
Protection différentielle, relais de terre, relais buchholz, relais de surintensité, thermomètres, sondes thermiques.

III.4 Les principaux défauts sur un transformateur [17]

III.4.1 Défauts mécaniques

Les principaux défauts liés aux contraintes mécaniques sont :

- ✓ **Des points chauds sur des régleurs de prises** si ceux-ci sont mécaniquement mal alignés.
- ✓ **Des dégradations d'isolants internes** dues à des vibrations anormales, elles-mêmes dues à un manque de serrage interne à la construction, ou suite à des chocs importants.
- ✓ **La diminution de distances diélectriques**, dues au déplacement interne massif d'un circuit magnétique de plusieurs centimètres, suite à un choc mécanique comme lors de la chute d'un transformateur (Figure III-5).
- ✓ **Les fuites de joints** mécaniquement trop serrés et/ou chauffés (Figure III-6) lors de leur installation puis leur exploitation.



Figure III-5 chute d'un transformateur [20]. Figure III-6 Joint de traversée écrasé [3].

III.4.2 Défauts diélectriques

Les défauts diélectriques sont caractérisés par la tenue en tension des différents éléments de transformateur, cette tenue diélectrique est liée à l'état des isolants les défauts les plus connus dans cette catégorie :

- **L'amorçage des pièces sous tension** : entre elles (entre spires (Figure III-7) ou entre enroulement), ou avec la masse.
- **Des décharges partielles** : au sein d'un isolant, classiquement solide dans les transformateurs. Ce sont des micros décharges locales qui tendent à se propager dans le temps [24].



Figure III-7 Amorçage franche entre spires [25].

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

➤ **Défauts dus aux surintensités**

Les conséquences de ces surintensités sont de trois ordres :

✓ **Efforts électrodynamiques**

Dus aux forces de Laplace dans les bobinages entraînant des contraintes mécaniques élevées. Ces efforts peuvent être particulièrement significatifs lors des efforts de court-circuit, jusqu'à quelques centaines de tonnes. Un exemple franc de déformation mécanique d'enroulement est visible sur la (Figure III-8).

✓ **Échauffements élevés des enroulements**, dégradant les isolants solides en particulier.

✓ **Chute de tension au secondaire**, perturbant la stabilité du réseau.



Figure III-8 Effort électrodynamique franche [21].

III.4.3 Défauts électromagnétiques

En cas de mises à la masse en plusieurs points du circuit magnétique (Figure III-9) ou des éléments métalliques de serrage de la partie active, on peut avoir comme défauts typiquement des points chauds dus à [17] :

✓ **des courants de Foucault induits**, anormalement importants,

✓ **Des dégradations d'isolants internes** dus à ces courants de Foucault anormaux.

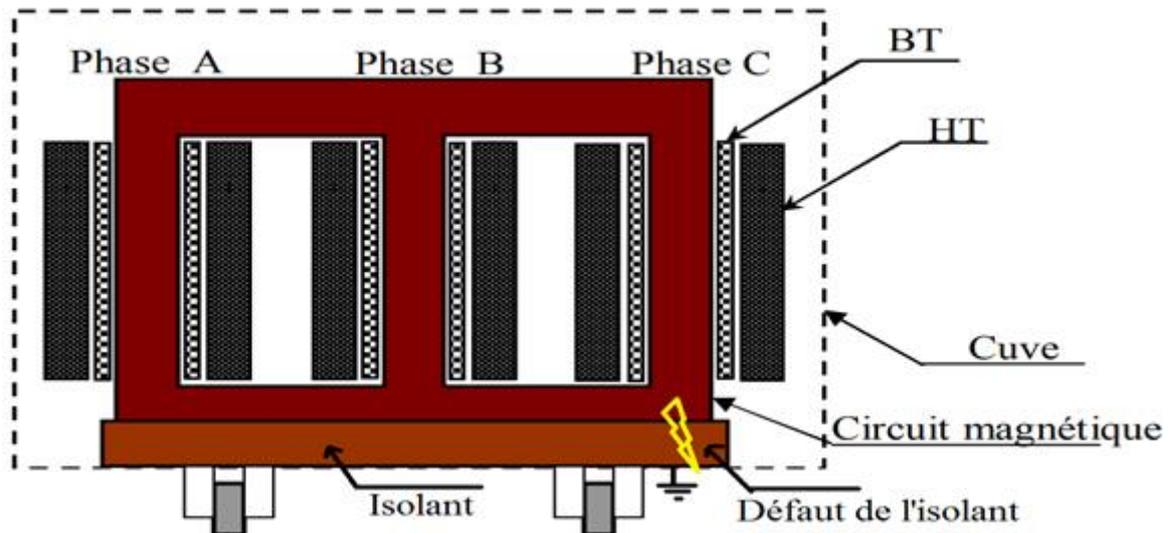


Figure III-9 Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM) [26].

III.4.4 Défauts thermiques

Dans tous les cas, ces contraintes thermiques provoquent le vieillissement.

- ✓ **Des papiers isolants**, et la dégradation de leurs propriétés diélectriques par voie de conséquence. Ceux-ci sont autant plus critiques qu'ils ne sont pas, sauf reconstruction, remplaçables au long de la vie d'un transformateur. Par exemple dans le cas extrême de la (Figure III-10) toute la bobine est noircie de l'intérieur à cause d'un fonctionnement à des températures excessives.
- ✓ **De l'huile isolante** : La température, l'humidité et l'oxygène accélèrent le vieillissement de l'huile, qui perd donc ses qualités d'origine, ce qui peut mener à un défaut [3].

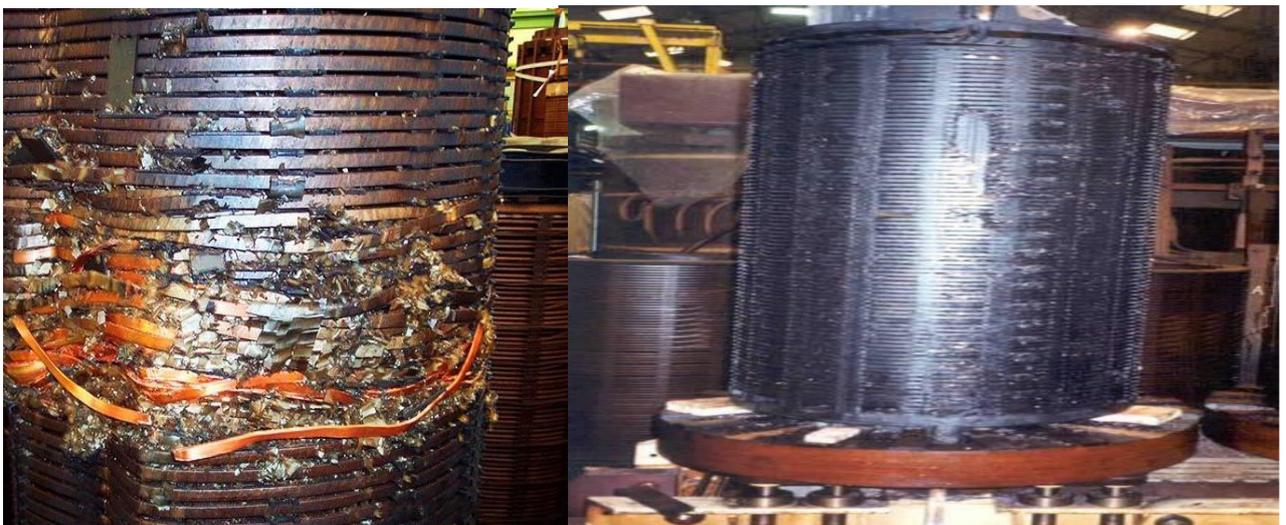


Figure III-10 Échauffement excessive d'un enroulement [17].

III.4.5 Défauts électriques

Le passage de courant à travers des différents contacts dans le transformateur peut produire quelques défauts comme :

- ✓ Création d'un point chaud dus à des échauffements au niveau de quelques éléments de transformateur ce qui provoque la dégradation des isolants.
- ✓ Coupures des circuits électriques.
- ✓ Connexions dans certains changeurs de prises en charge, en particulier les contacts mobiles de l'inverseur s'ils sont peu manipulés, et suivant la qualité du contact, et les conditions d'exploitation, certains de ces raccords peuvent chauffer anormalement.

Un point chaud très avancé sur un contact boulonné est visible sur la (Figure III-11), alors qu'ils voient passer en permanence le courant de charge du transformateur.

- ✓ Connexions des changeurs de prise hors tension : Les contacts mobiles sur les positions en service qui ne sont jamais bougés peuvent se dégrader avec le temps [24].



Figure III-11 Point chaud sur connexion boulonnée [17].

III.5 Maintenance préventive de transformateur à huile

Bien que non exhaustives, les actions préventives de maintenance suivantes peuvent grandement réduire les possibles défaillances du transformateur à huile et la perte d'exploitation qui en résulte [27] :

III.5.1 Inspecter l'état général du transformateur

Brancher les bornes sur la mise à la terre du transformateur pour empêcher tout contact électrique possible lors du nettoyage mensuel [28].

- Nettoyer au moins une fois par mois avec du solvant diélectrique, de l'eau ou une solution d'eau légèrement savonneuse. Ne pas utiliser de détergent ou de solvant.
- Respecter toutes les mesures de sécurité, comme fournir des détecteurs de potentiel, gants isolants et ainsi de suite.
- Vérifier que de mauvaises fixations aux bornes ou de mauvaises connexions du transformateur n'ont pas provoqué de dommages ou ne donnent pas d'étincelles.

Il faut aussi nettoyer la zone de la barre omnibus de mise à la terre et enlever toute obstruction.

- Vérifier qu'il n'y a pas de fuite d'huile au niveau des vannes, des radiateurs, des soudures, des garnitures d'étanchéité, de la tuyauterie de l'échangeur de chaleur ou des protections.
- Vérifier l'état de la peinture du transformateur.
- Vérifier si le transformateur n'émet pas de bruits ou de vibrations anormaux.

III.5.2 Inspection thermique et ventilation

Inspection par thermographie infrarouge des systèmes électriques. Les inspections devraient être faites annuellement ou plus fréquemment (par exemple, trimestriellement ou semestriellement); Si le transformateur est à l'intérieur, s'assurer que le bâtiment est bien ventilé pour empêcher une surchauffe,

Les lectures d'affichage de la tension, du courant, de la température, du niveau de liquide, de la pression / dépression devraient être enregistrées afin de s'assurer qu'elles sont dans les limites autorisées [27].

III.5.3 Resserrer les boulons et les vis des buses mécaniques et des bornes

Chaque fois que le transformateur est hors service, effectuer un « entretien parce que l'occasion s'en présente » en resserrant les buses mécaniques et les bornes.

III.5.4 Purification et filtrage de l'huile diélectrique

Analyser le liquide isolant par rapport à la rigidité diélectrique, à l'acidité, à la coloration, au moins une fois par an. En complément, une analyse des gaz dissous dans l'huile devrait être réalisée annuellement ou plus souvent si le pouvoir diélectrique est près de la limite inférieure [27].

III.6 Maintenance corrective de transformateur à huile [28]

La maintenance corrective est effectuée pour réparer toute panne de l'équipement et inclut les catégories suivantes :

- Prévues : Les réparations nécessaires sont connues à l'avance et donc tous les éléments requis sont disponibles au moment de la réparation.
- Imprévues : Requise en cas de problème qui provoque une panne de l'équipement essentiel. Connue également sous le nom de maintenance d'urgence ou «en cas de panne ». La maintenance corrective est fréquemment réalisée dans des conditions d'urgence pour seul objectif : le rétablissement du service.

III.6.1 Réparation de l'équipement

La réparation de l'équipement est nécessaire dans les cas suivants :

- Lorsqu'il est déterminé que les conducteurs du bobinage doivent être remplacés après un test de cavitation ou un test du rapport du nombre de spires,
- Lorsque des températures élevées sont détectées en fonctionnement, qui peuvent indiquer que le niveau d'huile est bas et doit être rempli,
- Lorsque le transformateur a été physiquement endommagé par une cause extérieure, et.
- Lorsque le transformateur est endommagé par un problème électrique combiné à une défaillance des systèmes de protection.

III.6.2 Remplacement de l'équipement

Le remplacement du transformateur est recommandé lorsque ce dernier a pour une raison ou pour une autre, perdu son efficacité ou sa fiabilité. On trouvera ci-après une liste des causes de la perte d'efficacité du transformateur :

- Facteur de charge élevé : Un facteur de charge élevé fait fonctionner le transformateur de manière inefficace, en outre, la chaleur dégagée par le courant électrique requis par la charge endommage les propriétés de l'huile et provoque des inefficacités. Des facteurs de charge élevés peuvent provoquer un court-circuit et endommager le transformateur de manière irréparable.

- Déséquilibre de tension, d'intensité et de puissance – Dans certaines circonstances, il est préférable de remplacer le transformateur si ces déséquilibres ne peuvent être résolus. Un système défectif de protection, combiné à un problème électrique, peut provoquer une défaillance au niveau du transformateur, qu'il faudra alors peut-être remplacer.

III.6.3 Différentes actions de maintenance corrective pour les transformateurs

Ci-après figure une liste d'actions de maintenance corrective pour les transformateurs sur la base de différents problèmes :

- Température excessive: la surchauffe peut être causée par un refroidissement insuffisant, un niveau de liquide bas, des boues dans le fluide du transformateur, une température ambiante élevée. Doit être changé le niveau d'huile et la ventilation.

- Défaillance d'isolation de l'enroulement : les causes de ce type de défaillance peuvent être dues à un défaut de court-circuit, la foudre, une surcharge ou une surintensité.

La solution utilisez un autre transformateur pour partager la charge électrique ou remplacez-le par un avec une puissance suffisante.

- Modifications des propriétés de l'huile. Ceci est principalement dû à l'humidité, La solution est de filtrer ou de remplacer l'huile isolante.

III.7 Diagnostic de défauts par la méthode de l'arbre de défaillances

III.7.1 Définition

La méthode de l'arbre de défaillance ou (AdD) (en anglais Fault Tree Analysis ou « FTA ») est aussi appelée méthode de l'arbre des causes. Souvent utilisée en conjonction avec une AMDEC. L'arbre de défaillance est une représentation graphique de type arbre généalogique. Il représente une démarche d'analyse d'évènement. Il est construit en recherchant l'ensemble des événements élémentaires, ou les combinaisons d'évènements, qui conduisent à un événement redouté [29].

La méthode de l'arbre de défaillance est une méthode d'analyse technique concernant la fiabilité/sécurité qui, partant des défaillances du système, descend jusqu'aux causes individuelles ou combinées tracées en cascade.

III.7.2 Principe

Pour construire un arbre de défaillance, toutes les combinaisons possibles d'événements entraînant la réalisation de l'événement non désiré sont recensées. Ensuite, nous présentons graphiquement ces combinaisons au moyen d'une structure arborescente dont l'événement non désiré est le tronc. Nous construisons l'arbre de manière déductive, jusqu'à l'obtention des causes premières pouvant entraîner l'événement redouté, ce sont les événements de base. L'arbre de défaillance est la combinaison des événements de base menant à l'événement redouté, les combinaisons étant construite à l'aide de portes logiques [30].

III.7.3 Objectifs

L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un événement redouté pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires.

Ce type d'analyse permet, dans le domaine de la maintenance [29] :

- ✓ D'améliorer la conception,
- ✓ De faire un diagnostic rapide,
- ✓ De prévoir une meilleure logistique [31].

III.7.4 Logiciel Arbre-Analyste

Arbre analyste est conçu par des ingénieurs spécialistes dans le domaine de la sûreté de fonctionnement dans le but de proposer un outil qui réponde aux mieux aux besoins des études de sécurité et de fiabilité des systèmes [31].

1 Evènements

La symbolisation des évènements a pour but de faciliter la désignation entre les différents types d'évènements.

2 Portes logiques

Les portes logiques (ou connecteurs logiques) sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET, OU (Figure III-12). Les portes fonctionnent comme suit :

- OU : l'évènement en sortie/supérieur survient si, au moins, un des évènements en entrée/inférieur survient/est présent;
- ET : l'évènement en sortie/supérieur survient seulement si tous les évènements en entrée/inférieur surviennent/sont présents.

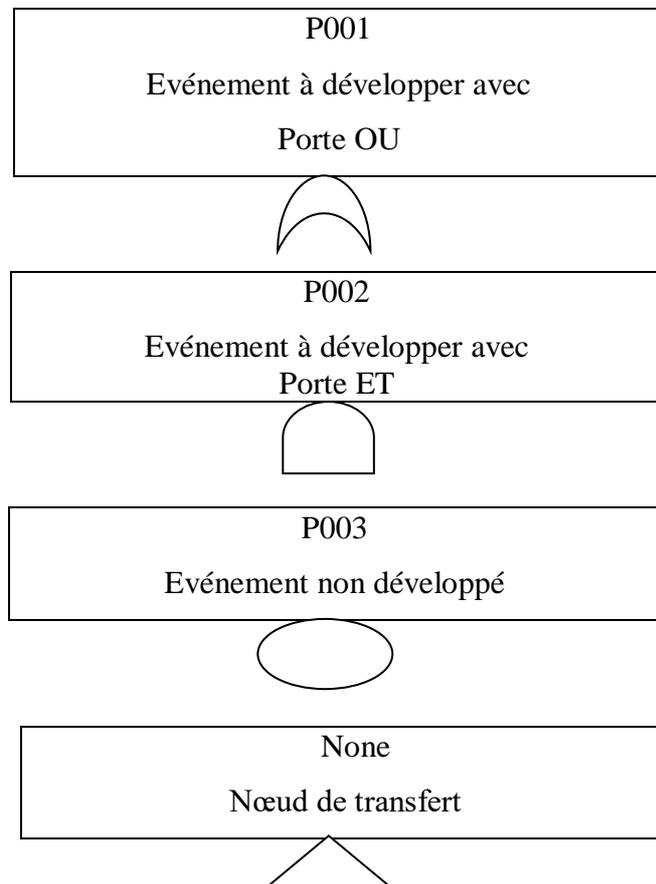


Figure III-12 Différents évènements de l'arbre analyste [31].

III.7.5 Construction d'un arbre de défaillances [32]

Cette construction est détaillée dans plusieurs normes industrielles dont la norme **CEI 61025**.

Étape 01 : Évènement sommet (évènement indésirable)

La première étape réside dans la définition de l'évènement à étudier, cet évènement est appelé évènement sommet, évènement indésirable ou encore évènement redouté. Cette étape est cruciale quant à la valeur des conclusions qui seront tirées de l'analyse. Il est important de définir l'évènement de façon explicite et précise. L'arbre de défaillances se veut être une représentation synthétique, le libellé de l'évènement sommet devra être court.

Ce libellé sera, en général, trop court pour définir précisément l'événement et lever les ambiguïtés. Il devra donc y avoir :

- un libellé bref, mais aussi évocateur que possible dans la boîte qui représente l'événement sommet dans l'arbre,
- un texte complémentaire apportant toutes les précisions utiles sur la définition de l'événement.

Cette remarque est aussi valable pour tous les événements qui vont figurer dans l'arbre.

Etape 02 : Evènement intermédiaires

L'événement sommet étant défini, il convient de décrire la combinaison d'événements pouvant conduire à cet événement sommet. Les événements intermédiaires sont donc des événements moins globaux que l'événement sommet. Une fois ces événements définis, ils seront liés à l'événement sommet via un connecteur logique. Ces événements intermédiaires peuvent être, à leur tour, redéfinis par d'autres événements intermédiaires plus détaillés.

Etape 03 : Evènements de base, transfert et conditions

Il est possible de prendre en compte des événements sur lesquels les informations sont insuffisantes pour les décomposer davantage ou encore qu'il n'est pas utile de développer plus, ces événements sont appelés événements non développés. Lors de la construction de gros arbres de défaillances, il est pratique d'utiliser des portes de transfert, permettant ainsi de rendre la lecture et la validation de l'arbre plus aisée. Ces portes signalent que la suite de l'arbre est développée sur une autre page. Les événements de base (ou événements primaires) sont les événements les plus fins de l'arbre, il ne sera pas possible de les détailler davantage; ils concernent la défaillance (électrique, mécanique, logiciel...) d'un élément du système.

III.7.6 Historique de défaillance du transformateur

En vue de l'établissement de l'arbre de défaillance d'un transformateur et vue la non disponibilité des historiques dans la société visé, nous avons basée sur une historique d'un poste de transformation MT/BT. Les deux tableaux III-1 et III-2 représentent les défauts enregistrés pendant une période du groupe Base TC10 (Base TC10 c'est un poste de transformation au nord de la France) [33].

Tableau III-1: Extrait relatif au transformateur uniquement du groupe Base TC10 [33].

	Défauts	Type	Inspection	H2	CH4	C2H 2	C2H 4	C2H 6	CO	CO2
1	PD	U	Décharges partielles à faible énergie et formation de cire X	32930	2397			157	313	560
13	DL	U	Étincelles continues entre les coupelles métalliques et les boulons mis à la terre dans l'enroulement	543	120	1880	411	41	76	2800
32	DL	U	Contamination provenant de l'OLTC	4	1	52	7	2	93	519
33	DL	U	Défaut de fonctionnement de l'OLTC	1900	285	7730	957	31	681	732
38	DH	U	Court-circuit dans les enroulements de Distribution	2850	1115	3675	1987	138	2330	4330
39	DH	U	Court-circuit BT-masse	7020	1850	4410	2960	-	2140	1000
42	DH	U	Enroulements tertiaires endommagés par des arcs	620	325	244	181	38	1480	2530
46	DH	U	Court-circuit dans les Enroulements	13500	6110	4040	4510	212	8690	1460
51	DH	U	Etincelles entre la connexion détachée et traversées HT	13	3	6	3	1	4	51
52	DH	U	Etincelles dû à la surtension de foudre avec des fils brûlés	137	67	104	53	7	196	1678
54	DH	U	Arc entre les connexions au changeur de prises, zones brûlées sur les enroulements	34	21	56	49	4	95	315
65	DH	U	Arc dans les enroulements	420	250	800	530	41	300	751
68	DH	U	Arc dans le conduit d'huile	310	230	760	610	54	150	631
69	DH	U	Arc dans le conduit d'huile	800	160	600	260	23	490	690
82	DH	U	Arc dans l'OLTC et les Enroulements	10000	6730	10400	7330	345	1980	3830
83	DH	U	Arc dans l'huile provenant des conduit en cuivre dans la cuve	1570	735	1740	1330	87	711	4240
88	TL	U	Zone noircie à l'intérieur des enroulements, défaut inter-spires, circuit parallèle en circuit ouvert	3675	6392	5	7691	2500	101	833
92	TL	U	Surchauffe du noyau à la terre et des boucliers d'isolation (conduits d'huile étroits)	1450	940	61	322	211	2420	3560
105	TH	U	Contacts du sélecteur brûlés	1860	4980	1600	10700	-	158	1300
106	TH	U	Longue surchauffe des contacts du changeur de Prises	860	1670	40	2050	30	10	690
107	TH	U	Défauts sur les contacts du sélecteur du changeur de Prises	150	22	11	60	9	-	-
110	TH	U	Contacts en cuivre brûlés dans le sélecteur de Changement	100	200	11	670	110	100	650

Tableau III-2 : Cas supplémentaires de défauts identifiés par l'inspection de l'équipement en service [33].

Case	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	CO	CO2	Unité	Inspection
D1	400	40	200	60	6	200	1000	ppm	Décharges capacitatives sur des boulons desserrés
D2	2320	616	822	800	72	9	72	ppm	Arc dans l'huile et le papier humide
D3	245	30	245	35	5			ppm	Trace de surchauffe entre les Bobines
T1	200	700		500	200	300	2000	ppm	Courant de circulation dans les blindages en aluminium
T2	101	184	10	243	32	61	298	ppm	Surchauffe par flux
T3		57		4	40	72	203	ppm	Boulons lâches, aucun dommage Visible
T4	81	70		68	25	57	243	ppm	Point chaud dans la pompe à huile
T5	30	200	8	308	114	219	1040	ppm	Surchauffe des fils
T6	465	3100	1	3360	1221	1530	8060	ppm	Surchauffe des fils
T7	50	100	9	305	51	404	3560	ppm	Surchauffe de la barre transversale du fond
T8	3650	6730	191	9630	1570	674	7230	ppm	Noyau magnétique surchauffé
T9	1040	2100	10	2720	579	220	366	ppm	Surchauffe du croisement de plomb
T10	305	538		101	157	1900	4210	ppm	Point chaud dans un conducteur
T11	12	17,6		4,5	4,6	554	1710	ppm	Surchauffe du câble aux enroulements *
T12	93	194		27	52	2330	6350	ppm	Surchauffe de l'isolation en papier
T13	107	143	2	222	35	193	1330	ppm	Courants circulants dans les tôles
T14	220	1660		1140	1880	410	2430	ppm	Pompe à huile brûlée
T15	78	259		640	117	219	1827	ppm	Surchauffe importante au niveau des connexions de plomb
O1	310	410	10	472	89	180	490	ppm	Cokéfaction de l'OLTC
O2	75	700		799	623	480	8690	ppm	Contacts de l'OLTC brûlés

III.7.7 Elaboration de l'arbre de défaillance d'un transformateur MT/BT

Pour l'élaboration de l'arbre de défaillance d'un transformateur MT/BT, on a suivi une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un événement unique intitulé événement redouté, c'est à dire: panne d'un transformateur MT/BT. Ce point de départ de la construction de l'arbre est l'évènement redouté lui-même (également appelé événement sommet). Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifié.

À partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs événements du niveau inférieur.

La démarche est la suivante : pour chaque événement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des événements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation.

Des opérateurs logiques (ou portes) permettent de définir précisément les liens entre les événements des différents niveaux.

Ce processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des événements en combinaisons d'évènements de niveau inférieur, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de la probabilité d'occurrence de l'évènement analysé. Ces événements non décomposés de l'arbre sont appelés événements élémentaires (ou événements de base). Notons que [31] :

- Il est nécessaire que les événements élémentaires soient indépendants entre eux.
- Leur probabilité d'occurrence doit pouvoir être quantifiée (condition nécessaire seulement dans le cas où l'arbre est destiné à une analyse quantitative, et ce n'est pas le cas de notre étude).
- Contrairement à l'approche inductive de l'AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) qui ne cible pas les conséquences des défaillances élémentaires, l'approche déductive de l'arbre de défaillance permet de se focaliser exclusivement sur les défaillances contribuant à l'évènement redouté.

Ainsi, en démarrant de l'évènement redouté qui est la panne d'un transformateur MT/BT, on a tracé l'arbre de défaillance. Il est composé de cinq événements de niveau inférieur (électrique, thermique, mécanique, diélectrique, électromagnétique) pour lesquels nous tracerons un arbre de défaillance pour chacun afin d'identifier les événements élémentaires d'une panne de transformateur.

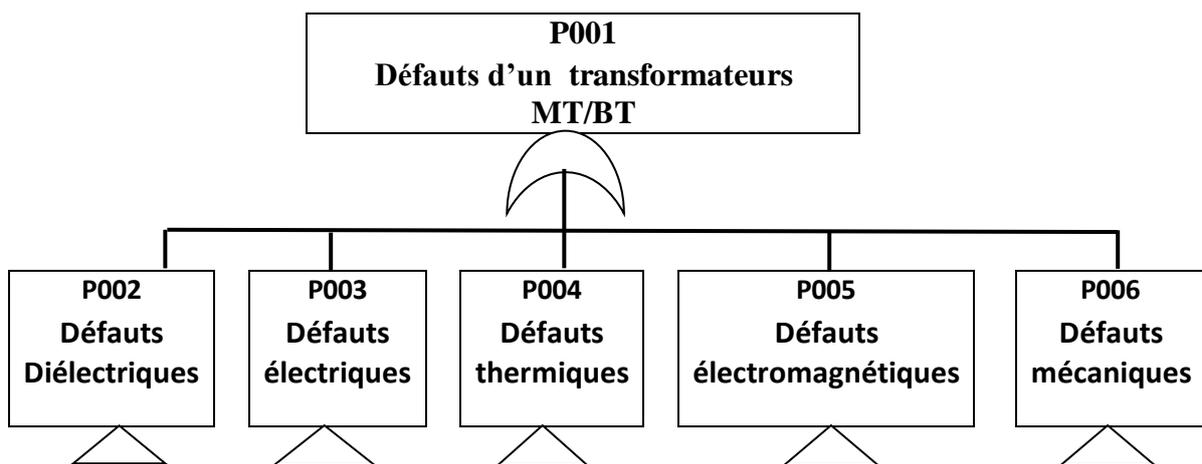


Figure III-13 Arbre de défaillance du transformateur MT/BT.

Les transformateurs sont sujets à des défauts (Diélectriques, électriques, thermiques, électromagnétiques, mécaniques), c'est ce que représente la figure III-13.

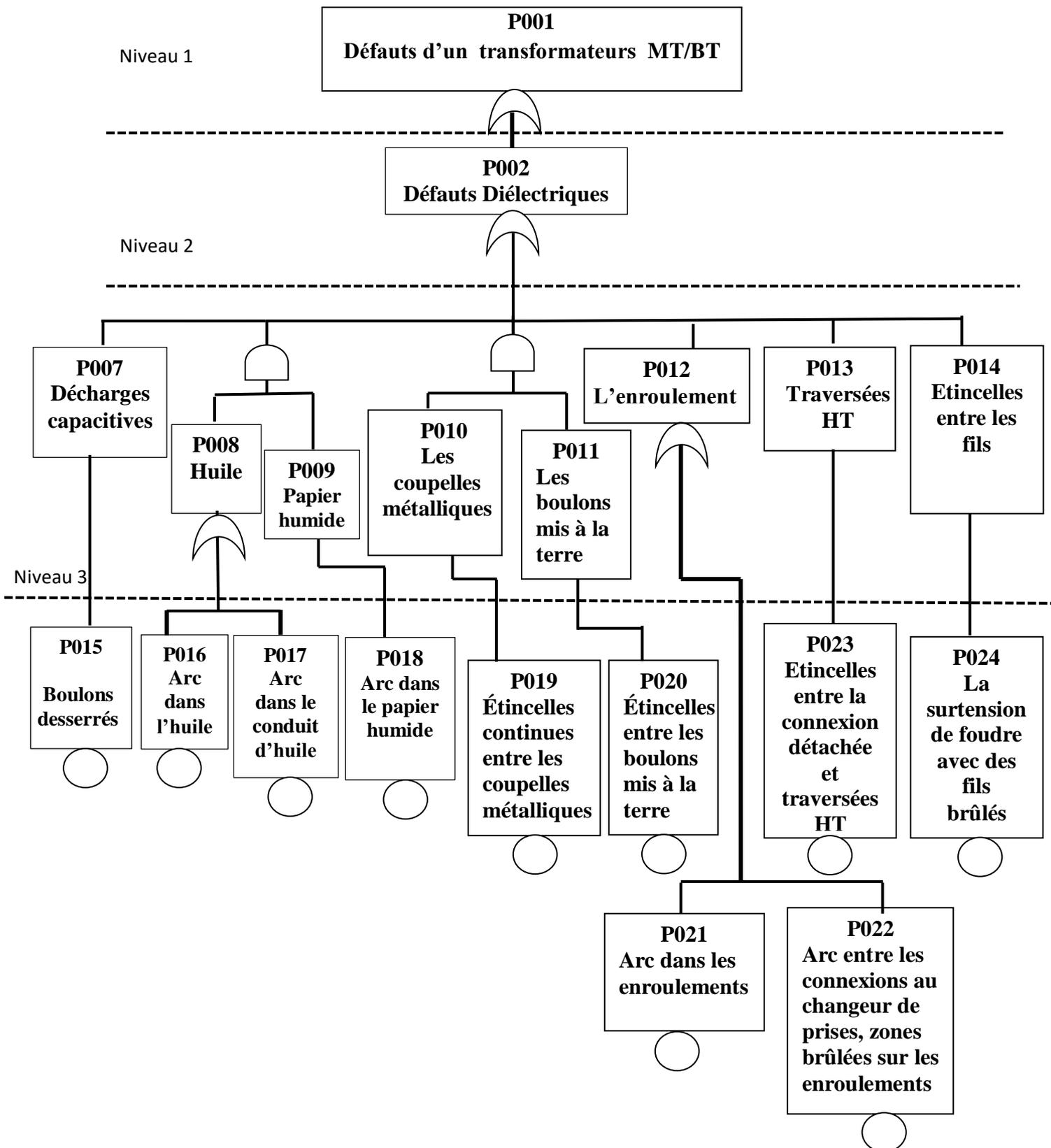


Figure III-14 Arbre de défaillance du transformateur (Défauts Diélectriques).

À partir de la figure III-14, nous constatons que les défauts diélectriques est causée par la détérioration de l'état de l'huile et du papier isolant, quelle est due à (humidité, étincelles, arcs dans l'huile).

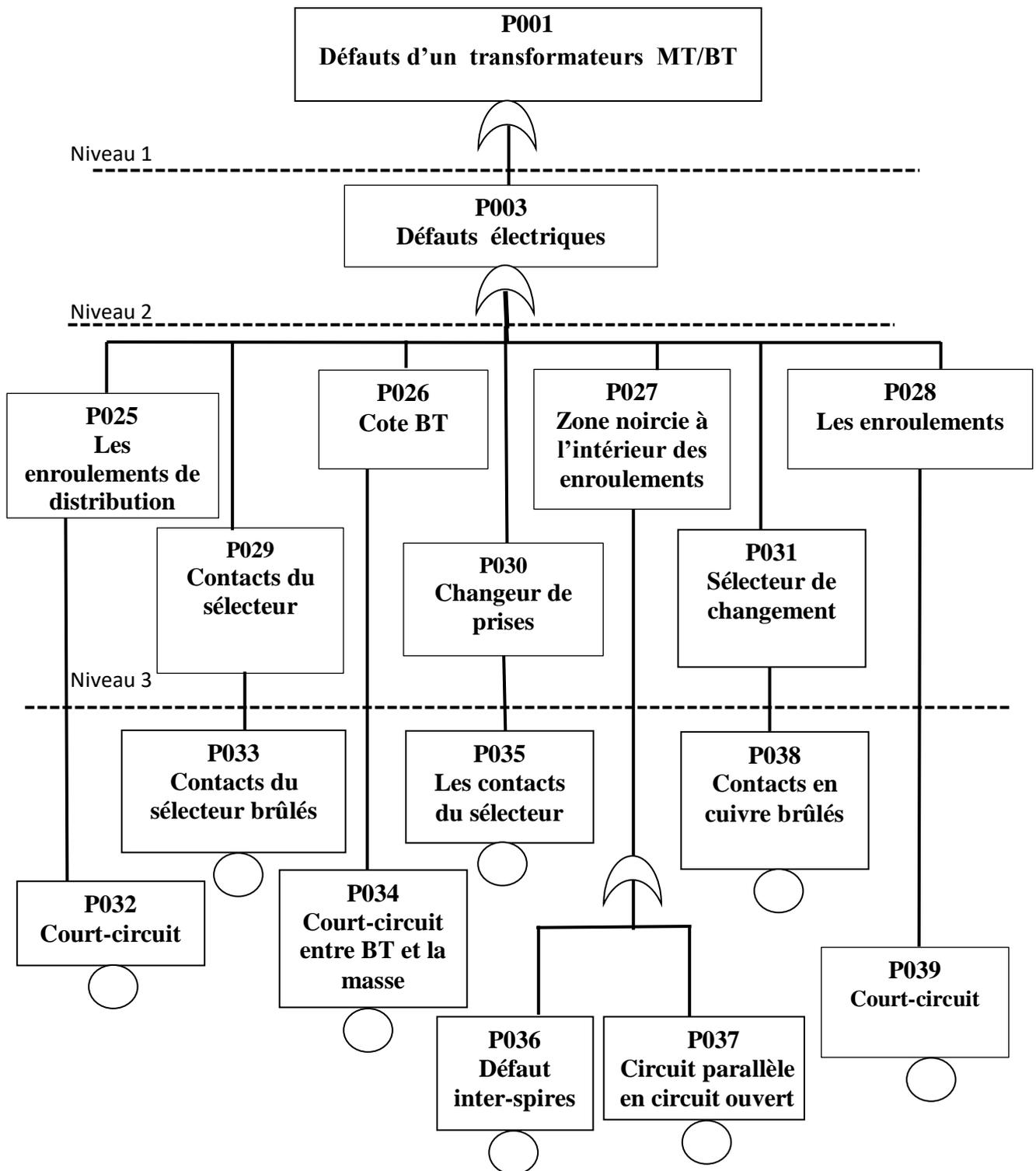


Figure III-15 Arbre de défaillance du transformateur (Défauts électriques).

À partir de la figure III-15, on peut voir que les défauts électriques souvent trouvés dans le changeur de prises et les enroulements sont causés par un court-circuit et un contact entre les enroulements et les conducteurs internes.

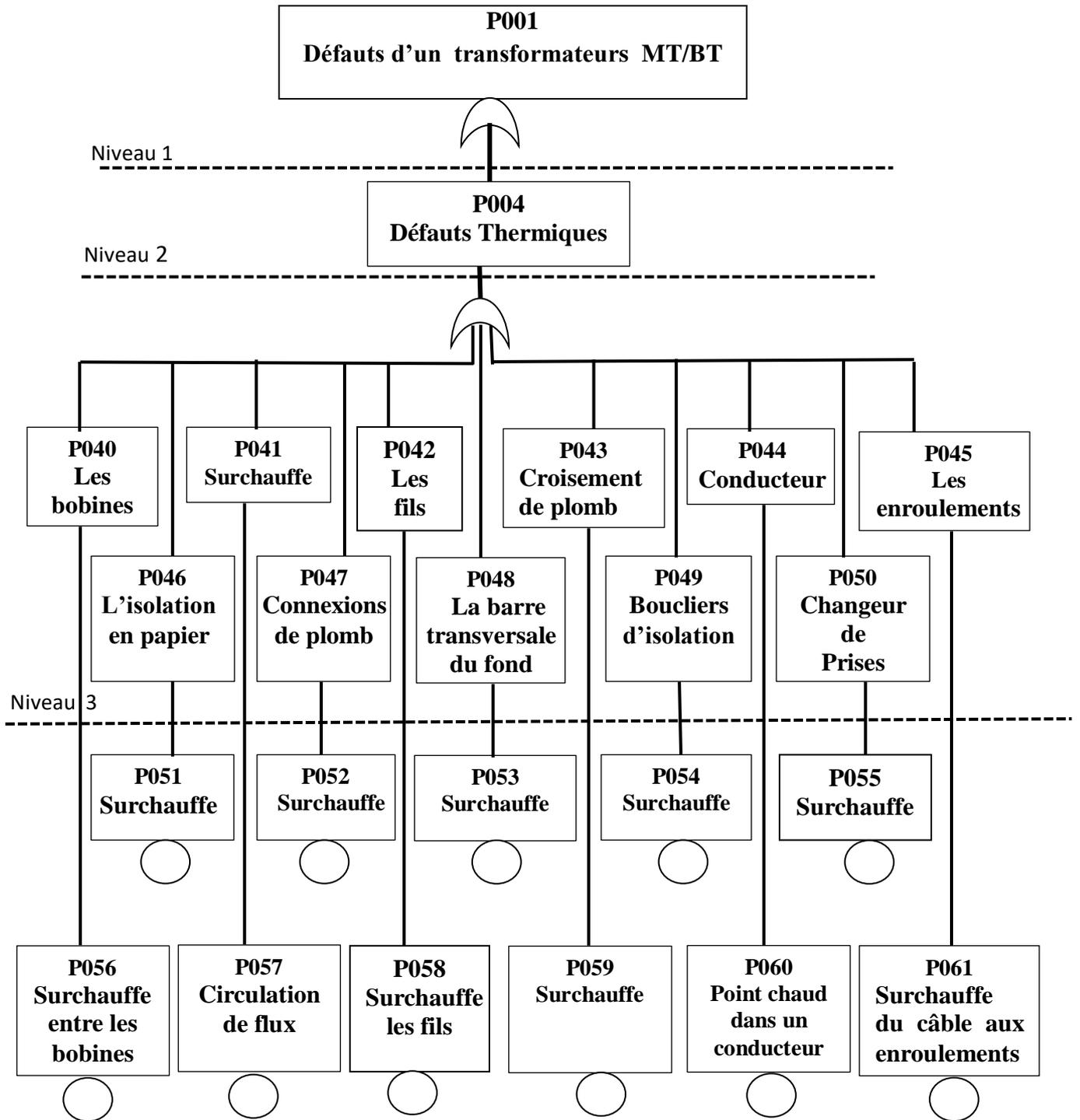


Figure III-16 Arbre de défaillance du transformateur (Défauts Thermiques).

Parmi les causes les plus importantes illustrées sur la figure III-16, qui conduisent à un défaut thermique, il y a une concentration du flux magnétique, une diminution des agents de refroidissement (huile) et une augmentation de la tension sur le transformateur.

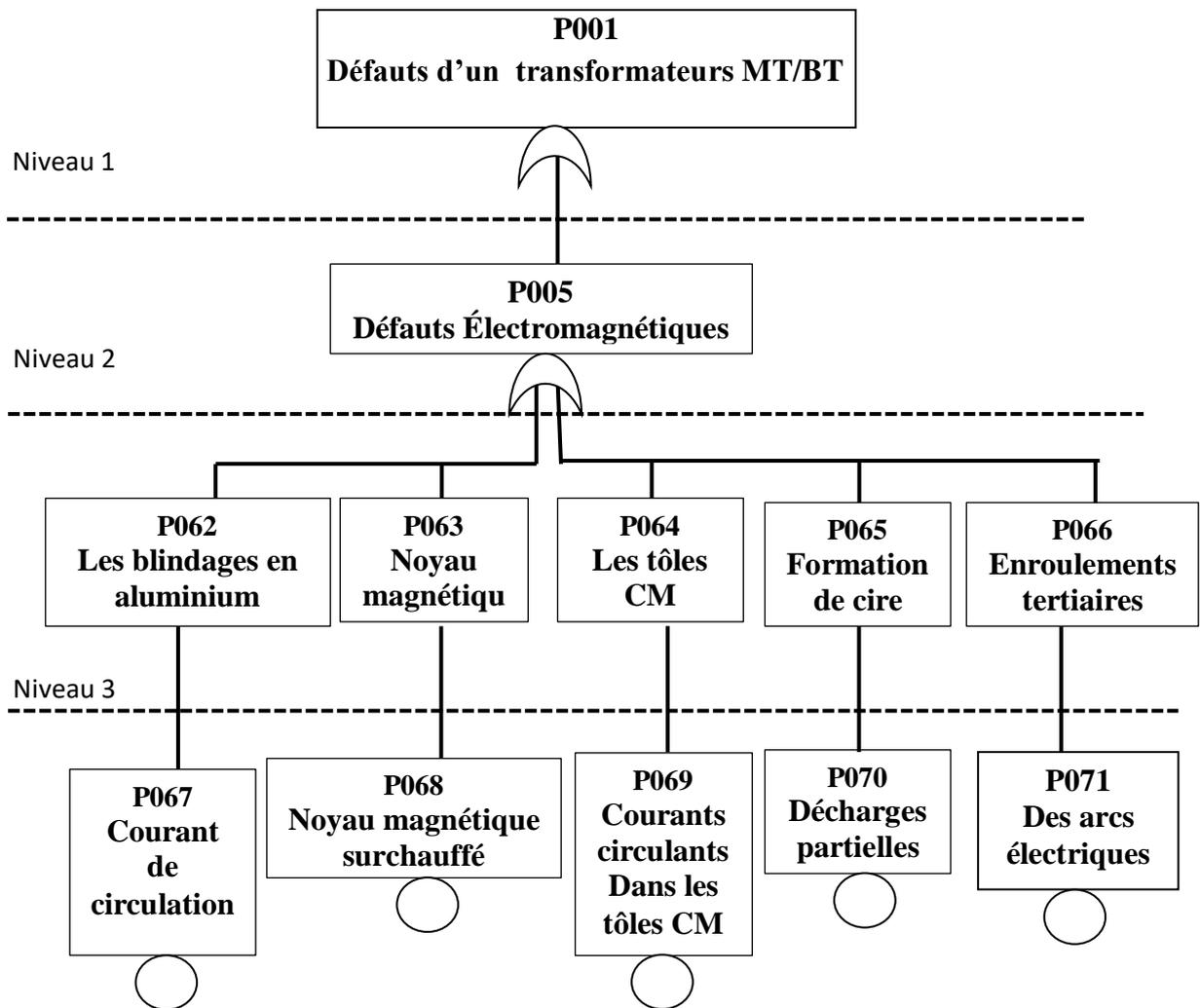


Figure III-17 Arbre de défaillance du transformateur (Défauts Électromagnétiques).

Nous concluons de la figure III-17 que les défauts électromagnétiques sont généralement dus à des défauts dans les pièces où il y a un flux magnétique, telles que les tôles de circuit magnétiques et les bobines, et ces erreurs sont causées par le noyau magnétique surchauffé ou le passage du courant à travers les tôles de circuit magnétiques.

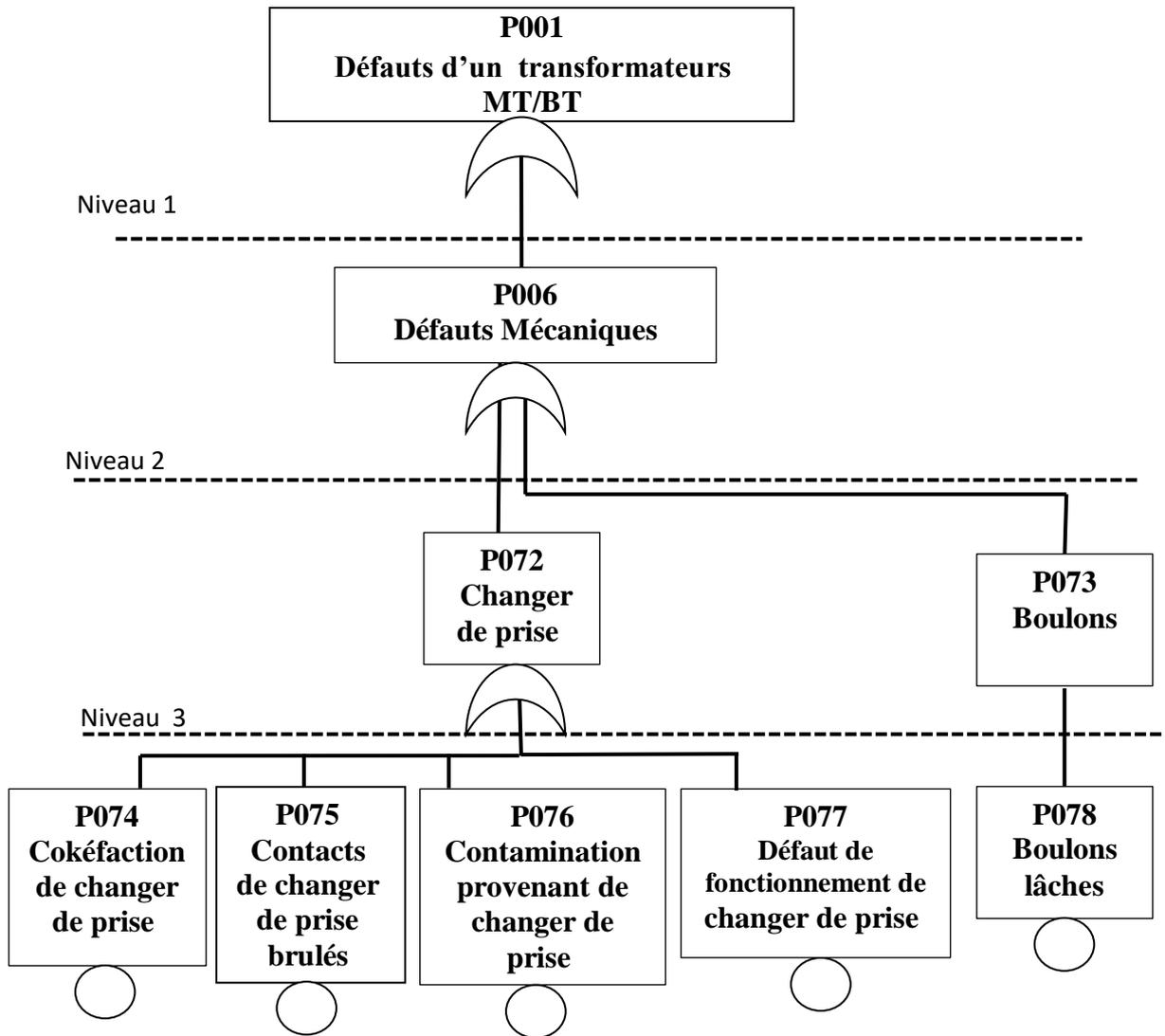


Figure III-18 Arbre de défaillance du transformateur (Défaits Mécaniques).

À partir de la figure III-18, nous notons que le changer de prise est l'élément le plus susceptible de provoquer une défaillance mécanique d'un transformateur.

III.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'intérêt des informations que peut apporter l'utilisation la méthode "Arbre de Défaillances" dans le but de réduire la probabilité de défaillances ou de dégradation du service et d'augmenter l'espérance de vie du transformateur.

Après cela en fonction des résultats d'analyse arbre de défaillances nous avons atteint à :

- déterminer les points faibles du système du transformateur,
- hiérarchiser les combinaisons d'événements suivant leur probabilité d'apparition, et estimer la probabilité de l'événement sommet,
- Avoir des critères pour déterminer les priorités pour la prévention de l'événement redouté dans le transformateur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de notre projet de fin d'études établi pour l'obtention du diplôme de master en électromécanique spécialité maintenance industrielle, on a essayé de traiter la problématique de la défaillance de transformateur MT/BT d'huile. En étudiant sont historique de pannes sur une période de fonctionnement.

Le transformateur est un organe vital du réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique. Pour que son fonctionnement soit bon et sûr, il nécessite une évaluation efficace et opportune de son état, pour cela, la gestion des transformateurs est toujours un compromis technique-économique en fonction de la pénurie et de la période de remplacement, qui peut aller jusqu'à quelques années.

Notre travail a été réalisé sans qu'on puisse s'intégrer dans le milieu industriel, à cause des conditions sanitaires actuelles. Ce qui nous a obligés à travailler seulement avec des données obtenus à partir d'études précédentes sur le transformateur.

Avant tout on a présenté une mise en valeur de la maintenance comme impérative nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours en faveur de l'amélioration de l'efficacité de la production et de l'économie, en premier pas.

Deuxièmement, nous avons présenté un aperçu des transformateurs, leur définition, leur principe de fonctionnement et leurs diverses classifications.

Le troisième et dernier chapitre est au cœur de ce travail. Il est entièrement consacré à la diagnostique des défauts par la méthode de l'arbre de défaillances, ce qui nous a permis de constater que ces transformateurs ont un problème de défaillance thermique, dû à l'échauffement de l'huile. Induit par de forts courants circulant à travers la cuve et le noyau, ou par de court-circuit dans les tôles du noyau magnétique, ou par un contact entre les enroulements et les conducteurs internes. Ceci est bien entendu le résultat de l'état de vieillissement de la structure interne de ces transformateurs. Nous avons également observé un grand pourcentage de défaillances d'isolation d'huile. Ces défauts liés à la rigidité diélectrique de l'huile ne sont pas directement imputables à la teneur en eau ou en humidité, mais plutôt à la présence de particules provoquée par la détérioration des parties internes du transformateur.

Enfin, nous souhaitons que ce travail soit un point de départ pour d'autres projets dans le future.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [1] Abdi Adil, "*Optimisation de la fonction maintenance par la méthode AMDEC Cas de la pompe 2000D à membrane de l'entreprise CERTAF*," Mémoire de magister d'université Aboubekr Belkaïd, Tlemcen, 2013.
- [2] Mrabet Mohammed El Amin, "*Contribution à la conception d'un outil d'aide au diagnostic des systèmes de productions*," Mémoire de magister d'université Aboubekr Belkaïd, Tlemcen, 2017.
- [3] Benaïcha Halima, "*Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle*," Thèse de doctorat, Université d'Oran Mohammed Boudiaf, 2015.
- [4] Moumene Salah Eddine, "*Etude et Maintenance des pompes centrifuges industrielles*," Thème de master d'université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
- [5] Pascal Vrignat, "*Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne*," Thèse de doctorat, Automatique, Université d'Orléans, 2010.
- [6] Frédéric Tomala, Cours de maintenance, Département Management des Systèmes HEI Hautes Études d'ingénieur.
<https://docplayer.fr/1036020-Cours-de-maintenance-frederic-tomala.html>
(visité 07/10/2020).
- [7] FD X 60-000 Fonction maintenance
<https://docplayer.fr/157142-Fonction-maintenance.html>
(visité 23/10/2020).
- [8] Pierre Cochetoux, "*Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels*," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I, 2010.
- [9] Roache Ayache et Sakhri Walid, "*Développement d'un Prototype de gestion des connaissances pour un processus de diagnostic. Application réseau électrique*," Mémoire de magister d'université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, mai 2016.

Références bibliographiques

- [10] Senoussaoui Mohammed El Amine, "*Contributions des techniques intelligentes au diagnostic industriel des transformateurs de puissance*," Thèse de doctorat, Es-Sciences en Electrotechnique, Université Djillali Liabbes de Sidi Bel Abbes, 2019.
- [11] Abdelkebir Amir et Saadi Nassim, "*Application de la Logique Floue pour le Diagnostic des Transformateurs de Puissance par Analyse des Gaz dissous*", Mémoire de master, d'université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Juin 2017.
- [12] Yahiou Abdelghani, "*contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : cas du courant d'appel*," Mémoire de magister d'université de Sétif, Avril 2012.
- [13] Chenane Souheyb et Rakhouane Adnane, "*Simulation d'une décharge partielle dans un enroulement d'un transformateur de puissance*," Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2018.
- [14] Benfichouh Imene et Bendani Souad, "*Contribution à l'étude de comportement d'un réseau de transport électrique en cas de seisme*," Mémoire de master d'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2018.
- [15] Harzelli Imadeddine, "*Contribution à la Modélisation par la méthode des volumes finis d'un transformateur de courant*," Mémoire de magister d'université Mohamed Khider, Biskra, 2014.
- [16] Transport & Distribution
<http://sitelyceejdarc.org/autodoc/cours/001%201%20STI2D/EE/3%20EdT%20Transport%20Mouvements/Transport%20HTML/Transport%20&%20Distribution.html?Travaildemand2.html> (visité 13/10/2020).
- [17] Jean Sanchez, "*Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance*," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 21 juin 2011.
- [18] Hadjam Mokhtar et Belazizia Hamza, "*Modélisation du transformateur de puissance*," Mémoire de magister d'université larbi ben m'hidi, Oum el bouagui, 06/2012.

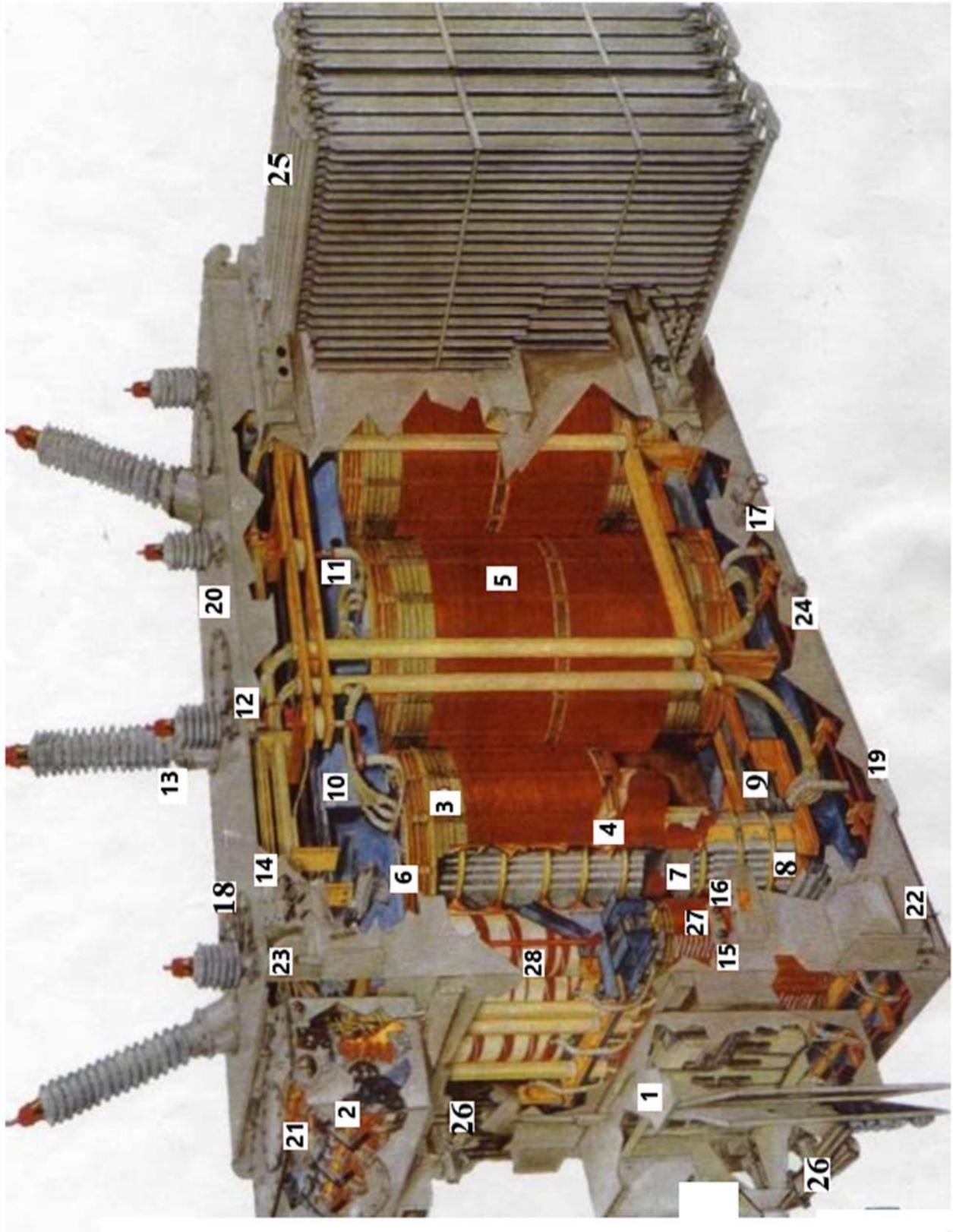
- [19] Cours conception des Systèmes électriques L3 "*Chapitre I : Transformateurs -E-moniste*," USDB 2015/2016.
<http://mellah.e-monsite.com/medias/files/2-transformateur.pdf>
(visité 28/09/2020).
- [20] Stock photo
<https://www.istockphoto.com/fr/photos/transformateur?mediatype=photography&phrase=transformateur&sort=mostpopular> (visité 05/10/2020).
- [21] Can stock photo
<https://www.canstockphoto.fr/photos-images/transformateur.html>
(visité 05/10/2020).
- [22] Refroidissement-des-transformateurs,
<https://elec13.wordpress.com/2017/10/29/refroidissement-des-transformateurs-onan-onaf-odaf-ofaf-odwf> (visité 15/09/2020).
- [23] SNVI groupe.dz
http://snvigroupe.dz/pagesweb/entreprise/carrosseries_tialet.php
(visité 25/09/2020).
- [24] Larfi Abd El fetteh et Korichi Abd Salam, "*Modélisation en HF d'un transformateur triphasé en vue de son diagnostic*," Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2018.
- [25] Défauts d'enroulement du transformateur
<https://electrical-engineering-portal.com/transformer-winding-faults>
(visité 05/10/2020).
- [26] Rekik Badri, "*Etude et modélisation de défauts des transformateurs de puissance*," Mémoire de magister d'université Badji Mokhtar, Annaba, 2008.
- [27] Maintenance de transformateur à diélectrique liquide
<https://www.agcs.allianz.com/content/dam/onemarketing/agcs/agcs/pdfs-risk-advisory/tech-talks/ARC-Tech-Talk-Vol-2-Liquid-Filled-Transformers-FR.pdf>
(visité 22/09/2020).

- [28] Évaluation des systèmes de pompage d'eau Manuel de maintenance https://downloadapi.paperflite.com/api/2.0/shared_url/5d65aace0b593a2b6eb41ac9/asset/5d65aace0b593a2b6eb41ac8/download (visité 22/09/2020).
- [29] Hassini Brahim, "*Etude qualitative et quantitative des scénarios de défaillances de la Pompe 2000 D de l'entreprise CERTAF*," Mémoire de master d'université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, 01octobre 2014.
- [30] Sallak Mohamed, "*Evaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité*," Thèse de doctorat, Ecole doctorale IAEM Lorraine, 19 Octobre 2007.
- [31] Hasniou Zakaria et Ililten Amine, "*Etudes des paramètres influant sur la tension de claquage de l'huile Borak 22utilisée dans les transformateurs de puissance*," Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [32] Kassas Bachir, "*Application de l'arbre de défaillance « Fault-tree » pour le système du ballon à vapeur au niveau de l'unité Production Ammoniac*," Mémoire de master d'université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.
- [33] EKE Samuel, "*Stratégie d'évaluation de l'état des transformateurs : Esquisse de solutions pour la gestion intégrée des transformateurs vieillissants*," Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2018. Français.
- [Annexe A] Bouchaoui Lahcene, "*Diagnostic des transformateurs de puissance par la méthode d'analyse des Gas dissous : Application des réseaux de neurones*," Mémoire de magister d'université Ferhat Abbas, Setif, 2010.

ANNEXE

Annexe A

Constitution des transformateurs de puissance (IEEE)



1. **Cabinet de contrôle** : renferme les contrôles de ventilation et du changeur de prises. C'est aussi le point de raccordement des instruments de mesure.
2. **Changeur de prises en charge** : Ce changeur de prises est du type sous vide. Conçu pour produire 500.000opérations.
3. **Conducteur** : les bobinages sont produits à partir de fil de cuivre ou aluminium. L'isolation est conçue de papier, de NOMEX ou d'époxy pour certaines applications à basse tension.
4. **Cylindre de bobinage** : les bobines haute et basse tension sont enroulées sur leurs cylindres respectifs. Le cylindre basse tension est composé de papiers Kraft et imprégné de résine. Cette construction offre une rigidité mécanique en compression engendrée lors des courts circuits. Le cylindre haute tension est aussi composé de couches de papier Kraft et d'adhésifs spéciaux offrant une perméabilité uniforme à l'huile. Cette construction évite la formation d'effet couronne.
5. **Bobinage** : prouvé à l'essai pour résister aux effets des courts circuits. Le filage est disposé selon les niveaux de tension et de courant.
6. **serre bobine** : les bobines sont centrées autour du noyau à l'aide de cales bien assujetties. Cette construction simple assure rigidité mécanique et procure l'espace adéquat pour le refroidissement à l'huile.
7. **Masse magnétique** : fabriquée d'acier de haute qualité à la silice à grain orienté. L'acier est dessiné, tracé, coupé avec précision et empilé par une machine outil automatisée. Ceci procure un circuit magnétique avec peu de perte et un bruit réduit.
8. **Noyau**: noyau et culasse sont conçu avec symétrie afin d'obtenir un équilibre du champ magnétique.
9. **Culasse**: voir noyau.
10. **Serrage** : l'ensemble des la minations est maintenu par un jeu de poutrelles précontraints pour offrir une pression de serrage uniforme.
11. **Raccords** : fonction du courant, on utilise du câble isolé ou un jeu de barres. Le câblage passe à travers des tubes isolants pour offrir un maintien et une stabilité.
12. **Transformateurs de courant** : disponible pour les relais de protection et le mesurage.
13. **Traversée** : Ces dispositifs isolés à l'huile permettent de raccorder les circuits hautes tensions extérieures.
14. **Manomètre de pression/vide ou niveau du liquide.**

15. **Manomètre de température des bobinages** : indique la température du point chaud des bobinages. Ce dispositif contrôle la mise en route des ventilateurs, des alarmes et des déclenchements.
16. **Manomètre de température du liquide.**
17. **Relais de pression de défaut** : installé sous le niveau du liquide afin de détecter l'onde de choc produit par un défaut interne.
18. **Dispositif de détente de pression** : fournie sur la cuve et le compartiment du changeur de prises afin de libérer toute pression excessive.
19. **Base.**
20. **Cuve** : La cuve est de construction soudée. Le dessus est habituellement légèrement courbé pour l'écoulement de l'eau. Une couche d'apprêt antirouille et d'émail, complète la finition. Un émail de couleur blanche recouvre l'intérieur de la cuve pour faciliter l'inspection.
21. **Garniture** : Les garnitures sont une barrière pour les fuites d'huile et l'entrée de l'humidité.
22. **Mise à la terre** : installée à chaque coin opposé de la cuve.
23. **Emprise de levage.**
24. **Valve de vidange et d'échantillonnage.**
25. **Radiateurs** : Ces radiateurs sont détachages de la cuve pour un entretien facile.
26. **Refroidissement auxiliaire** : Le refroidissement par ventilateur permet un accroissement de la capacité de base de 133%.
27. **Transformateur série** : Utilisé pour les transformateurs de plus de 800 A et de 25 kv (150kvBIL).
28. **Réactance** : limite le courant lors des changements de prises.

Résumé : Les transformateurs MT/BT sont des organes vitaux des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils sont utilisés pour adapter le niveau de tension aux besoins de l'utilisation. Dans l'industrie les transformateurs sont utilisés dans les postes de distribution où la tension est réduite pour être adaptée au niveau de la tension d'utilisation des entreprises. Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude théorique, sur le transformateur d'huile, On se basant sur le diagnostic de défauts par la méthode de l'arbre de défaillances ce qu'il nous a permis d'établir l'arbre de défaillance selon cinq mode de défaillances.

Mot clés : Transformateur MT/BT, Maintenance, Diagnostic de défauts, défaillance.

Summary: Transformers MV/LV is vital parts of electrical energy transmission and distribution networks. They are used to adapt the voltage level to the needs of the use. In industry, transformers are used in distribution substations where the voltage is reduced to match the level of the operating voltage of companies. In this thesis, we presented a theoretical study, Based on the fault diagnosis by the fault tree method, this allowed us to establish the fault tree according to five fault mode.

Keywords : MV / LV transformer, Maintenance, Fault diagnosis, failure.

ملخص : محولات الطاقة هي أجزاء حيوية من شبكات نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية. يتم استخدامها لتكييف مستوى الجهد مع احتياجات الاستخدام. في الصناعة، تستخدم المحولات في محطات التوزيع حيث يتم تقليل الجهد لتناسب مع مستوى جهد التشغيل للشركات. في هذه الأطروحة قدمنا دراسة نظرية على محول الزيت بناءً على تشخيص العطب بواسطة تحليل السبب الجذري، فقد سمح لنا بإنشاء شجرة خطأ المحول وفقاً لوضع خمسة أخطاء.

الكلمات المفتاحية : محول MT/BT ، صيانة ، تشخيص الأعطال ، العطب.