

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche

Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa

جامعة غرداية



كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'Automatique et d'Electromécanique Mémoire de fin D'étude,
en vue de l'obtention du diplôme Master Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique Spécialité :

Maintenance industrielle

Thème :

**Contribution à la maintenance prévisionnelle et
corrective par le traitement d'huile des
transformateurs de puissance HTB**

• HACINI Mohamed Tahar

Soutenu devant le jury composé de / Evalué par :

Nom et prénom	Grade	Qualité	Etablissement
CHERIF Saleh	MCA	Président	Université de Ghardaïa
BENDAOUI Messaoud	Professeur	Examineur	Université de Ghardaïa
FIHAKHIR Amine Mehdi	Professeur	Examineur	Université de Ghardaïa
MERZOUG Hocine	MAA	Encadrant	Université de Ghardaïa

Année universitaire : 2024/2025



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة
التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة غرداية مركز
تطوير المقاولاتية



عنوان المشروع:

آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB
مشروع لنيل شهادة مؤسسة اقتصادية في إطار القرار الوزاري 008
المعدل والمتمم لقرار 1275

صورة العلامة التجارية

الاسم التجاري

**Machine Traitement
D'huile HTB**

السنة الجامعية

2025 _ 2024

Remerciements

*Nous exprimons tout d'abord notre profonde gratitude à Allah Tout-Puissant pour nous
.avoir guidés dans la réussite de ce travail*

*Nous adressons nos sincères remerciements à notre directeur de thèse, le professeur Merzoug
Hocine, pour son soutien constant, ses précieux conseils et son encadrement dévoué tout au long
.de ce travail*

*Nous exprimons également notre profonde gratitude à tous les professeurs éminents qui ont
contribué à notre formation académique et scientifique, enrichissant ainsi notre parcours
.éducatif*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement les membres du jury qui ont aimablement accepté
d'évaluer notre travail. Nous leur sommes profondément reconnaissants pour leur temps et
.leurs précieux commentaires*

*Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude à nos chers parents pour leur soutien
indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants qui nous ont motivés tout au long de
nos études*

*Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement tous ceux qui ont contribué, directement ou
indirectement, à la réalisation de ce modeste travail, que ce soit par leur soutien matériel ou leur
encouragement moral. Dédication*

Dédicace

Je dédie ce travail à

Mes chers parents.

Par leurs encouragements bienveillants et leurs immenses sacrifices, ils m'ont offert un environnement familial chaleureux et stimulant qui m'a permis de poursuivre mes études.

Aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement mon respect, ma reconnaissance et mes profonds sentiments pour vous, chers parents.

Je prie Allah de les bénir et de les protéger, et j'espère qu'ils seront toujours fiers de moi.

À mes frères et sœurs

Soufiane, Mohammed Amine et Aicha.

À tous les membres de ma famille et à mes amis. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon respect et de ma gratitude pour leur soutien indéfectible.

À ceux qui ont collaboré avec moi pour mener à bien ce projet.

À tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours, merci pour chaque mot d'encouragement et chaque coup de main.

Résumé

Notre thèse porte sur l'amélioration du traitement et de la maintenance des transformateurs de puissance HTB en traitant l'huile isolante à l'aide de techniques modernes telles que la chromatographie, l'analyse des gaz et la mesure de la rigidité diélectrique. Les machines à vide poussé jouent un rôle essentiel dans la restauration des propriétés de l'huile, tout en améliorant les performances grâce à des capteurs intelligents et à l'automatisation. Les contrôles non destructifs (CND) complètent cette méthodologie en détectant les défauts sans perturber le fonctionnement. Cette approche prolonge la durée de vie des transformateurs, réduit les coûts de maintenance et garantit la fiabilité durable du réseau électrique.

Mots clés : contrôle non destructifs (CND), Machine de filtration, Analyse des gaz dissous (DGA), Maintenance prévisionnelle, Maintenance corrective.

ملخص

تتحدث اطروحتنا على معالجة و تحسين صيانة محولات الطاقة HTB عبر معالجة الزيت العازل باستخدام تقنيات حديثة مثل التحليل الكروماتوغرافي، تحليل الغازات، وقياس الصلابة العازلة. يبرز دور آلة التفريغ العالي في استرجاع خصائص الزيت، مع تعزيز الأداء بواسطة حساسات ذكية وتشغيل آلي. تُكمل الفحوصات غير التدميرية (CND) هذه المنهجية عبر كشف العيوب دون التأثير على التشغيل. تُمكن هذه المقاربة من إطالة عمر المحولات، خفض تكاليف الصيانة، وضمان موثوقية الشبكة الكهربائية بشكل مستدام.

الكلمات المفتاحية: الفحوصات غير التدميرية (CND)، آلة التصفية، تحليل الغازات الذائبة (DGA)، الصيانة التنبؤية، الصيانة التصحيحية.

Abstract

Our thesis focuses on the treatment and improvement of power transformer (HTB) maintenance through insulating oil processing using modern techniques such as chromatography, gas analysis, and dielectric strength measurement. The high vacuum oil treatment machine plays a key role in restoring the oil's properties, with enhanced performance through smart sensors and automated systems. Non-destructive testing (NDT) complements this approach by detecting internal faults without interrupting operation. This strategy extends transformer lifespan, reduces maintenance costs, and ensures the sustainable reliability of the electrical network.

Keywords: Non-Destructive Testing (NDT), Filtration Machine, Dissolved Gas Analysis (DGA), Predictive Maintenance, Corrective Maintenance

Liste des figures

Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure I.1	Schéma simplifié d'un réseau électrique	6
Figure I.2	Niveaux de tension normalisés	7
Figure I.3	Partage du réseau électrique par gamme de tension	7
Figure I.4	Structure générale d'un réseau électrique	10
Figure I.5	Principaux organes qui constituent un transformateur	11
Figure I.6	Circuits magnétiques et électriques liés	12
Figure I.7	Symbole de transformateur	12
Figure I.8	Couplage du primaire	13
Figure I.9	Couplage du secondaire	13
Figure I.10	Schéma électrique équivalent	15
Figure I.11	Schéma de l'essai à vide d'un transformateur triphasé	16
Figure I.12	Schéma du bilan de puissance d'un transformateur	18
Figure II.1	Modes de fonctionnement d'un système	23
Figure II.2	Stratégies de la maintenance industrielle	25
Figure II.3	Examen par ressuage	34
Figure II.4	Examen par magnétoscopie	35
Figure II.5	Examen par radiographie	36
Figure II.6	Examen par ultrasons	37
Figure II.7	Examen visuel	38
Figure II.8	Examen par thermographie	40
Figure II.9	Schéma de principe de contrôle par courants de Foucault	41
Figure II.10	Synoptique colométrie d'un système de CND par CF	41
Figure III.1	Titreur colométrie karl fisher pour la mesure de la teneur en eau de liquide isolant	48
Figure III.2	Appareil de mesure de l'acidité conforme ainsi que le système de titrage	49
Figure III.3	Appareil de mesure de la viscosité	50

Liste des figures

Figure III.4	Appareil de claquage	51
Figure III.5	Dégradation de liquide isolant au cours de vieillissement thermique (changement de couleur)	52
Figure III.6	Diélectrique test DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité relative	53
Figure III.7	Appareil de mesure des gaz dissous et accessoires dans l'huile transport x	54
Figure III.8	Bouteille d'échantillon et connecteurs	56
Figure III.9	Ecoulement de l'huile vers le conteneur de déchets	56
Figure III.10	Expulsions de L'huile s'écoule dans la seringue	57
Figure III.11	Expulsions de l'huile et l'air de la seringue	57
Figure III.12	Aspiration de l'huile dans la seringue	58
Figure III.13	La partie mâle de la valve à connexion rapide attachée à la seringue	58
Figure III.14	Manchon extérieur du connecteur femelle	59
Figure III.15	Robinet d'arrêt (vanne à trois voies) avec bras latéral fermé	59
Figure III.16	Résultats imprimés par l'imprimante thermique intégrée transport x	60
Figure III.17	Triangle de duval pour le diagnostic des transformateurs	61
Figure III.18	Méthode de gaz clé	62
Figure III.19	Rogers' ratios screen	64
Figure III.20	Modèle de gaz basé sur les mesures d'analyse de gaz dissous (AGD)	65
Figure III.21	Schéma de défaillance de type C2H4-A	65
Figure III.22	Schéma de diagnostic ETRA Japon A	66
Figure III.23	Principaux composants d'un chromatographe a gaz	67
Figure III.24	Illustre le principe de la séparation des gaz par chromatographie,	69
Figure III.25	Chromatogramme gazeux typique	70
Figure III.26	Procédure de prélèvement d'échantillon d'huile par seringue	71
Figure III.27	Extraction sous vide	72
Figure IV.1	Machine de filtration d'huile de transformateur sous vide poussé	75
Figure IV.2	Schéma de circuit de la machine de filtration d'huile de transformateur sous vide poussé	84
Figure IV.3	Huile de transformateur avant et après filtration	85

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau I.1	Différentes gammes de tensions utilisées par SONELGAZ	7
Tableau I.2	Essai à vide	16
Tableau I.3	Essai en court- circuit	17
Tableau I.4	Puissance électrique en régime triphasé	18
Tableau II.1	Comparaison entre les différentes méthodes de CND	43
Tableau III.1	Normes utilisées par SONELGAZ pour l'analyse de la BORAK22	47
Tableau III.2	Triangle de duval pour le diagnostic des transformateurs	61
Tableau III.3	Code d'examen des gaz dissous dans l'huile minérale – extrait du guide	63

Liste des abreviations

Liste Des Abréviations

Acronyme	Signification
MT	Moyenne tension
KV	Kilovolt
THT	Très haute tension
HTB	Haute tension b (niveau b de haute tension)
HTA	Haute tension a (niveau a de haute tension)
BT	Basse tension
HT	Haute tension
AFNOR	Association française de normalisation.
TBT	Très basse tension.
BTA	Basse tension a (niveau a de basse tension).
BTB	Basse tension b (niveau b de basse tension).
PPM	Parts per million.
Z_{SS}	Impédance équivalente rapportée au secondaire.
R_{SS}	Résistance équivalente rapportée au secondaire.
X_{SS}	Réactance équivalente rapportée au secondaire.
U_{2cc}	Tension secondaire de court-circuit.
I_{1cc}	Courant primaire en court-circuit.
P_{1cc}	Puissance absorbée en court-circuit côté primaire.
P_U	Puissance utile.
CBM	Condition-based maintenance (maintenance basée sur la condition).
CND	Contrôle non destructif.
ETRA	Electric technology research association (Association de recherche en technologie électrique).
DLT	Dielectric loss tester (Testeur de perte diélectrique).
PLC	Programmable logic controller (automate programmable industriel).

Liste des abreviations

OLTC	On-load tap changer (changeur de prises en charge).
------	---

Table de matière

Table de matière

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les Transformateurs de Puissance THT/HT	
I.1-Réseaux électriques	6
I.2 -Description des réseaux électriques.....	6
I.2.1 -Gamme des tensions utilisées par SONELGAZ en algérie.....	7
I.2.2 -Différents types des réseaux électriques	8
I.2.3 -Rôle du réseau électrique	9
I.2.4 -Structure générale d'un réseau électrique.....	9
I.3 -Généralité sur les transformateurs	10
I.3.1-Définitions du transformateur.....	10
I.3.2 -Rôle du transformateur.....	10
I.3.3 -Les composants d`un transformateur	11
I.3.4 -Principe de fonctionnement du transformateur.....	12
I.3.5 -Couplage- rapport de transformation- indice horaire.....	12
I.3.6 -Pertes dans le transformateur triphasé	14
I.3.7-Schéma électrique équivalent	14
I.4 -Différents essais d`un transformateur triphasé.....	15
I.5 -Bilan de puissance	18
Conclusion.....	19
Chapitre II : La Maintenance Industrielle et le Contrôle Non Destructif	
II.1-Définition de la maintenance	22
II.2 -Importance de la maintenance industrielle	22
II.3 -Définition de la dégradation, défaillance et panne	23
II.4 -Niveaux de maintenance industrielle.....	23

Table de matière

II.5-Stratégie de la maintenance industrielle	24
II.5.1 -Maintenance corrective.....	25
II.5.2 -Maintenance préventive	26
II.6 -Techniques pratiques de maintenance préventive et corrective du transformateur de puissance	27
II.6.1 -Maintenance préventive du transformateur à huile	27
II.6.2 -Maintenance corrective de transformateur à huile	28
II.6.3 -Réparation de l'équipement la réparation de l'équipement est nécessaire dans les cas suivants.....	29
II.6.4 -Différentes actions de maintenance corrective pour les transformateurs.....	29
II.7 -Contrôle non destructif CND	30
II.7.1 -Définition et intérêt du CND.....	30
II.7.2 -Les objectifs du CND	31
II.7.3 -Principe de la détection d'un défaut par CND	32
II.7.4 -Différents défauts détectés en CND	32
II.7.4.1 -Défauts surfaciques.....	32
II.7.5 -Différentes méthodes de CND	33
II.7.5.2 -Endoscopie magnétique	34
II.7.5.3 -Radiographie	35
II.7.5.4 -Ultrasons	36
II.7.5.5 -Examen visuel	37
II.7.5.6 -Thermographie	38
II.7.5.7 -Contrôle par courant de foucault	39
II.8 -Comparaison entre les principales méthodes de CND	42

Chapitre III : Le Contrôle des Transformateurs de Puissance par le Traitement d'Huile

Table de matière

III.1-Rôle de l'huile isolante dans le transformateur.....	45
III.2 -Diagnostic par analyse d'huile du transformateur de puissance.....	46
III.2.1-Méthodes de surveillance et de diagnostic des isolants liquides	46
III.2.2 -Méthodes conventionnelles.....	46
III.2.2.1 -Mesure de la teneur en eau	47
III.2.2.2 -Nombre de neutralisation.....	48
III.2.2.3 -La viscosité de l'huile.....	49
III.2.2.4 -Mesure de la tension de claquage.....	50
III.2.2.5 -Examen visuel et couleur.....	51
III.2.2.6 -Mesure du facteur de dissipation diélectrique.....	52
III.3 -Etude de l'influence de l'analyse des gaz dissous dans l'huile	53
III.3.1 -Principe.....	53
III.3.2 -Appareillage.....	54
III.3.3 -Mode opératoire	54
III.3.4 -Echantillonnage d'huile.....	55
III.3.5 Analyse d'échantillon d'huile	59
III.3.6 -Analyse des gaz dissous (DGA) à l'aide de seuils de prudence et d'avertissement	60
III.4 -Analyse chromatographique des gaz dissous dans huile isolante.....	67
III.4.1 -Objectifs	67
III.4.2 -Principaux composants d'un chromatographe	67
III.4.3 -Principe de séparation par chromatographie en phase gazeuse	69
III.4.4 -Procédure d'analyse des gaz dissous dans l'huile.....	70
III.5 -Vieillessement de l'huile de transformateur.....	73
 Chapitre IV : Principe de fonctionnement de la machine de traitement d'huile	
IV-1 -Machine de filtration d'huile de transformateur sous vide poussé	74

Table de matière

IV.2 -Huile isolante.....	75
IV.3 -Principe et fonctionnement de la machine de traitement d'huile.....	76
IV.3.1-Principes physiques.....	76
IV.4 -Composants d'une machine de filtration sous vide poussé pour huile de transformateur.....	81
VI.4 -Types de machines de filtration d'huile de transformateur de puissance.....	85
VI.4.1 -Purificateurs à un seul étage.....	85
VI.5- Avantages principaux.....	86
VI.6 -Applications industrielles.....	87
Conclusion.....	88
CONCLUSION GENERALE.....	Error! Bookmark not defined.
Référence	

Introduction générale

Introduction générale

Ce mémoire examine le lien dynamique entre l'innovation entrepreneuriale, les infrastructures énergétiques complexes et les approches de maintenance préventive, dans une situation où la pérennité et la fiabilité des systèmes électriques représentent des défis cruciaux.

Ce dernier est conçu de manière cohérente, reliant les idées organisationnelles contemporaines à des applications techniques concrètes, pour montrer comment la flexibilité et l'avancement des petites entreprises transforment les méthodes industrielles.

L'analyse de recherche commence par l'examen du modèle des petites entreprises, entités reconnues pour leur capacité à innover rapidement et à répondre aux défis des marchés émergents. Ces entreprises jouent un rôle essentiel dans la modernisation des secteurs traditionnels, comme celui de l'énergie, en intégrant des solutions numériques et des approches disruptives.

Ils exercent leur influence, en particulier dans l'amélioration des équipements essentiels comme les transformateurs de puissance THT/HT, qui constituent la colonne vertébrale des réseaux électriques. Soumis à des restrictions opérationnelles strictes (surchauffe, usure, perturbations), ces éléments requièrent une administration stricte afin d'assurer leur efficacité et leur durabilité.

Les recherches se poursuivent avec l'analyse des stratégies de maintenance industrielle, notamment les techniques de contrôle non destructif (CND), qui permettent de vérifier la durabilité des équipements sans perturber leur fonctionnement. Des méthodes telles que la thermographie infrarouge et l'analyse vibratoire illustrent comment l'innovation, souvent portée par des procédés réactifs, se transforme en outils de diagnostic préventif. Cette approche permet d'étudier en détail une technologie spécifique : l'analyse de l'huile isolante des transformateurs. Grâce à des techniques analytiques avancées (chromatographie et études de ténacité), l'huile est essentielle pour déterminer l'état des matériaux en détectant rapidement les premiers signes de dommage ou de contamination.

L'utilisation d'un dispositif de traitement de l'huile est une solution sophistiquée pour maintenir l'efficacité des transformateurs. Ce dispositif purifie l'huile isolante de toutes les impuretés (telles que l'eau et les contaminants métalliques) par microfiltration et sous vide, restaurant ainsi ses propriétés isolantes et thermiques. Grâce à l'intégration de technologies intelligentes telles que des capteurs en temps réel, ces dispositifs s'adaptent automatiquement aux conditions de l'huile, réduisant ainsi les coûts de maintenance et prévenant les pannes imprévues. Dans ce cadre, ces travaux mettent en évidence une synergie fondamentale : les

Introduction générale

petites entreprises, grâce à leurs avancées technologiques et méthodologiques, proposent des solutions sur mesure aux problématiques des infrastructures énergétiques. De la prévision de la maintenance à l'optimisation des machines, chaque élément s'intègre pour former un système robuste et intégré, capable d'allier performance opérationnelle et exigences environnementales. Cette vision globale offre un cadre pour anticiper les besoins futurs, où l'innovation continue et la collaboration entre les secteurs traditionnels et les petites entreprises sont essentielles pour garantir un approvisionnement énergétique durable et constant.

Chapitre I

Généralités sur les Transformateurs de Puissance

THT/HT

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance THT/HT

Introduction

Un transformateur convertit une tension d'entrée en une tension de sortie CA plus ou moins élevée. Il modifie l'intensité d'un circuit spécifique à un autre sans modifier la fréquence en fonction des niveaux de contrainte. Les réseaux de transport capables de transférer efficacement des centaines de mégawatts d'électricité sur de longues distances sont rendus possibles grâce aux transformateurs, composants essentiels de la vie moderne.

Un transformateur est un dispositif fixe (c'est-à-dire sans pièce mobile) composé d'un, deux ou plusieurs bobinages couplés biologiquement et électriquement séparés, avec ou sans noyau magnétique. L'énergie électrique d'un circuit est transférée à un autre par induction électrique.

Le terme « primaire » désigne un fonctionnement conforme à la source d'énergie alternative du courant primaire, et « secondaire » désigne un fonctionnement conforme à la charge ou à la source d'énergie. Ces deux enroulements, bien isolés, sont enroulés sur un noyau feuilleté servant de chemin magnétique entre eux.

Un champ magnétique alternatif, ou flux, est créé dans le noyau du transformateur lorsque l'énergie primaire est fournie par une source de tension alternative. L'intensité de la tension appliquée, la fréquence du flux magnétique et l'amplitude du courant côté primaire sont fonction du nombre d'excursions.

Dans les réseaux électriques, les transformateurs sont souvent utilisés pour générer des valeurs de tension et de courant variables à la même fréquence. Par conséquent, en utilisant des circuits primaires et secondaires appropriés, le transformateur atteint le rapport de tension souhaité.

La tension secondaire du transformateur d'ascenseur est supérieure à la tension primaire. Cela s'explique par le fait que le primaire comporte moins de tours que le secondaire. Pour augmenter la tension, on utilise un transformateur.

Ils ont des capacités plus puissantes et sont utilisés dans les réseaux de transport. Comme l'enroulement secondaire comporte moins de tours, la tension secondaire dans le transformateur abaisseur est inférieure à la tension primaire.

Par conséquent, ce type de transformateur est utilisé pour abaisser la tension à des niveaux spécifiques au circuit.

La plupart des alimentations utilisent le transformateur abaisseur pour maintenir la plage de fonctionnement du circuit à une limite de tension plus sûre.

Ces types de transformateurs sont utilisés dans les réseaux de distribution.

Cela démontre que ces dispositifs comptent parmi les composants les plus cruciaux de tout réseau de transport ou de distribution d'électricité [1].

I.1 -Réseaux électriques :

Définition

Un réseau électrique qui produit et distribue de l'électricité aux clients tout en maintenant une tension et une fréquence constantes, une bonne qualité de tension et un approvisionnement ininterrompu [2].

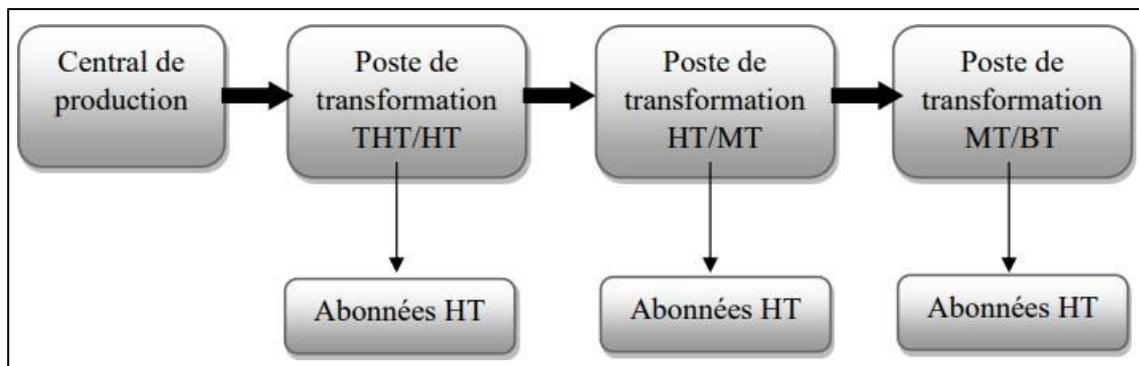


Figure I.1: Schéma simplifié d'un réseau électrique [3].

I.2 -Description du réseau électrique :

1) Réseau de transport très haute tension (THT)

D'une manière générale, il s'agit du réseau qui permet d'acheminer l'énergie des centres de production éloignés vers les centres de consommation. Il est situé sur le réseau THT, essentiellement ramifié par de grands centres de puissance (> 300 MW). Les réseaux de transport constituent un vaste réseau couvrant l'ensemble du territoire, auquel sont assignés les sources et les usages (groupes, transformateurs).

2) Réseau de transport haute tension (HT)

Ce réseau a pour objectif principal de distribuer l'électricité du réseau de transport vers les principaux pôles de consommation, à savoir :

- Le domaine public avec accès au réseau de distribution MT ;
- Il s'agit d'une propriété privée avec accès à des abonnés à fort débit (jusqu'à 10 MVA) qui sont directement acheminés vers le HT.

Il concerne principalement des secteurs comme la sidérurgie, la chimie, la cimenterie et le transport ferroviaire [4].

I.2.1 - Gamme des tensions utilisées par SONELGAZ en algérie

La nouvelle norme en vigueur en Algérie, établie par SONELGAZ, définit les niveaux de tensions comme suit :

Tableau I.1: Différentes gammes de tensions utilisées par SONELGAZ.

Domaine de Tension		Valeur de la tension composée nominale (en Volts)	
		Tension Alternative	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension	HTA	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 75000$
	HTB	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

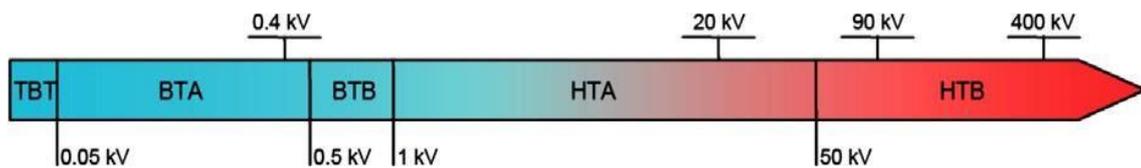


Figure I.2 : Niveaux de tension normalisés [5].

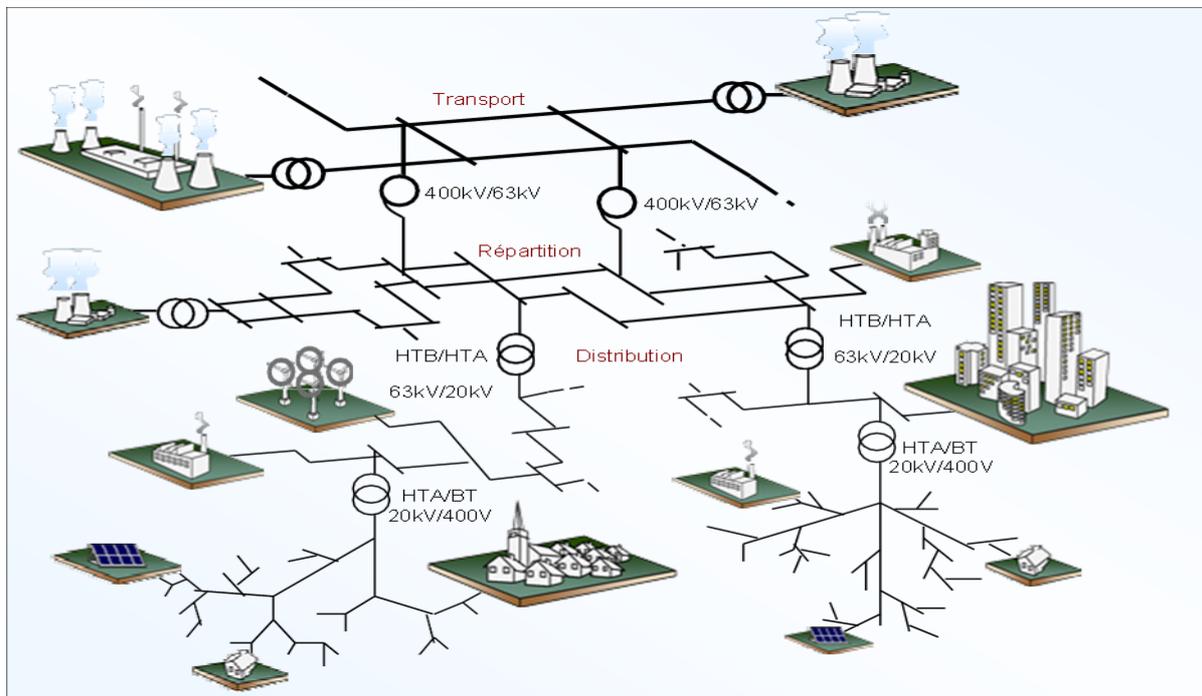


Figure I.3: Partage du réseau électrique par gamme de tension [6].

I.2.2 -Différents types des réseaux électriques :

1) Réseaux de transport et d'interconnexion

Ces réseaux ont pour mission principale :

De collecter l'électricité produite par les grandes centrales et de la transporter, sous forme de flux importants, vers les zones de consommation (fonction transport) ; D'assurer une exploitation économique et sécurisée des moyens de production en compensant divers aléas (fonction interconnexion).

Caractéristiques

Tensions de 150 kV, 220 kV et, plus récemment, 420 kV ; Neutre directement mis à la terre ; Réseau maillé.

2) Réseaux de répartition

Ces réseaux, également appelés réseaux Haute Tension, ont pour rôle de distribuer, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension dépasse 63 kV (variable selon les régions).

Caractéristiques

Majoritairement constitués de lignes aériennes capables de faire transiter plus de 60 MVA sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres ; Structure en boucle fermée ou, le plus Souvent, en boucle ouverte, pouvant se terminer en antenne dans certains postes de transformation ; En zone urbaine dense, ils peuvent être souterrains sur quelques kilomètres seulement ; Ils alimentent à la fois les réseaux de distribution via des postes de transformation HT/MT et les utilisateurs industriels nécessitant un raccordement en HT (supérieur à 60 MVA) [7].

Précisions techniques

Tensions de 90 kV ou 63 kV ; Neutre mis à la terre par réactance ou par transformateur de point neutre ; Limitation du courant neutre à 1500 A pour le 90 kV ; Limitation du courant neutre à 1000 A pour le 63 kV ; Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

3) Réseaux de distribution

Ces réseaux débutent à partir de tensions inférieures à 63 kV et à partir des postes de transformation HTB/HTA, puis se prolongent via des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA représente le dernier maillon de la chaîne de distribution, desservant l'ensemble des usages du courant électrique [8] [9].

➤ **Réseaux de distribution à moyenne tension**

- Tensions HTA (généralement 30 kV et 10 kV) ;
- Neutre mis à la terre par une résistance ;
- Limitation du courant à 300 A pour les réseaux aériens ;
- Limitation du courant à 1000 A pour les réseaux souterrains ;
- Réseaux souterrains en boucle ouverte.

➤ **Réseaux de distribution à basse tension**

- Tensions BTA (230/400 V) ;
- Neutre directement mis à la terre ;
- Réseaux de type radial, maillé ou bouclé [9].

I.2.3 -Rôle du réseau électrique :

Le courant des alternateurs s'est développé grâce aux progrès technologiques qui ont permis d'ajuster les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs.

Le réseau électrique est organisé en fonction de son niveau de contrainte et se divise en trois sections principales : les réseaux de distribution, de transport et de remplacement.

Une frontière peut être définie entre les différents niveaux de tension du réseau électrique ; cette frontière est assurée par les transformateurs et les bornes sources [10].

I.2.4 -Structure générale d'un réseau électrique :

La figure I.3 présente la structure générale d'un réseau électrique [11].

L'architecture d'un réseau électrique est définie en fonction du niveau de tension, de la puissance demandée et de la sécurité requise [12].

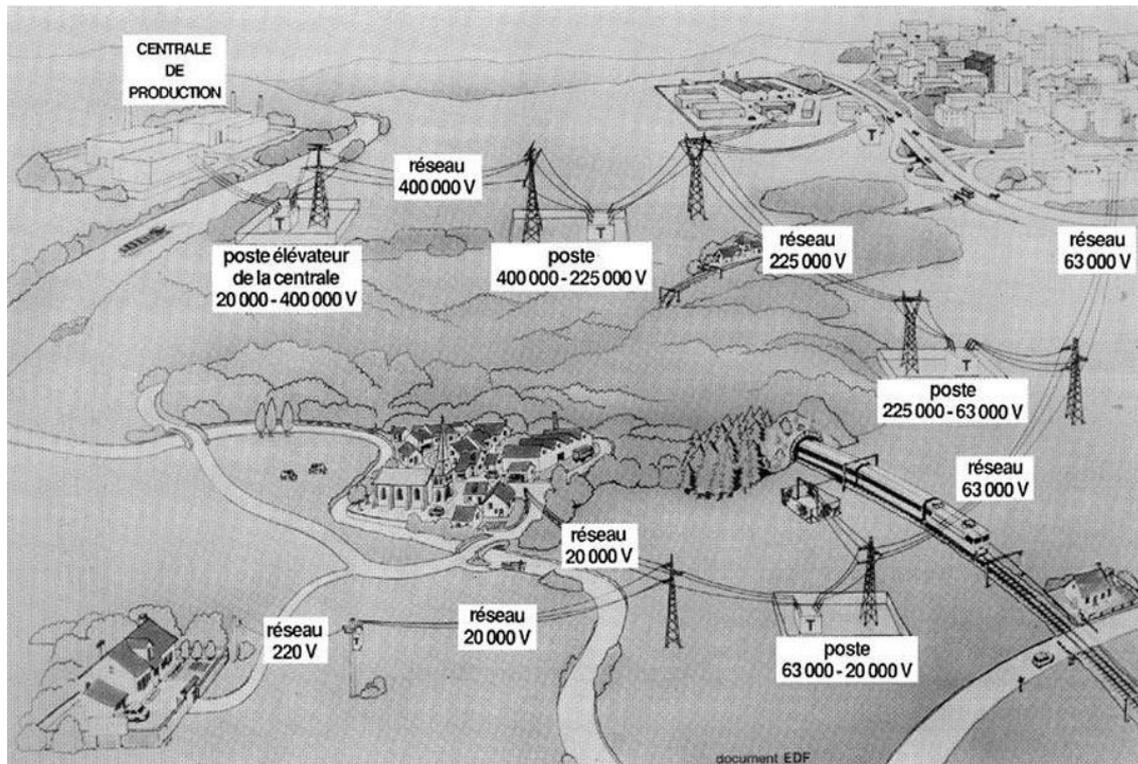


Figure I.4: Structure générale d'un réseau électrique [13].

I.3 -Généralité sur les transformateurs :

I.3.1 -Définitions du transformateur :

Les instituts scientifiques américains : American National Standards Institute (ANSI) et Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) définissent le transformateur comme un appareil électromagnétique statique « qui ne contient aucune partie mobile », utilisé dans les réseaux pour transférer la puissance entre circuits via l'induction électromagnétique. Le terme transformateur de puissance est utilisé pour se référer aux transformateurs qui se trouvent entre les circuits de production et de distribution électrique. Sont généralement de 500 kVA et plus [14-15].

I.3.2 -Rôle du transformateur :

Les transformateurs sont largement utilisés dans les réseaux électriques, par exemple pour minimiser les pertes de puissance en ligne lors du transport d'énergie électrique. Les transformateurs élévateurs sont situés à proximité des centres de production, tandis que les transformateurs abaisseurs se trouvent plus près des points d'utilisation. Les transformateurs de puissance permettent une réduction très rentable des pertes en ligne en assurant le transport de l'énergie électrique sur de longues distances sous haute tension (par exemple, 200 kV, 400 kV

et plus, entre phases) [15]. L'énergie est ensuite progressivement transformée par des transformateurs abaisseurs pour alimenter les réseaux de distribution régionaux, puis locaux, jusqu'à atteindre la tension domestique [16].

I.3.3 - Composants d'un transformateur :

D'une manière générale, un transformateur est constitué d'un circuit magnétique feuilleté et d'un ensemble de bobines séparées par des écrans électrostatiques qui entourent des noyaux magnétiques. Chaque bobine formant le milieu conducteur est organisée en paquets de spires et chaque spire étant constituée de brins élémentaires. Les différents types de transformateurs se distinguent suivant la disposition géométrique de leurs constituants, de la forme de leur circuit magnétique et du type de refroidissement [17].

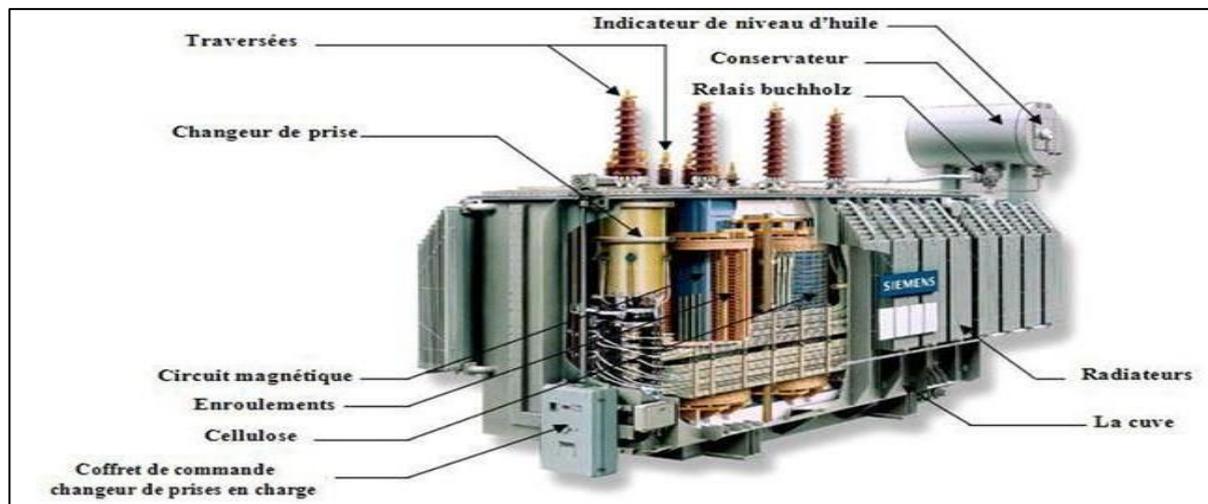


Figure I.5: Principaux organes qui constituent un transformateur [18].

Voici les principaux composants du transformateur :

- Traversées (isolateurs traversant la cuve)
- Changeur de prise (et son coffret de commande pour opérations sous charge)
- Circuit magnétique (cœur en tôles empilées)
- Enroulements (primaire et secondaire)
- Cellulose (isolation papier autour des conducteurs)
- Conservateur (réservoir supérieur d'expansion d'huile)
- Indicateur de niveau d'huile (niveau d'huile dans le conservateur)
- Relais Buchholz (détecteur de défauts gazeux)
- Radiateurs (refroidissement par circulation d'huile)
- Cuve (réservoir principal contenant l'huile et le transformateur) [18].

I.3.4 -Principe de fonctionnement du transformateur :

Selon la loi de Faraday, lorsqu'un flux magnétique variable (Φ) traverse un circuit magnétique, il induit dans chaque enroulement une force électromotrice proportionnelle à son taux de variation ($d\Phi/dt$) et au nombre de spires de l'enroulement concerné. Lorsqu'une source de courant alternatif alimente le primaire, un flux alternatif se met en place dans le circuit, son amplitude dépendant à la fois du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit, dans l'enroulement secondaire, une tension proportionnelle au nombre de ses spires.

La connexion du secondaire à une charge permet ainsi la circulation du courant secondaire. Le noyau magnétique offre quant à lui un chemin de conduction efficace pour le flux, comme l'illustre le schéma ci-dessous. La figure [19].

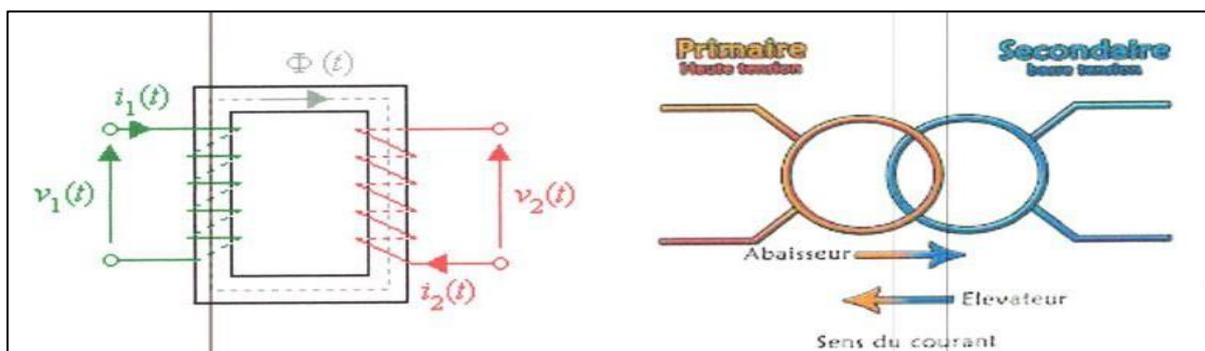


Figure I.6: Circuits magnétiques et électriques liés. **Figure I.7:** Symbole de transformateur [19].

I.3.5 -Couplage- indice horaire - rapport de transformation :

1) Couplage

Les enroulements primaires et secondaires sont couplés en étoile, en triangle ou en Zigzag Si on indique par Y, D et Z les couplages respectivement en étoile, en triangle et en zigzag des enroulements primaires.

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

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- Y-y : étoile –étoile
- Y-d : étoile- triangle
- Y-z : étoile- zigzag
- D-y : triangle – étoile
- D-d: triangle-triangle

- D-z: triangle-zigzag

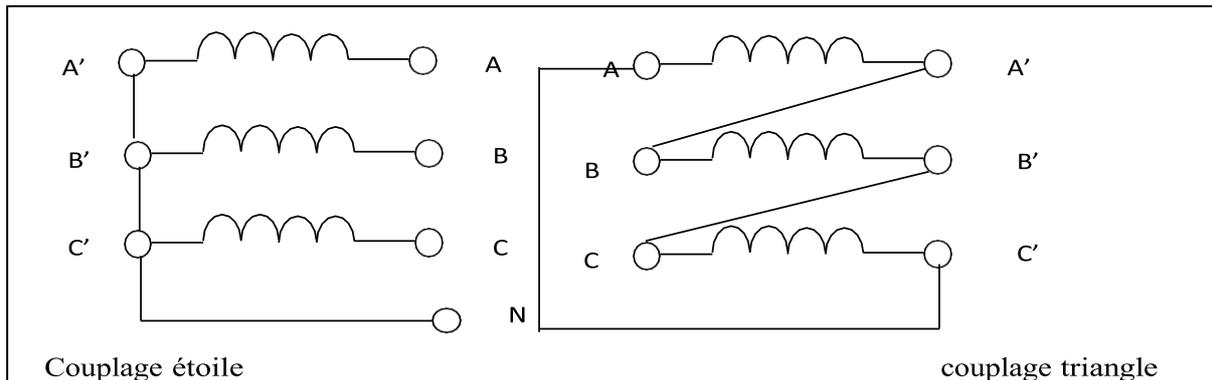


Figure I.8: Couplage du primaire.

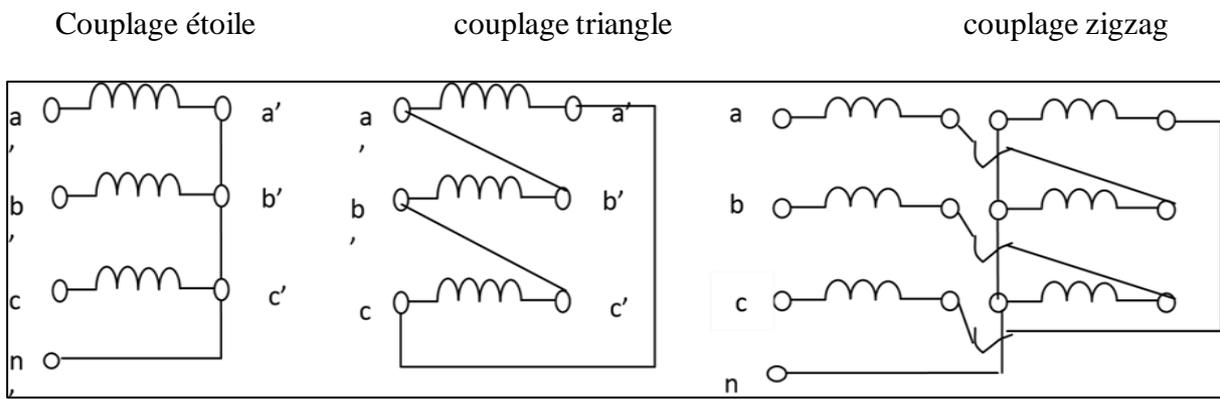


Figure I.9: Couplage du secondaire.

Les couplages les plus utilisés sont :

Couplage Dy11 il est considéré comme élévateur de tension à la sortie des centrales électrique.

Le couplage Yy0 utilisé comme abaisseur de tension en le réseau HT-B et un réseau HT-A

2) Indice horaire h

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

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

$$h = \theta / 30^\circ \quad [I.1]$$

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

On peut déterminer θ :

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

3) -Rapport de transformation

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

$$M = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_2}{I_1} \quad [I.2]$$

I.3.6 -Pertes des transformateurs triphasés :

1) Pertes électriques

Ces pertes, de type Joule, dépendent de la résistance des enroulements ainsi que de l'intensité du courant qui les traverse.

2) Pertes fer

Elles regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault, lesquelles varient en fonction de la fréquence et de l'induction maximale.

3) Pertes par hystérésis

Elles s'expliquent par le décalage de l'induction par rapport au champ magnétique appliqué dans le circuit magnétique, ce qui engendre une dissipation d'énergie sous forme de chaleur.

4) Pertes par courants de foucault

Ces pertes se manifestent par un effet Joule générant de la chaleur au sein du circuit magnétique. Pour les réduire, on empile les tôles et on les isole les unes des autres [20].

I.3.7 -Schéma électrique équivalent :

En compte des différentes pertes, le schéma monophasé équivalent ramener au secondaire d'un transformateur triphasé :[21]

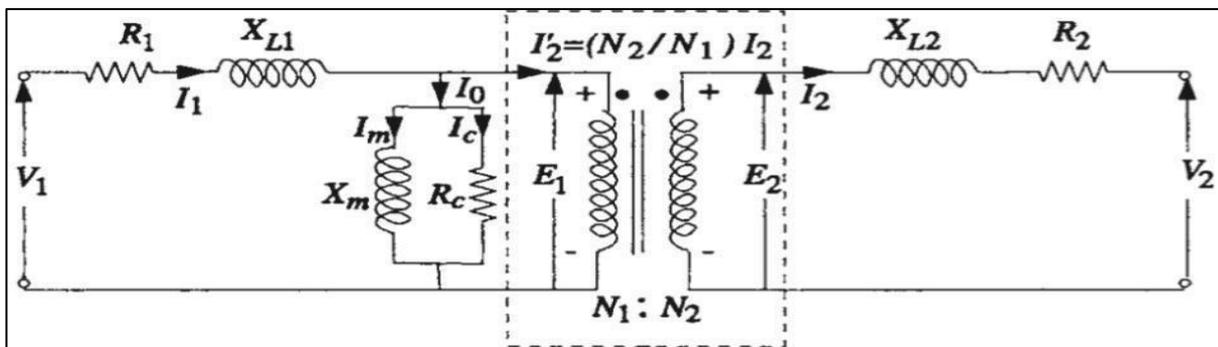


Figure I.10 : Schéma électrique équivalent [21].

I.4 -Différents essais d'un transformateur triphasé :

1) Essai à circuit secondaire ouvert (essai à vide)

- **Principe**

L'essai à vide consiste à alimenter le circuit primaire du transformateur à sa tension nominale, tandis que le secondaire reste ouvert (aucune charge connectée).

Ainsi, le courant dans le secondaire est nul :

$$I_2=0 \text{ (aucun courant)}$$

- Procédure expérimentale :

- On applique la **tension nominale** U_{10} au primaire.
- Le secondaire est **déconnecté**.

- On effectue les mesures suivantes :

I_{10} : Courant primaire à vide

U_{20} : Tension secondaire à vide

P_{10} : Puissance absorbée à vide

$$P_{10} = \sqrt{3} \times U_{20} \times I_{10} \times \cos\theta \quad [I.3]$$

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

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

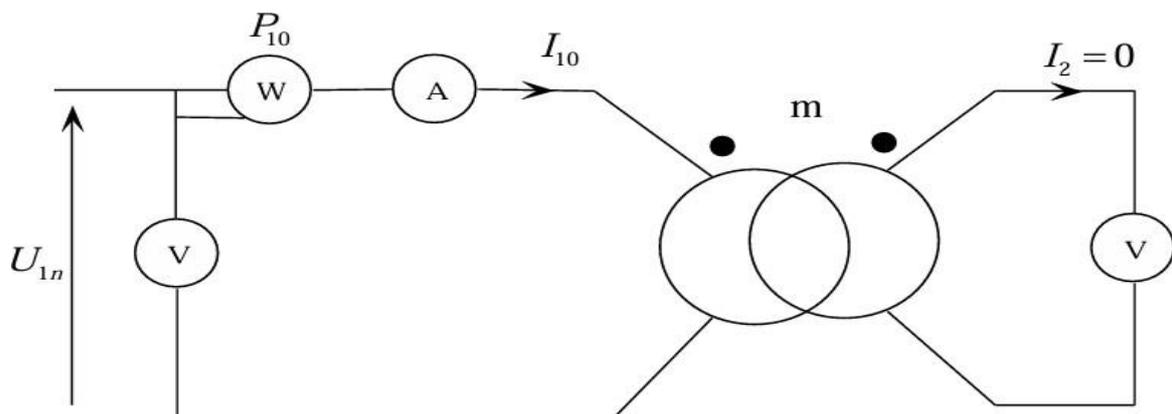


Figure I.11: Schéma de l'essai à vide d'un transformateur triphasé.

Tableau I.2: Essai à vide [22].

	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	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_0}{V_0} \sin(\varphi)$	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_0 - \text{phase}}{V_0 - \text{phase}} \sin(\varphi)$

2) Essai en court-circuit

Dans cet essai on : Règle : I_{2cc} à sa valeur nominale.

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

On calcule : Z_s , R_s , X_s .

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

Tableau I.3: Essai en court-circuit [22].

	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	$X_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \sin(\varphi)$	$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$

I.5 -Bilan de puissance :

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

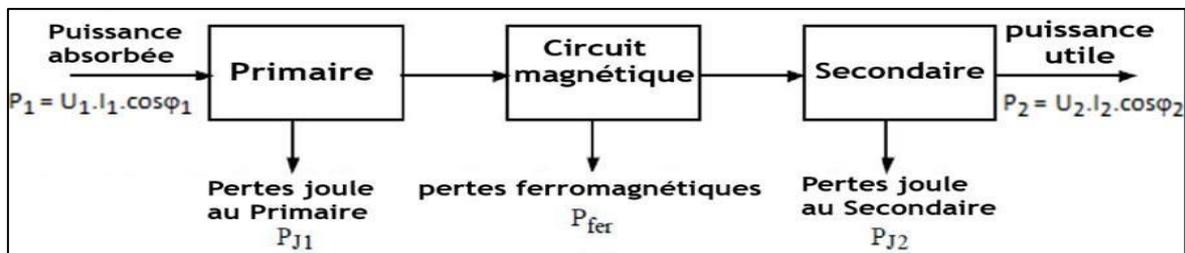


Figure I.12: Schéma du bilan de puissance d'un transformateur.

On distingue les expressions de puissance en triphasée :

Tableau I.4: Puissance électrique en régime triphasé

Paramètre de puissance	Expressions en triphasée
Puissance active P(W)	$P = 3.V.I.\cos\varphi$
Puissance réactive Q(Var)	$Q = 3.V.I.\sin\varphi$
Puissance apparente S(VA)	$S = 3.V.I$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
Facteur de puissance	$\cos\omega = P/S$

1) Rendement

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

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{ertes}} \quad [I,4]$$

Avec

$$P_u = \sqrt{3} U_s . I_s . \cos(\omega s) \quad [I,5]$$

Pertes : perte fer + perte joule

Donc

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

2) Chute de tension

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

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

$$\Delta = R_s . I_2 . \cos\varphi_2 + X_s . I_2 . \sin\varphi_2$$

Avec

U_{20} : tension secondaire à vide

U_2 : tension secondaire en charge[22].

Conclusion

Les transformateurs électriques sont l'épine dorsale des réseaux électriques car ils transfèrent efficacement l'énergie des centrales électriques aux consommateurs en augmentant la tension pour minimiser les pertes lors de la transmission longue distance, puis en la diminuant progressivement pour la distribuer en toute sécurité.

Chapitre II
Maintenance industrielle
&
Contrôle non destructif

Chapitre II : Maintenance industrielle et contrôle non destructif

Introduction

La maintenance est devenue l'un des enjeux les plus pressants de notre époque, soutenue par les gestionnaires et les décideurs du monde entier, notamment dans le secteur industriel, où elle trouve son utilisation la plus avantageuse. Dans une application industrielle, nous manipulons des équipements dont la défaillance peut avoir des conséquences désastreuses, notamment économiques, puisque le rendement d'un équipement est calculé comme s'il était toujours en mouvement, ce qui soustrait le rendement qu'il aurait pu avoir à l'arrêt. C'est pourquoi les études liées à la maintenance se concentrent sur les techniques et stratégies de maintenance préventive, dont l'objectif est d'arrêter les pannes avant qu'elles ne surviennent [23].

En raison des risques posés par la fissuration des structures métalliques, telles que les transformateurs, etc., dans le secteur industriel, un contrôle de qualité est parfois nécessaire. Le meilleur, c'est qu'ils garantissent leur disponibilité et leur fonctionnalité. Maintenir un produit industriel en bon état de fonctionnement dans des conditions de fonctionnement sûres pendant son utilisation nécessite une compréhension globale de l'évolution des composants qui le composent. Cette prise de conscience nécessite notamment de procéder à des contrôles qui n'affectent pas l'intégrité des pièces et, dans la mesure du possible, la disponibilité du produit. Sisi explique l'importance d'adopter un système de contrôle non destructif (CND) [24].

Les méthodes CND sont utilisées soit pour évaluer les principales caractéristiques du produit (telles que l'épaisseur, la conductivité, etc.), soit pour identifier et caractériser les éventuels défauts qu'il contient. L'échographie peut être considérée comme l'une des techniques les plus utilisées.

Il s'agit de techniques qui utilisent des rayonnements ionisants (radioscopie) et des techniques électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). Le choix d'une méthode dépend d'un large éventail de facteurs, notamment le type de matériaux qui composent les composants à contrôler, le type d'information recherchée (débouchant par défaut ou enfoui), les conditions de mise en œuvre, etc. [25],[26]

II.1 -Définition de la maintenance :

Selon l'AFNOR [27]

Par la norme NF X 60-010, la maintenance se définit comme étant l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé.

Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal [28].

Ce passage expose une définition normée de la maintenance, mettant en avant quatre notions essentielles :

- **Maintenir**

Implique la surveillance et le suivi régulier du bien, c'est-à-dire une démarche préventive pour éviter les défaillances.

- **Rétablir**

Fait référence à la correction des défauts ou à la réparation d'une panne, c'est une approche corrective pour remettre l'équipement en état.

- **État spécifié / Service déterminé**

Signifie que le niveau de performance attendu est préalablement défini, avec des objectifs et des critères précis quant à la fonctionnalité ou la qualité du service rendu par le bien.

- **Coût optimal**

Conditionne toutes les opérations de maintenance afin d'atteindre une efficacité économique, c'est-à-dire réaliser ces actions au meilleur coût global possible. En résumé, la fonction maintenance dans une entreprise vise à garantir la disponibilité maximale des équipements et à en assurer le meilleur rendement, tout en respectant le budget alloué. Ce rôle est essentiel pour maintenir la compétitivité et la performance opérationnelle de l'entreprise [27].

II.2 -Importance de la maintenance industrielle :

L'importance de la maintenance industrielle réside dans le fait que tout équipement a un cycle de vie qui débute généralement par un mode de fonctionnement initialement sain.

Le concepteur définit un certain nombre de paramètres définissant ce mode.

Au fil du temps, l'exploitation conduit l'équipement à atteindre un état ou mode de fonctionnement « dégradé », avec une baisse de ses performances.

L'équipement ne peut alors remplir que partiellement sa fonction.

L'équipement atteint l'état « défaillant », défini comme l'état dans lequel il est incapable de remplir sa fonction première, si la dégradation n'est pas corrigée par les personnes compétentes. À partir de ce moment, l'AFNOR [27] a défini les termes « dégradation », « défaillance » et « panne ».

La figure II.1. Extraite de [29] illustre le cycle de vie d'un équipement.

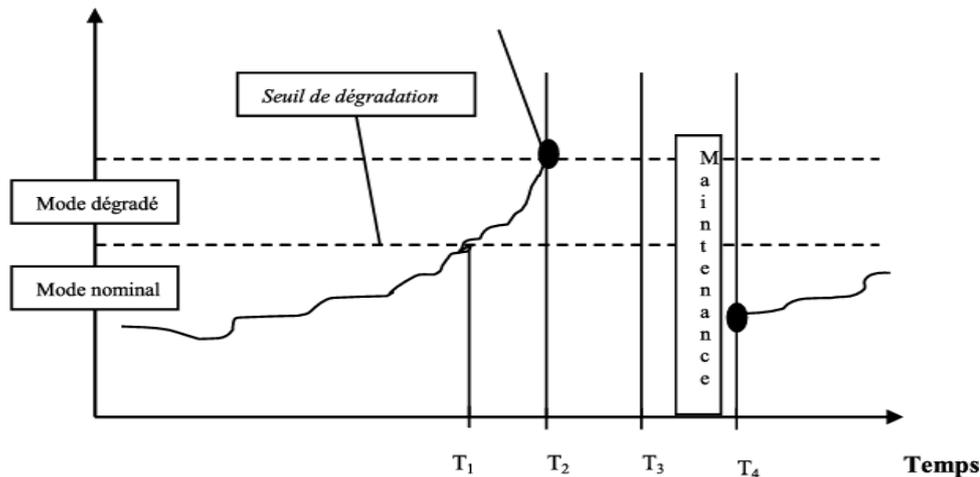


Figure II.1: Modes de fonctionnement d'un système.

II.3 -Définition de la dégradation, défaillance et panne :

Selon l'AFNOR [27] la dégradation et la panne ont été définies de la manière suivante :

La dégradation est une évolution irréversible liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe, d'une ou plusieurs caractéristiques d'un équipement. Par contre, la défaillance caractérise l'équipement s'il est inapte à accomplir une fonction requise. Quant à la panne, elle concerne l'état d'un équipement inapte à accomplir une fonction requise en excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures. Si la défaillance se produit à l'instant, la panne représente l'état du système après défaillance.

II.4 -Niveaux de la maintenance industrielle :

Selon l'AFNOR [27], différents niveaux de maintenance ont été définis en fonction du degré de défaillance de l'équipement et de la complexité des opérations à réaliser. Ces niveaux sont présentés dans [30] de la manière suivante :

Niveau 1

Il s'agit d'un contrôle réalisé par le constructeur ou le service de maintenance. Ce contrôle, essentiellement visuel et auditif, est superficiel et n'implique ni démontage ni

ouverture de l'équipement. On vérifie notamment les organes sensibles, ainsi que les niveaux d'huile, d'eau et les températures garantissant le bon fonctionnement.

Niveau 2

Ce niveau correspond à un dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet, associé à des opérations mineures de maintenance préventive. Ces interventions peuvent être effectuées par un technicien qualifié ou par l'utilisateur formé spécifiquement à cet effet. Elles consistent en des opérations de remplacement, d'analyse et de réglages simples, parfois à l'aide d'un outillage spécifique.

Niveau 3

Il englobe l'identification et le diagnostic d'une panne, suivis du remplacement de composants, de réglages et d'un étalonnage général. Ces opérations, de type curatif, peuvent être réalisées sur place ou dans un local de maintenance à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance, et concernent notamment des réparations mécaniques ou électriques mineures (par exemple, le remplacement de capteurs ou de modules défectueux).

Niveau 4

Ce niveau regroupe des travaux importants de maintenance corrective ou préventive, à l'exception des opérations de rénovation et de reconstruction. Ces interventions, plus complexes, sont effectuées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et d'outils adaptés à la nature de l'intervention (par exemple, le rebobinage d'un moteur électrique ou la rectification de culasse).

Niveau 5

Il s'agit de travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparations majeures confiés à un atelier central de maintenance ou à une entreprise extérieure prestataire de services. Ce niveau requiert des moyens comparables à ceux utilisés en fabrication.

II.5 -Stratégie de la maintenance industrielle :

On distingue deux types principaux de maintenance Industrielle :

La maintenance corrective et la maintenance préventive. On parle de maintenance mixte ou opportuniste lorsqu'une maintenance préventive est effectuée sur un équipement suite à la défaillance d'un autre équipement. Nous expliquons ci-après les différentes

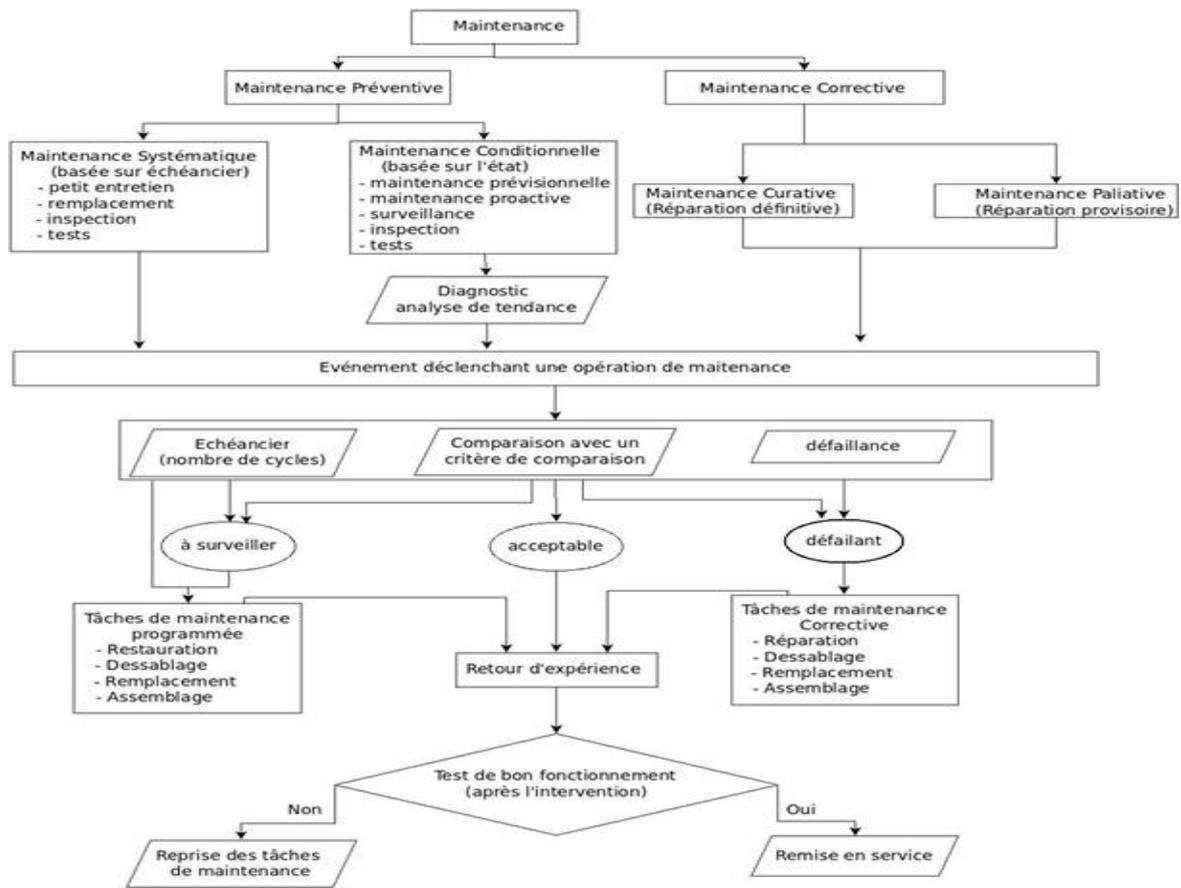


Figure II.2: Stratégies de la maintenance industrielle.

II.5.1 -Maintenance corrective :

C'est défini par [27] comme étant une maintenance accomplie après détection d'une panne et a pour objectif de remettre un équipement dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Elle se fait selon deux types d'interventions :

Le dépannage appelé aussi maintenance palliative et la réparation appelé maintenance curative.

A - Maintenance palliative

Il s'agit d'interventions rapides, réalisables directement sur le site de la panne ou à distance. Dans certains cas, ces interventions peuvent être effectuées sans interrompre le système de production. L'objectif est de rétablir provisoirement le fonctionnement du système (c'est-à-dire de lui permettre d'accomplir temporairement sa fonction requise), en attendant qu'une solution définitive soit mise en œuvre.

B - Maintenance curative

Cette intervention se réalise sur le site de la panne et vise à restaurer définitivement le fonctionnement de l'équipement. Elle consiste à réparer de manière pérenne la

défaillance, en remplaçant, réparant ou modifiant les éléments défectueux, afin que l'équipement retrouve son état spécifié et puisse continuer à accomplir sa fonction de façon optimale.

II.5.2 -Maintenance préventive :

Trois types de maintenance préventive ont été définies : la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle.

A -Maintenance systématique

Il s'agit d'une intervention planifiée à l'avance, exécutée selon un calendrier, et réalisée avant que ne survienne la défaillance probable. Selon [27], c'est une maintenance effectuée à intervalles prédéterminés ou selon des critères définis, dans le but de réduire la probabilité d'une panne ou la dégradation du fonctionnement d'un équipement.

Concrètement, dès qu'un nouvel équipement est mis en service, des visites préventives périodiques sont organisées pour contrôler son état, consigner les informations relatives à ses courbes de dégradation et établir des seuils d'admissibilité.

Ces inspections permettent de détecter à temps d'éventuelles anomalies et ainsi de préparer des interventions préventives adaptées. Une fois le comportement du matériel mieux connu, la stratégie de maintenance peut évoluer vers une organisation systématique avec une fréquence constante, facilitant ainsi sa gestion. Une approche plus avancée consiste à mettre l'équipement sous surveillance continue, ce qui conduit à la maintenance conditionnelle.

B -Maintenance conditionnelle

Cette forme moderne de maintenance appelée par l'abréviation CBM (Condition-Based Maintenance), permet d'assurer le suivi continu du matériel en service dans le but d'éviter un remplacement précoce des composants en bon état, ainsi que de prévenir les défaillances attendues. Le majeur avantage de cette stratégie est qu'elle n'implique pas nécessairement la connaissance de la loi de dégradation. Elle est définie par l'AFNOR [27] comme étant une maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La détection d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale de défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé.

Sur le plan technique, l'information sur le fonctionnement des différents composants d'un équipement est fournie par des capteurs fixés en permanence à la machine. Souvent reliés à une chaîne de télémessure (télésurveillance), ils permettent d'obtenir un signal

d'alarme, un arrêt automatique du fonctionnement, un enregistrement continu, des paramètres mesurés devenant ainsi un élément indispensable d'un système de télémaintenance.

C -Maintenance prévisionnelle

La maintenance prévisionnelle est une CBM approfondie. Elle est en effet basée sur l'analyse de l'évolution des paramètres techniques significatifs de l'état de l'équipement et permet de repérer les éventuelles dégradations dès leur apparition. Elle permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée, de façon plus précise que la CBM. L'application de cette stratégie nécessite la maîtrise de la technologie et du comportement de l'équipement concerné dans ses conditions d'exploitation. Elle a été définie de façon plus formelle par l'AFNOR, comme étant "une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien [27]

II.6 -Techniques pratiques de maintenance préventive et corrective du transformateur de puissance :

II.6.1 -Maintenance préventive du 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 : [31]

1) Inspection de l'état général du transformateur :

Il est recommandé de suivre les étapes suivantes :

- Brancher les bornes sur la mise à la terre du transformateur pour empêcher tout contact électrique possible lors du nettoyage mensuel [32]
- 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.
- **Inspection thermique et ventilation**
- Effectuer une inspection thermographique infrarouge des systèmes électriques.
- Inspection recommandée annuellement ou plus fréquemment (trimestriellement ou semestriellement).
- Si le transformateur est installé à l'intérieur, s'assurer que le local est bien ventilé pour éviter toute surchauffe.
- Relever et enregistrer les valeurs de : tension, courant, température, niveau de liquide, pression / dépression.
- Vérifier que ces valeurs restent dans les limites autorisées.
- **Resserrage des boulons et vis des isolateurs et bornes**
- Lors des arrêts du transformateur, effectuer une maintenance opportuniste.
- Procéder au resserrage des vis et boulons des isolateurs mécaniques et des bornes électriques.
- **Purification et filtration de l'huile isolante**
- Analyser l'huile isolante une fois par an pour vérifier :
 - La rigidité diélectrique.
 - L'acidité.
 - La coloration.
- Réaliser une analyse des gaz dissous (DGA) annuellement ou plus souvent si la rigidité diélectrique approche la limite inférieure.[31]

II.6.2 -Maintenance corrective de transformateur à huile :

1) Maintenance corrective est effectuée pour réparer toute panne de l'équipement et inclut les catégories suivantes

• **Prévue**

- Les réparations nécessaires sont connues à l'avance et donc tous les éléments requis sont disponibles au moment de la réparation.

- **Maintenance imprévue (ou d'urgence)**

- Nécessaire en cas de problème entraînant une panne d'un équipement essentiel.
- Aussi appelée maintenance d'urgence ou maintenance en cas de panne.
- Réalisée fréquemment dans des situations critiques.
- Objectif principal : rétablir rapidement le service.

II.6.3 -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.

1) 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**

- Fait fonctionner le transformateur de manière inefficace.
- La chaleur générée par le courant détériore les propriétés de l'huile isolante.
- Provoque des pertes de performance et des inefficacités.
- Peut entraîner un court-circuit et des dommages irréversibles au transformateur.

- **Déséquilibre de tension, d'intensité et de puissance**

- Si ces déséquilibres persistent et ne peuvent être corrigés, il est parfois préférable de remplacer le transformateur.
- Un système de protection défaillant, combiné à un problème électrique, peut causer une panne du transformateur nécessitant son remplacement.

II.6.4 -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

- Causes possibles :
 - Refroidissement insuffisant.
 - Niveau de liquide bas.
 - Présence de boues dans l'huile du transformateur.
 - Température ambiante élevée.
- Solutions : ajuster le niveau d'huile et améliorer la ventilation.

• Défaillance d'isolation de l'enroulement

- Causes :
 - Court-circuit.
 - Foudre.
 - Surcharge.
 - Surintensité.
- Solutions :
 - Utiliser un autre transformateur pour partager la charge.
 - Remplacer par un transformateur de puissance adéquate.

• Modifications des propriétés de l'huile

- Cause principale : humidité.
- Solution : filtrer ou remplacer l'huile isolante.

[32].

II.7 -Contrôle non destructif (CND) :**II.7.1 -Définition et intérêt du CND :**

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes permettant d'évaluer l'état d'intégrité de structures industrielles sans les altérer, que ce soit durant la production (les pièces issues des fonderies ne sont jamais exemptes de défauts) ou lors de leur utilisation (apparition de défauts). Il est ainsi nécessaire de déterminer, de façon empirique, la taille minimale d'un défaut conduisant à la casse (destruction) afin de pouvoir les détecter sans compromettre la pièce. On parle également d'essais non destructifs ou d'examen non destructifs (END), des termes qui évoquent davantage les contrôles réalisés en laboratoire que la qualité industrielle. En ce sens, le CND se présente comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits. Il se distingue de l'instrumentation de laboratoire et industrielle par son objectif : détecter et mettre en évidence les hétérogénéités, anomalies ou défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et, plus généralement, la conformité

d'un produit à l'usage auquel il est destiné, plutôt que de simplement mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce. [33] [34]

II.7.2 - Objectifs du CND :

Le contrôle non destructif (CND) vise, comme son nom l'indique, à vérifier l'état des pièces industrielles sans compromettre leur utilisation future. Cela se traduit par deux approches de contrôle : d'une part, l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce (par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, ou les propriétés électromagnétiques du matériau) et, d'autre part, la détection d'une rupture de ces paramètres. Dans le second cas, l'objectif est généralement de repérer des défauts, tels que des fissures, des inclusions, des porosités, ou des effets de corrosion et de fatigue mécanique. Cette méthode de contrôle, souvent répétée au cours de la vie d'une pièce, doit satisfaire au mieux les critères suivants :

A - Rapidité d'exécution

Le contrôle doit être réalisé rapidement afin de limiter l'immobilisation physique de chaque pièce, tout en réduisant les coûts liés au temps de travail de la main-d'œuvre et aux frais de fonctionnement de l'usine.

B - Coût

Pour des pièces complexes, le contrôle qualité représente un coût non négligeable qui doit être minimisé autant que possible.

C - Reproductibilité

La mesure ne doit pas être influencée par des facteurs externes : une même pièce contrôlée à plusieurs reprises doit toujours donner le même résultat.

D - Fiabilité

Le contrôle doit satisfaire aux exigences spécifiées dans son cahier des charges, en détectant systématiquement tous les défauts prévus, quelles que soient les conditions d'inspection.

E - Sensibilité

La sensibilité correspond au rapport entre les variations de la mesure et le mesurande. Plus cette sensibilité est élevée, plus il est possible de détecter de petites variations du mesurande, comme par exemple de très petits défauts.

F - Résolution

La résolution désigne la plus faible variation de signal qui peut être détectée, c'est-à-dire la dimension du plus petit défaut identifiable. Le pouvoir de résolution est considéré comme élevé lorsque cette dimension est réduite. [35] [36]

II.7.3 -Principe de la détection d'un défaut par CND :

Le principe de détection d'un défaut consiste à soumettre le défaut à une excitation et à analyser la réponse qui en résulte. Schématiquement, on distingue généralement les étapes suivantes, quelle que soit la méthode utilisée :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- Modulation ou altération de Ce processus par les défauts ;
- La détection de ces variations grâce à un capteur adapté ;
- Le traitement des signaux recueillis et l'interprétation de l'information délivrée. [37]

II.7.4 -Différents défauts détectés en CND :

Un défaut (défautuosité) détecter dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

II.7.4.1 -Défauts surfaciques :

Ces imperfections sont accessibles à l'observateur, bien qu'elles ne soient pas toujours discernables à l'œil nu. À cet effet, elles se répartissent en deux catégories distinctes :

- **Défauts ponctuels**

Il s'agit des défauts les plus critiques sur le plan technologique, regroupant des criques, piqûres, fissures et craquelures. Ces anomalies, susceptibles de provoquer la rupture de la pièce en initiant par exemple des fissures de fatigue, sont particulièrement préoccupantes. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent extrêmement faible (de l'ordre de quelques micromètres) et elles deviennent problématiques dès que leur profondeur excède quelques dixièmes de millimètre. Leur détection nécessite donc l'emploi de méthodes sensibles et non destructives, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons.

- **Défauts d'aspect**

Il s'agit ici de zones où une variation des paramètres géométriques ou physiques (comme la rugosité, une surépaisseur ou diverses taches) est visible, rendant le produit inutilisable. Bien qu'un contrôle visuel soit envisageable, il est souvent remplacé par des systèmes de contrôle optique automatique.

- **Défauts internes**

Ces défauts correspondent à des hétérogénéités d'origines, de formes et de dimensions très variées, localisées dans le volume de la pièce à contrôler. Leur classification est particulièrement détaillée et spécifique à chaque secteur technologique et industriel. Dans l'industrie des métaux, il peut s'agir de criques internes, de porosités, de soufflures ou d'inclusions diverses susceptibles de compromettre la qualité des pièces moulées, forgées, laminées ou soudées. Dans d'autres contextes, il peut simplement s'agir de la présence d'un corps étranger à l'intérieur d'une enceinte ou d'un produit emballé. Dans ces cas, le contrôle visuel est généralement exclu au profit des grands procédés du CND, tels que la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge et la neutronographie. [38] [39]

II.7.5 - Différentes méthodes de CND :

- **Ressuage**

Cette technique est spécifiquement dédiée à la détection des défauts de surface (manque de matière, éraflures, etc.). Elle consiste à appliquer, sur une surface préalablement nettoyée et séchée, un liquide pénétrants coloré ou fluorescent. Le liquide s'infiltré par capillarité dans les ouvertures du défaut. Après avoir laissé le temps nécessaire à cette pénétration, la pièce est lavée et séchée, puis un révélateur est appliqué. L'éclairage approprié (dépendant du liquide utilisé) permet alors de visualiser le défaut. Toutefois, cette méthode ne met pas en évidence les défauts qui ne débouchent pas à la surface et ne fournit pas d'informations sur la géométrie du défaut. La figure (II-3) illustre le principe du ressuage. [38] [39]

A - Avantages

- Facile à mettre en œuvre et relativement sensible pour détecter les fissures ouvertes et en surface.
- Même si elle n'est pas automatisable et que son interprétation repose sur l'appréciation de l'opérateur, elle peut être appliquée à une grande variété de matériaux non poreux, quelle que soit leur taille.
- La mise en œuvre est simplifiée, notamment lorsqu'un pénétrants pré-émulsionné est utilisé.

B - Inconvénients

- Un décapage et un dégraissage minutieux sont indispensables avant l'inspection.

- L'interprétation des résultats demeure subjective, rendant difficile la détermination précise des dimensions des défauts.
- L'utilisation de produits non récupérables, qui peuvent devenir contaminés après usage (par exemple, dans les centrales nucléaires, où cette technique est abandonnée pour se conformer aux normes de dépollution), est nécessaire.
- Les solvants employés présentent des dangers en raison de leur toxicité, de leur caractère corrosif et de leur inflammabilité. [36]

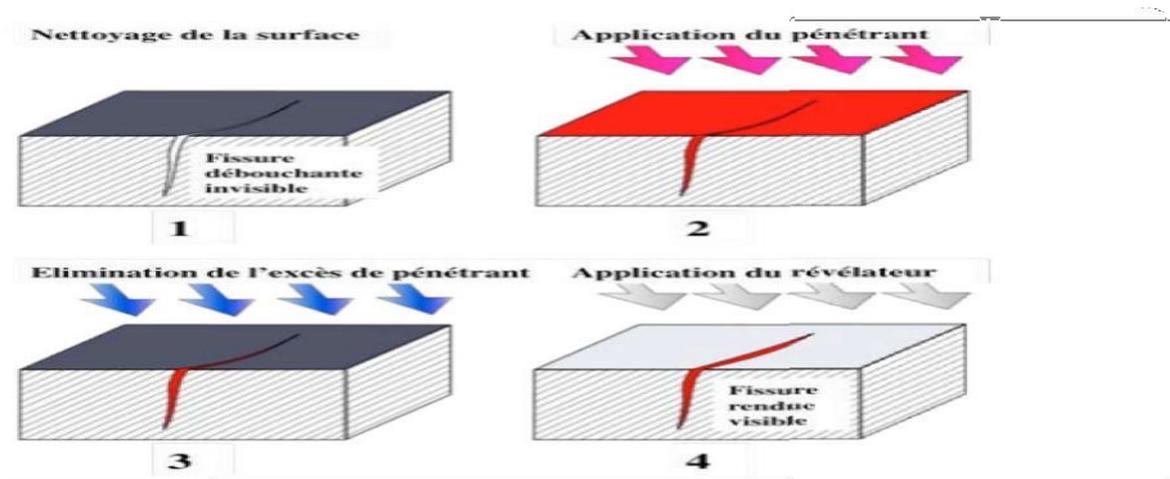


Figure II.3: Examen par ressuage. [38]

Cette figure représente un examen par ressuage

II.7.5.2 -Endoscopie magnétique :

Cette méthode est spécifiquement destinée aux pièces magnétiques (fer, fonte, etc.). Il permet d'identifier les défauts superficiels ou situés juste sous la surface de la pièce (très proche de la surface). Le principe est simple : un champ magnétique intense est généré à l'intérieur de la pièce, puis de la poudre magnétique est répartie uniformément à sa surface. Lorsqu'un défaut perturbe ce champ, il se dévie et son intensité augmente localement, créant une fuite qui attire les particules de poudre et indique ainsi un défaut. [41][42].

A -Avantages

- Facilité de mise en œuvre manuelle.
- Caractère économique.
- Obtenez des résultats presque immédiats.
- Capacité à détecter les défauts ouverts et superficiels. [41] [42] pour.

B -Inconvénients

- Cette méthode de champ magnétique constant s'applique uniquement aux matériaux ferromagnétiques. [39].

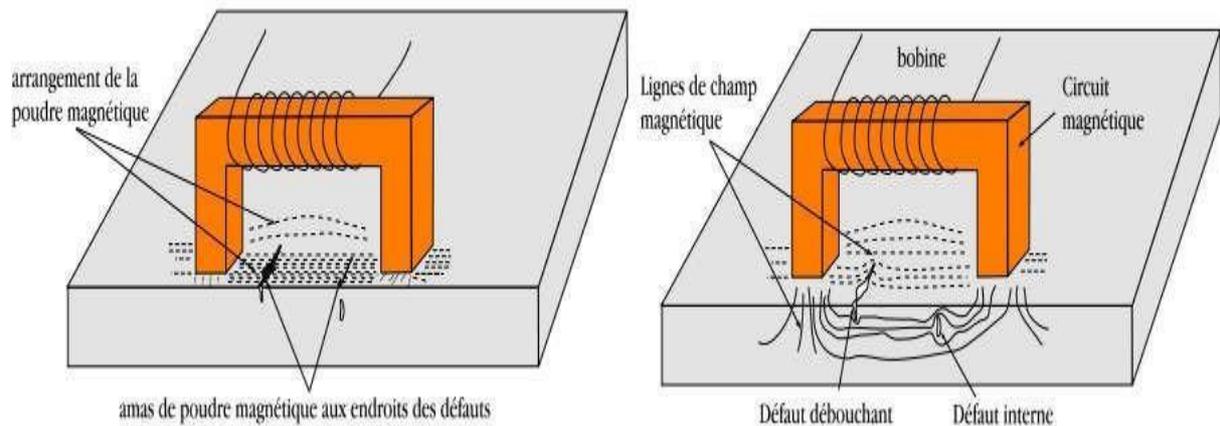


Figure II.4: Examen par magnétoscopie. [42].

La figure ci-dessus donne un exemple de représentation examen par magnétoscopie

I.7.5.3 -Radiographie :

Le principe de la radiographie repose sur le même concept que celui utilisé en médecine. Cette méthode exploite l'absorption des rayonnements électromagnétiques ionisants par la matière. Ainsi, pour examiner la structure ou l'état interne d'un objet, on le fait traverser par un rayonnement électromagnétique à très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) et on capte le rayonnement résiduel, non absorbé, à l'aide d'un détecteur adapté, généralement un film, comme illustré par la Figure (II-5). [43]

A -Avantages

- Elle permet d'obtenir une image directement archivable qui révèle l'absence ou la présence d'un défaut, permettant d'en apprécier, si besoin, la nature et la taille.
- Elle offre une certaine garantie quant à la fiabilité de l'examen et au respect des procédures établies. [44]

B -Inconvénients

- L'interprétation des images nécessite un niveau élevé d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est particulièrement coûteuse et requiert la mise en place de mesures de sécurité strictes pour l'opérateur et l'environnement, ce qui limite son utilisation en industrie.
- Il est indispensable de déployer des dispositifs et des procédures pour assurer la protection du personnel.

- Il existe un risque de ne pas détecter les fissures alignées avec l'axe du faisceau.
- La productivité est relativement faible et le coût reste élevé lorsqu'il s'agit de réaliser de nombreux examens systématiques avec des films. [44]

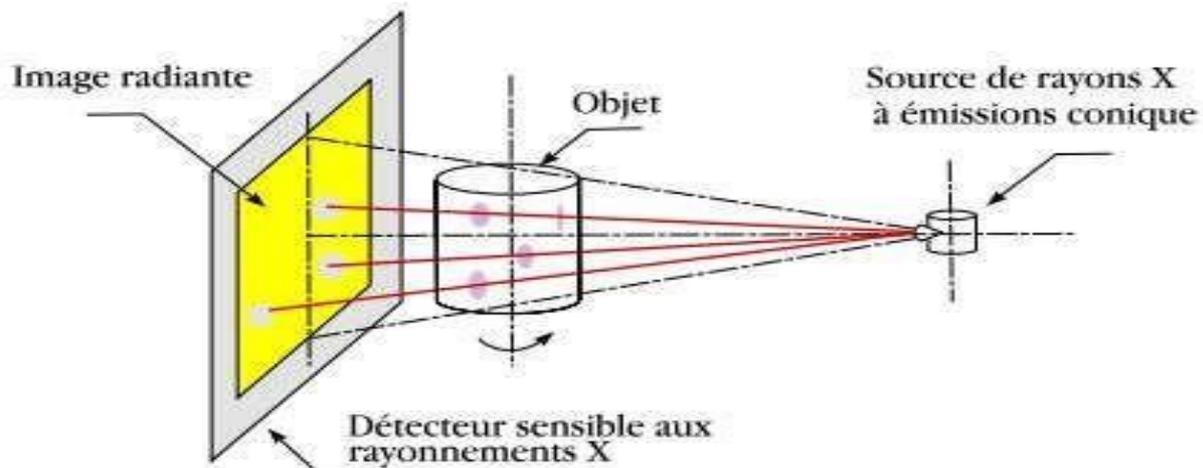


Figure II.5: Examen par radiographie [43].

La figure suivante donne un examen par radiographie

II.7.5.4. Ultrasons :

La méthode par ultrasons est particulièrement adaptée pour inspecter l'intérieur même de pièces très épaisses. Le principe repose sur la réflexion des ondes ultrasonores qui se propagent dans le matériau à examiner. Généralement, un transducteur joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur : il envoie des impulsions très brèves dans la pièce, puis, pendant les intervalles entre chaque impulsion, il capte les échos. Le faisceau d'ondes se réfléchit sur le fond de la pièce ou sur une discontinuité dans le matériau, revenant ensuite vers le transducteur. L'analyse de cet écho permet de localiser la présence éventuelle d'un défaut. [38] [45]

A-Avantages

- Excellente capacité de pénétration, pouvant atteindre plusieurs mètres dans l'acier forgé.
- Très haute sensibilité pour la détection des défauts, notamment des défauts plans, en fonction de la fréquence de l'onde ultrasonore.
- Permet la localisation précise et le dimensionnement des défauts.
- Un examen réalisé à partir d'une seule face est souvent suffisant.
- Détection quasi instantanée, ce qui favorise l'automatisation. [45]

B -Inconvénients

- Les contrôles manuels requièrent une grande expérience de la part des opérateurs.
- La technique implique un niveau de technicité très élevé.
- La méthode est sensible à la géométrie de la pièce (forme, rugosité).
- Elle dépend de la nature et de l'orientation des défauts.
- Souvent, cette technique est très coûteuse, tant en termes d'investissement que de temps de contrôle. [39]

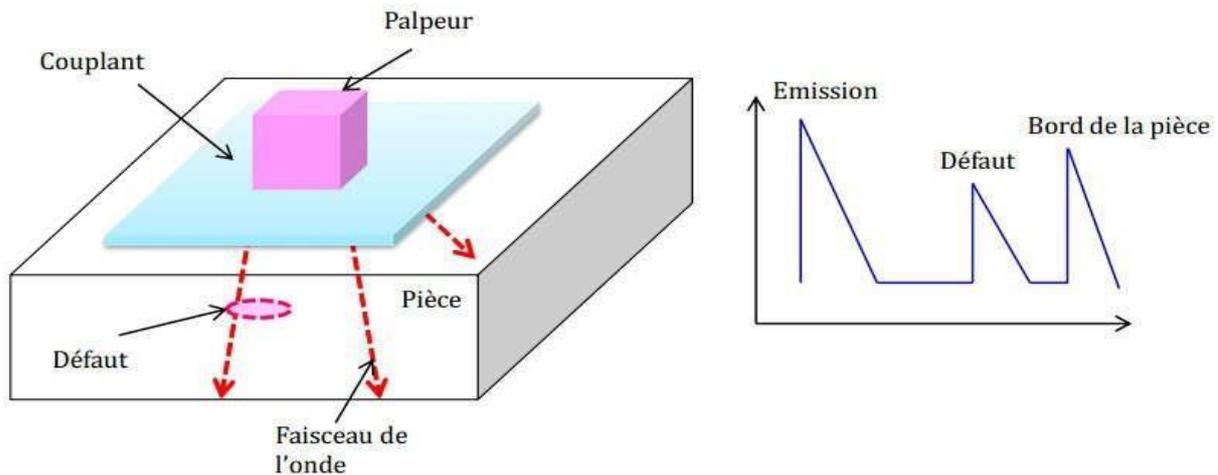


Figure II.6: Examen par ultrasons [45].

La figure ci-dessus donne un exemple de représentation examen par ultrasons.

II.7.5.5- Examen visuel :

Le contrôle visuel constitue la technique la plus ancienne dans le domaine des contrôles non destructifs et demeure l'une des méthodes les plus répandues en raison de son faible coût et de sa simplicité opérationnelle. Cette méthode repose essentiellement sur l'observation directe effectuée par un opérateur qualifié, dont l'expertise visuelle est le seul outil requis pour identifier les défauts sur la pièce examinée. [33]

A -Avantages

- Une méthode d'inspection simple à mettre en œuvre, rapide et particulièrement économique, ce qui la rend idéale pour des contrôles fréquents.
- L'absence d'interruption dans le parcours optique entre l'œil de l'opérateur et la surface de la pièce assure une observation ininterrompue et directe, facilitant ainsi la détection des anomalies.

B -Inconvénients

- La détection se limite strictement aux défauts visibles, excluant ainsi tout défaut interne ou de faible manifestation optique.
- Pour que l'examen soit efficace, la surface de la pièce doit être soigneusement nettoyée et exempte de saletés ou de contaminants, condition indispensable pour que les défauts puissent être discernés. [39]



Figure II.7: Examen visuel. [33].

La figure ci-dessus donne un exemple de représentation examen par visuel.

II.7.5.6. Thermographie :

Le principe de la thermographie repose sur l'analyse de la diffusion de la chaleur au sein de l'objet inspecté. La chaleur représente une forme d'énergie stockée dans la matière, et la température en est un indicateur mesurable. Cette technique consiste à obtenir et à interpréter des cartes thermiques (thermogrammes) qui révèlent la répartition de la température à la surface de la pièce. On distingue deux approches principales : la thermographie passive, qui se contente d'observer les gradients thermiques naturellement présents sur la pièce, et la thermographie active, où une stimulation thermique volontaire, par exemple via une source laser, est appliquée pour accentuer les différences de température. Les discontinuités ou anomalies dans la matière se manifestent alors par des variations locales de température, lesquelles sont capturées par une caméra thermographique. [47] [40]

A- Avantages

- La méthode est relativement rapide et se réalise sans aucun contact physique avec la pièce, ce qui permet un contrôle non invasif.
- Elle offre une vision globale en permettant d'inspecter l'ensemble de la pièce simultanément, garantissant ainsi une analyse complète de sa surface.
- L'examen couvre généralement toute l'épaisseur de la pièce, ce qui permet de détecter des défauts situés aussi bien en surface qu'en profondeur.
- La thermographie présente une grande sensibilité dans la détection des défauts, car même de faibles variations de température peuvent être révélatrices d'anomalies.
- L'automatisation du processus est envisageable pour des pièces dont la géométrie est constante, ce qui améliore l'efficacité des inspections. [40]

B -Inconvénients

- La technique est applicable uniquement aux matériaux qui présentent une conductivité électrique, limitant ainsi son champ d'utilisation.
- Elle est sensible aux écarts de chauffage non uniformes, qui peuvent altérer la fiabilité des mesures thermiques.
- L'interprétation des images thermiques peut s'avérer complexe, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer avec précision la nature des défauts observés. [40]

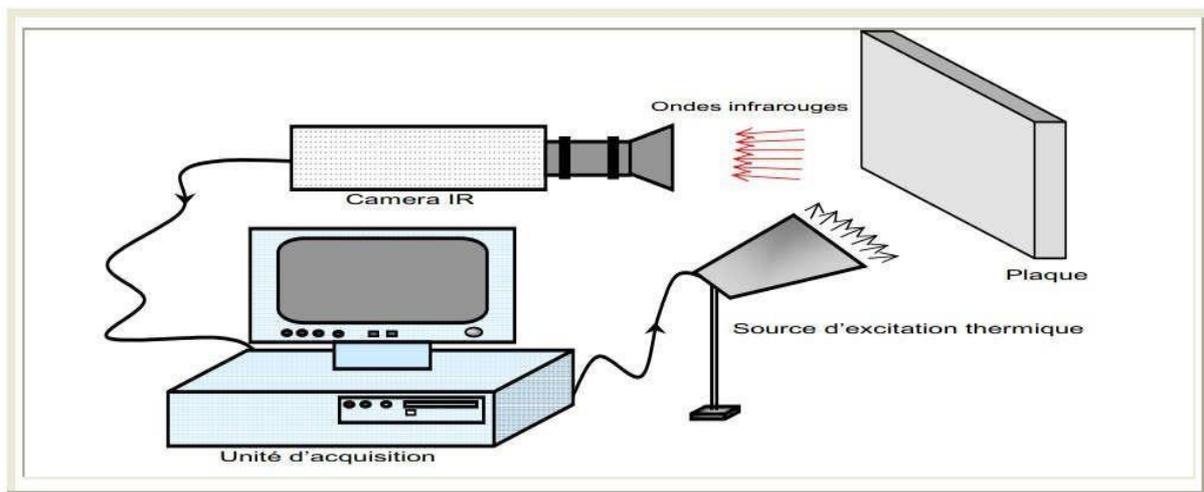


Figure II.8: Examen par thermographie [40].

La ci-dessus figure donne un exemple de représentation Examen Thermographie

I.7.5.7. Contrôle par courant de foucault :

- **Principe**

Est l'une des méthodes électromagnétiques de CND les plus couramment utilisées. Cette technique s'applique uniquement aux pièces électriquement conductrices et se prête particulièrement bien aux objets de forme cylindrique (barres, tubes, etc.). Elle permet de détecter les défauts situés à la surface ou légèrement en dessous, ainsi que toute variation des propriétés physiques du matériau, telles que la conductivité (σ) et la perméabilité magnétique (μ). [38] Le principe de cette méthode repose sur l'exposition de la pièce à un champ magnétique variable dans le temps, généré par une bobine excitatrice parcourue par un courant électrique variable. Ce champ induit des courants, appelés courants de Foucault, au sein de la pièce. La trajectoire de ces courants est alors perturbée, soit par la géométrie de l'objet, soit par ses caractéristiques internes. En retour, ces courants induits créent un champ magnétique qui s'oppose au champ d'excitation initial, conformément à la loi de Lenz.

Le champ résultant est fonction de plusieurs paramètres :

- Du signal d'excitation
- De la conductivité électrique
- De la perméabilité magnétique
- De la géométrie de la cible
- De la distance entre le capteur et la cible (lift-off) La mesure directe de ce champ ou de l'une de ses grandeurs dérivées (par exemple, la force électromagnétique ou l'impédance) permet de caractériser la pièce. La Figure II-9 illustre le principe de l'examen par courant de Foucault. [38] [48]

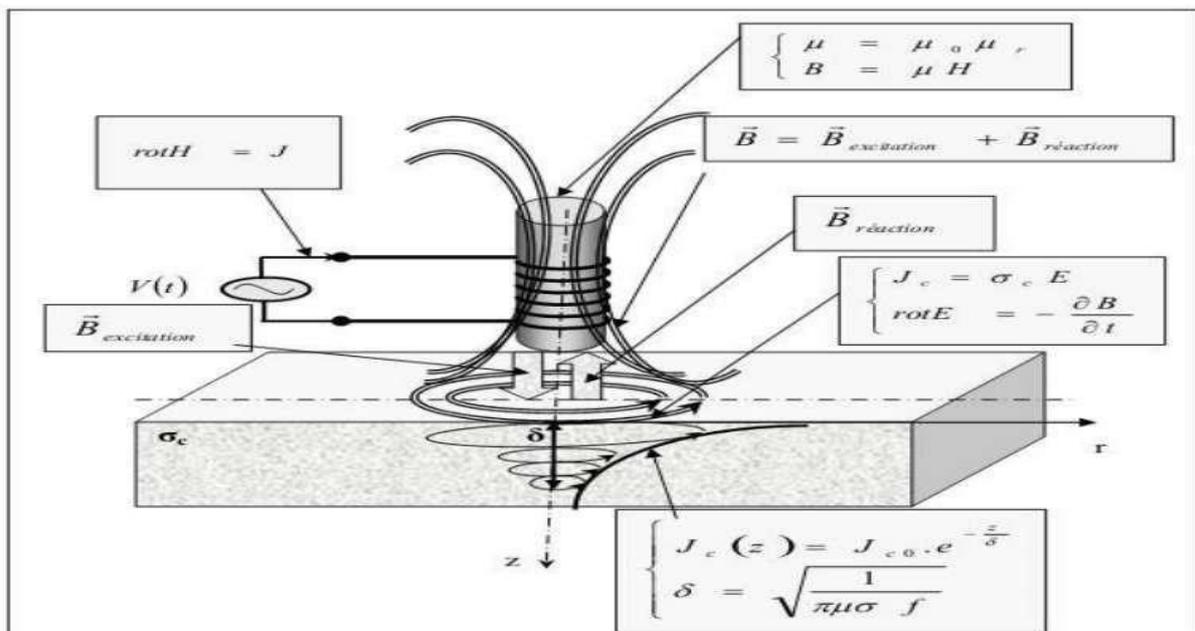


Figure II.9: Schéma de principe de contrôle par courants de foucault. [49].

La figure ci-dessous donne un exemple de représentation principe de contrôle par CF. D'une manière générale, un système de CND par CF peut être représenté par le synoptique de la Figure II-10

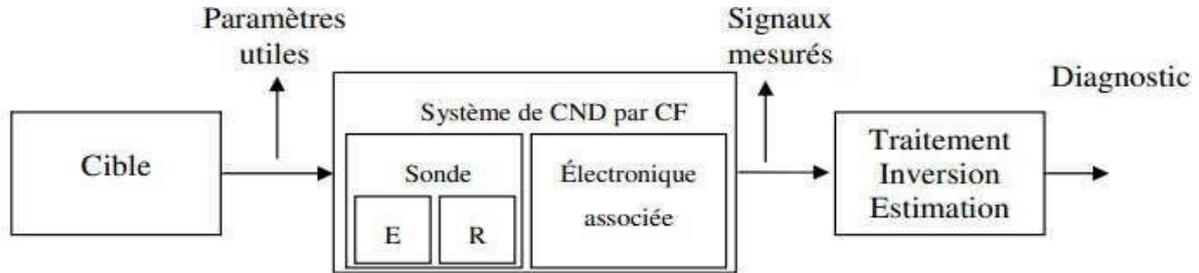


Figure II.10 : Synoptique général d'un système de CND par CF [48].

La figure suivante représente synoptique général d'un système de CND par CF

A -Avantages du CND par courants de foucault

- Cette technique permet d'identifier avec précision les défauts qui se manifestent à la surface ou qui sont faiblement enfouis (sur une profondeur de quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Elle n'exige pas l'utilisation de produits chimiques agressifs, ce qui simplifie son application et élimine les risques de pollution ou d'effets nocifs pour l'utilisateur et l'environnement, contrairement à des méthodes telles que le ressuage qui nécessitent l'emploi de produits potentiellement dangereux.
- La portabilité constitue un atout majeur : le système utilisé n'est pas encombrant, permettant ainsi des inspections dans des zones difficilement accessibles à l'aide d'un équipement portable, et il est également adapté pour des contrôles réalisés à des températures élevées. [48]

B. Limites du CND par courants de foucault

- La méthode s'applique exclusivement aux matériaux électriquement conducteurs.
- Elle n'est pas efficace pour la détection de défauts situés en profondeur, car son champ d'action reste limité aux anomalies proches de la surface.
- L'interprétation des signaux générés par cette technique est souvent complexe, ce qui peut rendre l'analyse des résultats plus difficile. [48] Domaine d'application du CND par courant de Foucault Le contrôle non destructif par courant de Foucault (CND-CF) peut être mis en œuvre sur des matériaux conducteurs, qu'ils soient magnétiques ou non. Il est utilisé pour diverses applications, notamment :

- Le contrôle de filtrage, qui consiste à détecter la présence de métaux dans un environnement donné.
- L'inspection des tôles minces.
- La vérification de l'épaisseur de revêtements.
- L'analyse de matériaux composites intégrant des fibres conductrices. [49]

II.8 -Comparaison entre les principales méthodes de CND

à détecter, la nature du matériau à contrôler et les avantages et inconvénients de la méthode, est donnée par le Tableau II-1

Tableau II.1 : Comparaison entre les différentes méthodes de CND [33].

Méthode	Défauts détectés	Matériaux contrôlés	Avantages et limites
Ressuage	Défauts débouchant. Sensibilité : 80 : 200 μm et 1 $\mu\text{m}/30 \mu\text{m}$ pénétrant fluorescent	Métaux, plastiques, céramiques, composites	Pour des matériaux compacts et non poreux
Courants de Foucault	Défauts de surface. Caractérisation de la microstructure du matériau.	Matériaux conducteurs électriques	Contrôle fidèle. Contrôle en continu possible (Utilisé pour le contrôle en fabrication des tubes et barre)
Magnétoscopie	Défauts débouchant et sous-cutanés	Matériaux Ferro-magnétiques	Grande sensibilité. Importance de l'orientation des défauts par rapport aux lignes de champ. Contrôle unitaire. Désaimantation des pièces après contrôle.
Ultrasons	Défauts internes. Caractérisation de la Microstructure du matériau et du	Métaux, plastiques, céramiques, composites	Appareils portables. Contrôle en continu possible. Cartographie de la répartition de

Conclusion

En somme, la maintenance préventive s'impose aujourd'hui comme un levier stratégique essentiel pour assurer la continuité de la production industrielle et limiter les risques

Chapitre II **La Maintenance Industrielle et le Contrôle Non Destructif**

liés aux défaillances techniques. Le recours aux techniques de contrôle non destructif (CND) permet d'anticiper les pannes sans compromettre l'intégrité des équipements, tout en garantissant leur performance et leur sécurité. Grâce à une combinaison de méthodes adaptées telles que la thermographie, la magnétoscopie ou encore la radioscopie. Il est désormais possible de détecter, de localiser et de caractériser les défauts de manière fiable et précise. Ce savoir-faire technologique, au service de la maintenance industrielle, contribue ainsi de manière significative à l'optimisation des coûts, à la sécurité des installations et à la pérennité des systèmes de production.

Chapitre III

Fiabilisation des transformateurs de puissance par le traitement d'huile

Chapitre III : Fiabilisation des transformateurs de puissance par le traitement d'huile

Introduction

L'huile isolante est exposée à la chaleur, à l'oxygène, à l'eau et à divers catalyseurs pendant le service, qui contribuent tous aux propriétés de l'huile.

L'échantillonnage et l'analyse de routine sont essentiels pour maintenir la qualité de l'huile en service.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord décrire les étapes à suivre.

Nous analysons le gaz dissous dans l'huile minérale utilisée pour l'isolation.

Nous utilisons également des méthodes expérimentales et des techniques de dissolution quelque peu différentes pour mesurer les propriétés physiques des produits chimiques et des diélectriques présents dans l'huile [50].

III.1-Rôle de l'huile isolante dans le transformateur :

Dans un transformateur électrique, l'huile remplit plusieurs rôles essentiels :

1. Isolement électrique

L'isolement électrique d'un transformateur est essentiel pour assurer la sécurité et prévenir les courts-circuits. Il permet la séparation des potentiels entre les différentes parties conductrices et doit résister aux contraintes électriques et thermiques.

Les principaux types d'isolement sont :

- Entre les spires (conducteurs individuels des enroulements).
- Entre les couches ou bobines superposées.
- Entre les enroulements basse tension (BT) et la masse.
- Entre les enroulements basse tension (BT) et ceux de haute tension (HT).
- Entre les enroulements haute tension (HT) et la masse.

2. Amélioration des performances diélectriques

- Accroissement de la rigidité électrique, permettant de résister à des champs électriques élevés.
- Réduction des pertes diélectriques grâce à une faible conductivité.

3. Refroidissement

- Circulation autour des noyaux magnétiques et des bobines pour évacuer les pertes d'énergie (effet Joule, courants de Foucault). [51].

4. Protection des matériaux isolants solides

- Ralentissement de l'oxydation directe de l'isolation en papier cellulosique (grâce à des additifs antioxydants).

5. Sécurité et résistance aux incidents

- Extinction rapide des arcs électriques dans les chambres de coupure (disjoncteurs, commutateurs en charge), limitant les risques d'incendie.

6. Lubrification

- Réduction des frottements dans les pièces mécaniques mobiles, telles que les sélecteurs de prises ou les pompes immergées.[52].

III.2- Diagnostic par analyse d'huile du transformateur de puissance :

III.2.1-Méthodes de surveillance et de diagnostic des isolants liquides:

Pour diagnostiquer les défauts des transformateurs, l'analyse de l'huile isolante revêt une importance capitale, puisqu'elle fournit près de 70 % des informations essentielles sur l'état de l'ouvrage. Si cette analyse peut sembler simple, elle requiert en réalité une expertise pointue et des procédures strictes pour garantir la fiabilité des résultats. Lorsque l'huile présente une dégradation avancée (présence d'humidité, particules métalliques ou gaz dissous), des techniques de régénération sont alors mises en œuvre afin de préserver la durée de vie et la performance du transformateur Parmi elles :

- Le dégazage (élimination des gaz dissous sous vide),
- La filtration (élimination des impuretés solides),
- Le séchage (réduction de la teneur en eau).

Ces interventions sont adaptées en fonction du type et de la gravité de la contamination, afin d'éviter des pannes coûteuses ou des risques d'explosion.

Ces techniques se divisent en deux types :

Les méthodes traditionnelles qui sont largement utilisées, et les méthodes modernes qui font l'objet de recherches et sont appliquées dans des laboratoires spécialisés.

III.2.2- Méthodes conventionnelles :

Le Tableau III.1 présente les essais et les normes utilisés par la SONELGAZ. Les méthodes conventionnelles sont un ensemble d'essais physiques et chimiques effectués sur l'huile de transformateur selon des normes internationalement reconnues. Ces méthodes

permettent d'évaluer la qualité de l'huile en termes de couleur, de viscosité, d'acidité, de rigidité diélectrique, de teneur en eau, etc., comme indiqué dans le tableau III.1. Ces méthodes sont considérées comme « conventionnelles » car elles sont connues et approuvées depuis des années et sont largement utilisées par des organismes tels que SONELGAZ pour garantir la conformité de l'huile aux normes techniques.

Tableau III.1: Normes utilisées par SONELGAZ pour l'analyse de la borak22.

Type d'essai	Norme
Couleur	ISO 2049
Viscosité cinématique	ISO 3104
Acidité totale	CEI 62021
Rigidité diélectrique	CEI 60156
Facteur de pertes diélectriques	CEI 247/ASTM 24
Teneur en eau	CEI 60814

Ces tests revêtent une grande importance car ils permettent de déterminer l'état de vieillissement de l'isolation et d'analyser son degré de contamination.

III.2.2.1 Mesure de la teneur en eau :

La détermination de la quantité d'eau présente dans un échantillon est indispensable pour préserver les propriétés diélectriques de l'isolation. Ce contrôle est particulièrement crucial pour l'huile et le papier isolants, car l'humidité peut en diminuer la rigidité diélectrique.

En pratique, la teneur en eau de l'huile minérale ne doit pas dépasser 5 ppm avant la mise en service du transformateur. Pour effectuer cette mesure, on prélève environ 2 ml d'huile à l'aide d'une seringue, puis on injecte l'échantillon dans un titreur automatique. La réaction chimique qui en découle permet de quantifier l'eau en parties par million (ppm). Nous utilisons pour cela le titreur automatique Karl Fischer 831 KF Coulometer, équipé d'une électrode à génératrice à diaphragme et distribué par Metrohm. La figure ci-dessous illustre le dispositif expérimental employé.[53].



Figure III.1: Titreur coulométrie karl fisher pour la mesure de la teneur en eau de liquide isolant.

III.2.2.2 Nombre de neutralisation :

L'augmentation du nombre de neutralisation (NN), ou indice d'acidité, du fluide isolant résulte essentiellement de l'oxydation de l'huile. La mesure du NN permet de suivre ce phénomène : une valeur élevée traduit une oxydation avancée et la formation précoce de produits solubles et colloïdaux. Le nombre d'acidité total, exprimé en mg de KOH par gramme d'huile (mg KOH/g), correspond à la quantité de composés acides dissous dans l'huile. Pour une huile neuve, cet indice est inférieur à 0,01 mg KOH/g ; il peut toutefois atteindre 0,05 mg KOH/g, voire davantage, au fil du vieillissement. La détermination de l'acidité s'effectue par neutralisation à l'aide d'une solution alcoolique de potasse (KOH). La valeur d'acidité correspond à la quantité de solution de KOH à 0,1 N nécessaire pour neutraliser 1 g d'huile. L'indice d'acidité se calcule selon l'équation suivante :

Où :
$$\mathbf{IA} = 0,1M1V/M$$

IA : l'indice d'acidité (mg KOH/g)

M1 : masse moléculaire de la solution KOH (g/moles).

V : volume de KOH nécessaire pour avoir la neutralisation (ml).

m : masse d'huile (g)

$$\mathbf{IA} = \frac{V \times N \times M_{KOH}}{m} \quad \text{[III.1]}$$

La figure III.2 montre la photographie de l'appareil utilisé pour mesurer l'acidité selon la norme CEI 62021, et le système de neutralisation selon la norme ASTM 1534.

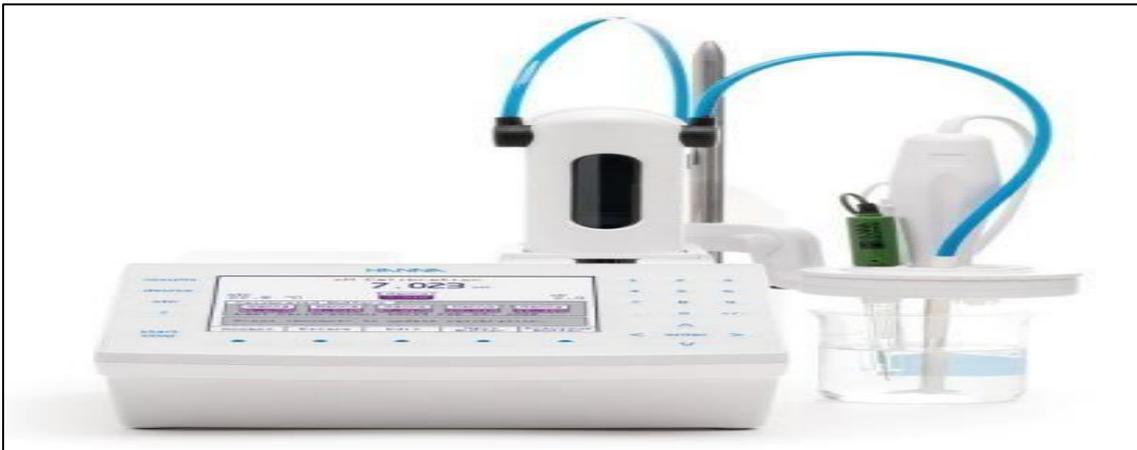


Figure III.2: Appareil de mesure de l'acidité conforme et système de titrage.

III.2.2.3 -Viscosité de l'huile :

La viscosité, c'est-à-dire la résistance d'un liquide à l'écoulement, est une propriété clé pour le refroidissement des transformateurs : elle conditionne la capacité de l'huile à absorber puis à évacuer la chaleur générée par le cœur et les enroulements.

- **Convection naturelle vs Convection forcée**

- **Convection naturelle**

Dans les petits transformateurs auto-refroidis, l'huile chauffée monte à travers le cœur, se refroidit au contact de la paroi extérieure, puis redescend.

- **Convection forcée**

Dans les transformateurs de puissance de grande taille, des pompes et des radiateurs entretiennent un débit d'huile élevé pour optimiser l'échange thermique.

- **Impact de la viscosité sur le transfert de chaleur**

- À basse température, une viscosité trop élevée ralentit la circulation de l'huile, diminue l'évacuation de la chaleur et peut entraîner une surchauffe locale.
- À l'inverse, une viscosité trop faible augmente les risques de fuites et peut compromettre la lubrification des pièces mobiles.

- **Choix de l'huile et conditions d'utilisation**

Pour garantir un refroidissement efficace et une isolation électrique fiable, on sélectionne des huiles dont la viscosité cinématique respecte des normes (par exemple la CEI 60296) sur une large plage de températures :

- **Viscosité à chaud**

Pour optimiser le transfert de chaleur en service.

- **Viscosité à froid**

Pour éviter tout blocage au démarrage et limiter les pointes de température lors de la remise en circulation de l'huile.

La viscosité cinématique se mesure en chronométrant l'écoulement d'un volume d'huile à travers un tube capillaire calibré. Cette opération s'effectue à l'aide de viscosimètres dédiés (voir exemple illustré à la figure III.3).



Figure III.3: Appareil de mesure de la viscosité.

III.2.2.4 Mesure de la tension de claquage :

La tension de claquage diélectrique, exprimée en kilovolts, correspond à la valeur à laquelle un fluide isolant devient conducteur. Sa mesure est sensible à la présence de contaminants, d'humidité ou de particules, y compris les produits d'oxydation, qui tendent à en diminuer la valeur. Pour réaliser l'essai, on place un échantillon de fluide isolant dans une cellule d'essai équipée de deux électrodes en demi-sphères, séparées par un écart standardisé. On applique ensuite une tension croissante jusqu'au moment où se produit le claquage. Après chaque test, les résidus de décomposition formés entre les électrodes sont soigneusement éliminés. La figure ci-dessous montre la cellule d'essai utilisée pour cette mesure, conformément à la norme ASTM D-877 ou CEI 60156 [54].

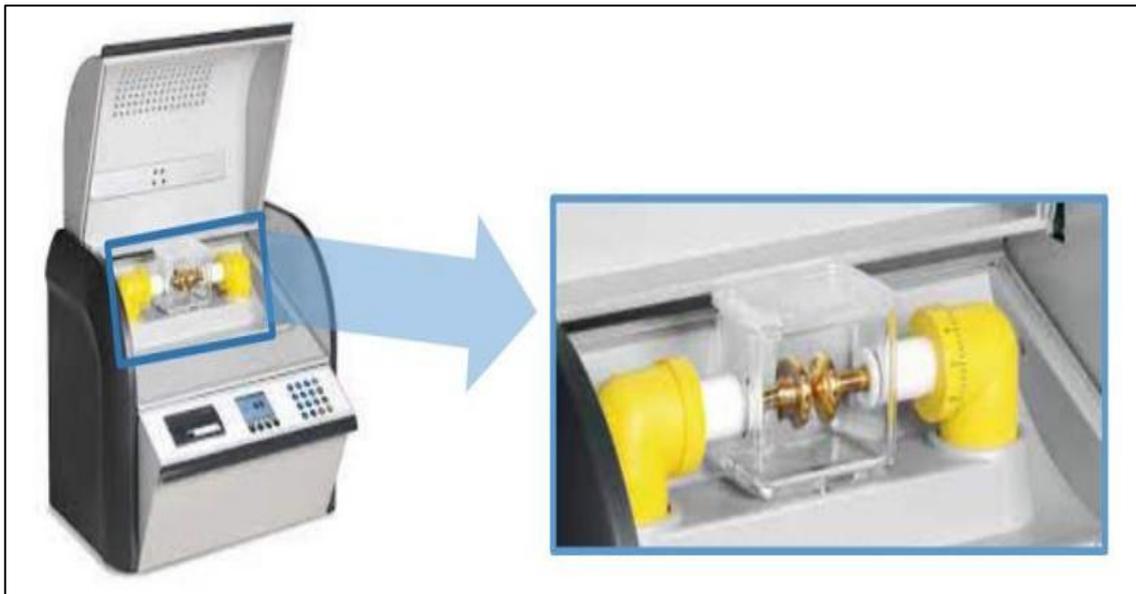


Figure III.4: Appareil de claquage.

III.2.2.5 Examen visuel et couleur :

L'observation de la couleur et de l'aspect de l'huile isolante constitue une méthode simple et rapide pour en évaluer l'état et la qualité. Au fil du temps, sous l'effet de l'oxydation et de diverses réactions chimiques, l'huile tend à s'assombrir : ce phénomène peut indiquer une dégradation progressive de ses propriétés diélectriques et thermiques.

- Par ailleurs, cet examen visuel permet de repérer la présence de contaminants ou de particules en suspension
- Dépôts, résidus de vieillissement ou autres impuretés susceptibles de nuire à son efficacité. En ce sens, l'examen visuel et colorimétrique constitue une première étape essentielle, préalable à tout contrôle physico-chimique plus approfondi.



Figure III.5: Dégradation de liquide isolant au cours de vieillissement thermique (changement de couleur).

III.2.2.6 Mesure du facteur de dissipation diélectrique :

La mesure du facteur de dissipation ($\tan \delta$) des huiles isolantes électriques est cruciale, car elle renseigne sur la concentration des porteurs de charge susceptibles d'altérer les propriétés diélectriques du liquide. Si cette concentration dépasse un seuil critique sous tension, elle peut provoquer une panne latente dans le transformateur. En revanche, une faible valeur de $\tan \delta$ traduit de faibles pertes diélectriques et un faible taux de contaminants ioniques, qu'ils soient solubles ou colloïdaux. Ces indicateurs sont essentiels pour le contrôle qualité et pour détecter toute altération de l'huile en service, qu'elle résulte d'une contamination ou de son vieillissement.

La mesure du facteur de pertes diélectrique ($\tan \delta$) et de la permittivité relative (ϵ_r) peut être réalisée à l'aide d'un pont de Schering de type Dieltest DLT. La cellule d'essai contenant l'échantillon d'huile est composée de deux cylindres coaxiaux avec une distance inter-électrodes de 5 mm. Le principe consiste à

Remplir la cellule avec l'huile, puis la chauffer jusqu'à 90°C sous une tension de 2 kV. Les résultats d'essai sont ensuite affichés et imprimés automatiquement [54].



Figure III.6: Diélectrique test DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité relative [55].

III.3. Etude de l'influence de l'analyse des gaz dissous dans l'huile :

III.3.1. Principe :

Pour déterminer la nature et la concentration des gaz dissous, on utilise couramment la chromatographie, un ensemble de procédés fondés sur la répartition différentielle des solutés entre deux phases. En analysant ces gaz dans l'huile isolante, il devient possible d'identifier les divers défauts en cours dans le transformateur.

L'analyse des gaz dissous (DGA) fait appel à une nouvelle génération d'appareils portables offrant des mesures précises, rapides et fiables directement sur site. Pour garantir les performances optimales de TRANSPORT X.

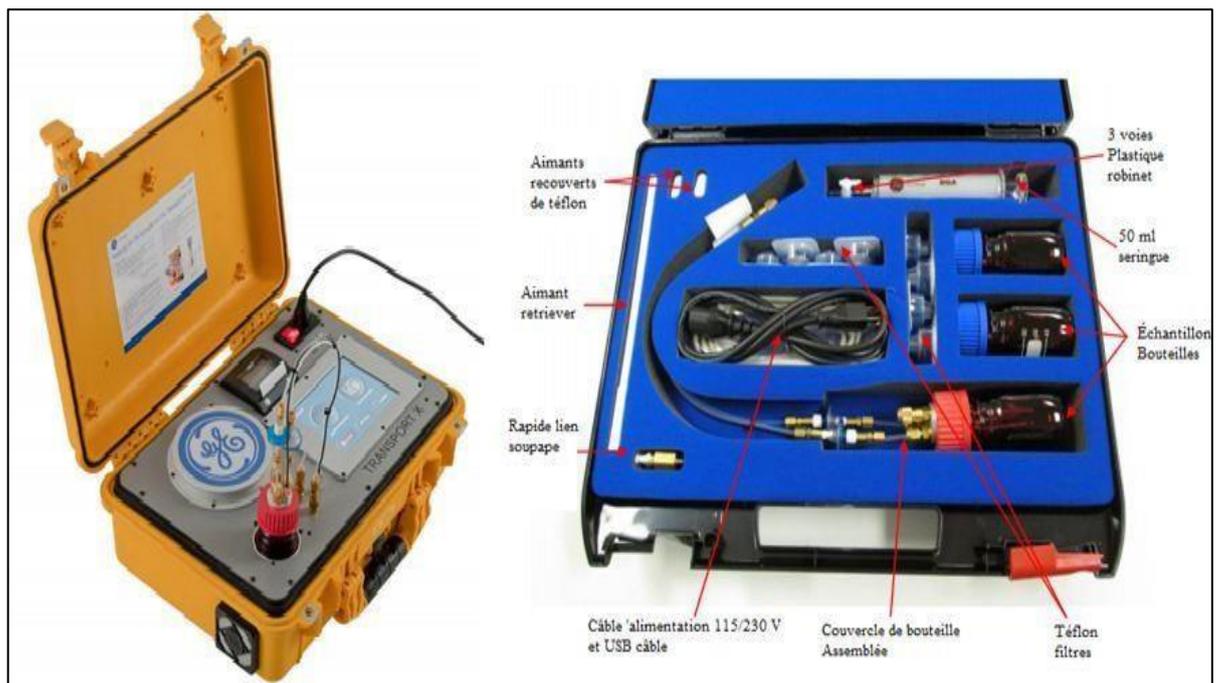


Figure III.7: Appareil de mesure des gaz dissous et accessoires dans l'huile transport x.

III.3.2. Appareillage

- L'analyse des gaz dissous contient un PC embarqué et un écran tactile.
- Le logiciel incorporé contient des instructions pour guider l'utilisateur à travers le fonctionnement du système et des algorithmes pour aider au diagnostic de l'équipement électrique.
- Le PC dispose d'une base de données interne pouvant stocker plus de 16 000 enregistrements.
- La communication avec des PC externes est possible via des connexions USB, ce qui permet de télécharger des bases de données sur un ordinateur portable ou de bureau [56,57].

III.3.3. Mode opératoire :

Respectez les points suivants pour garantir une utilisation correcte du produit :

- Lisez et suivez toutes les instructions à l'écran.
- Utilisez toujours des échantillons d'huile de 50 ml.
- Utilisez toujours une seringue, un couvercle et un flacon propres.
- N'utilisez pas de solvants pour nettoyer l'appareil ou les accessoires.

- Placer un agitateur magnétique dans le flacon pour que l'échantillon soit analysé correctement (nécessaire uniquement pour les échantillons d'huile).
- Suite à l'injection d'huile dans la bouteille d'échantillon.
- Lorsque la bouteille d'échantillon contient de l'huile, elle doit être maintenue verticale pour éviter la pénétration d'huile dans la tuyauterie de l'assemblage du couvercle.
- Assurez-vous que les raccords rapides des tuyaux sont connectés correctement et solidement, par instructions.
- Lorsque la bouteille d'échantillon est retirée, l'ensemble du couvercle de la bouteille doit être maintenu à la verticale puis soigneusement nettoyé avec un chiffon ou un mouchoir après utilisation et avant stockage pour éviter toute pénétration d'huile dans la tuyauterie.
- Videz toujours la bouteille d'échantillon d'huile usagée après la fin d'un test. Aussi, nettoyez le l'appareil immédiatement après chaque test.
- Le « temps de purge » peut être augmenté (maximum 10 minutes) pour aider à prévenir le transfert d'un échantillon fortement gazé à l'échantillon suivant.
- Si le produit est déballé de neuf ou de stockage, l'opérateur doit exécuter une
- Opération de rinçage pour aider à dégager les voies de gaz de la contamination potentielle de tout matériaux de garnissage/effluents gazeux.
- Il est recommandé d'effectuer un cycle de mesure complet ou un essai à sec au moins une fois par mois pour maintenir la rigueur opérationnelle [58].

III.3.4. Echantillonnage d'huile :

Le flacon d'échantillonnage est équipé d'un « ensemble de couvercle », illustré à la figure III.8. Chaque couvercle porte un étiquetage unique correspondant aux paramètres du module. Cet ensemble comprend des raccords étanches, une sonde de température et un capteur d'humidité capacitif, tous destinés à être fixés sur la plaque supérieure de l'appareil. Les opérateurs doivent veiller à bien verrouiller ces connexions avant toute utilisation.

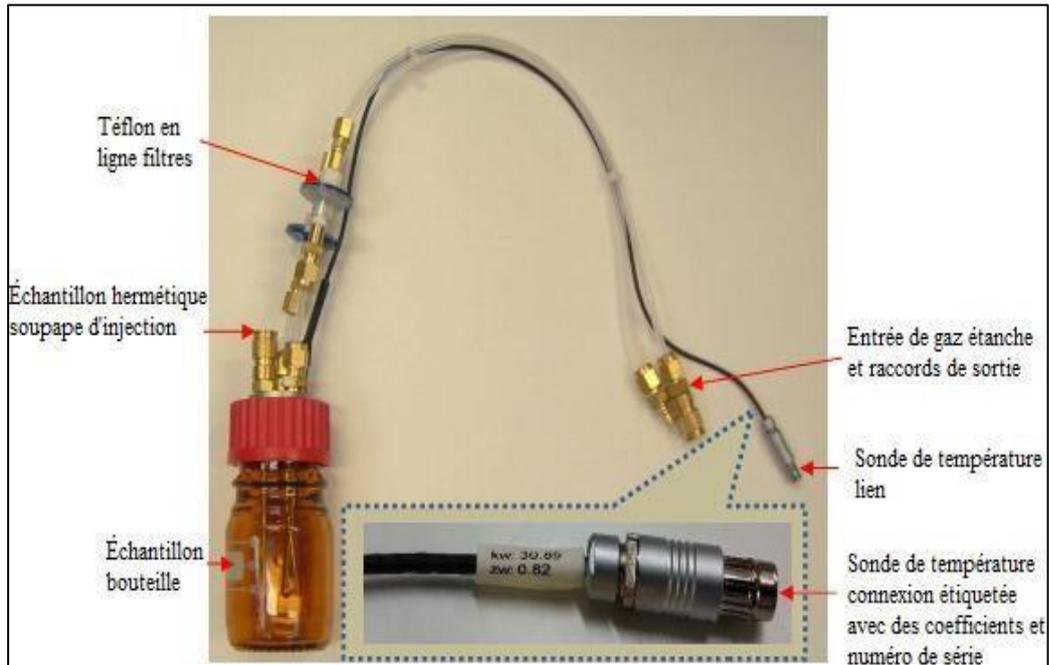


Figure III.8: Bouteille d'échantillon et connecteurs.

Un prélèvement correct de l'huile isolante est indispensable pour obtenir un échantillon représentatif de l'équipement. L'huile recueillie doit pouvoir être injectée directement dans l'analyse des gaz dissous, sans risque de contamination, afin de fournir une image fidèle de l'état de l'huile au moment de l'échantillonnage.

La procédure décrite ici suit la norme internationale IEC 567 et s'accompagne d'illustrations spécifiques à l'appareil.

Suivez cette procédure étape par étape :

1. Connectez la seringue via une valve à trois voies Leur lock à la ligne d'échantillonnage de l'équipement.
2. Tournez la vanne de la ligne d'échantillonnage de l'équipement et la vanne de la seringue pour permettre l'huile de l'équipement s'écoule vers un conteneur de déchets à partir de la valve de la seringue, comme indiqué dans Figure III.9. Laisser au moins 1 litre d'huile s'écouler dans un récipient à déchets.

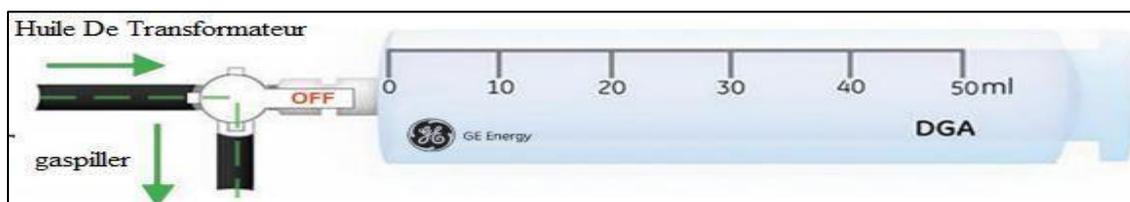


Figure III.9: Écoulement de l'huile vers le conteneur de déchets.

3. Tournez la valve de la seringue dans la position où l'huile peut être aspirée dans la seringue comme illustré à la Figure III.10.
4. Aspirez doucement l'huile entièrement dans le corps de la seringue. A ce stade des bulles d'air des morts volume dans le col de la seringue sont aspirés dans le corps de la seringue et certains dès le gaz présent est dissous dans l'huile. De plus, une partie du gaz contenu dans l'huile s'échappe dans le des bulles d'air.

Ce pétrole et ce gaz doivent être rejetés comme non représentatifs du pétrole dans le transformateur.

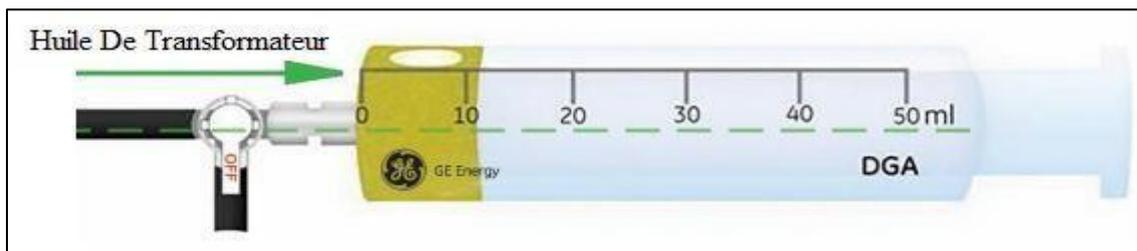


Figure III.10: Expulsions de l'huile s'écoule dans la seringue.

5. Tournez la valve de verrouillage Leur montée sur la ligne d'échantillonnage de l'équipement pour permettre à l'huile de s'écouler de la seringue à un conteneur à déchets, comme illustré à la Figure III.11.

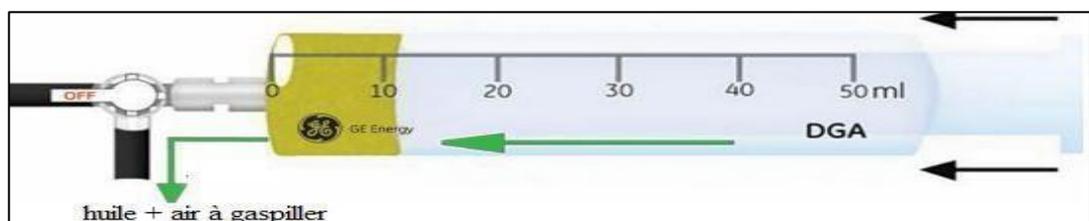


Figure III.11: Expulsions de l'huile et l'air de la seringue.

6. Fermez la valve de la seringue lorsque la plus grande partie de l'huile a été expulsée, en laissant environ 2 ml d'huile restant dans la seringue.
7. Tournez la valve de la seringue pour permettre l'aspiration douce de 50 ml d'huile dans la seringue comme illustré à la Figure III.12.

Remarque

La pression de refoulement du réservoir principal du transformateur peut pousser l'huile dans la seringue, il faut donc veiller à ce qu'elle pousse complètement le piston hors de le corps de la seringue.

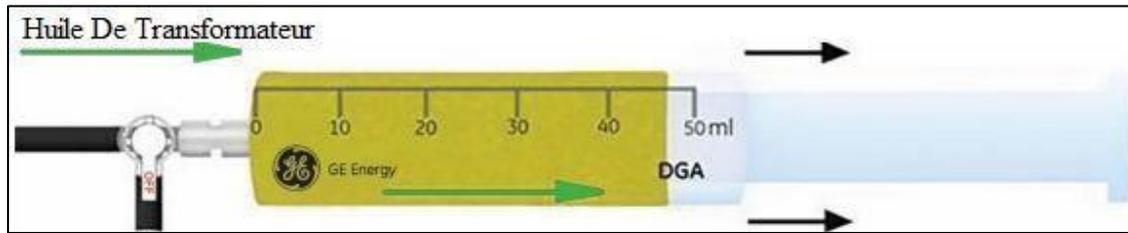


Figure III.12: Aspiration de l'huile dans la seringue.

8. Videz cette huile de la seringue dans le récipient à déchets comme décrit précédemment.
9. Répétez les étapes 7 et 8 au moins deux fois.
10. Aspirez exactement 50 ml d'huile dans la seringue.
11. Tournez la vanne de l'équipement pour empêcher toute autre fuite d'huile du transformateur.
12. Tournez la valve de la seringue en position complètement fermée.
13. Déconnecter la seringue de la ligne d'échantillonnage de l'équipement.

Un échantillon représentatif d'huile de l'équipement est maintenant prêt à être testé avec l'analyse des gaz dissous.

Remarque

Si l'échantillon n'est pas testé immédiatement après avoir été prélevé, il est recommandé de stocker l'échantillon dans un endroit sombre et frais, à température ambiante normale. Après avoir obtenu un échantillon d'huile et préparé le produit pour l'injection, suivez ces étapes pour injecter l'échantillon d'huile dans la bouteille d'échantillon de produit :

- Connectez le raccord rapide mâle au robinet à trois voies de la seringue, comme illustré à la Figure III.13.



Figure III.13: Partie mâle de la valve à connexion rapide attachée à la seringue.

- Connectez la seringue au flacon d'échantillon. L'enveloppe extérieure du raccord femelle doit être maintenue sur l'assemblage du capuchon entre le pouce et l'index et enfoncée aussi loin que possible, comme illustré à la Figure III.14.
- Insérez fermement le raccord rapide mâle attaché à la seringue dans le connecteur femelle. Vous entendez un léger clic lorsque la connexion est entièrement établie. Libérez l'enveloppe extérieure du connecteur femelle pour sécuriser la connexion.

- Tournez la vanne à trois voies de 90 degrés pour ouvrir le bras de la seringue au flacon, fermant ainsi le bras latéral de la vanne comme illustré à la Figure III.15.



Figure III.14: Manchon extérieur du connecteur femelle.



Figure III.15: Robinet d'arrêt (vanne à trois voies) avec bras latéral fermé.

III.3.5. Analyse d'échantillon d'huile :

Une fois l'échantillon injecté dans la bouteille, la température de l'huile est mesurée afin d'éviter toute condensation dans la tuyauterie interne du système. Il est donc recommandé de ne pas tester l'huile « chaude », mais de lui laisser le temps de refroidir.

La mesure de la température dure 90 secondes. Si la température de l'huile est supérieure à la température interne de la cellule, l'analyse ne démarrera pas. Lorsque la différence de température atteint 0,0 °C, l'appareil lance automatiquement l'analyse, éventuellement après un délai lié à sa réinitialisation. Veillez à ce que la bouteille soit correctement positionnée dans son support au moment du démarrage de l'analyse.

GE Energy - Kelman Transport X		
DGA Results		
Type: Transformer		
Equipment ID: Lescot 8		
Location: Lescot		
Substation: Lescot		
Voltage (kV): 60		
Site Owner: Sonelgaz		
Date: 23 Jul 10		
Time: 14:27 PM		
Gas	Symbol	Value (ppm)
Hydrogen	H2	200
Carbon	CO	1330
Dioxyde	CO2	10630
Methane	CH4	130
Ethylene	C2H6	468
Acetylene	C2H2	373

Figure III.16: Résultats imprimés par l'imprimante thermique intégrée transport x [8].

III.3.6. Analyse des gaz dissous (DGA) à l'aide de seuils de prudence et d'avertissement

A) Triangle de duval

Dans l'édition 2019 de la norme IEEE C57.104-2019, la méthode du triangle de Duval est officiellement adoptée et mise à jour pour le diagnostic des défauts des transformateurs isolés à l'huile. Cette méthode repose sur la mesure des concentrations de trois gaz (CH_4 , C_2H_4 et C_2H_2) en ppm et le calcul de leurs pourcentages afin de déterminer l'emplacement du point de diagnostic dans un triangle équilatéral divisé en six zones : décharge partielle (PD), décharge de faible puissance (D1), décharge de forte puissance (D2) et défauts thermiques à différentes températures (T1 inférieure à 300 °C, T2 entre 300 et 700 °C et T3 supérieure à 700 °C). L'édition 2019 a ajouté deux triangles supplémentaires : le triangle 4 ($H_2 - CH_4 - C_2H_6$) pour améliorer la précision du diagnostic en cas de défaillances thermiques partielles et de décharges partielles, et le triangle 5 ($CH_4 - C_2H_4 - C_2H_6$) pour différencier les défaillances thermiques de la carbonisation potentielle de l'isolant en papier. Des tableaux précis détaillant les limites de chaque zone sont également inclus, ainsi qu'un diagramme

logique illustrant la séquence de prise de décision lors de l'utilisation des triangles de Duval. Ces améliorations rendent l'édition 2019 plus précise et plus complète pour l'interprétation des résultats d'analyse des gaz dissous dans les huiles isolantes [59].

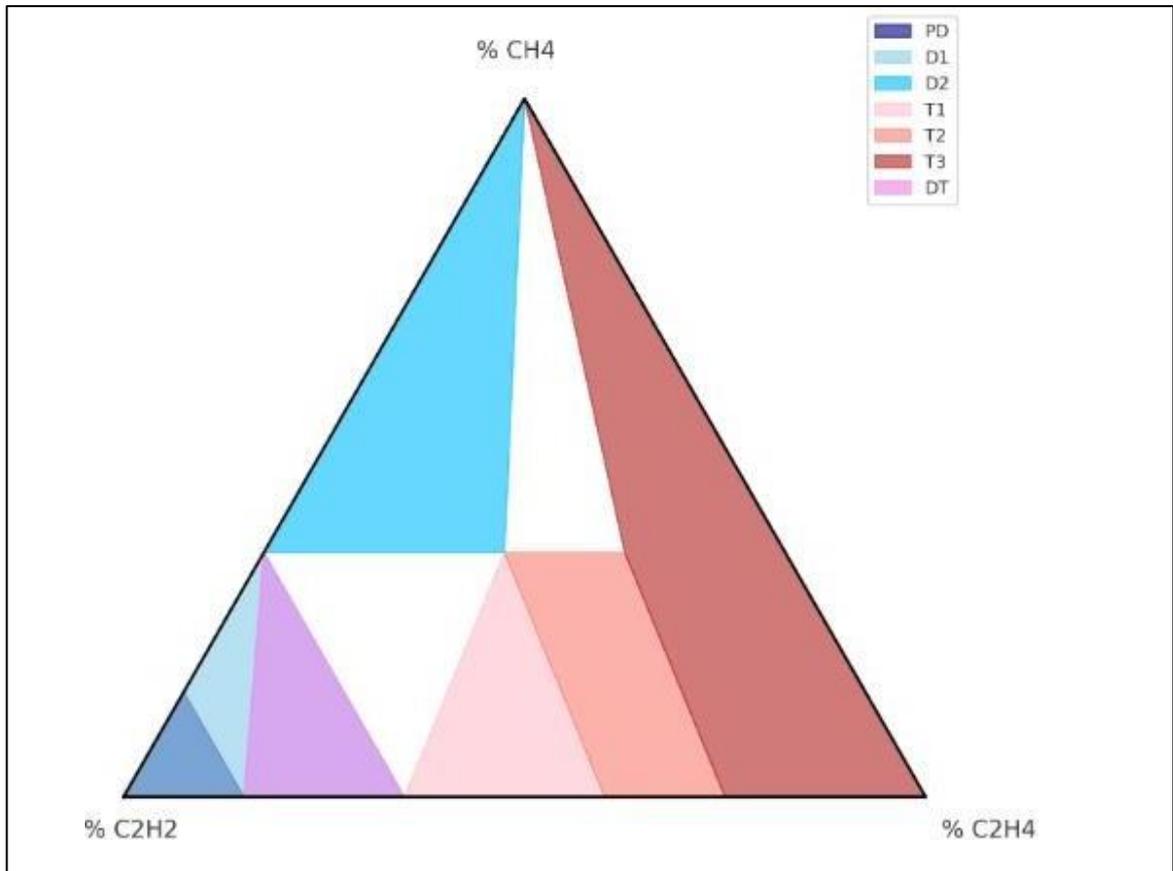


Figure III.17: Triangle de duval pour le diagnostic des transformateurs [60].

Tableau III.2: Zones de défaut selon le triangle de duval [61].

Type de défaut	Zone	Couleur
Décharge partielle	PD	Bleu foncé
Décharge à faible énergie	D1	Bleu clair
Décharge à haute énergie	D2	Bleu ciel
Défaillance thermique 300°C <	T1	Rose clair
Défaillance thermique entre 300 et 700 °C	T2	Rose/Saumon
Défaillance thermique > 700°C	T3	Rouge foncé

Défaut combiné (thermique + électrique)	DT	Violet
--	----	--------

B) Méthode du gaz principal

L'analyse des gaz dissous, ou gaz libres, s'applique principalement aux transformateurs de puissance. Des guides spécifiques ont été élaborés pour interpréter ces analyses, cependant leur interprétation reste complexe et doit être menée avec la plus grande prudence, en faisant appel à du personnel expérimenté en maintenance d'isolation.

Cette méthode propose une comparaison visuelle du profil de mesure avec quatre scénarios d'anomalies « typiques ». L'utilisateur fait défiler ces quatre modèles d'échec à l'aide des touches fléchées. Sur l'écran tactile, ils apparaissent sous forme de barres roses, tandis que le résultat de l'analyse des gaz dissous s'affiche en barres bleues (voir Figure III.18). Pour sélectionner le diagnostic le plus pertinent, il suffit d'appuyer sur le bouton « Sélectionner » situer sous l'option choisie. Le tableau III.2 présente les codifications et diagnostics recommandés par la norme CEI 60599[62].



Figure III.18 : Méthode de gaz clé.

A cet effet, plusieurs méthodes de diagnostic ont été proposées Parmi les plus importantes, la technique CEI 60599 est l'une des plus consensuelles. Le diagnostic est basé sur les rapports des gaz clés : C2H2/C2H4, CH4/H2 et C2H4/C2H6 [63,64].

Tableau III.3: Code d'examen des gaz dissous dans l'huile minérale – extrait du guide.

Défaut caractéristique	$\frac{C2H2}{C2H4}$	$\frac{CH4}{H2}$	$\frac{C2H4}{C2H6}$	Exemples typiques
Pas de défaut	0	0	0	Vieillessement normal
Décharges partielles de faible densité d'énergie	0	1	0	Décharges des poches de gaz provenant d'une imprégnation incomplète, ou d'une teneur en eau élevée
Décharges partielles de haute densité d'énergie	1	1	0	Comme ci-dessus, mais provoquant du cheminement ou la perforation de l'isolation
Décharges de faibles énergies	1 → 2	0	1 → 2	Amorçage continu dans l'huile dû à de mauvaises connexions ou à des potentiels flottants.
Décharges de hautes énergies	1	0	2	Décharges de puissance ; arc ; rupture diélectrique d'huile entre des enroulements ou entre spires ou entre spire et masse. Courant de coupure dans le sélecteur
Défaut thermique de basse température < 150 °C	0	0	1	Échauffement généralisé de conducteurs isolés
Défaut thermique de basse température gamme 150 à 300 °C	0	2	0	Surchauffe locale du circuit magnétique due à des concentrations de flux. Points chauds de températures croissantes, allant de petits points chauds dans le circuit magnétique, mauvais contacts jusqu'à des points chauds dus à des courants de circulation entre circuit magnétique et cuve.
Défaut thermique de température moyenne gamme 300 à 700 °C	0	2	1	
Défaut thermique de haute température > 700 °C	0	2	2	

C) Pedigree de rogers – ieee c57.104-1991

La méthode du Pedigree de Rogers repose sur l'analyse des rapports entre différents gaz dissous pour identifier le type de défaut (voir Figure III.19). Si les concentrations de gaz sont trop faibles, l'écran « Roger Ratio » avertit que ces niveaux peuvent ne pas suffire à garantir la fiabilité du résultat. Dans ce cas, le code d'erreur et les diagnostics restent accessibles, mais leur interprétation requiert une vigilance particulière avant toute décision.

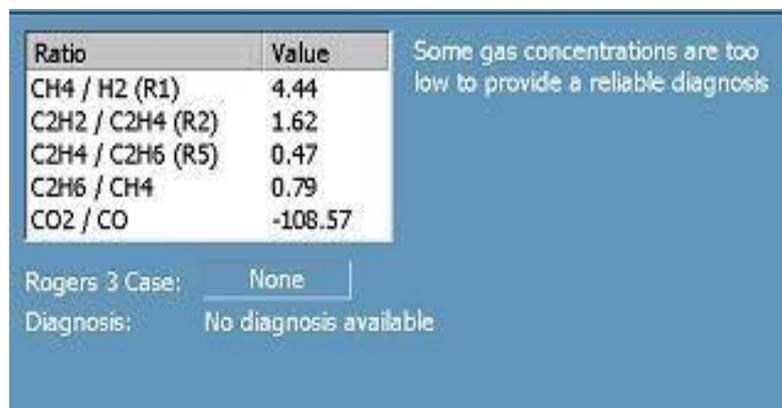


Figure III.19: Rogers' ratios screen.

D) Japon etra

L'Association japonaise de recherche en technologie électrique (ETRA) a analysé de nombreux diagnostics DGA, tant au Japon qu'à l'étranger, et en a tiré plusieurs conclusions sur la détection des défauts dans les transformateurs. À partir de ces études, elle a élaboré une série de schémas illustrant les concentrations relatives de certains gaz dissous (H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₂ et C₂H₄) présents dans l'huile des transformateurs au moment où apparaissent les défauts internes. Ces schémas sont ensuite corrélés à des types de pannes spécifiques. Les deux méthodes de diagnostic ainsi définies ont été intégrées dans la suite d'analyse des gaz dissous (AGD).

o **Méthode d'analyse du modèle de gaz**

Appuyez sur le bouton Gas Pattern situé dans le panneau Central Diagnostics Information sous l'onglet Japan ETRA de l'écran Analysais. Une série de schémas de gaz dissous (Figure III.19) sont ensuite mis à disposition à l'aide des flèches vers l'avant ou vers l'arrière, chaque modèle étant dérivé de l'analyse Japan ETRA des défaillances des

transformateurs. Également inclus à des fins de comparaison est le modèle, produit de manière identique aux schémas de défaillance ETRA, c'est-à-dire basés sur les mesures d'analyse de gaz dissous (AGD).

Remarque

Tous ces modèles ont été produits par un processus de normalisation utilisant le niveau de concentration du gaz dissous avec la concentration la plus élevée découverte dans l'huile d'un transformateur défaillant.

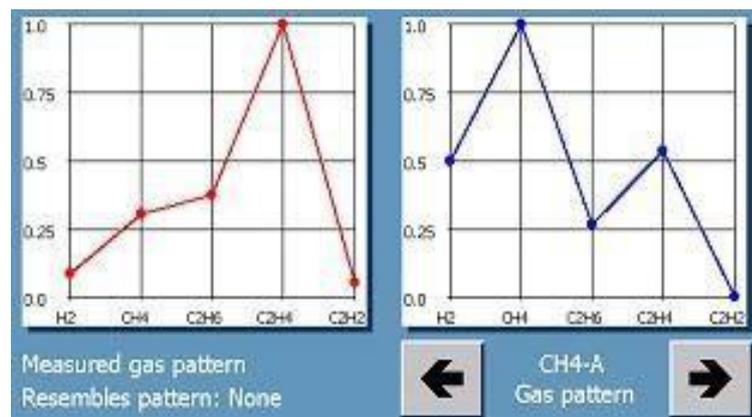


Figure III.20: Modèle de gaz basé sur les mesures d'analyse de gaz dissous (AGD).

Dans la Figure III.20, on présente le jeu de mesures le plus récent des concentrations de gaz dissous obtenu par l'analyse des gaz dissous. On y voit que la concentration de C₂H₄ sert de référence pour normaliser les niveaux des autres gaz mesurés : ainsi, la concentration de C₂H₆ représente environ 37 % de celle de C₂H₄.

Dans la Figure III.21, le diagramme de droite illustre le modèle ETRA correspondant à un défaut de type C₂H₄-A, tandis que le graphique de gauche reprend le profil mesuré décrit à la Figure III.20. L'outil d'analyse des gaz dissous propose plusieurs modèles ETRA, chacun associé à un type de panne particulier : l'utilisateur doit identifier le profil qui se rapproche le plus de ses propres mesures, puis appuyer sur « Sélectionner » pour valider le modèle de défaut retenu (ou choisir de n'en sélectionner aucun).

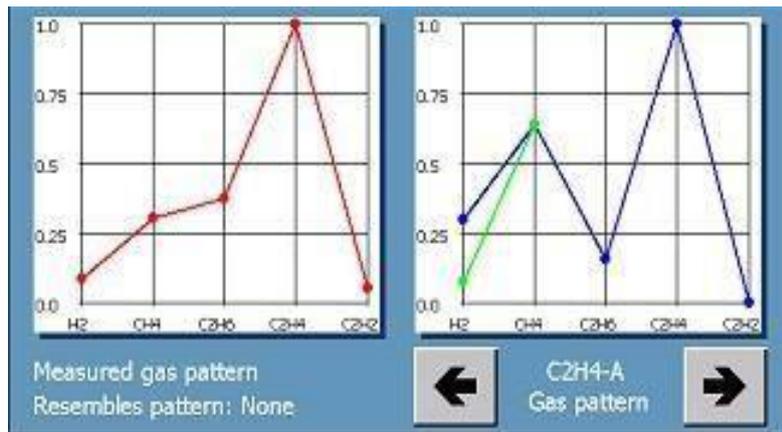


Figure III.21: Schéma de défaillance de type c2h4-a.

o **Méthode du tableau de diagnostic**

Appuyez sur le bouton Diagramme de diagnostic situé dans le panneau central d'informations de diagnostic sous l'onglet Japon ETRA de l'écran d'analyse. Sur le premier diagramme (Diagramme A) illustré à la Figure III.21, le point blanc est le résultat dérivé de l'ensemble le plus récent de mesures de concentration de gaz dissous effectuées par d'analyse de gaz dissous (AGD) pour les rapports de gaz particuliers utilisés dans ce tableau. On peut voir que dans ce cas, le diagramme suggère que la panne du transformateur est due à des décharges.

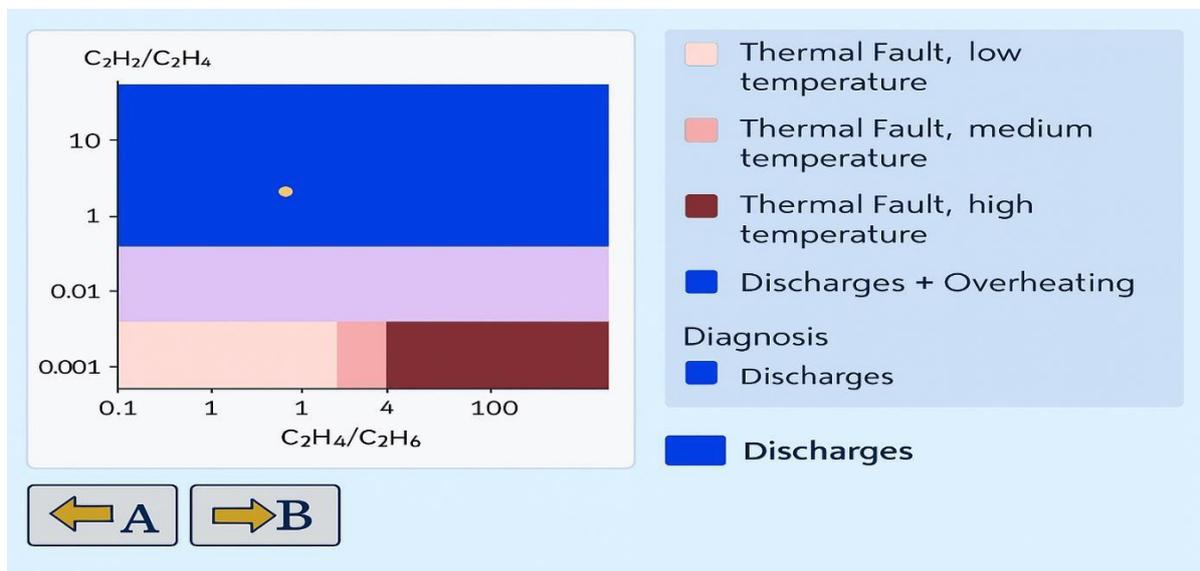


Figure III.22: Schéma de diagnostic extra japon a [63].

III.4. Analyse chromatographique des gaz dissous dans l'huile isolante :

III.4.1 Objectifs :

L'analyse des gaz dissous est l'une des techniques les plus répandues pour le diagnostic des transformateurs.

Elle peut être mise en œuvre en temps réel et ne requiert qu'un faible volume d'huile isolante, prélevé sans interrompre le service du transformateur. Les principaux gaz recherchés dans l'huile isolante sont le méthane (CH_4), l'éthane (C_2H_6), l'éthylène (C_2H_4), l'acétylène (C_2H_2) et l'hydrogène (H_2), produits par la dégradation de l'huile sous l'effet thermique, électrique ou chimique. Par ailleurs, la décomposition du papier isolant génère du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO_2). Ces composés dissous reflètent l'état de détérioration des systèmes d'isolation (papier et huile), causée par les décharges et arcs électriques, la surchauffe ou le vieillissement du papier [64].

Pour extraire et quantifier ces gaz, on utilise la chromatographie en phase gazeuse : les résultats sont exprimés en parties par million (ppm) et servent à déterminer le type de défauts selon les différentes méthodes d'interprétation développées.

III.4.2 Principaux composants d'un chromatographe :

Quel que soit le chromatographe à gaz, on retrouve toujours les principales composantes illustrées dans le schéma de la figure III.26 :

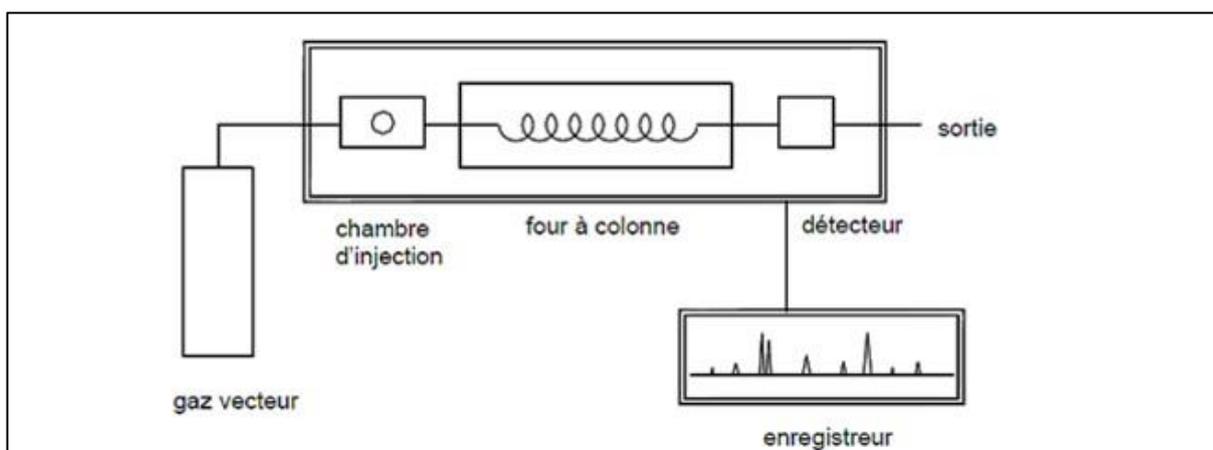


Figure III.23: Principaux composants d'un chromatographe a gaz [65].

A -Gaz vecteur

Le gaz vecteur doit être pur et inerte, et son choix dépend du détecteur utilisé. Les principaux gaz employés sont l'hélium, l'argon, l'azote et le dioxyde de carbone. Ceux-ci sont généralement fournis dans des bonbonnes équipées d'un dispositif de régulation, ce qui permet d'entraîner efficacement les composés à travers la colonne [65].

B -Chambre d'injection

Le système d'injection permet d'introduire l'échantillon dans le chromatographe à l'aide d'une micro-seringue, dont la capacité varie généralement de 1 à 10 μL . Ce dispositif remplit plusieurs fonctions essentielles, quel que soit l'état physique de l'échantillon (solide, liquide ou gazeux) :

- **Rôle d'interface**

Il facilite l'introduction de l'échantillon dans le chromatographe.

- **Rôle de vaporisation**

Pour les échantillons liquides ou solides, le système assure leur vaporisation afin de préparer l'analyse.

- **Rôle de transfert**

Il assure le déplacement des composantes de l'échantillon vers la colonne chromatographique, propulsées par le gaz vecteur.

Ainsi, la chambre d'injection constitue un élément clé dans le processus d'analyse, garantissant une transition efficace de l'échantillon vers la phase d'analyse chromatographique. [66].

C - Four principal

Le four principal est un compartiment dans lequel se trouve la colonne. Il est muni d'éléments chauffants pouvant contrôler la température du four avec une très grande précision. Des contrôles permettent également de travailler à température programmée pour la séparation de mélanges [65].

D -Détecteur

Le détecteur du chromatographe à gaz est situé dans un compartiment immédiatement à la sortie de la colonne. Son rôle est de détecter les Composés à la sortie de la colonne et de transmettre l'information sous forme d'un signal électrique à l'enregistreur [65].

Parmi plusieurs détecteurs on peut citer : les détecteurs simples et quasi universels comme le catharomètre, le détecteur à ionisation de flamme (FID) et le détecteur à capture d'électrons. Ces détecteurs signalent la sortie des gaz de la colonne mais n'en révèlent aucune propriété chimique [67].

E -Enregistreur

L'enregistreur a pour fonction de capter les impulsions électriques générées par le détecteur et de les retranscrire sous forme de pics sur un support papier en mouvement à une vitesse définie. Ce dispositif traduit ainsi les signaux électriques en une courbe graphique, facilitant l'analyse et l'interprétation détaillée des données issues de l'analyse. [65].

III.4.3 Principe de séparation par chromatographie en phase gazeuse :

La figure III.24 illustre le principe de la séparation des gaz par chromatographie,

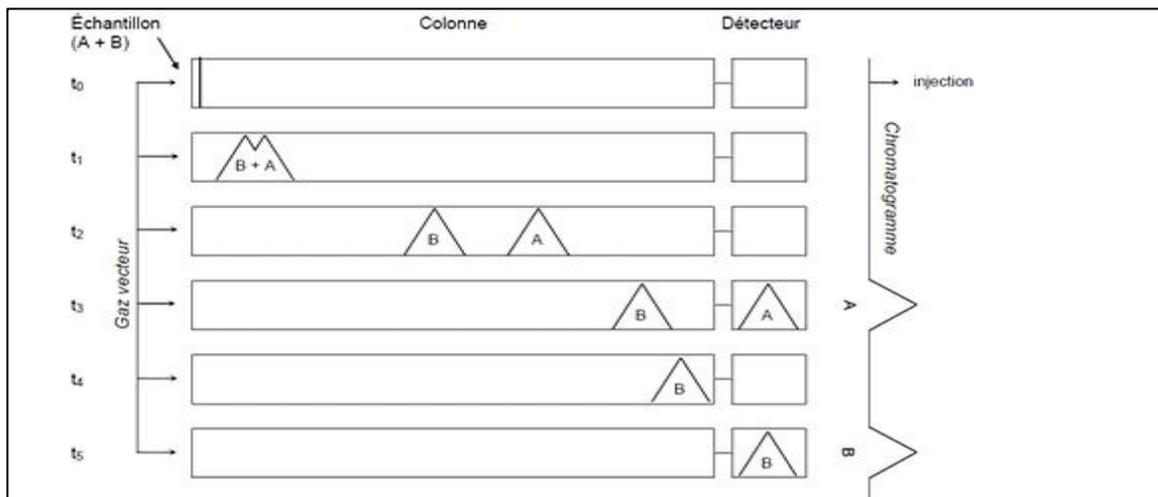


Figure III.24: Illustre le principe de la séparation des gaz par chromatographie.

En résumé, les étapes à suivre pour l'analyse chromatographique sont les suivantes. Le mélange de composés est introduit à l'aide d'une seringue de façon qu'il entre dans la colonne sous forme vapeur. La phase mobile est un gaz chimiquement inerte (hélium, l'argon l'azote), appelé gaz vecteur. Celui-ci entraîne avec lui le mélange de composés à travers la colonne qui contient une phase stationnaire.

Les composés du mélange traversent la colonne à des vitesses différentes. Lorsqu'ils arrivent à la sortie de la colonne, ils sont détectés par un détecteur qui transmet un signal électrique à un enregistreur. Les résultats apparaissent sur le chromatogramme sous forme de pics (figure III.28) [68].

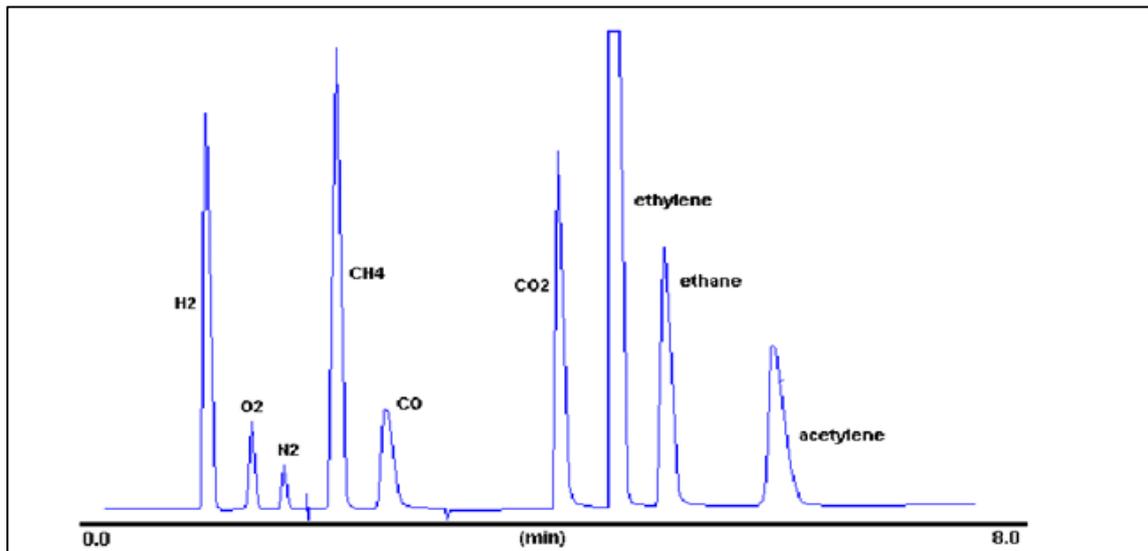


Figure III.25 : Chromatogramme gazeux typique [68].

III.4.4 Procédure d'analyse des gaz dissous dans l'huile :

La procédure d'analyse des gaz dissous comporte trois phases successives : l'échantillonnage de l'huile, l'extraction des gaz et à la fin leur analyse [69].

A -Echantillonnage de l'huile

Il est impératif de prélever et de transporter l'échantillon de manière à préserver l'intégrité des gaz dissous dans l'huile.

La méthode de prélèvement par seringue s'avère appropriée, quel que soit le mode de transport employé.

La sélection des points de prélèvement requiert une attention particulière : en principe, l'échantillon doit être prélevé à un emplacement représentatif de l'ensemble de l'huile du transformateur (par exemple, via la vanne d'échantillonnage).

Toutefois, il peut être nécessaire, dans certaines situations, de prélever intentionnellement des échantillons à des points non représentatifs, notamment lorsqu'il s'agit de localiser un défaut spécifique, tel qu'un problème au niveau du changeur de prise. [70].

La figure III.29 illustre la procédure d'échantillonnage d'huile par seringue pour l'AGD [71].

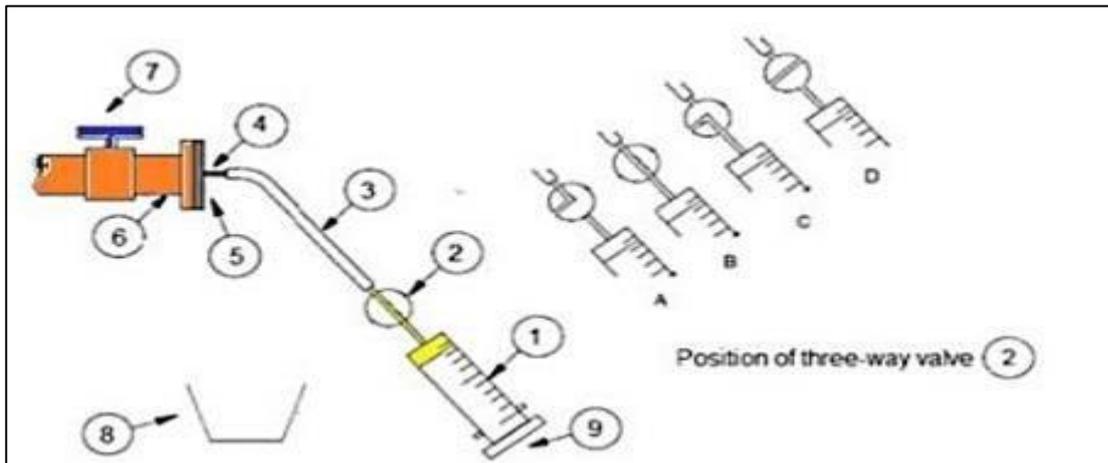


Figure III.26: Procédure de prélèvement d'échantillon d'huile par seringue [71].

Ainsi, il faut suivre les différentes étapes suivantes prescrites par la norme CEI 657 [70] :

1. Retirez la couverture du point de prélèvement de la sortie (6) d'un transformateur.
2. Retirez toute la saleté et la poussière visibles du point de prélèvement (6).
3. Monter un adaptateur approprié (5) avec la buse (4) dans le point de prélèvement (6).
4. Fixez un morceau de tuyau en plastique (3) à la buse (4).
5. Ouvrir la vanne de vidange d'huile (7) et laisser s'écouler lentement au moins 2 litres d'huile dans un récipient à déchets (8). Réglez ensuite la vanne (7) à un faible débit.
6. Réglez la vanne à trois voies (2) en position (A), puis fixez-la à la tubulure en plastique (3). Permettre à l'huile de s'écouler dans le récipient à déchets (8).
7. Tourner la soupape à trois voies (2) en position (B) pour permettre à l'huile de pénétrer dans la seringue (1). Le piston (9) ne devrait pas être retiré, mais permettre de reculer sous la pression de l'huile.
8. Tourner la soupape à seringue à trois voies (2) en position (C) pour permettre à l'huile dans la seringue de s'écouler vers le récipient à déchets (8) pendant que le piston (9) est poussé pour vider la plus grande partie de l'huile dans la seringue (1) qui doit être approximativement verticale pour être sûr que toutes les bulles d'air sont exclues.
9. La procédure décrite aux étapes 7 et 8 est ensuite répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles de gaz.
10. Tourner la valve à trois voies (2) en position (B) et remplir la seringue (1) d'huile jusqu'à 50 ml.
11. Tournez ensuite la vanne à trois voies (2) en position (D) pour fermer le côté de la seringue et débranchez-la de la tubulure en plastique (3). Retourner la seringue (1) avec sa valve à seringue à trois voies (2) dans le sachet.

12. Fermez le robinet de vidange d'huile (7).

B -Extraction des gaz dissous dans l' huile

Pour entamer l'analyse des gaz dissous il faut extraire tout d'abord les gaz de l'huile. On ne peut pas extraire le gaz entièrement à cause du coefficient de solubilité de chaque gaz dans l'huile ; le gaz le moins dissoluble est le plus facile à extraire de l'échantillon d'huile et vice versa [72].

D'après la norme IEC 60567 [70] trois techniques peuvent être employées, à savoir : la méthode d'extraction sous vide, la méthode par entraînement et la méthode d'espace de tête.

Ci-dessous, nous présentons la méthode d'extraction de gaz sous vide.

La figure III.27 illustre les principes d'extraction de gaz dissous de l'huile.

Le système entier est d'abord évacué pour créer le vide, puis la valve (b) est fermée et l'échantillon d'huile est introduit à travers un septum de volumes entre 0.25 et 5 ml.

La valve (a) est alors fermée et le niveau de mercure est élevé de 1 à 2 pour apporter les gaz extraits de nouveau à la pression atmosphérique [73].

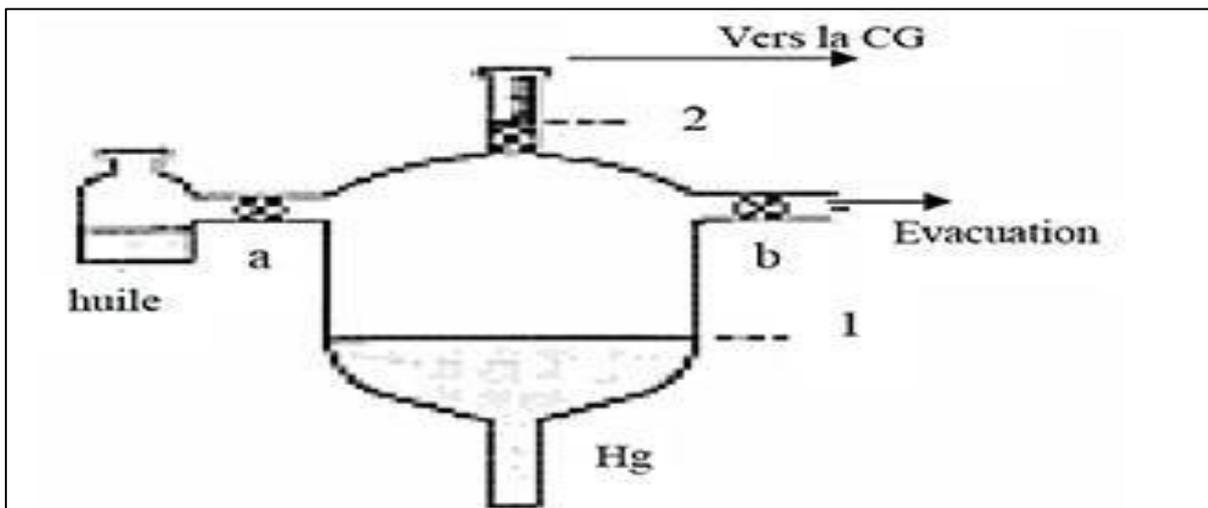


Figure III.27: Extraction sous vide [73]

C -Analyse des gaz dissous

Après extraction, le mélange gazeux est fractionné en divers composés chimiques, chacun étant identifié et quantifié.

Par ailleurs, la chromatographie en phase gazeuse (CG) offre une méthode d'analyse plus performante, permettant de déterminer avec précision la composition et les concentrations de ces gaz.

Bien qu'elle nécessite un équipement sophistiqué et soit réservée aux environnements de laboratoire, cette technique fournit une analyse exhaustive tant sur le plan qualitatif que quantitatif. [74].

KV (50 Hz). Lors de l'essai, la température de chaque échantillon doit être maintenue égale à la température ambiante ($20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$). Le spintermètre (Appareil de mesure de la rigidité diélectrique) est programmé pour des claquages avec un temps des repos de 2mn entre 2 essais successifs.

Ce temps de repos est largement suffisant pour permettre à l'huile de se stabiliser.

La tension de claquage est la moyenne arithmétique des valeurs trouvées pour 6 essais. Cette valeur est affichée sur l'afficheur.

III.5 Vieillessement de l'huile de transformateur :

Les principaux modes de vieillissement de l'huile de transformateur sont thermiques, électrochimique et électrique.

1- Le vieillissement thermique

Il résulte d'un échauffement cyclique ou continu, sur de longues périodes, à des températures relativement élevées.

2- Le vieillissement électrochimique

Il se manifeste par les effets durables du champ électrique sur des agents chimiques introduits accidentellement dans l'huile ou formés lors de sa propre dégradation.

3- Le vieillissement électrique

Il correspond à l'action prolongée des décharges partielles ou de tout phénomène d'ionisation induit par le champ électrique [75].

Conclusion

Le traitement de l'huile des transformateurs de puissance est essentiel au maintien de l'efficacité des réseaux électriques contemporains. Cette approche permet de prolonger la durée de vie des transformateurs de 30 à 40 ans et d'éviter les pannes catastrophiques en éliminant les impuretés (humidité, gaz et particules) et en prolongeant les propriétés isolantes de l'huile.

Chapitre IV

Principe de fonctionnement de la machine de traitement d'huile

Chapitre IV : Principe de fonctionnement de la machine de traitement d'huile

Introduction

Le transformateur est l'un des composants les plus cruciaux et les plus coûteux du système électrique. Bien que le risque de panne soit faible, une panne entraîne des coûts de réparation élevés, des temps d'arrêt prolongés et des problèmes de sécurité. De plus, le remplacement régulier des transformateurs est prohibitif ; un entretien approprié est donc nécessaire pour prolonger leur durée de vie. La purification de l'huile isolante est l'une des procédures de maintenance les plus importantes, car la longévité du transformateur est directement liée à la qualité de son huile. Ceci est réalisé grâce à une machine de filtration immergée, composée d'une pompe d'aspiration, de filtres, de circuits de chauffage, d'une colonne de purification ionique, d'une chambre de dégazage et de déshydratation, de pompes à vide et d'une pompe de refoulement. Dans cette étude, nous décrivons ce dispositif de filtration et son fonctionnement pour purifier l'huile de transformateur contaminée [76],[77].

IV-1. Machine de filtration d'huile de transformateur sous vide poussé :

En général, l'huile de transformateur non traitée contient 50 à 60 ppm (parties par million) d'eau et 10 à 12 % d'air en volume à saturation. Pour que l'huile réponde aux exigences, elle doit être filtrée afin d'éliminer l'humidité, les résidus gazeux et les particules ferreuses et non ferreuses en suspension, et ainsi obtenir les propriétés requises. La machine de filtration d'huile de transformateur traite l'huile de transformateur et d'équipement sous haute pression. Elle la chauffe d'abord, puis passe à travers un filtre spécialement conçu avant de la soumettre à un traitement haute pression qui la déshydrate et la dégaze afin de garantir sa conformité aux spécifications standard. Fin de la procédure.



Figure IV.1: Machine de filtration d'huile de transformateur sous vide poussé.

La figure III.31 montre la machine de filtre à huile du transformateur. Les machines de filtration d'huile pour transformateurs sont disponibles en plusieurs capacités, allant de 100 litres par heure (L/h) à 16 000 L/h. Il existe deux types de machines de filtration : fixes et mobiles. Les vis-vérins servent à soulager la pression sur les roues en position stationnaire. Elles sont adaptées à une utilisation en extérieur et résistent aux intempéries. L'équipement est sécurisé et protégé des intempéries. Tous les composants présentent une rigidité et une résistance suffisantes pour supporter les conditions de fabrication, de transport et d'utilisation habituelles. L'installation est conçue pour fonctionner sur un courant alternatif triphasé de 415 V, 4 fils, 50 Hz [79],[80].

IV.2-Huile isolante

Deux types de matériaux isolants sont fréquemment utilisés dans les transformateurs :

A) Liquides isolants

Cette huile isolante a été sélectionnée pour sa haute résistance électrique, sa bonne conductivité thermique et sa capacité à s'adapter à des formes complexes grâce à sa capacité d'auto-cicatrisations.

B) Isolants plus solides

Le papier isolant est utilisé en complément de l'huile minérale pour renforcer l'isolation électrique des transformateurs. Il est généralement imprégné d'huile pour améliorer ses propriétés diélectriques et sa résistance thermique. Le papier offre une excellente isolation entre les enroulements. [76,78].

IV.3-Principe et fonctionnement de la machine de traitement d'huile :

IV.3.1- Principes physiques :

A) Déshydratation sous vide

1) Rigueur technique

L'entretien de l'isolateur d'huile d'un transformateur repose sur un procédé de déshydratation sous vide dont l'objectif est de préserver ses caractéristiques électriques et d'augmenter sa durée de vie. Afin d'éviter toute modification de ses additifs, l'huile est d'abord chauffée à une température modérée (souvent inférieure ou égale à 50 °C). Elle est ensuite exposée à une pression extrêmement basse (généralement inférieure à 0,1 bar), ce qui accélère l'évaporation de l'eau libre et dissipée sans nécessiter de températures susceptibles de dégrader le fluide.

Sous cette pression, l'huile circule en film mince à travers un système de séparation vapeur-liquide. Les vapeurs d'eau et les hydrocarbures les plus légers sont dirigés vers un séparateur où l'eau se condense puis est évacuée, tandis que les gaz non condensables sont mis en réserve dans une chambre tampon avant d'être aspirés par la pompe à vide. Cette boucle continue garantit qu'à la sortie, l'huile est à la fois parfaitement déshydratée et débarrassée de ses gaz dissous.

2) Préparation et sécurité

Avant toute intervention, le transformateur doit être libéré sous contrôle strict et expédié par Lockout/Tagout (LOTO). Pour déterminer son état initial, nous commençons par mesurer la tension de clivage de l'huile.

• Procédure verrouillage et étiquetage sécurité lors des interventions sur les équipements loto (lockout/tagout)

- Isolation électrique stricte du transformateur (débranché du réseau).
- Cadenassage des disjoncteurs et sectionneurs pour empêcher toute énergisation accidentelle.
- Pose d'étiquettes de danger sur les organes de commande.
- Vérification de l'absence de tension par un détecteur haute tension (vérification avant contact).

3) Raccordements et mise en service

L'huile usagée est extraite du bac de vidange et envoyée vers l'unité de traitement. V= 76 544 567 litres. Une fois chauffée et immergée, l'huile retourne intégralement dans le réservoir. L'équipement est ensuite mis en service.

V : Volume d'huile usagée du réservoir de vidange (l)

4) Phase active (4–5 heures)

Pendant ce temps, l'huile perd rapidement son humidité et son gaz lorsqu'elle se présente en fine couche. Si les résultats sont satisfaisants, la durée du traitement peut être ajustée d'une heure afin d'optimiser l'efficacité grâce à des contrôles intermédiaires de la tension de claquage.

5) Vérifications finales

- Une fois le cycle terminé, une mesure définitive de la tension de claquage est effectuée par exemple,
 - Pour un transformateur de **11 kV**, la tension de claquage de l'huile devrait être d'environ **50 kV**.
 - Pour un transformateur de **33 kV**, elle devrait être d'environ **60 kV**.

, puis on vérifie la stabilité diélectrique de l'huile, son niveau dans le circuit de refroidissement et sa température.

6) Cas des chambres du changeur de prises en charge, dit-on-load tap changer (OLTC)

Avant sa mise en service, la salle OLTC subit les mêmes procédures de nettoyage, de séchage et de vidange que si le transformateur était équipé d'un changeur de pièces surchargé.

La chambre OLTC suit les mêmes procédures rigoureuses que les transformateurs fortement sollicités, en 3 phases clés :

1. Nettoyage complet

- Vidange intégrale de l'huile usée et élimination des dépôts carbonés (générés par les arcs électriques lors des commutations sous charge).
- Lavage des composants internes avec des solvants spécialisés pour garantir l'élimination des impuretés sur les contacts.

2. Séchage sous vide

- Exposition de la chambre à un vide poussé (< 0.1 bar) avec un chauffage modéré ($\leq 50^{\circ}\text{C}$) pour extraire l'humidité et les gaz dissous.
- Vérification que l'humidité résiduelle atteint < 5 ppm (partie par million) pour prévenir corrosion et arcs électriques.

3. Remplissage et contrôle

- Réalimentation avec une huile neuve filtrée (précision : 1 micron).
- Mesure de la rigidité diélectrique (≥ 50 kV) et vérification mécanique (alignement des contacts, étanchéité des joints).

Objectif principal : Éviter l'explosion de la chambre ou sa défaillance due à l'accumulation de gaz inflammables (ex : hydrogène) ou d'humidité, assurant la continuité de service du transformateur.

6) Performances et choix de l'appareil

Les installations actuelles visent des performances élevées :

Élimination de toute l'eau libre et de plus de 99,9 % de l'eau rejetée,

Élimination de tout le gaz libre et jusqu'à 98 % du gaz dissous.

Des facteurs tels que la tension du transformateur (110-330 kV pour un étage simple et jusqu'à 500 kV pour un étage double), la teneur en eau initiale de l'huile, la quantité de traitement souhaitée et la capacité de la pompe à vide sont tous pris en compte lors du choix de la machine la plus adaptée. Enfin, un service après-vente performant, comprenant la fourniture de pièces de rechange, la maintenance périodique et la requalification, garantit une utilisation durable de l'installation.

Assen Power Equipment Co., Ltd., « Comment choisir la bonne installation de déshydratation d'huile de transformateur »

B- Dégazage sous vide

Objectif du dégazage sous vide

Le dégazage par aspiration a pour objectif d'éliminer les polluants gazeux (principalement l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone et l'hydrogène) ainsi que l'humidité présente dans l'huile isolante du transformateur. Ces polluants peuvent :

- Réduire la rigidité électrique de l'huile ;
- Accélérer la dégradation de l'huile et ses processus ;
- Favoriser la production de bulles de gaz lors des pressions, augmentant ainsi le risque de panne électrique.

1) Principes de fonctionnement

Le procédé de dégazage immergé consiste à relâcher la pression à l'intérieur d'une chambre de dégazage, permettant ainsi au gaz et à l'eau de s'évaporer dans l'huile.

Etapas standard comprennent

- Chauffage de l'huile

L'huile est préchauffée à la température idéale (généralement entre 60 et 70 °C) pour faciliter la libération du gaz et de l'humidité.

Cette technique consiste à introduire de l'huile chauffée dans une chambre immergée à basse pression (souvent entre 0,5 et 5 mbar), ce qui provoque l'évaporation du gaz et de l'eau.

- Séparation des gaz

Grâce à un système de pompage adapté, l'excès d'eau et les vapeurs de gaz sont éliminés de la chambre de dégazage.

- **Filtration et refroidissement** : Une fois l'huile chauffée, elle est refroidie et filtrée pour éliminer les particules solides restantes avant d'être réintroduite dans le transformateur.

2) Paramètres opérationnels clés

La température de l'huile est comprise entre 60 et 70 °C. La pression dans la chambre de dégazage est de 0,5 à 5 mbar. Selon le niveau de contamination initial, la durée de séjour dans la pièce varie de 15 à 30 minutes. Capacité de traitement : de 1 à 10 m³/h pour les unités transportables ; jusqu'à 50 m³/h pour les systèmes fixes.

3) Critères de performance

Après traitement, teneur dans l'eau ≤ 10 mg/kg. Teneur en gaz dissous : réduction significative conforme aux normes IEEE C57.106 et CEI 60296. Rigidité électrique : ≥ 60 kV (selon CEI 60156) [81].

C) Technologies de la filtration mécanique

1) Objectif de la filtration mécanique

Le procédé de filtration mécanique vise à éliminer les particules solides (métaux, poussières et résidus de pollution) dont la présence peut : réduire la rigidité électrique de l'huile ; accélérer la formation d'acides et de boues ; augmenter les courants de fuite et les risques de pollution interne.

La norme IEEE C57.140 décrit les exigences de pureté à respecter ainsi que Les tests de contrôle post-filtration.

2) Étapes de filtration et types de médias filtrants

- Préfiltration

Support filtrant : cartons emballés ou granulés.

Taille des pores : 5 à 25 µm.

Objectif : éliminer les particules supérieures à 10 µm.

- Filtration fine

Support filtrant : cartouches en microfibre ou en micro-verre.

Taille des pores : 1 à 5 µm.

Objectif : capturer les particules comprises entre 1 et 10 µm.

- Filtration absolue

Support filtrant : cartouches équipées de membranes absolues.

Taille des pores : 0,5 à 1 μm .

Objectif : garantir une propreté inférieure à 1 mg de particules pour 100 mL d'huile

- **Classification et efficacité**

Les médias filtrants sont classés selon leur efficacité :

- Efficacité nominale : rétention partielle des particules
- Efficacité absolue : rétention supérieure à 99,9 % à la taille nominale (conformément à la clause 7.3)

L'enchaînement progressif de ces différents niveaux de filtration permet d'optimiser la qualité finale de l'huile tout en prolongeant la durée de vie des filtres.

3) Paramètres de fonctionnement

- **Débit de traitement**

Les unités transportables conventionnelles offrent un débit de traitement compris entre 3 et 10 m^3/h , tandis que les systèmes fixes de grande capacité peuvent atteindre jusqu'à 50 m^3/h .

- **Pression différentielle (Δp)**

Le seuil recommandé pour le remplacement des filtres se situe entre 0,5 et 1,0 bar. Une surveillance continue de la pression différentielle est assurée afin d'éviter tout colmatage critique, conformément à la clause 7.5.

- **Température de l'huile**

La plage de température optimale se situe entre 40 et 60 °C. Une température plus élevée réduit la viscosité de l'huile, ce qui améliore la perméabilité des filtres.

- **Compatibilité et matériaux**

Les composants en contact avec l'huile, tels que les joints et les corps de filtre, sont conçus en inox ou en matériaux résistants à l'huile. Une conception antistatique est intégrée pour limiter l'attraction électrostatique des particules.

4) Conception des machines

- **Configuration modulaire**

Le système est composé de plusieurs unités modulaires facilement remplaçables. En fonction de l'état de l'huile, des étapes supplémentaires de filtration fine ou absolue peuvent être intégrées.

- **Automatisation et mobilité**

Monté sur un châssis mobile (sur roues ou remorque), l'ensemble intègre une pompe et une armoire de commande programmable (PLC) permettant une gestion automatisée de la température, de la pression et du remplacement des filtres.

- **Sécurité et maintenance**

Des clapets de dérivation sont installés dans les boîtiers en cas de surpression. Des alarmes visuelles et sonores signalent tout colmatage. L'accès aux cartouches est simplifié pour un remplacement rapide. Chaque filtre est suivi à l'aide d'une documentation complète de son cycle de vie.

5) Critères de performance et essais

- **Propreté de l'huile – Indice ISO 4406**

- Objectif de propreté : $\leq 16/14/11$
- Cela correspond à une concentration maximale de particules supérieures à 4 μm , 6 μm et 14 μm par millilitre.

- **Rigidité électrique**

- Testée avant et après filtration
- Niveau minimal recommandé : ≥ 60 kV
- Applicable aussi bien à de l'huile neuve qu'à de l'huile recyclée

- **Teneur en eau**

- Après traitement, la teneur en eau résiduelle doit être inférieure à 20 mg/kg
- L'ajout d'une unité de déshydratation est recommandé si nécessaire

- **Données expérimentales à fournir**

Les résultats des essais doivent inclure :

- Histogrammes de répartition des particules
- Mesures différentielles de pression (Δp)
- Courbes de retour des filtres (efficacité de filtration au fil du temps) [82].

IV.4-Composants d'une machine de filtration sous vide poussé pour huile de transformateur :

A) Pompe d'entrée

Dirige l'huile contaminée du transformateur vers l'équipement de filtration d'huile. Elle a subi des tests approfondis et est apte à fonctionner en continu et sans problème. Elle est équipée d'un système de protection automatique contre les surpressions. Un mécanisme de verrouillage est installé entre la pompe d'entrée d'huile et le réchauffeur, empêchant ainsi l'alimentation de ce dernier pendant le fonctionnement de la pompe d'alimentation. Afin d'éviter une remontée excessive d'huile dans la chambre de dégazage et de déshydratation, un

mécanisme de verrouillage est intégré à l'équipement de filtration d'huile, entre la pompe d'alimentation et l'interrupteur de flotteur de niveau haut [83].

B) Chauffages

La première étape consiste à amener l'huile à une température souhaitée, généralement jusqu'à 65 °C. Cela permet de fournir à l'huile une chaleur latente qui favorise la séparation de l'humidité et des gaz d'huile dans la chambre de dégazage et de déshydratation. De plus, la viscosité de l'huile diminue, ce qui améliore d'une certaine manière la filtration. Les réchauffeurs sont équipés de tubes de protection pour éviter les surchauffes localisées, les points chauds et les ruptures d'huile. Un thermostat régule les réchauffeurs. Un filament de nichrome/kanthal noyé dans un matériau réfractif constitue les éléments chauffants.

Ils sont logés dans des tubes de protection. L'isolation thermique du réservoir du radiateur minimise les pertes de chaleur. Un dispositif d'aspiration approprié est installé dans la chambre du chauffeur pour éviter toute augmentation de pression au-delà de la limite autorisée.

C) Système de filtration

1) Filtre préliminaire

L'objectif principal de ce filtre est de prévenir les dommages au tuyau d'entrée. Il contient des crépines capables de retenir toutes les particules supérieures à 1 mm, ainsi que les particules magnétiques. Ce filtre est traversé par l'huile entrante. Le nettoyage de la crépine est possible sans démonter le filtre cylindrique.

2) Filtre-presse

Le filtre-presse est constitué de filtres maintenus en place entre des disques métalliques. Il permet d'éliminer les particules de plus de 50 microns et d'éliminer les impuretés présentes dans l'huile usagée.

3) Filtre à cartouche

Il existe des cartouches filtrantes jetables non hygroscopiques d'une capacité de l'ordre du micron. Ces cartouches ont une excellente capacité de rétention de la poussière. Leurs composants sont facilement remplaçables sans outils spécialisés. Un manomètre pression/volume est installé sur la cuve du filtre pour indiquer la pression d'entrée et évaluer l'état des composants. Une aération est prévue pour aérer la cuve du filtre lors de la vidange. Le filtre à cartouche permet d'obtenir la granulométrie souhaitée (en microns) [78].

D) Colonne de réaction ionique

Afin de réduire l'acidité de l'huile, une colonne de réaction ionique est intégrée à la machine de filtration d'huile comprimée immergée. Elle est fournie en option sur demande du client. [79].

E) Chambre de dégazage et de déshydratation

La dessiccation et le dégazage de l'huile de transformateur constituent la troisième étape du processus de filtration de l'huile. Les gaz dissous et l'humidité de l'huile de transformateur sont éliminés dans la chambre de dégazage et de déshydratation. Cette chambre est en aluminium soudé et résiste à la pression à laquelle elle est soumise. Des anneaux de Raschig, repositionnables, sont placés dans la chambre de dégazage et de déshydratation. Les anneaux de Raschig sont des segments de tubes dont le diamètre et la longueur sont quasiment identiques.

Généralement, les anneaux de Raschig en cuivre ou en aluminium sont utilisés dans les dispositifs de filtration de l'huile des compresseurs. Les anneaux de Raschig offrent une surface suffisante pour générer de fines particules d'huile et faciliter l'élimination des gaz dissous et de l'humidité du débit nominal d'huile. Afin de surveiller le débit d'huile dans la chambre de dégazage et de déshydratation, un voyant à lampes allumées est prévu. Un flotteur-interrupteur, situé sur la chambre de dégazage et de déshydratation, est conçu pour empêcher une augmentation excessive du niveau d'huile et est relié électriquement à la pompe d'entrée. Pour réguler le niveau d'huile bas dans la chambre de dégazage et de déshydratation, un autre flotteur-interrupteur est prévu. Il est relié électriquement à la pompe de refoulement. Deux ou trois étages sont séparés par un siphon.

Deux ou trois étages sont séparés par un joint de siphon. Une vanne d'aération est prévue pour aérer la chambre de dégazage et de déshydratation.

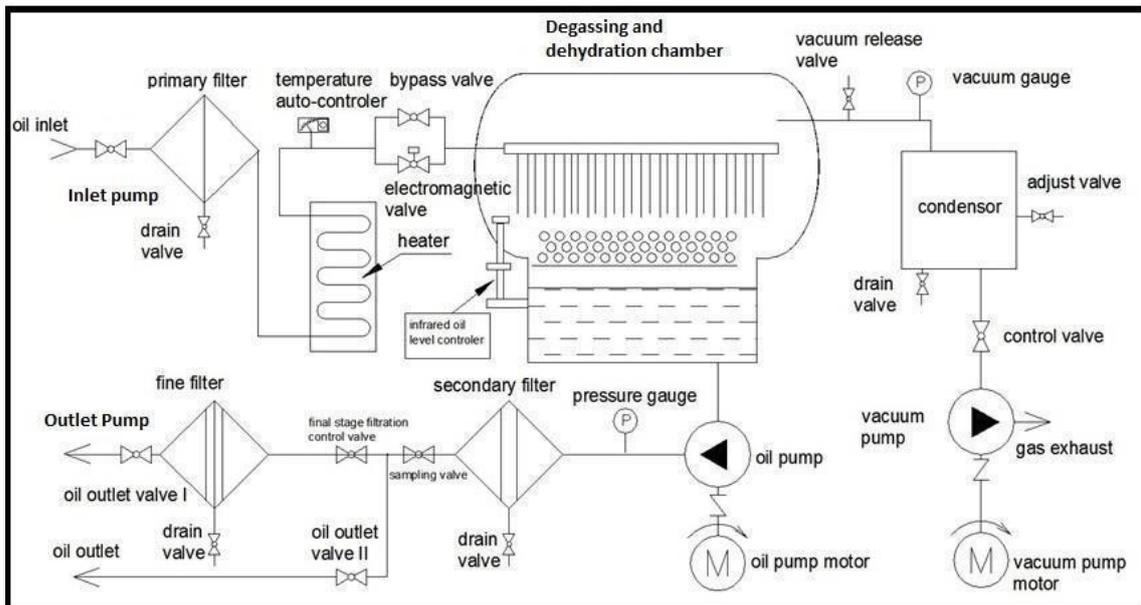


Figure IV.2: Schéma de circuit de la machine de filtration d'huile de transformateur sous vide poussé.

F) Système de pompage à vide

Des pompes à vide sont prévues pour l'évacuation de la chambre de dégazage et de déshydratation. Ces pompes sont importées.

1) Pompe de refoulement

Une pompe de refoulement aspire l'huile de la chambre immergée de dégazage et de déshydratation. Elle est intégrée au système de filtration d'huile du transformateur de distillation de vapeur. Elle a subi des tests approfondis de pression et de taux de défaillance. Entre l'interrupteur à flotteur de niveau bas (situé dans la chambre de dégazage et de déshydratation) et la pompe de refoulement, un mécanisme de dérivation est conçu pour empêcher la pompe de fonctionner sans alimentation.

2) Tuyaux d'huile

Ils fournissent deux tuyaux en caoutchouc nitrile, un pour l'entrée et l'autre pour la sortie de l'huile. Ils sont capables de traiter l'huile de transformateur jusqu'à 100 °C et sous vide.

L'huile de transformateur subit trois à cinq passages dans une machine de filtration immergée avant d'être purifiée. La figure III.33 présente l'huile de transformateur avant et après filtration dans la machine de filtration immergée. L'huile purifiée jaune est classée comme filtrée, tandis que l'huile brune est classée comme non filtrée. La figure IV3 présente le schéma

du circuit de la machine souterraine de filtrage d'huile sous pression. Les propriétés électriques de l'huile peuvent varier en fonction de sa teneur en humidité, en gaz, en particules en suspension et en impuretés. Pendant le stockage, même l'huile neuve absorbe la condensation et l'humidité. C'est pourquoi l'huile doit être traitée occasionnellement avant utilisation.

Périodiquement, pendant son utilisation, l'huile doit également être dégazée et déshumidifiée, car ses propriétés sont affectées par l'absorption de gaz et d'humidité lors de son utilisation dans diverses conditions climatiques [78,80].



Figure IV.3: Huile de transformateur avant et après filtration.

VI.4- Types de machines de filtration d'huile de transformateur de puissance :

1) Classification générale

Il existe principalement deux grandes familles de dispositifs de filtration d'huile de transformateur à distinguer : Les purificateurs à un étage (pour les équipements jusqu'à 220 kV) Les purificateurs sous vide à deux étages (pour les installations à haute et très haute tension, supérieures à 110 kV).

VI.4.1- Purificateurs à un seul étage

- Dispositifs multifonctions pour transformateurs et convertisseurs jusqu'à 220 kV

Ces équipements combinent plusieurs technologies de traitement pour restaurer efficacement la qualité de l'huile isolante. Ils conviennent aux transformateurs et convertisseurs jusqu'à 220 kV, et offrent les caractéristiques suivantes :

- Formation d'une couche d'huile tridimensionnelle : accélère l'évaporation de l'eau et l'élimination des gaz dissous, optimisant le dégazage thermique.

- Filtration mixte en deux étapes : une filtration mécanique initiale élimine les grosses particules, suivie d'une adsorption polymère ciblant les particules fines et le carbone libre.
 - Systèmes de navigation automatisée : intégration de barrières de sécurité, de dispositifs de protection moteur et de capteurs infrarouges pour un fonctionnement autonome sécurisé.
 - Fonctionnalités supplémentaires : possibilité d'intervenir sur d'autres composants isolés, comme les câbles ou les petits transformateurs.
 - Mesure intelligente de la tension de barrière : via un système de perception automatisée des relations entre les paramètres d'isolation.
 - Option d'intégration d'une unité de régénération chimique : traitement avancé par décoloration, désacidification, et réduction des pertes diélectriques.
- **Purificateurs sous vide à double étage – applications haute tension (> 110 kV jusqu'à 500 kV)**

Conçus pour des environnements de très haute tension, ces purificateurs offrent des performances optimales pour le traitement d'huiles jusqu'à 500 kV :

- Double dégazage sous vide : deux niveaux de vide successifs assurent une déshydratation et un dégazage en profondeur, même pour les huiles les plus contaminées.
- Amélioration de la tension de claquage : gain pouvant atteindre +35 kV en un seul passage, assurant une huile conforme aux standards les plus exigeants.
- Normes de pureté renforcées : performances dépassant les exigences réglementaires nationales pour l'huile isolante.
- Grande polyvalence : convient aussi bien au traitement d'huiles neuves, qu'à celui d'huiles importées ou à forte valeur. [84].

VI.5- Avantages principaux

A) Prolongation de la durée de vie des transformateurs

L'huile étant désormais en parfait état, les transformateurs fonctionnent plus longtemps sans panne.

B) Coûts de maintenance réduits

Une maintenance proactive permet de réduire les coûts de remplacement et de réparation de l'huile.

C) Amélioration des performances

Des transformateurs bien entretenus offrent une meilleure efficacité énergétique et une fiabilité accrue.

D) Préservation de l'environnement

La régénération de l'huile réduit la production de déchets et le besoin de nouvelles ressources.

E) Conformité aux normes internationales

Les procédures sont conformes aux normes CEI 60422 et 60599, garantissant un niveau de qualité et de sécurité optimal.

VI.6- Applications industrielles :

Centres de production d'énergie nucléaire, thermique et hydraulique : préservation de la fiabilité des transformateurs de puissance critiques, prévention des arrêts prématurés et optimisation des coûts de débriefing.

A) Énergie solaire et éolienne

Protection des transformateurs de conversion haute tension, particulièrement sensibles aux variations de charge.

B) Transport et distribution**- Postes et sous-stations électriques**

Traitement sur site garantissant la continuité de service lors des opérations de maintenance sans provoquer de stress.

- Adaptation aux hautes et très hautes tensions

Réduction du risque de défaillances dues à l'humidité et aux gaz dissipés lors des transports longue distance.

C) Industrie manufacturière et industries lourdes**- Sidérurgie, cimenteries et usines chimiques**

Prolonger la durée de vie des transformateurs alimentaires, souvent soumis à des coûts élevés et à des conditions difficiles, réduit les interruptions de production.

- Industries automobiles et électroménager

Optimiser la qualité de l'huile pour assurer une isolation adéquate et prévenir les défauts de fabrication causés par les variations de tension.

D) Gaz, pétrole et produits pétroliers**- Raffineries et plateformes offshore**

Procédé de traitement agressif de l'huile éliminant les impuretés acides et spécifiques afin de protéger les équipements critiques en environnements corrosifs.

- Terminaisons de pipelines et stations de pompage

Maintenance des transformateurs embarqués, souvent inaccessibles, rendue possible par des unités de traitement mobiles.

E) Transport ferroviaire et maritime**- Réservoirs ferroviaires**

Maintenance des locomotives électriques et des transformateurs d'alimentation des filtres, assurant une traction stable et minimisant les interruptions de service.

- Marines et plates-formes maritimes

Utilisation d'équipements compacts et mobiles pour maintenir l'isolation d'huile en bon état malgré l'humidité et les vibrations ambiantes.

F) Centres de données et de télécommunications**- Centres de données**

Évaluation de la fiabilité des transformateurs UPS et des groupes électriques, où chaque minute d'inactivité peut entraîner des pertes financières importantes.

- Visites guidées par téléphone portable :

Maintenance préventive des transformateurs de réduction de tension dans des endroits parfois éloignés ou difficiles d'accès [85]

Conclusion

L'étude approfondie du fonctionnement des machines de traitement d'huile de transformateur met en évidence leur rôle essentiel dans la préservation des performances et de la longévité des équipements électriques haute tension. Grâce à un enchaînement rigoureux de procédés – filtration mécanique, déshydratation et dégazage sous vide, chauffage contrôlé, et traitement ionique – ces machines permettent de restaurer les propriétés diélectriques de l'huile, tout en répondant aux normes les plus strictes en matière de sécurité et de performance.

Les performances attendues, telles qu'une rigidité électrique supérieure à 60 kV, une teneur en eau inférieure à 10 mg/kg, ou encore l'élimination de plus de 99 % des gaz dissous, sont désormais atteignables grâce à des systèmes conçus pour s'adapter à des environnements industriels variés, incluant les réseaux de transport, les énergies renouvelables, et les sites critiques. L'évolution vers des unités modulaires, automatisées,

et mobiles renforce leur efficacité opérationnelle, tout en minimisant les interruptions de service.

En somme, les machines de filtration sous vide poussé ne se contentent pas d'améliorer la qualité de l'huile : elles constituent un levier stratégique pour la maintenance proactive des transformateurs, contribuant à la durabilité des infrastructures électriques et à la fiabilité des systèmes énergétiques modernes.

Conclusion générale

Conclusion générale

La fiabilité des systèmes électriques modernes repose largement sur la performance durable des transformateurs, véritables piliers des réseaux de distribution d'énergie. Pour garantir cette performance, il est essentiel de combiner une maintenance préventive rigoureuse avec des techniques de contrôle non destructif et des traitements spécifiques comme la purification de l'huile isolante.

Ces approches intégrées permettent non seulement de prolonger la durée de vie des équipements, mais aussi d'optimiser leur rendement tout en prévenant les pannes coûteuses et dangereuses. L'évolution vers des technologies de maintenance avancées, mobiles et automatisées, témoigne de l'importance croissante accordée à la fiabilité, à la sécurité et à l'efficacité énergétique dans le secteur industriel.

Ainsi, la maintenance ne se limite plus à une simple réparation : elle devient un levier stratégique pour assurer la pérennité des infrastructures électriques et soutenir la transition vers des réseaux intelligents et durables.

Bibliographie

Référence :

- [1] J.J, la forest; 345 kv and above, transmission line reference book; 2ed.edition, electric power research institute; epr general electric company; 1975.
- [2] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « la planification des réseaux électriques » editions eyrolles 1984.
- [3] Mahafenoahasina Virginie Lara, « integration d'une puissance moyenne solaire photovoltaïque sans stockage au reseau : application au reseau électrique de tular », mémoire de master 2, université d'antananarivo, 2016
- [4] J.M. Delbarre, « postes à ht et tht - rôle et structure », techniques de l'ingénieur, traité génie électrique, d 4570, 2004. (3)
- [5] Zellagui Mohamed, "étude des protections des réseaux mt 30 et 10 kv", mémoire de magistère, université constantine, juillet 2010.
- [6] rte-2004]. rte, « mémento de la sûreté du système électrique », 2004
Siemens AG, « power engineering guide - transmission and distribution » 4th edition, 2005.
- [7] schneider electric, « architecteur de réseau de distribution », 2007
- [8] Groupe Sonelgaz, XD « guide technique de distribution », document technique de groupe sonelgaz, 1984.
- [9] Kouadra Foued, « etude Odes variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau mt »
- [10] schneider electric, "les architectures des réseaux".**valentin crastan**, "les réseaux d'énergie électrique i", edition lavoisier 2006
- [11] Chibane, Adel. « études et dimensionnement du nouveau poste de livraison 30kv a sonatrach de bejaia », mémoire de fin d'étude, université abderrahmane mira-bejaïa faculté de technologie, département génie électrique 2013-2014.
- [12] M. Lambert les transformateurs électriques fonctionnement, et mise en œuvre ; technique et ingénierie collection dunod ; 5rue la romiguière, 75005 paris ; 2016.
- [13] D. Tschudi ; localisation des défauts de transformateurs de puissance lors de l'essai de choc ; thèse de doctorat école polytechnique fédéral de lausanne ; 1993.
- [14] F. Chevrier, F, Guely, la logique floue ; collection technique, cahier technique schneider no 191.
- [15] Mezari Naouel << diagnostic des transformateurs de puissance thèse de magistère de l'université tizi.

- [16] Boudraa, s, maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - apport de l'intelligence artificielle-, in departement d'electrotechnique2017, universite de batna2. P. 286
- [17] Anthony Lefevre.(contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires) thèse de doctorat de l'université de nantes année 2006.
- [18] Amari Mansour. chapitre 03 « transformateur triphasé »
- [19] Jean Sanchez « aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance », mémoire de doctorat université de grenoble, 21 juin 2011.
- [20] Mr. Benadda Abdellah & Mr. Benahmed Abderrazzak « contribution à l'étude de maintenance d'un transformateur mt/bt au niveau de l'entreprise snvi / c.i.t aïn bouchekif tiaret » université ibn khaldoun de tiaret
- [21] Nacéra Benaouda, H.Guyennet.and A.Benaouda, simulation d'un scénario de e-maintenance préventive utilisant les services web .net., in iee setit'2005, tunis, abstract p 325
- [22] Lakhdari, Ala-Eddine. etude et modelisation de capteurs en nd par courants de foucault :application a la detection des fissures. biskra : s.n., 2011.
- [23] Benhadda, Nabil. modélisation des capteurs inductifs à courants de foucault. batna : s.n., 2006.
- [24] Trillon, Adrien. reconstruction de défauts à partir de données issues de capteurs à courants de foucault avec modèle direct différentiel. nantes : s.n., 2010.
- [25] AFNOR, terminologie de la maintenance, norme européenne nf en13306, 2001.
- [26] Ahmad Alali Alhouaij, contribution à l'optimisation de la main tenance dans un contexte distribué, thèse de doctorat,spécialité automatique-productique, institut polytechnique de grenoble, université de grenoble, france, 2010.
- [27] V.Tararykine, modélisation des flux d'information dans un système de e-maintenance, thèse de doctorat en automatique, lab (labo ratoire d'automatique de besançon), université de franche comté, france, 2005.
- [28] Bernard Robles, étude de la pertinence des paramètres stochastiques sur des modèles de markov cachés, thèse de doctorat, discipline : sciences et technologies industrielles, université d'or léan, 2013.
- [29] transformateur série : utilisé pour les transformateurs de plus de 800 a et de 25 kv (150kvbil).

- [30] Slimane, Wissem. conception d'un système multi-capteurs à courants de foucault pour le contrôle non destructif (cnd). batna : s.n., 2008.
- [31] Elhachmi, Taleb m'hammed Mustapha & Ghedamsi. modélisation semi-analytique d'un système de cnd-cf pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur. ouargla : s.n., 2013.
- [32] Ravat, Cyril. conception de multicapteurs à courants de foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif. paris : s.n., 2008.
- [33] Adib, Safer Omar. etude et modélisation de capteur a courants de foucoult pour controle non destructif . m'sila : s.n., 2014.
- [34] Ravat, Cyril. conception de multicapteurs à courants de foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif . paris : s.n., 2008.
- [35] Benhadda, Nabil. modélisation des capteurs inductifs à courants de foucault. batna : s.n., 2006.
- [36] Oussama, Bensalah. contrôle non destructif par courants de foucault par capteur différentiel. m'sila : s.n., 2012.
- [37] Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND)constantine2007
- [38] Benhadda, Nabil. modélisation des capteurs inductifs à courants de foucault. batna : s.n., 2006.
- [39] Bouchala, Tarek. modélisation semi-analytique des courants de foucault. batna : s.n., 2008.
- [40] Zaidi, Houda. méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de foucault : application aux capteurs souples. paris : s.n., 2012.
- [41] Fnaiech, Emna Amira. développement d'un outil de simulation du procédé de contrôle non destructif des tubes ferromagnétiques par un capteur à flux de fuite. paris : s.n., 2012.
- [42] Zorni, Chiara. contrôle non destructif par courants de foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction. paris : s.n., 2012.
- [43] Salma, Cherif. modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs-pièces a défauts complexes pour le controle non destructif par courants de foucoult . tizi- ouzou : s.n., 2011.
- [44] Leleux, Alban. contrôle non destructif de composites par ondes ultrasonores guidées, générées et détectées par multiélément. bordeaux : s.n., 2012.
- [45] Slimane, Wissem. conception d'un système multi-capteurs à courants de foucault pour le contrôle non destructif (cnd) . batna : s.n., 2008.

- [45] Kouadio, Thierry. thermographie infrarouge de champs ultrasonores en vue de l'évaluation et du contrôle non destructifs de matériaux composites. bordeaux : s.n., 2013.
- [46] Hamia, Rimond. performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de contrôle non destructif par courant de foucault. caen : s.n., 2011.
- [47] Lakhdari, Ala-Eddine. etude et modelisation de capteurs en nd par courants de foucault :application a la detection des fissures. Biskra : s.n., 2011.
- [48] Sakina, Zerguini. elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de foucault. Constantine : s.n., 2010.
- [49] N. A. Bakar, A. Abu-Siada and S. Islam, "a review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques," *iee electrical insulation magazine*, vol. 30, no. 3, pp. 39-49, may-june 2014.
- [50] AR. Von Hippel, "les diélectriques et leur applications" dunod 1961.
- [51] P.J.Vuarchex, « huiles et liquides isolants », technique de l'ingénieur d230,d231,d232, 1986.
- [52] Felkaoui, A. (2018). Diagnostic vibratoire au service de la maintenance : de l'acquisition à la décision (Doctoral dissertation).). Univ setif
- [53] N'cho, J. S. (2011). développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon).
- [54] les approches, d. L. M. P. présenté en vue de l'obtention du diplôme de master thème. univ annaba
- [55] Khelfane, F. Benlhafsi, « service d'analyses physico-chimiques – méthode d'analyses des huiles lubrifiantes et diélectriques – masse volumiques des liquides » sonelgaz dpe / r, mai
- [56] norme cei 60567 (ed. 2) : Guide d'échantillonnage de gaz et d'huile dans les matériels électriques immergés pour l'analyse des gaz libres et dissous, Juillet 1992.
- [57] A. Mollmann et B. Pahlavanpour : « nouvelles directives pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous dans les transformateurs dans l'huile ». Lectra no 186. (Oct. 1999).
- [58] norme astm d93-15, standard test methods for flash point by pensky-martens closed cup tester, astm international, west conshohocken, pa, 2015.
- [59] IEEE Std C57.104-2019, *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.

- [60] HV Assets, *The Duval Triangle for Transformer Fault Diagnosis*, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hv-assets.com/duval-triangle>. Consulté le: 25 juin 2025.
- [61] Reinhausen, *The Ultimate Guide to DGA Interpretation*, Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.reinhausen.com/solutions/dga-guide>. Consulté le: 25 juin 2025.
- [62] R.R. Rogers, "IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers using gas in oil analysis," *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, vol. E1-13, pp. 349–354, Oct. 1978.
- [63] N. A. Bakar, A. Abu-Siada and S. Islam, "A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30, no. 3, pp. 39-49, May-June 2014.
- [64] Rachid Salghi, notes de cours analyses physicochimiques II chromatographie, Filière génie des procédés, énergie et environnement première année, école nationale des sciences appliquées d'Agadir.
<https://elearn.univouargla.dz/20132014/courses/222/document/chimichromato.pdf?Cidreq=222>
- [65] Boucheloukh Hadjira, cours méthodes d'analyses chromatographiques, département de chimie, faculté de science exact et d'informatique université de Jijel.
http://elearning.univJijel.dz/elearning/pluginfile.php/8209/mod_resource/content/1/cours%20boucheloukh.pdf
- [66] JF Perrin, chromatographie en phase gazeuse, bts bio analyses & contrôles
<http://fdanieau.free.fr/cours/bts/A1/biochimie/tp/chromatographie%20en%20phase%20gazeuse.pdf>
- [67] N.Senoussaoui, « contributions des techniques intelligentes au diagnostic industriel des transformateurs de puissance », thèse de doctorat, département d'électrotechnique, université Djillali Liabbes de Sidi Bel Abbès, 2018.
- [68] S.Boudraa, « analyse des gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques d'intelligence artificielle », mémoire de magister en électrotechnique, département d'électrotechnique, université de Batna, faculté des sciences de l'ingénieur, 2005.
- [69] norme internationale CEI 60567-3, « matérielle diélectrique immergées- échantillonnage de Gaz et d'huile pour analyse des gaz libres et dissous –lignes électriques », 2005.
- [70] practice procedure of transformer oil sampling according to IEC 60475, rezayat laboratories for industrial services w.l.l. 2019.

http://www.rezilabs.com/site_media/downloads/practice_procedure_of_oil_and_water_sampling.pdf

[71] dissolved gas analysis, digital energy lissue industrial estate east lissue road lisburn bt8 2re united kingdom, general electric company, 2013.

[Http://static1.squarespace.com/static/57243cb920c647f685d9c42c/t/577e3a58e3df288b4972f417/1467890285497/ge+dga+application+intro.pdf](http://static1.squarespace.com/static/57243cb920c647f685d9c42c/t/577e3a58e3df288b4972f417/1467890285497/ge+dga+application+intro.pdf)

[72] A.Amir, N.Saadi, «application de la logique floue pour le diagnostic des transformateurs de puissance par analyse des gaz dissous », mémoire de Master, département d'électrotechnique, université de m'hamed bougara-boumerdes, 2017.

[73] Rachid Salghi, notes de cours analyses physicochimiques II chromatographie, filière génie des procédés, energie et environnement première année, ecole nationale des sciences appliquées d'Agadir.

[74] A.Boubakeur « essais de l'huile de transformateur », cours de graduation, ecole nationale Polytechnique, Alger, 2014.

[75] B. L. Theraja Et A. K. Theraja, « textbook of electrical technology », vol. 2, 1ère 98dition multicolore, S. chand & company Ltd, 2010.

[76] the electrical4u.Com [en ligne] disponible: <https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/>

[77] Ieee: A. Raymon Et R. Karthik, « reclaiming aged transformer oil with activated bentonite and enhancing reclaimed and fresh transformer oils with antioxidants », ieee transactions on dielectrics and electrical insulation, vol. 22, n° 2; Février 2015

[78] Site web de nach engineering pvt. ltd. [en ligne] disponible : <http://nachengg.net/transformer-oil-purification-process>

[79] T.O. Rouse, « huile minérale isolante dans un transformateur », ieee electrical insulation magazine, 1998

[80] norme ieee c57.140-2012, « guide pour la récupération de l'huile isolante et la remise à neuf des équipements électriques immergés dans l'huile », ieee power and energy society, piscataway (nj), états-unis, 2012. Doi : 10.1109/Ieeestd.2012.6201187. (ppapco.ir, linguee.com)

[81] ieee stdc57.140-2012, « guide pour la récupération de l'huile isolante et la remise à neuf des équipements électriques immergés dans l'huile », ieee power and energy Society, piscataway, nj, états-unis, 2012. Doi : 10.1109/ieeestd.2012.6201187.IV.2

[82] ieee : junhao li, quanwei hu, xuefeng zhao, xiu yao, yongfen lu et yanming Li, « caractéristiques de décharge partielle de particules conductrices sphériques libres en

condition CA dans l'huile de transformateur », IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, n° 2 ; avril 2011

[83] Yang Neng, « Analyse des machines de filtration d'huile de transformateur »

[84] Globe Core – traitement de l'huile de transformateur disponible sur :

[85] <https://globecore.com/fr/oil-filtration-pumping/traitement-de-lhuile-de->

حول فريق الاشراف وفريق العمل 1-
فريق الاشراف:

فريق الاشراف	
التخصص: صيانة صناعية	المشرف الرئيسي (01): مرزوق حسين
التخصص: /	المشرف الرئيسي (01): /
التخصص: /	المشرف المساعد: /

2- فريق العمل:

الكلية	التخصص	فريق المشروع
قسم الآلية والكهروميكانيك	صيانة صناعية	الطالب: حسيني محمد الطاهر
/	/	الطالب: /
/	/	الطالب: /

فهرس المحتويات

المحور الأول: تقديم المشروع

المحور الثاني: الجدوى الاقتصادية للمشروع

المحور الثالث: النموذج التجاري (BMC)

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

المحور الأول: تقديم المشروع

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

فكرة المشروع:

يتضمن هذا المشروع وحدات متنقلة لمعالجة زيوت محولات الطاقة الكهربائية، بحيث تكون قابلة للتركيب والتشغيل الميداني السريع، وتتميز بسهولة النقل والعمل في البيئات الصحراوية والصناعية القاسية.

فإن زيوت محولات الطاقة الكهربائية تتعرض لتدهور سريع في الخصائص العازلة بسبب:

- ارتفاع درجات الحرارة قد تتجاوز 50 °C صيفاً مما يسرع أكسدة الزيت.
 - وجود غبار كثيف ورطوبة ليلية متفاوتة تزيد من مخاطر دخول شوائب ورطوبة إلى الزيت.
 - صعوبة الوصول إلى خدمات الصيانة المركزية في الشمال وارتفاع تكاليف النقل لمسافات تزيد عن 800-1,000 كم.
- انطلاقاً من ذلك، تقوم الفكرة على إنشاء وحدة معالجة وتنقية زيوت محولات الطاقة الكهربائية HTB باستخدام تقنية متحركة/ثابتة، تهدف إلى:

- استرجاع خواص الزيت وحمايته من الأكسدة والرطوبة والشوائب المعدنية.
- إطالة عمر الزيت وخفض تكاليف الاستبدال أو التخلص غير المستدام.
- تقديم خدمة صيانة دورية لأصحاب المحطات في الجنوب بتكلفة معقولة وجودة عالية.

أهداف المشروع الأساسية:

- تعزيز الاستدامة البيئية من خلال تقليل كميات الزيت الملوّث التي يُحتمل التخلص منها بطريقة غير صحيحة.
- رفع عمر الزيت المستخدم في محولات الأطراف الجنوبية من 4 سنوات إلى 8-10 سنوات. تقديم خدمة صيانة وتنقية دورية لزيوت المحولات لشركات الكهرباء والمؤسسات الصناعية (عامّة وحكومية)، خاصة في ولايات: ورقلة، توفرت، غرداية، إليزي، الوادي، تمنراست، جانت، النعامة.
- تحقيق عائد استثماري يغطي تكاليف شراء آلة وتشغيلها وصيانة الوحدة خلال فترة لا تتجاوز 36 شهراً.
- بناء قاعدة عملاء ثابتة من مؤسسات حكومية وخاصة تعتمد على تشغيل المحولات في الجنوب الجزائري.

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

المحور الثاني: الجدوى الاقتصادية

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

1 وصف المشروع:

1.1 الأهداف:

يهدف المشروع إلى إنشاء شركة صغيرة متخصصة في معالجة وتنقية زيوت المحولات الكهربائية في المنطقة الجنوبية من الجزائر، وخاصة في الولايات التابعة للإقليمية لحاسي مسعود (سونلغاز) (ورقلة، توقرت، غرداية، إليزي، الوادي، تمنراست، جانت، النعامة).

ويسعى المشروع إلى:

- تعزيز الاستدامة البيئية من خلال استرجاع زيوت المحولات بدل التخلص غير المستدام.
- تقليل تكاليف استبدال الزيت السنوي للشركات والمؤسسات الصناعية والحكومية.
- تحسين موثوقية تشغيل المحولات في البيئات الصحراوية القاسية.
- تقديم خدمة معالجة منتظمة بجودة عالية وتكلفة معقولة.
- بناء قاعدة عملاء ثابتة من شركات الكهرباء والمؤسسات الصناعية في الجنوب.
- تحقيق عائد استثماري يغطي تكاليف شراء آلة معالجة زيوت المحولات الكهربائية وتشغيلها خلال فترة لا تتجاوز 36 شهرا".

1.2 المنتجات/الخدمات:

ستقدم شركتنا خدمات متكاملة لمعالجة وتنقية زيوت المحولات الكهربائية باستخدام آلة متخصصة (التبييض بدرجة حرارة عالية، التبييض بالتفريغ، وتشمل:

- جمع الزيت المستعمل من المحطات (محولات kV30/400 ، kV30/60 ، والمحطات الفرعية الصناعية.
- معالجة الزيت عبر المراحل التالية:
 - ◀ الترشيح الأولي: إزالة الجسيمات الكبيرة (50 < ميكرون).
 - ◀ التسخين الأولي إلى ~100 °C لإخراج الرطوبة القابلة للتطاير.
 - ◀ إضافة مواد مبيضة وتسخين إلى ~120 °C تحت ضغط جوي خفيف. ◀ مرحلة التفريغ لإزالة الرطوبة المتبقية والشوائب الطيارة.
 - ◀ الترشيح النهائي: فلاتر دقيقة (10 < ميكرون) لضمان لون شفاف وخلو من الجسيمات الصلبة.
 - ◀ التبريد وإعادة الزيت إلى درجة حرارة التشغيل (~40 °C) ، ثم التعبئة في حاويات معقمة (براميل).
 - ◀ اختبارات عملية قبل وبعد المعالجة (محتوى الرطوبة، الحموضة، نسبة الشوائب الصلبة)
- تقرير تقني مفصل بعد كل دفعة معالجة يبين:
 - ◀ معامل العزل بعد المعالجة ($55 \leq kV$).
 - ◀ محتوى الرطوبة ($5 \leq ppm$)
 - ◀ الحموضة ($0.1 \geq mg KOH/g$)
 - ◀ نسبة استرجاع الزيت ($80 \geq \%$)
- عقود صيانة دورية (شهرية، ربع سنوية، سنوية) مع حزم خصم للالتزامات طويلة الأمد.
- استخدام جهاز استرجاع الفراغ المتنقل (من السنة الثانية) لتثبيت الفراغ في الزيت بين جلسات المعالجة المتوسطة

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

2دراسة السوق:

2.1دراسة المنافسة:

- المنافسون المباثرون:
 - ◀ بعض شركات الصيانة الكهربائية الكبرى في الجزائر (محلبة أو مرتبطة بشركات أجنبية) التي بدأت في تقديم خدمات معالجة الزيت باستخدام تقنيات بسيطة (مثل الترشيح بالفلترات الدقيقة).
 - ◀ شركات استشارية متخصصة في زيوت المحولات والتي تُنشئ شراكات مع مختبرات خارجية لمعالجة الزيت مكلفة نسبياً.
- المنافسون غير المباثرون:
 - ◀ أقسام الصيانة الداخلية لشركة سونلغاز وسوناطراك التي قد تعتمد على طرق تقليدية (إرسال الزيت إلى المختبرات المركزية في الشمال).
 - ◀ المتعاملون المحليون الصغار الذين يجمعون الزيت المستعمل لإرساله دفعات فصيلة إلى مصانع إعادة التكرير المكلفة في شمال البلاد.

2.2تحليل: SWOT

نقاط القوة :

- ◀ آلة معالجة حديثة قادرة على إزالة الرطوبة والشوائب المعدنية بكفاءة.
- ◀ خبرة فنية متخصصة في ظروف الجنوب القاسية (حرارة عالية، غبار كثيف). ◀ خدمة متكاملة “من الموقع إلى الاختبار” التشخيص ← العلاج ← الاختبار ← تقارير فنية رقمية دقيقة تُسلم خلال (العودة). 24-48 ساعة.
- ◀ توفير تكاليف النقل مقارنةً بإرسال الزيت إلى الشمال (1,000 < كلم).
- ◀ عقود صيانة دورية تضمن ولاء العملاء.
- ◀ وجود شاحنات نقل معزولة حرارياً لحماية الزيت أثناء التنقل. ◀ شراكات أولية مع ورش صيانة محلية كنقاط تجميع فرعية.

2.3اتجاهات السوق:

- جهود متصاعدة نحو الصيانة التنبؤية وتعزيز عمر الأصول.
- تركيز متزايد على الاستدامة البيئية وتقليل النفايات الصناعية الخطرة.
- زيادة الاستثمارات في البنية التحتية الكهربائية في الجنوب لتحفيز التنمية الاقتصادية.
- تزايد استخدام الإلكترونيات الدقيقة وأجهزة مراقبة لحظية تعمل بالتكامل مع عمليات المعالجة.

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

- توجه الشركات نحو تقنيات متعددة المراحل لمعالجة الزيت (التبييض + التقطير + إزالة الغازات).

2.4 حجم السوق:

- شبكة HTB في الجنوب تضم أكثر من 150 محطة تحويل رئيسية وفرعية، متوزعة عبر ولايات: ورقلة، توفرت، غرداية، إليزي، الوادي، تمنراست، جانت، النعامة.
- متوسط استهلاك زيت المحولات سنوياً في المنطقة الجنوبية يقارب 1,000-1,200 طن (سنة 2024).
- السوق المحتمل لمعالجة الزيت يقدر بـ 800-900 طن/سنة خلال السنوات الثلاث القادمة (بزيادة 20 % سنوياً).
- القيمة التقديرية لسوق معالجة زيت المحولات في الجنوب (بافتراض 300 دولار ربح صافي/طن):
◀ السنة الأولى: 800 طن × 300 = 240,000 دولار
◀ السنة الثانية: 960 طن × 300 = 288,000 دولار
◀ السنة الثالثة: 1,152 طن × 300 = 345,600 دولار

3 الخطة العملية:

3.1 الموارد البشرية:

- مدير المشروع (1): خبير في إدارة المشاريع الصناعية والتواصل مع الجهات الحكومية.
- مدير فني (1): مهندس كهرباء/كيميائي مختص بزيوت المحولات وتقنيات المعالجة.
- مهندسو صيانة حقلية (2-3): مسؤولون عن أخذ العينات الأولية وتشخيص حالة الزيت في المحطات.
- فريق تشغيل آلة المعالجة (3-4 فنيين): تشغيل الوحدة، مراقبة درجات الحرارة والضغط وصيانة الفلاتر.
- سائقو نقل (2-3): نقل الزيت (2-3 طن لكل رحلة) مع مادة عزل حراري داخل الشاحنة.
- محاسب/مراجع داخلي (1): متابعة الإيرادات والمصروفات والفواتير والودائع.
- منسق لوجستي (1): جداول النقل، نقاط التجميع الفرعية، التواصل مع الورش المحلية.
- موظف علاقات عامة وتسويق (1): بناء قاعدة بيانات العملاء، إدارة الموقع الرقمي ووسائل التواصل.

3.2 المسار (الجدول الزمني للتنفيذ):

المرحلة	المدة	الأنشطة الرئيسية	النتائج المتوقعة
1. التأسيس والتجهيز (1-6 أشهر)	6 أشهر	تسجيل الشركة قانونياً (ورقلة أو حاسي مسعود).	-تأسيس قانوني ناجح -جاهزية قانونية -وانطلاق المشروع
شراء آلة معالجة الزيت المُختارة (سعة 5-10 طن/يوم)			-توفر المعدات الأساسية -جاهزية تشغيلية

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

و مولد احتياطي.			
تجهيز شاحنة نقل معزولة حرارياً وخزان تخزين مؤقت.			
توريد أولي من الفلاتر الاحتياطية.			
توظيف وتدريب الفريق الفني والإداري.			
تطوير نظام التقارير الرقمية (قاعدة بيانات واستمارات).			
الحصول على تراخيص بيئية وأمنية (سونغاز ، البلدية) .	الوحدة جاهزة للعمل تقنياً		
فريق مدرب ودليل تشغيل داخلي مُعدّ.			
نظام تقارير رقمية يعمل بكفاءة.			
فريق مدرب وجاهز للتشغيل بكفاءة عالية			
نظام تقارير رقمي يعمل بكفاءة -سهولة تتبع الأداء، -حفظ البيانات وتحليلها بشكل فوري			
بيانات أولية حول جودة الزيت وحالة المحطات	جمع عينات زيت من 10-15 محطة (ورقلة، اغواط، وادي).	5 أشهر (متداخل)	2. الانطلاق التجريبي -8 (4 أشهر)
-تحديد استهلاك الطاقة والزمن الفعلي لكل دورة			إجراء معالجات تجريبية وحسابات تكاليف وحدة الزيت) وقت دورة، طاقة)
تقييم دقيق لفعالية الوحدة			جمع بيانات وتحليل الأداء (رطوبة) .
-تحسين مستمر لفعالية وكفاءة المعالجة -تقليل الأخطاء والمشاكل التشغيلية		تقرير تقييمي شامل لفعالية الوحدة وكفاءة المعالجة.	تعديل إجراءات المعالجة بنا " على النتائج التجريبية.
-توحيد العمليات التشغيلية وفق معايير			إجراءات وضوابط تشغيل محسنة.

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

دقيقة -رفع مستوى السلامة والجودة -تحسين كفاءة الأداء والسرعة التشغيلية			
توسيع قاعدة العملاء والأسواق	إضافة ولايات غرداية والوادي إلى جدول الزيارات.	6 أشهر	3.التوسع الجغرافي الأول (7-12 أشهر)
تثبيت أول قاعدة زبائن ثابتة			توقيع عقود أولية مع 5-7 عملاء في تلك الولايات (محطات تحويل ومصانع).
سهولة الوصول لمصادر الزيت المعالج			إنشاء نقاط تجميع فرعية بالتعاون مع الورش المحلية.
-رفع القدرة الإنتاجية بشكل تدريجي-تحفيز العملاء الجدد وتعزيز السمعة		70-50طن معالج إضافي بحلول نهاية الشهر الـ12.	إطلاق حملة تسويقية لعرض الفوائد البيئية والاقتصادية.
-توفير تدفق مالي ثابت ومستمر -بناء علاقات طويلة الأمد مع العملاء -تعزيز ثقة العملاء في الخدمة			عقود صيانة سنوية مع عملاء متعددين.
-تحقيق دخل دوري ثابت -تثبيت علاقات طويلة الأمد مع الزبائن	طرح باقات صيانة (شهرية، ربع سنوية، سنوية) بأسعار مخفضة.	4 أشهر	4.عقود الصيانة الدورية (9-12 أشهر)
شراكات استراتيجية مع كبرى الهيئات			إبرام عقود مع سونلغاز وفروعها في ولايات الجنوب.
رقابة مستمرة على الأداء والجودة		عقود سنوية تغطي -250 200 طن زيت.	متابعة جداول المعالجة الشهرية وتقديم التقارير الدورية.
استقرار مالي تدريجي			إيرادات دورية منتظمة تغطي جزءاً كبيراً من التكاليف الثابتة.

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

3.3 التكنولوجيا:

- آلة معالجة زيوت المحولات الكهربائية (سعة: 5-10 طن/يوم) مزودة ب :
 - خزان تدفئة من الفولاذ المقاوم للصدأ مع سخانات كهربائية/حرارية.
 - يُستخدم نظام المضخة الفراغية لتوليد ضغط منخفض في حدود 5 إلى 10 Torr أثناء عمليات التفريغ.
 - مرشحات أولية وثانوية (الخام 50 ميكرومتر والناعم 10 ميكرومتر) ومواد التبييض نوعية.
 - خزان تبريد ثانوي لاستقبال الزيت بعد المعالجة.
 - لمراقبة الحرارة، الضغط، معدل التدفق، وإنذارات الطوارئ.
 - مولد ديزل احتياطي بقدرة لا تقل عن 12%.
 - شاحنة نقل معزولة حرارياً (سعة 2-3 طن) لمنع تغير خصائص الزيت أثناء التنقل.
 - أجهزة مختبرية ميدانية (جهاز اختبار الزيت المحمول، قياس جهد الانهيار الكهربائي والرطوبة والحموضة قبل المعالجة).
 - برنامج إلكتروني لإدارة قاعدة البيانات (عينات، نتائج المعالجة، جداول الصيانة).
 - نظم إنترنت عبر الأقمار الصناعية أو شبكات 4G/5G لضمان اتصال متواصل وتحديث التقارير في الوقت الحقيقي.

3.4 الموقع:

- المقر الرئيسي : ولاية ورقلة (بالقرب من الطريق الصحراوي حاسي مسعود-ورقلة) لتسهيل الوصول إلى محطات سونلغاز وسوناطراك
- الورشة الفرعية ونقطة التخزين: (ورقلة لخزن فلاتر ومواد التبييض وقطع غيار المولد).
- نقاط تجميع فرعية:
 - ورشة شراكة في اغواط (بنود شراكة مع ورشة صيانة محلية). < ورشة شراكة في غرداية.
 - ورشة شراكة في الوادي.
 - مخزن مؤقت في الوادي (إمداد سريع للولايات البعيدة مثل إليزي وتمنراست).
 - مكتب إداري صغير (2-3 مكاتب) في ورقلة يضم: مدير المشروع، المدير الفني، والشؤون الإدارية.

4.1 تقييم المخاطر:

4.1 تحديد المخاطر:

• مخاطر فنية:

- تعطل أو عطل مفاجئ في آلة المعالجة (السخانات أو مضخة التفريغ)
- عدم كفاءة في إزالة الرطوبة أو الشوائب بسبب سوء معايرة الأجهزة أو تدهور مواد التبييض. < فشل المولد الاحتياطي أثناء انقطاع التيار الكهربائي.
- تلف فلاتر الترشيح قبل موعد الاستبدال.

• مخاطر تشغيلية:

- صعوبة الوصول إلى مواقع نائية بسبب حالة الطرق الصحراوية أو الظروف الجوية القاسية (عواصف رملية).
- تأخر وصول الزيت إلى الوحدة خلال الفترة الحرجة (موسم الصيف العالي الحرارة). < نقص في الكوادر الفنية المؤهلة (مهندسون وتقنيون).

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

← تأخر إصدار تراخيص وتأمين العمالة في الولايات الحدودية (تمنراست وجانت).
• **مخاطر سوقية وتنافسية:**

- ← دخول شركة أجنبية بسعر أقل وعروض واسعة (حزم صيانة متكاملة).
- ← تغيير سياسة ترسية العقود من قبل الجهات الحكومية (تحول لشركة واحدة).
- ← تفضيل بعض العملاء إرسال الزيت إلى المختبرات بالشمالية لضمان الاعتماد على تقارير مركزية.

• **مخاطر مالية:**

- ← ارتفاع مفاجئ في أسعار (المواد الماصة أو الفلاتر) بسبب تقلبات سعر العملة. ← تأخر سداد العملاء لفواتير المعالجة (تدفق نقدي ضعيف).
- ← تكاليف صيانة المولد والفلاتر أعلى من المتوقع.

• **مخاطر قانونية وتنظيمية:**

- ← تغيير تشريعات الاستيراد للمواد الكيميائية (مواد الماصة، فلاتر) مما يزيد الرسوم أو يمنع الاستيراد مؤقتاً.
- ← تغيرات في قوانين البيئة الصادرة عن الولاية أو البلدية (متطلبات إضافية للفلاتر أو المعالجة). ← عقوبات محتملة في حال عدم الالتزام بمعايير النقل الآمن للزيوت الخطرة (ضروريات ISO)

4.2 تقييم الأثر:

• **تعطل الآلة أو المولد:**

- ← يبطئ عملية المعالجة وينتج عنه توقف عن العمل قد يصل إلى أيام (تكلفة فقدان العملاء). ← حاجة إلى صيانة عاجلة أو استبدال القطع يؤدي إلى مصاريف إضافية تستهلك السيولة.

• **سوء جودة المعالجة (رطوبة أو شوائب متبقية):**

- ← تراجع الثقة لدى العملاء عند عدم استيفاء (المعايير قياس جهد <55 kV، محتوى الرطوبة >5

ppm

- ← خسارة عقود مستقبلية وصعوبة استقطاب عملاء جدد.

• **صعوبات لوجستية في النواحي البعيدة:**

- ← زيادة زمن النقل وتكاليف الوقود (نسبة 20-30 % زيادة)
- ← تأخر التقارير يصل إلى 5-7 أيام بدلاً من 24-48 ساعة، ما يسبب عدم رضا العملاء.

• **نقص الكوادر المؤهلة:**

- ← تأخير في مواعيد المعالجة الشهرية أو الربع سنوية، ما يُضعف خدمات الصيانة الدورية. ← تدهور سمعة الشركة عند عدم تلبية الاحتياجات في الوقت المناسب.

• **تنافسية الأسعار:**

- ← الإيجار على خفض هامش الربح إلى أقل من 300 دولار/طن للتنافس. ← تراجع العائد الاستثماري وزيادة فترة الاسترداد لأكثر من 36 شهراً.

• **التقلبات المالية:**

- ← انخفاض السيولة يؤدي إلى صعوبات في شراء المواد الأساسية (التبييض (المواد الماصة)، فلاتر).
- ← تأخر السداد من العملاء يضغط على التدفق النقدي الفعال ويزيد من حاجة الاقتراض.

• **التغيرات التنظيمية:**

- ← فرض رسوم إضافية للتخلص من الشوائب المتبقية النفقات التشغيلية.
- ← تأخير أو منع استيراد مواد الماصة محددة يُعيق استمرار عمليات المعالجة.

4.3 إجراءات تخفيف المخاطر:

- **المخاطر الفنية والتشغيلية:**

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

- ◀ الاستثمار في آلة معالجة من مورد موثوق وذو علامة تجارية معروفة، وضمان صيانة دورية (كل 6 أشهر) للفلاتر والمولد و مضخة الفراغ.
- ◀ توظيف فريق فني مدرب (شهادات معتمدة في تشغيل معدات المعالجة) وإجراء تدريبات إعادة تأهيل نصف سنوية.
- ◀ إنشاء مخزون قطع غيار أساسية(فلاتر أولية وثانوية، مضخة ، سخانات إضافية يكفي 6-9 أشهر).
- ◀ تركيب نظام إنذار تلقائي مع رصد لحظي لدرجة الحرارة والضغط لإيقاف التشغيل عند أي خلل بسيط.
- ◀ وجود مولد ديزل احتياطي بحالة ممتازة وخطة صيانة شهرية له.
- ◀ اعتماد بروتوكولات واضحة للوصول إلى المناطق النائية (التنسيق المسبق مع الأمن المحلي وفرق الدعم).
- للمخاطر السوقية والتنافسية:بناء شراكات استراتيجية مع سونلغاز وسوناطراك منذ البداية لضمان عقود طويلة الأمد.
- تقديم حزم اشتراك صيانة سنوية بأسعار تنافسية مع خصم 10-15 % للحجوزات المسبقة.
- التركيز على جودة التقارير الفنية وسرعة التسليم (24-48 ساعة) كميزة تنافسية.
- التسويق الرقمي المستمر (موقع إلكتروني تفاعلي، حسابات رسمية على الشبكات الاجتماعية) وعرض قصص نجاح واقعية.
- متابعة مستمرة لتكاليف مواد التبييض والفلاتر والبحث عن موردين بديلين محليين أو إقليميين لتخفيض التكاليف.

● للمخاطر المالية:

- ◀ إعداد خطة مالية مفصلة تشمل توقعات التدفقات النقدية وتحديد حد أدنى للإيرادات الشهرية لتغطية النفقات التشغيلية .
- ◀ التفاوض على شروط سداد مرنة مع العملاء (30 % مقدماً، 70 % عند التسليم) لتقليل أوقات التحصيل.
- ◀ فتح خط ائتمان مصرفي لتغطية احتياجات الطوارئ القصيرة الأجل. ◀ مراقبة دورية للتكاليف التشغيلية وضبط الميزانية شهرياً.
- للمخاطر القانونية والتنظيمية:

- ◀ التنسيق مع مستشار قانوني للتأكد من الالتزام بقوانين البيئة واستيراد المواد الكيميائية. ◀ متابعة مستمرة للتشريعات الجديدة بشأن التخلص من النفايات الخطرة واشتراطات ISO 14001.

- ◀ ضمان حصول الشركة على جميع التراخيص الأمنية للتنقل في المناطق الحدودية (تمنرست، جانت)، وأخذ الموافقات من الجهات المحلية والولائية.

5الخلاصة والتوصيات:

يظهر تحليل الدراسة أن السوق الجزائري الجنوبي يفتقر حالياً إلى خدمات متخصصة وفعالة لمعالجة وتنقية زيوت المحولات الكهربائية محلياً، ويعتمد بشدة على إرسال الزيت إلى المختبرات المركزية في الشمال بتكاليف نقل عالية وفترات انتظار طويلة. وحجم الطلب السنوي يزداد باستمرار مع توسع البنية التحتية الكهربائية والمشاريع الصناعية في الجنوب. تكلفة معالجة الزيت محلياً (≈ 250-300 دولار للطن) مقارنةً بتكلفة استبدال الزيت الجديد (800-1,000 دولار/طن) تشكل ميزة تنافسية كبيرة. إضافة إلى الفوائد البيئية المتمثلة في تقليل كميات النفايات

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

الخطرة ومعالجة الزيت بدلاً من التخلص منه غير المستدام.

على الرغم من وجود تحديات تقنية ولوجستية، إلا أن الإجراءات المقترحة للتخفيف من المخاطر صيانة دورية، مخزون قطع غيار، اتفاقيات تفضيلية مع سونلغاز وسوناطراك، تأمين مصدر المواد الماصة محلي كقيلة يجعل المشروع عملاً مستداماً ومربحاً.

التوصيات الأساسية:

- (1) البدء فوراً بإجراءات تسجيل الشركة والحصول على التراخيص البيئية والأمنية (1-2 أشهر).
 - (2) تأمين التمويل اللازم لشراء آلة المعالجة والشاحنة والمولد (3-4 أشهر).
 - (3) تركيز جهود التوظيف والتدريب خلال الأشهر الأولى (مهندسين، فنيين، سائقي نقل) وإنشاء دليل تشغيل داخلي.
 - (4) إطلاق المرحلة التجريبية في ورقلة وتوقرت أولاً (شهور 4-8) ، ثم التوسع إلى غرداية والوادي خلال شهور 9-12.
 - (5) إبرام شراكات استراتيجية مع سونلغاز وفروعها في ولايات الجنوب فورياً، لتأمين عقود صيانة سنوية.
 - (6) تنفيذ حملة تسويقية رقمية وميدانية تبرز الفوائد المالية والبيئية، وتسلط الضوء على تقارير فنية دقيقة وسرعة التسليم.
 - (7) متابعة مستمرة للأسعار العالمية للمواد الكيماوية والفلاتر، والبحث عن موردين بديلين محليين لتخفيض التكاليف.
 - (8) توسيع نطاق الخدمة بعد السنة الأولى إلى ولايتي إليزي وتمنراست، استناداً إلى الطلب المحسوس وعقود الصيانة الموقعة.
- باختصار، إن الاستثمار في آلة معالجة زيوت المحولات الكهربائية جنوب الجزائر يحقق مزيجاً مثالياً من المنافع الاقتصادية والبيئية، ويُعزز موثوقية الشبكة الكهربائية، مع إمكانية استرداد رأس المال قبل نهاية السنة الثالثة وبناء قاعدة عملاء وفية على مدى طويل.

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

المحور الثالث: النموذج التجاري (BMC)

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات كهربائية HTB

النموذج التجاري (BMC)

1. شرائح العملاء (Customer Segments)

- شركة سونلغاز: الزبون الأكبر المحتمل، نظراً لامتلاكها آلاف المحولات التي تحتاج دورياً لمعالجة الزيت لتفادي تكاليف الاستبدال الباهظة.
- شركات الكهرباء الإقليمية: تمتلك برامج صيانة دورية للمحولات عبر مختلف الولايات.
- المصانع الثقيلة: مثل مصانع البتروكيماويات، التعدين، والإسمنت، والتي تعتمد على محولات كهربائية تشتغل بشكل مستمر.
- شركات المقاولات الكهربائية: تقوم بأعمال صيانة الشبكات وقد تعتمد علينا كمزود خارجي لخدمة تنقية الزيوت.
- محطات توليد الطاقة الخاصة: كمراكز البيانات، المستشفيات، المطارات، والفنادق الكبرى التي تستخدم محولات ومولدات تعتمد على زيت عالي الجودة.

2. عرض القيمة (Value Propositions)

- إطالة عمر المحولات عبر إزالة الرطوبة، الغازات المذابة، الأحماض والشوائب من الزيت.
- تقليل الأثر البيئي الناتج عن التخلص العشوائي من الزيوت الملوثة.
- خدمة معالجة زيت المحولات بجودة تقارب الزيت الجديد وبتكلفة تقل بنسبة تزيد عن 50%.
- إصدار تقارير جودة تقنية مفصلة تُستخدم كوثائق امتثال فني لدى الزبائن.
- مرونة في تقديم الخدمة: إما في موقع العميل أو ضمن الورشة المركزية.

3. قنوات التوزيع (Channels)

- البيع المباشر من خلال فريق مبيعات متخصص يتواصل مع مسؤولي الصيانة والمشتريات.
- التسويق الرقمي عبر LinkedIn، البريد الإلكتروني، والموقع الإلكتروني الرسمي.
- المشاركة في المعارض الوطنية الخاصة بالطاقة والصناعة.
- تقديم عروض تجريبية مجانية أو مخفضة لكسب ثقة العملاء الجدد.
- علاقات شراكة مع شركات الصيانة للعمل كوسطاء في تقديم الخدمة.

4. علاقات العملاء (Customer Relationship)

- عقود سنوية أو حسب عدد الدورات مع العملاء الرئيسيين مثل سونلغاز والمصانع.
- ضمان ما بعد الخدمة لفترة محددة يضمن جودة الزيت المُعالج.
- تقارير تحليل دورية تبين النتائج والمكاسب الفنية من الخدمة.
- مدير حساب مخصص للعملاء الرئيسيين لضمان استمرارية العلاقة وتحقيق رضاهم.
- زيارات دورية ميدانية لمتابعة حالة المحولات وتقديم توصيات للعقود المستقبلية.

5. مصادر الإيرادات (Revenue Streams)

- رسوم خدمة معالجة الزيت: بسعر يتراوح بين 300 إلى 400 دج/لتر حسب الكمية والمنطقة.
- بيع الزيت المعاد تأهيله لعملاء ثانويين أو لشركات لا توفر زيتاً.
- تحاليل الجودة المدفوعة قبل وبعد المعالجة.
- عقود خدمة (دورية أو شهرية أو سنوية) حسب حجم استهلاك العميل.
- خدمات نقل وتفريغ الزيت كخدمة إضافية تُسعر بشكل مستقل.

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

6. الموارد الرئيسية (Key Resources)

- ورشة معالجة متكاملة مزودة بنظام كهربائي ثلاثي الطور (380V) ، ومجهزة بكافة وسائل الأمان الصناعي المعتمدة
- آلة معالجة زيوت محولات HTB بطاقة إنتاجية تتراوح بين 1000 و2000 لتر في الساعة، مستوردة من مورد أوروبي أو آسيوي.
- فريق متخصص يضم مهندس تشغيل، فنيين، عمال تحميل، وفني مختبر.
- أسطول نقل مخصص (صهاريج، شاحنات، رافعات شوكية).
- شراكة مع مختبر كيميائي معتمد لإجراء التحاليل.
- برنامج رقمي بسيط لتتبع الأوامر وتحليل الأداء.

7. الأنشطة الرئيسية (Key Activities)

- استقبال الزيت المستعمل عبر صهاريج أو حاويات مخصصة.
- تحليل أولي للزيت لتحديد نوع المعالجة المطلوبة.
- إجراء تحليل بعد المعالجة وإصدار شهادة جودة.
- تتم معالجة الزيت لمحولات HTB باستخدام تقنيات متقدمة تشمل: التفريغ الحراري، إزالة الرطوبة، إزالة الغازات، الفلترة، والتبييض.
- تغليف الزيت المُعالج في حاويات نظيفة وإعادةه للعميل.
- صيانة دورية للألة ومراقبة مخزون المواد الاستهلاكية.
- التخلص الآمن من المخلفات الناتجة عن عمليات المعالجة.

8. الشركاء الرئيسيون (Key Partners)

- مصنع آلة (ألمانيا، الصين، تركيا): للتوريد، التدريب، والصيانة.
- مختبر محلي متخصص لتحليل جودة الزيت.
- شركات نقل متخصصة في الزيوت الصناعية.
- جهات تمويل محلية مثل ANDPME أو ANGEM أو البنوك الوطنية.
- موردو المواد التشغيلية: فلاتر، مواد تبييض (مواد الماصة) عبوات تعبئة.

9. هيكل التكاليف (Cost Structure)

- تكلفة شراء الآلة: بين 50,000 إلى 100,000 دولار حسب المواصفات.
- تجهيز الورشة: تشمل الكهرباء، التهوية، الأرضية، مساحة التخزين، وأمن صناعي.
- رواتب الفريق التقني والإداري.
- تكاليف تشغيلية: كهرباء، فلاتر، مواد تبييض، تحاليل.
- صيانة دورية وقطع غيار.
- نقل وتأمين الزيوت.
- ميزانية تسويق والمشاركة في المعارض

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

<p>(7) الشركاء الرئيسيون:</p> <p>- مصنع آلة : (ألمانيا، الصين، تركيا) - للتوريد، التدريب، الصيانة. - المختبر المحلي المتخصص : لتحليل جودة الزيت. - شركات نقل متخصصة : في الزيوت الصناعية. - جهات التمويل : الوطنية لتطوير المؤسسات الصغيرة والمتوسطة (ANDPME)، الوكالة الوطنية لتسيير القرض المصغر (ANGEM) ، البنوك الوطنية). - موردو المواد التشغيلية : فلاتر، مواد تبييض، عبوات تعبئة.</p>	<p>(5) الأنشطة الرئيسية:</p> <p>- استقبال الزيت المستعمل. - تحليل أولي للزيت. - معالجة الزيت : (تفريغ حراري، إزالة رطوبة/غازات، فلترة، تبييض). - تحليل ما بعد المعالجة وإصدار شهادة الجودة. - تغليف الزيت المعالج وإعادةه للعميل. - صيانة دورية للآلة ومراقبة المخزون. - التخلص الآمن من مخلفات المعالجة.</p>	<p>(2) القيمة المقترحة : -</p> <p>معالجة الزيت بجودة تضاهي الزيت الجديد وبتكلفة أقل من 50% -تقليل الأثر البيئي الناتج عن التخلص العشوائي من الزيوت الملوثة. - تقارير جودة تقنية مفصلة : وثائق امثال فني للزيائن. - مرونة الخدمة : في موقع العميل أو في الورشة المركزية</p>	<p>(4) علاقات العملاء</p> <p>- دعم ميداني وتقني مستمر. -إنشاء منصة رقمية أو رقم هاتف خاص للرد على استفسارات العملاء. - عروض تجريبية مجانية. -حملات ترويجية على خدماتنا. - خدمة ما بعد الفحص والتوصيات.</p>	<p>(1) شرائح العملاء :</p> <p>- شركة سونلغاز - شركات الكهرباء الإقليمية - المصانع الثقيلة (بتروكيماويات، تعدين، إسمنت) - شركات المقاولات الكهربائية - محطات توليد الطاقة الصغيرة (مستشفيات، مراكز بيانات، مطارات، فنادق)</p>
	<p>(6) الموارد الرئيسية :</p> <p>-آلة المعالجة: طاقة 1000-2000 لتر/ساعة -ورشة معالجة متكاملة: مجهزة</p>		<p>(3) القنوات :</p> <p>-زيارات ميدانية مباشرة للمؤسسات -موقع إلكتروني رسمي.</p>	

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

	<p>(كهرباء V380، أمان صناعي).</p> <p>- الفريق المتخصص : مهندس تشغيل، فنيين، عمال تحميل، فني مختبر.</p> <p>- أسطول نقل : صهاريج، شاحنات، رافعات شوكية.</p> <p>- شراكة مع مختبر كيميائي معتمد.</p> <p>- برنامج رقمي : لتنج الأوامر وتحليل الأداء.</p>		<p>- مشاركات في فعاليات تقنية وصناعية .</p> <p>-التسويق الالكتروني.</p> <p>-مواقع في صفحات التواصل الاجتماعي.</p>	
--	---	--	---	--

(8) مصادر الإيرادات:

- عقود صيانة دورية مع سونلغاز والمؤسسات.
- اشتراكات شهرية/سنوية للشركات حسب حجم استهلاك العميل.
- ورشات تكوين مهنية للفرق التقنية .
- بيع الزيت المعاد تأهيله :لعملاء ثانويين أو شركات لا توفر زيتها.
- تحاليل الجودة المدفوعة :قبل وبعد المعالجة.
- رسوم معالجة الزيت 300-400 :دج/لتر (حسب الكمية والمنطقة)
- خدمات نقل وتفريغ الزيت

(9) هيكل التكاليف:

- تكلفة شراء الآلة : 6,750,000- 13,500,000 دينار جزائري
- تجهيز الورشة : تهوية، أرضية، تخزين، أمن صناعي. - الرواتب : الفريق التقني والإداري.
- التكاليف التشغيلية : كهرباء، فلاتر، مواد تبييض، تحاليل. - صيانة وقطع غيار.
- تكاليف النقل والتأمين للزيوت.
- ميزانية التسويق والمشاركة في المعارض.

عنوان المشروع : آلة معالجة زيوت محولات الكهربائية HTB

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie

جامعة غرداية
كلية العلوم و التكنولوجيا

القسم : الآلية و الكهروميكانيك .

الشعبة : إلكتروميكانيك .

التخصص : 2 ماستر صيانة صناعية .

غرداية في : ... / 06 / 2025

شهادة ترخيص بالتصحيح و الإيداع :

أنا الأستاذ(ة) : شريف صالح .

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس / ماستر / دكتوراه) المضمونة بـ :

«Contribution à la maintenance prévisionnelle et corrective par le traitement d'huile des transformateur de puissance HTB»

من إنجاز الطلبة :

حسيني محمد الطاهر

التي نوقشت بتاريخ : 2025 / 06 / 24 .

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات و التصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة و قد تم التحقق من ذلك من طرفنا و قد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم :

رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك
عزاوي محمد



إمضاء المسؤول عن التصحيح :

الاستاذ شريف صالح