

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

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement
/...../...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master/Académique

Domaine : Sciences et technologies.
Filière : Electromécanique
Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

Optimisation des stratégies de maintenance prévisionnelle et corrective par l'analyse des huiles des transformateurs HTB

Présenté par :

MESSAILLI Abdallah
BELEKBIR Driss

Soutenue publiquement le 21/06/2026

Devant le jury composé de :

BOUDABIA Saad	MCB	Univ. Ghardaïa	Président(e)
MOUSBAH Charaf Abdelkarim	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
GUETIB Abdelkader	MCA	Univ. Ghardaïa	Examineur
MERZOUG Houcine	MCA	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2025/2026



مركز تطوير المقاولاتية

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الآلية والكهرو ميكانيك

مشروع مؤسسة اقتصادية كمذكرة تخرج وفق القرار
الوزاري 1275 المتمم والمعدل بموجب القرار 008
الموسوم بـ:

عنوان المشروع مخر تحاليل زيوت المحولات الكهربائية

ضمن متطلبات نيل شهادة ماستر – مؤسسة اقتصادية، تخصص صيانة صناعية

فريق الاشراف:

- مرزوف حسين

اعداد الطالب/الطالبة:

- مسايلى عبد الله

- بلكبير ادريس

نوقشت يوم: 21 كجوان 2026 امام اللجنة المكونة من

اللقب والاسم	الرتبة	الصفة
بوضبية سعد	أستاذ محاضر ب	رئيس اللجنة
مصباح شرف عبد الكريم	أستاذ محاضر ب	المناقش الأول
قطيب عبد القادر	أستاذ محاضر أ	المناقش الثاني
طويطي خالد	مهندس	شريك اقتصادي (شركة سونلغاز)

الموسم الجامعي: 2025 - 2026

Dédicaces

A la mémoire de mon père

A la mémoire de mon fils

A ma chère mère

A ma chère femme

A mes petits-enfants Zakaria et ma fleur Maram

A mon frère et mes sœurs

A toute ma famille

A tous ceux qui me sont chers

A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

Je dédie ce travail

Driss

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

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.

Abdallah

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah le Tout-Puissant** de nous avoir accordé la santé, la force, la patience et la volonté pour mener à bien ce travail de fin d'études.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, **M. MERZOUG Houcine** pour sa disponibilité, ses conseils précieux, son orientation et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses judicieux conseils ont grandement enrichi notre réflexion et guidé notre travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs de notre filière pour la qualité de l'enseignement dispensé.

Nous remercions également l'ensemble du personnel de laboratoire de SONALGAZ pour leur aide et leur contribution directe à notre projet.

Nous exprimons notre reconnaissance particulière à notre chimistes Mlle CHEHROURI Nesrine et Mlle ABDENNEBI Amel pour ses aides précieuses, ses conseils éclairés et son soutiens technique qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail, ses encouragements constants et ses présence réconfortante tout au long de nos études.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos frères de L'ORGANISATION OURHOUD pour leurs soutiens, leur esprit d'équipe et leur contribution à nos recherche et études. En particulier, nous tenons à remercier chaleureusement à M. TOUMI Khaled. HARIZI Mohammed, M. SOUHANE Yacine, M. BELLAHRACH Mohamed Ali et Mr BIDARI Abdallah ainsi que notre collègue ALOUANI Omar Mehdi, pour leur disponibilité, leurs conseils et leur bonne humeur au quotidien.

Un merci tout particulier à nos familles pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements et leur compréhension durant toutes ces années d'études.

Nous exprimons notre reconnaissance à nos amis qui nous ont soutenus moralement et dont la présence a été une source de motivation.

Enfin, nous tenons à souligner la collaboration fructueuse qui a uni les deux membres de ce binôme tout au long de ce travail. Leur complémentarité, leur implication et leur esprit d'équipe ont été déterminants pour la réussite de ce mémoire.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, nous présentons notre vive gratitude et notre respect

RESUME :

La maintenance des transformateurs de puissance à haute tension (HTB) est un enjeu critique pour la fiabilité et la rentabilité des réseaux électriques. L'analyse des huiles isolantes est imposée comme un outil indispensable pour optimiser les stratégies de maintenance, qu'elles soient prévisionnelles (prédictive) ou correctives.

L'analyse d'huile des transformateurs HTB transforme la maintenance d'une approche calendaire ou réactive vers une approche conditionnelle et piloté par les données (data-driven).

En fournissant une vision claire de l'état interne de l'équipement, elle permet d'optimiser les deux volets de la maintenance : elle rend la prévisionnelle plus précise et proactive, et la corrective plus rapide et efficace. Cette stratégie intelligente maximise la disponibilité des actifs, minimise les coûts de cycle de vie et renforce la sécurité du réseau électrique.

Mots clés : Analyse d'huile ; Chromatographie ; Maintenance prédictive ; Diagnostic transformateur ; Surveillance conditionnelle ; Fiabilité.

ملخص :

تُعد صيانة محولات القدرة ذات الجهد العالي قضية حاسمة لضمان موثوقية الشبكات الكهربائية وربحياتها. وقد أصبح تحليل الزيت العازل أداة لا غنى عنها لتحسين استراتيجيات الصيانة، سواء كانت استباقية تنبؤية أو تصحيحية.

يُحوّل تحليل زيت المحولات الصيانة من نهج زمنيّ أو تفاعلي إلى نهج قائم على الحالة والبيانات. ومن خلال توفير رؤية واضحة للحالة الداخلية للألة، يتيح هذا التحليل تحسين جانبي الصيانة معاً: إذ يجعل الصيانة التنبؤية أكثر دقة واستباقية، والصيانة التصحيحية أسرع وأكثر فعالية. وتُسهم هذه الاستراتيجية الذكية في زيادة استعدادية الماكينات، وتقليل تكاليف دورة حياتها، وتعزيز سلامة الشبكة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية : تحليل الزيت؛ كروماتوغرافيا؛ الصيانة التنبؤية؛ تشخيص المحولات؛ المراقبة الشرطية؛ موثوقية.

Abstract

The maintenance of high-voltage power transformers (HV) is a critical issue for the reliability and cost-effectiveness of electrical networks. Insulating oil analysis has become an indispensable tool for optimizing maintenance strategies, whether predictive or corrective. Transformer oil analysis shifts maintenance from a calendar-based or reactive approach to a condition-based, data-driven approach.

By providing a clear picture of the equipment's internal condition, it optimizes both aspects of maintenance: it makes predictive maintenance more accurate and proactive, and corrective maintenance faster and more effective. This intelligent strategy maximizes asset availability, minimizes life-cycle costs, and enhances the safety of the electrical grid.

Keywords : Oil analysis ; Chromatography ; Predictive maintenance ; Transformer diagnostics ; Condition monitoring ; Reliability.

TABLE DES MATIERES :

Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Liste des abréviations.....	VII
Introduction générale :	1
Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance THT/HT :	3
I.1. Introduction :	3
I.2. Réseau électrique :	3
I.2.1. Niveaux de puissance d'un réseau de distribution électrique :	4
I.2.2. Postes de transformation HTB / HTA :	5
I.3. Transformateur de puissance dans les réseaux électriques :	5
I.3.1. Définition d'un transformateur de puissance :	5
I.3.2. Fonction principale du transformateur :	6
I.3.3. Place du transformateur dans la chaîne énergétique :	6
I.4. Généralités sur les transformateurs de puissance :	6
I.4.1. Principe physique fondamental des transformateurs de puissance :	6
I.4.2. Transformateur de puissance triphasé :	7
I.5. Constitution et technologie des transformateurs de puissance :	11
I.5.1. Partie active (cœur et enroulements) :	12
I.5.2. Partie constructive (Cuve et Accessoires) :	15
I.6. Caractéristiques techniques et grandeurs nominales :	21
I.7. Conclusion :	24
Chapitre II : Maintenance industrielle et contrôle non destructif.....	26
II.1. Introduction :	26
II.2. Objectifs de la maintenance industrielle et le contrôle non destructif :	26
II.2.1. Objectif général :	26
II.2.2 Objectifs spécifiques :	26
II.3. Maintenance industrielle (suivant la norme : FN EN 13306) :	26
II.3.1. Définition de la maintenance :	26

II.3.2. Types de maintenance :	27
II.3.3. Activités principales de la maintenance :	28
II.3.4. Niveaux de la maintenance :	29
II.3.5. Planification et gestion de la maintenance :	29
II.4. Contrôle non destructif (CND) :	30
II.4.1. Définition :	30
II.4.2. Objectifs du CND :	30
II.4.3. Application des méthodes CND :	31
II.4.4. Principe de détection des défauts :	32
II.4.5. Méthodes de CND :	34
II.5. Conclusion :	40
Chapre III: Contrôle des transformateurs de puissance par l'analyse d'huile.....	42
III.1. Introduction :	42
III.2. Généralités sur les moyens d'isolation électrique des transformateurs :	42
III.2.1. Rôle de l'isolant dans les transformateurs :	42
III.2.2. Isolation solide :	42
III.2.3. Isolation gazeuse :	43
III.2.4. Isolation liquide :	43
III.3. Phénomènes de dégradation et vieillissement de l'isolant :	44
III.3.1. Contraintes subis :	44
III.3.2. Mécanisme de dégradation de l'isolant :	45
III.4. Techniques d'analyse de l'huile isolante :	47
III.4.1. Spécification de l'huile isolant neuve :	47
III.4.2. Échantillonnage d'huile :	47
III.4.3. Analyses Physico-chimiques d'huile isolante :	48
III.4.3.1. Control des propriétés électriques :	48
III.5. Méthodes d'interprétation et de diagnostic des analyses d'huile :	52
III.5.1. Analyse des gaz dissous dans l'huile isolant :	53
III.5.1.1. Principe de la détection et de la mesure des gaz dissous (chromatographie) : ..	53
III.5.2. Normes de référence :	54
III.5.3. Méthodes classiques d'interprétation des gaz dissous :	55
III.6. Optimisation des résultats d'analyse d'huile des transformateurs :	63
III.6.1. Étude expérimentale :	63
III.7. Conclusion :	67

Conclusion générale :	69
1. مقدمة عن المقاولاتية وأهمية المشاريع المصغرة	4
1.1. دوافع المقاول	4
2.1. مصادر فكرة المشروع	4
3.1. أهمية المشروع	4
2. وصف فكرة المشروع	5
1.2. تسمية المشروع	5
2.2. موقع المشروع	5
3.2. وصف الخدمة	5
4.2. مميزات خدماتنا عن الخدمات المشابهة:	5
5.2. مراحل الإنتاج + التجهيزات والعتاد اللازم	6
6.2. التوظيف	6
7.2. الإجابة على الأسئلة الخمسة	6
3. نموذج الأعمال BMC	7
4. تحليل SWOT	10
1.4. عوامل داخلية:	10
2.4. عوامل خارجية	10
1. تحديد السوق والزبائن	13
1.1. حجم السوق	13
2.1. خصائص الزبائن:	13
3.1. الأسئلة الخمسة لمن وماذا ومتى وأين ولماذا يشتري الزبون	13
2. دراسة المنافسين	14
1.2. المنافسون المباثرون، تحليل نقاط قوتهم وضعفهم	14
2.2. (P5) المزيج التسويقي	15
3.2. تقييم المخاطر:	16
1.2.3. تحديد المخاطر:	16
2.3.2. تقييم الأثر:	16
3.3.2. إجراءات تخفيف المخاطر:	16
1. الشكل القانوني المناسب للمشروع	18
19 . الخاتمة	
1 ملخص النتائج الرئيسية للدراسة.	19
2 الملاحظات النهائية والاستنتاج	19
3. تطلعات المشروع (اهدافك)	20

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : Le réseau de distribution d'électricité	3
Figure I.2 : Réseau électrique global	4
Figure I.3 : les principales composantes d'un transformateur type	5
Figure I.4 : Acheminement de l'énergie électrique	6
Figure I.5 : Schémas équivalent d'un transformateur	7
Figure I.6: trois transformateurs monophasés	7
Figure I.7 : un transformateur triphasé	8
Figure I.8 : transformateur a colonnes	8
Figure I.9 : Transformateur cuirassé	9
Figure I.10 : modèle simple type d'un transformateur triphasé	9
Figure I.11 : Symboles d'un transformateur triphasé	9
Figure I.12 : couplage étoile (Y)	10
Figure I.13 : couplage triangle Δ (ou D)	10
Figure I.14 : couplage étoile (y)	10
Figure I.15 : couplage triangle Δ (ou d)	10
Figure I.16 : Couplage Zigzag (z)	10
Figure I.17 : Différents couplages et indice horaire	11
Figure I.18 : Constitutions d'un transformateur triphasé	12
Figure I.19 : enroulement d'un transformateur	13
Figure I.20 : Disposition relative des enroulements (coupe d'un $\frac{1}{2}$ enroulement	13
Figure I.21 : Disposition classique des enroulements autour du noyau magnétique d'un transformateur triphasé	13
Figure I.22: Circuit magnétique	14
Figure I.23: CM a colon	14
Figure I.24: Régleur en charge (changeur de prise)	15
Figure I.25: cuve d'un transformateur	16
Figure I.26: Une des méthodes de refroidissement.	17
Figure I.27 : radiateur d'huile	18
Figure I.28 : Ventilateurs (refroidissement forcé par air)	18
Figure I.29 : Pompes (Refroidissement forcé par huile)	19
Figure I.30 : Schéma constitutif d'un relais Buchholz	19
Figure I.31: Le déshydrateur	20
Figure I.32: Composition d'un désydrateur	20
Figure I.33 : Indicateur de température	20
Figure I.34: Indicateurs de niveau d'huile	20
Figure I.35: Photos réel d'un parafoudre	21
Figure I.36 : Plaque signalétique d'un transformateur triphasé	23
Figure II.1 : Les branches de la maintenance	27
Figure II.4 : Les méthodes CND	33
Figure II.5 : Principe de détection d'un défaut	33
Figure II.6: Principe de ressuage	34
Figure II.7: Magnétoscopie	35
Figure II.8 : Schéma de principe de la méthode d'inspection par ultrasons	35
Figure II.9 : principe de contrôle par radiographie	36
Figure II.10 : Principe de la méthode CND par courant de Foucault	37
Figure II.11 : Exemple de défaut électrique de connexion (mauvais serrage)	37
Figure III.1 : Isolation cellulosique autour du noyau magnétique	43
Figure III.2 : Schéma de principe du HPLC	46

Figure III.3: Chromatographe PerkinElmer Altus HPLC	47
Figure III.4 : Test de la tension de claquage	49
Figure III.5 : Test de Facteur de dissipation ($\tan \delta$)	49
Figure III.7 : viscosimètre	50
Figure III.8 : Schéma de principe d'un chromatographe en phase gazeuse	53
Figure III.9 : Chromatographe en phase gazeuse	54
Figure III.10: Organigramme de la méthode de Dornenburg	57
Figure III.11 : Organigramme de la méthode de Rogers utilisant quatre ratios	59
Figure III.12 : Triangle 1 de Duval	61
Figure III.13 : Triangle 2 de Duval	61
Figure III.14 : Triangle 4 De Duval	62
Figure III.15 : Triangle 4 de Duval	62
Figure III.16 : Pentagone I de Duval	63
Figure III.17 : Pentagone II de Duval	63
Figure III.18 : Présentation des résultats sur le triangle 1 de Duval	65
Figure III.19 : Présentation des résultats sur le triangle 4 de Duval	66

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1: Caractéristiques technique d'un transformateur de 30 KVA	21
Tableau II.1: propriétés des huiles isolantes.....	38
Tableau III.1: Spécifications générales de l'huile isolants.	51
Tableau III.2 : Les principaux gaz et les défauts responsables	55
Tableau III.3 : Conditions de concentration des gaz dissous selon la norme IEEE	56
Tableau III.4 : Méthode de Dornenburg pour le diagnostic de défauts	57
Tableau III.5 : Gammes des ratios et leur code selon Rogers	58
Tableau III.6 : Diagnostic de défaut basé sur les codes de Rogers employant quatre ratios.....	58
Tableau III.7 : Table d'interprétation de DGA	60
Tableau III.8 : Types de défauts pour les deux versions du pentagone de Duval	63
Tableau III.9 : Résultats de DGA de l'échantillon prévenance HMN3 (Hassi Messaoude nord 3) du transformateur	64

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

THT :	Très haute tension
HT :	Haute tension
HTA :	Haute tension A
HTB :	Haute tension B
BT :	Basse tension
MT :	Moyenne tension
MW:	Mega Watt
KV:	Kilo Volt
U:	Tension alternative
FEM :	Force électromotrice
i :	Intensité de courant
ϕ :	Flux magnétique
CM :	Circuit magnétique
OLTC :	On load tap changer (régleur en charge)
CEI :	Commission électrotechnique internationale
OTI:	Oil temperature indicator (indicateur de température d'huile)
WTI:	Winding temperature indicator (indicateur de température des enroulements)
Kg :	Kilogramme
A :	Ampère
KVA :	Kilo Volt ampère
MVA :	Méga Volt ampère
S :	Puissance apparente [VA]
U_{eff} :	Tension alternative efficace en Volts [V]
I_{eff} :	Courant alternatif efficace en Ampères [A]
U_{cc} :	Tension de court-circuit [V]
P :	Puissance [Watt]
R :	Résistance [Ohm]
T :	Température [°C]
CND :	Control non destructif
FN :	French norme (la norme française.)
EN :	European norme (la norme européenne)
GMAO :	Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
MTBF :	Mean time between failures (temps moyen entre défaillance)
MTTR :	Mean time to repair (temps moyen de réparation)
Φ_R :	Flux réfléchi ;
Φ_T :	Flux transmis ;
CO ₂ :	Dioxyde de Carbon
SF ₆ :	Hexafluorure de soufre
CO :	Monoxyde de Carbon
H ₂ :	Hydrogène
ISO:	International organization for standardization. (Organisation nationale de normalisation)

FDD : Facteur de dissipation diélectrique
DBDS : Disulfure de bidenzyle
PCB : Polychlorobiphényles
TCE : Traitement en charge
TMDP : Température minimale de démarrage en puissance
DGA : Dissolved gas analysis (analyse des gaz dissous)
TAN: Total acid number (indice d'acidité totale)
IEEE: Institute of electrical and electronics engineers (institut des ingénieurs en électrique et électronique)
ASTM: American society for testing and materials (la société américaine d'essais et de matériaux)
DIF : Détecteur à ionisation de flamme

Introduction générale

Introduction générale :

L'intensification du développement industriel dans les régions du sud exige une infrastructure électrique robuste, capable de soutenir la charge opérationnelle des nouveaux pôles d'activité. Face aux carences constatées dans les services annexes et l'alimentation énergétique, notre étude s'oriente vers l'optimisation en se focalisant sur les maillons essentiels du réseau représenté par les transformateurs de puissances.

Véritables pivots du système électrique, les transformateurs THT/HT jouent un rôle stratégique qui compte tenu de leur sensibilité, impose une surveillance accrue.

Notre projet se concentre spécifiquement sur l'analyse physico-chimique de l'huile isolante et l'étude de la constitution interne, en nous appuyant sur des protocoles et des équipements de mesure de haute précision.

En effet, le suivi rigoureux de ce fluide diélectrique permet, conformément aux normes internationales, de diagnostiquer les défauts naissants, de prévenir les pannes majeures et de définir une stratégie de maintenance optimale.

Le Sud algérien est le moteur de l'économie nationale grâce à ses pôles pétroliers, miniers et industriels. Cependant, deux facteurs critiques menacent la continuité de service :

- Contraintes Climatiques : La période estivale impose un stress thermique extrême aux transformateurs, accélérant la dégradation des huiles isolantes.
- Enclavement Géographique : L'absence de laboratoires spécialisés à proximité oblige les entreprises à envoyer leurs échantillons vers le nord, entraînant des délais de réponse inacceptables (perte de temps, risques liés au transport des échantillons, coûts logistiques).

Notre startup s'implante au cœur de la région sud pour offrir un service de maintenance prévisionnelle et corrective de haute précision. Nous supprimons la distance pour offrir une réactivité immédiate, dont nous avons opté sur ces deux axes d'optimisation :

- Optimisation du Coût : Éviter le remplacement prématuré des transformateurs et réduire les coûts de logistique d'analyse.
- Optimisation de la Fiabilité : Fournir des résultats rapides et précis, permettant d'intervenir avant la panne majeure (maintenance prédictive).

Afin d'approfondir notre expertise technique, nous avons effectué un stage pratique au sein de **SONELGAZ SERVICE : Département approvisionnement et laboratoires**. Cette immersion nous a permis de maîtriser les protocoles d'analyse en vigueur et d'évaluer la progression de nos travaux de recherche dans la pratique industrielle

Chapitre I :

Généralités sur les Transformateurs de Puissance THT/HT

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance

THT/HT :

I.1. Introduction :

Le transformateur de puissance est l'élément noble dans les réseaux électriques. Cette machine statique à induction électromagnétique transfère l'électricité entre deux réseaux de tensions différentes tout en assurant leur isolation galvanique [Figure I.1].

En 1884, **Lucien Gaulard** et **John Dixon Gibbs** ont inventé le transformateur, ce qui a permis de résoudre le problème du transport de l'électricité sur de longues distances.

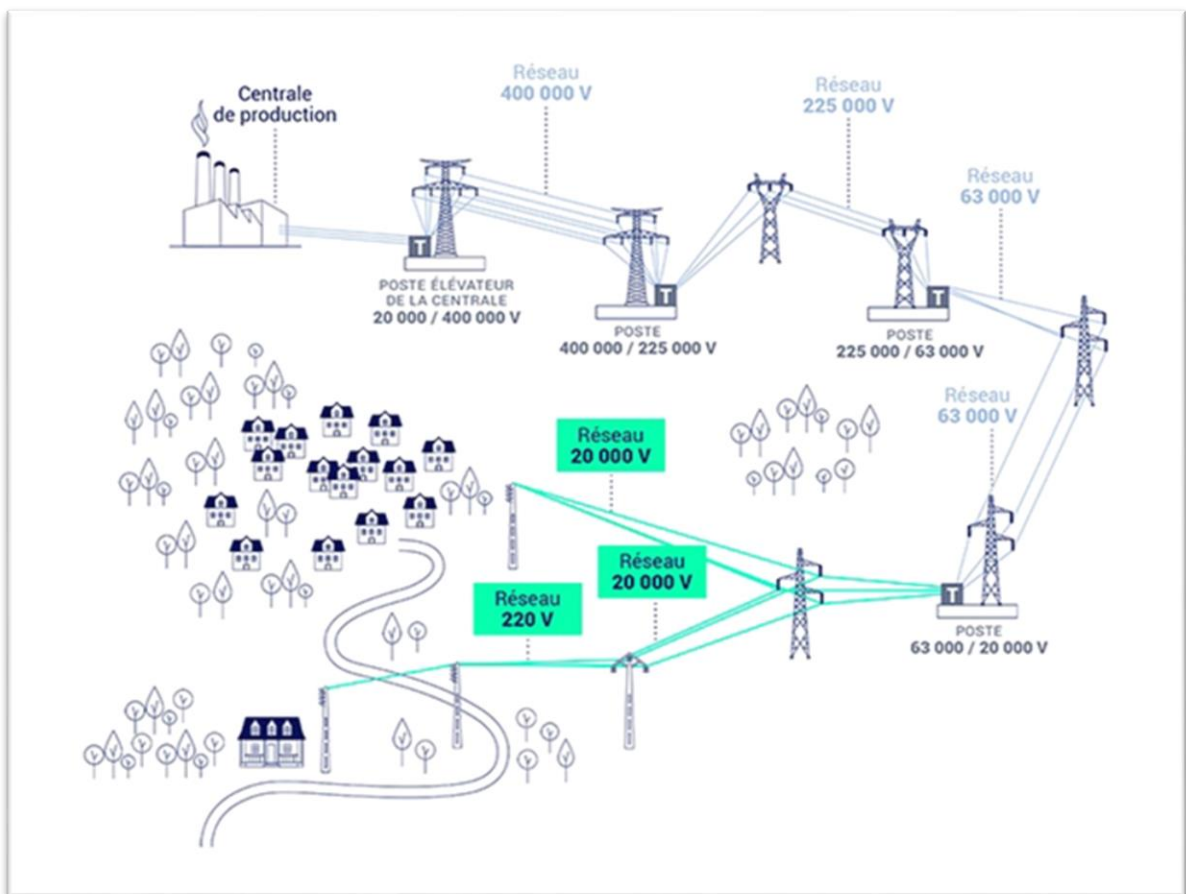


Figure I.1 : Le réseau de distribution d'électricité

I.2. Réseau électrique :

Le réseau électrique actuel, issu de développements anciens, repose sur de grandes unités de production qui injectent l'énergie dans le réseau haute tension. La distribution aux consommateurs se fait via des réseaux moyenne et basse tension, de manière passive et

unidirectionnelle (des centrales vers les usagers). Cette organisation engendre un monopole national ou régional sur le transport et la distribution [1]

I.2.1. Niveaux de puissance d'un réseau de distribution électrique :

Le réseau électrique comprend trois niveaux de tension : le transport et la répartition (reliés aux grands producteurs centralisés) et la distribution (qui alimente la majorité des consommateurs), formant une structure verticale. [Figure I.2]

Les grands groupes de production électrique (alternateurs synchrones entraînés par les turbines) produisent de 100 MW à 1650 MW et ils sont connectés au réseau de transport via un transformateur. Ce réseau à très haute tension (de 60 à 400 kV) est conçu pour minimiser les pertes d'énergie, il est maillé, bidirectionnel et fortement supervisé. Cette supervision permet un contrôle précis de la tension, de la fréquence et des flux de puissance.[2]

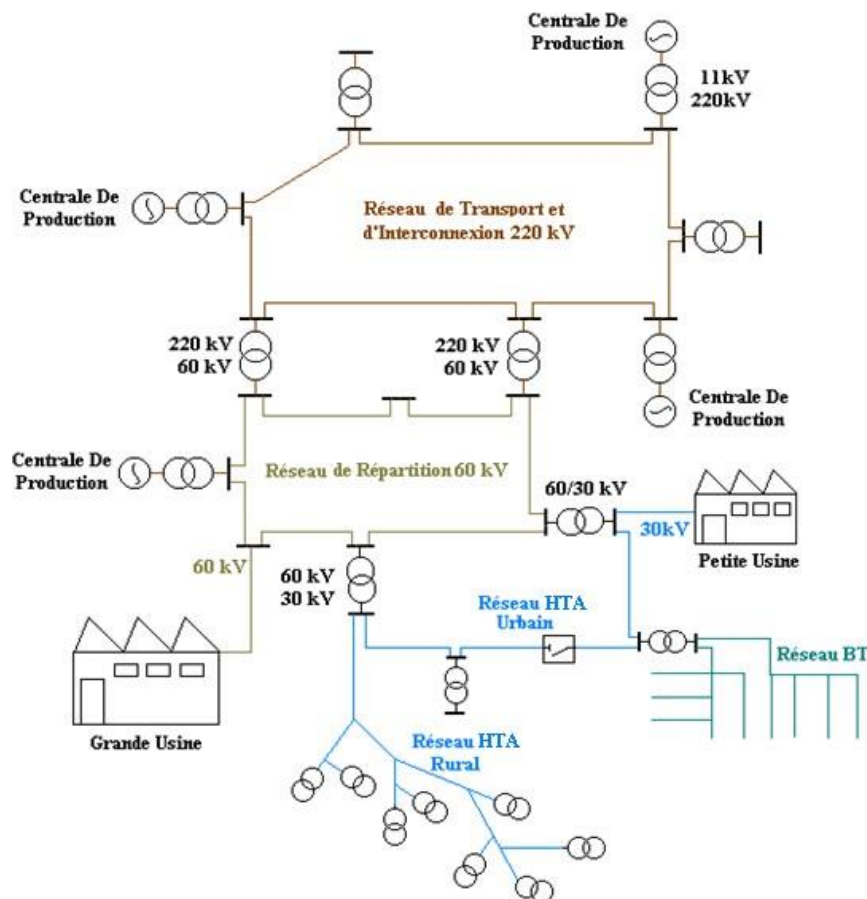


Figure I.2 : Réseau électrique global [2]

I.2.2. Postes de transformation HTB / HTA :

Les postes de transformation HTB/HTA relient le réseau de transport au réseau de distribution. Ils sont généralement alimentés par deux arrivées HTB pour assurer la continuité du service. Leur architecture comprend deux transformateurs associés à deux jeux de barres, alimentant les départs HTA. La protection contre les défauts est garantie par des disjoncteurs placés en tête de chaque départ.

I.3. Transformateur de puissance dans les réseaux électriques :

Un transformateur est un dispositif fixe sans pièces mobiles, fait d'enroulements isolés et couplés magnétiquement. Il transfère l'énergie électrique d'un circuit à un autre par induction électromagnétique, en convertissant la tension d'entrée en une tension de sortie alternative plus élevée ou plus faible, sans changer la fréquence.

Dans un transformateur, le primaire (connecté à la source) et le secondaire (à la charge) sont enroulés sur un noyau feuilleté qui guide le flux magnétique. La tension primaire crée un champ variable et le rapport de tension dépend du nombre de spires qui sera plus au secondaire pour élever la tension et moins pour l'abaisser. [Figure I.3]

Ils sont indispensables dans les réseaux électriques, dont les élévateurs seront choisis pour le transport de l'électricité à longue distance et les abaisseurs seront choisis pour la distribution et les alimentations sécurisées.

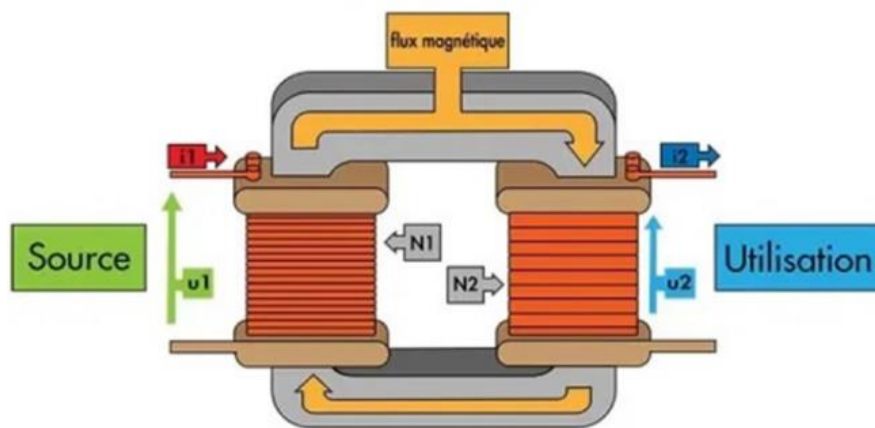


Figure I.3 : les principales composantes d'un transformateur type

I.3.1. Définition d'un transformateur de puissance :

Un appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique [3].

I.3.2. Fonction principale du transformateur :

La fonction principale d'un transformateur est de modifier les niveaux de tension et d'intensité d'un courant alternatif, par induction électromagnétique, sans en changer la fréquence. Il permet d'adapter la tension pour le transport (élévation) ou la consommation (abaissement), assurant ainsi l'efficacité énergétique et la sécurité.

Il y a trois types des transformateurs :

- ✓ **Transformateur élévateur de tension**
- ✓ **Transformateurs abaisseurs**
- ✓ **Transformateurs de distribution [4]**

I.3.3. Place du transformateur dans la chaîne énergétique :

- **Production** : L'électricité des centrales classiques (nucléaire, thermique, hydraulique) est élevée par transformateur pour rejoindre le réseau de transport ; les énergies décentralisées (éolien, solaire) s'injectent directement sur le réseau de distribution.
- **Transport** : Ce réseau acheminer l'énergie des centrales vers la distribution, via des auto transformateurs (400-220 kV) et transformateurs classiques pour tensions inférieures.
- **Distribution** : Réseau de proximité reliant le transport aux consommateurs, avec tensions réduites adaptées par de nombreux transformateurs aux besoins des usagers [Figure I.4][5]

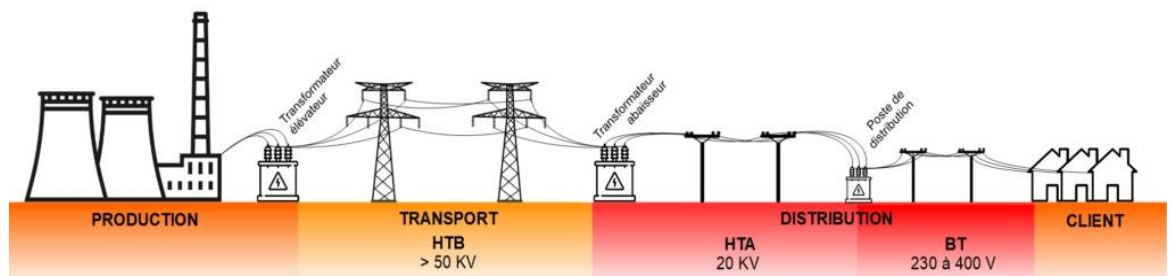


Figure I.4 : Acheminement de l'énergie électrique

I.4. Généralités sur les transformateurs de puissance :

I.4.1. Principe physique fondamental des transformateurs de puissance :

Le transformateur modifie la tension et l'intensité d'un courant alternatif sans changer sa fréquence, via un champ magnétique entre circuits primaire et secondaire.

Le primaire, alimenté en tension alternative U_1 , crée un flux magnétique variable canalisé par le noyau fermé ; ce flux induit une FEM et une tension U_2 au secondaire.

À vide (secondaire ouvert), le primaire agit comme une inductance limitant le courant. En charge (récepteur connecté), le courant secondaire génère un champ opposé, augmentant le courant primaire pour équilibrer quasi parfaitement les puissances entrée/sortie. [Figure I.5].

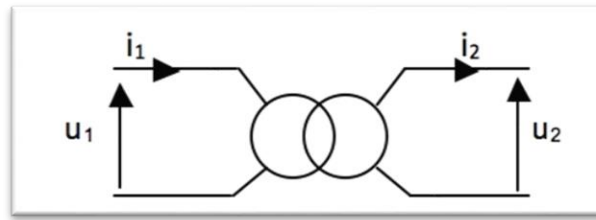


Figure I.5 : Schémas équivalent d'un transformateur [6]

I.4.2. Transformateur de puissance triphasé :

La production et le transport d'énergie électrique s'effectuent généralement en triphasé. Le transport en haute tension est plus économique, nécessitant des transformateurs élévateurs en issue des centrales et abaisseurs près des centres de consommation. Pour modifier la tension d'un système triphasé, nous distinguons plusieurs options [7]:

- Soit trois transformateurs monophasés identiques [Figure I.6]
- Soit un seul transformateur triphasé (la solution la plus économique). [Figure I.7]

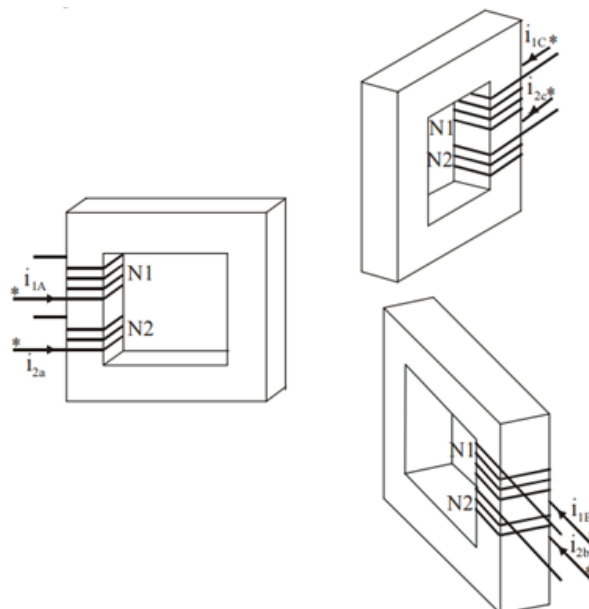


Figure I.6: trois transformateurs monophasés [8]

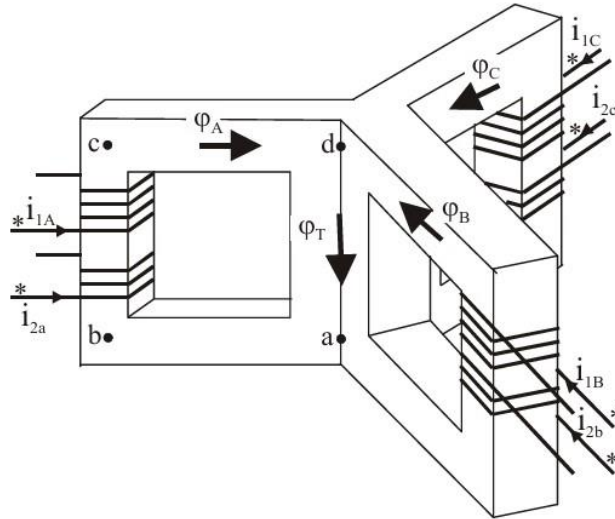


Figure I.7 : un transformateur triphasé [8]

I.4.2.1. Types des transformateurs triphasés :

Le choix d'un transformateur dépend des contraintes électriques, mécaniques, thermiques, d'encombrement et économiques.

a) Transformateur à colonnes [Figure I.8] : Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique [9]

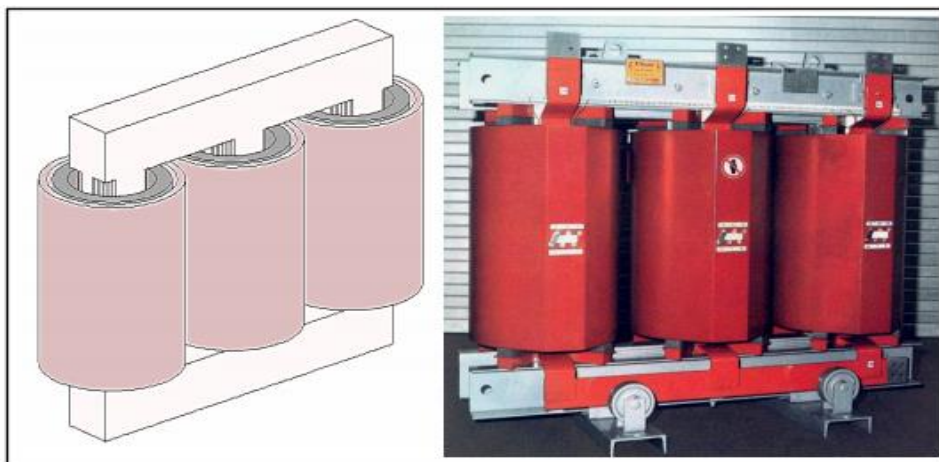


Figure I.8 : transformateur a colonnes [9]

b) Transformateur cuirassé [Figure I.9] : Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat [9]

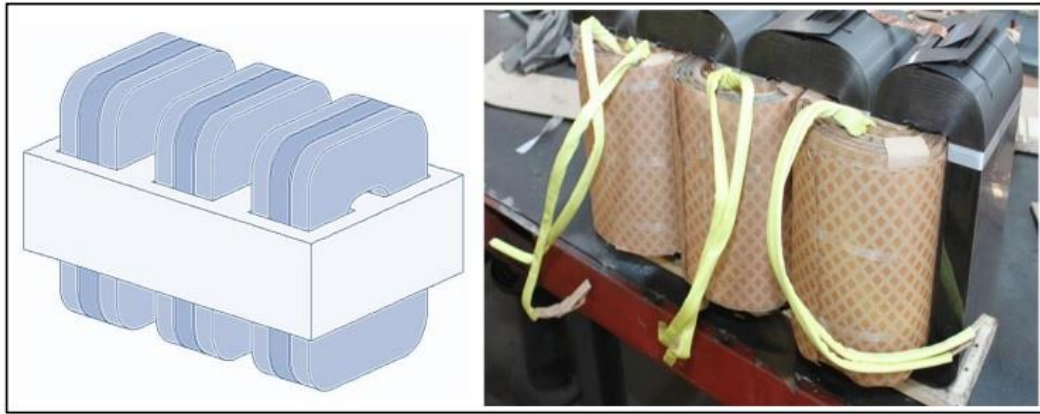


Figure I.9 : Transformateur cuirassé [9]

I.4.2.2. Conception d'un transformateur triphasé :

Le circuit magnétique du transformateur est réalisé à plat pour faciliter sa conception, avec des réluctances différentes pour les trois colonnes. Chaque colonne porte deux enroulements : bornes HT repérées par A, B, C et BT par a, b, c. Les tensions homologues sont celles portant les mêmes lettres : (U_A, U_a) , (U_B, U_b) et (U_C, U_c) [Figure I.10]. [7]

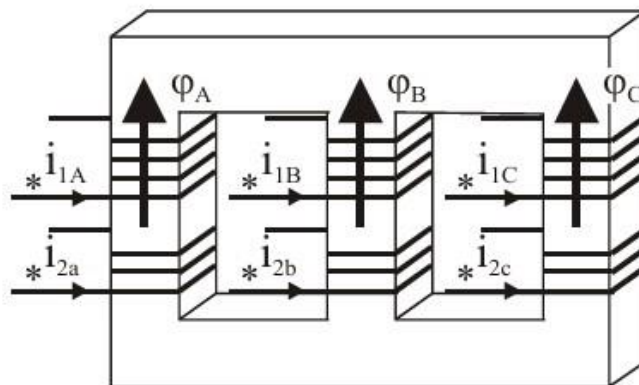


Figure I.10 : modèle simple type d'un transformateur triphasé [8]

Le symbole d'un transformateur triphasé est indiqué sur la figure suivante [Figure I.11] :



Figure I.11 : Symboles d'un transformateur triphasé [7]

I.4.2.3. Couplage d'un transformateur triphasé :

Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) [Figure I.12] soit en triangle (D) [Figure I.13]

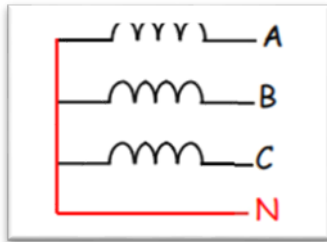


Figure I.12 : couplage étoile (Y)

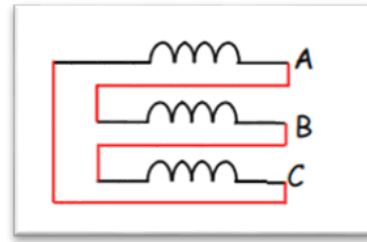


Figure I.13 : couplage triangle Δ (ou D)

Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile (y) [Figure I.14], triangle (d) [Figure I.15] et zigzag (z) [Figure I.16]

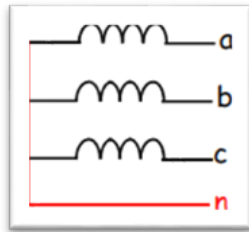


Figure I.14 : couplage étoile (y)

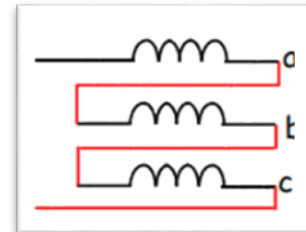


Figure I.15 : couplage triangle Δ (ou d)

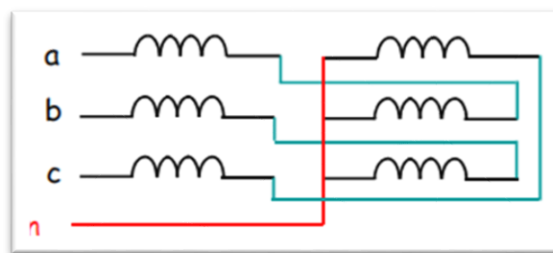


Figure I.16 : Couplage Zigzag (z)

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- Yy : étoile –étoile.
- Yd ($Y\Delta$) : étoile-triangle.
- Yz : étoile-zigzag.
- Dy (Δy) : triangle- étoile
- Dd ($\Delta\Delta$) : triangle –triangle
- Dz (Δz) : triangle-zigzag.

I.4.2.4. Choix du couplage :

✚ Le couplage en étoile au primaire et au secondaire (**Yy**) est utilisé surtout pour les transformateurs de **très haute tension**, car il permet de réduire la tension aux bornes des enroulements.

✚ Le couplage en étoile au primaire et en triangle au secondaire (**Yd**) relie les générateurs des centrales et les machines industrielles. Il réduit le courant dans les bobines, idéal pour les applications à forts courants.

✚ Dans les réseaux de distribution électrique, un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (**Yz**) est courant, car le couplage zigzag permet de réduire le déséquilibre de tension entre phases.[7]

La figure [I.17] indique les différents couplages et indice horaires des transformateurs :

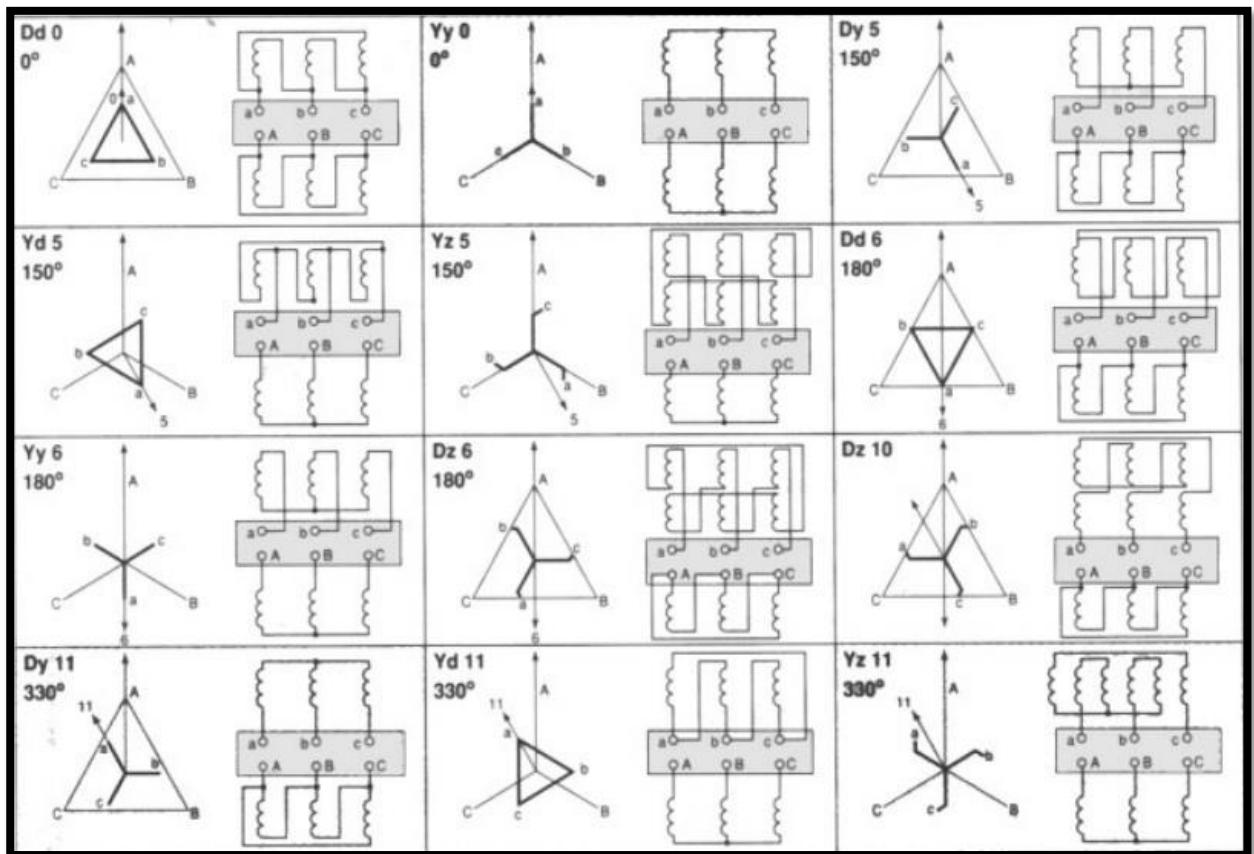


Figure I.17 : Différents couplages et indice horaire

I.5. Constitution et technologie des transformateurs de puissance :

Le transformateur est constitué de deux parties essentielles partie active et une autre constructive comme le montre la figure suivante [Figure I.18] [10] :

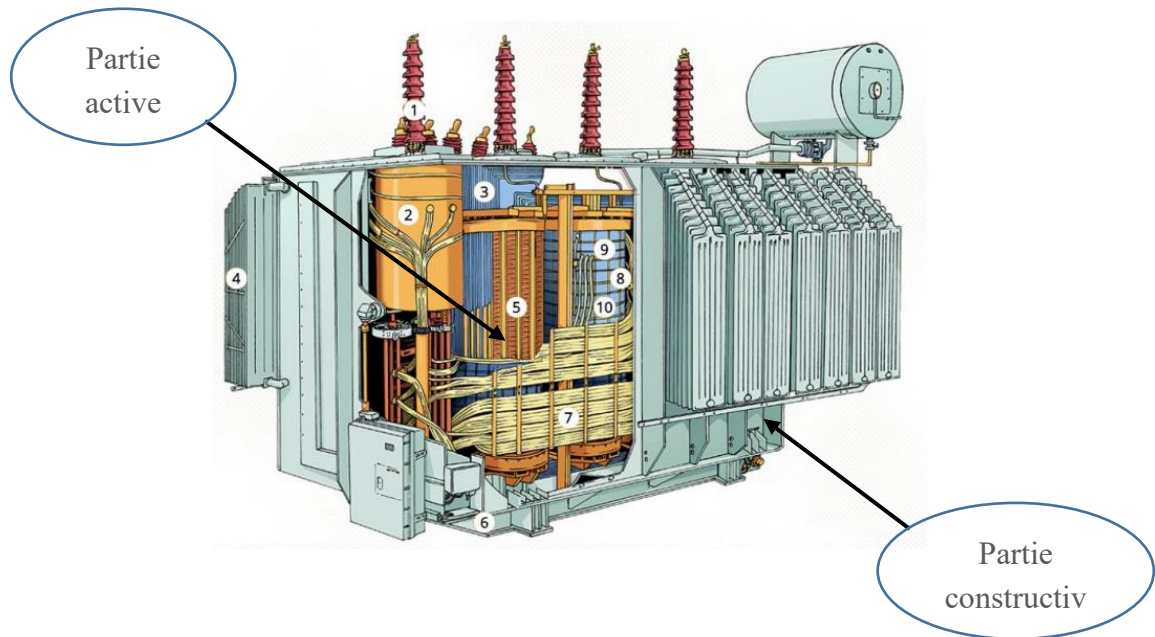


Figure I.18 : Constitutions d'un transformateur triphasé [10]

- | | |
|--|-----------------------------------|
| (1) Traversées et borne en porcelaine | (7) Connexions des enroulements |
| (2) Changeur de prises | (8) Constitution des enroulements |
| (3) Circuit magnétique (CM) | (9) Géométrie des enroulements |
| (4) Réfrigérants et protections | (10) Isolation entre spires |
| (5) Isolation entre enroulements et par rapport à la masse | (11) réservoir d'expansion |
| (6) Masse / Cuve | |

I.5.1. Partie active (cœur et enroulements) :

La partie active d'un transformateur est l'ensemble constitué par le **circuit magnétique (noyau)** et les **enroulements (bobinages) primaire et secondaire**. C'est le cœur du transformateur qui assure la conversion d'énergie par induction électromagnétique, généralement immergée dans de **l'huile** ou isolée dans l'air, séparée de la cuve et des accessoires externes [Figure I.18] [10].

I.5.1.1. Enroulements (bobinages) :

Sur la Figure [Figure I.19] on peut observer un enroulement seul, avec plusieurs spires qui seront connectées par la suite aux connexions finales du transformateur [4].

Chaque phase d'un transformateur comporte un enroulement par niveau de tension (BT, HT, parfois MT). Ces enroulements sont imbriqués, avec le BT à l'intérieur et les tensions

supérieures progressivement vers l'extérieur, le tout étant installé sur les noyaux du circuit magnétique (CM) [Figure I.20] [4].



Figure I.19 : enroulement d'un transformateur [4]

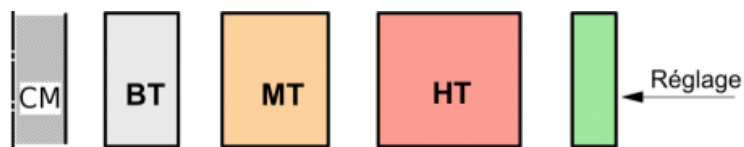


Figure I.20 : Disposition relative des enroulements (coupe d'un $\frac{1}{2}$ enroulement [4]

Les enroulements sont superposés cylindriquement, séparés par un isolant, pour optimiser le couplage magnétique et le refroidissement [Figure I.21]. [10]

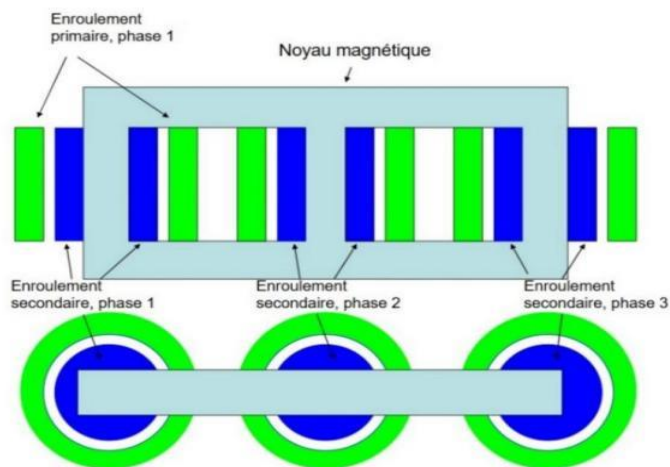


Figure I.21 : Disposition classique des enroulements autour du noyau magnétique d'un transformateur triphasé [10]

Deux grandes familles technologiques d'enroulements existent :

- Transformateur à Enroulement sur Colonne (Type Colonne) [Figure I.8]
- Transformateur à Enroulement cuirassée triphasée [Figure I.9]

I.5.1.2. Circuit magnétique (noyau) :

Les circuits magnétiques des transformateurs [Figure I.22.23] sont faits de tôles de fer laminées à froid à cristaux orientés (épaisseur 0,28-0,35 mm), isolées par Carlite pour un flux magnétique optimal.

Dans un modèle triphasé classique, ils comprennent trois noyaux verticaux (jambes) entourés chacun d'une phase complète (enroulements BT, HT et souvent de réglage), reliés par des culasses supérieure et inférieure formant un chemin fermé à faible réluctance, sans entrefer.

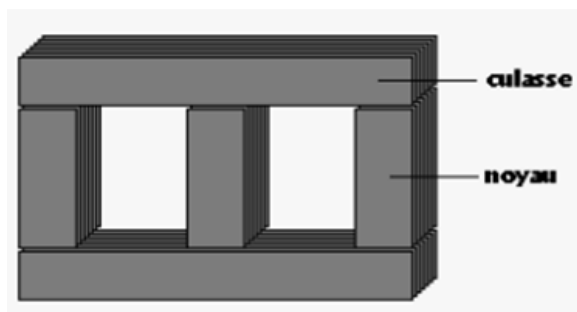


Figure I.22: Circuit magnétique

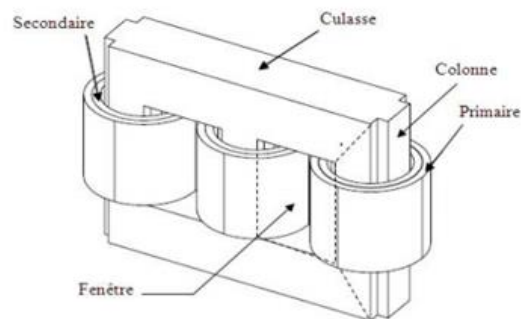


Figure I.23: CM a colon

I.5.1.3. Prise de réglage OLTC (On-Load Tap-Changer) :

Les transformateurs de puissance utilisent des prises de réglage sur l'enroulement haute tension pour ajuster le nombre de spires actives et réguler la tension de sortie, comme un transformateur 225 kV offrant une plage de $\pm 15\%$ répartie sur 35 positions.

Sur les transformateurs de forte puissance, ce régleur (OLTC) [Figure I.24] est composé de deux parties mécaniques distinctes travaillant ensemble[4] :

1. Un commutateur électromécanique (jaune) [Figure I.24 (1)], situé dans un volume d'huile isolante, qui bascule rapidement (en quelques dizaines de ms) d'une prise à une autre en créant un court-circuit momentané entre elles.

2. Un sélecteur de prises mécanique (rouge) [Figure I.24 (2)], qui se déplace lentement sur l'enroulement de réglage pour sélectionner les connexions souhaitées, lesquelles sont reliées au sélecteur et à une extrémité de l'enroulement principal [4]

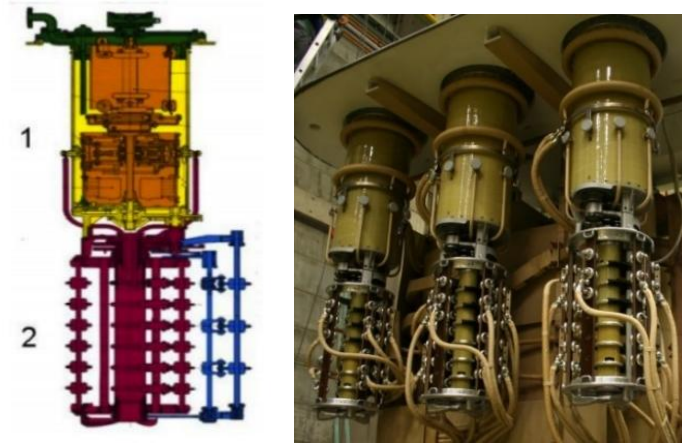


Figure I.24: Régleur en charge (changeur de prise) [4]

I.5.2. Partie constructive (Cuve et Accessoires) :

La partie constructive d'un transformateur regroupe les composants qui contiennent, protègent, refroidissent et soutiennent la partie active (circuit magnétique et enroulements), assurant sa longévité et sa sécurité [Figure I.18].

I.5.2.1. Cuve (ou cloche) : [Figure I.18 (6)] [Figure I.25] La cuve d'un transformateur immergé est une enceinte métallique étanche (en acier) contenant le cœur, les enroulements et l'huile isolante. Elle protège les composants internes, assure l'isolation diélectrique, dissipe la chaleur et résiste aux contraintes mécaniques [11]



Figure I.25: cuve d'un transformateur

- **Fonction :** Contenir l'huile isolante, protéger la partie active contre l'humidité, la poussière et les chocs, et faciliter le refroidissement.
- **Structure :** Fabriquée en tôle d'acier robuste, elle est conçue pour résister à la pression interne et au vide (lors du remplissage ou traitement d'huile).
- **Refroidissement :** La cuve peut être munie de radiateurs, de tubes de refroidissement ou d'ailettes pour augmenter la surface d'échange thermique avec l'air ambiant.
- **Couvercle :** Le dessus de la cuve permet de fixer les traversées, le conservateur et d'autres accessoires.

I.5.2.2. Système de refroidissement : Les méthodes de refroidissement des transformateurs sont normalisées par la CEI (CEI 60076-2)[11]. Elles utilisent un code à quatre lettres pour les transformateurs immergés dans l'huile et un code à deux lettres pour les transformateurs secs, précisant les fluides de refroidissement (interne/externe) et leur type de circulation (naturelle ou forcée) ; Le codes à quatre (4) lettres est comme suit :

1. **Première lettre :** désigne le fluide de refroidissement interne :

O : pour l'huile minérale (99 % des cas),

K : pour les liquides isolants ayant un point de feu $> 300^{\circ}\text{C}$,

L : pour les liquides à point de feu non mesurable.

2. **Seconde lettre :** désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement interne :

N : pour naturel,

F : pour forcer (présence d'une pompe, mais l'huile circule librement),

D : pour forcer et dirigé (pompe et l'huile est forcée et dirigée à travers les enroulements).

3. **Troisième lettre :** indique le fluide de refroidissement externe :

A : pour air,

W : pour eau.

4. **Quatrième lettre :** désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement externe :

N pour naturel,

F pour forcer (ventilateurs).

Exemple : ONAN (Oil Natural Air Natural) [Figure I.26] : circulations naturelles de l'huile dans le transformateur et de l'air sur ses surfaces extérieures [11].

Oil Natural Air Natural (ONAN)

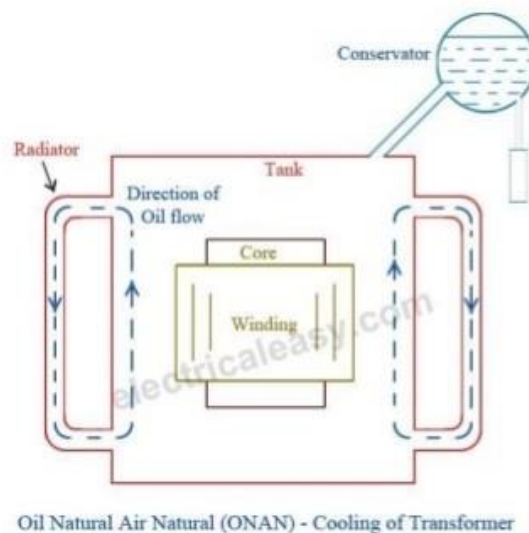


Figure I.26: Une des méthodes de refroidissement.

- **Fluides diélectriques :** Les fluides diélectriques assurent l'isolation électrique et le refroidissement des transformateurs triphasés immergés. On distingue les huiles minérales (les plus courantes, bon rapport coût-efficacité), les esters naturels (biodégradables, risque d'incendie réduit), les esters synthétiques (stabilité thermique et chimique) et les silicones (haute résistance au feu mais coûteux) [12]

- **Dispositifs de refroidissement :** radiateurs, ventilateurs, pompes :

Les radiateurs, ventilateurs et pompes sont des éléments cruciaux du **système de refroidissement d'un transformateur immergé dans l'huile**, essentiels pour évacuer la chaleur produite par les pertes dans les enroulements et le noyau magnétique. Ces dispositifs garantissent que le transformateur fonctionne dans des limites de température sûres, prolongeant ainsi sa durée de vie.

✚ **Radiateur : [Figure I.27]** : Les radiateurs augmentent la surface d'échange thermique du transformateur. L'huile chaude monte dans les radiateurs, s'y refroidit au contact de l'air, puis redescend.



Figure I.27 : radiateur d'huile

✚ **Ventilateurs (refroidissement forcé par air) [Figure I.28]** : Les ventilateurs assurent un refroidissement forcé par air en faisant circuler l'air extérieur dans les ailettes des radiateurs.



Figure I.28 : Ventilateurs (refroidissement forcé par air)

✚ **Pompes (refroidissement forcé par huile) [Figure I.29]** : Dans les grands transformateurs, les pompes assurent une circulation forcée de l'huile entre les enroulements et les radiateurs, accélérant ainsi la dissipation thermique.



Figure I.29 : Pompes (Refroidissement forcé par huile)

I.5.2.3. Accessoires critiques :

Des organes de sécurité vitaux pour un transformateur de puissance agissent comme les "yeux et les oreilles" de l'équipement, permettant d'éviter des pannes catastrophiques qui coûteraient énormément d'argent. Parmi les quelles :

- ✚ **Relais Buchholz** : Le relais Buchholz est installé sur tous les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, entre le haut de la cuve et le conservateur [Figure I.30]. Un accident interne majeur provoque :
- Un dégagement de gaz qui abaisse un flotteur et déclenche une alarme (1er stade).
 - Un mouvement d'huile important en haut de la cuve, qui bascule un flotteur et coupe le courant du transformateur (2e stade) [4]

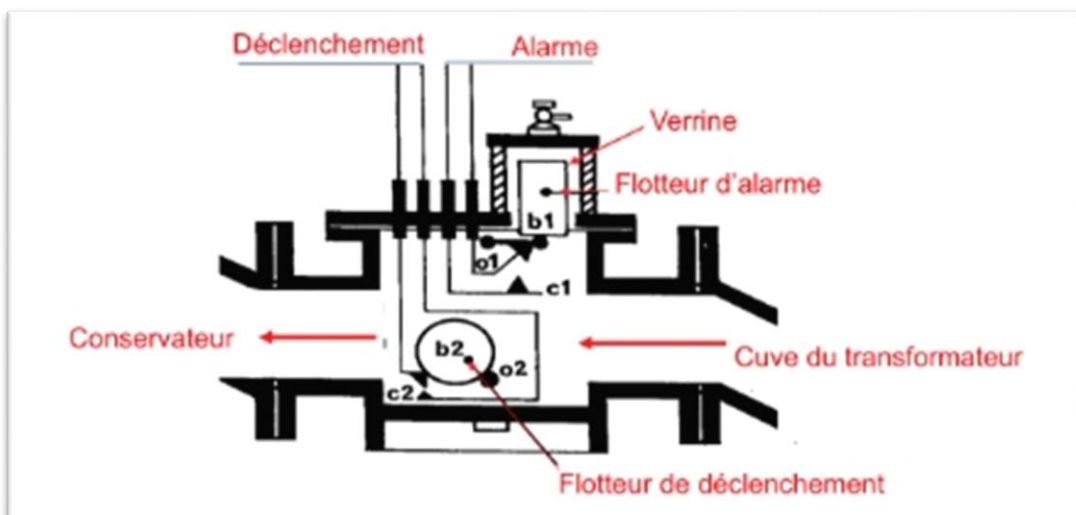


Figure I.30 : Schéma constitutif d'un relais Buchholz

✚ **Déshydrateur** : appelé aussi reniflard (*transformer breather*) [Figure I.31] [Figure I.32] est un dispositif de sécurité monté sur le conservateur. Il empêche l'humidité et les impuretés de pénétrer dans l'huile isolante lors des cycles de dilatation et contraction de l'huile.



Figure I.31: Le déshydrateur

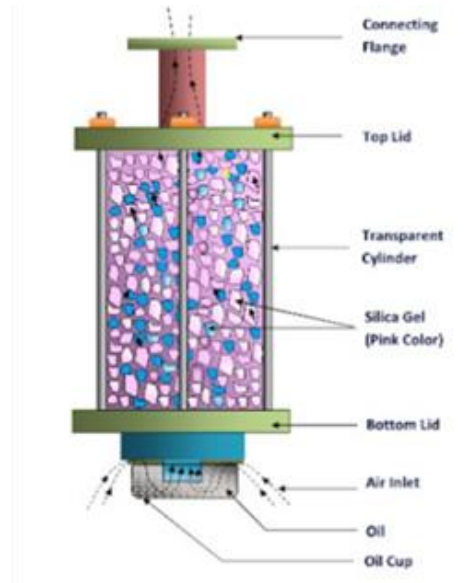


Figure I.32: Composition d'un déshydrateur [13]

✚ **Indicateurs de température** [Figure I.33] : Les indicateurs OTI (température d'huile) et WTI (température des enroulements) surveillent les points chauds d'un transformateur.

✚ **Indicateurs de niveau d'huile** [Figure I.34] : Installée sur le conservateur (réservoir d'expansion), il indique la quantité d'huile diélectrique à l'intérieur du transformateur. Il est crucial de vérifier que le niveau n'est pas trop bas, ce qui pourrait entraîner un défaut d'isolement.



Figure I.33 : Indicateur de température



Figure I.34: Indicateurs de niveau d'huile

Parafoudres : pour transformateur triphasé protègent l'équipement contre les surtensions transitoires (foudre, manœuvres) en dérivant l'énergie vers la terre. [Figure I.35]



Figure I.35: Photos réel d'un parafoudre

I.6. Caractéristiques techniques et grandeurs nominales :

La plaque signalétique d'un transformateur triphasé fournit des informations cruciales pour son installation et son exploitation sécurisée.

Par exemple le tableau ci-après mentionne les données de la plaque signalétique d'un transformateur triphasé. [Tableau I.1], [Figure I.36] :

Tableau I.1: Caractéristiques technique d'un transformateur de 30 KVA

Item	Valeur	Item	Valeur
Type	30.000/30	Intensité nominale	3 149,18 A
Numéro	37473	Tension de court-circuit en % pour 30 000 / 5 500 V	9.52
Date fabrication :	28.01.21	Echauffement cuivre	50°C
Puissance nominale	30 000 kVA	Diélectrique huile	REPSOL
Refroidissement	ONAN	Litre d'huile à extraire du transformateur pour :	
Installation	Extérieure	Inspection	800
Groupe	Dyn 11	Enlever une borne H.T.	800
Normes	CEI 76	Enlever un radiateur	159
Fréquence	50 Hz	Vidange complet	9749
Service	Continu	Masse en Kg	
Primaire		D'une borne H.T.	10

Connexion	Triangle (implicite pour Dyn11)	Un radiateur	575
Tensions nominales entre phases (1U-1V-1W) selon prise	31 500 V → 549,86 A 30 750 V → 563,27 A 30 000 V → 577,35 A 29 250 V → 592,15 A 28 500 V → 607,74 A	De la partie active	27160
Secondaire :		De la cuve et accessoires	14435
Tension nominale entre phases (2U-2V-2W) :	5 500 V	De l'huile	8773
		La masse générales	50953

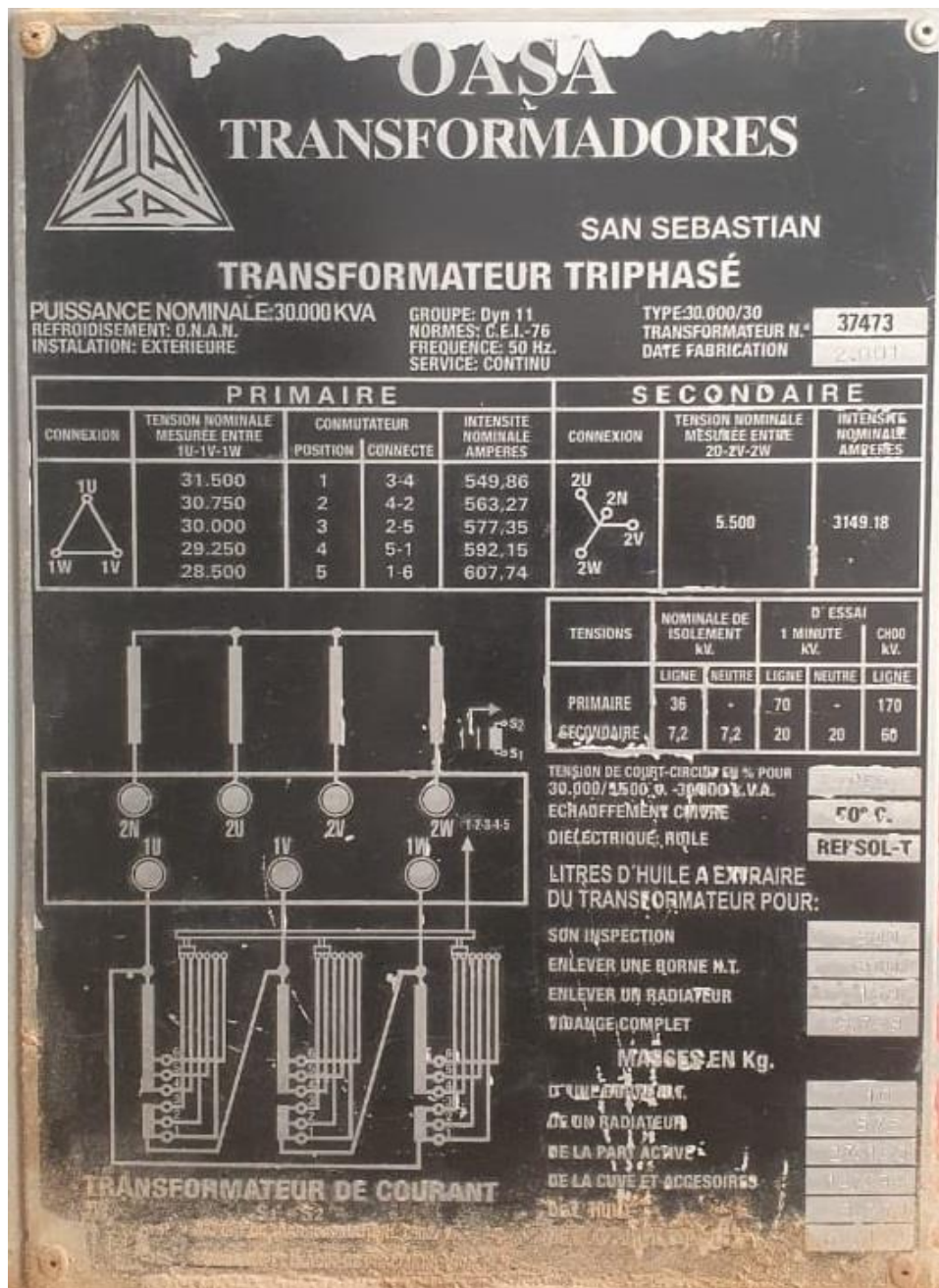


Figure I.36 : Plaque signalétique d'un transformateur triphasé

I.7. Conclusion :

Les transformateurs de puissance jouent un rôle indispensable dans la transmission efficace et sécurisée de l'électricité à travers les réseaux. Ils minimisent les pertes d'énergie en élevant la tension pour le transport de l'électricité à longue distance et donc réduisant ainsi les courants engendrant les pertes par effet Joule ($P_j = I^2 R$), ainsi qu'ils l'abaissent pour l'adaptation aux besoins variés des usagers domestiques, industriels ou commerciaux.

Incarnant le cœur battant des systèmes électriques modernes, les transformateurs de puissance intègrent des technologies avancées comme l'isolation en huile ou en résine, des noyaux en tôles à cristaux orientés et des protections contre les surtensions, garantissant fiabilité et durabilité face à des charges fluctuantes.

Chapitre II :

Maintenance industrielle et contrôle non destructif

Chapitre II : Maintenance industrielle et contrôle non destructif

II.1. Introduction :

La performance d'un outil de production repose sur l'équilibre entre la productivité et la sécurité. Dans ce contexte, la maintenance industrielle n'est plus perçue comme une simple fonction de réparation, mais comme un levier stratégique visant à garantir la pérennité des actifs.

Face à des exigences réglementaires et économiques croissantes, les entreprises doivent anticiper les défaillances pour éviter des arrêts coûteux ou des accidents majeurs.

Le Contrôle Non Destructif (CND) s'inscrit au cœur de cette stratégie préventive et prédictive. Véritable « examen médical » des matériaux, il permet de détecter des défauts internes ou de surface sans altérer l'intégrité des pièces. Le CND est un pilier indispensable pour :

La sûreté de fonctionnement : prévenir les risques humains et environnementaux.

La Qualité : assurer la conformité des équipements aux normes en vigueur.

La Disponibilité : optimiser les intervalles de maintenance et réduire les arrêts non programmés.

II.2. Objectifs de la maintenance industrielle et le contrôle non destructif :

II.2.1. Objectif général :

L'objectif de ce travail est de définir un cadre méthodologique pour l'intégration du CND dans un plan de maintenance global. Nous analyserons comment le choix judicieux des techniques de contrôle permet d'augmenter la fiabilité des installations tout en optimisant les coûts d'exploitation.

II.2.2 Objectifs spécifiques :

- Réduire les arrêts non planifiés.
- Prévenir les défaillances critiques.
- Prolonger la durée de vie des équipements.
- Garantir la conformité aux normes et réglementations.

II.3. Maintenance industrielle (suivant la norme : FN EN 13306) :

II.3.1. Définition de la maintenance :

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [14][15].

II.3.2. Types de maintenance :

II.3.2.1. Maintenance préventive : Maintenance destinée à évaluer et/ou atténuer la dégradation et réduire la probabilité de défaillance d'un bien elle est subdivisée en [Figure II.1] :

- a) **Maintenance systématique :** Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien
- b) **Maintenance conditionnelle :** maintenance préventive qui inclut l'évaluation des conditions physiques, l'analyse et les éventuelles actions de maintenance qui en découlent [14]
- c) **Maintenance prévisionnelle :** maintenance conditionnelle exécutée suite à une prévision obtenue grâce à une analyse répétée ou à des caractéristiques connues et à une évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien [14] [15]

II.3.2.2. Maintenance corrective : maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à rétablir un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise

On peut distinguer deux types de maintenance corrective :

- a) **Maintenance curative :** est la maintenance effectuée après l'apparition d'une panne ou d'un dysfonctionnement. Son objectif est de remettre un équipement en état de fonctionner.
- b) **Maintenance palliative :** est une forme de maintenance curative particulière. Elle consiste à dépanner provisoirement un équipement en panne pour lui permettre d'assurer une fonction minimale ou de secours, sans forcément revenir à son état nominal. [14] [15]

II.3.2.3. Maintenance améliorative : ensemble de toutes les actions technique, administratives et de management, destinées à améliorer la fiabilité et la maintenabilité et la sécurité intrinsèques d'un bien, sans changer la fonction d'origine

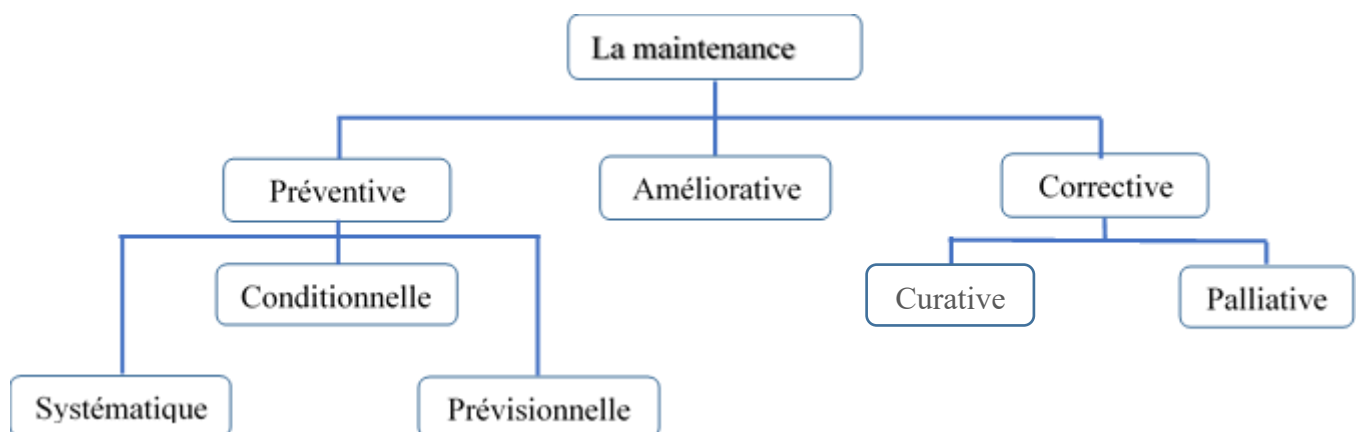


Figure II.1 : Les branches de la maintenance

II.3.3. Activités principales de la maintenance :

- **Inspection** : examen de conformité réalisé en mesurant, en observant ou en testant les caractéristiques significatives d'un bien
- **Surveillance en fonctionnement** : activité, exécutée soit manuellement, soit automatiquement, destinée à mesurer à intervalles prédéterminés les caractéristiques et les paramètres de l'état physique réel d'un bien
- **Essai de conformité** : essai destiné à montrer si une caractéristique ou une propriété d'un bien est, ou non, conforme aux exigences stipulées.
- **Essai de fonctionnement** : actions menées après une action de maintenance pour vérifier que le bien est en mesure d'accomplir la fonction requise.
- **Entretien courant (maintenance de niveau 1)** : activités de maintenance préventive simples régulières ou répétées.
- **Révision** : ensemble complet d'actions de maintenance préventive réalisées afin de maintenir le niveau requis de performance d'un bien.
- **Diagnostic de panne** : actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification des causes.
- **Localisation de panne** : actions menées en vue d'identifier à quel niveau d'arborescence du bien en panne se situe le fait générateur de la panne.
- **Remise à disposition** : événement correspondant au rétablissement de l'état de disponibilité après une défaillance.
- **Réparation** : action physique exécutée pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne
- **Dépannage** : action physique exécutée pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée
- **Reconstruction** : action suivant le démontage d'un bien et la réparation ou le remplacement des parties qui approchent de la fin de leur durée de vie utile et/ou qu'il convient de remplacer régulièrement afin de lui donner une vie utile étendue
- **Maintenance exceptionnelle** : maintenance préventive peu fréquente et ayant un impact significatif en termes de coûts totaux du cycle de vie
- **Préparation des tâches de maintenance** : fourniture de toutes les informations nécessaires et identification des ressources requises pour permettre d'effectuer les tâches de maintenance
- **Planning de maintenance** : plan élaboré à l'avance notifiant quand il convient d'exécuter une tâche de maintenance spécifique [14].
- **Amélioration continue** : Identifier des solutions techniques pour optimiser les performances, réduire les coûts et améliorer la sécurité.

- **Gestion de la documentation** : Tenir à jour les dossiers techniques, l'historique des interventions et la GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur).

a. Base de connaissances (le savoir) : Il s'agit du référentiel technique qui regroupe les plans, les manuels constructeurs et les schémas (électriques, hydrauliques). C'est la "carte d'identité" de vos équipements.

b. Référentiel opérationnel (le faire) : Ce sont les documents qui dictent l'action :

- Gammes de maintenance : Étapes pas à pas pour les révisions.
- Modes opératoires : Instructions spécifiques pour les tâches complexes.
- Consignes de sécurité : Procédures de mise hors tension et de protection.

c. Traçabilité (la mémoire) : C'est l'enregistrement de ce qui a été fait :

- Bons de Travail (BT) : Ordres de mission.
- Rapports d'intervention : Détails des pannes et solutions trouvées.
- Historiques : Données cruciales pour analyser la fiabilité et optimiser les coûts.

d. GMAO : Pour éviter l'accumulation de papier, permet de :

- Centraliser toutes les données en un clic.
- Automatiser les rappels de maintenance préventive.
- Analyser les performances via des indicateurs (MTBF, MTTR).

II.3.4. Niveaux de la maintenance : Classement en catégories des tâches de maintenance en fonction de la complexité :

Niveau 1 : est caractérisé par des actions simples exécutées par du personnel ayant une formation minimale.

Niveau 2 : est caractérisé par des actions de base devant être exécutées par du personnel qualifié utilisant des instructions de maintenance détaillées.

Niveau 3 : est caractérisé par des actions complexes devant être exécutées par du personnel qualifié utilisant des instructions de maintenance détaillées.

Niveau 4 : est caractérisé par des actions qui impliquent la maîtrise d'une technique ou d'une technologie et sont exécutées par du personnel technique spécialisé.

Niveau 5 : est caractérisé par des actions qui impliquent un savoir-faire détenu par le fabricant ou une société spécialisée à l'aide d'un équipement de soutien logistique industriel [14].

II.3.5. Planification et gestion de la maintenance :

La maintenance des transformateurs repose sur une organisation rigoureuse qui suit un processus structuré en quatre étapes (planification, organisation, exécution et enregistrement des

données), complété par une phase de retour d'information pour optimiser les décisions [16] [Figure II.2].

Des activités non négligeables jouent un rôle essentiel pour l'application du processus :

- Élaboration du planning de maintenance
- Gestion des ordres de travail
- Gestion des pièces de rechange
- Suivi des indicateurs de performance (MTBF, MTTR, disponibilité)

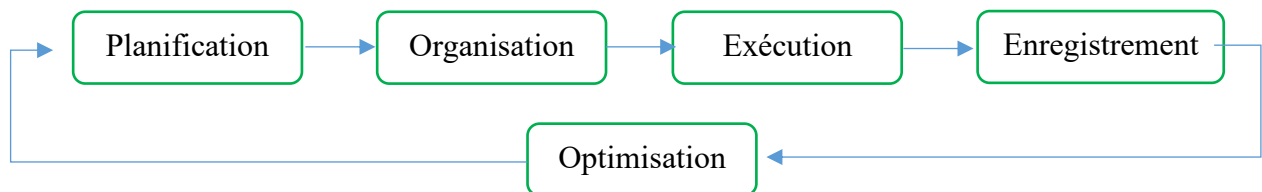


Figure II.2 : Processus de maintenance [16]

II.4. Contrôle non destructif (CND) :

II.4.1. Définition :

Le contrôle non destructif (CND) a pour but d'évaluer l'intégrité d'une pièce sans la détériorer. Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue aussi un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance [17].

II.4.2. Objectifs du CND :

Le contrôle non destructif a pour objectif de mieux les critères suivants :

- **Rapidité d'exécution** : Le contrôle doit être rapide pour éviter une immobilisation trop longue des pièces et limiter les coûts liés à la main-d'œuvre et au fonctionnement de l'usine.
- **Coût** : Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- **Reproductibilité** : La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- **Fiabilité** : Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection
- **Sensibilité** : La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

- **Résolution** : La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite [17].

II.4.3. Application des méthodes CND :

L'application des méthodes CND est essentiel pour :

- Garantir la qualité et la fiabilité des matériaux sans les endommager.
- Utilisé aussi bien dans des secteurs critiques (nucléaire, aéronautique, ...) que dans les biens de consommation
- Détecter divers défauts (fissures, corps étrangers, ...) à trois moments clés du cycle de vie d'un produit. [18][Figure II.3] :

II.4.3.1. Contrôle en cours de fabrication :

Le contrôle en cours de fabrication utilise une instrumentation robuste et automatisée, intégrée directement sur la ligne pour surveiller le procédé en temps réel. Il permet de détecter précisément les défauts et d'assurer le tri automatique des produits non conformes avec une grande fiabilité [22].

II.4.3.2. Contrôle de réception :

Le contrôle de réception valide la conformité d'un lot aux spécifications préétablies, privilégiant la rigueur des procédures et de l'archivage sur les seuls impératifs de productivité. Il ne se contente pas de détecter les anomalies, mais doit également en caractériser précisément la nature et les dimensions pour assurer la qualité finale [18].

II.4.3.3. Contrôle en service :

Le contrôle en service, lié à la maintenance, exige une fiabilité absolue et une grande reproductibilité pour suivre l'évolution des dommages dans le temps. Il vise à identifier et mesurer précisément les défauts afin d'évaluer leur nocivité et de prévenir tout risque de défaillance grave [18].

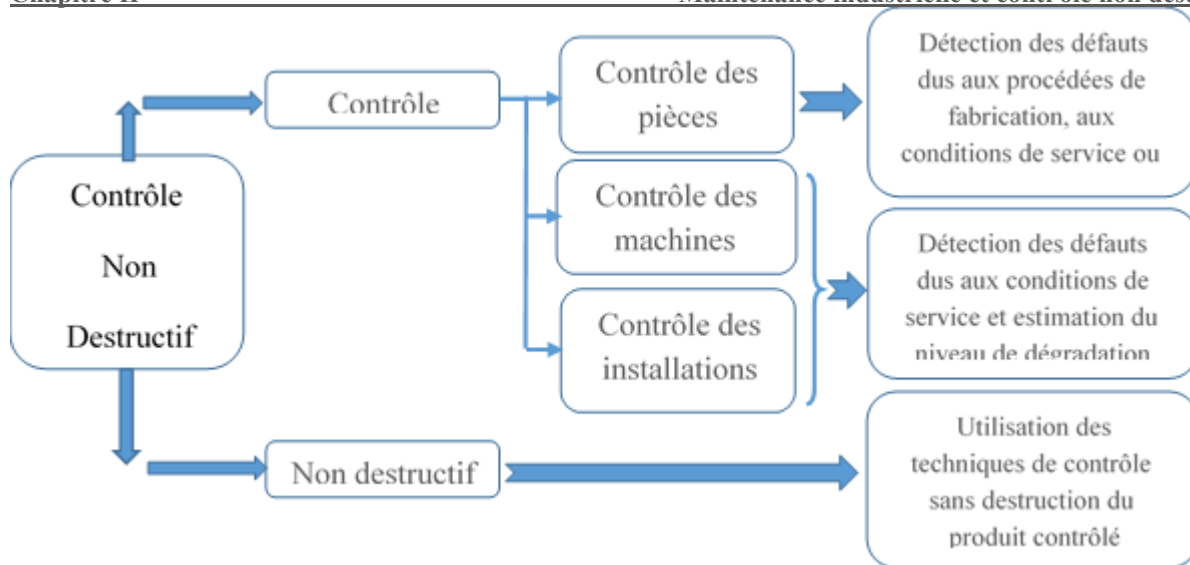


Figure II.3 : champ d'application CND [18]

II.4.4. Principe de détection des défauts :

II.4.4.1. Hétérogénéités et défauts : Le terme défaut désigne une anomalie (hétérogénéité ou variation de propriété) nuisant à l'utilisation d'une pièce. Bien qu'ambigu, il souligne l'importance du contrôle non destructif (CND) pour garantir la qualité [18].

On distingue généralement deux types de défauts selon leur position : les défauts de surface (surfaique) et les défauts internes (volumique) [Figure II.4] :

1- Défauts de surface (surfaique) : Les défauts de surface, accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

a) Défauts ponctuels : Les défauts structuraux de l'ordre du micromètre (fissures, criques, piqûres) sont les plus critiques car ils amorcent des ruptures par fatigue. Leur détection exige donc l'usage de méthodes de contrôle non destructif sensibles, comme les ultrasons ou la magnétoscopie.

b) Défauts d'aspect : causés par des variations géométriques ou physiques visibles, dévaluent le produit et le rendent inutilisable. Bien que le contrôle visuel humain soit réalisable.

2- Défauts internes (volumique) : Sont des hétérogénéités variées situées au cœur des matériaux, dont la nomenclature dépend du secteur industriel concerné.

Dans la métallurgie, ils prennent la forme de porosités, criques ou inclusions altérant la qualité des pièces (moulées, soudées, etc.) [18].

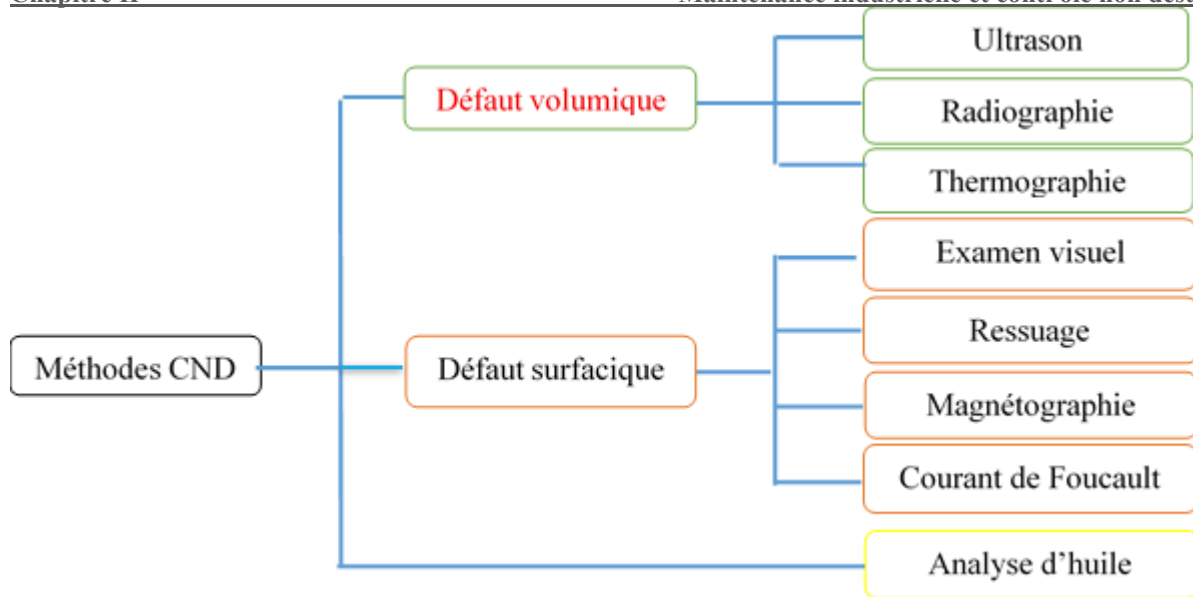


Figure II.4 : Les méthodes CND

II.4.4.2. Principe de la détection d'un défaut :

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée [Figure II.5] :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**) ;
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts (**perturbation**) ;
- Détection de ces modifications par un capteur approprié (**révélation**) ;
- Traitement des résultats et interprétation des informations délivrées.

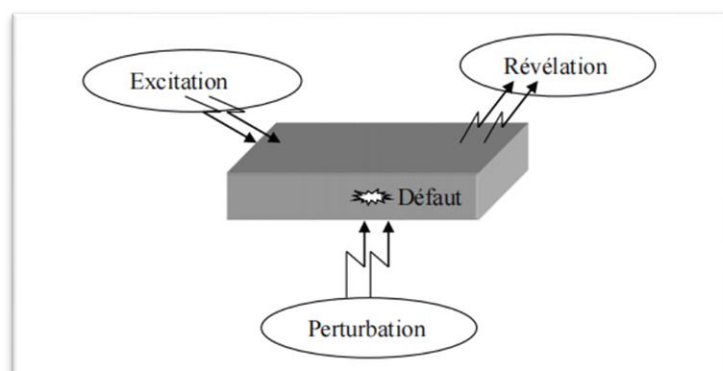


Figure II.5 : Principe de détection d'un défaut [16]

II.4.5. Méthodes de CND :

a. Examen visuel (VT) : Les procédés optiques constituent un type de techniques qu'il convient de séparer en deux catégories, selon que le contrôle soit automatisé ou non. L'examen visuel, contrôle ancestral le plus élémentaire, est la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision [17]

b. Ressuage (PT) : Le ressuage est une méthode de contrôle non destructif dont le but est de localiser et déterminer l'importance des discontinuités superficielle dans les matériaux ; elle est basée sur le principe de la capillarité. Les matériaux, les procédures et les équipements utilisés en ressuage sont tels qu'ils facilitent la capillarité et rendent possible la détection des défauts et leur interprétation [23].

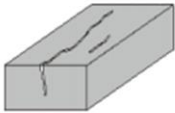
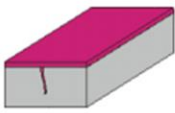
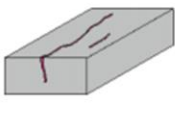
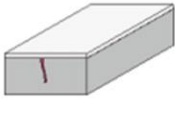
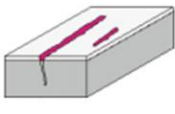
	Nettoyage de la surface à examiner à l'aide d'un dégraissant (acétone et solvant).
	Application d'un pénétrant coloré qui entre par capillarité dans les discontinuités ouvertes à la surface de la pièce à contrôler.
	Élimination du pénétrant résiduelle (avec de l'eau ou à l'aide d'un chiffon humidifié de solvant).
	Application d'un développeur.
	Le développeur absorbe le pénétrant resté dans les discontinuités et forme une image par contraste de couleur. Après contrôle : nettoyage des surfaces contrôlées à l'acétone ou au solvant.

Figure II.6: Principe de ressuage [17]

La méthode [Figure II.6] consiste à appliquer un pénétrant sur la surface d'une pièce, le laisser s'infiltrer dans les discontinuités débouchant à la surface, puis éliminer l'excès de pénétrant. Un révélateur opaque et absorbant est ensuite appliqué : par capillarité, il aspire le pénétrant des discontinuités vers la surface, le rendant visible[17].

c. Magnétoscopie (MT) : L'examen magnétique permet de visualiser les défauts à la surface et en dessous [Figure II.7]. La méthode est utilisable uniquement pour les matériaux magnétisables, comme le fer et l'acier. Un champ magnétique est appliqué sur le matériau à examiner à l'aide d'un aimant. Le champ magnétique est perturbé aux endroits où il y a des fissures et d'autres dommages au matériau. Les lignes de champ ne seront pas droites. Le tracé des lignes de champ peut être rendu visible à l'aide de limaille de fer [17].



Figure II.7: Magnétoscopie

d. Ultrasons (UT) : Les ultrasons sont des ondes sonores qui se propagent dans les milieux élastiques. Des modifications locales du milieu parcouru (fissures, défaut de compacité, ...) engendrent des perturbations dans la propagation de l'onde. Le contrôle par ultrasons a donc pour principe d'analyser, à l'aide d'instruments de mesure appropriés, les modifications apportées à la progression des ondes sonores.

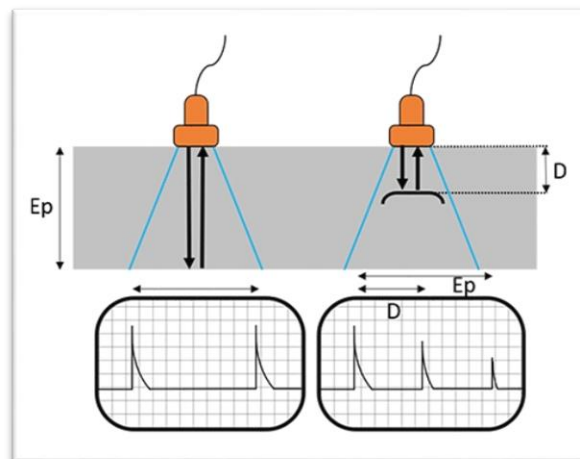


Figure II.8 : Schéma de principe de la méthode d'inspection par ultrasons [19]

Dans la méthode [Figure II.8] d'inspection par ultrasons, des ondes sonores à haute fréquence sont transmises dans un matériau pour détecter les imperfections ou localiser des changements dans les propriétés des matériaux. La technique de contrôle par Ultrasons la plus couramment utilisée est l'écho pulsé ; le son est introduit dans un objet à contrôler et les réflexions (les échos) des imperfections internes ou des surfaces géométriques de la pièce inspectée sont renvoyées à un récepteur [19].

e. Radiographie industrielle (RT) [Figure II.9] : L'examen radiographique est utilisé pour détecter des défauts sous la surface d'un matériau. Deux types de rayons électromagnétiques sont utilisés :

Rayon X : il est généré dans un tube radiogène, un appareil électrique qui émet des rayons X lorsqu'il est mis sous tension.

Rayon gamma : il est généré par des éléments radioactifs (isotopes). Les isotopes les plus fréquemment utilisés sont le cobalt-60, le césium-137 et l'iridium-192. Un film fixe toutes les inégalités de la pièce soumise aux rayons.

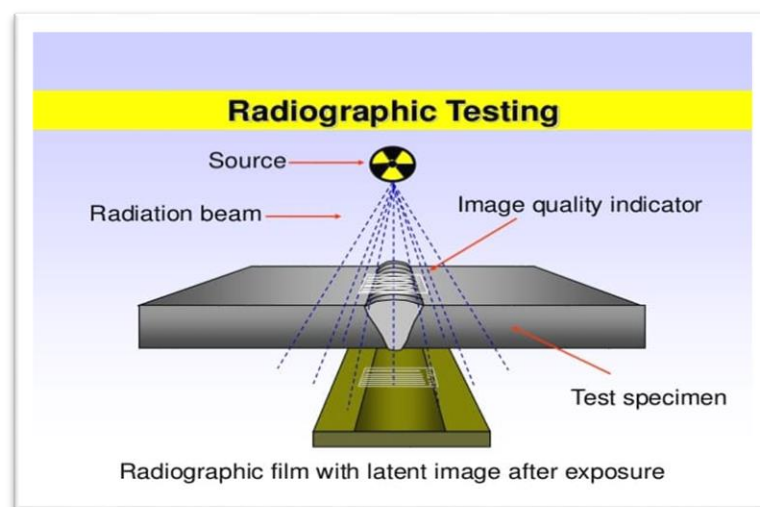


Figure II.9 : principe de contrôle par radiographie

f. Courants de Foucault (ET) : Cette technique utilise des courants de Foucault, générés par une bobine excitée en courant alternatif, pour détecter les défauts superficiels. Ces courants produisent un champ magnétique de réaction dont les variations, causées par les déviations dues aux défauts, sont mesurées par un capteur magnétique (bobine ou autre) [19].

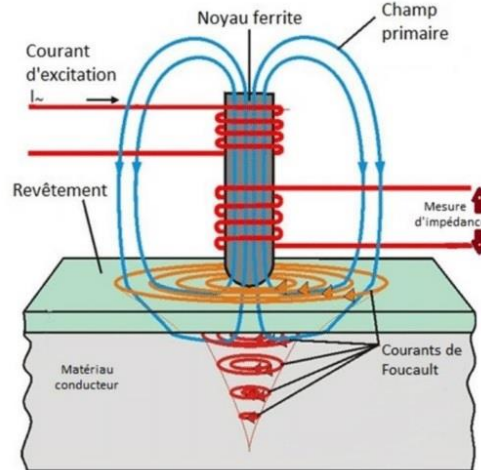


Figure II.10 : Principe de la méthode CND par courant de Foucault

A l'aide d'une bobine intégrée dans une sonde [Figure II.10], on va induire des courants dans la pièce à examiner. La présence d'un défaut va modifier la circulation de ces courants. On va capter cette variation en mesurant la modification de l'impédance d'une bobine réceptrice [19]

j. Thermographie infrarouge (TIR) [Figure II.11] : La thermographie infrarouge est une science qui consiste à recueillir et analyser des informations thermiques à distance. Selon la norme française A 09-400, il s'agit d'une technique produisant une image thermique d'une scène dans l'infrarouge. Elle est utilisée en maintenance conditionnelle pour surveiller les équipements sans interrompre la production et réduire les coûts d'entretien.

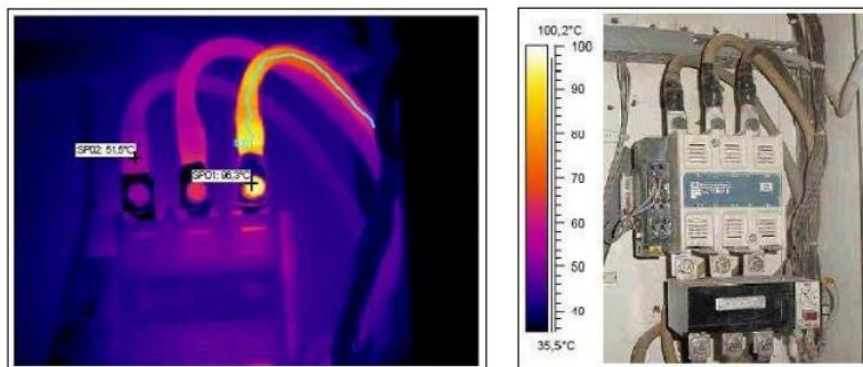


Figure II.11 : Exemple de défaut électrique de connexion (mauvais serrage) [19]

g. Analyse des huiles : L'analyse des huiles de lubrification et diélectriques permet de détecter les contaminations, l'usure et la dégradation des propriétés, ce qui aide à prévenir les pannes coûteuses et à prolonger la durée de vie des huiles et des équipements industriels

- **Huile de lubrification** : La lubrification des machines tournantes repose sur deux facteurs clés : l'état du lubrifiant et celui des surfaces lubrifiées. L'analyse du fluide permet de détecter des modifications (dégradation par oxydation/chaleur ou contamination par eau, particules ou usure interne) pouvant entraîner des dysfonctionnements et une usure anormale. [20]

Deux paramètres importants conditionnent la lubrification correcte des machines tournantes l'état du lubrifiant et l'état des surfaces lubrifiées. Les analyses d'échantillons du fluide permettent de déterminer d'une part les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant et d'identifier une usure des éléments mécaniques.

Deux facteurs prépondérants interviennent pour modifier les caractéristiques d'un lubrifiant

- La dégradation,
- La contamination.

La dégradation des lubrifiants résulte principalement de l'oxydation due à l'oxygène et aux hautes températures, altérant leurs propriétés et formant des dépôts qui perturbent les machines. Le suivi des propriétés aide à ajuster les changements ou appoints, sans prédire l'usure mécanique. La contamination vient de particules d'usure internes, d'eau ou de solides externes, souvent à l'origine d'usures anormales. [20]

- **Huiles diélectriques** :

Dans les transformateurs de puissance, l'huile minérale assure l'isolation électrique et le refroidissement thermique. Elle imprègne l'isolation cellulosique, élimine l'air et les gaz pour booster la rigidité diélectrique, et facilite l'évacuation de la chaleur ; donc il faut qu'il convienne aux spécifications bien déterminés. Les spécifications des huiles minérales à usage électriques sont définies dans la publication CEI 60296 [16] (Tableau II.1). Il existe également un guide de maintenance des huiles minérales utilisées dans les appareils électriques (CEI 60422). Toutes les huiles isolantes et dans le but d'assurer l'isolation électrique et le transfert de chaleur, doivent toujours répondre à plusieurs critères électriques et physiques. [21] [22]

Tableau II.1: propriétés des huiles isolantes [21]

		Unité	Huile neuve	Norme
Propriétés électriques	Tension de claquage	KV	>70	CEI 156
	Facteur de dissipation diélectrique à 90°C	/	0,005	CEI 247
Propriétés chimiques	Teneur en eau	ppm	<30	CEI 814.
	Indice d'acidité	MgKOH/g	<0,03	CEI 296.
	Indice de couleur	/	<2	ASTM D 1500

II.4.5.2. Choix des méthodes CND :

Pour choisir la méthode CND (contrôle non destructif) appropriée à partir de vos défauts attendus et de vos sources (matériaux, géométrie, normes, etc...), il faut suivre une démarche structurée en fonction de critères techniques et pratiques.

a. Caractériser les défauts et les pièces : Commencez par définir :

- **Type de défauts** : fissures débouchantes en surface, porosités internes, laminations, défauts de soudure, etc.
- **Localisation** : défauts de surface ou interne(volumiques).
- **Nature du matériau** : métal ferromagnétique ou non, plastique, composite, etc...
- **Géométrie et accessibilité** : accès d'un seul côté, pièces épaisses, tubes, soudures, etc...

À partir de ces critères nous distinguons la méthode CND :

- **Méthodes de surface** (ressuage PT, magnétoscopie MT, courants de Foucault ET) pour défauts débouchant ou proches de la surface.
- **Méthodes volumiques** (ultrasons UT, radiographie RT) pour défauts internes.

b. Critères de choix de la méthode CND : On retient généralement ces critères pour choisir la méthode la mieux adaptée :

- **Nature du matériau** :
 - Ferromagnétique → MT envisageable.
 - Non ferreux métallique → PT, ET, UT.
 - Non métallique, composites → UT, RT, IR.
- **Type et localisation du défaut** :
 - Fissure débouchant → PT, MT, ET.
 - Défaut interne plan (soude) → UT, RT.
- **Contraintes pratiques** :
 - Coût et temps de contrôle, nombre de pièces, sécurité (rayons X, champ magnétique), état de surface, accès possible.
 - Certains documents proposent même des **tableaux de choix** “méthode CND vs critères” pour vous appuyer sur des normes ou références.

II.5. Conclusion :

Ce chapitre démontre que la maintenance industrielle est passée d'une simple fonction de réparation à un levier stratégique essentiel pour la productivité et la sécurité des entreprises. Elle s'articule autour d'une organisation rigoureuse, allant de la maintenance préventive pour anticiper les pannes à la maintenance corrective pour rétablir les fonctions défaillantes. Le Contrôle Non Destructif (CND) s'insère au cœur de cette dynamique comme un « examen médical » indispensable, permettant de détecter des anomalies sans altérer l'intégrité des équipements.

Qu'il s'agisse de méthodes de surface comme le ressuage ou de techniques volumiques comme les ultrasons ou analyses des huiles ; le CND garantit la sûreté, la qualité et la disponibilité opérationnelle des installations. L'intégration de ces contrôles dans un plan global, soutenue par des outils de GMAO et des indicateurs de performance, permet d'optimiser les coûts et de prolonger la durée de vie des actifs. Finalement, le succès repose sur une démarche structurée pour choisir la méthode la plus adaptée à la nature des matériaux et aux défauts recherchés, assurant ainsi une performance industrielle durable.

Chapitre III :
Contrôle des
transformateurs de
puissance par l'analyse
d'huile

Chapitre III: Contrôle des transformateurs de puissance par l'analyse d'huile.

III.1. Introduction :

Les transformateurs de puissance sont des équipements stratégiques et coûteux dont la défaillance peut avoir de graves conséquences. Pour garantir leur fiabilité, l'analyse des huiles isolantes est la méthode de surveillance non destructif la plus efficace. Elle permet, via le suivi des propriétés de l'huile minérale, de détecter précocement les anomalies et d'éviter les pannes majeures.

III.2. Généralités sur les moyens d'isolation électrique des transformateurs :

L'isolation des parties actives des transformateurs de puissance est réalisée à l'aide de papier, de carton, de bois et d'huile (minérale ou synthétique). Ce système d'isolation qui est le maillon le plus faible dans le transformateur, représente la partie la plus importante du transformateur à entretenir et exige pour ce faire une attention particulière [23].

III.2.1. Rôle de l'isolant dans les transformateurs :

L'isolation électrique des composants d'un transformateur est assurée par un liquide (huile isolante) et un solide (papier imprégné d'huile et bois). L'huile sert également à évacuer la chaleur générée par les pertes d'énergie. Cependant, pour les transformateurs de mesure, qui chauffent peu et sans circulation d'huile, cette fonction de refroidissement est négligée. [24]

III.2.2. Isolation solide :

L'isolation solide des transformateurs est réalisée à l'aide de papier et de carton. Le papier sert à l'isolation entre spires des enroulements tandis que le carton sert à d'isolation entre les enroulements l'un par rapport à l'autre et entre les enroulements et le noyau [23].

Les papiers et les cartons restent des matériaux de choix pour l'isolation des transformateurs HT, MT et BT [25]

III.2.2.1. Isolation cellulosique :

L'isolation solide des transformateurs est faite d'un matériau cellulosique de type papier kraft. Ce matériau offre des caractéristiques d'imprégnation exceptionnelles qui se traduisent par d'excellentes performances diélectriques, une bonne stabilité géométrique dans l'huile ainsi qu'une facilité de mise en forme. Le papier présente également une fonction de protection des enroulements de cuivre de la partie active.[24] [Figure III.1].



Figure III.1 : Isolation cellulosique autour du noyau magnétique [24]

III.2.2.2. Isolation mixte liquide et solide :

L'isolation mixte combine des isolants liquides et solides : les liquides imprègnent les solides ou remplissent des équipements électriques (transformateurs, câbles, etc.) pour éliminer l'air, améliorer la tenue diélectrique et parfois évacuer la chaleur. Le chapitre III détaillera le type spécifique utilisé dans cette étude [26]

III.2.3. Isolation gazeuse :

En haute tension, les gaz sont privilégiés comme isolants dans les réseaux de forte puissance car ils épousent parfaitement les conducteurs (sans créer de poches d'air nuisibles) et retrouvent instantanément leurs propriétés isolantes après un arc électrique, contrairement aux isolants solides. Les gaz couramment utilisés sont l'air, l'azote, le CO_2 et le SF_6 [26]

III.2.4. Isolation liquide :

Les huiles isolantes représentent l'avantage d'avoir une rigidité diélectrique élevée par rapport aux gaz et d'améliorer les propriétés diélectriques.

En électrotechnique, elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Son rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz. [26] [22] . Elles absorbent et transportent la chaleur générée vers les zones de refroidissement, dissipant-la pour maintenir une température optimale et prolonger la durée de vie de l'équipement.

Les huiles isolantes se classent en quatre types selon leur origine et leur ordre d'apparition historique dans l'électrotechnique : d'abord les huiles végétales, puis les huiles minérales, enfin les

liquides synthétiques et les huiles de silicone, ces derniers ayant été développés pour pallier les inconvénients des huiles minérales dans certaines applications [27].

III.2.4.1. Huile végétale : Les huiles végétales, issues de plantes comme le colza ou le soja, sont biodégradables et écologiques, mais elles présentent une rigidité diélectrique et une stabilité moindre que les huiles minérales.

III.2.4.2. Huiles silicones : Les huiles silicones sont des huiles synthétiques stables thermiquement, avec une bonne rigidité diélectrique et une faible volatilité. Utilisées en milieux extrêmes, elles se distinguent par une faible viscosité et une meilleure fluidité que les autres huiles.

III.2.4.3 Huiles synthétiques : Les huiles synthétiques, fabriquées chimiquement avec des compositions variées, offrent des performances supérieures en stabilité thermique, rigidité diélectrique et compatibilité, mais à un coût plus élevé [27].

III.2.4.4 Huile minérale isolant : suivant la norme IEC 60296 ; liquide isolant pour transformateurs et matériels électriques analogues (appareillages de connexion, changeurs de prises, par exemple) dérivé de produits pétroliers et/ou d'autres hydrocarbures [12]

III.3. Phénomènes de dégradation et vieillissement de l'isolant :

L'isolation des équipements électriques, notamment des transformateurs, se dégrade progressivement en fonctionnement sous l'effet de réactions chimiques et physiques, ce qui réduit ses performances diélectriques et mécaniques [28].

III.3.1. Contraintes subis : Les transformateurs sont confrontés à divers types de contraintes tout au long de leur fonctionnement. Ces contraintes influencent directement leur performance et accélèrent leur vieillissement s'ils ne sont pas correctement surveillés [29]

a) Oxydation : L'exposition à l'oxygène entraîne la formation de produits oxydants tels que les acides et les boues. Cela augmente l'acidité de l'huile et peut causer la corrosion des composants métalliques.

b) Hydrolyse : La présence d'humidité dans l'huile peut conduire à la décomposition hydrolytique, produisant des acides et de l'eau supplémentaires, ce qui accélère encore le vieillissement.

c) Contamination : Les impuretés, comme les particules solides, l'eau, et les gaz dissous, peuvent s'introduire dans l'huile, dégradant ses propriétés isolantes et thermiques.

d) Température : Les températures élevées accélèrent les réactions chimiques dans l'huile, augmentant le taux de vieillissement. Les cycles de chauffage et de refroidissement peuvent également provoquer des tensions thermiques.

e) Défauts : Les principaux défauts pouvant accélérer le vieillissement d'un transformateur sont les suivants.

- **Surcharge :** Une augmentation de la charge entraîne une surintensité prolongée, qui élève la température et réduit la durée de vie du transformateur.
- **Court-circuit :**
 - Interne : un défaut entre phases ou spires générant un arc électrique aide à la dégradation du bobinage, pouvant causer même un incendie, ainsi qu'un dégagement gazeux dangereux.
 - Externe : un défaut en aval provoque des efforts électrodynamiques pouvant endommager mécaniquement le bobinage et mener à un défaut interne.
- **Défaut à la masse :** une anomalie interne entre bobinage et noyau magnétique cause un dégagement gazeux pouvant entraîner une destruction ou un incendie [27]

III.3.2. Mécanisme de dégradation de l'isolant :

III.3.2.1. Dégradation du papier (dépolymérisation) et formation de dérivés furaniques :

Le papier des transformateurs de puissance, composé à 90 % de cellulose (longues chaînes de glucose reliées par des ponts d'oxygène), se dégrade sous l'effet de trois réactions principales (pyrolyse, oxydation, hydrolyse) qui brisent ses macromolécules et réduisent son degré de polymérisation. Ces réactions sont accélérées par une hausse de la température, de la teneur en oxygène ou du taux d'humidité.

- **La pyrolyse ou la thermolyse :** La dégradation thermique de la cellulose coupe les liaisons glycosidiques et ouvre les anneaux de glucose, produisant principalement des sucres libres, du CO, du CO₂, de l'eau et de l'hydrogène. La pyrolyse n'altère les propriétés mécaniques du papier qu'à partir de 150 °C

- **L'oxydation :** elle consiste en l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène. Elle provoque une dépolymérisation. Les produits formés sont des carbonyles, des aldéhydes et des acides, mais aussi des gaz tels que CO, CO₂, H₂ et de l'H₂O ;

- **L'hydrolyse :** C'est la réaction de l'eau avec les ponts d'oxygène et qui provoque la rupture de chaînes sans formation de produits libres. L'eau formée par pyrolyse et par oxydation contribue à augmenter l'hydrolyse [28].

En dessous de 140°C, les trois mécanismes de dégradation du papier sont indissociables car la dégradation résulte de l'action combinée de l'oxygène et de l'eau, accélérée par la température.

La pyrolyse, l'oxydation et l'hydrolyse dégradent la cellulose en sucres, mais ceux-ci sont peu solubles dans l'huile, ce qui empêche leur utilisation pour diagnostiquer l'état de l'isolation

solide. Sous l'effet de l'humidité et des acides, le glucose se transforme en composés furaniques, partiellement solubles dans l'huile, utilisés comme traceurs de dégradation du papier.

Le 2-furaldéhyde (2FAL) est le plus significatif : sa concentration, mesurée par la chromatographie en phase liquide à haute performance (*High-Performance Liquid Chromatography* HPLC) dans l'huile du transformateur, permet d'estimer le degré de dépolymérisation (DP) via une formule empirique (norme IEC 61198) [28] [29].

❖ **Chromatographie en phase liquide à haute performance (*High-Performance Liquid Chromatography* HPLC) [Figure III.2] [Figure III.3] :** le principe c'est le passage de l'échantillon à analyser par deux phases ; la première c'est la phase mobile constitué d'un liquide qui transporte l'échantillon vers la deuxième phase c'est la phase stationnaire s'agit d'une colonne remplie des matériaux souvent apolaire.

Le débit élevé diminue le temps nécessaire pour séparer les composants le long de la phase stationnaire.

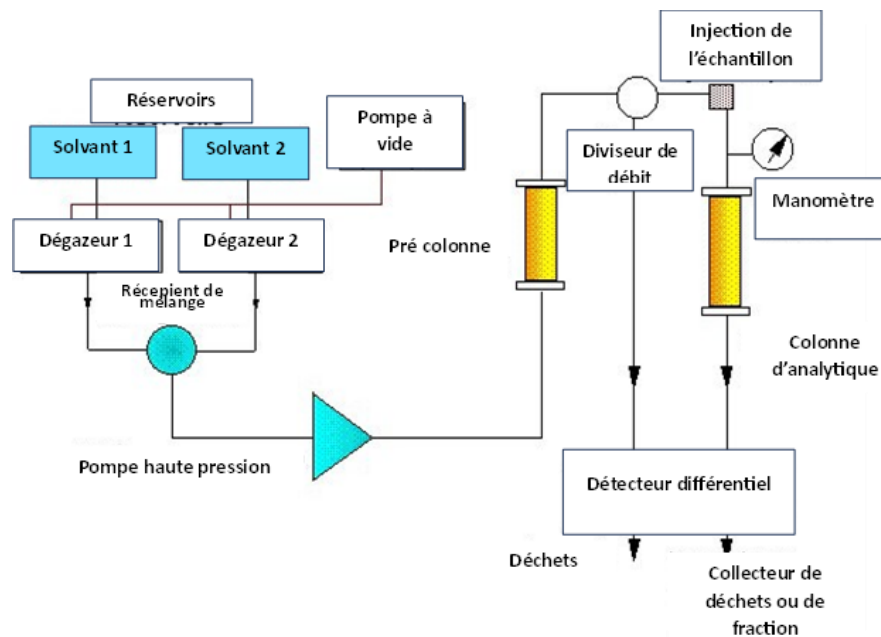


Figure III.2 : Schéma de principe du HPLC



Figure III.3: Chromatographe PerkinElmer Altus HPLC

III.3.2.2. Oxydation de l'huile isolant et formation de la boue :

L'oxydation est un processus chimique où l'oxygène dégrade les hydrocarbures, formant des composés oxygénés (hydroperoxydes, alcools, acides). Accélérée par des métaux comme le cuivre et le fer, elle rend l'huile plus polaire, augmentant sa conductivité et sa solubilité dans l'eau. De plus, les molécules aromatiques de l'huile se transforment en dépôts (boues ou asphaltènes) par polymérisation [21].

III.4. Techniques d'analyse de l'huile isolante :

Les techniques d'analyse de l'huile isolante regroupent essentiellement des essais physico-chimiques, diélectriques et de gazeuse, visant à évaluer l'état de l'huile et la santé du transformateur ou du matériel haute tension.

III.4.1. Spécification de l'huile isolant neuve : Ces propriétés de l'huile [Tableau III.1] sont celles qui sont liées à son rôle de liquide isolant et fluide caloporteur. Dépendent du type et de la qualité du raffinage et des additifs et liées au comportement à long terme de l'huile en service, et/ou à sa tenue sous contrainte électrique et température élevées suivant la norme IEC 60296 [12].

III.4.2. Échantillonnage d'huile :

La norme IEC 60475 (« *Method of sampling insulating liquids* ») [29] définit la procédure à suivre pour prélever des échantillons représentatifs d'huile isolante sur les transformateurs et

autres matériels électriques, de manière à éviter toute contamination et à garantir la fiabilité des analyses (DGA (*Dissolved Gas Analysis*), tension de claquage, humidité, etc.).

Mode opératoire simplifié conforme à IEC 60475 :

1. Rassembler la trousse d'échantillonnage (tuyau en acier inoxydable, flacon propre, chiffon, étiquettes).
2. Nettoyer la vanne de prélèvement et laisser circuler l'huile quelques instants pour purger le circuit.
3. Placer l'extrémité du tuyau au fond du flacon et laisser couler lentement l'huile pour éviter l'aération.
4. Remplir le flacon de manière à ce qu'il déborde légèrement, puis retirer le tuyau sous écoulement.
5. Fermer la vanne, puis visser le bouchon du flacon sans bulle d'air (ou laisser un petit volume d'air si requis par le laboratoire).
6. Étiqueter immédiatement (numéro de transformateur, date, température, tension, type d'analyse prévue).
7. Noter les conditions de prélèvement (appareil en charge, hors charge, température ambiante, etc.) [30]

III.4.3. Analyses Physico-chimiques d'huile isolante :

Les analyses physico-chimiques de l'huile isolante (minérale ou synthétique) des transformateurs de puissance sont cruciales pour évaluer son vieillissement et sa capacité diélectrique.

III.4.3.1. Control des propriétés électriques :

a) Tension de claquage [Figure III.4] : Mesure la capacité de l'huile à résister au claquage électrique sans conduire le courant. Une valeur basse indique la présence d'humidité ou de particules conductrices suivant les normes IEC 60156 [31]

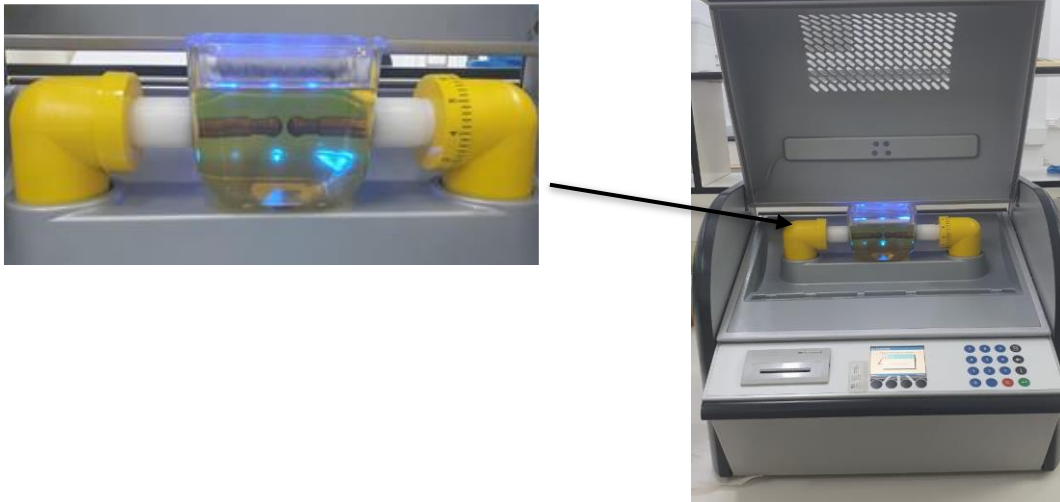


Figure III.4 : Test de la tension de claquage

b) Facteur de dissipation ($\tan \delta$) : Évalue les pertes diélectriques. Un facteur élevé signale une contamination polaire (eau, produits d'oxydation) ou un vieillissement avancé ; suivant les normes IEC 60247 [30] [Figure III.5]

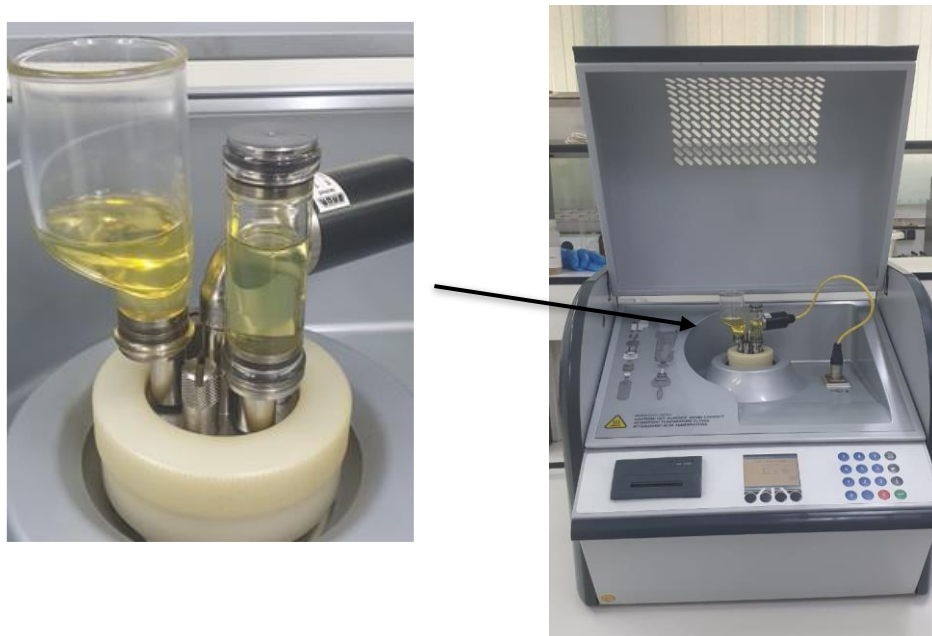


Figure III.5 : Test de Facteur de dissipation ($\tan \delta$)

c) Résistivité : Indique la résistance au passage du courant continu. Une résistivité faible témoigne d'une conductivité accrue due aux contaminants [30]

III.4.3.2. Control des propriétés chimiques :

a) **Indice de neutralisation (*Total acid number TAN*) (l'acidité) :** Mesure l'acidité totale. Un TAN élevé provient de l'oxydation de l'huile et peut accélérer la corrosion des parties métalliques et le vieillissement du papier isolant ; suivant les normes IEC 62021-2 [12]

b) **Teneur en eau [Figure III.6] :** L'humidité réduit drastiquement la rigidité diélectrique et accélère le vieillissement de la cellulose. La mesure est effectuée à l'aide d'un titrateur et par la méthode Karl Fischer (normes IEC 60814) [31]



Figure III.6 : mesure de la teneur en eau (titrateur KFM 300)

III.4.3.3. Contrôle des propriétés physiques :

a) **Viscosité cinématique [Figure III.7] :** Conditionne la circulation de l'huile pour le refroidissement. Une viscosité trop élevée entrave la dissipation thermique



Figure III.7 : viscosimètre

b) Couleur : Un indicateur simple de vieillissement. L'huile s'assombrit avec l'oxydation et la formation de boues.

Tableau III.1: Spécifications générales de l'huile isolants. [12]

Propriété	Méthode d'essai	Limites	
		Huile pour transformateur	Huile pour disjoncteurs basse température
1 – Fonctions			
Viscosité à 40 °C	ISO 3104	Max. 12 mm ² /s	Max. 3,5 mm ² /s
Viscosité à -30 °C ^a	ISO 3104	Max. 1 800 mm ² /s	–
Viscosité à -40 °C ^b	CEI 61868	–	Max. 400 mm ² /s
Point d'écoulement	ISO 3016	Max. -40 °C	Max. -60 °C
Teneur en eau	CEI 60814	Max. 30 mg/kg ^c / 40 mg/kg ^d	
Tension de claquage	CEI 60156	Min. 30 kV / 70 kV ^e	
Densité à 20 °C	ISO 3675 ou ISO 12185	Max. 0,895 g/ml	
FDD à 90 °C	CEI 60247 ou CEI 61620	Max. 0,005	
Teneur en particules	CEI 60970	Pas d'exigence générale ⁱ	
2 – Raffinage/stabilité			
Apparence	–	Limpide, exempte de dépôts et de matières en suspension	
Acidité	CEI 62021-1 ou 62021-2	Max. 0,01 mg KOH/g	
Tension interfaciale	EN 14210 ou ASTM D971	Pas d'exigence générale ^f	
Teneur totale en soufre	IP 373 ou ISO 14596	Pas d'exigence générale	
Soufre corrosif	DIN 51353	Non corrosif	
Soufre potentiellement corrosif	CEI 62535	Non corrosif	
Teneur en DBDS	CEI 62697-1 (en préparation)	Non détectable (< 5 mg/kg)	
Inhibiteurs de la CEI 60666	CEI 60666	(U) huile non inhibée: non détectable (< 0,01%) (T) huile faiblement inhibée: < 0,08 % (I) huile inhibée: 0,08 % – 0,40 % (voir 3.6 à 3.8)	
Additifs passivants des métaux de la CEI 60666	CEI 60666	Non détectable (< 5 mg/kg), ou selon accord avec l'acheteur	
Autres additifs		Voir ^g	
Teneur en 2-Furfural et ses dérivés	CEI 61198	Non détectable (< 0,05 mg/kg) pour chaque composé individuel	
Stray gassing	Voir 6.22	Pas d'exigence générale ^h	
3 – Performance			
Stabilité à l'oxydation	CEI 61125:1992 (méthode C) Durée de l'essai ^k : Pour les huiles non inhibées (U): 164 h Pour les huiles faiblement inhibées (T): 332 h pour les huiles inhibées (I): 500 h	Pour les huiles contenant d'autres additifs antioxydants et des additifs passivants de métaux, voir 6.12	
- Acidité totale ⁱ	CEI 61125:1992, 1.9.4	Max. 1,2 mg KOH/g	
- Dépôts ⁱ	CEI 61125:1992, 1.9.1	Max. 0,8 %	
- FDD à 90 °C ⁱ	1.9.6 de la CEI 61125, Amendement 1 (2004) + CEI 60247	Max. 0,500 ⁱ	
Tendance au gassing	CEI 60628:1985, Méthode A	Pas d'exigence générale ^h	
TCE	Voir 6.14	Pas d'exigence générale ^h	

Tableau III.1 : Spécifications générales de l'huile isolants (suite).

Propriété	Méthode d'essai	Limites	
		Huile pour transformateur	Huile pour disjoncteurs basse température
4 – Hygiène, sécurité et environnement (HSE)			
Point d'éclair	ISO 2719	Min. 135 °C	Min. 100 °C
Teneur en HAP	IP 346	Max. 3 %	
Teneur en PCB	CEI 61619	Non détectable (< 2 mg/kg)	
^a Il s'agit de la TMDP nominale pour une huile pour transformateur (voir 6.1); elle peut être ajustée aux conditions climatiques de chaque pays. Il est recommandé que le point d'écoulement soit inférieur de 10 K au moins à la TMDP. ^b TMDP nominale pour les huiles pour disjoncteurs basse température. ^c Livraisons en vrac. ^d Livraisons en fûts ou petits conteneurs. ^e Après traitement en laboratoire (voir 6.4). ^f Là où une spécification générale est utilisée, une limite minimale de 40 mN/m est recommandée. ^g Le fournisseur doit déclarer le type générique de tous les additifs, et leurs concentrations dans les cas des additifs antioxydants. ^h Devant être décidé d'un commun accord entre le fournisseur et l'acheteur. ⁱ A la fin des essais de stabilité d'oxydation. ^j La teneur en particules dans les fûts à la livraison de l'huile peut faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et le client, sur la base de références statistiques à la livraison. ^k Au Canada et aux Etats-Unis, où les exigences concernant la résistance à l'oxydation sont plus faibles pour certaines applications, les durées des essais peuvent être réduites à: Pour les huiles faiblement inhibées (T): 164 h; pour les huiles inhibées (I): 332 h. Ces exigences sont de nature permanente. ^l Un FDD de 0,020 max. après 2 h d'oxydation (voir CEI 61125:1992, Méthode C) peut être utilisé pour des applications avec transformateurs de mesure et traversées en THT.			

III.4.3.4. Analyses spécialisées (approfondi) :

Sont des analyses de deux techniques de diagnostic essentiel pour évaluer la santé des transformateurs électrique immergé dans l'huile ; la première concentre sur la dégradation de l'isolation en papier (cellulose) tandis que la deuxième cible spécifiquement l'état de l'huile et la détection de défauts actifs sont comme suit :

- Analyse des furanes [12]
- Analyse des gaz dissous (DGA)

III.5. Méthodes d'interprétation et de diagnostic des analyses d'huile :

L'analyse de l'huile de transformateur est une méthode de maintenance prédictive cruciale, utilisant des techniques physico-chimiques (humidité, acidité, tension interfaciale) et des analyses de gaz dissous (DGA) pour diagnostiquer l'état du diélectrique et des isolants solides.

III.5.1. Analyse des gaz dissous dans l'huile isolant :

L'Analyse des Gaz dissous (DGA) est une méthode de diagnostic des défauts dans les transformateurs. Elle interprète les concentrations de gaz issus de la décomposition de l'huile isolante sous contraintes électriques et thermiques, mesurées par chromatographie en phase gazeuse. On distingue en résultat tous les gaz combustibles (H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO) et non combustibles (CO_2 , N_2 , O_2). Les proportions des gaz permettent de détecter, caractériser et suivre l'évolution des anomalies (points chauds, décharges, etc.). Encadrée par les normes CEI 60599 et IEEE C57-140, la DGA s'appuie sur différentes méthodes : gaz clés, rapports de concentrations (Rogers, Dornenburg) et des rapports graphiques tel que les triangles de Duval [39] [32] [33] [34]

III.5.1.1. Principe de la détection et de la mesure des gaz dissous (chromatographie) :

La chromatographie en phase gazeuse permet de détecter et mesurer les gaz dissous dans l'huile, ainsi que leur concentration en ppm. L'appareil utilisé pour assurer cette opération est le chromatographe, dont les principales compositions sont indiquées dans la figure suivante [Figure III.8] [23]:

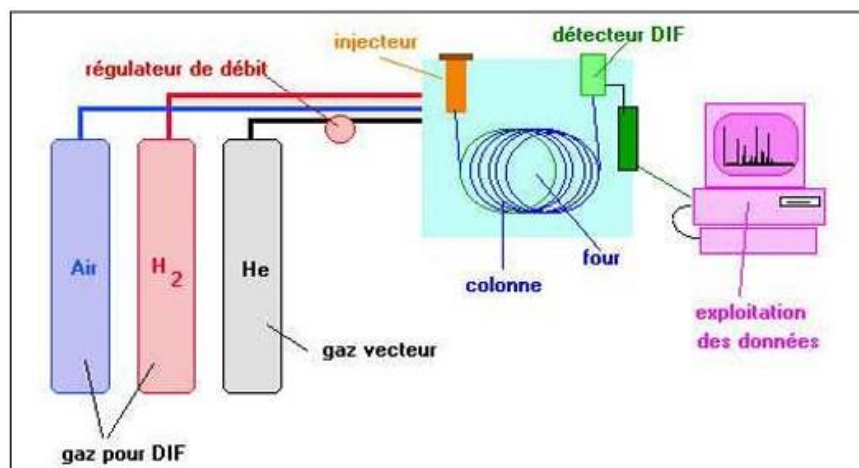


Figure III.8 : Schéma de principe d'un chromatographe en phase gazeuse [23]

➤ Constitution d'un chromatographe :

- Four : qui est une enceinte thermostatée dans laquelle se trouve la colonne.
- Gaz vecteur : dont le choix est conditionné par l'efficacité de la séparation et la sensibilité du détecteur. Il doit être pur et inerte.
- Système d'injection : qui permet d'introduire l'échantillon dans le chromatographe. Il a également un rôle de vaporisation dans le cas d'un Échantillon liquide ou solide.
- Colonne (capillaire ou remplie) : sur laquelle les différentes molécules de l'échantillon injecté vont se séparer.

•Système de détection : qui va permettre de mesurer le signal émis par les différentes molécules et de pouvoir les identifier. Le détecteur à ionisation de flamme (DIF) est le plus utilisé.

➤ **Processus de la chromatographie :**

L'échantillon de l'huile à tester est injecté à l'aide d'une seringue dans la colonne chromatographique qui est placée dans le four. Les constituants de l'huile sont séparés et ensuite détectés à l'aide du détecteur à ionisation de flamme (DIF). Ce signal est envoyé à un ordinateur pour l'exploitation des données [23][Figure III.9].



Figure III.9 : Chromatographe en phase gazeuse

III.5.2. Normes de référence :

Les normes de référence de l'analyse d'huiles des transformateurs les plus fréquentes sont comme suite :

III.5.2.1. IEC (International Electrotechnical Commission) (Technologie) : Organisation mondiale de normalisation pour les technologies électriques et électroniques

- IEC 60296 : Spécifications pour les huiles minérales isolantes neuves [12].
- IEC 60422 : Lignes directrices pour la surveillance et la maintenance des huiles minérales[20].
- IEC 60599 : Analyse des gaz dissous (DGA) pour l'interprétation des défauts [35]
- IEC 60156 : Rigidité diélectrique : Capacité à supporter la tension [12]
- IEC 61198 : pour la détermination du 2-furfural et ses dérivés [28].

III.5.2.2. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) : sont des standards techniques mondiaux essentiels dans l'informatique et l'électronique

- IEEE C57.104 : C'est la principale norme nord-américaine dédiée à l'analyse des gaz dissous (DGA) dans les transformateurs immergés dans l'huile minérale. Elle fournit une méthodologie systématique pour évaluer l'état de santé des transformateurs [33].

III.5.2.3. ASTM International (Anciennement american society for testing and materials) :

est un organisme mondial de normalisation, qui élabore des normes techniques volontaires. Ces standards garantissent la qualité, la sécurité et la performance dans divers secteurs industriels

- ASTM D878 : Test pour les chlorures et sulfates inorganiques.
- ASTM D1298 : Mesure de la densité spécifique [31].

III.5.3. Méthodes classiques d'interprétation des gaz dissous :

L'interprétation des gaz dissous (DGA - *Dissolved Gas Analysis*) dans l'huile des transformateurs repose sur plusieurs méthodes classiques éprouvées ; les plus utilisées suivant les norme international IEC, IEEE et ASTM [31] [33].

III.5.3.1. Méthode des ratios :

La méthode des ratios, utilisée dans le cadre de l'analyse des gaz dissous (AGD ou DGA en anglais) dans l'huile des transformateurs, est une technique de diagnostic prédictif. Elle permet d'identifier le type de défaut (thermique ou électrique) en analysant les proportions relatives de certains gaz générés par la décomposition de l'huile isolante et du papier.

Le [Tableau III.2] ci-dessous présente les gaz clés, et les défauts potentiels responsables de leur production. L'équation (III.1) présente les cinq rapports généralement utilisés. Notons que l'utilisation des rapports de gaz clés dans le diagnostic des défauts a été introduite par Doernenburg puis confirmée par Rogers et la communauté européenne[32]

$$R1 = \frac{CH_4}{H_2}, R2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, R3 = \frac{C_2H_2}{CH_4}, R4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2}, R5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \quad \text{III. 1}$$

Tableau III.2 : Les principaux gaz et les défauts responsables [36]

Gaz	Défauts associés
Acétylène(C ₂ H ₂)	Défaut électrique de haute énergie (arc électrique, étincelles)
Ethylène (C ₂ H ₄)	Défaut thermique caractérisé par une surchauffe locale ; Décomposition thermique de l'huile ou de la cellulose.
Ethane (C ₂ H ₆)	Défaut thermique de faible énergie ; Décomposition thermique de l'huile.

Hydrogène (H ₂)	Défaut électrique de basse énergie (faibles décharges, effet couronne)
Méthane (CH ₄)	Décharges partielles (arcs) ou décomposition thermique de l'huile.
Monoxyde de carbone (CO)	Décomposition de la cellulose.
Dioxyde de carbone (CO ₂)	
Azote (N ₂)	Défaut au niveau de l'échantillon ; Défaut d'étanchéité.
Oxygène (O ₂)	

a) Méthode de Dornenburg :

La méthode de Dornenburg, qui figure parmi les premières approches de diagnostic fondées sur l'analyse des gaz dissous (AGD), repose sur l'évaluation de quatre rapports gazeux (R₁ à R₄). Son utilisation nécessite au préalable le dépassement des seuils minimaux de concentration (L1) des gaz clés suivant la norme IEEE C57.104 [33], définis dans (Tableau III.3). Lorsque cette condition est satisfaite, les rapports sont calculés puis confrontés à des intervalles caractéristiques, ce qui permet de classer les défauts en trois grandes catégories conformément aux critères du [Tableau III.4] et suivant la norme IEEE C57.104 un organigramme englobe les différents défauts traités par la méthode de Dornenburg [Figure III.10].

Tableau III.3 : Conditions de concentration des gaz dissous selon la norme IEEE [33]

Gaz clés	Limites Dornenburg (ppm)	Seuil L1 (ppm)
Hydrogène (H ₂)	200	100
Méthane (CH ₄)	50	120
Éthane (C ₂ H ₆)	35	65
Acétylène (C ₂ H ₂)	5	35
Éthylène (C ₂ H ₄)	80	50
Monoxyde de carbone (CO)	500	350

Tableau III.4 : Méthode de Dornenburg pour le diagnostic de défauts [33]

Type de défaut	$R1 = \frac{CH_4}{H_2}$	$R2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$R3 = \frac{C_2H_2}{CH_4}$	$R4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2}$
Décomposition thermique	> 1	< 0,75	< 0,3	> 0,4
Décharges partielles	< 0,1	Non significatif	< 0,3	> 0,4
Arcs électriques	0,1 – 1	> 0,75	> 0,3	< 0,4

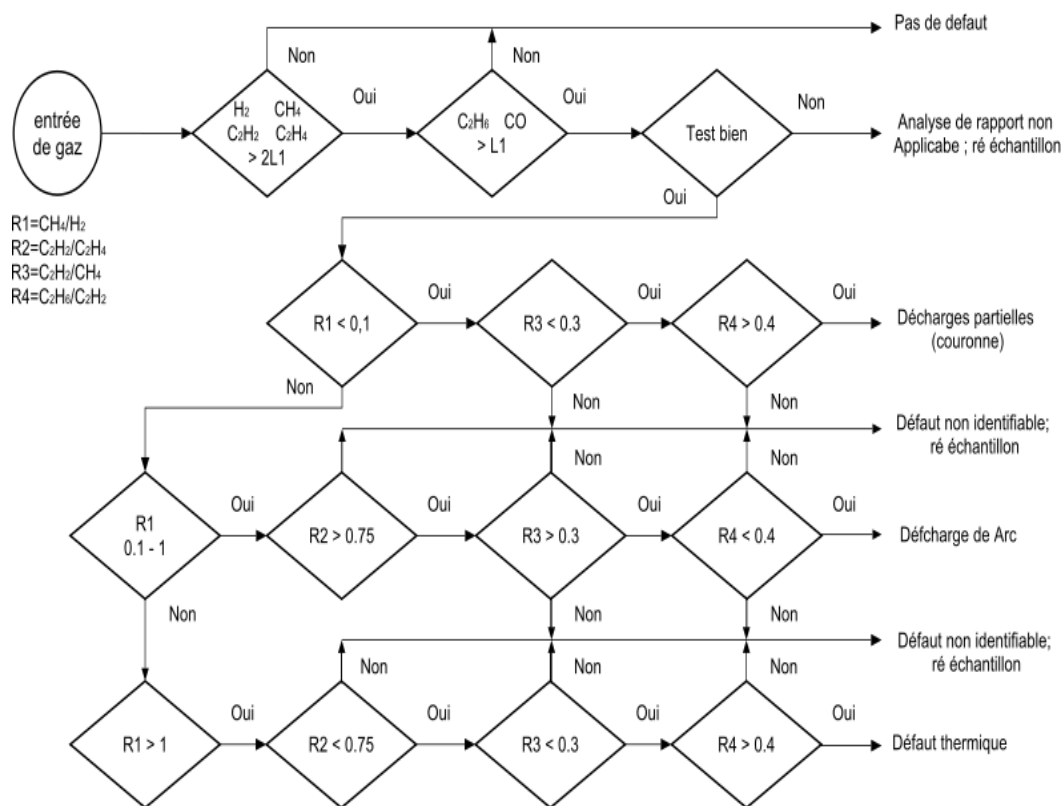


Figure III.10: Organigramme de la méthode de Dornenburg [34]

b) Méthodes de Rogers :

Rogers a initialement défini quatre rapports gazeux : CH_4/H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/C_2H_6 et C_2H_2/C_2H_4 , avant d'éliminer le ratio C_2H_6/CH_4 , jugé insuffisant pour identifier les défauts. La procédure de cette méthode est globalement similaire à celle de Dornenburg.

La principale différence réside dans le fait que la méthode de Rogers s'applique même lorsque les concentrations des gaz restent inférieures aux seuils limites indiqués dans le

Tableau III.5. Comme pour Dornenburg, les ratios de Rogers peuvent parfois s'avérer non interprétables [12].

Rogers a proposé plusieurs codes (0, 1, 2 et 5) pour les ratios. Chaque code correspond à une gamme de variation de chaque ratio. Les gammes des différents ratios ainsi que leurs codes sont illustrés dans le Tableau III.5.

La combinaison de codes pour les quatre ratios à la fois peut être liée à une interprétation diagnostic comme montrée dans le [Tableau III.6] [12]. Et un organigramme de la méthode de Rogers utilisant quatre ratios pour éclaircir les ratios [Figure III.11] [34].

Tableau III.5 : Gammes des ratios et leur code selon Rogers [12]

Ratios des gaz	Gamme	Codes
$R1 = \frac{CH_4}{H_2}$	$R1 \leq 0,1$	5
	$0,1 < R1 < 1$	0
	$1 \leq R1 < 3$	1
	$R1 \geq 0,1$	2
$R2 = \frac{C_2H_2}{CH_4}$	$R2 < 1$	0
	$R2 \geq 1$	1
$R3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$R3 < 1$	0
	$1 \leq R3 < 3$	1
	$R3 \geq 3$	2
$R4 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$R4 < 0,5$	0
	$0,5 \leq R4 < 3$	1
	$R4 \geq 3$	2

Tableau III.6 : Diagnostic de défaut basé sur les codes de Rogers employant quatre ratios [12]

Cas	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	Interprétation
1	0	0	0	0	Normale
2	5	0	0	0	Décharges partielles de faible énergie
3	1~2	0	0	0	Légère surchauffe < 150 °C
4	1~2	1	0	0	Surchauffe de 150 à 200 °C
5	0	1	0	0	Surchauffe de 200 à 300 °C
6	0	0	1	0	Surchauffe au conducteur
7	1	0	1	0	Échauffement causé par la circulation de courant dans les enroulements
8	1	0	2	0	Échauffement causé par la circulation de courant dans le noyau et le réservoir
9	0	0	0	1	Arc de faible énergie
10	0	0	1~2	1~2	Arc de grande énergie
11	0	0	2	2	Étincelle continue, arc
12	5	0	0	1~2	Décharges partielles

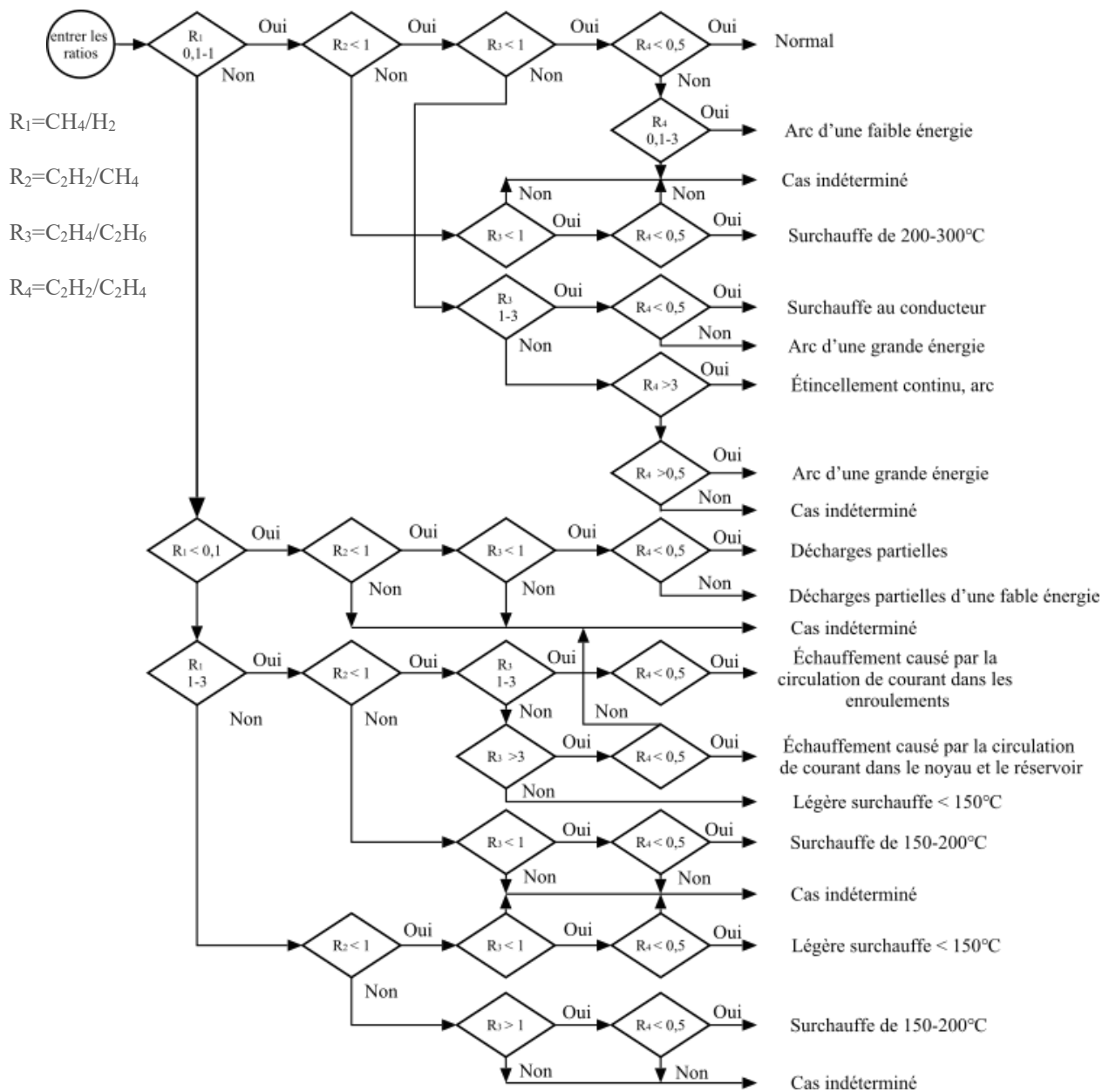


Figure III.11 : Organigramme de la méthode de Rogers utilisant quatre ratios [34]

c) Méthodes de IEC 60599 : La norme fournit des méthodes d'interprétation de l'analyse des gaz dissous (DGA) dans l'huile minérale des matériels électriques (transformateurs, réactances). Elle permet de diagnostiquer les défauts internes (surchauffes, arcs, décharges partielles) en analysant les concentrations de gaz, principalement via la méthode des rapports de Rogers et des triangles de Duval [35].

Cette méthode se base sur les mêmes rapports de gaz utilisés dans celle de Rogers. Cependant, six défauts sont considérés et sont désignés par les indications suivantes :

DP : décharges partielles.

D1 : décharges électriques de faible énergie.

D2 : décharges électriques de forte énergie.

T1 : défaut thermique $T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

T2 : défaut thermique $300\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

T3 : défaut thermique $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Rapports fondamentaux de gaz : Chacune des six grandes classes de défauts donne naissance à une composition caractéristique en hydrocarbures gazeux, qui peut être mise sous la forme d'une table d'interprétation des DGA, telle que celle recommandée dans le Tableau III.7, et en utilisant trois rapports de gaz fondamentaux :

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad \frac{CH_4}{H_2} \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Tableau III.7 : Table d'interprétation de DGA[35]

Cas	Défaut caractéristique	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
DP	Décharges partielles	NS ^{a)}	< 0,1	<0,2
D1	Décharges de faible énergie	> 1	0,1 – 0,5	> 1
D2	Décharges de forte énergie	0,6-2,5	0,1 – 1	> 2
T1	Défaut thermique $T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	NS ^{a)}	> 0,1	< 1
T2	Défaut thermique $300^{\circ}\text{C} < T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	< 0,1	> 1	1 – 4
T3	Défaut thermique $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,2 ^{b)}	> 1	> 4
a) NS = Non significatif, quelle que soit la valeur. b) une valeur croissante de C_2H_2 peut indiquer que le point chaud est à une température supérieure à $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.				

III.5.3.2. Méthodes graphiques :

a) Le triangle de Duval : est un outil graphique qui identifie les défauts dans les transformateurs à l'aide de trois axes représentant les pourcentages de gaz. Sur les sept versions existantes, quatre (versions 1, 2, 4 et 5) s'appliquent aux transformateurs à **huile minérale**, et trois (version 3,6 et 7) s'applique aux transformateurs à huile végétale ; chaque version utilisant trois gaz spécifiques (C_2H_2 , CH_4 et C_2H_4) pour un cas de défaut bien défini [34].

On distingue les quatre (versions 1,2,4 et 5) des triangles de Duval pour l'huile minérale comme suit :

▪ **Triangle 1 de Duval** : il emploie les gaz (C_2H_2 , CH_4 et C_2H_4). Cette version est très fiable pour le diagnostic de transformateurs et les câbles qui utilisent l'huile minérale comme isolante. Sept zones forment le triangle 1 [Figure III.12] et sont : **DP**, **D1**, **D2**, **T1**, **T2**, **T3** et **DT** qui représentent les défauts mixtes thermique et électrique. [34]

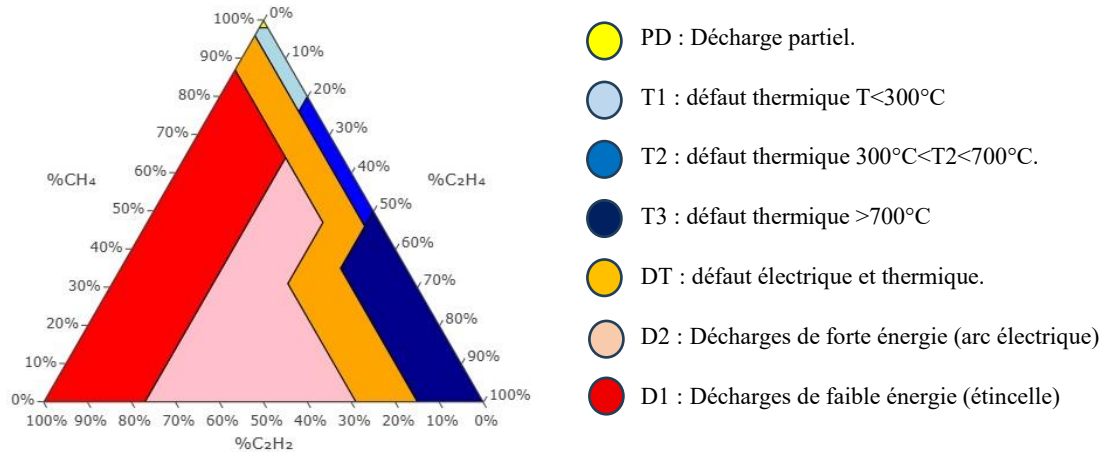


Figure III.12 : Triangle 1 de Duval [37]

▪ **Triangle 2 de Duval** : Il emploie les gaz (C_2H_2 , CH_4 et C_2H_4). Cette version est applicable dans le cas des changeurs de prises (des transformateurs). Six zones forment le triangle 2 et sont présentées à la Figure III.13 : **D1**, **T2**, **T3**, **N** (opération normale), **X1** (défaut **T3** ou **T2** en progrès, ou arc grave anormal **D2**) et **X3** (arc anormal **D1** ou défaut thermique en progrès). [34]

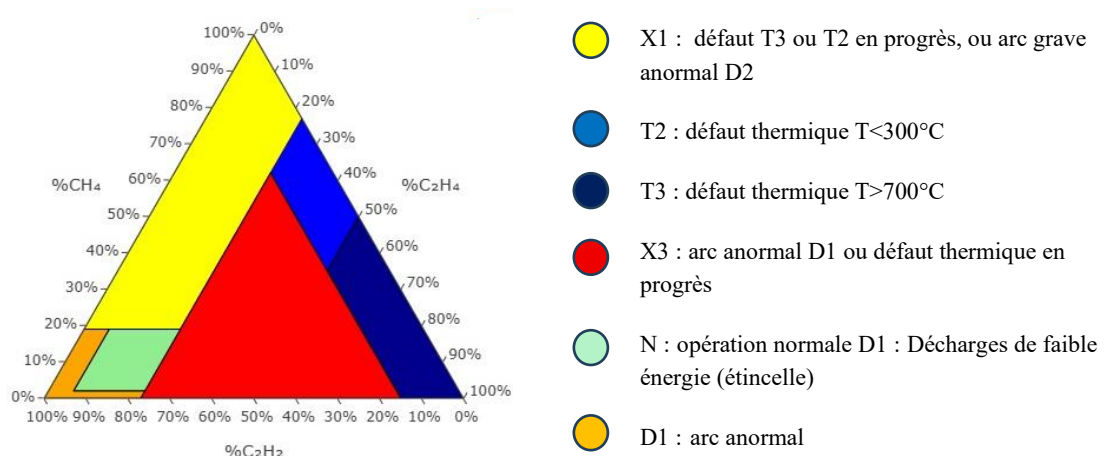
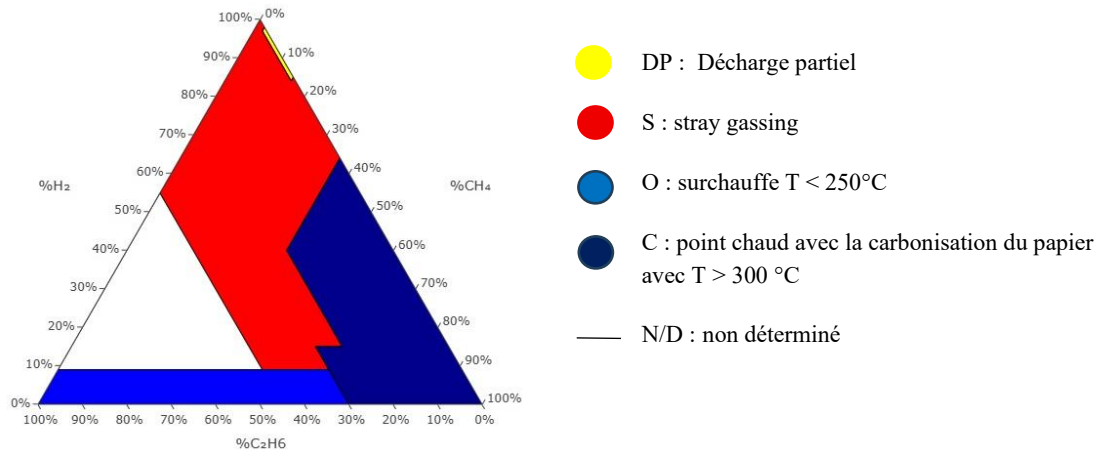


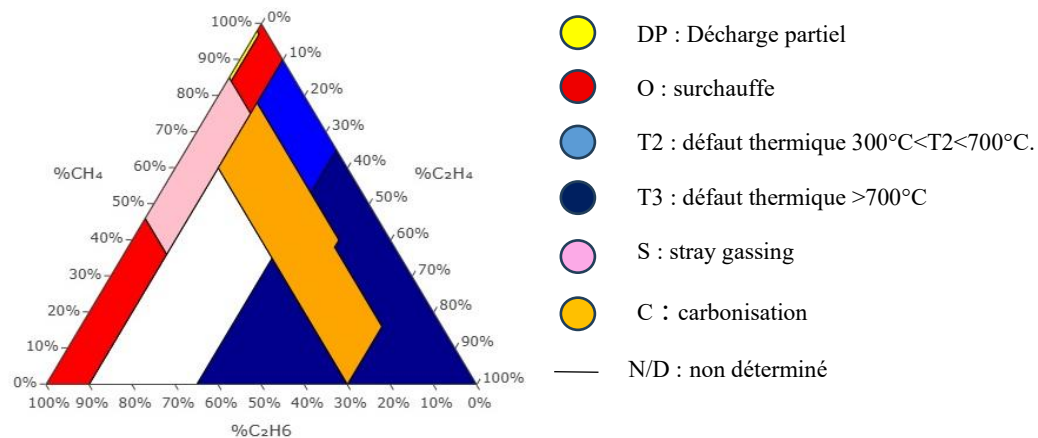
Figure III.13 : Triangle 2 de Duval [37]

▪ **Triangle 4 de Duval** : Il emploie les gaz (H_2 , CH_4 et C_2H_6). Cette version est développée spécialement pour les défauts de basse température (DP, T1 et T2. Cinq zones forment le triangle 4 [Figure III.14] et sont : **DP**, **S** : Dégagement gazeux (*stray gassing*), **C** (point chaud avec la

carbonisation du papier avec $T > 300\text{ °C}$), **O** (surchauffe $T < 250\text{ °C}$) et la zone **N/D** (non déterminé).



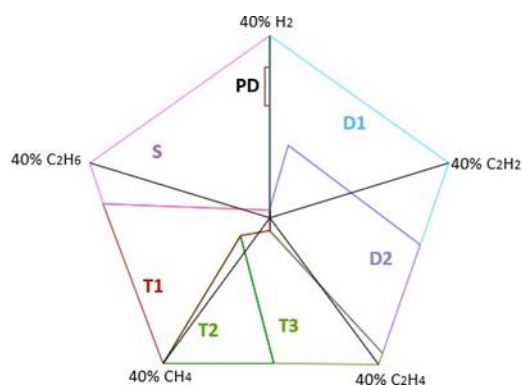
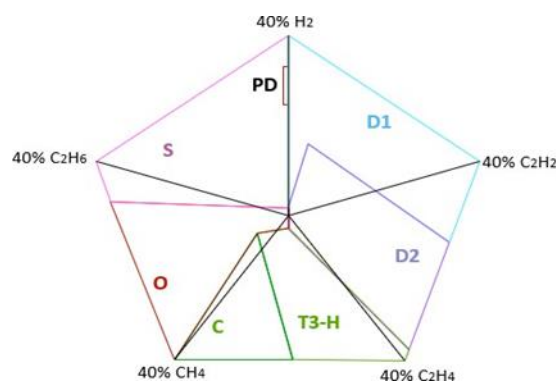
▪ **Triangle 5 de Duval** : Il emploie les gaz (CH_4 , C_2H_4 et C_2H_6). Cette version est développée spécifiquement pour les défauts thermiques engendrant une surchauffe de l'huile minérale et la carbonisation du papier. Six zones forment le triangle 5 et sont [figure III.15] : PD, T3, T2, et S, C, O, et la zone N/D (non déterminé). [34]



b) Pentagone de Duval : Le pentagone de Duval, est une méthode graphique dérivée du triangle de Duval, permettant une représentation simultanée des cinq principaux gaz dissous : H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 et C_2H_6 . Cette méthode se décline en deux variantes : Pentagone I et Pentagone II [Figure III.16 et Figure III.17], chacune prenant en compte sept types de défauts. Le Pentagone I reprend les six défauts définis par la norme CEI 60599 (**PD, D1, D2, T1, T2, T3**), et y ajoute un septième, le "stray gassing" (S), officiellement intégré à la norme CEI 60599 en 2015 [35](tableau III.8)

Tableau III.8 : Types de défauts pour les deux versions du pentagone de Duval [34]

Pentagone I de Duval	Pentagone II de Duval
PD : décharges partielles	PD : décharges partielles
D1 : décharges à faible énergie	D1 : décharges à faible énergie
D2 : décharges à forte énergie	D2 : décharges à forte énergie
T3 : défauts thermiques > 700 °C	T3-H : défaut thermique T3-H dans huile uniquement
T2 : défauts thermiques 300 °C à 700 °C	C : défauts thermiques T3-C, T2-C et T1-C avec carbonisation du papier
T1 : défauts thermiques < 300 °C	O : surchauffe T1-O < 250 °C
S : stray gassing	S : stray gassing

**Figure III.16 :** Pentagone I de Duval**Figure III.17 :** Pentagone II de Duval [34]

III.6. Optimisation des résultats d'analyse d'huile des transformateurs :

Sur la base des résultats des analyses physico-chimiques, une optimisation du fonctionnement du transformateur est envisageable, accompagnée de recommandations précises destinées à préserver son état, à garantir son exploitation dans des conditions optimales de service et à maximiser sa durée de vie utile.

III.6.1. Étude expérimentale :

III.6.1.1. Présentation du parc et donnés du transformateur :

L'analyse a été faite au niveau du laboratoire SONELGAZ SERVICE : Département approvisionnement et laboratoires d'analyse des huiles des transformateurs de SONALGAZ (Alger) ; l'échantillon est prélevé suivant la norme IEC 60475 [29] du centre nord de SONALGAZ de Hassi Messaoud ; Ouargla.

Caractéristique du transformateur de puissance analysé :

- Provenance : HMN3
- Type d'équipement : TPN°2
- Puissance : 300 MVA
- Tension : 15.5/400 kV
- N° de série : 106801
- Température de prélèvement : 67°C
- Point de prélèvement : Bas de Vanne

Les données de l'analyse des gaz dissous (DGA) sont présentées dans le tableau suivant [Tableau III.9] :

Tableau III.9 : Résultats de DGA de l'échantillon prévenance HMN3 (Hassi Messaoude nord 3) du transformateur

Constituants	Valeurs mesurées en ppm selon ASTM 3612	Valeurs typiques en ppm Selon CEI 60599 [39]
H ₂ (Hydrogène)	<S	50-150
CH ₄ (Méthane)	87	30-130
CO (Monoxyde de carbone)	139	400-600
CO ₂ (n Dioxyde de carbone)	6410	3800-14000
C ₂ H ₄ (Ethylène)	<S	60-280
C ₂ H ₆ (Ethane)	188	20-90
C ₂ H ₂ (Acétylène)	13	2-20
O ₂ (Oxygène)	-	-
N ₂ (Azote)	-	-

<S : moins que la valeur typique selon la norme IEC 60599

III.6.1.2. Interprétation des résultats :

Suivant les normes IEC 60599 [39] et IEEE C57.104-2019 [43] par les méthodes de ratios IEC 60599 et Rogers et les méthodes graphiques de Duval

Les ratios les plus utilisées sont :

$$R1 = \frac{CH_4}{H_2}, R2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, R3 = \frac{C_2H_2}{CH_4}, R4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2}, R5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

a) Méthode de IEC 60599 : les ratios caractéristique (Tableau III.7) R1, R2 et R5

$$R1 = \frac{CH_4}{H_2} \text{ indéfini } (H_2 < S)$$

$$R2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \text{ indéfini } (C_2H_4 < S)$$

$$R5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \text{ indefini } (C_2H_2 < S)$$

S : moins que la valeur typique selon la norme IEC 60599

Suivant le tableau précédent (III.7) des caractéristiques des ratios de la norme IEC 60599 nous avons trouvé :

R1, R2 et R5 d'une valeur non significative et donc l'anomalie est **indéterminée**.

b) Méthode de Rogers : D'après les ratios caractéristiques utilisés (tableau III.5) et l'organigramme (figure III.4) nous avons obtenu :

$$R1 = \frac{CH_4}{H_2} \text{ indéfini } (H_2 < S) \rightarrow \text{code 0}$$

$$R2 = \frac{C_2H_2}{CH_4} = 0.15 \rightarrow \text{code 1}$$

$$R3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \text{ indefini } (C_2H_4 < S) \rightarrow \text{code 0}$$

$$R4 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \text{ indefini } (C_2H_4 < S) \rightarrow \text{code 0}$$

Suivant le tableau III.5 caractéristiques des ratios on a le code (0,1,0,0) :

R2 = 0.15 ppm, R1, R3 et R4 d'une valeur non significative on se trouve dans le :

Cas 5 = Surchauffe de 200 à 300 °C

c) Méthode du triangle de Duval : suivant la norme IEEE C57.104

Triangle 1 de Duval : CH₄, C₂H₂, C₂H₄

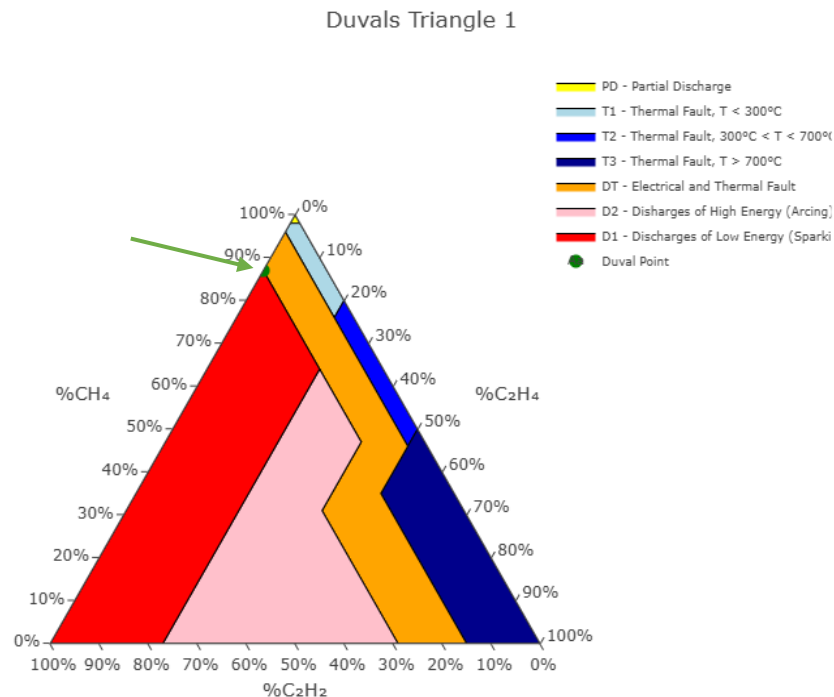


Figure III.18 : Présentation des résultats sur le triangle 1 de Duval[37]

Diagnostic : D1 : Décharges de faible énergie (étincelle) [Figure III.18]

On calcule le triangle 4 de Duval suite au **Surchauffe de 200 à 300 °C** résulte au méthode Rogers.

Exploitant les trois gazes suivant (H_2 , CH_4 et C_2H_6) on obtient :

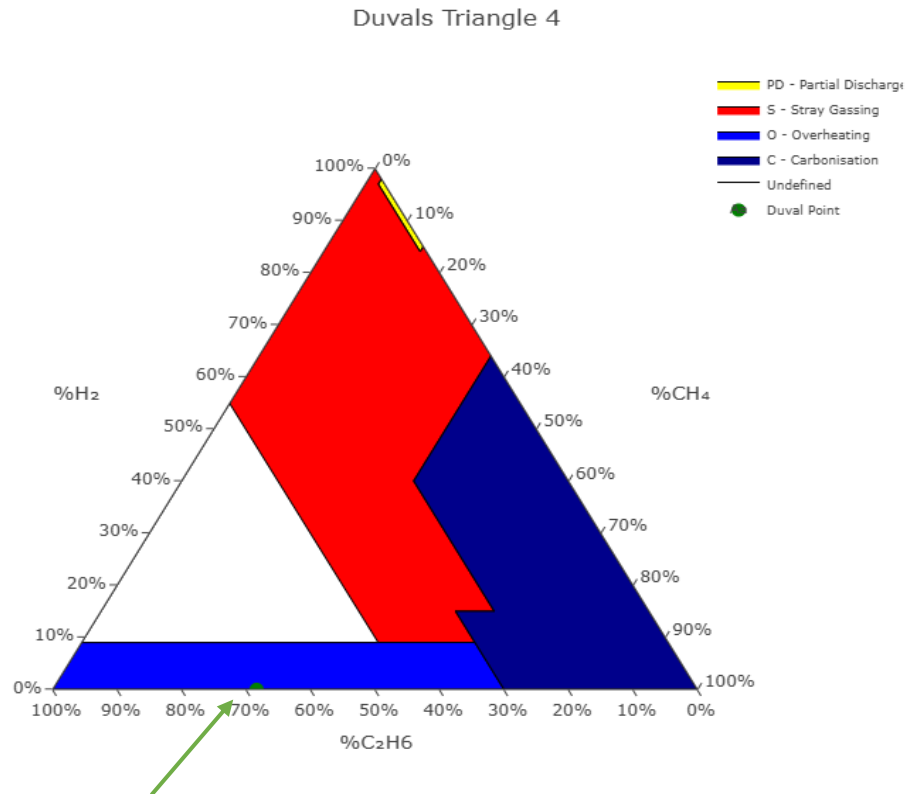


Figure III.19 : Présentation des résultats sur le triangle 4 de Duval[37]

Diagnostic : O : surchauffe $T < 250^{\circ}C$ [Figure III.19]

III.6.1.3. Diagnostic final et recommandations :

Suite aux résultats des trois méthodes :

- Méthode de IEC 60599 : défaut indéterminé
- Méthode de Rogers : Cas 5 = Surchauffe de 200 à 300 °C
- Triangle 1 de Duval : D1 : Décharges de faible énergie (étincelle)
- Triangle 4 de Duval : Surchauffe $T < 250^{\circ}C$

➤ Résultat du diagnostic :

L'ensemble des méthodes de diagnostic convergent vers l'identification d'un surchauffage a une température $< 250^{\circ}C$ avec des piques entre $200^{\circ}C$ et $300^{\circ}C$ due à une décharge électrique à faible énergie (étincelle) suite à un début de décomposition de l'isolant solide ou la présence de l'humidité. Le surchauffage d'huile engendre la formation de l'Ethane C_2H_6 suite au décomposition thermique d'huile.

➤ Recommandation :

- Filtration et dégazage d'huile du transformateur
- Vérification de l'ensemble des enroulements cherchant à une dégradation de l'isolant
- Faire une analyse furaniques et comptage des particules pour confirmer les résultats de DGA.
- Eviter la surcharge électrique du transformateur pour limiter l'augmentation de la température et donc la dégradation de l'isolant solide.

III.7. Conclusion :

Ce chapitre traite le contrôle des transformateurs de puissance par l'analyse d'huile isolante, une méthode de surveillance non destructive essentielle pour détecter précocement les anomalies.

L'isolation des transformateurs est assurée par un système mixte (papier, carton, bois et huile minérale), l'huile jouant également un rôle de refroidissement. La dégradation de l'huile et du papier cellulosique résulte de contraintes thermiques, électriques et chimiques (oxydation, hydrolyse, contamination) produisant des gaz dissous, des dérivés furaniques et des boues.

Les techniques d'analyse incluent des essais et des mesures spécialisées physico-chimiques (tension de claquage, acidité, teneur en eau, viscosité), tel que la chromatographie gazeuse (DGA) pour mesurer les gaz dissous (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO , etc.).

L'interprétation des résultats repose sur des méthodes normalisées (IEC 60599, IEEE C57.104) détaillées dans ce chapitre : méthodes des ratios (Dornenburg, Rogers), triangles de Duval (versions 1-4) et pentagones de Duval. Une étude expérimentale sur un transformateur 300 MVA a été réalisée et montre après l'application rigoureuse des méthodes d'analyse spécialisées des résultats précis et fiables. L'exploitation meilleure de ces résultats est notre objectif principal car il nous aide fortement à optimiser l'élimination rationnelle de n'importe quelle anomalie interne susceptibles d'affecter les transformateurs de puissance.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'analyse d'huile isolante des transformateurs de puissance constitue une avancée stratégique majeure dans la maintenance préventive. Ce travail a permis de démontrer que cette technique, intégrée dans une démarche de maintenance conditionnelle, transforme profondément l'approche traditionnelle de la surveillance des équipements.

À travers l'étude des transformateurs THT/HT, il apparaît clairement que ces équipements, bien que robustes, restent sensibles aux contraintes thermiques, électriques et environnementales. Leur conception complexe nécessite une surveillance adaptée pour prévenir les défaillances.

L'intégration des méthodes de contrôle non destructif, et plus particulièrement de l'analyse physico-chimique de l'huile isolante, s'impose comme une réponse pertinente aux limites des approches calendaires ou purement correctives. Les différentes techniques d'analyse offrent une vision précise de l'état interne du transformateur sans jamais l'endommager.

Les méthodes normalisées d'interprétation (méthodes des ratios, triangles de Duval, pentagones) permettent de diagnostiquer avec fiabilité les défauts naissants, qu'ils soient d'origine thermique ou électrique. Cette approche rend la maintenance à la fois plus proactive et plus efficace.

Ainsi, déployée dans un contexte industriel contraignant, comme celui du Sud algérien, marqué par des contraintes climatiques extrêmes et un enclavement géographique, cette stratégie de surveillance contribue directement à :

- L'optimisation des coûts d'exploitation et de maintenance,
- L'allongement de la durée de vie des transformateurs,
- La sécurisation de la continuité de service du réseau électrique.

Par ailleurs les recherches et la réalisation du projet a était renforcé par un stage pratique ont été essentiels pour concrétiser cette approche. Ils ont permis, grâce à une immersion terrain au sein d'un environnement industriel contraignant, de mettre en œuvre les protocoles normalisés d'analyse physico-chimique et d'interpréter les résultats via les méthodes normaliser. Cette expérience pratique a non seulement renforcé la compréhension de l'analyse des huiles des transformateurs, mais a également démontré la faisabilité et l'efficacité de la maintenance conditionnelle dans des conditions opérationnelles réelles, confrontant la théorie aux aléas du terrain. Ainsi, le stage a constitué un cadre d'apprentissage et d'application indispensable

En conclusion, l'analyse d'huile ne se limite pas à un outil de diagnostic, mais elle devient aussi un levier de pilotage stratégique pour la maintenance des transformateurs de puissance, conciliant la performance technique, la sécurité et la rentabilité économique.

Bibliographie

Bibliographie :

- [1] AISSAOUI Ahmed, “planification des réseaux électriques de distribution pour une présence massive de la génération d’énergie dispersée,” génie électrique, Sidi-bel-abbes, 2016.
- [2] Erwan Le Pelleter and E. Le, “Outil d’électronique de puissance pour le maillage / bouclage des réseaux de distribution : application au contrôle des flux de puissance et la limitation des courants de court-circuit,” institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- [3] Norme internationale IEC, “IEC 60076-1 Transformateurs de puissance – Partie 1 : Généralités,” International Electrotechnical Commission, 2011.
- [4] Jean SANCHEZ, “Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance,” Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [5] Syndicat départemental d’électricité des Vosges, “Le parcours de l’électricité.” Accessed : Mar. 29, 2026.
- [6] MEDJEBAR Ilyes and OUINHAROUN Ghilas, “Transmission sans fils d’énergie électrique par voie d’induction magnétique,” Université Abderrahmane mira -Bejaia, Bejaia, 2016.
- [7] M. SALLAH, “Transformateur électrique,” support de cours du module Electrotechnique appliquée 2023.
- [8] BETTACHE Fahima, “Etude des diverses configurations des transformateurs triphasés et calcul des courants magnétisants,” Master, Electromécanique.
- [9] CHAOUCH Souad, “Electrotechnique fondamentale 2,” support de cours 2023.
- [10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_%C3%A9lectrique
- [11] Norme internationale IEC, “IEC 60076-2 : Temperature rise-Part 2,” 1993.
- [12] Norme internationale IEC, “IEC 60296 : Fluides pour applications électrotechniques- Huiles minérales isolantes pour matériel électrique” Jun. 2020
- [13] François. Monchy and Jean-Pierre Vernier, Maintenance : Méthodes et organisations Ed. 3. Dunod, 2010.
- [14] ACHAIBOU Said and SABO Khaled, “Maintenance et protection d’un transformateur de puissance,” Master, Electromécanique, BOUMERDES, 2023.
- [15] Cyril Ravat, “Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux pour le contrôle non destructif,” Docteur en sciences, physique, Paris, 2014.

- [16] Houcine MERZOUK, “CONTROLES NON DESTRUCTIFS CND.” support de cours module CND
- [17] Adnene TLILI, Sofien MARZOUKI, Mohamed NAJIB SAÏDI, and Faouzi MOHAMED KAROUI, “Contrôles non destructifs,” support de cours 2005
- [18] <https://www.cmseddyscan.com/wp-content/uploads/2016/08/Sch%C3%A9ma-principe-Ultrasons.png>
- [19] ARAB Mustapha, “contribution à l’amélioration de la maintenance prédictive dans l’industrie,” Master, Sciences de L’Ingéniorat, 2019
- [20] Norme internationale IEC, “IEC 60422 Huiles minérales isolantes dans les matériels électriques- lignes directrices pour la maintenance et la surveillance,” Jan. 2013,
- [21] Betie Amidou, “impacts de la qualité du système d’isolation sur la condition et l’efficacité des transformateurs de puissance,” Doctorat en ingénierie, Chicoutimi, 2015.
- [22] A. Jeanneton, “Transformateurs de mesure immergés haute tension : nouveaux matériaux isolants et diagnostic,” DOCTEUR, LYON, 2023.
- [23] Safia KHEMRI and Lila BESSEGHIR, “Protection des transformateurs MT/BT contre les surtensions de foudre,” Master académique, Sciences et technologies, Tizi-ouzou, 2014.
- [24] Mme SMILI Karima, “Etude des propriétés diélectriques des matériaux isolants soumis à des champs très intenses,” doctorat en sciences, électromécanique, 2018.
- [25] Ikram LOUNNAS and Smail LARBI, “Etude des caractéristiques de l’huile minérale de transformateur,” Électrotechnique, 2024.
- [26] KOUTOUA Simon kassi, “Etude de l’isolation hybride en vue de son application dans les transformateurs de puissance,” Ingénierie, Québec, 2013.
- [27] ABES Khouloud, “Diagnostic des défauts de transformateurs par l’analyse des gaz dissous (AGD),” Pour l’obtention du diplôme d’Ingénieur, 2025.
- [28] Norme internationale IEC, “IEC 61198 Huiles minérales isolantes-Méthodes pour la détermination du 2-furfural et ses dérivés,” Sep. 1993.
- [29] Norme internationale IEC, IEC 60475 Méthode d’échantillonnage des liquides isolants, 2.0. International Electrotechnical Commission, 2011.
- [30] Norme internationale IEC, “IEC 60247 Liquides isolants – Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) et de la résistivité en courant continu,” 2004.

- [31] Norme internationale IEC, “IEC 60814 Isolants liquides-Cartons et papiers imprégnés d’huile-Détermination de la teneur en eau par titrage coulométrique de Karl Fischer,” 1997.
- [32] T. Committee of the IEEE Power Engineering Society, “C57.140-2006 Guide for the Evaluation and Reconditioning of Liquid Immersed Power Transformers,” 2007.
- [33] Ibrahim B. M. Taha, “Refining DGA Methods of IEC Code and Rogers Four Ratios for Transformer Fault Diagnosis,” 2016,
- [34] Abdellah KERROUCHE, “Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance à partir de l’analyse des dissous,” Ingénieur d’Etat, 2019.
- [35] Norme internationale IEC, “IEC 60599 Matériels électriques remplis d’huile minérale en service – Lignes directrices pour l’interprétation de l’analyse des gaz dissous et des gaz libres,” 2015
- [36] Institute of electrical and electronic engineers, *C57.104-2019* - IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. IEEE, 2019.
- [37] <https://powertransformerhealth.com/free-tools/>

حول فريق الاشراف وفريق العمل :

فريق الاشراف :

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

فريق العمل :

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالب: مسايلى عبد الله	صيانة صناعية	قسم الالية والكهروميكانيك
الطالب: بلـكـبير ادريس	صيانة صناعية	قسم الالية والكهروميكانيك

• شكر وتقدير

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله رب العالمين الذي بنعمته تتم الصالحات، وبه نستعين على إنجاز الأعمال، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

بعد تمام هذا الجهد المتواضع، وببلوغنا نهاية هذا العمل الذي كان ثمرة تعاون وجد واجتهاد، يتقدم فريق الطلبة بأسمى آيات الشكر والعرفان والامتنان إلى كل من ساهم ولو بكلمة أو دعم أو توجيه في إنجاز هذه المذكرة التي تتناول مشروع إنشاء مخبر تحليل زيوت المحولات الكهربائية في جنوب الجزائر.

فبكل فخر واعتزاز نتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى أساتذتنا الأفاضل والي فريق مركز تطوير المقاولاتية، الذين لم يبخلوا علينا بوقتهم ونصحهم وتوجيهاتهم القيمة طيلة فترة إنجاز هذا العمل، فقد كانوا خير دليل ومعين لنا، فجزاهم الله عنا خير الجزاء.

كما نتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى السادة أعضاء اللجنة الموقرة الذين قبلوا مناقشة هذه المذكرة وتقييمها، راجين من الله أن نكون قد وفقنا في تقديم عمل يليق بمقامهم العلمي الرفيع.

ولا يفوتنا أن نعبر عن عميق شكرنا وتقديرنا لكل من:

إدارة جامعة غرداية وكلية العلوم والتكنولوجيا وقسم الآلية والكهروميكانيك ومركز تطوير المقاولاتية، على ما وفرتة لنا من ظروف ملائمة للدراسة والتعلم.

كل من قدم لنا يد العون والمشورة من أصدقاء وزملاء، سواء بتزويدنا بمعلومات أو نصائح قيمة ساهمت في إغناء هذا العمل.

كل المؤسسات والمراجع التي أفدنا منها في إعداد هذه الدراسة، وعلى رأسها مجمع سونلغاز وسوناطراك.

نسأل الله العلي القدير أن يكون هذا العمل المتواضع خالصاً لوجهه الكريم، وأن ينفع به، وأن يجعله في ميزان حسناتنا يوم القيامة. كما نرجو من الله أن يكون هذا المشروع نواة لمشاريع حقيقية على أرض الواقع تساهم في خدمة الاقتصاد الوطني وتوفير فرص العمل للشباب الجزائري.

إن كان توفيقاً فمن الله وحده، وإن كان خطأ أو تقصيراً فمن أنفسنا والشيطان، ونستغفر الله من كل زلل وخطيئة.

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.

• ملخص

يهدف هذا المشروع إلى إنشاء مخبر متخصص لتحليل زيوت المحولات الكهربائية في ولاية غرداية بالجنوب الجزائري لكونه همزة وصل بين الشمال والجنوب، وذلك لسد الفجوة الكبيرة التي تعاني منها المنطقة جراء غياب مثل هذه المخابر رغم تواجد آلاف المحولات التابعة لمؤسسات كبرى.

يقوم المشروع على فكرة تقديم خدمات مخبرية دقيقة تشمل تحليل الغازات الذائبة (DGA)، قياس الرطوبة، جهد الانهيار، الحموضة، اللزوجة، والضياعات الكهربائية، مع إمكانية معالجة الزيت واسترجاع خصائصه.

الكلمات المفتاحية: مخبر تحليل، زيت المحولات، تحليل الغازات الذائبة DGA، الصيانة الوقائية، المقاولاتية، جنوب الجزائر.

Résume :

Ce projet vise à créer un laboratoire spécialisé dans l'analyse des huiles des transformateurs électriques dans la wilaya de Ghardaïa, dans le sud algérien, car cette région constitue un carrefour entre le nord et le sud. L'objectif est de combler le grand vide dont souffre la zone en raison de l'absence de tels laboratoires, malgré la présence de milliers de transformateurs appartenant à de grandes institutions.

Le projet repose sur l'idée de fournir des services de laboratoire précis incluant l'analyse des gaz dissous (DGA), la mesure de l'humidité, la tension de claquage, l'acidité, la viscosité et les pertes électriques, avec la possibilité de traiter l'huile et de restaurer ses propriétés.

Mots-clés : laboratoire d'analyse, huile de transformateur, analyse des gaz dissous (DGA), maintenance préventive, entrepreneuriat, Sud algérien.

Abstract :

The maintenance of high-voltage power transformers (HV) is a critical issue for the reliability and cost-effectiveness of electrical networks. Insulating oil analysis has become an indispensable tool for optimizing maintenance strategies, whether predictive or corrective.

Transformer oil analysis shifts maintenance from a calendar-based or reactive approach to a condition-based, data-driven approach.

By providing a clear picture of the equipment's internal condition, it optimizes both aspects of maintenance : it makes predictive maintenance more accurate and proactive, and corrective maintenance faster and more effective. This intelligent strategy maximizes asset availability, minimizes life-cycle costs, and enhances the safety of the electrical grid.

Keywords : Oil analysis ; Chromatography ; Predictive maintenance ; Transformer diagnostics ; Condition monitoring ; Reliability

الفصل الأول:

الإطار التمهيدي للمشروع وفكرته

1. مقدمة عن المقاولاتية وأهمية المشاريع المصغرة

1.1. دوافع المقاول

- الرغبة في الاستقلالية: التحرر من تبعية الوظيفة واتخاذ القرارات بنفسه.
- تحقيق الذات والطموح: ترجمة فكرة أو ابتكار إلى واقع ملموس.
- تحسين الدخل: السعي لزيادة الأرباح مقارنة بالراتب الثابت.
- استغلال فرصة سوقية: وجود طلب غير مشبع على منتج أو خدمة معينة.
- صعوبة التوظيف: كبديل عملي عن البحث الطويل عن عمل.
- الرغبة في المساهمة الاقتصادية: خلق فرص عمل، وتنشيط الاقتصاد المحلي.

2.1. مصادر فكرة المشروع

استندت فكرة إنشاء مخبر تحليل زيت المحولات الكهربائية في جنوب الجزائر إلى مصادرين رئيسيين: المصدر التقني يتمثل في كون زيت المحولات يتدهور بمرور الوقت منتجاً غازات ذائبة ورطوبة ومركبات حمضية، مما يجعل تحليل الغازات الذائبة (DGA) الأداة الأكثر فعالية للكشف المبكر عن الأعطال قبل حدوثها، وهو ما تفرضه المعايير العالمية (IEC، ASTM) كإجراء دوري إلزامي. المصدر السوقي يتمثل في وجود فجوة حقيقية في جنوب الجزائر، حيث تعاني مؤسسات سونلغاز وسوناطراك من غياب مختبرات متخصصة في المنطقة، مما يضطرها لإرسال العينات إلى الشمال بتكاليف باهظة وزمن طويل يصل إلى أسابيع.

3.1. أهمية المشروع

يعد مشروع إنشاء مخبر تحليل زيت المحولات الكهربائية في الجنوب الجزائري ذو استراتيجيات متعددة الأبعاد تمتد من حماية الأصول الصناعية الضخمة التي تحقق عوائد اقتصادية ملموسة وصولاً إلى حماية البيئة من الملوثات الخطيرة

أهمية صناعية

تشكل المحولات الكهربائية القلب النابض لشبكات نقل وتوزيع الكهرباء وتعتمد موثوقيتها بشكل كبير على جودة الزيت العازل وبذلك يحمي الأصول الحوية ويطيل في العمر التشغيلي للمحولات

أهمية اقتصادية

تمثل المحولات الكبيرة استثمارات راس مالية ضخمة تصل تكلفة الواحدة منها إلى ملايين الدولارات لذلك يجب تجنب الخسائر الفادحة الناجمة عن الأعطال وتعزيز الاقتصاد الدائري عبر إعادة التكرير وتوفير العملة الصعبة وتقليل الاستيراد

أهمية بيئية

يعد الجانب البيئي من أهم الجوانب الأساسية في مشروعنا حيث يقوم بتقليل ومنع الملوثات عن طريق التخلص من الزيوت المستعملة الغير سليمة

2. وصف فكرة المشروع

1.2. تسمية المشروع



TRANSLAB

2.2. موقع المشروع

يقع المقر الرئيسي في ولاية غرداية (على الطريق الوطني رقم 1 شمال جنوب)
وقد قمنا بختيار هذا الموقع للأسباب التالية:
سهولة وصول العملاء
ولاية غرداية تعد همزت وصل بين الولايات الجنوبية
عدم وجود مخبر في الولاية
نقص شديد للمخابر في الولايات الجنوبية

3.2. وصف الخدمة

تقدم شركتنا خدمات تحليل زيت المحولات الكهربائية بشتى أنواعها بما في ذلك عملية معالجة الزيت (تصفية)
واسترجاع خصائصه

4.2. مميزات خدماتنا عن الخدمات المشابهة:

تتميز شركتنا عن باقي الشركات بما يلي:

- وجود فريق عمل كفى يقوم بالذهاب الى العميل واخذ العينة الأولية وفقا للمعايير.
- السرعة في عمليات التحليل.
- الدقة في النتائج وانشاء تقرير مفصل عن حالة الزيت والمحول مع إعطاء الحلول الواجب اتخاذها.
- وجود تطبيق يربط شركتنا بالعملاء من اجل معرفة حالة العينات (مراحل تقدم انجاز التحاليل).
- تقديم الخدمة بمبالغ تنافسية.

5.2. مراحل الإنتاج + التجهيزات والعتاد اللازم

العتاد اللازم	مراحل الإنتاج
سيارة مجهزة (أدوات اخذ العينات + قوارير زجاجية خاصة)	جلب العينات
- جهاز قياس محتوى الرطوبة في الزيت - جهاز قياس جهد الانهيار - جهاز قياس الضياعات الكهربائية - جهاز قياس الحموضة - جهاز قياس الكتلة الحجمية - جهاز قياس اللون - جهاز قياس اللزوجة - جهاز قياس الغازات الذائبة (DGA) - جهاز قياس محتوى كبريتيد (Sulfure) - جهاز قياس مشتقات فورانيك (dérivés furaniques) - جهاز عد الجسيمات	تحليل العينات
- حواسيب + تطبيق معلوماتي خاص بالعملية	دراسة النتائج
- حواسيب	كتابة تقارير نهائية

6.2. التوظيف

- مدير المشروع (1): خبير في إدارة المشاريع الصناعية والتواصل مع الجهات المختصة
- مدير تقني (1): مسؤول عن المخبر
- مسؤول التحاليل (1): مهندس مختص في كيمياء مختص في زيوت المحولات الكهربائية
- مسؤول الفريق التقني (1): مهندس مختص في الكهرباء
- الفريق التقني (3): تقني مختص في الكهرباء وتقني مختص في الكيمياء وتقني في الإعلام الآلي

7.2. الإجابة على الأسئلة الخمسة:

- ماذا؟
- يقدم المشروع خدمات مخبرية متخصصة في تحليل زيت المحولات الكهربائية بهدف التشخيص المبكر للأعطال والمساهمة في الصيانة الوقائية.
- لمن؟
- يستهدف مشروعنا الشركات الكبرى التي لها علاقة بقطاعات الكهرباء والطاقة والصناعة في الجنوب الجزائري من بينها (سونلغاز، سوناطراك، الشركات النفطية، المصانع المنتجة لمواد الاستهلاك اليومي)
- أين؟
- يقع المقر الرئيسي في ولاية غرداية (على الطريق الوطني رقم 1 شمال جنوب)
- كيف؟
- يتم تشغيل المشروع عن طريق استقبال الطلب ثم جمع العينات ونقلها وبعد ذلك نقوم بإجراء التحاليل اللازمة (حسب طلب العميل) ثم التفسير والتشخيص وارجاع النتائج في أقصى وقت ممكن وتقام هذه العملية على أيادي خبراء في المجال.

• لماذا؟ (الأسباب المقنعة لاختيار الفكرة)

تم اختيار فكرة إنشاء مخبر لتحليل زيت المحولات الكهربائية في جنوب الجزائر، وتحديدًا في ولاية غرداية، لعدة أسباب أهمها:

- سد فجوة سوقية حقيقية
- توفير الوقت والتكلفة للزبائن
- حماية معدات كهربائية كبرى تقدر بمليارات
- الريادة والتميز

3. نموذج الأعمال BMC

(1) شرائح العملاء Customer Segments

شركة سونلغاز: الزبون الأكبر يسبب لنا ضررا لامتلاكه آلاف المحولات التي تحتاج صيانة دورية لتفادي تكاليف الاستبدال الباهظة

الشركات النفطية والمصانع: والتي هي بدورها تعتمد على المحولات الكهربائية بشكل مستمر
شركات المقاولات الكهربائية: تقوم بأعمال صيانة الشبكات وقد تعتمد علينا كمزود خارجي لخدمات تحليل ومعالجة الزيت

(2) عرض القيمة Value Proposition

- سرعة في تحليل وإعطاء تقارير مفصلة
- إعطاء حلول الأعطال ان وجدت وتسهيل علي العميل إيجاد مكان العطل
- تقليل استيراد الزيت
- تقليل الملوثات البيئية

(3) القنوات Channels

- التسويق الرقمي عبر LinkedIn، الموقع الإلكتروني الرسمي ...
- المشاركة في المعارض الوطنية الخاصة بالطاقة والصناعة
- تقديم عروض تجريبية منخفضة لكسب ثقة العملاء
- انشاء صفحات خاصة في وسائل التواصل الاجتماعي
- بناء علاقات مع شركات لها خبرة في المجال
- القيام بزيارات ميدانية مباشرة للمؤسسات

(4) العلاقة مع العملاء Customer Relationship

- عقود سنوية مع العملاء مثل سونلغاز، سوناطراك
- منصة رقمية وبريد إلكتروني مهني وكل مواقع التواصل الاجتماعي ورقم هاتف خاص باستفسارات العملاء
- حملات ترويجية على خدماتنا
- زيارات دورية ميدانية لمتابعة حالة المحولات وتقديم توصيات لتفادي الأعطال
- زيارات ميدانية في حالة الطوارئ

(5) مصادر الإيرادات Revenue Streams

- عقود سنوية للعملاء (حسب استهلاك العميل)
- تحاليل الجودة المدفوعة
- خدمات اخذ العينات

- رسوم خدمة معالجة الزيت

(6) الأنشطة الرئيسية Key Activities

- اخذ العينات وجمعها في الموقع: وجود فريق فني يقوم بالتنقل الي مواقع المحولات لأخذ عينات الزيت وفقا للمعايير المعمول بها
- اجراء التحاليل المخبرية الخاصة بزيوت المحولات الكهربائية لمعرفة الأعطال الموجودة وذلك حسب طلب العميل
- تفسير النتائج واعداد تقارير مفصلة ودقيقة حول الأعطال الموجودة مع إعطاء الحلول لهذه الأعطال

(7) الموارد الرئيسية Key Resources

- مخبر تحاليل متكامل: مجهز بعنّاد مخبري وكهرباء V380 ونظام امان صناعي
- فريق مختص وله خبرة في المجال
- جهاز قياس الغازات المذابة (DGA)
- جهاز قياس كمية الماء
- جهاز قياس جهد الانهيار
- جهاز قياس الضياعات الكهربائية
- جهاز قياس الحموضة
- جهاز قياس اللزوجة
- سيارة مجهزة مختصة في جلب العينات
- آلة معالجة الزيت

(8) الشركاء الرئيسيون Key Partners

- مصانع الآلات (كندا، النمسا، تركيا، اليابان): تعتبر الشركاء الرئيسيون في المشروع للتوريد والتدريب والصيانة
- مؤسسات توريد المواد الأولية: لهم دور هام في المشروع بسبب المواد التي نستعملها بشكل يومي
- البنوك الوطنية: نظرا لارتفاع تكاليف الاستثمار فأن البنوك الوطنية هي الحل الأمثل لتجسيد المشروع على ارض الواقع

(9) هيكل التكاليف Cost Structure

- تكلفة الأجهزة المستعملة
- تجهيز المخبر: تهوية وتخزين والأمن صناعي والعتاد المكتبي
- الرواتب: الفريق التقني والإداري
- التكاليف التشغيلية: الكهرباء، الكراء، الأنترنت، الغازات الصناعية، صيانة المخبر
- تكاليف النقل
- الميزانية التسويقية والمشاركة في المعارض الوطنية

(1) شرائح العملاء - شركة سونلغاز - الشركات النفطية - المصانع الكبرى بشتى أنواعها - شركات المقاولات الكهربائية	(4) علاقة العملاء - تقديم نصائح في المجال - منصة رقمية ورقم هاتف خاص للرد عن استفسارات العملاء - حملات ترويجية حول خدماتنا - عقود سنوية مع كبار العملاء - زيارات ميدانية في حالة الطوارئ (3) القنوات - موقع الكتروني رسمي - مشاركة في الفعاليات التقنية والصناعية - زيارات ميدانية المباشرة للمؤسسات - مواقع في صفحات التواصل الاجتماعي	(2) القيمة المقترحة - سرعة في تحليل وإعطاء تقارير مفصلة - إعطاء حلول الأعطال ان وجدت والتسهيل علي العميل إيجاد مكان العطل - تقليل استيراد الزيت - تقليل الملوثات البيئية	(6) الأنشطة الرئيسية - أخذ العينات وجمعها من المواقع - إجراء التحاليل المخبرية - معالجة زيت - تفسير النتائج وإعداد التقارير التشخيصية (7) الموارد الرئيسية - مخبر تحاليل متكامل (مجهز بكهرباء V380، ونظام امان صناعي) - جهاز قياس الغازات الذائبة - جهاز قياس محتوى الرطوبة في الزيت - جهاز قياس جهد الانهيار - جهاز قياس الضياعات الكهربائية - جهاز قياس الحموضة - جهاز قياس اللزوجة - جهاز عد الجسيمات - فريق مختص - سيارة مجهزة مختصة في جلب العينات - آلة معالجة الزيت	(8) الشركاء الرئيسيون - مصانع الآلات (كندا، النمسا، تركيا، المانيا) - لتوريد والتدريب وصيانة أجهزة الفحص - مؤسسات توريد المواد الأولية (المواد الكيميائية والكواشف) - البنوك الوطنية
(5) مصادر الإيرادات - عقود للشركات حسب حجم استهلاك العميل - تحاليل الجودة المدفوعة - خدمات اخذ العينات من المحولات - معالجة الزيت		(9) هيكل التكاليف - رأس المال: 36,700,000 دج - تكلفة الأجهزة المستعملة: 16,193,163.00 دج - تجهيز المخبر: تهوية، تخزين، امن صناعي، العتاد المكتبي - الرواتب: الفريق التقني والإداري - تكاليف التشغيلية: كهرباء، الكراء، الأنترنت، الغازات الصناعية، صيانة المخبر - تكاليف النقل - الميزانية التسويقية والمشاركة في المعارض		

4. تحليل SWOT

جدول يتضمن نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات بالتفصيل

عوامل معطلة لتحقيق المشروع	عوامل مساعدة لتحقيق المشروع	SWOT
نقاط الضعف 1. ارتفاع الاستثمار الأولي 2. ضعف العلامة التجارية في البداية 3. الحاجة لاعتماد ISO/IEC 17025 4. تكاليف تشغيل مرتفعة نسبياً 5. الاعتماد على موردين خارجيين	نقاط القوة 1. الموقع الجغرافي الاستراتيجي 2. تلبية حاجة حقيقية في السوق 3. السرعة في تسليم النتائج 4. مرونة التسعير 5. خدمة الطوارئ	عوامل داخلية
التهديدات 1. SGS Algeria – منافس عالمي في حاسي مسعود 2. تطوير سونلغاز لمختبرات داخلية 3. دخول لاعبين جدد للسوق 4. تأخر صرف مستحقات العملاء 5. صعوبة الحصول على اعتماد ISO/IEC 17025 6. تباطؤ الاقتصاد الجزائري	الفرص 1. نمو قطاع الطاقة المتجددة 2. الطلب من المنشآت النفطية 3. غياب المنافسة المباشرة في الجنوب 4. التوسع في خدمات معالجة الزيوت 5. تطوير خدمات استشارية	عوامل خارجية

1.4. عوامل داخلية:

1. نقاط القوة:

- الموقع الجغرافي الاستراتيجي: وجود المخبر في جنوب الجزائر (حاسي مسعود، ورقلة، تمنراست) يضعه في قلب المنطقة المستهدفة، ويقلل زمن وتكاليف نقل العينات مقارنة بالمختبرات الشمالية أو الخارجية
- تلبية حاجة حقيقية في السوق: المشروع يسد فجوة خدمية حقيقية حيث لا يوجد مختبر متخصص لتحليل زيت المحولات في الجنوب، مما يجعله "أولاً" في السوق
- السرعة في تسليم النتائج: القدرة على تقديم نتائج التحليل خلال 24-48 ساعة، بينما المنافسون البعيدون يحتاجون أياماً إلى أسابيع
- مرونة التسعير: القدرة على تقديم أسعار تنافسية أقل من SGS والشركات العالمية الكبرى
- خدمة الطوارئ: القدرة على تقديم خدمة 24 ساعة للحالات العاجلة (عطل مفاجئ في محول حيوي) – وهي خدمة لا يقدمها المنافسون البعيدون

2. نقاط الضعف:

- ارتفاع الاستثمار الأولي: تكاليف التجهيزات المخبرية (كروماتوغرافيا الغاز DGA، أجهزة BDV، أجهزة قياس الرطوبة، مواد استهلاكية) مرتفعة
- ضعف العلامة التجارية في البداية: كشركة ناشئة، ستحتاج وقتاً لبناء سمعة قوية تتنافس مع SGS العالمية أو EIMI ذات الخبرة 12 عاماً
- الحاجة لاعتماد ISO/IEC 17025: للحصول على مصداقية كاملة، تحتاج لهذا الاعتماد الذي يتطلب وقتاً (6-12 شهراً) واستثماراً إضافياً في نظام الجودة
- تكاليف تشغيل مرتفعة نسبياً: رواتب الخبراء، تكاليف نقل العينات، صيانة الأجهزة الدورية، وشراء المواد الاستهلاكية (غازات المعايرة، المذيبات)
- الاعتماد على موردين خارجيين: معظم الأجهزة والمواد الاستهلاكية ستستورد من الخارج، مما يخلق تبعية وتكاليف جمركية ونقل إضافية

2.4. عوامل خارجية

3. الفرص

- نمو قطاع الطاقة المتجددة: مشاريع الطاقة الشمسية في الجنوب تحتاج محولات كهربائية، وبالتالي خدمات تحليل زيت المحولات
- الطلب من المنشآت النفطية: سوناطراك والشركات النفطية الأجنبية في حاسي مسعود وحقول الجنوب تمتلك أعداداً كبيرة من المحولات التي تحتاج فحصاً دورياً
- غياب المنافسة المباشرة في الجنوب: جميع المنافسين المباشرين يتركزون في الشمال (الجزائر، وهران، سطيف، بجاية، المسيلة)، وغيابهم في الجنوب يخلق فرصة فريدة
- التوسع في خدمات معالجة الزيوت: بعد تأسيس المخبر، يمكن التوسع لإضافة خدمات معالجة الزيوت (ترشيح، نزع غازات، إعادة تكرير) لتكملة سلسلة القيمة
- تطوير خدمات استشارية: تقديم تقارير تشخيصية متقدمة، خطط صيانة وقائية مخصصة

4. التهديدات

- SGS Alegria – منافس عالمي في حاسي مسعود : SGS لديها مختبر في حاسي مسعود، وعلامة تجارية عالمية، وإمكانات مالية هائلة. يعتبر أخطر منافس مباشر
- تطوير سونلغاز لمختبرات داخلية: قد تلجأ سونلغاز إلى تطوير مختبراتها الداخلية لتقليل الاعتماد على الخارج، مما يقلص السوق المتاح
- دخول لاعبين جدد للسوق: نجاح المشروع قد يشجع آخرين على دخول السوق (شركات جزائرية جديدة أو شركات أجنبية)، مما يزيد المنافسة
- تأخر صرف مستحقات العملاء: الشركات الكبرى (سونلغاز، سوناطراك) قد تتأخر في صرف المستحقات المالية لأشهر، مما يضغط على السيولة النقدية
- صعوبة الحصول على اعتماد ISO/IEC 17025: عملية الاعتماد معقدة وتستغرق وقتاً، وقد تفشل فيها إذا لم تتوفر الشروط التقنية والإدارية المطلوبة
- تباطؤ الاقتصاد الجزائري: أي أزمة اقتصادية قد تؤدي إلى تقليص ميزانيات الصيانة لدى الشركات الكبرى، مما يقلل الطلب على خدمات الت

الفصل الثاني:

دراسة السوق والاستراتيجية التسويقية

1. تحديد السوق والزبائن

1.1. حجم السوق

يقدر عدد المحولات الكهربائية في الجزائر بحوالي 60,000 إلى 120,000 محول، موزعة بين محولات التوزيع ومحولات القدرة الكبرى. بالنظر إلى أن شبكة الكهرباء الجزائرية تغطي 99% من السكان (أكثر من 11.8 مليون زبون)، وتشهد توسعاً سنوياً في الأطقم الكهربائية (خاصة في مناطق الجنوب والهضاب العليا)، فإن الطلب على خدمات تحليل زيت المحولات في تزايد مستمر

2.1. خصائص الزبائن:

الزبون	العمر	الدخل	الموقع
سونلغاز	قائمة منذ أكثر من 50 سنة	مؤسسات ذات ميزانيات	لها فروع في كامل
سوناطراك	قائمة منذ أكثر من 60 سنة	صيانة ضخمة	التراب الوطني

3.1. الأسئلة الخمسة لمن وماذا ومتى وأين ولماذا يشتري الزبون.

- ماذا؟
يقدم المشروع خدمات مخبرية متخصصة في تحليل زيت المحولات الكهربائية بهدف التشخيص المبكر للأعطال والمساهمة في الصيانة الوقائية.
- لمن؟
يستهدف مشروعنا الشركات الكبرى التي في قطاعات الكهرباء والطاقة والصناعة في الجنوب الجزائري من بينها (سونلغاز، سوناطراك، الشركات النفطية، المصانع المنتجة لمواد الاستهلاك اليومي)
- أين؟
يقع المقر الرئيسي في ولاية غرداية (على الطريق الوطني رقم 1 شمال جنوب)
- كيف؟
يتم تشغيل المشروع عن طريق استقبال الطلب ثم جمع العينات ونقلها وبعد ذلك نقوم ب إجراء التحاليل اللازمة (حسب طلب العميل) ثم التفسير والتشخيص وإرجاع النتائج في ظرف 48 ساعة وتقام هذه العملية أي إيادي خبراء في المجال.
- لماذا؟
تم اختيار فكرة إنشاء مخبر لتحليل زيت المحولات الكهربائية في جنوب الجزائر، وتحديدًا في ولاية غرداية، لعدة أسباب أهمها:
 - سد فجوة سوقية حقيقية
 - توفير الوقت والتكلفة للزبائن
 - حماية أصول بمليارات
 - الريادة والتميز

2. دراسة المنافسين

1.2. المنافسون المباثرون، تحليل نقاط قوتهم وضعفهم

المنافسون	نقاط القوة	نقاط الضعف
BMELECTRIC LAB	- لديهم مخبر متنقل - متخصص بالكامل في تحليل زيت المحولات (تركيز كامل) - يقدم تحليل DGA المتقدم (أكثر التحاليل تعقيدا وأهمها) - مرونة عالية في التنقل بين المواقع	- يقع مقرها الرئيسي في الجزائر العاصمة (شمال) مما يزيث وقت الوصول الي الجنوب - عدد محدود من الفرق المتنقلة لا يغطي الطلب المتزايد - تكاليف تشغيل المخبر المتنقل مرتفعة جدا (وقود، صيانة، نقل الأجهزة الحساسة)
EIMI TRANSFORMATEURS	- خبرة في المجال تزيد عن 12 عاما في السوق - سلسلة خدمات متكاملة (تحليل + معالجة + صيانة) - لها تعاقدات مع المؤسسات الوطنية الكبرى (سونلغاز، الشركات النفطية) - سمعة قوية في الوسط الصناعي	- تقع في سطيف (شمال شرق)، بعيدا عن الجنوب الجزائري - لا تمتلك فروع او مختبرات في الجنوب - الوقت المستغرق لنقل العينات من الجنوب الي سطيف ثم ارجاع النتائج طويل جدا
KH TRANSFO	- خدمات معالجة متكاملة	- بعيد جدا عن الجنوب مقرها ولاية بجاية
Winding Industrie	- يقع في المسيلة (أقرب نسبيا للجنوب من غيره) - اختبارات أساسية: محتوى الرطوبة وجهد الانهيار - لديه قاعدة عملاء راسخة - نشاطه الأساسي في لف واصلاح المحولات	- لا يقدم تحليل الغازات المذابة (DGA) - تحليل ليس نشاط رئيسي بل خدمة ثانوية - ليس لديها خبرة كبير في مجال التحليل المخبري
SIBELC Industrie	- تحليل وخبرة دقيقة	- يقع في غرب الجزائر (وهران)
SGS Algeria	- علامة تجارية عالمية معترف بها دوليا - وجود مختبر في حاسي مسعود (جنوب الجزائر) - موقعها الاستراتيجي القريب من حقول النفط والغاز	- الأسعار مرتفعة نسبيا بسبب العلامة التجارية العالمية - بيروقراطية وإجراءات طويلة بسبب هيكلتها الكبير

- قد لا تعطي أولوية للعملاء الصغار والمتوسطين (العقود الكبير أولاً) - المرونة أقل في التعامل مع الحالات الطارئة خارج أوقات العمل الرسمية	- تغطية وطنية واسعة بفروع 8 ولايات - نظام معلومات مخبري متطور وتقارير عبر الويب (LIMS: Laboratory information managment system) - إمكانيات مالية ضخمة للاستثمار في أحدث الأجهزة	
--	---	--

2.2. المزيج التسويقي (P) (5)

- المنتج (Product): المواصفات، التغليف، خدمات ما بعد البيع.
تحاليل المخبرية الدقيقة لزيت المحولات الكهربائية
- السعر (Price): استراتيجية التسعير (تكاليف الإنتاج + هامش الربح + مقارنة بالمنافسين) -.

التحليل	السعر (دج)
Aspect	1500
Couleur	2000
Teneur en eau	6500
Tension de claquage Rigidité diélectrique	6000
Pertes diélectriques	10000
Densité (Masse volumique)	2000
Viscosité cinématique à 40c° et 100c°	8000
Acidité totale	6500
Chromatographie des gaz dissous	60000
Analyse des dérivées furaniques	80000

- المكان:: (Place)
المقر الرئيسي للمشروع ولاية غرداية (على الطريق الوطني رقم 1 شمال جنوب)
- الترويج (Promotion): وسائل الإعلان، الميزانية الترويجية.
يتم ترويج خدماتنا عن طريق:

- التسويق الرقمي عبر LinkedIn، الموقع الإلكتروني الرسمي
- المشاركة في المعارض الوطنية الخاصة بالطاقة والصناعة
- انشاء صفحات خاصة في وسائل التواصل الاجتماعي
- بناء علاقات مع شركات لها خبر في المجال
- القيام بزيارات ميدانية مباشر للمؤسسات

• الأشخاص (People): المهارات المطلوبة لفريق العمل.

- خبير في إدارة المشاريع الصناعية
- خبراء في الكيمياء والكهرباء

3.2. تقييم المخاطر:

1.2.3. تحديد المخاطر:

- تعطل الأجهزة: في ظل البيئة الصحراوية، الأجهزة الدقيقة قد تتأثر بالغبار أو الحرارة أو انقطاع التيار المستمر.
- العزلة التقنية: صعوبة الحصول على دعم فني سريع أو قطع غيار في المناطق النائية بالجنوب.
- تأخر التحصيل: المؤسسات الكبرى (سونلغاز أو سوناطراك) غالبًا ما يكون نظام سدادها طويلًا، مما يعطل السيولة.
- تقلب الأسعار: ارتفاع تكاليف المواد الاستهلاكية المستوردة (غازات المعايرة، المذيبات) بسبب تغير سعر الصرف.

2.3.2. تقييم الأثر:

- عدم الاستجابة السريعة
- تعطل السيولة

3.3.2. إجراءات تخفيف المخاطر:

- عقود الصيانة الوقائية: إبرام عقود مع الموردين تشمل تدخلات دورية.
- التجهيز المزدوج: توفير بديل للأجزاء الأكثر عرضة للعطل.
- التنويع: عدم الاعتماد على طرف واحد، واستهداف شركات النفط والطاقة المتجددة والمقاولات الخاصة.
- التسعير الديناميكي: تحديث الأسعار دوريًا وفق تقلبات السوق واحتساب هامش أمان للعملة.

الفصل الثالث:

الجوانب القانونية والإجرائية

1. الشكل القانوني المناسب للمشروع

بعد دراسة متأنية لطبيعة نشاط المشروع ولعدد الشركاء المؤسسين (شخصين فأكثر)، يقع الاختيار على شكل شركة ذات مسؤولية محدودة (SARL)، عملاً بأحكام القانون التجاري الجزائري (لا سيما المرسوم التشريعي 07-05 المؤرخ في 16 ربيع الأول 1426 هـ الموافق 25 أبريل 2005م، والمتضمن قانون التجارة).

• تبرير الاختيار

حماية الذمة المالية الشخصية للشركاء: تمنح SARL مسؤولية محدودة، حيث تقتصر مسؤولية كل شريك على قيمة حصته في رأس المال فقط. تشكل هذه الحماية عامل أمان بالغ الأهمية نظراً للمخاطر المهنية المحتملة في مجال التحاليل المخبرية (كالأخطاء التقنية التي قد تؤدي إلى خسائر مالية للعملاء)، ولارتفاع قيمة التجهيزات المخبرية المستثمر فيها (كروماتوغرافيا الغاز وغيره). هذا يتناقض مع شركات التضامن حيث تكون المسؤولية غير محدودة وتضامنية.

المصدقية اللازمة للتعاقد مع المؤسسات الكبرى: يستهدف المشروع التعاقد مع شركات كبرى مثل سونلغاز وسوناطراك ومقاولي الكهرباء. هذه المؤسسات تمنح ثقتها بشكل أكبر للشركات ذات الشخصية المعنوية الراسخة (مثل SARL)، لأن هذا الشكل يوفر إطاراً قانونياً واضحاً للتعامل، بما في ذلك إصدار فواتير رسمية تحمل ضريبة القيمة المضافة (TVA)، وهو شرط أساسي في عقود هذه الهيئات.

مرونة في توزيع الأدوار والأرباح: يتيح عقد تأسيس SARL تحديد نسب مساهمة كل شريك في رأس المال بدقة، وتوزيع الأرباح والخسائر بنسب قد تختلف عن نسب المساهمة، بالإضافة إلى تعيين مدير عام (Gérant) وتحديد صلاحياته وأجره بشكل واضح، مما ينظم العلاقة بين الشركاء ويحد من النزاعات المستقبلية.

2. الالتزامات الضريبية

كنشاط استراتيجي في قطاع الخدمات التقنية، سيخضع مشروع مخبر تحليل زيت المحولات للنظام الحقيقي

. الخاتمة

1 ملخص النتائج الرئيسية للدراسة.

خلصت دراسة مشروع إنشاء مخبر تحليل زيوت المحولات الكهربائية في جنوب الجزائر إلى نتائج رئيسية تؤكد جدوى الفكرة ونجاحها اقتصادياً وتقنياً:

أولاً: أثبتت الدراسة وجود فجوة سوقية حقيقية في المنطقة الجنوبية، حيث تغيب المخابر المتخصصة رغم توافر آلاف المحولات الكهربائية التابعة لمؤسسات كبرى كسونلغاز وسوناطراك، مما يضطر هذه المؤسسات إلى إرسال عيناتها إلى الشمال بتكاليف باهظة وزمن طويل يصل إلى أسابيع.

ثانياً: أظهر تحليل السوق أن المشروع يتمتع بمزايا تنافسية قوية، أبرزها الموقع الجغرافي الاستراتيجي بولاية غرداية على الطريق الوطني رقم 1، والسرعة في إنجاز التحاليل، ومرونة التسعير مقارنة بالمنافسين العالميين كـ SGS Algeria، بالإضافة إلى خدمة الطوارئ على مدار الساعة.

ثالثاً: كشفت دراسة نموذج الأعمال (BMC) أن مصادر الإيرادات الرئيسية تتمثل في العقود السنوية مع كبار العملاء، وتحاليل الجودة المدفوعة، وخدمات أخذ العينات ومعالجة الزيت، مع هيكل تكاليف يمكن التحكم فيه رغم ارتفاع الاستثمار الأولي. رابعاً: أوصت الدراسة باختبار شكل شركة ذات مسؤولية محدودة (SARL) لحماية الذمة المالية للشركاء وللمصداقية المطلوبة للتعاقد مع المؤسسات الكبرى، مع الخضوع للنظام الضريبي الحقيقي.

خامساً: حدد تحليل SWOT نقاط قوة المشروع كالموقع الاستراتيجي وتلبية حاجة حقيقية في السوق، بينما تمثلت أبرز التهديدات في وجود منافس عالمي (SGS) في حاسي مسعود، وصعوبة الحصول على اعتماد ISO/IEC 17025. وأخيراً، تم وضع استراتيجية لتخفيف المخاطر تشمل إبرام عقود صيانة وقائية للأجهزة، وتنويع قاعدة العملاء لتجنب تأخر التحصيل، والتسعير الديناميكي لمواجهة تقلبات أسعار المواد المستوردة، مما يجعل المشروع قابلاً للتنفيذ ومربحاً وذا أبعاد استراتيجية وبيئية واعدة.

2 الملاحظات النهائية والاستنتاج

في ختام هذه الدراسة المتعلقة بمشروع إنشاء مخبر تحليل زيوت المحولات الكهربائية بولاية غرداية، يمكن القول إن المشروع يمثل نموذجاً ناجحاً للمقاولاتية في الجزائر، حيث يجمع بين الفكرة التقنية المبتكرة والفرصة الاقتصادية الواعدة في آن واحد. لقد تبين من خلال التحليل المعمق أن المشروع لا يقتصر كونه مجرد خدمة مخبرية عادية، بل هو مشروع استراتيجي بامتياز، يسد فجوة خدمية حقيقية تعاني منها المنطقة الجنوبية منذ سنوات، ويحمي أصولاً صناعية ضخمة تصل قيمة المحول الواحد منها إلى ملايين الدولارات، كما يساهم في تعزيز الاقتصاد الدائري عبر إعادة معالجة الزيوت وتقليل الاستيراد، فضلاً عن حماية البيئة من التلوث الناتج عن التخلص غير السليم من الزيوت المستعملة.

إن الموقع الجغرافي المتميز الذي تم اختياره بعناية، والذي يعتبر همزة وصل بين شمال وجنوب البلاد، يمنح المشروع ميزة تنافسية لا يستهان بها، حيث يقلل زمن وتكاليف النقل ويوفر خدمة سريعة للعملاء، كما أن الدراسة أثبتت أن المشروع قادر على المنافسة رغم وجود لاعبين كبار، وذلك بفضل مرونة التسعير، وجودة الخدمات المقدمة، والاهتمام بالعلاقة مع العملاء عبر منصة رقمية وزيارات ميدانية منتظمة. ورغم التحديات التي سيواجهها المشروع، وعلى رأسها ارتفاع الاستثمار الأولي، والحاجة للحصول على اعتماد ISO/IEC 17025، إلا أنه تم وضع استراتيجيات عملية للتخفيف من هذه المخاطر، ما يجعل المشروع قابلاً للتنفيذ على أرض الواقع. وفي النهاية، يمكن القول بثقة أن هذا المشروع يستحق الدعم والتمويل، ليس فقط لأنه يحقق عوائد مالية مجزية، بل لأنه يخدم الاقتصاد الوطني، ويخلق فرص عمل نوعية، ويساهم في تطوير البنية التحتية الصناعية

في الجنوب الجزائري، ويضع حجر الأساس لمشاريع توسعية مستقبلية قد تشمل إنشاء فروع جديدة أو تطوير خدمات استشارية متكاملة.

3. تطلعات المشروع (اهدافك)

انطلاقاً من الأسس العلمية والدراسات الجدية التي قامت عليها فكرة إنشاء مخبر تحليل زيوت المحولات الكهربائية في جنوب الجزائر، فإن فريق المشروع يضع نصب عينيه مجموعة من الأهداف الطموحة والمتدرجة التي تسعى إلى تحقيقها على المدى القصير والمتوسط والبعيد. على المدى القصير (سنة إلى سنتين)، يهدف المشروع إلى الحصول على اعتماد ISO/IEC 17025 خلال اثني عشر شهراً من تاريخ الافتتاح، وهو الاعتماد الذي يمنح المختبر المصادقية اللازمة للتعامل مع المؤسسات الكبرى، كما يسعى إلى إبرام عقود سنوية مع خمسة عملاء كبار على الأقل من بينهم سونلغاز وسوناطراك، بالإضافة إلى تغطية ولايات الجنوب الأربع الرئيسية (غرداية، ورقلة، تمنراست، إيليزي) وتعريف العملاء المحتملين بخدمات المشروع عبر استراتيجية تسويقية فعالة.

أما على المدى المتوسط (ثلاث إلى خمس سنوات)، فطموح المشروع يتعدى حدود التحليل إلى التوسع في خدمات معالجة الزيوت وإعادة التكرير والترشيح ونزع الغازات، بما يكمل سلسلة القيمة ويقدم حلاً متكاملاً للعملاء، كما يهدف إلى إنشاء فرع ثانٍ في منطقة حاسي مسعود أو ورقلة للاقترب أكثر من العملاء في أقصى الجنوب. وأما على المدى البعيد (خمس إلى عشر سنوات)، فيطمح فريق المشروع إلى أن يصبح المخبر المرجعي الأول لتحليل زيوت المحولات الكهربائية، من خلال تطوير خدمات استشارية متكاملة في مجال الصيانة الوقائية للمحولات وتقديم تقارير تشخيصية متقدمة وخطط صيانة مخصصة لكل عميل، بالإضافة إلى المساهمة الفعالة في تأطير وتكوين الكوادر الوطنية في مجال تحليل الزيوت الصناعية، وإنشاء مركز بحث وتطوير متخصص في العوازل الكهربائية السائلة يساهم في تطوير هذا المجال علمياً وتقنياً. إن هذه الأهداف ليست مجرد أرقام على ورق، بل هي خارطة طريق واضحة المعالم، تستند إلى دراسة واقعية للسوق وإمكانات حقيقية للفريق، وستكون بمثابة البوصلة التي توجه القرارات والجهود نحو بناء مشروع دائم ومستدام يخدم الاقتصاد الوطني ويخلق قيمة مضافة حقيقية للمجتمع الجزائري.

المراجع والمصادر

من اين حصلت على المعلومات؟ (مواقع، فواتير شكلية، مجلات.....)

الملحقات

فواتير شكلية

الملحقات

أسعار الأجهزة

الوقت و التاريخ	السعر (دج)	رابط	المؤسسة	الخصائص	العدد	العداد
11:39 (18/05/2026)	1372000	https://www.haerberle-lab.de/en/colorimeters-lovibond-pfxi-series/9947285?srsId=AfmBOopluygUNJzzDx0mVpJkyh9wblukTcd7kUmz1mxZqIFCU92ejeG	Lovibond	قياس اللون	1	Colorimeters, Lovibond® PFXi series (9947280)
11:44 (18/05/2026)	350000	Metrohm 831 KF Coulometer in Selm, Nordrhein-W	Metrohm	قياس الرطوبة	1	Metrohm 831 KF Coulometer
12:10 (18/05/2026)	8500000	Système de chromatographie en phase gazeuse - GC-	Shimadzu GC-2014	قياس الغازات الذائب	1	Chromatographie en phase gazeuse GC-2014
12:30 (18/05/2026)	310000	https://french.alibaba.com/product-detail/Huazheng-HZYN-1301-ASTM-D445-IP-1600989126812.html	Huazheng	قياس اللزوجة	1	HZYN-1301
12:40 (18/05/2026)	621000	Achetez en gros Huazheng Electric Hzjd-2z Testeur Automatique De Facteur De Dissipation Et De Tangente Delta D'huile De Transformateur Chine et Testeur De Perte Diélectrique Pour Huile Isolante à 4300 USD Global Sources	Huazheng	قياس الضياعات الكهربائية	1	HZJD-2Z
12:53 (18/05/2026)	220000	Achetez en gros Appareil D'analyse Bdv D'huile De Transformateur Testeur De Claquage Diélectrique 80kv Chine et Essai De Résistance Diélectrique D'huile à 1349 USD Global Sources	Kvtester	قياس جهد الانهيار	1	ZC-210E-#2914
13:06 (18/05/2026)	280000	Machine de mesure de l'acidité de l'huile de transformateur, instrument automatique de test de la valeur acide - Chine Équipement de test d'acide, l'acide d'huile Huile de transformateur testeur	Huazheng	قياس الحموضة	1	HZCS-3
13:26 (18/05/2026)	2510000	Analyseur de furan et de furfural dans l'huile isolante des transformateurs, chromatographe liquide haute performance - Chine La HPLC, chromatographe en phase liquide	Weshine Electric Manufacturing	قياس فورانك	1	VS-HPLC980
						14163000
						المجموع

البدر للإعلام الآلي والتجهيزات

مؤسسة التكوين بالتجهيزات بالمعدات وعتاد الإعلام الآلي والمكاتب

شارع أول نوفمبر بجانب بنك BADR ثنية المخزن غرداية

029 233484 0770 24 24 96 0550 525 776

badrinfo47@yahoo.fr

رقم المادة: 47050015353

47/00-4335064 A 15

هاتف فاكس

سجل التجاري :

الرقم الجبائي: 17416010251414904700

رقم التعريف الإحصائي : 197416010251440

الحساب البنكي: B.A.D.R GHARDAIA.

R.I.B 00300292000176730070

غرداية يوم 21/05/2026

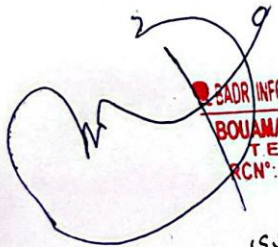
بلكبير دريس

المطلوب من :

مؤسسة مصغرة غرداية

فاتورة شكلية رقم: 68/2026

الرقم	التعيين	الكمية	السعر الفردي HT	السعر الإجمالي HT
1	MICRO I5 6EM 8GO 256G SSD HDD50GOGRAVEUR DVD CLAVIER SOURIS	3	52,000.00	156,000.00
2	IMPRIMANTE CANON MF 3010	1	49,500.00	49,500.00
3	BUREAU MDF 1.6M +RETOUR	3	38,000.00	114,000.00
4	ARMOIRE METALIQUE	3	13,500.00	40,500.00
5	ONDULEUR 650VA	3	5,800.00	17,400.00
6	ARMOIRE MDF 3.50*1.2	1	32,000.00	32,000.00
7	CHAISE PDG	1	18,500.00	18,500.00
8	CHAISE RECEPTION	5	3,200.00	16,000.00
9	CHAISE OPERATEUR	3	7,500.00	22,500.00
10	TABLE BASSE	1	8,900.00	8,900.00
11	PHOTOCOPIE A4 2135 KYOCERA	1	112,000.00	112,000.00
13	PAILLASSE CENTRALE 1.50	1	298,000.00	298,000.00
14	PAILLASSE MURALE 1.80	6	85,500.00	513,000.00
15	CLIMATISEURE 12 BUT	3	74,000.00	222,000.00


BADR INFORMATIQUE ET EQUIPEMENT
BOUAMAMA ABDERRAHMANE
T.E.M. Ghardaia
RCN: 47/00 - 4335064 .A.15

المجموع خارج الرسم

1,620,300.00

القيمة المضافة 19%

307,857.00

المجموع بكل الرسوم

1,928,157.00

أوقفت هذه الفاتورة عند المبلغ /

مليون وتسعمائة وثمانية وعشرون ألف ومائة وسبعة وخمسون دينار جزائري

البدر للإعلام الآلي والتجهيزات

مؤسسة التكوين بالتجهيزات والمعدات وعتاد الإعلام الآلي والمكاتب

شارع أول نوفمبر بجانب بنك BADR ثنية المخزن غرداية
 هاتف فاكس
 سجل التجاري : 47/00-4335064 A 15
 الرقم الجبائي: 17416010251414904700
 رقم التعريف الإحصائي : 197416010251440
 الحساب البنكي : B.A.D.R GHARDAIA.
 رقم المادة: 47050015353
 R.I.B 00300292000176730070

غرداية يوم 21/05/2026

المطلوب من :
 بلكبير دريس
 مؤسسة مصغرة غرداية
 فاتورة شكلية رقم: 68/2026

الرقم	التعيين	الكمية	السعر الفردي HT	السعر الإجمالي HT
1	RMAE PAIER A4	30	590.00	17,700.00
2	GRAVEUSE	2	450.00	900.00
3	TONER 6030	10	1,500.00	15,000.00
4	SCOUTSHE PM	5	50.00	250.00
5	DEVIDOIRE	2	450.00	900.00
6	GRAPHE	10	50.00	500.00
7	TOMBOUNE	10	60.00	600.00
8	REGL 30CM	2	60.00	120.00
9	REGISTER 2 MAIN	5	250.00	1,250.00
10	STYLOU BLEU	20	15.00	300.00
11	CREYOUN	10	15.00	150.00
13	ENVLOUPE F16	150	10.00	1,500.00
14	SOUS CHEMISE	10	1,200.00	12,000.00
15	CHEMISE	10	2,500.00	25,000.00
16	BOITE ARCHIVE	20	190.00	3,800.00
17	CLASSEUR CRONON	5	600.00	3,000.00
18	MARQUER	10	200.00	2,000.00
19	FASSEUR	5	150.00	750.00

المجموع خارج الرسم 85,720.00
 القيمة المضافة 19% 16,286.80
 المجموع بكل الرسوم 102,006.80

2
 BOUAMAMA ABDERRAHMANE
 T.E.M. Ghardaia
 RCN: 47/00 - 4335064 A.15

أوقفت هذه الفاتورة عند المبلغ /
 مائة وإثنان ألف وستة دنانير جزائرية وثمانون سنتيما

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences

et de la technologie

جامعة غرداية

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الآلية والكهروميكانيك

غرداية في: 2026/06/23

شعبة: كهروميكانيك

تخصص: صيانة صناعية

شهادة ترخيص بالتصحيح والايداء:

انا الأستاذ: بوضيبة سعد.

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ماستر) المعنونة بـ:

Optimisation des stratégies de la maintenance prévisionnelle et corrective par l'analyses des

huiles des transformateurs HTB

من انجاز الطالب (الطالبة):

مسايلى عبد الله

بلكبير ادرىس

التي نوقشت بتاريخ: 2026/06/21

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من

ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم

امضاء المسؤول عن التصحيح

رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك

عزواي محمد

