



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE Électrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Électrique

Spécialité : Réseaux Électriques

Thème

**Application des méthodes méta-heuristique pour
le diagnostic de l'huile de transformateur**

Réalisé par :

SEK AHMED
HENNI AHMED YASSINE

Dirigé par :

Dr. TALAL GUIA

Année universitaire 2022/2023

Dédicace

Tout d'abord, nous exprimons notre sincère gratitude au Tout-Puissant Allah pour nous avoir accordé la force et la patience pour mener à bien cette tâche.

Nous tenons à dédier de tout cœur notre travail remarquable aux personnes qui ont joué un rôle significatif dans notre réussite.

À nos chers parents, dont l'amour indéfectible, le soutien inébranlable et la confiance inébranlable en nous ont été une source constante d'inspiration.

À notre estimé superviseur, dont les conseils inestimables, l'encouragement constant et la disponibilité ont été essentiels à notre succès.

Nous souhaitons également exprimer notre appréciation à nos membres de la famille élargie et à nos amis proches pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude la plus profonde à tous nos professeurs pour leur mentorat précieux, leur guidance et les connaissances transmises tout au long de notre parcours académique

Remerciement

*Cette recherche n'aurait pas été possible sans la participation et la coopération de nombreuses personnes, dont certains noms ne peuvent pas être divulgués ici. Nous tenons à exprimer notre gratitude à Monsieur **GUIA Talal**, notre superviseur, pour son aide, ses recommandations et ses conseils. Nous souhaitons également exprimer notre appréciation à l'équipe administrative pour leur soutien et leur aide. De plus, nous saisissons cette occasion pour remercier tous nos enseignants pour leurs conseils et leur orientation. Néanmoins, malgré toute l'aide fournie, nous assumons l'entière responsabilité de toutes les erreurs commises dans cette thèse..*

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I	
I.1 Introduction	2
I.2 Constitution des transformateurs de puissance	3
I.3 L'isolation d'un transformateur	4
I.3.1 Isolation Liquide de Transformateurs de Puissance	5
I.3.2 Le rôle des huiles isolantes dans les transformateurs	5
I.3.3 Principaux types d'huiles isolantes.....	5
I.4 Classification des huiles isolantes	6
I.4.1 Selon la catégorie.....	6
I.4.2 Selon l'origine	8
I.4.2.1 Huiles synthétiques	9
I.4.2.2 Huiles végétales	12
I.4.2.3 Huiles minérales	14
I.5 Les causes de vieillissement des huiles	17
I.6 Recyclage d'huile de transformateur.....	18
I.7 Conclusion.....	19
Chapitre II.....	
II.1 Introduction.....	20
II.2 Méthodes de Surveillance et de diagnostic des isolants liquides	20
II.2.1 Méthodes conventionnelles	21
II.2.1.1 Mesure de la teneur en eau	21
II.2.1.2 Nombre de neutralisation	22
II.2.1.3 Mesure de la viscosité.....	23
II.2.1.4 Mesure de la tension de claquage	24
II.2.1.5 Examen visuel et couleur	25

II.2.1.6 Mesure du facteur de dissipation diélectrique	25
II.2.2 Méthodes intelligentes	26
II.2.2.1 L'algorithme de ACO (Ant Colony Optimization)	27
II.2.2.2 L'algorithme de BCO (Bee Colony Optimization)	30
II.2.2.3 Méthode de RNA (Réseau de Neurones Artificiels)	33
II.2.2.4 Méthode de la logique floue	36
II.3 Conclusion	37
Chapitre III	
III.3 Méthode de détection des fuites de courant	40
III.3.1 Définition	40
III.3.2 Étapes de l'expérience	40
III.4 Processus du système RNA utilisé	45
III.5 Création du réseau	46
III.6 Modèle du réseau	49
III.6.1 Graphe de l'erreur	51
III.6.2 Courbes de régression	52
III.7 Comparaison des résultats	53
III.9 Conclusion	55
CONCLUSION GENERALE	61

Liste des figures

Figure I.1 Réseau électrique.	2
Figure I.2 Constitution générale de transformateurs de puissance.	4
Figure I.3 Exemples de formule de polybutènes.	11
Figure I.4 Formules des esters isolants.	12
Figure I.5 Structure générale d'une huile végétale.	13
Figure I.6 Processus de raffinage pour les huiles brutes.	15
Figure I.7 Structures des hydrocarbures de base dans une huile minérale.	16
Figure II.1 Titreur Coulométrique Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau de liquide isolant.	22
Figure II.2 L'appareil de mesure de l'acidité conforme ainsi que le système de titrage.	23
Figure II.3 Appareil de mesure de la viscosité	24
Figure II.4 L'appareil de claquage.	24
Figure II.5 Dégradation de liquide isolant au cours de vieillissement thermique (changement de couleur), photographie de colorimètre pour la mesure de l'indice couleur.	25
Figure II.6 Dieltest DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité relative.	26
Figure II.7 Schéma des différentes étapes dès l'optimisation par l'ACO.	29
Figure II.8 Schéma des différentes étapes dès l'optimisation par la BCO.	32
Figure II.9 Schéma de la procédure d'apprentissage de RNA.	35
Figure III.1 Circuit de test et dispositifs.	41
Figure III.2 Courbe du courant de fuite à 5V.	42
Figure III.3 Différents module d'harmonique en signal du courant de fuite	43
Figure III.4 Command Window du Matlab.	Error! Bookmark not defined.
Figure III.5 Interface de NNToolbox sous l'environnement de Matlab.	46
Figure III.6 Sélection des sources des paramètres de RNA.	47
Figure III.7 Paramètres de RNA introduits sous NNTOOL.	48
Figure III.8 La structure du RNA adoptée.	49
Figure III.9 Fenêtre présente l'étape d'apprentissage de RNA.	50
Figure III.10 Fenêtre présente les paramètres d'apprentissage adoptés.	51
Figure III.11 Graphes de l'erreur (d'apprentissage de test et de validation).	51
Figure III.12 Courbes de régression des résultats données par RNA.	53
Figure III.13 Exportation de notre réseau nommé net1 vers l'espace de travail du Matlab.	54

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Comparaison de paramètres typiques des principaux d'huiles isolantes.....	6
Tableau I. 2 Caractéristiques et domaines d'application des diverses catégories d'huiles diélectriques.....	8
Tableau I. 3 Choix du liquide isolant pour différents types de	9
 Tableau II. 1 Normes utilisées par SONELGAZ pour l'analyse de la BORAK22.	21
 Tableau III. 1 Les données utilisé (résultat expérimentale).....	44
Tableau III. 2 Tableau des résultats obtenus par la méthode de RNA.....	54

الملخص

هدف دراستنا هو تنبؤ العزل الكهربائي لزيت المحول وتحديد حالته بطريقة ذكية دون إيقافه عن الخدمة. لتحقيق ذلك، استخدمنا برنامج "ماتلاب" وشبكة الخلايا العصبية. قمنا بأخذ نتائج الاختبارات المنجزة في مختبر الجهد العالي في جامعة الوادي العام السابق باستخدام تقنية التيار المسرب. بناءً على هذه الاختبارات، حصلنا على قاعدة بيانات تساعدنا في اكتشاف وتشخيص حالة زيت المحولات الكهربائية.

الكلمات المفتاحية : التشخيص , العزل الكهربائي, شبكة الخلايا العصبية , التيار المسرب.

Résumé

Notre objectif d'étude est de prédire l'isolation électrique de l'huile du transformateur et de déterminer son état de manière intelligente sans le mettre hors service.

Pour y parvenir, nous avons utilisé le logiciel "Matlab" et un réseau de cellules neuronales. Nous avons recueilli les résultats des tests effectués au laboratoire de haute tension d'université d'El Oued en utilisant la technique du courant de fuite. Sur la base de ces tests, nous avons obtenu une base de données qui nous aide à détecter et diagnostiquer l'état de l'huile des transformateurs électriques.

Mots-clés : Diagnostic, Isolation électrique, Réseau de Neurones Artificiels, Courant de fuite.

Summary

The aim of our study is to predict the electrical insulation of transformer oil and determine its condition in an intelligent manner without shutting it down. To achieve this, we used the "Matlab" program and a neural cell network. We utilized the test results conducted at the high voltage laboratory of the former El Oued University using the leakage current technique. Based on these tests, we obtained a database that helps us in detecting and diagnosing the condition of electrical transformer oil.

Keywords: Diagnostic, Electrical insulation, Artificial Neural Network, Leakage current.

INTRODUCTION GENERALE

Les transformateurs électriques sont des dispositifs utilisés pour changer la tension de l'électricité en la réduisant ou en l'augmentant lors de sa distribution et de sa transmission. Ils sont indispensables pour que l'électricité produite par les centrales électriques soit utilisable par les consommateurs.

Cependant, les transformateurs électriques sont soumis à des pannes techniques qui peuvent survenir à tout moment, mettant en danger la vie des personnes à proximité. Ces incidents peuvent également causer des pertes financières importantes pour les compagnies d'électricité en raison des coûts élevés de réparation ou de remplacement des équipements endommagés. [1]

L'augmentation constante de la consommation d'électricité dans le monde a également des répercussions sur les transformateurs. En effet, la surcharge des anciens transformateurs peut entraîner leur dégradation prématurée et des risques d'explosion. Cela met en évidence la nécessité de trouver des méthodes préventives pour minimiser ces risques sans interrompre le fonctionnement des installations.

Les huiles isolantes utilisées dans les transformateurs sont l'un des éléments les plus importants pour garantir une bonne isolation et un bon refroidissement. Les diélectriques liquides, tels que les huiles minérales, sont utilisés pour isoler les parties électriques du transformateur les unes des autres et des parties externes. Ils ont la capacité de résister à des niveaux de tension élevés, mais ils peuvent se dégrader au fil du temps en raison de l'exposition à l'air et à l'humidité. [2]

La surveillance régulière de l'état de l'huile d'un transformateur en service est donc une mesure préventive efficace pour prévenir les pannes et les risques d'explosion. Cette surveillance peut également fournir des informations sur l'état interne de la partie active du transformateur.

Ainsi, les études et les recherches visant à améliorer la résistance diélectrique des huiles utilisées dans les transformateurs sont un sujet d'actualité important. Le but de notre travail est d'appliquer les analyses d'huile et les machines utilisées dans ces analyses et de savoir comment ces analyses contribuent au maintien de l'intégrité du transformateur.

Ce travail comprend trois chapitres distincts :

Nous commençons par le premier chapitre qui aborde les transformateurs de tension électrique, où il explique les types d'huiles, leurs caractéristiques, avantages et inconvénients, les méthodes de recyclage d'huile et leur importance dans la protection de la continuité du transport d'énergie dans le réseau de transport national.

Le deuxième chapitre traite des différentes méthodes traditionnelles et modernes pour tester l'huile de transformateur électrique.

Le troisième chapitre parle de diagnostic d'état de l'huile en utilisant le courant de fuite par la méthode de RNA

Chapitre I

***Recherche bibliographique sur l'huile de
transformateur***

I.1 Introduction

Les transformateurs de puissance sont essentiels pour les réseaux de transport et de distribution d'électricité car ils permettent de convertir et de maintenir le flux de puissance. Ils sont couramment utilisés dans différentes étapes du processus :

- À la sortie des centrales pour augmenter la tension pour la transmission.
- Dans les postes d'interconnexion ou de distribution.
- Dans les postes de distribution où la tension est réduite pour s'adapter à la tension de distribution.
- Dans les postes de distribution où la tension est réduite pour s'adapter au niveau de tension requis par les entreprises et les résidences (Figure I.1). [3]

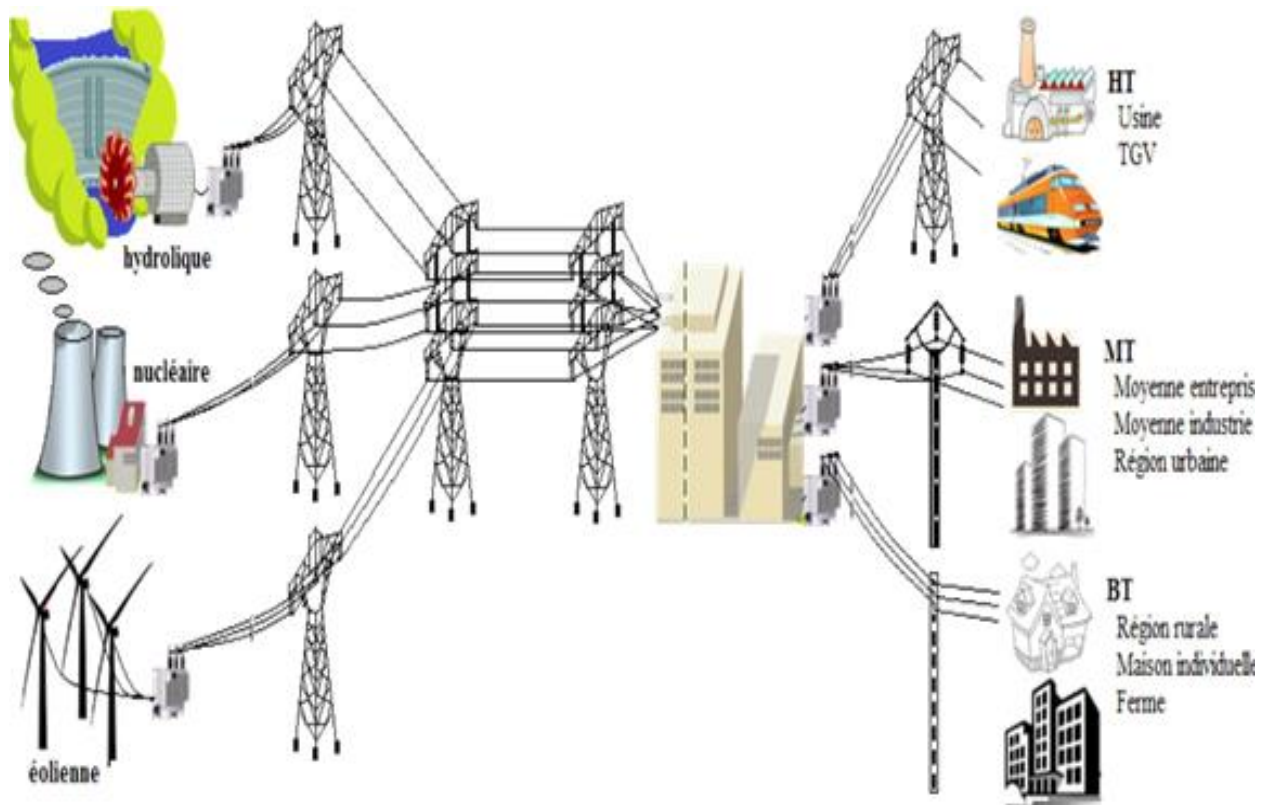


Figure I.1 Réseau électrique.

Ces équipements comportent souvent des structures d'isolation mixtes, combinant au moins deux phases : solide/liquide ou solide/gaz. Ce type d'isolation est également présent dans d'autres équipements tels que les condensateurs de puissance, les disjoncteurs et les câbles, ainsi que dans les lignes aériennes (isolateurs de support et de traversée). Dans certains cas, les isolants solides sont utilisés à la fois comme enveloppe et comme isolant, comme dans le cas des disjoncteurs. Toutefois, dans les transformateurs de puissance, en plus de l'isolation des bobinages et des traversées, les solides servent également de panneaux (rôle mécanique) et de barrière isolante, en particulier dans les transformateurs cuirassés. Les fluides jouent également un double rôle en tant qu'isolant et caloporteur.

Ce chapitre décrit brièvement les différents éléments qui composent les transformateurs de puissance, et se concentre ensuite sur les différents types d'isolation liquide et solide utilisés dans ces équipements, ainsi que sur leurs propriétés électriques et physico-chimiques. [4]

1.2 Constitution des transformateurs de puissance

Les transformateurs de puissance sont des équipements essentiels et coûteux dans les réseaux d'énergie électrique. En termes d'investissement, ils représentent près de 60 % du coût total d'un poste de transformation. La plupart de ces transformateurs sont des structures triphasées, allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de MVA, fonctionnant en haute tension dont la tension la plus basse est supérieure ou égale à 20 kV. Ils sont immergés dans de l'huile isolante, en particulier de l'huile minérale. En effet, l'huile isolante est utilisée non seulement comme isolant dans les transformateurs, mais également comme moyen de refroidissement. Un exemple simplifié d'une coupe d'un tel transformateur est présenté sur la Figure 1.2. [5]

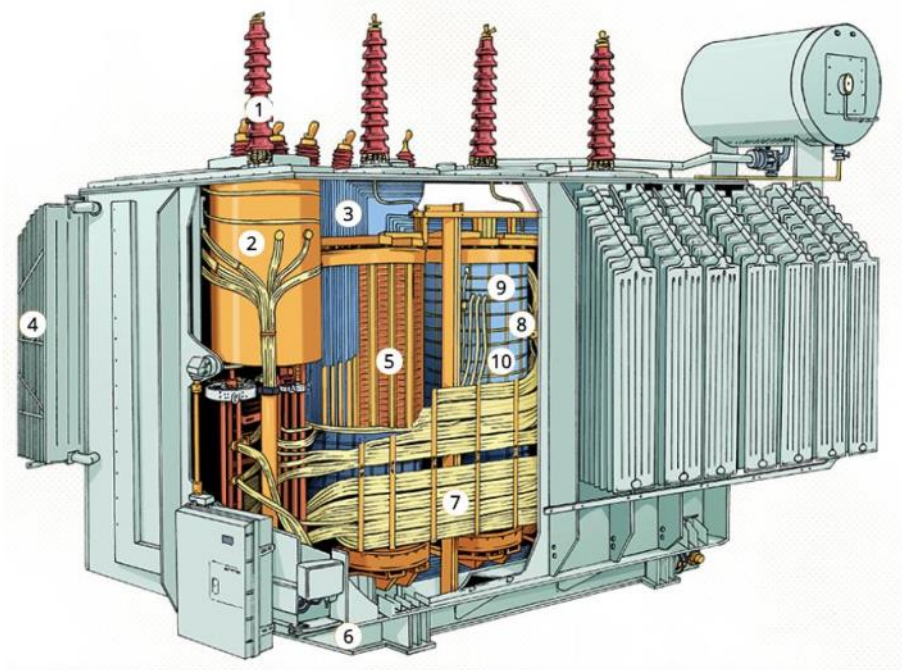


Figure I.2 Constitution générale de transformateurs de puissance.

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

I.3 L'isolation d'un transformateur

Dans un transformateur, l'isolation est assurée par un système diélectrique composé à la fois d'un matériau solide (papiers ou cartons) et d'un matériau liquide diélectrique (huile isolante). Les parties actives d'un transformateur sont constituées des enroulements et de leur isolation (papiers ou cartons). Dans cette partie active, l'isolement est assuré par des matériaux isolants sous deux états différents :

- Liquide : huile minérale, carbure d'hydrogène chloré (pyralène).
- Solide : organique (papier, résine synthétique, vernis).

I.3.1 Isolation Liquide de Transformateurs de Puissance

Les diélectriques liquides sont utilisés comme imprégnant pour les diélectriques solides et comme remplissage pour divers équipements électriques tels que les disjoncteurs, les transformateurs de puissance, les réactances, les réducteurs de mesure, les condensateurs, les câbles, les boîtes de traversées, etc. En plus de leur fonction principale d'isolation, d'extinction des décharges d'arc et de dissipation de chaleur, les isolants liquides peuvent également agir comme moyen d'amortissement acoustique dans les équipements électriques tels que les transformateurs. Plus important encore, ils offrent un moyen pratique d'évaluer régulièrement l'état de l'équipement électrique pendant sa durée de vie en service. En effet, les liquides jouent un rôle crucial dans le maintien de l'équipement en bon état. [6]

I.3.2 Le rôle des huiles isolantes dans les transformateurs

En électrotechnique, les huiles isolantes sont utilisées soit comme imprégnant pour l'isolation cellulosique, soit comme produit de remplissage pour divers équipements électriques tels que les transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure, etc.), les réactances, les condensateurs, les câbles, les traversées, les disjoncteurs, les changeurs de prise, etc. Les volumes d'huiles utilisés varient de quelques litres pour les condensateurs à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance. Leur rôle principal est d'améliorer la tenue diélectrique de l'isolation solide en éliminant l'air et les autres gaz, sachant que la rigidité diélectrique des liquides est nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans de nombreuses applications, les huiles isolantes servent à la fois à assurer l'isolation électrique et à évacuer la chaleur, comme c'est le cas pour les transformateurs.

I.3.3 Principaux types d'huiles isolantes

Les huiles isolantes sont généralement classées en fonction de leur origine, avec trois types différents : les huiles végétales (issues de produits naturels), les huiles minérales (fabriquées à partir de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse. Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. Les huiles végétales ont été les premières à être utilisées, suivies des huiles minérales qui ont été développées ensuite.

Les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour combler les lacunes des huiles minérales dans certaines applications.

Le tableau I.1 présente les caractéristiques de performance typiques des liquides diélectriques utilisés dans les transformateurs immergés. [7].

Propriétés	Huiles minérale	Huiles silicone	Esters synthétiques	Huiles végétales	Methods D'essais
Tension de claquage (kV)	30 – 85	35 – 60	45 – 70	82 – 97	IEC 60156
Permittivité relative à 25°C	2.1 – 2.5	2.6 – 2.9	3.0 – 3.5	3.1 – 3.3	IEC 60247
Viscosité à 0°C, $mm^2 \cdot s^{-1}$	< 76	81 – 92	26 – 50	43 – 77	ISO 3104
Viscosité à 40°C, $mm^2 \cdot s^{-1}$	3 – 16	35 – 40	14 – 29	16 – 37	
Viscosité à 10 °C, $mm^2 \cdot s^{-1}$	2 – 2.5	15 – 17	4 – 6	4 – 8	
Point d'écoulement ,°C	-30 – -60	-50 – -60	-40 – -50	-19 – -33	ISO 3016
Point d'éclair ,°C	100 – 170	300 – 310	250 – 270	315 – 328	ISO 2592(I)
Point de feu ,°C	110 – 185	340 – 350	300 – 310	350 – 360	ISO 2592(I)
Densité à 20°C , $kg.dm^3$	0.83 – 0.89	0.96 – 1.10	0.90 – 1.00	0.87 – 0.92	ISO 3675
Chaleur spécifique $J.g^{-1}K^{-1}$	1.6 – 2.0	1.5	1.8 – 2.3	1.5 – 2.1	ASTM E1269
Conductivité thermique $W.m^{-1}K^{-1}$	0.11 – 0.16	0.15	0.15	0.16 – 0.17	(DCS)
Coefficient de dilatation $10^{-4}K^{-1}$	7 – 9	10	6.5 – 10	5.5 – 5.9	ASTM D1903

Tableau I. 1 Comparaison de paramètres typiques des principaux d'huiles isolantes.

I.4 Classification des huiles isolantes

Les liquides et huiles isolants peuvent être classés selon la catégorie ou selon l'origine d'extraction

I.4.1 Selon la catégorie

Le tableau I-1 présente les types les plus courants d'huiles et de liquides isolants, classés par catégorie. Ces liquides sont généralement des composés organiques composés de molécules d'hydrocarbures stables tels que les alcanes (aliphatiques), les cyclanes (alicycliques), les aromatiques et leurs dérivés halogénés. Ils ne contiennent généralement pas de groupes fonctionnels et leur stabilité sous contraintes thermiques et électriques est primordiale pour assurer une durée de vie de plus de 30 ans aux équipements.

Différentes catégories de diélectriques liquides				
N°	Catégorie	Type	Application	Caractéristiques particulières
I.	Huiles minérales	Naphténiques	tous types : transformateurs, condensateur, câbles, etc.	- Bas point d'écoulement sans additif - Teneur en hydrocarbures aromatique > 12%
		Paraffiniques		- Indice de viscosité de 115 à 120 (60 pour une huile naphténique)
		A masse moléculaire élevée	Transformateurs de distribution (remplacement des PCB)	- Point de feu > 300 °C
II.	hydrocarbure de synthèse	polybutènes	câbles d'énergie	- Pertes diélectriques très faible $\text{tg}\delta < 0,0005$ à 50 Hz et 90°C
		Alkylbenzènes	Traversées	- Rigidité électrique au choc de foudre élevée - Absorption gazeuse sous décharges partielles
		Alkylnaphtalènes	Condensateurs	
		Alkylbiphéniles	Condensateurs tout film	
III.	Hydrocarbures halogénés	Perchloréthylène	Transformateurs de distribution	- Résistant au feu - Appareils scellés et à points chauds limités par la température d'ébullition
		Trichlorobenzènes	Liquides d'attente en rétrofilling (post-remplissage)	- Solvant des PCB - Ininflammabilité
		Polychlorobiphéniles (PCB)	Transformateurs	- Ininflammabilité
		Polychlorophénylalcane		- Biodégradabilité - Ininflammabilité
		Trichlorotrifluoroéthane	Transformateurs pour équipement électronique et rayon X	- Agent de refroidissement - Stabilité thermique

IV.	Estes organiques	Néocaprâte de benzyle	Condensateur au papier	- Permittivité relative > 5 à 20°C à 50 Hz
		Dioctylphtalate	Remplacement des PCB	- Permettent en mélange d'accroître le point de feudes diélectriques liquides
		Esters phosphates	organe de coupure immergé	
		Esters du pentaérythrol	Transfo de traction etde distribution	- Point de feu > 300°C
V.	Silicones liquides	Polydiméthylsiloxanes	Transfo de traction	- Point de feu > 300°C - Indice de viscosité élevé :170
		polyméthylphénylsiloxane	Liquide expérimental	- Absorption gazeuse sous décharge partielle
VI.	Liquides divers	Éthers-oxydes (alkyldiphényle-éther, ditolyléther)	Condensateurs	- Permittivité relative, à 20°C, supérieur à 3, adaptabilité.
		Mélanges de liquides	Condensateurs	- Adaptabilité - Réduction ou suppressionde pertes Joule.
		Gaz liquéfiés (Argon)	Enroulement supraconducteur et cryogénique	

Tableau I. 2 Caractéristiques et domaines d'application des diverses catégories d'huiles diélectriques.

I.4.2 Selon l'origine

Les huiles isolantes utilisées dans les transformateurs, indépendamment de leur type, doivent satisfaire à plusieurs critères électriques, physico-chimiques et thermiques qui englobent l'ensemble de leurs propriétés, garantissant ainsi leurs deux fonctions principales, qui sont l'isolation électrique et le transfert de chaleur.

Les propriétés d'une huile isolante peuvent être classées en trois catégories, à savoir les propriétés électriques, physiques et chimiques. Ces propriétés sont toutes indispensables pour assurer une isolation électrique fiable et efficace ainsi qu'un transfert de chaleur optimal dans le transformateur. [8]

propriétés	Huiles minérale	Huiles silicone	Esters synthétiques	Huiles végétales
Transformateurs de puissance	A	X	B	B
Transformateurs de traction	A	A	A	X
Transformateurs de distribution	A	A	A	A
Transformateurs d'instrument	A	X	X	X

Tableau I. 3 Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs.

A = Largement utilisé
B = moins fréquemment utilisé
X = Couramment non utilisé

I.4.2.1 Huiles synthétiques

Des liquides de synthèse sont utilisés pour remplacer les huiles minérales lorsque leurs propriétés ne sont pas adéquates. Par exemple, ils peuvent être utilisés pour améliorer la résistance au feu dans les transformateurs ou pour obtenir de meilleures performances diélectriques et une stabilité thermique dans les câbles et les condensateurs [9]. Il existe quatre principaux types de liquides de synthèse, à savoir les hydrocarbures aromatiques, les hydrocarbures aliphatiques tels que les polyoléfines, les esters obtenus à partir d'acides organiques et d'alcools, ainsi que les silicones.

Ces liquides sont tous dérivés des principaux intermédiaires de la pétrochimie. Bien que des produits per fluorés aient également été proposés pour certaines applications spécifiques dans les transformateurs et les condensateurs, leur coût est cent fois plus élevé que celui des huiles minérales, limitant ainsi leur utilisation. Les polychlorobiphényles, qui sont également des liquides de synthèse, ont été largement utilisés pendant plusieurs décennies, mais leur persistance dans l'environnement a conduit à leur interdiction. Seuls les produits biodégradables sont désormais acceptés.

Les huiles synthétiques sont utilisées lorsque les huiles minérales ne répondent pas aux caractéristiques requises. Par exemple, les huiles synthétiques sont utilisées pour améliorer la résistance au feu des transformateurs ou pour obtenir une meilleure stabilité thermique et des performances diélectriques supérieures pour les câbles et les condensateurs. Il existe quatre principaux types de liquides synthétiques : les hydrocarbures halogénés, les hydrocarbures aromatiques, les polyoléfines et les esters.

Les liquides synthétiques ont un point d'éclair élevé, ce qui signifie qu'ils sont ininflammables et ont un point d'éclair minimum supérieur à 300°C. En raison de leur haute résistance à l'inflammation, ils sont utilisés dans les transformateurs situés dans les zones urbaines, où la sécurité des personnes et des biens peut être compromise en cas d'incendie [9].

A. Les hydrocarbures halogénés

À partir de 1930, les huiles minérales ont été remplacées par des produits chlorés (halogénés) pour le remplissage des transformateurs. Bien que des dérivés fluorés ou chlorofluorés aient également été utilisés, l'industrie électrotechnique a principalement employé des produits chlorés en raison de leur capacité à éviter la formation de gaz inflammables ou explosibles en cas de décharges partielles ou de claquages électriques. Ce processus implique la substitution d'une partie des atomes d'hydrogène de la molécule par des atomes de chlore. Lorsqu'il y a ionisation ou arc électrique, des molécules d'HCl sont formées au lieu d'hydrogène gazeux.

Les polychlorobiphényles (PCB) ont été largement utilisés jusqu'à ce que leur utilisation soit réglementée en raison de leur toxicité. Des produits de remplacement des PCB ont été proposés, présentant le même comportement au feu, mais ils ont également été réglementés. Actuellement, aucun produit chloré n'est utilisé comme liquide pour les applications en électrotechnique [10].

B. Les hydrocarbures aromatiques

Les alkylbenzènes sont produits par alkylation du benzène avec des oléfines ayant entre 8 et 14 atomes de carbone. Cette réaction est réalisée en présence d'un catalyseur Friedel et Crafts, à une température de 40 à 50°C et sous une pression de quelques bars. Ensuite, une distillation est effectuée pour séparer les fractions plus ou moins lourdes. En fonction de l'oléfine utilisée, les alkylbenzènes peuvent être linéaires ou ramifiés, et cette différence peut être distinguée par spectrométrie infrarouge (un ou deux pics dans les régions 1 360cm⁻¹ et 1 380 cm⁻¹, respectivement). Comparativement aux huiles minérales, la composition des alkylbenzènes est assez simple, avec seulement 10 à 20 molécules différentes de type C_nH_{2n+1} [11].

Les "askarels" sont un groupe de produits développés pour remplacer les PCB en tant qu'isolant pour les condensateurs. Dans le domaine de la basse tension, les condensateurs sont généralement fabriqués à partir de polypropylène métallisé et ne contiennent plus de liquide.

Dans le domaine de la haute tension, la principale exigence pour les produits d'isolation était initialement l'absence de chlore, ce qui a conduit au développement de produits plus performants que les askarels.

Les polyoléfines sont des hydrocarbures insaturés à chaîne droite ou ramifiée, qui possèdent une double liaison en bout de chaîne. Les plus connus et les plus utilisés sont les polybutènes, et plus spécifiquement les polyisobutènes (PIB). Plus récemment, les poly- α -oléfines (PAO) ont fait leur apparition et sont destinées à remplacer les huiles minérales. Elles sont obtenues par polymérisation catalytique d'une oléfine. Le PIB est fabriqué à partir d'une fraction de pétrole contenant des hydrocarbures en C4, principalement constituée (à 45 %) de n-butènes et d'isobutène. Voici les formules chimiques correspondantes.

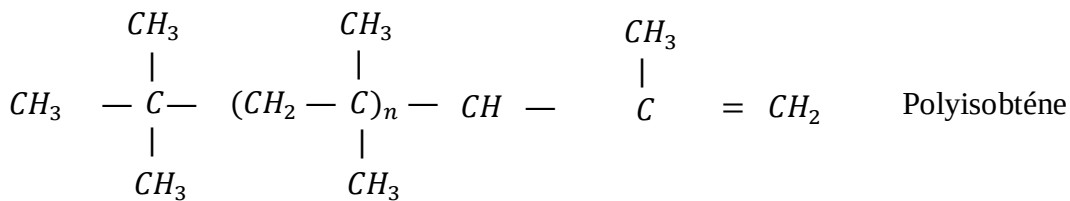
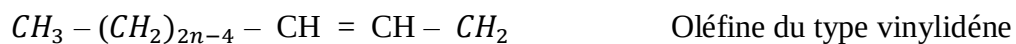
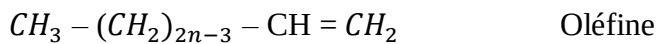


Figure I.3 Exemples de formule de polybutènes.

En électrotechnique, différents types d'esters sont utilisés pour des applications spécifiques. Les phtalates ont été conçus pour remplacer les PCB dans les condensateurs basse tension, mais leur marché a considérablement diminué dans les années 70 en Europe, passant de plusieurs milliers de tonnes par an à moins de 500 tonnes en raison du développement de condensateurs "secs" au film polypropylène métallisé.

Les esters de pentaérythritol ont été développés pour l'imprégnation de transformateurs résistants au feu, après le bannissement des PCB. Leur marché est relativement limité, atteignant seulement quelques milliers de tonnes par an dans le monde.

Les esters phosphoriques ont été proposés pour diverses applications telles que les condensateurs et les transformateurs en raison de leur résistance au feu et de leur permittivité élevée, mais leur consommation est extrêmement faible et presque nulle en Europe [12].

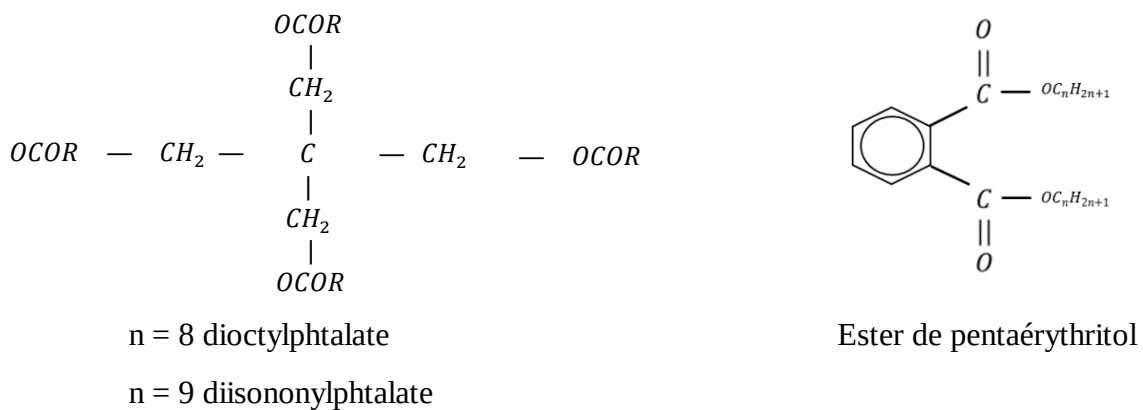


Figure I.4 Formules des esters isolants.

I.4.2.2 Huiles végétales

Depuis des temps immémoriaux, les huiles végétales sont obtenues à partir de la récolte de graines et de fruits. Après un processus de pressage suivi de raffinage complexe, elles donnent des esters d'acides gras et de glycérol appelés triglycérides. Ces huiles sont biodégradables et généralement peu toxiques, en raison de leur faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse, qui sont des caractéristiques avantageuses sur le plan environnemental. Toutefois, ces mêmes caractéristiques présentent un inconvénient majeur pour les applications électrotechniques, car leur rigidité diélectrique est faible. En conséquence, malgré une utilisation limitée dans certains types de condensateurs à courant continu, les huiles végétales sont peu utilisées. Bien que leur utilisation dans les transformateurs ait été proposée récemment. [13]

➤ Structure et présentation

La composition chimique de ces huiles est celle d'un triester principalement dérivé de triglycérides. Les esters ont une formule générale de $R\text{-COO-R'}$, et la structure chimique d'une huile végétale est illustrée dans la figure I.5.

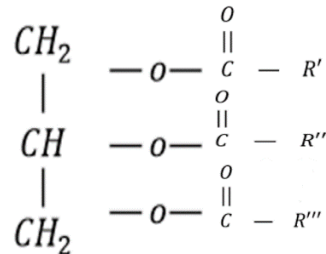


Figure I.5 Structure générale d'une huile végétale.

Les huiles végétales sont produites par estérification d'un tri-alcool simple avec trois acides gras mono-carboxyliques, qui ont une chaîne linéaire non branchée et un nombre pair d'atomes de carbone. Ces acides peuvent être saturés ou insaturés, et parfois hydroxylés. Les triglycérides sont obtenus par trituration des grains par broyage et pression.

Ces huiles végétales sont généralement peu toxiques et biodégradables, en raison de leur faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Bien que ces caractéristiques soient bénéfiques d'un point de vue écologique, elles sont un désavantage important pour les applications électrotechniques, car leur comportement diélectrique est assez faible. Malgré ces inconvénients, les huiles végétales sont déjà utilisées dans les transformateurs de distribution, et des tentatives sont en cours pour étendre leur utilisation dans les transformateurs de puissance. Au cours des dernières années, deux unités ont été installées, l'une au Royaume-Uni (90 MVA/132 kV) et l'autre au Brésil (170 MVA/245 kV) [14].

➤ Avantages et inconvénients des huiles végétales

Les huiles végétales présentent un avantage considérable en matière de biodégradabilité, mais leur sensibilité à l'oxydation est un inconvénient majeur. Pour contrer cela, des antioxydants sont ajoutés, mais ils ne sont pas écologiques ("non verts").

Ces huiles ont également une inflammabilité réduite et une solubilité élevée dans l'eau, comparable à celle des esters organiques, par rapport aux huiles minérales.

Cependant, elles ont une viscosité plus élevée que les huiles minérales et un point d'écoulement relativement haut (-20°C environ), ce qui limite le transfert de chaleur. [15]

I.4.2.3 Huiles minérales

L'utilisation d'huiles minérales dans les installations électriques remonte à l'époque où leur production industrielle a commencé. Les huiles minérales sont obtenues par distillation de pétrole soigneusement sélectionné, une substance naturelle d'origine géologique. Elles sont purifiées pour éliminer les matières indésirables telles que les gaz légers, le sulfure d'hydrogène, l'eau, etc.

Les huiles minérales sont des mélanges complexes de plusieurs milliers de molécules différentes, notamment des hydrocarbures, des composés soufrés, oxygénés, azotés, ainsi que des traces de composés organométalliques. Ces huiles sont extraites dans toutes les régions du monde, et il existe plusieurs centaines de types différents. [16]

Il est important de souligner que les huiles minérales jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement des installations électriques, car elles assurent l'isolation électrique et la dissipation de la chaleur. Cependant, il est également important de prendre des précautions appropriées lors de leur manipulation, car certaines huiles peuvent être toxiques ou inflammables.

La première phase du développement des huiles minérales a été axée sur l'amélioration de leur stabilité à l'oxydation. Cette phase a duré plus de trente ans et a permis d'atteindre un niveau satisfaisant de stabilité, ce qui permet aujourd'hui leur utilisation tout au long de la durée de vie des équipements les plus soumis à des contraintes thermiques.

Depuis 25 ans, la deuxième phase de leur évolution, portant sur leur stabilité sous contraintes électriques et ionisantes, a été couronnée de succès. Les constructeurs peuvent ainsi disposer d'huiles minérales stables même sous décharges électriques.

Ces améliorations progressives ont également permis de réduire progressivement les volumes d'huiles utilisés dans les appareils, tout en maintenant des performances élevées en matière d'isolation électrique et de dissipation thermique.

Les huiles minérales sont produites à partir de bruts de pétrole qui subissent différents processus de raffinage pour obtenir des huiles isolantes répondant aux normes électrotechniques. La composition de ces huiles dépend de la composition du brut de pétrole d'origine et contient environ 3000 molécules différentes, dont seulement 10% sont caractérisées. [17]

La norme CEI 60296 définit les propriétés requises pour les huiles minérales utilisées dans les transformateurs, afin d'assurer leur efficacité et leur sécurité. Ces propriétés comprennent notamment la stabilité à l'oxydation, la stabilité diélectrique, la viscosité, la densité et la teneur en impuretés.

Il est important de noter que la composition des huiles minérales peut varier d'un fournisseur à l'autre, ce qui peut avoir un impact sur leurs performances et leur durabilité. Par conséquent, il est essentiel de choisir des huiles minérales conformes aux normes en vigueur et de qualité supérieure pour garantir le bon fonctionnement et la longévité des équipements électriques.

L'huile minérale est obtenue à partir du raffinage du pétrole brut. Selon l'origine du pétrole et du processus de raffinage, on peut identifier différents types d'huile (figure I.6)

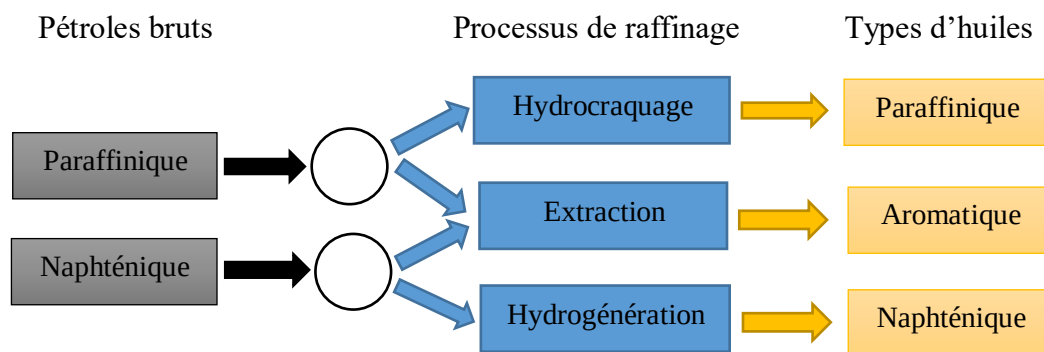


Figure I.6 Processus de raffinage pour les huiles brutes.

➤ Origine et composition

Les huiles minérales sont largement utilisées dans les équipements électriques depuis le début de leur production industrielle. Elles remplissent deux fonctions principales : l'isolation électrique et le transfert thermique. Ces huiles sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, qui sont des substances naturelles d'origine géologique débarrassées de matières indésirables telles que les gaz légers, le sulfure d'hydrogène, l'eau, etc. [18]

Les pétroles sont principalement composés d'hydrocarbures saturés paraffiniques (alcanes) et naphténiques (cycloalcanes), qui constituent la matrice liquide fondamentale, ainsi que d'hydrocarbures aromatiques et hétérocycliques. Les huiles minérales contiennent près de 3 000 produits différents, dont 90 % n'ont pas encore été identifiés. Elles peuvent être classées en deux catégories principales : paraffiniques ou naphténiques, en fonction du rapport entre le nombre de carbones paraffiniques (Cp) et le nombre de carbones naphténiques (CN). Le carbone est l'élément qui détermine la structure de l'huile. Les améliorations continues des procédés de raffinage ont permis d'obtenir des huiles minérales de plus en plus performantes, tout en réduisant progressivement les volumes utilisés dans les équipements. [19]

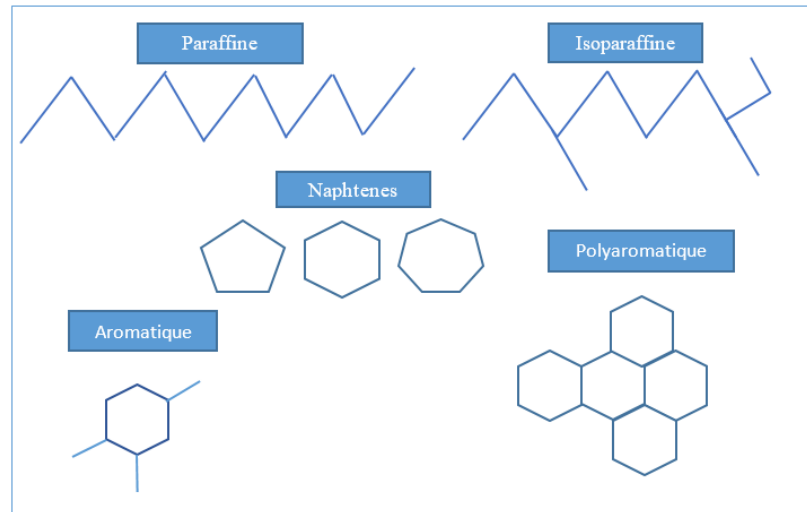


Figure I.7 Structures des hydrocarbures de base dans une huile minérale.

➤ Rôle des huiles minérales

L'huile peut être utilisée seule comme isolation électrique dans les zones où les tensions électriques sont faibles. Cependant, dans les transformateurs de haute tension, l'huile minérale doit être imprégnée dans les papiers et les cartons préalablement séchés et dégazés. Les huiles minérales ont trois fonctions principales : évacuer la chaleur produite par les pertes des conducteurs, des circuits magnétiques et des enroulements vers les dispositifs de refroidissement, isoler et ralentir l'oxydation de l'isolation solide, et isoler électriquement. En outre, pour certains équipements contenant des pièces mobiles, l'huile a également une fonction résistante au feu et lubrifiante. [20]

➤ Les Avantages et inconvénients des huiles minérales

Les huiles minérales offrent un excellent compromis entre le prix et les performances, et sont très compatibles avec les autres matériaux utilisés dans les transformateurs. Les huiles minérales naphténiques ont une viscosité fiable qui permet une bonne évacuation de la chaleur, un démarrage à froid correct et une bonne imprégnation des isolants cellulosiques. Cependant, leur inflammabilité est un inconvénient important car leur point d'éclair est relativement bas, entre 140 et 150°C. D'un point de vue écotoxique, les huiles minérales peuvent être nuisibles à l'environnement en cas de fuites dans le transformateur, car elles sont potentiellement cumulables et peuvent entraîner une bioaccumulation et une contamination de la chaîne alimentaire. [21]

I.5 Les causes de vieillissement des huiles

Lorsqu'on utilise de l'huile sur une longue période sous différentes contraintes telles que électriques, thermiques et chimiques, cela peut entraîner sa dégradation. Le vieillissement est un phénomène qui se caractérise par un changement lent et irréversible des propriétés du matériau. Les types de vieillissement les plus courants pour l'huile de transformateur sont le vieillissement thermique, le vieillissement électrochimique et le vieillissement électrique. La modification des propriétés affecte grandement les performances de l'isolant et peut réduire considérablement sa durée de vie. [22] Voici les principales causes :

A. Oxydation

L'huile de transformateur est en contact avec l'air et la chaleur, ce qui peut provoquer une oxydation. L'oxygène réagit avec les molécules d'huile, créant des composés acides qui peuvent corroder les composants du transformateur.

B. Contamination

Les contaminants, tels que l'eau, les particules métalliques et les produits de combustion, peuvent s'accumuler dans l'huile de transformateur. La contamination peut accélérer la dégradation de l'huile et causer des dommages au transformateur.

C. Température

La température élevée accélère la dégradation de l'huile de transformateur. Les transformateurs fonctionnant à des températures élevées ont tendance à avoir une durée de vie plus courte que ceux qui fonctionnent à des températures plus basses.

D. Électriques

Les sollicitations électriques, telles que les arcs électriques et les décharges partielles, peuvent causer des dommages à l'huile de transformateur. Ces phénomènes peuvent produire des gaz corrosifs qui endommagent l'huile et les composants du transformateur.

E. Durée de vie

La durée de vie de l'huile de transformateur dépend de plusieurs facteurs, notamment la qualité de l'huile, les conditions de fonctionnement et l'entretien. Les huiles de qualité supérieure ont tendance à durer plus longtemps que les huiles de qualité inférieure. [22]

I.6 Recyclage d'huile de transformateur

En raison de la haute température et pression auxquelles les transformateurs fonctionnent, leur huile isolante a tendance à se dégrader avec le temps. Lorsque cela se produit, l'huile ne peut plus fournir une isolation adéquate, ce qui peut entraîner une diminution des performances ou même une défaillance du transformateur. Pour éviter cela, l'entretien régulier et le recyclage de l'huile sont essentiels. Pendant l'entretien de routine, l'état des transformateurs et de leur huile isolante est évalué pour déterminer si le recyclage est nécessaire. Si l'huile est trouvée dégradée, elle peut être recyclée correctement par plusieurs méthodes différentes. [23]

1. La régénération

Cette méthode consiste à filtrer l'huile de transformateur pour éliminer les impuretés, l'humidité et les contaminants. Les filtres utilisés pour la régénération de l'huile sont généralement en argile naturelle. Cette méthode est couramment utilisée pour l'huile minérale et végétale.

2. Le traitement par adsorption

Cette méthode consiste à éliminer les contaminants de l'huile de transformateur à l'aide de matériaux adsorbants tels que le charbon actif, la silice et la zéolite. Cette méthode est efficace pour éliminer les polluants organiques, les métaux et les additifs d'huile.

3. Le traitement thermique

Cette méthode consiste à chauffer l'huile de transformateur pour la décomposer en ses composants de base. Cette méthode est particulièrement efficace pour éliminer les contaminants et les additifs d'huile, mais elle peut être coûteuse.

4. Le traitement biologique

Cette méthode consiste à utiliser des micro-organismes pour décomposer les contaminants de l'huile de transformateur. Cette méthode est plus efficace pour l'huile végétale et les huiles synthétiques. [23]

I.7 Conclusion

L'huile minérale est dotée de propriétés remarquables, avec de nombreuses variantes dans sa composition. Elle reste donc le liquide le plus adapté et le plus couramment utilisé dans les isolations haute tension, notamment dans les transformateurs de puissance. Dans ce premier chapitre, nous avons abordé les généralités sur les huiles diélectriques pour transformateurs de puissance, en mettant en évidence les propriétés isolantes de l'huile minérale, telle que la BORAK 22 utilisée par SONEGAS et manipulée lors de notre stage au sein du Laboratoire Essais et Contrôle de la Société Algérienne de Gestion du réseau de Transport de l'Electricité (GRTE). [24]

Chapitre II

***Méthodes du Contrôle et diagnostic de
l'huile de transformateur***

II.1 Introduction

Les huiles des transformateurs jouent un rôle essentiel dans l'isolation et le refroidissement des transformateurs de puissance. L'état de ces huiles a un impact direct sur les performances, la fiabilité et la durée de vie des transformateurs. Au fil du temps, les huiles des transformateurs peuvent se détériorer en raison de facteurs tels que le stress thermique, la contamination et le vieillissement. Il est donc crucial de diagnostiquer et de surveiller l'état des huiles des transformateurs afin de détecter d'éventuels défauts ou anomalies.

Le diagnostic des huiles des transformateurs implique l'utilisation de différentes techniques et méthodes. Ces méthodes visent à évaluer la santé du système d'isolation, à identifier d'éventuels problèmes et à permettre une maintenance préventive. Les méthodes de diagnostic traditionnelles reposent souvent sur l'inspection visuelle et des tests physiques de base. Cependant, des techniques de diagnostic modernes ont émergé, exploitant des outils et des technologies avancées pour fournir des évaluations plus précises et complètes. [25]

Dans ce chapitre, nous aborderons les techniques de diagnostic utilisées dans les deux méthodes, conventionnelles et intelligentes.

II.2 Méthodes de Surveillance et de diagnostic des isolants liquides

Pour déterminer si un transformateur est défaillant, il est essentiel de connaître les variations des différents paramètres de l'huile et du papier. L'huile isolante représente environ 70 % des informations sur l'état du transformateur, d'où l'importance de l'analyse de son huile. Bien que cette analyse puisse sembler simple, elle nécessite beaucoup de savoir-faire et de nombreuses opérations. Si l'huile est suffisamment dégradée pour mettre en danger le transformateur, des traitements tels que le dégazage, la filtration et la déshydratation doivent être effectués en fonction des besoins.

Ces méthodes de traitement peuvent être classées en deux catégories : les méthodes conventionnelles couramment utilisées par les différentes compagnies et laboratoires, et les méthodes non conventionnelles dites modernes, qui sont spécifiques à certains laboratoires et font l'objet de plusieurs recherches.

II.2.1 Méthodes conventionnelles

Le Tableau II.1 présente les essais et les normes utilisés par la SONEGGAZ.

Type d'essai	Norme
Couleur	ISO 2049
Viscosité cinématique	ISO 3104
Acidité totale	CEI 62021
Rigidité diélectrique	CEI 60156
Facteur de pertes diélectriques	CEI 247/ASTM 924
Teneur en eau	CEI 60814

Tableau II. 1 Normes utilisées par SONEGGAZ pour l'analyse de la BORAK22.

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

II.2.1.1 Mesure de la teneur en eau

La mesure de la quantité d'eau présente dans un échantillon est essentielle pour préserver les propriétés diélectriques de l'isolation. Cela est particulièrement important pour l'huile et le papier isolants, où la présence d'humidité peut réduire leur rigidité diélectrique. En général, la teneur en eau de l'huile minérale ne doit pas dépasser 5 ppm avant la mise en service du transformateur.

Pour mesurer la teneur en eau, un échantillon d'environ 2 ml d'huile est prélevé à l'aide d'une seringue et injecté dans un titreur automatique. La réaction qui en résulte permet de déterminer la teneur en eau, exprimée en parties par million (ppm). Nous utilisons le titreur automatique Karl Fischer 831 KF Coulometer avec électrode à génératrice à diaphragme commercialisé par la société Metrohm pour mesurer la teneur en eau. La photographie ci-dessous montre le dispositif expérimental utilisé. [26]



Figure II.1 Titreur Coulométrique Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau de liquide isolant.

II.2.1.2 Nombre de neutralisation

L'augmentation du nombre de neutralisation (NN) ou de l'acidité du fluide isolant est principalement due à l'oxydation de l'huile. La mesure du NN permet de surveiller le processus d'oxydation de l'huile, et une valeur élevée du NN indique une forte oxydation et une formation plus précoce de produits solubles et colloïdaux. Le nombre total d'acidité, exprimé en mg KOH/g, correspond à la quantité de composés acides dissous dans l'huile. Pour une huile neuve, l'indice est inférieur à 0,01 mgKOH/g et peut augmenter jusqu'à 0,05 mgKOH/g et plus au cours du vieillissement.

La mesure de l'acidité est effectuée par neutralisation à l'aide d'une solution de potasse alcoolique (KOH) et la valeur de l'acidité est exprimée en mg d'une solution KOH normalité à 0,1 nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile. L'indice d'acidité est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Où :} \quad \text{IA} = 0,1 \text{M1V/M}$$

IA : l'indice d'acidité.

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

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

M : masse d'huile (g).

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



Figure II.2 L'appareil de mesure de l'acidité conforme ainsi que le système de titrage.

II.2.1.3 Mesure de la viscosité

La viscosité de l'huile est un paramètre essentiel pour le dimensionnement et la conception des systèmes de refroidissement par convection naturelle dans les petits transformateurs auto-refroidis ou par écoulement forcé dans les grandes unités, comme les transformateurs de puissance, qui utilisent des pompes et des radiateurs. La fonction de transfert de chaleur d'une huile dépend de sa viscosité. La viscosité est définie comme la résistance de l'huile à l'écoulement et est une caractéristique essentielle des liquides isolants. Les viscosités élevées sont moins souhaitables, en particulier dans les climats froids. La viscosité cinématique est mesurée en chronométrant le temps d'écoulement de l'huile dans un tube capillaire calibré. Des viscosimètres sont utilisés pour mesurer la viscosité, comme illustré dans la photographie dans la figure II.3.



Figure II.3 Appareil de mesure de la viscosité

II.2.1.4 Mesure de la tension de claquage

La tension de claquage diélectrique, mesurée en kilovolts, représente la tension à laquelle un fluide isolant devient conducteur. La présence de contaminants, d'humidité et de particules, y compris les produits d'oxydation, réduit la tension de claquage diélectrique. Pour mesurer cette tension, un échantillon est placé dans une cellule entre deux électrodes en demi-sphères, puis soumis à une tension. Entre chaque test, les produits de décomposition qui apparaissent entre les deux électrodes sont éliminés. La figures suivantes montre une vue de la cellule d'essai utilisée pour effectuer la mesure de la tension de claquage, conformément à la norme ASTM D-877 ou CEI 60156. [27]

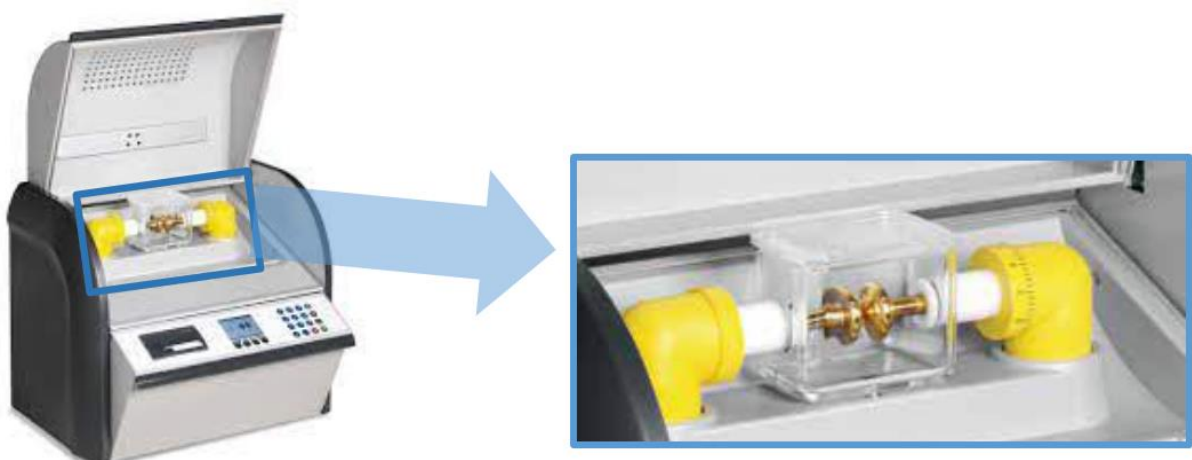


Figure II.4 L'appareil de claquage.

II.2.1.5 Examen visuel et couleur

La surveillance de la couleur et de l'aspect visuel de l'huile isolante permet une évaluation rapide de sa qualité. En effet, avec le temps, les huiles isolantes ont tendance à s'assombrir en raison de l'oxydation. L'inspection visuelle permet également de détecter la présence de matériaux indésirables en suspension dans l'huile.



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

II.2.1.6 Mesure du facteur de dissipation diélectrique

La mesure du facteur de dissipation des huiles isolantes électriques est une propriété très importante car elle permet de déterminer la concentration des porteurs de charges qui peuvent endommager la fonction diélectrique principale du liquide. Si la concentration des porteurs de charges dépasse une certaine limite critique sous une contrainte électrique, cela peut entraîner une panne latente dans le transformateur. Une faible valeur du facteur de dissipation indique de faibles pertes diélectriques et un faible niveau de contaminants ioniques polaires solubles ou colloïdaux. Ces caractéristiques sont utiles pour le contrôle qualité et pour indiquer les modifications de l'huile en service résultant d'une contamination ou de la détérioration de l'huile.

La mesure du facteur de pertes diélectrique ($\tan\delta$) et de la permittivité relative (ϵ_r) peut être réalisée à l'aide d'un pont de Schering de type Dieltest DLT. La cellule d'essai contenant l'échantillon d'huile est composée de deux cylindres coaxiaux avec une distance inter-électrodes de 5 mm. Le principe consiste à remplir la cellule avec l'huile, puis la chauffer jusqu'à 90°C sous une tension de 2 kV. Les résultats d'essai sont ensuite affichés et imprimés automatiquement. [28]



Figure II.6 Dieltest DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité relative.

II.2.2 Méthodes intelligentes

Avec les avancées récentes dans le domaine des méthodes intelligentes, de nouvelles approches basées sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique ont émergé pour faciliter le diagnostic de l'huile de transformateur de manière plus rapide, précise et économique.

Les méthodes intelligentes utilisent des algorithmes sophistiqués capables d'analyser de grandes quantités de données provenant de diverses sources, telles que les mesures électriques, les paramètres thermiques, les analyses d'huile et les données de fonctionnement du transformateur. Ces algorithmes peuvent détecter et interpréter les signes précurseurs de défaillance, permettant ainsi d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques. [29]

II.2.2.1 L'algorithme de ACO (Ant Colony Optimization)

➤ Définition

L'ACO (Ant Colony Optimization), ou optimisation par colonies, est une technique d'optimisation inspirée du comportement des fourmis lorsqu'elles cherchent de la nourriture. Elle est souvent utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire, tels que le problème du voyageur de commerce ou le problème d'ordonnancement.

Le principe de l'ACO repose sur la modélisation du problème à résoudre sous forme de graphe, où les nœuds représentent les villes (dans le cas du problème du voyageur de commerce) ou les tâches (dans le cas du problème d'ordonnancement), et les arêtes représentent les chemins entre les villes ou les dépendances entre les tâches. Chaque chemin entre les nœuds est associé à une quantité de phéromone déposée par les fourmis.

Les fourmis suivent un processus itératif pour trouver la meilleure solution au problème. Chaque fourmi se déplace de nœud en nœud en fonction des quantités de phéromone présentes sur les arêtes et des heuristiques locales. Lorsqu'une fourmi termine un parcours, les quantités de phéromone sont mises à jour en fonction de la qualité de la solution trouvée. Les chemins les plus courts ou les solutions de meilleure qualité sont renforcés par le dépôt de phéromone, ce qui permet aux fourmis suivantes de favoriser ces chemins lors de leurs déplacements.

Au fur et à mesure des itérations, les quantités de phéromone se concentrent sur les chemins les plus courts ou les solutions les plus prometteuses, ce qui guide les fourmis vers une meilleure solution globale. L'ACO a été largement utilisée avec succès pour résoudre de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire, offrant des résultats proches de l'optimalité dans de nombreux cas.

➤ Principe de fonctionnement

En utilisant l'algorithme ACO, nous pouvons simuler le processus d'exploration et d'exploitation des fourmis pour identifier les signes de dégradation de l'huile de transformateur. Les fourmis virtuelles peuvent suivre des pistes chimiques, représentant les différentes propriétés de l'huile, afin de localiser les zones présentant des altérations.

Grâce à l'algorithme ACO, nous pouvons optimiser les paramètres clés du diagnostic de l'huile de transformateur, tels que la concentration de différents composés chimiques, les niveaux d'humidité et la présence de particules étrangères. Les fourmis virtuelles peuvent ajuster leur comportement en fonction des indices chimiques qu'elles rencontrent, permettant ainsi une détection plus précise des problèmes potentiels.

En combinant l'algorithme ACO avec des techniques d'analyse de données avancées, nous pouvons développer un système expert capable de prédire l'état de l'huile de transformateur et de recommander des actions correctives appropriées. Cette approche innovante offre un moyen efficace d'améliorer la maintenance préventive des transformateurs, en minimisant les temps d'arrêt et en prolongeant leur durée de vie.

L'application de l'algorithme ACO au diagnostic de l'huile de transformateur représente une avancée significative dans le domaine de la surveillance des équipements électriques. En exploitant les principes de l'intelligence collective des fourmis, nous pouvons obtenir des informations précieuses sur l'état de l'huile, permettant ainsi une gestion plus proactive et plus efficace des transformateurs.

➤ Organigramme explicatif des différentes étapes de l'optimisation par l'ACO

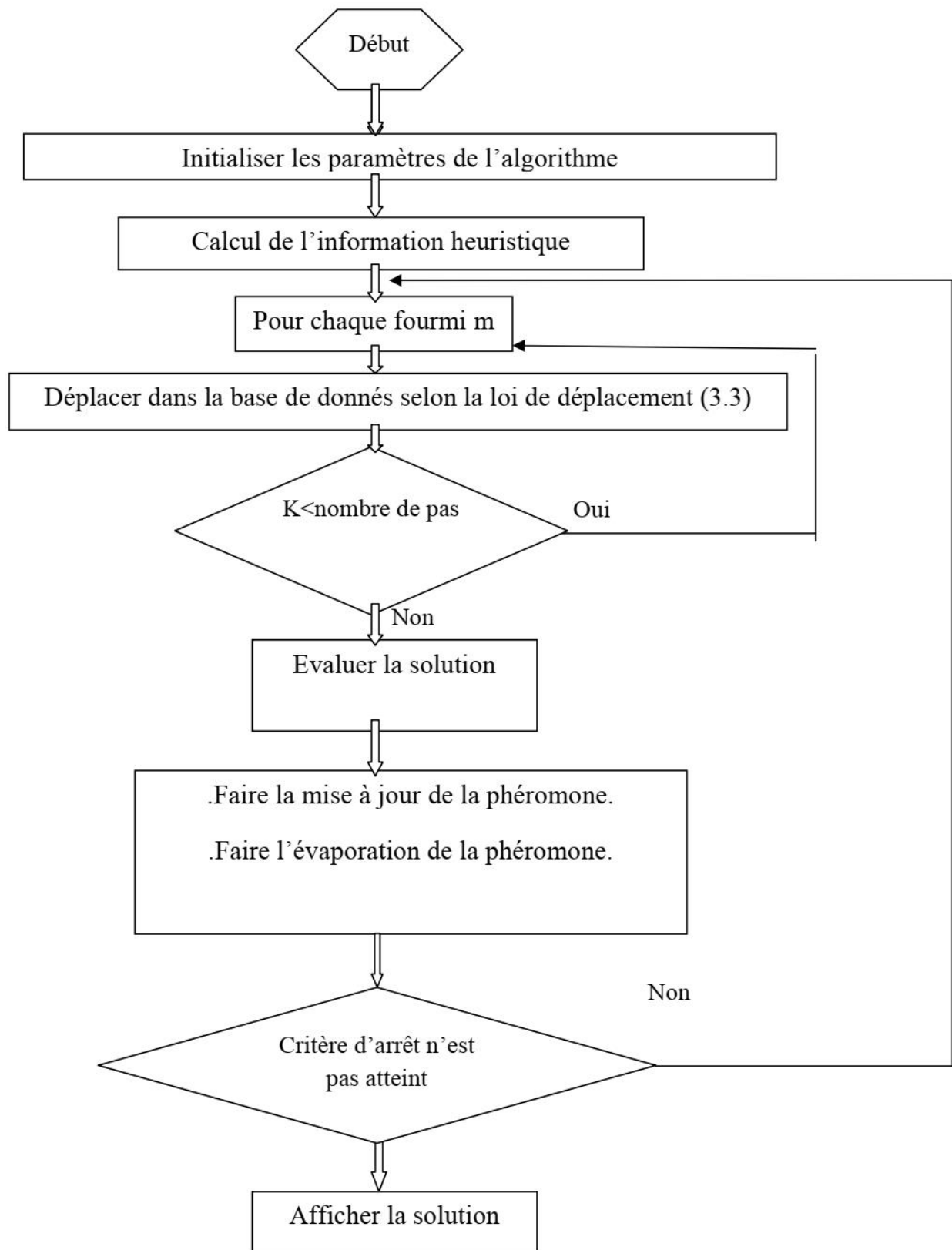


Figure II.7 Schéma des différentes étapes de l'optimisation par l'ACO.

II.2.2.2 L'algorithme de BCO (Bee Colony Optimization)

➤ Définition

L'algorithme de BCO (Bee Colony Optimization), également connu sous le nom d'optimisation par colonie d'abeilles, est une méta-heuristique inspirée du comportement des colonies d'abeilles pour résoudre des problèmes d'optimisation. Cet algorithme imite le processus de recherche de nourriture des abeilles pour trouver la meilleure solution possible à un problème donné. [30]

Le concept de base de l'algorithme de BCO repose sur l'idée que les abeilles effectuent des danses pour communiquer les informations sur les sources de nourriture qu'elles ont trouvées. De manière similaire, dans l'algorithme de BCO, plusieurs "abeilles" artificielles sont utilisées pour explorer l'espace de recherche du problème.

➤ Principe de fonctionnement

L'algorithme BCO peut être utilisé pour analyser les données de surveillance de l'huile de transformateur et détecter les anomalies. Voici un exemple de la façon dont cela pourrait fonctionner :

1. Collecte des données : Des capteurs ou des systèmes de surveillance sont utilisés pour collecter des données sur l'huile de transformateur, telles que la température, la viscosité, le taux d'humidité, les concentrations de gaz dissous, etc.
2. Prétraitement des données : Les données collectées peuvent contenir du bruit ou des valeurs aberrantes. Avant d'appliquer l'algorithme BCO, il est important de prétraiter les données en éliminant les valeurs aberrantes, en normalisant les données et en effectuant d'autres opérations de nettoyage si nécessaire.
3. Définition de la fonction objective : Dans le contexte du diagnostic de l'huile de transformateur, la fonction objective pourrait être définie pour maximiser la qualité de l'huile en minimisant les niveaux de contaminants ou en optimisant d'autres paramètres d'intérêt.
4. Initialisation de la colonie d'abeilles virtuelles : Dans l'algorithme BCO, une colonie d'abeilles virtuelles est créée pour explorer l'espace des solutions possibles. Chaque abeille représente une solution potentielle.

5. Exploration de l'espace des solutions : Les abeilles virtuelles utilisent des mécanismes d'exploration pour rechercher les solutions les plus prometteuses. Elles effectuent des déplacements dans l'espace des solutions en fonction des informations locales et globales.
6. Évaluation et mise à jour des solutions : Après chaque déplacement, les solutions sont évaluées en utilisant la fonction objective définie précédemment. Les meilleures solutions sont mises à jour et les abeilles virtuelles continuent leur exploration.
7. Critères d'arrêt : L'algorithme BCO continue d'explorer jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, par exemple lorsque le nombre maximum d'itérations est atteint ou lorsque la convergence est atteinte.
8. Analyse des résultats : Une fois que l'algorithme a convergé, les solutions optimales peuvent être extraites et interprétées pour effectuer le diagnostic de l'huile de transformateur. Cela peut inclure l'identification de la présence de contaminants, l'évaluation de la qualité globale de l'huile ou la détection de problèmes potentiels.

➤ Organigramme explicatif des différentes étapes de l'optimisation par le BCO :

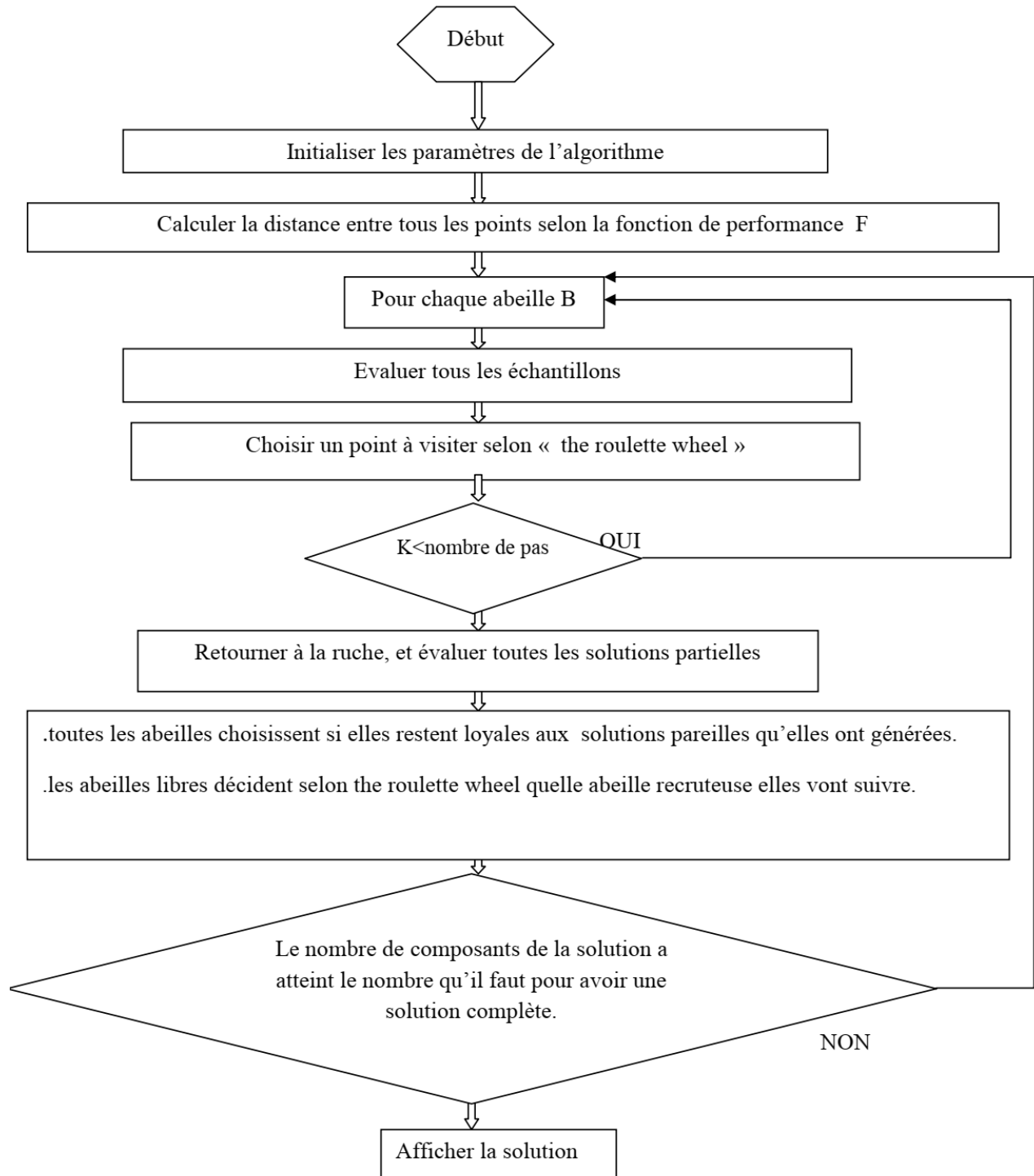


Figure II.8 Schéma des différentes étapes de l'optimisation par la BCO.

II.2.2.3 Méthode de RNA (Réseau de Neurones Artificiels)

➤ Définition

Les réseaux de neurones artificiels (RNA), également connus sous le nom de réseaux de neurones profonds ou de réseaux neuronaux, sont une classe de modèles d'apprentissage automatique inspirés par le fonctionnement du cerveau humain. Ils sont largement utilisés pour des tâches telles que la classification d'images, la reconnaissance vocale, la traduction automatique, la prédiction de séries chronologiques, etc... [31]

La méthode des réseaux de neurones artificiels se base sur un modèle mathématique qui simule le comportement des neurones biologiques interconnectés dans le cerveau. Un RNA est composé de plusieurs couches de neurones, chacune effectuant des opérations mathématiques simples sur les données d'entrée pour produire une sortie. Les neurones sont organisés en couches successives : une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie.

Chaque neurone est connecté à des neurones de la couche précédente et de la couche suivante par des poids. Ces poids sont ajustés pendant le processus d'apprentissage pour permettre au réseau de neurones d'apprendre à résoudre un problème spécifique. L'apprentissage se fait généralement en utilisant un algorithme d'optimisation tel que la rétropropagation du gradient.

Lorsqu'un réseau de neurones est entraîné sur un ensemble de données, il ajuste les poids des connexions entre les neurones afin de minimiser une fonction de coût qui mesure l'écart entre les prédictions du réseau et les valeurs attendues. Une fois le réseau entraîné, il peut être utilisé pour effectuer des prédictions sur de nouvelles données en passant simplement ces données à travers le réseau et en obtenant la sortie correspondante.

Les réseaux de neurones artificiels ont connu une popularité croissante ces dernières années grâce à des avancées technologiques, à l'augmentation de la puissance de calcul et à des ensembles de données massifs disponibles pour l'entraînement. Les modèles de RNA, tels que les réseaux de neurones convolutifs (CNN) et les réseaux de neurones récurrents (RNR), ont obtenu des performances remarquables dans de nombreux domaines.

➤ Principe de fonctionnement

Pour utiliser un RNA dans le diagnostic de l'huile de transformateur, vous devez collecter un ensemble de données comprenant des mesures physico-chimiques de l'huile de transformateur ainsi que des informations sur l'état du transformateur correspondant. Ces mesures peuvent inclure des paramètres tels que la viscosité, la teneur en eau, l'indice d'acidité, la présence de contaminants, les gaz dissous, etc.

Une fois que vous avez un ensemble de données étiquetées avec l'état du transformateur (par exemple, en bon état ou dégradé), vous pouvez entraîner un réseau de neurones à prédire l'état du transformateur à partir des mesures de l'huile. Voici les étapes générales pour utiliser un RNA dans ce contexte :

1. Collecte des données : Pour entraîner un réseau neuronal artificiel (RNA) à diagnostiquer l'huile de transformateur, il est nécessaire de collecter un ensemble de données comprenant des échantillons d'huile de transformateur avec des informations sur leur état réel (par exemple, des échantillons de transformateurs en bon état, des échantillons présentant des problèmes connus, etc.).
2. Prétraitement des données : Les données d'échantillons d'huile doivent être prétraitées avant leur utilisation pour l'entraînement d'un RNA. Cela peut inclure la normalisation des données, la sélection des caractéristiques pertinentes, etc.
3. Entraînement du RNA : Une fois les données prétraitées, un RNA peut être entraîné à l'aide d'un algorithme d'apprentissage approprié, tel que les réseaux neuronaux profonds. L'objectif est d'apprendre au RNA à associer les caractéristiques spécifiques des échantillons d'huile à leur état de santé correspondant.
4. Validation et évaluation : Une fois le RNA entraîné, sa validité peut être vérifiée à l'aide d'un ensemble de données de test distinct. Cela permet de vérifier ses performances et de l'évaluer en termes de précision, de rappel, etc.
5. Utilisation pour le diagnostic : Une fois que la validité du RNA est confirmée et qu'il est approuvé, il peut être utilisé pour diagnostiquer de nouveaux échantillons d'huile de transformateur. Le RNA analysera les caractéristiques de l'échantillon et fournira une estimation de son état de santé. [32]

Il est important de noter que le succès de la méthode de RNA dépend de la disponibilité d'un ensemble de données représentatif et de qualité, ainsi que d'un entraînement et d'une validation appropriés du modèle. De plus, il est généralement recommandé de combiner les techniques d'analyse traditionnelles de l'huile de transformateur avec les méthodes basées sur les RNA pour obtenir des résultats plus fiables.

- **Organigramme explicatif des différentes étapes de l'apprentissage supervisé par le RNA :**

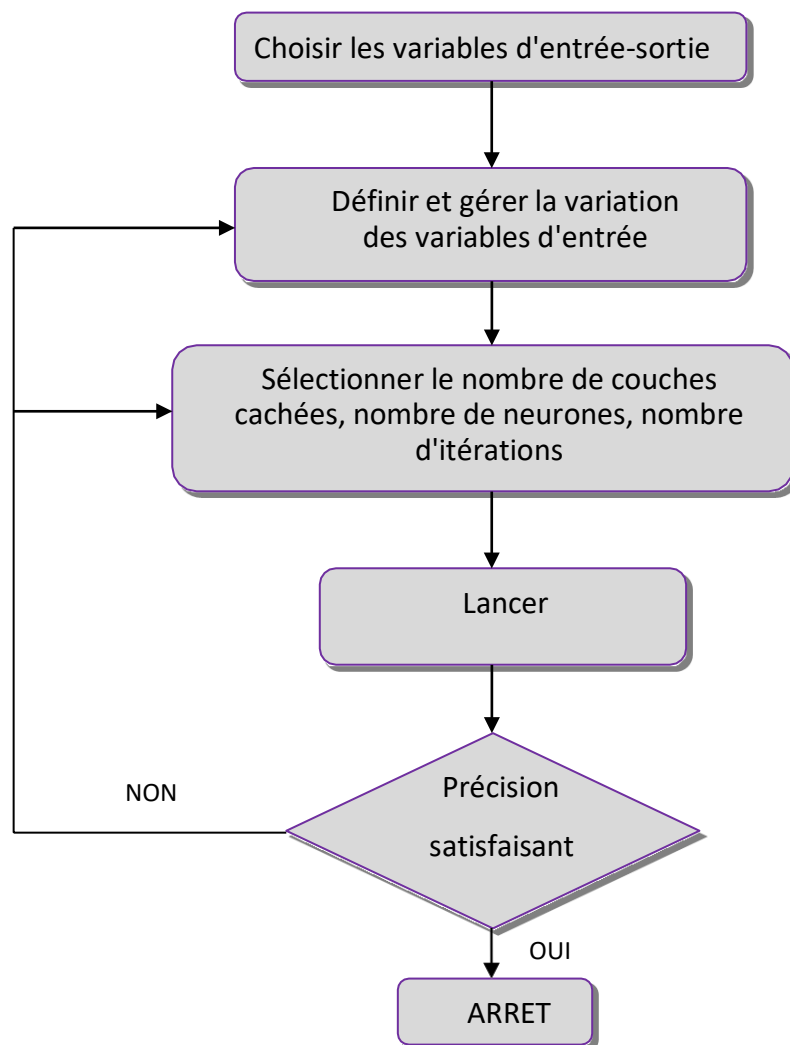


Figure II.9 Schéma de la procédure d'apprentissage de RNA.

II.2.2.4 Méthode de la logique floue

➤ **Définition**

La logique floue est une méthode mathématique et informatique qui traite de l'incertitude et de la vagueness dans le raisonnement. Contrairement à la logique classique binaire, qui traite des propositions comme vraies ou fausses, la logique floue permet de prendre en compte les valeurs intermédiaires entre le vrai et le faux.

La méthode de la logique floue repose sur des ensembles flous, qui sont des ensembles dont les éléments peuvent avoir un degré d'appartenance partiel. Au lieu d'utiliser des valeurs booléennes (0 ou 1), la logique floue utilise des degrés d'appartenance compris entre 0 et 1 pour représenter l'incertitude. Par exemple, au lieu de dire qu'un objet est soit grand, soit petit, la logique floue permet de définir des ensembles flous tels que "grand à 0,8" ou "petit à 0,2". [33]

➤ **Principe de fonctionnement**

La logique floue est une méthode utilisée pour modéliser et résoudre des problèmes complexes où les valeurs peuvent varier entre les états binaires (vrai/faux). Dans le contexte du diagnostic de l'huile des transformateurs, la logique floue peut être utilisée pour évaluer l'état de l'huile en fonction de différents critères de mesure.

La méthode d'utilisation de la logique floue pour diagnostiquer l'état de l'huile des transformateurs :

1. Détermination des paramètres d'entrée : Identifiez les paramètres de mesure pertinents pour évaluer l'état de l'huile. Cela peut inclure des paramètres tels que la teneur en humidité, la teneur en gaz dissous, la viscosité, la tension superficielle, etc. Chaque paramètre doit être mesuré en définissant des plages de valeurs (par exemple, bas, moyen, élevé).
2. Création des fonctions d'appartenance : Pour chaque paramètre, il est nécessaire de définir des fonctions d'appartenance floues qui décrivent la relation entre les valeurs mesurées et les termes linguistiques (par exemple, bas, moyen, élevé). Les fonctions d'appartenance peuvent être triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, etc., en fonction de la nature du paramètre.

3. Détermination des règles floues : Établissez des règles floues en fonction de l'expertise des spécialistes pour relier les différents paramètres d'entrée à l'état de l'huile. Par exemple, une règle pourrait être formulée comme suit : "Si la teneur en humidité est élevée ou si la teneur en gaz dissous est élevée, alors l'état de l'huile est mauvais." Vous pouvez définir plusieurs règles pour couvrir différents ensembles de paramètres d'entrée.
4. Mise en œuvre du raisonnement flou : Utiliser les valeurs mesurées des paramètres d'entrée et les fonctions d'appartenance pour évaluer l'état de chaque paramètre sur une échelle floue. Ensuite, appliquer les règles floues pour obtenir les valeurs floues correspondantes à l'état de l'huile. [34]
5. Précision de la défuzzification : Convertir les valeurs floues obtenues en une valeur numérique précise pour représenter l'état de l'huile. Cela peut être fait en utilisant des méthodes de défuzzification telles que le centre de gravité, le degré d'appartenance maximal, etc.
6. Interprétation des résultats : En fonction de la valeur numérique obtenue à l'étape précédente, l'état de l'huile du transformateur peut être interprété. Par exemple, une valeur proche de 0 indique un très bon état, tandis qu'une valeur proche de 1 indique un très mauvais état.

II.3 Conclusion

Les méthodes de diagnostic d'huile de transformateur traditionnelles et intelligentes offrent des approches complémentaires pour évaluer la santé et la performance des transformateurs électriques. Les méthodes traditionnelles, telles que l'analyse chimique et la spectroscopie d'absorption dans l'infrarouge, ont fait leurs preuves au fil des années et sont largement utilisées dans l'industrie. Elles permettent d'identifier des paramètres clés tels que la présence de contaminants, la dégradation de l'huile ou des composants internes du transformateur.

D'autre part, les méthodes de diagnostic intelligentes, telles que l'utilisation de l'intelligence artificielle et des algorithmes avancés, offrent des avantages supplémentaires en termes de précision, de rapidité et de capacité à détecter des problèmes plus subtils. Elles exploitent les données collectées en temps réel à partir de capteurs et d'instruments de surveillance pour identifier les tendances et les anomalies, ce qui permet de prendre des décisions plus éclairées en matière de maintenance et de planification. [35]

Ces nouvelles méthodes intelligentes ont révolutionné le domaine du diagnostic d'huile de transformateur en offrant une surveillance continue et proactive, réduisant ainsi les risques de défaillance et les temps d'arrêt imprévus. De plus, elles permettent une optimisation des coûts de maintenance en planifiant les interventions de manière plus efficace et en évitant les opérations inutiles.

Il est important de noter que bien que les méthodes de diagnostic intelligentes présentent de nombreux avantages, elles ne remplacent pas totalement les méthodes traditionnelles. Les deux approches doivent être utilisées de manière complémentaire pour obtenir une évaluation globale de la condition d'un transformateur électrique.

Les méthodes de diagnostic d'huile de transformateur traditionnelles et intelligentes offrent des outils précieux pour surveiller, évaluer et maintenir les transformateurs électriques en bon état de fonctionnement. L'adoption de ces méthodes permet une gestion proactive de la maintenance, une prolongation de la durée de vie des transformateurs et une amélioration de la fiabilité du réseau électrique dans son ensemble.

Chapitre III

*Diagnostic d'état d'huile par
le courant de fuite via RNA*

III.1 Introduction

Le diagnostic de l'huile de transformateur repose sur l'analyse de ses caractéristiques physico-chimiques et électriques. Traditionnellement, cela était effectué par des méthodes de laboratoire coûteuses et chronophages. Toutefois, avec les avancées récentes dans le domaine de l'intelligence artificielle, notamment les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA), de nouvelles perspectives s'ouvrent pour le diagnostic rapide et précis de l'huile de transformateur.

Une proposition a été faite pour utiliser un modèle basé sur l'intelligence artificielle (les réseaux de neurones artificiels) afin d'étudier le diagnostic de l'huile des transformateurs électriques, pour faciliter leur modélisation mathématique. Les réseaux de neurones artificiels sont très attrayants pour les processus de modélisation où la modélisation mathématique traditionnelle est difficile. La capacité d'apprentissage des réseaux de neurones permet de découvrir des interactions complexes et précises entre les variables indépendantes qui contribuent à développer un modèle plus précis. [36]

Dans ce chapitre, nous avons appliqué un réseau de neurones artificiels (RNA) pour diagnostiquer l'huile des transformateurs électriques en utilisant la méthode de l'analyse du courant de fuite. De plus, nous présenterons des études de cas et des résultats expérimentaux récents qui démontrent l'efficacité des RNA dans la détection précoce des problèmes liés à l'huile de transformateur.

III.2 Description du problème

Avec le temps, l'huile des transformateurs devient de plus en plus susceptible d'être polluée, et il est essentiel de protéger les installations qui en dépendent.

Notre travail consiste à étudier et à proposer une technologie de prédiction de la pollution de l'huile, qui nous donne un aperçu de l'état du transformateur sans interrompre son fonctionnement.

III.3 Méthode de détection des fuites de courant

III.3.1 Définition

La détection des courants de fuite dans l'huile isolante repose sur l'analyse du courant de fuite qui peut se produire entre les parties conductrices des équipements immergés dans l'huile. Elle est utilisée pour détecter les fuites de courant dans un circuit électrique et surveille l'intégrité de l'isolation, identifiant toute fuite de courant actuelle pouvant indiquer des problèmes d'isolation.

III.3.2 Étapes de l'expérience

Les tests ont été réalisés dans le but d'étudier expérimentalement les paramètres influençant la tension de claquage de l'huile Borak 22 sous tension alternative sinusoïdale de 50 Hz. Plusieurs paramètres d'effet seront abordés, notamment l'effet du niveau de tension électrique, la détermination de la valeur de tension lors de trois effondrements successifs de l'huile, et l'étude des valeurs du courant de fuite après chaque effondrement, le tout en maintenant une géométrie constante des électrodes, leur nature et leur distance.

- Dans un premier temps, montrer l'appareillage utilisé dans les différents tests effectués.
- Dans un deuxième temps, définition du protocole expérimental utilisé
- Enfin, nous présenterons les différents résultats obtenus, pour leur application dans la RNA.

1. Équipements expérimentaux

Pour la mesure de la tension de claquage, nous avons utilisé un dispositif représenté schématiquement dans la figure (Figure III.1). Ce dernier comprend les éléments suivants :

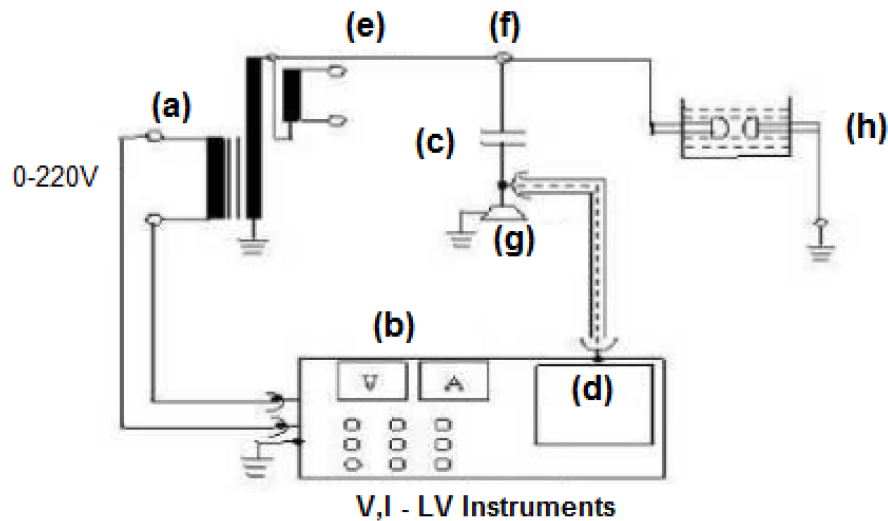


Figure III.1 Circuit de test et dispositifs.

- | | |
|---------------------------|------------|
| a) Transformateur de test | « HV9105 » |
| b) Panneau de contrôle | « HV9103 » |
| c) Capacité de mesure | « HV9141 » |
| d) Voltmètre AC | « HV9150 » |
| e) Conducteur en tige | « HV9108 » |
| f) Conducteur en coupe | « HV9109 » |
| g) Connexion à la terre | « HV9110 » |
| h) Cuve de test | « HV9137 » |

2. Définition du protocole expérimental utilisé

Essais sur les huiles isolantes Les transformateurs de haute tension contiennent une quantité d'huile isolante utilisée à la fois pour l'isolation et le refroidissement. Les bonnes propriétés diélectriques de l'huile isolante constituent donc une condition préalable importante pour une isolation parfaite de ces transformateurs. Étant donné que la résistance à la rupture d'une huile isolante dépend significativement de sa composition et de ses conditions de préparation, sa détermination est une partie importante des tests de haute tension des transformateurs [37], telle que prescrite par la norme IEC 60296 pour les huiles isolantes. Cette norme spécifie une qualité minimale pour les huiles neuves ou usagées, selon des procédures de test précisément définies. Le programme complet de test comprend la viscosité, la tension de claquage, le facteur de dissipation diélectrique et la résistivité volumique spécifique.

Un échantillon d'huile est prélevé dans le transformateur à tester. L'huile à étudier doit être versée lentement dans le récipient d'essai, en évitant la formation de bulles d'air (en la faisant couler le long d'une tige en verre), puis laissée reposer pendant environ 10 minutes avant d'appliquer la tension. La tension doit être coupée instantanément au moment de la rupture. Un intervalle d'environ 2 minutes doit être respecté après chaque décharge, et l'espace entre les électrodes doit être nettoyé avec de l'huile fraîche en faisant passer délicatement une spatule à travers l'interstice

3. Les différents résultats obtenus

Les valeurs de tension appliquées pour tous les cas d'expérience sont (5KV, 10KV, 15KV, 20KV)

- **Utilisation du programme " Matlab "**

Les courbes de courant de fuite sont extraites pour tous les cas, où nous faisons référence à l'état représenté sur la courbe suivante :

❖ Dans le cas de 5 kV de Première claquage.

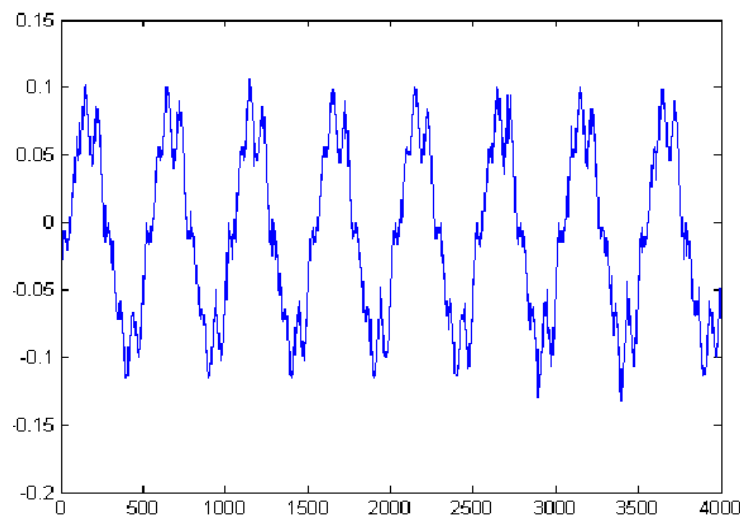


Figure III.2 Courbe du courant de fuite à 5KV.

Nous exportons la courbe du courant de fuite dans la modèle "FFT Toolbox Analysis", comme indiqué dans la figure III.3, par le schéma suivant :

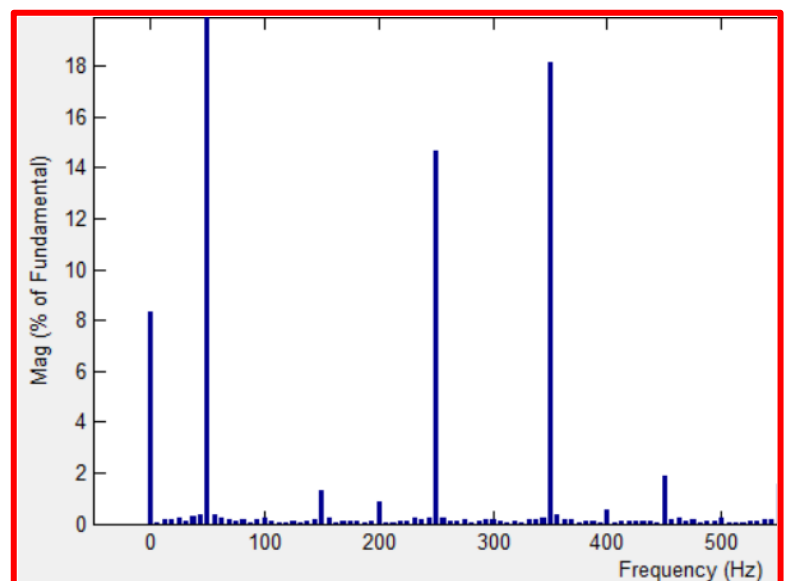
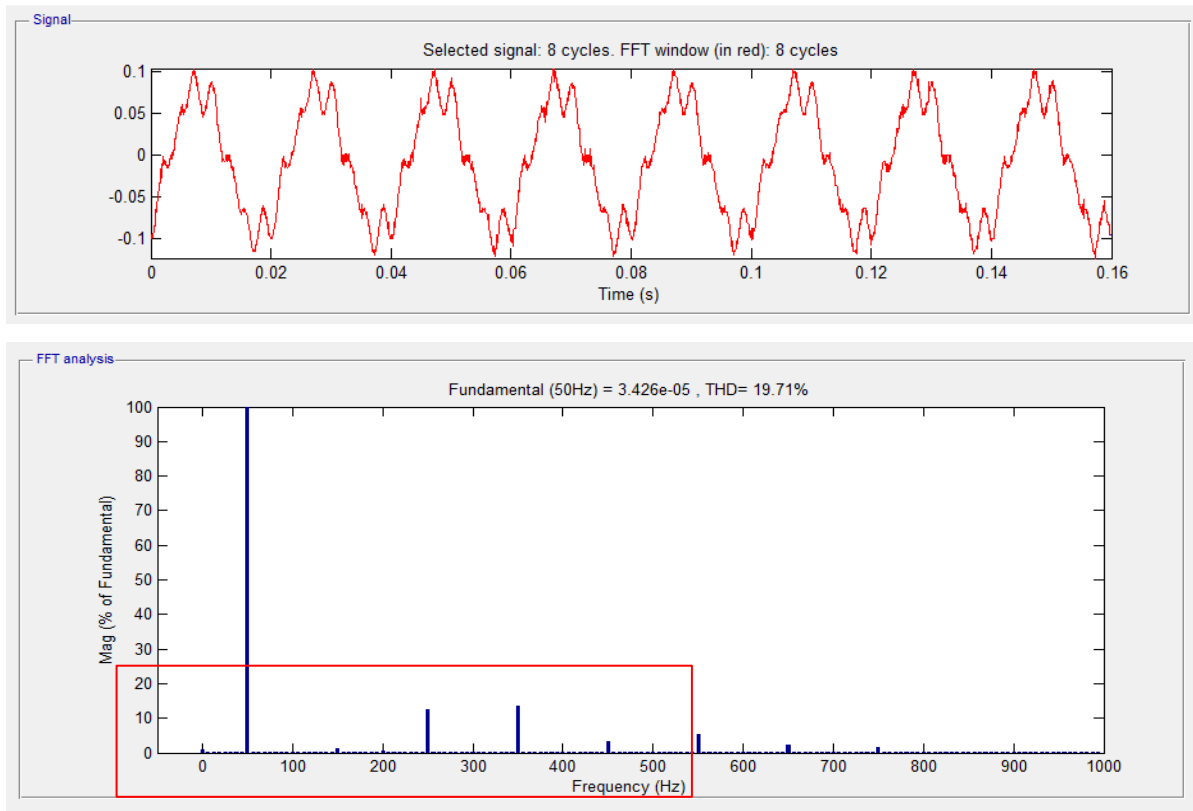
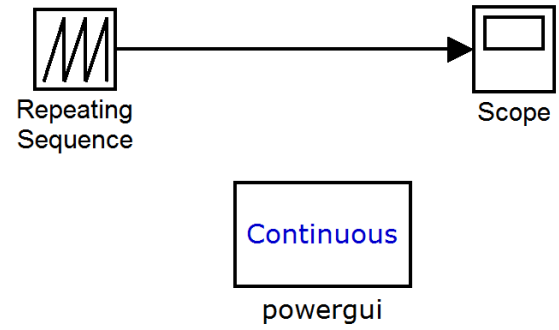


Figure III.3 Différents module d'harmonique en signal du courant de fuite.

Grâce au "FFT Toolbox Analysis" nous extrayons les valeurs de chacun de :

- THD %
- I_{max} (mA)
- La courant Fondamentale (mA) (H1)
- Les Harmoniques (%) (H3, H5, H7, H9, H11, H13, H15, H17, H19)

Pour tous les cas de l'expérience. Les résultats extraits sont répertoriés dans le tableau III.4 :

claquage	Tension (Kv)	THD %	I _{max} (mA)	Fondamentale (mA)	Harmonique 3 (%)	Harmonique 5 (%)	Harmonique 7 (%)	Harmonique 9 (%)	Harmonique 11 (%)	Harmonique 13 (%)	Harmonique 15 (%)	Harmonique 17 (%)	Harmonique 19 (%)
0	5	23.93	1.06*10 ⁻⁵	8.677*10 ⁻⁶	0.80	14.43	18.14	1.91	1.62	1.54	0.48	0.29	0.58
	10	25.34	1.60*10 ⁻⁵	1.791*10 ⁻⁵	1.10	14.57	19.11	2.42	2.46	1.36	0.71	0.21	0.47
	15	27.69	2.80*10 ⁻⁵	2.617*10 ⁻⁵	1.49	14.92	22.07	1.81	4.09	2.71	0.67	0.36	0.61
	20	28.43	4.20*10 ⁻⁵	3.471*10 ⁻⁵	2.12	15.15	23.10	2.54	3.83	2.01	0.70	0.56	0.32
1	5	23.94	1.08*10 ⁻⁵	8.844*10 ⁻⁶	1.29	14.64	18.13	1.84	1.55	1.58	0.62	0.6	0.52
	15	27.98	2.52*10 ⁻⁵	2.677*10 ⁻⁵	0.76	7.74	12.23	5.43	21.63	6.14	0.44	1.45	0.55
	20	22.30	6.00*10 ⁻⁵	3.589*10 ⁻⁵	1.05	7.79	12.85	6.10	13.96	3.79	0.70	1.28	0.58
2	5	16.74	1.12*10 ⁻⁵	9.061*10 ⁻⁶	2.65	11.09	9.76	2.26	5.96	0.58	0.97	0.17	0.42
	10	36.20	2.52*10 ⁻⁵	1.714*10 ⁻⁵	2.28	13.06	14.41	2.60	29.90	2.56	1.45	0.66	0.34
	15	25.01	3.52*10 ⁻⁵	2.626*10 ⁻⁵	2.36	12.48	13.61	2.12	16.23	0.87	1.30	0.51	0.30
	20	28.93	4.96*10 ⁻⁵	3.417*10 ⁻⁵	2.55	12.68	14.79	2.99	20.70	1.01	1.13	0.44	0.19
3	5	16.25	1.16*10 ⁻⁵	8.861*10 ⁻⁶	1.22	11.56	10.48	1.38	1.67	1.33	1.05	0.3	0.14
	10	20.38	2.28*10 ⁻⁵	1.771*10 ⁻⁵	1.36	11.83	15.91	2.37	2.27	1.75	1.03	0.13	0.37
	15	18.89	3.40*10 ⁻⁵	2.651*10 ⁻⁵	1.08	12.26	12.51	2.65	5.35	2.31	1.67	0.17	0.24

Tableau III. 1 Les données utilisé (résultat expérimentale).

- Nous avons exclu les deux autres cas (le premier claquage de 10 kV / le troisième claquage de 20 kV) pour appliquons nos tests et comparaison en fin de chapitre.

III.4 Processus du système RNA utilisé

Dans la plupart des architectures de réseaux neuronaux artificiels (RNA), l'apprentissage implique une modification des poids synaptiques, c'est-à-dire un changement des valeurs des poids qui relient les neurones entre les différentes couches. Le processus d'entraînement de notre système de RNA comprend plusieurs étapes, résumées comme suit :

- Sélection des variables d'entrée et de sortie en se basant sur une collecte de données issues de la littérature.
- Détermination du nombre de couches cachées, du nombre de neurones dans chaque couche cachée et du nombre d'itérations nécessaires pour atteindre une solution stable.
- Apprentissage du système de RNA en utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt de l'erreur pour ajuster les poids synaptiques.

III.4.1 Implémentation du modèle RNA

L'outil "NNTOOL" est utilisé pour implémenter le modèle de réseau de neurones artificiels (RNA). Il est disponible dans le logiciel Matlab utilisé pour la simulation des RNA.

III.4.2 Choix des paramètres du réseau

La sélection des paramètres d'un réseau de neurones dépend principalement du problème spécifique à résoudre. Par conséquent, il n'existe pas de règle générale pour déterminer de manière précise les paramètres à utiliser pour résoudre un problème donné [28].

III.5 Création du réseau

En utilisant l'utilitaire (NNTOOL), sélectionnez l'entrée et la sortie en appuyant sur le bouton "Importer".

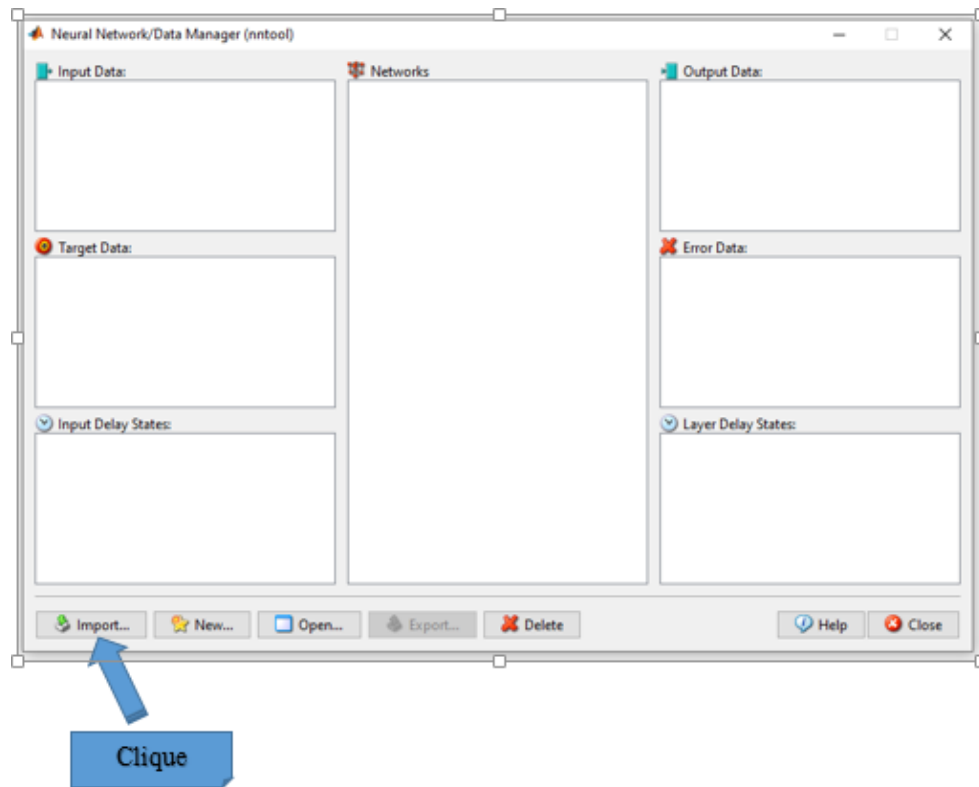


Figure III.4 Interface de NNToolbox sous l'environnement de Matlab.

La Figure III.4 illustre la méthode de sélection de la source des paramètres du RNA, que ce soit à partir de l'espace de travail ("Workspace") de Matlab ou à partir de fichiers enregistrés sur le disque dur.

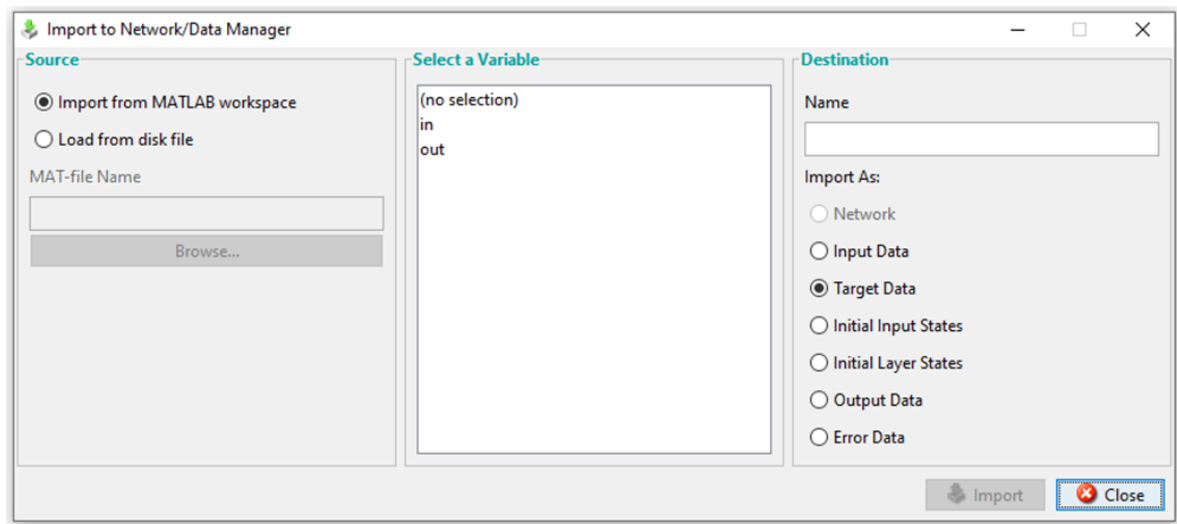


Figure III.5 Sélection des sources des paramètres de RNA.

La colonne de désignation de la Figure III.4 vise à classer les données importées selon leur fonction respective, définies comme suit :

1. Données d'entrée (Input data) :

Il s'agit d'introduire les entrées, telles que la tension de claquage, THD, la courant de fuite fondamental et harmoniques, notées "in".

2. Données cibles (Target data) :

Il s'agit d'introduire la sortie souhaitée, telle que la nombre de claquage, notée "out".

3. Fonction d'apprentissage (Training function) :

Cela représente l'algorithme d'apprentissage utilisé. NNTOOL propose les algorithmes suivants:

- Trainlm : Algorithme d'apprentissage par la méthode de Levenberg-Marquardt.
- Trainrp : Algorithme d'apprentissage par la méthode de rétropropagation résiliente.
- Trainscg : Algorithme d'apprentissage par la méthode du gradient conjugué (scg).

Dans notre cas, nous avons utilisé la fonction Trainlm.

4. Fonction d'apprentissage adaptatif (Adaption learning function) :

Il s'agit de l'algorithme d'apprentissage incrémental, qui peut être :

- Learnsgd : Algorithme de descente de gradient avec un pas d'apprentissage fixe.

- Learngdm : Algorithme de descente de gradient avec un pas d'apprentissage et un momentum fixes.

Dans notre travail, nous avons appliqué l'algorithme d'apprentissage incrémental de type Learngdm.

5. Fonction de performance (Performance function) :

Il s'agit de la fonction de coût utilisée pour évaluer les performances du réseau. Elle peut être :

- MSE : Erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error).
- MSERG : Erreur quadratique moyenne avec pondération des poids.
- SSE : Somme des carrés des erreurs (Sum of Squared Errors).

Nous utiliserons l'erreur quadratique moyenne, MSE.

La figure suivante présente les différents paramètres de notre réseau de neurones artificiel créé sous NNTOOL.

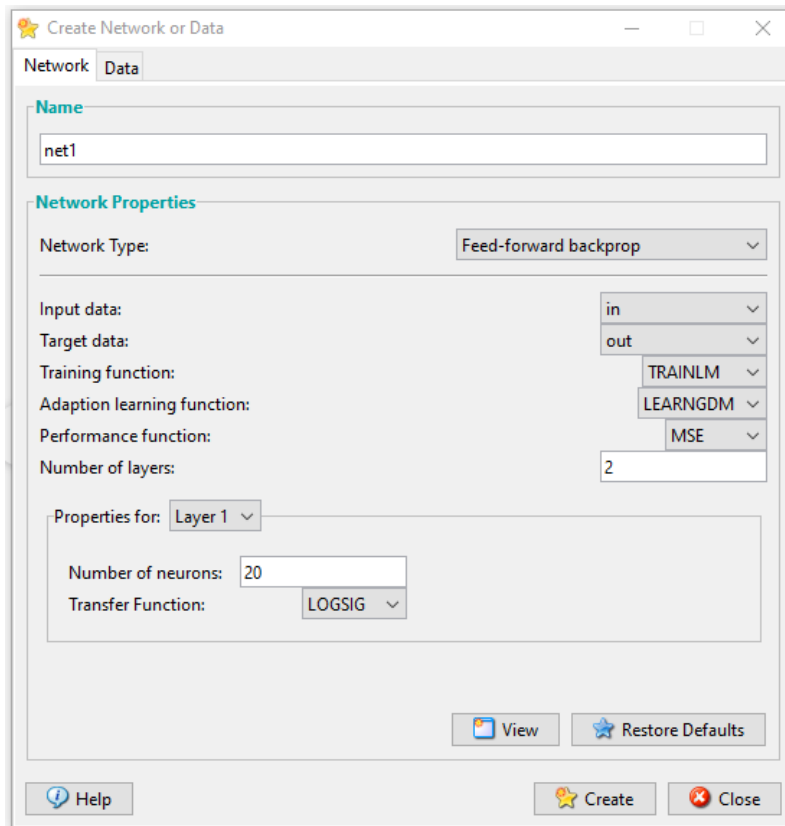


Figure III.6 Paramètres de RNA introduits sous NNTOOL.

III.6 Modèle du réseau

Après avoir créé le réseau en utilisant NNTOOL sous Matlab, il reste à définir le nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couche. Pour ce faire, nous avons utilisé une base de données mentionnée dans l'annexe.

Afin de déterminer les meilleurs paramètres du réseau (nombre de neurones cachés, nombre de couches cachées) qui donnent une prédiction satisfaisante, nous avons effectué une série de tests. Nous avons fixé le nombre de neurones cachés à 20 et fait varier le nombre de couches cachées de 2 à 4. Ces tests ont été réalisés avec un nombre d'itérations de 1000,

La figure suivante montre l'architecture du RNA

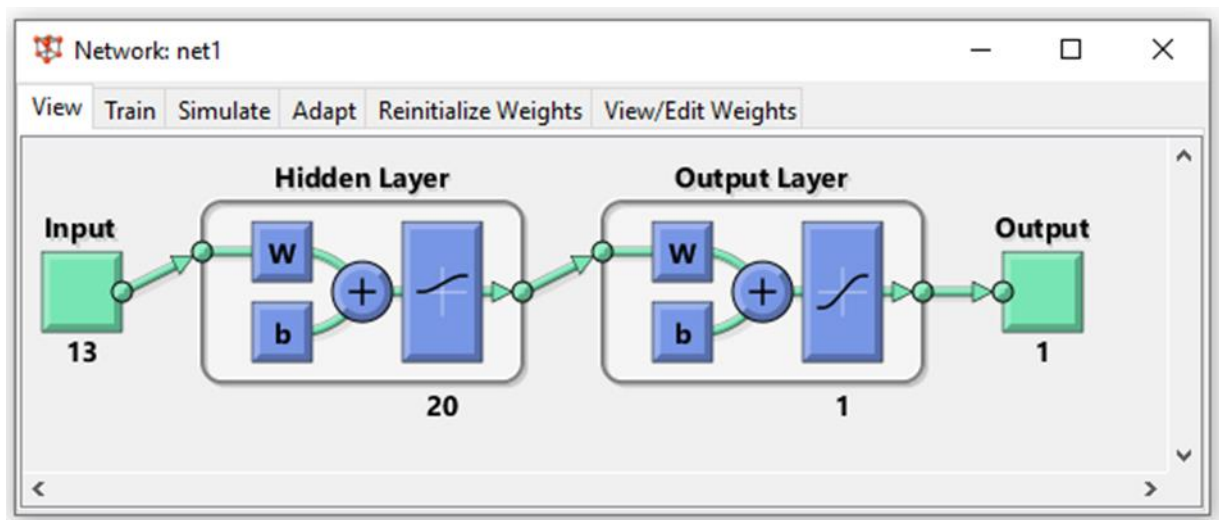


Figure III.7 La structure du RNA adoptée.

La figure suivante présente la procédure de démarrage de l'apprentissage, qui consiste à appuyer sur le bouton "Training Info" et sélectionner "in" et "out" de la manière suivante :

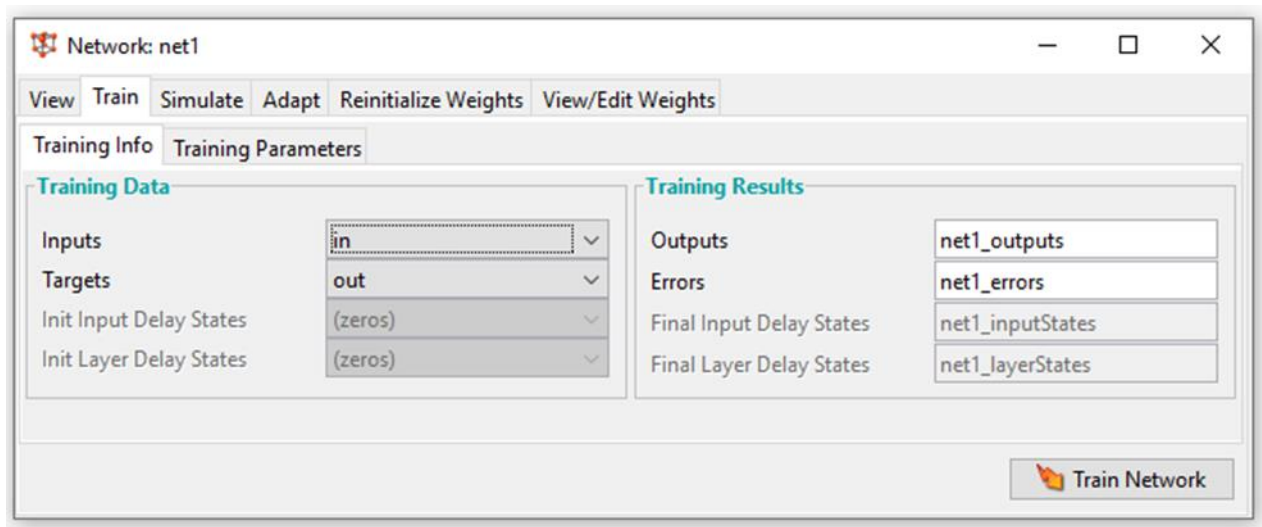


Figure III.8 Fenêtre présente l'étape d'apprentissage de RNA.

La sélection des paramètres optimaux du réseau de neurones s'est basée sur le calcul de l'erreur (conformément au Tableau III.1). Après avoir effectué une série d'apprentissages avec différents réseaux, nous avons préféré celui qui possède 2 couches, avec 20 neurones dans chaque couche cachée (2), et 1 neurone dans la couche de sortie. L'erreur calculée pour ce choix est de 10^{-10} , ce qui est considéré comme optimal.

En analysant ces résultats, la configuration de notre réseau de neurones est la suivante :

- Nombre de couches cachées : 2 couches.
- Nombre de neurones dans les couches cachées : 20 neurones.
- Nombre de neurones dans la couche de sortie : 1 neurone.
- Fonction d'activation des couches cachées : fonction sigmoïde.
- Fonction d'activation de la couche de sortie : fonction linéaire.
- Algorithme d'apprentissage : Trainlm.
- Nombre d'itérations : 1000.
- Erreur désirée : 10^{-10}

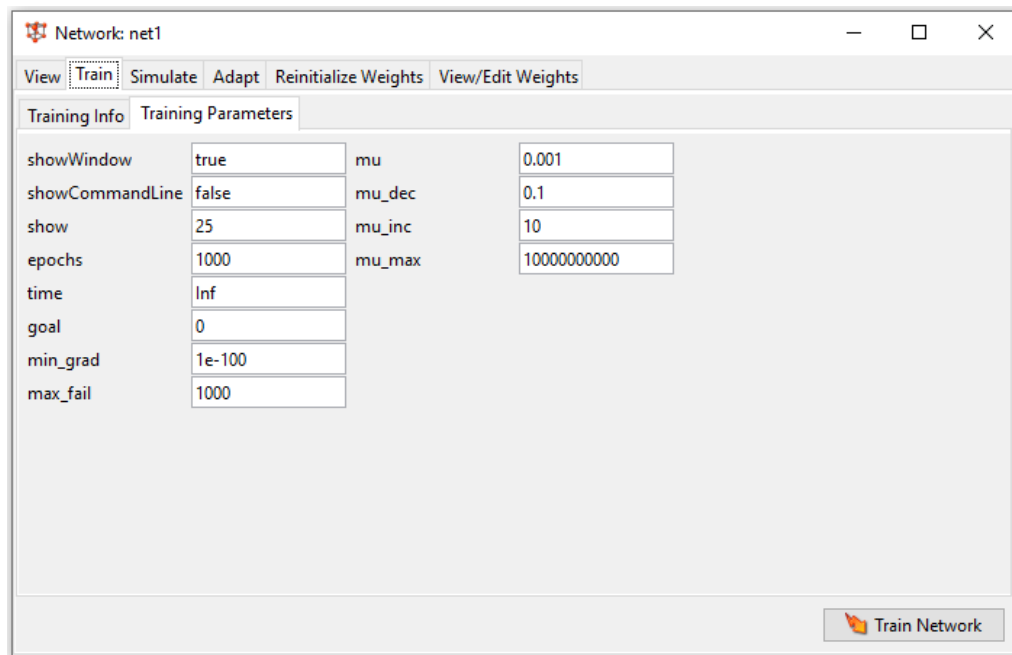


Figure III.9 Fenêtre présente les paramètres d'apprentissage adoptés.

III.6.1 Graphe de l'erreur

Après la création du réseau, l'entraînement du RNA à plusieurs reprises conduit à la caractéristique de performance représentée par la figure III.11 du réseau choisi, qui affiche le graphe de l'erreur.

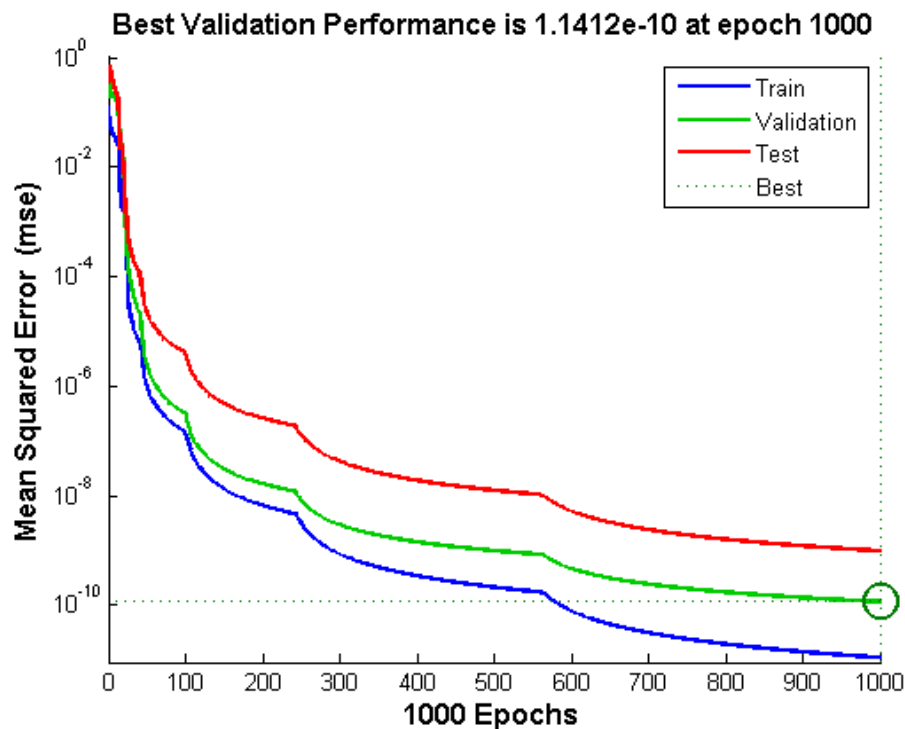


Figure III.10 Graphes de l'erreur (d'apprentissage de test et de validation).

Le RNA (Réseau de Neurones Artificiels) permet de calculer les valeurs de la couche de sortie en fonction des vecteurs d'entrée. L'erreur est définie comme la différence entre la valeur de sortie calculée par le réseau et la valeur désirée.

À chaque itération, l'algorithme ajuste les poids synaptiques dans le but de converger vers les bonnes valeurs. L'algorithme s'arrête lorsque l'erreur calculée est inférieure à l'erreur seuil prédéfinie par l'utilisateur.

Dans nos tests, nous avons défini la condition d'arrêt lorsque l'erreur est $< 10^{-10}$. D'après la figure III.12, nous constatons que le nombre d'itérations requis pour que l'apprentissage satisfasse cette condition d'arrêt était l'itération 1000.

III.6.2 Courbes de régression

Les courbes de régression (Figure III.11) sont utilisées pour évaluer la performance du réseau construit. Les valeurs sur l'axe des ordonnées représentent les sorties du réseau, tandis que les valeurs sur l'axe des abscisses représentent les valeurs désirées.

Dans le graphique, les cercles noirs représentent les valeurs désirées, les lignes continues représentent l'approximation réalisée par le réseau, et les lignes en pointillés représentent une approximation parfaite.

En analysant la figure, on peut constater ce qui suit :

- Les données d'apprentissage sont correctement classées à 100%.
- Les données de validation sont correctement classées à 100%.
- Les données de test sont correctement classées à 100%.
- Globalement, les données sont correctement classées à 100%.

Cela indique que le réseau présente une performance élevée et est capable d'approximer de manière précise les valeurs désirées.

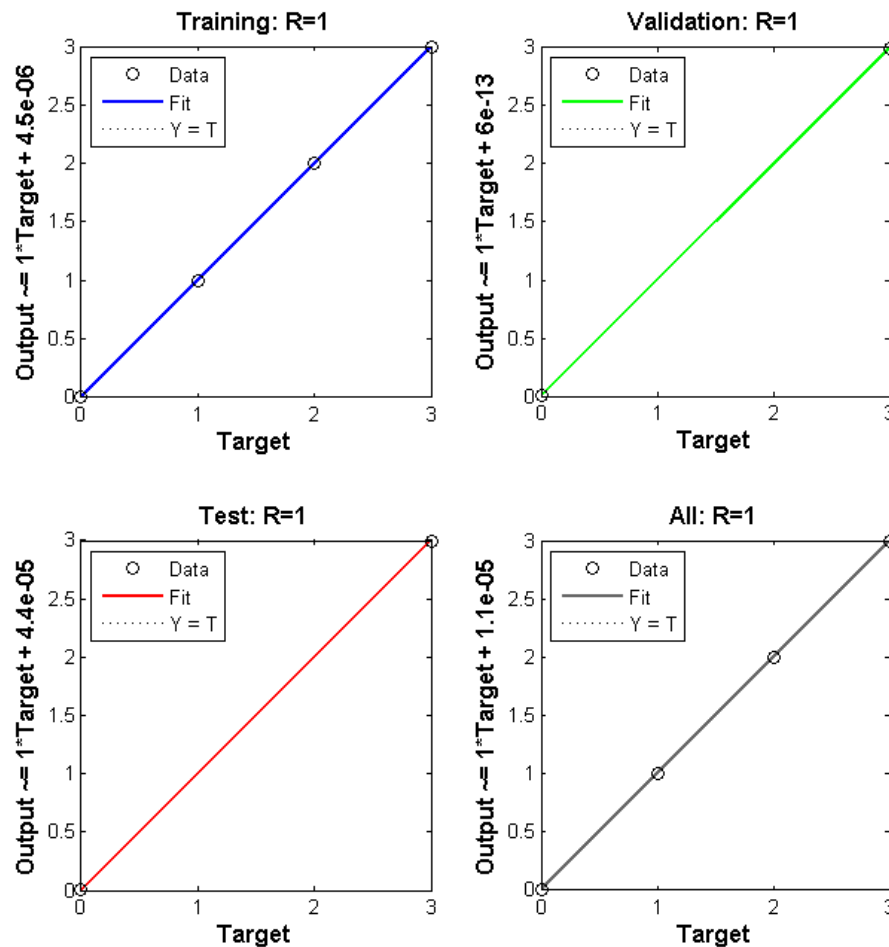


Figure III.11 Courbes de régression des résultats données par RNA.

III.7 Comparaison des résultats

Une fois que les caractéristiques du réseau ont été déterminées, nous pouvons procéder à des tests de ce réseau en utilisant d'autres échantillons tels que des vecteurs la courant maximal de fuite et la THD Pour ce faire, nous utilisons la fonction de simulation de test définie comme suit :

net1([E1, E3, E3, ...])

Avec E1 : la tension électrique, E2 : la THD, E3 : la courant fondamental.....

Pour utiliser la fonction, il est nécessaire d'exporter le réseau vers Workspace de travail de Matlab en sélectionnant l'onglet "Export" comme indiqué dans l'image ci-dessous.

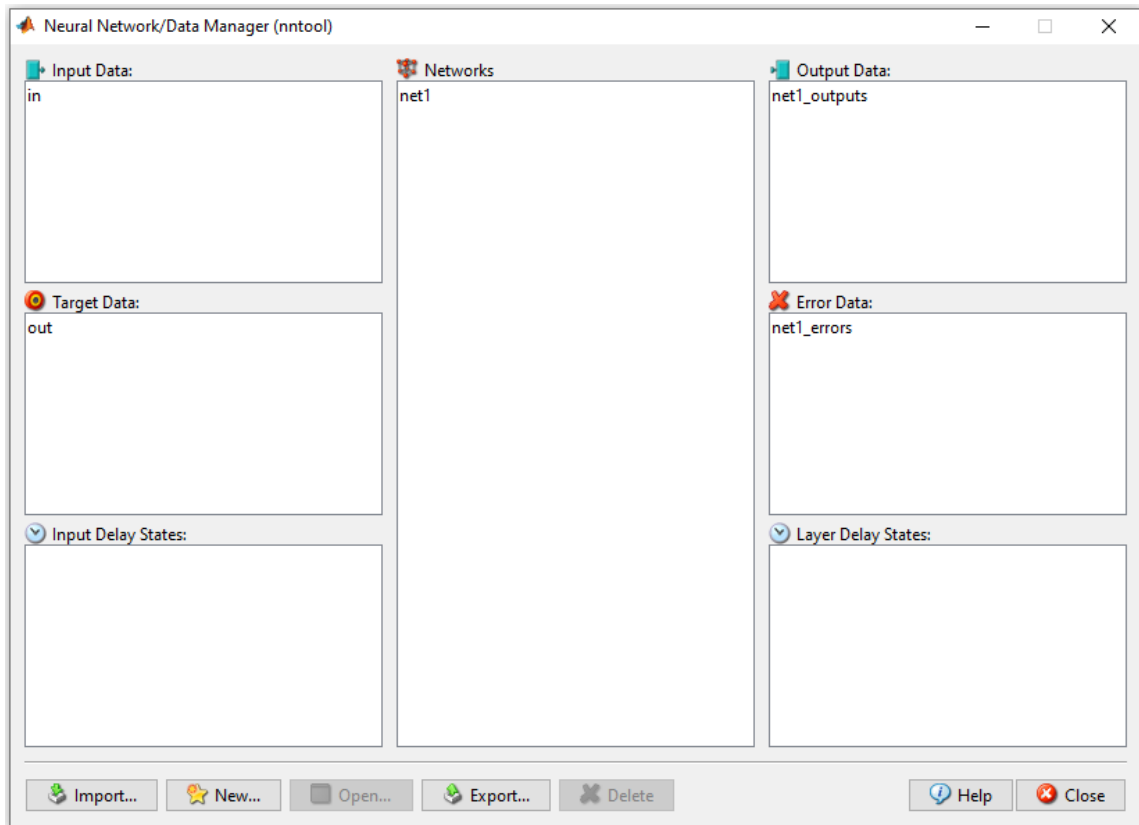


Figure III.12 Exportation de notre réseau nommé net1 vers l'espace de travail du Matlab.

III.8 Résultats

Nous présentons ci-dessous un tableau contenant les positions de plusieurs huiles pour les transformateurs électriques, les positions désirées (réelles) et celles prédites par l'RNA pour différentes valeurs moyennes de tension électrique et le courant de fuite principal. Les valeurs prédites sont calculées en utilisant la fonction `net1([E1, E3, E3, ...])`. Les valeurs désirées correspondantes sont fournies en annexe.

La valeur du tension de claquage (kV)	La THD %	La valeur du courant max I _{max} (mA)	La valeur du courant de fuite fondamental (mA) en 50HZ	La valeur d'harmonique (H5) % en 150hz	La valeur d'harmonique (H7) % en 250hz	La valeur d'autres Harmoniques (H3,H9,... ,H19) %	Le nombre de claquage calculée par (RNA)	Le nombre de claquage adoptées en expérimentale	validation
10	25.45	$2.16 \cdot 10^{-5}$	$1.769 \cdot 10^{-5}$	15.03	19.81		0.9945	1	✓
20	19.71	$4.36 \cdot 10^{-5}$	$3.426 \cdot 10^{-5}$	12.54	13.43		3	3	✓

Tableau III. 2 Tableau des résultats obtenus par la méthode de RNA.

À chaque entraînement, le réseau neuronal peut obtenir des résultats différents en raison des poids initiaux aléatoires et des ensembles de données d'entraînement, de validation et de test différents. Par conséquent, après l'entraînement, le réseau neuronal peut donner des sorties différentes pour les mêmes entrées. Pour garantir une bonne précision du réseau neuronal.

Il doit être recyclé plusieurs fois. Dans cette étude, nous avons utilisé la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMS) pour vérifier les performances de classification. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau III.3.

III.9 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté l'utilisation des réseaux neuronaux artificiels pour diagnostiquer l'huile des transformateurs et pour déterminer son état d'isolation électrique.

Il est intéressant de noter que les bases de données utilisées pour l'apprentissage des RNA et les tests sont regroupées en annexe. Le tableau des résultats est présenté à la fin de ce chapitre. Ce tableau montre la très bonne capacité de l'ANN à prédire l'état de l'huile en se basant sur les résultats expérimentaux, tels que le courant de fuite, THD, l'harmonique, etc..... Cela souligne l'importance de la technologie de prédiction basée sur les réseaux neuronaux artificiels.

L'outil d'aide NNTOOL a démontré une capacité indéniable à créer et à apprendre notre RNA simulé dans l'environnement MATLAB.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire nous avons créé un système intelligent capable de diagnostiquer l'état de l'huile des transformateurs, cela se base sur les données expérimentales recueillies par des tests de courant de fuite effectués à l'Université El Oued au cours des années précédentes

Tout d'abord, nous avons clarifié les définitions des différents types d'huiles de transformateurs, leurs avantages et inconvénients, leur vieillissement et leur recyclage. Ainsi, la connaissance du degré de contamination de l'huile est essentielle pour évaluer le niveau d'isolation et les performances des transformateurs installés sur site, dans le but de construire un algorithme approprié et pratique.

Ensuite, nous avons présenté la méthode de mise en œuvre des réseaux de neurones artificiels (RNA) et quand et comment les utiliser. Les réseaux de neurones artificiels sont une méthode innovante de traitement de l'information, fortement recommandée lorsqu'il existe une corrélation très complexe entre les entrées et les sorties d'un système donné. Les réseaux de neurones sont utilisés dans divers domaines tels que la biologie, la physique et l'économie. Ils sont spécifiquement utilisés pour déterminer le taux de défaut dans l'huile, constituant une innovation majeure dans ce domaine.

En général, la méthode d'apprentissage permet d'obtenir rapidement des résultats. Cependant, l'utilisation des réseaux de neurones reste délicate car il est nécessaire de déterminer les "bonnes" paramètres d'entrée, ainsi que de savoir comment configurer correctement le réseau neuronal avec le bon nombre de neurones cachés (dans la couche cachée). L'étape de formation est également essentielle, en commençant par choisir l'ensemble de données d'entraînement à tester et le degré de formation requis. Après l'apprentissage, il est généralement prévu de tester le réseau avec un échantillon de résultats connus pour vérifier la qualité de l'apprentissage et estimer l'efficacité du réseau neuronal.

Dans la troisième partie, nous avons abordé la partie simulation de notre travail, où nous avons collecté des données pratiques du dispositif afin de former notre RNA et d'arriver à prédire l'état de l'huile pour différentes valeurs en étudiant le courant de fuite. Les résultats obtenus ont montré une efficacité très élevée de l'RNA dans le cas de l'huile.

Bibliographies

- [1] Selfaoui, R., & Kheridla, M. Y. La prévention des risques professionnels (Doctoral dissertation).univ ouargla
- [2] Chorfi Belhadj, R., Ould Zemirli, I., & Ferhat, S. (2022). Prévention et protection contre les risques dans les industries de construction et fabrication mécanique.. univ medea
- [3] Zitouni, M. (2022). Amélioration de la protection différentielle numérique des transformateurs de puissance par la détection, la localisation et l'exploitation des courants inverses (Doctoral dissertation). univ setif
- [4] Hamdini, B., & Ikhlef, N. E. (2016). Modélisation des dispositifs à diélectriques (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [5] SENOUSSAOUI, M. E. A. (2019). Contribution des techniques intelligentes au diagnostic industriel des transformateurs de puissance (Doctoral dissertation).univ sba dz
- [6] KHAMES, A., & FILALI, B. Utilisation des huiles de Quercus dans les transformateurs électriques (Doctoral dissertation). univ ouargla
- [7] Dang, V. H. (2011). Etude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques : caractérisation des décharges aux interfaces (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon).
- [8] SENOUSSAOUI, M. E. A. (2019). Contribution des techniques intelligentes au diagnostic industriel des transformateurs de puissance (Doctoral dissertation).univ sba dz
- [9] Souhaib, D., & Errachid, D. H. (2022). Analyse des courants associés aux streamers dans les huiles synthétique (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).
- [10] Toumi, A., MASSAOUDI, A. C., & ABDI, S. (2014). Etude des caractéristiques électriques et physico-chimiques de défférente huile de transformateur neuve, vieille et régénérée. univ medea
- [11] Noëlle Berger ; « Liquides isolante en électrotechnique » ; Techniques de l'ingénieur, A 3150, 1990.
- [12] Sifeddine Abdi « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de Transformateur », Thèse doctorat électrotechnique, École Nationale Polytechnique Alger, Juillet2012.
- [13] Slimene.Bouazabia « Cours sur Les diélectrique liquides » École Nationale Polytechnique Jun99.
- [14] Janver-Sylver Nacho « Développement des nouvelles méthodes de diagnostic et de Régénération des huiles pour les transformateur de puissance », Thèse doctorat génie Électrique l'école centrale de Lyon 2011.

- [15] DJERIFILI, A., GSASSI, A., & BAKACHE, Y. (2020). Production le biodiesel : modélisation et optimisation (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [16] Hammouda, B., & Ayoub, A. (2011). Application de l'algorithme de fourmis artificielles et l'algorithme des essaims particulaires et trois critères d'interprétation DUVAL, CEI et ROGERS pour le diagnostic de l'huile de transformateurs (Doctoral dissertation). enp edu dz
- [17] Saidi, A., Sadoudi, I., & Benimam, S. (2020). L'influence de l'ajout de la charge carbonate de calcium et la matière polypropylène broyée sur les propriétés d'un produit fait en PP. univ medea
- [18] Dang, V. H. (2011). Etude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques : caractérisation des décharges aux interfaces (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon). hal science
- [19] Azizi, A. (2015). Contrôle de l'état des huiles minérales régénérées. univ medea
- [20] محمد البشير, مريقة, عز الدين, حمادي, العيد, & قدة (2020). Etude électro-statistique du comportement de l'huile de transformateur de puissance. univ eloued dz
- [21] Souhaib, D., & Errachid, D. H. (2022). Analyse des courants associés aux streamers dans les huiles synthétique (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).
- [22] "IEEE Guide for Maintenance, Diagnostics, and Testing of Electric Power Apparatus" (IEEE Std 62-1995)
- [23] Les sources d'IEEE sur ce sujet incluent les normes IEEE C57.154-2018 et IEEE C57.147-2018 qui définissent les exigences et les pratiques recommandées pour la gestion de l'huile de transformateur dans les transformateurs de puissance. La norme IEEE C57.161-2017 fournit des recommandations pour la régénération de l'huile de transformateur.
- [24] Djemaoui, A., Alioua, A., Boulassel, A. E., & Kessasra, R. (2020). Etude et analyse du procédé de la maintenance du transformateur de puissance de la centrale thermique de Jijel (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- Ch2
- [25] Felkaoui, A. (2018). Diagnostic vibratoire au service de la maintenance : de l'acquisition à la décision (Doctoral dissertation). univ setif
- [26] N'Cho, J. S. (2011). Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon).
- [27] TITOU, S. T., & GUELIEL, S. (2020). Amélioration des performances d'huile isolant de transformateur par l'insertion d'une barrière isolante (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [28] Guerbas, F. (2011). Influence des barrières sur la rigidité diélectrique de l'huile minérale (Doctoral dissertation).
- [29] LES APPROCHES, D. L. M. P. Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master Thème. univ annaba
- [30] Belgeuleil, A. (2022). Séparation aveugle de sources (SAS) par optimisation BCO (Bee colony Optimization) dans mélange non-linéaire : Application aux signaux paroles (Doctoral dissertation, university of M'sila).

- [31] Krine, Z., & Abdi, A. (2020). Utilisation des réseaux de neurones convolutifs pour la suppression automatique des filigranes (Doctoral dissertation, University of Jijel).
- [32] BOUKHELKHAL, S., & TCHOKETCH KEBIR, S. (2020). Étude et réalisation d'un système de détection des maladies végétales par traitement d'images au niveau des serres agricoles. univ medea
- [33] Latreche, M. T. (2018). Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien (Doctoral dissertation). univ setif
- [34] Benglia, L., & Zinet, M. L. (2020). Diagnostic de l'huile de transformateurs de puissance par analyse de gaz dissous utilisant un classificateur SVM multicouche (Doctoral dissertation) enp.edu.dz.
- [35] Mohamed, D. J. E. R. I. O. U. I. (2019). Contribution au Développement de Systèmes Multicapteurs Intelligents Dédiés à la Surveillance et au Contrôle de la Qualité des Eaux Propres (Doctoral dissertation, Université de M'sila).
- [36] Michiorri, A. (2021). Modélisation et prise de décision pour le système électrique (Doctoral dissertation, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, École Doctorale EEATS (Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal)).
- [37] YOUNES, H., & ABDERRAHMANE, S. (2022). *Amélioration de la rigidité diélectrique des intervalles d'huile du transformateur par l'insertion d'une barrière isolante sous haute tension 50 Hz* (Doctoral dissertation, university of M'sila).

