



République Algérienne Démocratique et
Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Universite Amar Telidji - Laghouat

DEPARTEMENT : Electrotechnique

FACULTE : Technologie

MEMOIRE DE MASTER

PRESENTE PAR : Toobi Walid
Nouioua Mouad Taki Eddin

DOMAINE : Sciences et techniques

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Electrotechnique Industrielle

Thème

**Influence de la concentration méthanique sur le
comportement diélectrique de l'huile d'un
transformateur de puissance soumis à un vieillissement
thermique : Dégradation et diagnostic**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
A. AMEUR	Professeur	Président
R.Djekidel	Professeur	Examineur
MAHI Djillali	Professeur	Encadreur
BESSEDIK Sid Ahmed	Professeur	Co-Encadreur

Promotion: 2022/2023

Remerciements

*Nous tenons abord à remercier le Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience pour atteindre cet objectif. Nos sincères remerciements d'abord à notre encadreur : «**Prof D.MAHI**» qui a suivi l'évolution de notre mémoire, surtout, pour son aide précieuse, nous tenons à lui exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance.*

Nos plus vifs remerciements sont adressés à Monsieur

*«**S. BESSEDIK**» Nous tenons à remercier également Monsieur «**A. AMEUR**» Professeur à l'université **Amar Telidji de Laghouat**, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*Nous tenons à remercier également Monsieur «**R.Djekidel**» Professeur à l'université Amar Telidji de Laghouat,*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à chacun des membres de **notre famille** pour leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours universitaire*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et à **tous nos amis**, chacun par son nom.*

أثر تركيز الميثانول على السلوك العازل لزيت المحولات المعرض للشيخوخة عند درجات حرارة عالية : التدهور والتشخيص.

ملخص :

يؤدي تقادم الورق ، بشكل أساسي إلى آلية التحلل المائي الحمضي ، إلى إنتاج العديد من المنتجات الثانوية للتحلل مثل: الماء والكحول وأكاسيد الكربون ومركبات الفوران وغيرها.

تتبع المواد الكيميائية لشيخوخة السليلوز ، مثل FAL-2 والميثانول ، كمنتجات تدهور الورق ، المراحل المختلفة من تقادم الورق. تساعد أدوات التتبع هذه في مراقبة حالة الورق داخل محولات الطاقة.

تم إثبات استخدام الميثانول كمنتج كيميائي بطريقة مناسبة وموثوقة لمتابعة المراحل المختلفة من التقادم الطبيعي لأوراق Kraft و TUK التقليدية .

في هذه الدراسة كنا مهتمين بالدراسة والتنبؤ بسلوك شيخوخة أوراق كرافت والأوراق المحسنة حرارياً بواسطة نظام ANFIS. الهدف هو تحسين تشخيص نظام عزل المحولات والتنبؤ بقيمة مؤشر الجر (TiDX). النتائج التي تم الحصول عليها مثيرة للاهتمام.

تم العثور على نموذج ANFIS ليكون أفضل في التنبؤ DPv مقارنة بالشبكة العصبية الاصطناعية و PSO. وهذا يعني أن ANFIS كانت قادرة على النقاط الأنماط الأساسية أو العلاقات في البيانات بدقة ، مما أدى إلى تنبؤات Dpv أفضل.

الكلمات المفتاحية: الزيت ، القوة العازلة ، تركيز الميثانول ، الشيخوخة الحرارية ، التشخيص.

Influence de la concentration méthanoïque sur le comportement diélectrique de l'huile d'un transformateur de puissance soumis à un vieillissement thermique : Dégradation et diagnostic

Résumé :

Le vieillissement du papier, principalement en raison du mécanisme de l'hydrolyse acide, produit plusieurs sous-produits de décomposition tels que : l'eau, des alcools, des oxydes de carbone, des composés furanniques et autres.

Les traceurs chimiques du vieillissement de la cellulose comme le 2-FAL et le méthanol, comme produits de dégradation du papier, suivent les différentes étapes du vieillissement du papier. Ces traceurs aident à surveiller l'état du papier à l'intérieur des transformateurs de puissance.

L'utilisation du méthanol comme traceur chimique a été démontrée d'une manière convenable et fiable pour suivre les différentes étapes du vieillissement normal des papiers Kraft traditionnel et TUK.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à l'étude et la prédiction du comportement du vieillissement des papiers Kraft et des papiers thermiquement améliorés, par le système ANFIS. Le but étant d'améliorer le diagnostic du système d'isolation du transformateur et de prédire la valeur l'indice de traction (TiDX). Les résultats obtenus sont intéressants.

Le modèle ANFIS s'est avéré meilleur dans la prédiction du DPv par rapport au réseau neuronal artificiel et au PSO. Cela implique que l'ANFIS a pu capturer avec précision les schémas ou les relations sous-jacentes dans les données, conduisant à de meilleures prédictions du Dpv

Mots - Clés : Huile, Rigidité diélectrique, Concentration méthanoïque, Vieillissement thermique, Diagnostic. _

Influence of the methanoic concentration on the dielectric behavior of the oil of a power transformer subjected to thermal aging: Degradation and diagnosis

Abstract:

The aging of paper, mainly due to the mechanism of acid hydrolysis, produces several decomposition by-products such as: water, alcohols, carbon oxides, furan compounds and others.

Cellulose aging chemical tracers such as 2-FAL and methanol, as paper degradation products, follow the different stages of paper aging. These tracers help monitor the condition of the paper inside power transformers.

The use of methanol as a chemical tracer has been demonstrated in a suitable and reliable way to follow the different stages of normal aging of traditional Kraft and TUK papers.

In this study we were interested in the study and prediction of the aging behavior of Kraft papers and thermally improved papers, by the ANFIS system. The goal is to improve the diagnosis of the transformer insulation system and to predict the value of the traction index (TiDX). The results obtained are interesting.

ANFIS model was found to be better in predicting DPv compared to artificial neural network and PSO. This implies that ANFIS was able to accurately capture underlying patterns or relationships in the data, leading to better Dpv predictions.

Keywords: Oil, Dielectric strength, Methanoic concentration, Thermal aging, Diagnosis.

SOMMAIRE

Résumé.....	ii
SOMMAIR.....	iv
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations et des symboles	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES TRANSFORMATEUS DE PUISSANCE.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique :.....	3
I.3. Le transformateur de puissance :.....	3
I.3.1. Définition :.....	3
I.3.2. Classification :.....	3
I.4. Rôle et domaine d'application :.....	4
I.5. Principe de fonctionnement :.....	4
I.5.1. Bilan de puissance :.....	5
I.5.2. Rendement :.....	5
I.6. Les composants de base du transformateur(Constitution) :.....	5
I.6.1. Partie active.....	5
I.6.2. Composants associés:.....	6
I.6.3. Système de refroidissement.....	8
I.6.4. Système d'isolation.....	8
I.7. Différents types de transformateurs :.....	8
I.7.1. Classification selon le type de construction :.....	8
I.7.2. Classification selon le type de refroidissement :.....	9
I.7.3. Autotransformateur :.....	11
I.8. Protection des transformateurs de puissance.....	11
I.9. Couplages.....	12
I.10. Le système d'isolation dans les transformateurs de puissance.....	13
I.11. Isolation liquide :.....	13
I.12. Isolation solide :.....	17
I.12.1. Principaux types d'isolation solide.....	17
I.12.2. Propriété du papier isolant.....	18
I.12.3. Vieillessement des isolants solides.....	19

I.13.	Isolation mixte Huile – Papier.....	19
I.13.1.	Différentes configurations du système d'isolation des transformateurs.....	20
I.13.2.	Viellissement du complexe huile/papier.....	20
I.14.	Conclusion.....	21
CHAPITRE II : Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance.		23
II.1.	Introduction:.....	23
II.2.	Généralité sur diagnostic:.....	23
II.3.	Les modes de défaillance :.....	25
II.3.1.	Le mode de défaillance diélectrique:.....	25
II.3.2.	Le mode de défaillance thermique:.....	25
II.3.3.	Le mode de défaillance mécanique:.....	26
II.3.4.	Le mode de défaillance chimiques :.....	27
II.4.	Méthodes de surveillance et de diagnostic des huiles isolantes :.....	29
II.4.1.	Méthodes de diagnostic non traditionnelles:.....	29
II.4.2.	Méthodes de diagnostic traditionnelles.....	30
II.5.	Analyse de l'état du papier cellulosique :.....	33
II.5.1.	Mesure direct sur le papier :.....	33
II.5.2.	Analyse furanique:.....	34
II.6.	Conclusion.....	34
CHAPITRE III : Approche Neuro-Floue ANFIS.....		36
III.1.	Introduction :.....	36
III.2.	Réseaux de neurones :.....	36
III.2.1.	Architecture des réseaux de neurones :.....	36
III.2.2.	Apprentissage des réseaux de neurones :.....	37
III.3.	Logique floue :.....	38
III.3.1.	Variable floue ou linguistique :.....	38
III.3.2.	Sous-ensemble flou :.....	39
III.3.3.	Fonction d'appartenance :.....	39
III.3.4.	Base de règles floues :.....	40
III.3.5.	Systèmes d'inférence flous :.....	40
III.4.	Réseaux neuro-flous :.....	41
III.4.1.	Choix de l'architecture d'un réseau neuro-flou :.....	41
III.4.2.	Structure neuro-flou :.....	41
III.4.3.	Différents modèles des réseaux neuro-flous :.....	42
III.4.4.	Système d'Inférence Neuro-Flou Adaptatif (ANFIS):.....	42

III.4.5.	Architecture de l'ANFIS :.....	43
III.4.6.	Algorithme d'apprentissage :.....	44
III.4.7.	Avantages de l'anfis.....	45
III.4.8.	Les inconvénients de l'anfis.....	46
III.5.	Conclusion :.....	46
CHAPTER IV Application de l'ANFIS dans la modélisation.....		48
IV.1.	Introduction:.....	48
IV.2.	La base de données.....	49
IV.3.	PARTIE 1 : Modélisation de la polymérisation.....	53
IV.3.1.	Introduction.....	53
IV.3.2.	Préparation des entrées/sorties :.....	53
IV.3.3.	Résultats de simulation.....	54
IV.3.4.	Discussion :.....	62
IV.3.5.	La comparaison :.....	63
IV.4.	Partie 2 : Modélisation et prédiction d'indice de traction.....	64
IV.4.1.	Introduction :.....	64
IV.4.2.	La base des données :.....	64
IV.4.3.	Résultats :.....	65
IV.4.4.	Discussion :.....	67
IV.5.	PARTIE 3 : Diagnostic du papier et de l'huile isolante du transformateur.....	68
IV.5.1.	Introduction :.....	68
IV.5.2.	Diagnostic de degré de polymérisation :.....	68
IV.5.3.	Diagnostic a concentration de méthanol :.....	69
IV.6.	Conclusion.....	69
CONCLUSION GÉNÉRALE		64
BIBLIOGRAPHIE.....		66

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance

Figure I.2 : Schéma de bilan de puissance d'un transformateur

Figure I.3 : [vue intérieure d'un transformateur, type colonne.](#)

Figure I.4 : Différentes configurations du circuit magnétique

Figure I.5 : [La cuve d'un transformateur de puissance](#)

Figure I.6 : [Traversées d'un transformateur triphasé](#)

Figure I.7 : [Transformateur à colonnes](#)

Figure I.8 : [Transformateur type cuirassé](#)

Figure I.9 : [Transformateur immergé dans l'huile](#)

Figure I.10 : [Transformateur sec.](#)

Figure I.11 : Schéma d'un autotransformateur

Figure I.12 : [Couplage étoile-étoile](#)

Figure I.13 : [Couplage étoile-triangle](#)

Figure I.14 : couplage zigzag

Figure I.15 : représenté Isolation liquide entre les enroulements

Figure I.16 : Structure de l'ester synthétique

Figure I.17 : Structure des huiles silicones

Chapitre II

Figure II.1: Évaluation de la qualité de l'huile

Figure II.2: Évaluation des propriétés du papier

Figure II.3 : [Configuration d'électrodes utilisées pour l'étude du claquage aux champs divergents](#)

Figure II.4: Échauffement excessive d'un enroulement

Figure II.5: Effort électrodynamique franche

Figure II.6: Problème de transport

Figure II.7: Joint de traversée écrasé

Figure II.8: Dégradation de la cellulose des isolant

Figure II.9: Cellules d'essai avec des électrodes partiellement sphériques

Figure II.10 : La tension interfaciale entre l'huile et l'eau méthode de l'anneau

Chapitre III

Figure.III.1 : Comparaison entre neurone biologique et neurone artificiel

Figure III.2: Architecture d'un réseau de neurones

Figure III.3 : Partition floue de l'univers de discours de la variable linguistique « Température ».

Figure III.4 : Formes de quelques fonctions d'appartenance.

Figure III.5 : Système d'inférence flou.

Figure III.6 : Modèle général d'un neurone flou.

Figure III.7 : Architecture du réseau ANFIS.

Chapitre IV

Figure IV.1: Modélisation de DPv kraft

Figure IV.2: Prédiction de DPv kraft

Figure IV.3 : Modélisation de DP 4 variables

Figure IV.4 : Prédiction de DPv 4 variable

Figure IV.5 : Modélisation de DPv 3 variables TUK

Figure IV.6 : Prédiction de DPv 3 variables TUK

Figure IV.7 : Modélisation de Tidx

Figure IV.8 : Prédiction de Tidx

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Choix de l'isolant liquide pour différents types de transformateurs

Tableau I.2 : Comparaison des paramètres typiques des principaux types des huiles isolantes

Chapitre II

Tableau II. 1: Les gaz pour le diagnostic

Tableau II. 2: Mesure directe sur papier cellulosique

Chapitre III

Tableau.III.1 : Les activités de l'algorithme d'apprentissage

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Résultats de l'essai a T=150°C

Tableau IV.2: Résultats de l'essai a T=170°C

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai a T=190°C

Tableau IV.4 : Résultats de l'apprentissage 3 var kraft

Tableau IV.5 : Résultats de test 3 var kraft

Tableau IV.6 : Les performances de l'approche ANFIS avec 3 variables

Tableau IV.7 : Résultats de l'apprentissage 4 var kraft

Tableau IV.8 : Résultats de test 4var kraft

Tableau IV.9 : Les performances de l'approche ANFIS avec 4 variable

Tableau IV.10: Résultats de l'apprentissage TUK

Tableau IV.11 : Résultats de test TUK

Tableau IV.12 : Les performances de l'approche ANFIS avec 3 variable TUK

Tableau IV.13 : comparaison entre ANN.PSO.ANFIS.

Tableau IV.14 : Résultats de l'apprentissage tidx

Tableau IV.15 : Résultats de test tidx

Tableau IV.16 : Les performances de l'approche ANFIS de Tidx

Tableau IV.17 : Estimation de la durée de vie écoulée et restante du transformateur étudié

Tableau (IV.18) : Niveau seuil du méthanol et son état

Liste des abréviations et des symboles

CEI	Commission Électrotechnique Internationale
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
IREQ	Institut de recherche d'Hydro-Québec
DP	Degré de polymérisation
DGA	Dissolved gas analysis
ANN	Artificial neural network
HT	Haute tension
BT	Basse tension
PCB	Polychlorobiphényles
TUK	Thermally upgraded Kraft
UV	Ultraviolet
DF	Degradation factor
IA	Intelligence artificielle
MLP	Multilayer perceptron
ALVINN	Autonomous land vehicle in a neural network
SI	Système international
DP_v	Degré de polymérisation viscosimétrique moyen
T_{idx}	Indice de traction
HPLC	Chromatographie en phase liquide à haute performance
Trainlm	Fonction rétropropagation
MSE	Mean-squared error
Tansig	Fonction tangente sigmoïde
Purelin	Fonction linéaire
IT	Indice de traction
FL	Fuzzy logic
GA	Genetic algorithms
<i>E_r</i>	Permittivité relative
Σ	Conductivité électrique
<i>tan δ</i>	Facteur de dissipation diélectrique

Liste des abréviations et des symboles

E	Rigidité diélectrique
U_i	Somme pondérée des entrées du neurone i
w_{ij}	Poids de la connexion reliant l'entrée j au neurone i
X_i	Entrée j connectée au neurone i
B_i	Seuil interne du neurone i
O_i	Sortie du neurone i
G	Fonction d'activation de la sortie du neurone i
A	Fonction d'activation d'un neurone
E_{abs}	Erreur de calcul absolue d'un réseau de neurones
Ψ	Fonction absolue
Y_k	Sortie estimée d'un réseau de neurones
D_k	Sortie exacte d'un réseau de neurones
E_{rel}	Erreur relative de calcul s'exprime en (%)
$J(t)$	Critère de la performance à l'instant t
$d_i(t)$	$i^{\text{ème}}$ sortie désirée à l'instant t

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les transformateurs de puissance sont des composants essentiels du système de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils constituent l'un des éléments les plus chers et il est donc fondamental qu'ils fonctionnent correctement durant de nombreuses années. La plupart des transformateurs de puissances à travers le monde sont à isolation liquide, solide ou mixte (ou mélangée). Ces isolants permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique que le transport de chaleur. En effet, en plus de leurs propriétés diélectriques, ils ont de bonnes propriétés de dissipation de chaleur comparés aux isolants solides et gazeux.

L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance ; d'une part pour ses propriétés physico-chimiques, et d'autre part pour son faible coût. Tout au long de leur utilisation, les huiles isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes : électrique, thermique, chimique etc., et en fonction du temps leurs propriétés peuvent progressivement se dégrader.

Ce phénomène de dégradation est connu sous le nom de vieillissement. Il est causé essentiellement par la présence d'oxygène et d'humidité [1].

Dû à la perforation du système d'isolation (papier-huile) et en cas de défauts dus à des facteurs tels que la surchauffe, la carbonisation du papier, les décharges de faible énergie, les décharges de forte énergie et les arcs, l'huile isolante de transformateurs se décompose provoquant la formation des gaz dissous. Les principaux gaz consistent en l'hydrogène (H_2), le méthane (CH_4), l'acétylène (C_2H_2), l'éthylène (C_2H_4) et l'éthane (C_2H_6).

En outre, la décomposition du papier isolant produit le monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO_2) [2]. L'analyse des gaz dissous (DGA) permet de donner une image exacte de la dégradation de l'huile et de la cause de cette dégradation affectant l'isolation. Du fait que les transformateurs de puissance sont très coûteux, l'isolation doit supporter sans Défaillance plusieurs contraintes ; électrique, thermique et chimique, et cela pendant une durée de vie pouvant aller jusqu'à 40 ans. La surveillance des transformateurs en service devient donc systématique.

La maintenance des transformateurs ne doit, pas être, donc, négligée. Elle permet de prolonger la durée de vie des appareils, de limiter les risques de panne, les pertes d'exploitation et les risques environnementaux.

Cette surveillance est assurée grâce à des essais sur l'isolation, et particulièrement sur l'huile isolante pour prévoir la durée de vie et le stade de vieillissement atteint par l'isolation [1].

L'analyse d'huile permet de Détecter un éventuel défaut électrique et/ou thermique. La Vérification de l'état des isolants notamment le papier qui en se décomposant, il fournit, en plus du CO , du CO_2 et de l'eau, une famille de produits partiellement solubles dans l'huile, les dérivés furaniques. Ceux-ci sont caractéristiques de la décomposition de la cellulose. L'analyse des dérivés furaniques permet d'obtenir des renseignements sur l'état du papier dans le transformateur en ne prélevant que l'huile. Elle permet de déterminer la durée de vie résiduelle du transformateur [3].

Plusieurs algorithmes basés sur l'intelligence artificielle ont été élaborés pour obtenir un meilleur diagnostic des transformateurs de puissance. Récemment, les méthodes conventionnelles ont été combinées avec des algorithmes intelligents, pour contribuer à l'amélioration du diagnostic des défauts de transformateurs de puissance [2]. A titre d'exemple : prédiction de vieillissement des papiers celluloses sous l'effet de la température.

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier l'isolation hybride. Le but étant de faire une analyse prédictive, utilisant les techniques de l'intelligence artificielle, qui consiste à utiliser des données provenant des mesures effectuées sur du papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol sous l'influence de trois niveaux de température appliquée (150°C, 170°C et 190°C) [4] et par conséquent de diagnostiquer l'état de l'isolation.

Le manuscrit de ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente de manière générale les transformateurs de puissance et leurs systèmes d'isolation : liquides, solide et mixte : liquide/ solide ainsi les propriétés de chaque type.

Le deuxième chapitre porte sur le diagnostic de l'état de santé du transformateur et les différents types d'analyses d'huile.

Le quatrième chapitre est consacré à une présentation de la contribution des différents modèles de réseaux neuro-flous.

Le troisième chapitre rappelle brièvement les notions fondamentales de la logique floue et les réseaux de neurones artificiels. Il présente aussi le système d'inférence flou à base de réseaux de neurones adaptatifs (l'ANFIS) : leur conception, leur domaine d'application, ainsi leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le quatrième chapitre, on teste l'applicabilité de L'ANFIS à la modélisation et la prédiction du comportement diélectrique de l'huile du transformateur de puissance en vue d'étudier la dégradation et le diagnostic du diélectrique. Nous avons subdivisé ce chapitre en trois parties :

- Partie 1 :
 - Modélisation de la polymérisation en utilisant 3 variables : temps, température et concentration de méthanol pour le papier Kraft.
 - Modélisation de la polymérisation en utilisant 4 variables : temps, température, concentration de méthanol et d'éthanol pour le papier Kraft.
- Partie 2 : Modélisation et prévision de l'indice de traction $TiDX$.
- Partie 3 : Diagnostic du papier et de l'huile isolante du transformateur.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale qui synthétise les apports théoriques validés expérimentalement. Les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour une étude beaucoup plus approfondie.

**CHAPITRE I : PRÉSENTATION
GÉNÉRALE DES
TRANSFORMATEURS DE
PUISSANCE**

I.1. Introduction

Les transformateurs de puissance sont un moyen très économique de réduire les pertes de ligne en transmettant une puissance haute tension sur de longues distances, puis en abaissant cette tension pour alimenter les réseaux de distribution régionaux et locaux ou même la tension d'alimentation domestique. Avec les progrès scientifiques qui ont lieu aujourd'hui, la recherche de moyens plus efficaces est devenue afin d'obtenir une longue durée de vie et les meilleurs moyens de l'entretenir. Ce premier chapitre présente les transformateurs de puissance, Son fonctionnement, ses différents types et ses principaux éléments, avec un focus sur le système d'isolation, car la durée de vie du transformateur en dépend, avec un focus sur les systèmes d'isolation complexes : liquide – solide.

I.2. Historique :

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur Véhiculant un courant génèrait un champ magnétique. Quelques années plus tard, en 1830, Josef Henry donne corps aux notions d'induction et de self-induction. En 1831 l'anglais Michael Faraday à une série d'expériences avec un appareil constitué d'un anneau de fer et d'enroulements de fil cuivre isolé. En 1832 Lucien Gaulard (1850-1880), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la société Française des Électriciens « un générateur secondaire », dénomme depuis Transformateur [5].

I.3. Le transformateur de puissance :

I.3.1. Définition :

Un transformateur de puissance est un appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique » norme (IEC 60076-1, 2000).

« Les transformateurs sont réversibles et permettent, soit l'élévation, soit l'abaissement de la tension ; d'où la possibilité de choisir la meilleure tension pour la production, le transport, la distribution, l'utilisation de l'énergie électrique, et de passer facilement de l'une à l'autre. » Un transformateur électrique permet donc de faire transiter la puissance électrique en courant alternatif (AC) depuis la centrale de production d'électricité jusqu'à son utilisateur final avec un minimum de pertes, à différents niveaux de tensions. Le transformateur est l'élément du réseau qui permet le passage d'une tension alternative donnée à une autre : c'est un convertisseur AC/AC à fréquence fixe, celle du réseau [6].

I.3.2. Classification :

On peut classifier les transformateurs de puissance selon plusieurs aspects. Ces aspects Sont indépendants les uns des autres:

- La puissance :
 - Transformateurs de distribution : jusqu'à 2,5 MVA en triphasé ou 0,833MVA en monophasé.

- Transformateur de moyenne puissance : au-delà de 2,5 MVA et jusqu'à 100 MVA en triphasé et 33,3MVA en monophasé.
- Transformateur de grande puissance : au-delà de 100 MVA en triphasé 33,3 MVA en monophasé.
- *Le nombre de phases* : monophasé ou triphasé
- *Le milieu réfrigérant et le mode de refroidissement* : air ou huile, naturel ou forcé
- *Le rapport de transformation* : élévateur ou abaisseur
- *La forme du circuit magnétique* : colonne ou galette (cuirassé)
- *Type de respiration*: hermétique ou respiration libre [7].

I.4. Rôle et domaine d'application :

Les transformateurs triphasés sont présents à différents endroits dans les réseaux Électriques pour adapter les valeurs efficaces des tensions aux niveaux souhaitables. De façon simplifiée, l'énergie électrique est produite dans les centrales sous des tensions moyennes. Le transport à longue distance exige des hautes tensions afin de limiter les pertes par effet Joule et réduire le dimensionnement des conducteurs. L'utilisation demande des tensions basses ou moyennes. Alors, des transformateurs Élévateurs sont nécessaires au départ, et des transformateurs abaisseurs sont indispensables à l'arrivée côté consommateurs [8].

I.5. Principe de fonctionnement :

Un transformateur comprend essentiellement deux circuits électriques montés sur un Circuit magnétique, l'un des circuits électriques dit enroulement primaire comporte N_1 spires étant raccordé à une source de tension alternatif U_1 , le courant I_1 qui traverse cet enroulement donne naissance à un flux Φ_m dans le circuit magnétique. Ce flux induit une force électromotrice dans le deuxième enroulement dit « enroulement secondaire » de N_2 spires aux bornes duquel apparait une tension U_2 [9].

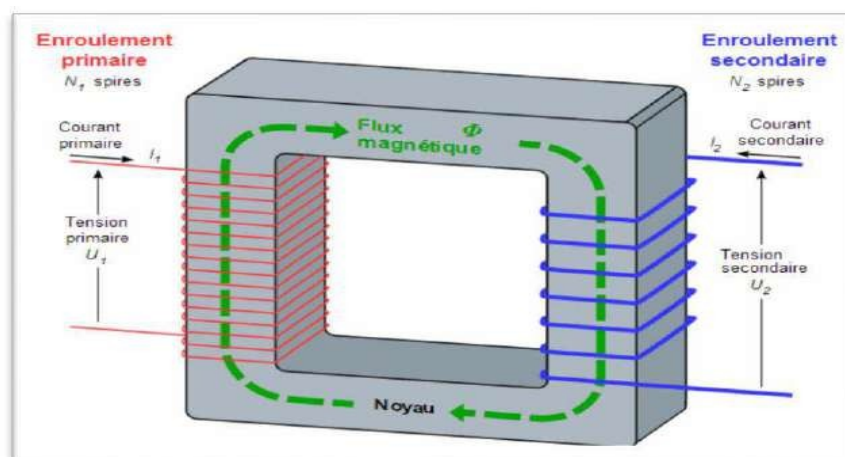


Figure (I.1) : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

I.5.1. Bilan de puissance :

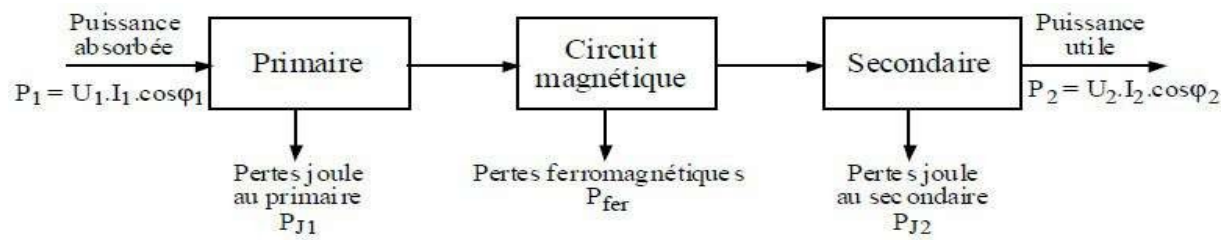


Figure (I.2) : Schéma de bilan de puissance d'un transformateur.

Bilan de puissance égale $P_1 = P_{J1} + P_{fer} + P_{J2} + P_2$

I.5.2. Rendement :

Le rendement du transformateur par définition égale le rapport de la puissance fournie Par le secondaire sur la puissance absorbée au primaire.

$$n = \frac{P_2}{P_1}$$

I.6. Les composants de base du transformateur(Constitution) :

La figure (I.13) suivante montre la constitution d'un transformateur de puissance Triphasé

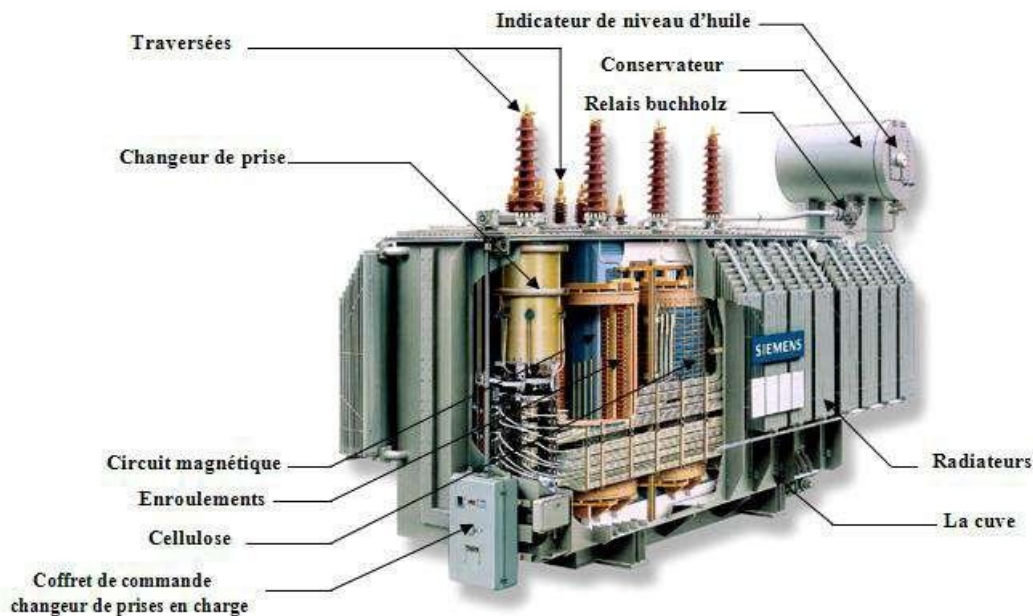


Figure (I.3) : vue intérieure d'un transformateur, type colonne.

I.6.1. Partie active

La partie active est définie comme le circuit magnétique et les enroulements

Circuit magnétique :

Le circuit est composé d'un noyau magnétique constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés. L'empilage et l'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les performances possibles pour canaliser le flux magnétique [10].

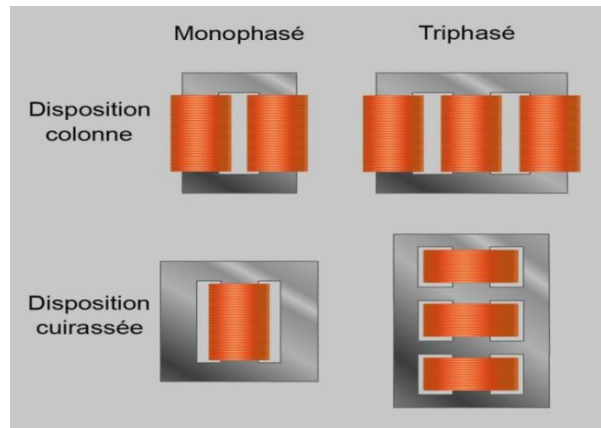


Figure (I.4) : Différentes configurations du circuit magnétique

Enroulements :

Ce sont les sources du champ magnétique primaire et secondaire et sont montés sur le noyau. Ils peuvent être feuillard, rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium. Les formes de bobinage, les sections et le nombre de spires sont conditionnées par des contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie des canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation d'huile et les échanges thermiques. [10].

I.6.2. Composants associés:

De nombreux composants sont associés au transformateur de puissance, les plus importants sont cités ci-dessous.

Bornes de traversée :

Les bornes de traversée peuvent être isolées par la porcelaine et du papier imprégné de l'huile ou de la résine époxy. Certaines sont immergées notamment pour les très hautes tensions, d'autres sont sèches.

Les traversés assurent le transit de la puissance entre les enroulements et les lignes aériennes sans contact avec le châssis du transformateur [10].

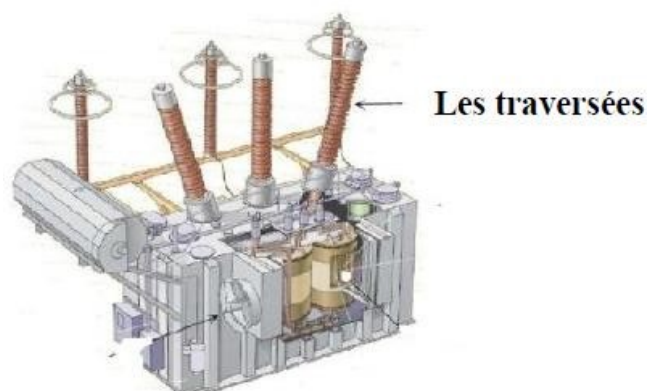


Figure (I.6) : Traversées d'un transformateur triphasé

La cuve:

La constitution de la cuve du transformateur est liée aux calculs thermiques du transformateur. Elle a pour rôles :

- Réservoir d'huile.
- Assurer la résistance au court-circuit (pour les transformateurs Cuirassé uniquement).
- Maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuite produit par le courant dans les enroulements.
- Elle sert à la protection de la partie active du transformateur. Elle est ajourée pour

Permettre la circulation naturelle de l'air autour du transformateur [11].



Figure (I.5) : La cuve d'un transformateur de puissance

Changeur de prise :

Le changeur de prise est un ensemble de quelques spires qui sont condensés en série avec les spires de l'enroulement haute tension. Elles permettent de modifier le rapport de transformation en charge et hors charge d'un transformateur de puissance sur une plage de réglage, on distingue deux types de changeur de prise en charge et hors charge (à vide) [12].

Conservateur:

Le conservateur (réservoir d'expansion) est utilisé pour les transformateurs dits « respirant » son rôle est de permettre la dilatation de l'huile en fonction de la température. La surface du diélectrique peut être en contact avec l'air ambiant (conservateur classique) ou être séparée par une paroi étanche souple (conservateur à diaphragme) [12].

Capteurs divers :

Le rôle des capteurs est de donner des informations sur l'état du transformateur. Parmi

Lesquels on trouve :

- Thermomètres pour la mesure de la température des points chauds ;
- Capteurs de pression du fluide isolant ;
- Capteurs du débit d'huile ;
- Capteurs d'humidité.

Aussi on peut citer les détecteurs de feu et les soupapes de sécurité [12].

I.6.3. Système de refroidissement

Un système de refroidissement est toujours mis en place pour maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier en fonction des paramètres suivants :

- Pertes à évacuer,
- Température ambiante extérieure,
- Contraintes de bruit,
- Contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur, et bien sûr le coût.
- La première lettre désigne le fluide de refroidissement interne : **O** pour l'huile minérale (99 % des cas), **K** pour les liquides isolant ayant un point de feu > 300°C, **L** pour les liquides à point de feu non mesurable.
- La seconde lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement interne : **N** pour naturel, **F** pour forcer (présence d'une pompe, mais l'huile circule librement), **D** pour forcée et dirigé (pompe et l'huile est forcée et dirigée à travers les enroulements).
- La troisième lettre indique le fluide de refroidissement externe : **A** pour air, **W** pour eau.
- Enfin la quatrième lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement externe : **N** pour naturel, **F** pour forcée (ventilateurs) [13].

I.6.4. Système d'isolation

A pour but de l'isolation diélectrique des enroulements ainsi que le refroidissement du transformateur, peut-être :

- **Liquide** : En fonction des fluides diélectriques (huiles minérales, synthétiques ou organiques).
- **Solide** : Papiers à base de cellulose, coton, rubans, vernis, résines époxydes, carton, bois, etc.
- **Complexe** : Combine les deux types précédents : liquide et solide.

I.7. Différents types de transformateurs :

Il existe différents types de transformateur, nous nous intéressons ici, à l'étude des transformateurs de puissances des réseaux électriques triphasés. Ces transformateurs présentent le plus grand intérêt dans le développement de l'interconnexion des réseaux. Pour différencier entre transformateurs, on distingue plusieurs types de classifications à savoir [14] :

I.7.1. Classification selon le type de construction :

Transformateur à colonnes :

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique

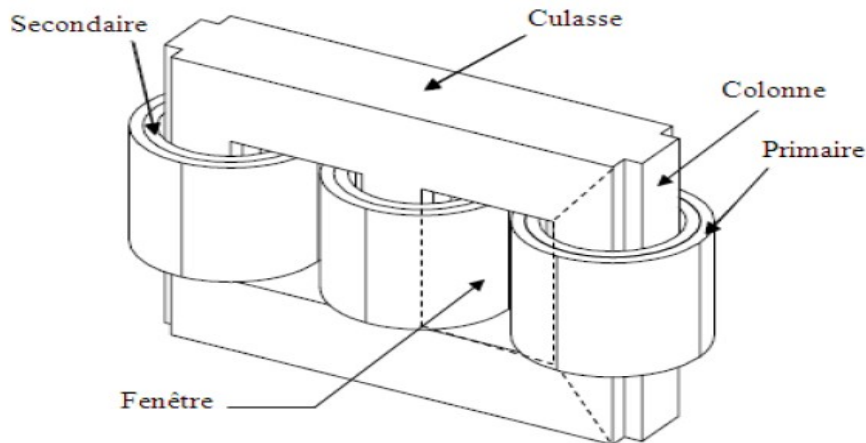


Figure (I.7) : Transformateur à colonnes

Transformateur cuirassé :

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et d'enroulements. Comme la montre la (figure I.8) Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages

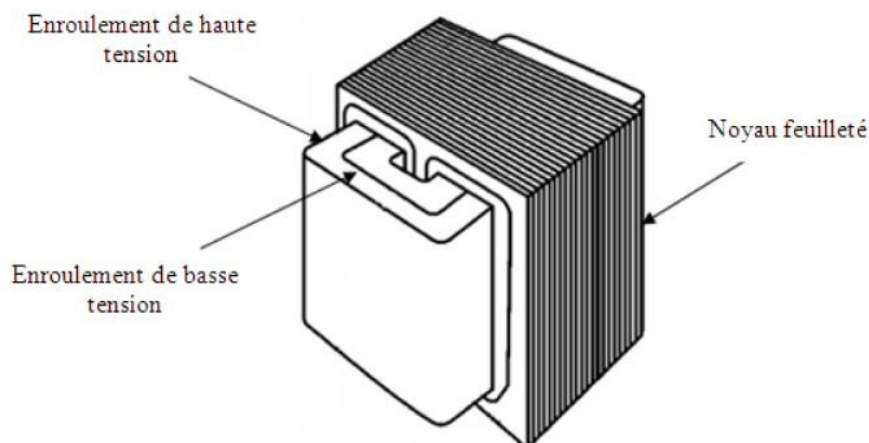


Figure (I.8) : Transformateur type cuirassé

I.7.2. Classification selon le type de refroidissement :

Transformateur à l'huile :

Pour prévenir l'action néfaste de l'air sur l'isolation des bobines et améliorer le refroidissement du transformateur, on place le noyau magnétique avec les enroulements dans une cuve remplie d'huile minérale. Malgré ces propriétés avantageuses, l'huile de transformateurs a deux défauts principaux: elle est inflammable et sa vapeur forme avec l'air dans certaines conditions un mélange explosif. En plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des

enroulements. La construction de la cuve généralement de forme ovale est liée au calcul thermique du transformateur. Le refroidissement du transformateur est d'autant plus difficile à réaliser que la puissance du transformateur est grande. La cuve est tapissée de shunts magnétiques, dont on distingue deux types :

- Les shunts magnétiques formés d'un empilement de tôles magnétiques semblable au noyau et qui canalise le flux de fuite.
- Les shunts amagnétiques plus économiques, constitués de plaque de cuivre ou aluminium ayant pour rôle de repousser le flux de fuite [15].



Figure (I.9) : Transformateur immergé dans l'huile.

Transformateurs secs :

Les transformateurs immergés dans l'huile liquide à base minérale ou de silicone sont plus répandus pour les plus fortes puissances et les niveaux de tension élevés, mais présentent des risques de fuite, d'incendie et la pollution de l'environnement. Cela a permis de laisser la place aux transformateurs avec technologie sèche, avec des enroulements enrobés (imprégnés). Le système d'isolation électrique est remplacé par une résine (époxyde) et l'air. Des résines ont été développées pour résister aux tensions électriques et aux contraintes mécaniques, thermiques qui apparaissent dans un transformateur en service. L'aspect favorable est son comportement non inflammable et léger. Ce genre de transformateur est le plus approprié pour la distribution de l'électricité en degré élevé de sûreté.



Figure (I.10) : Transformateur sec.

I.7.3. Autotransformateur :

Cet appareil présente l'avantage d'un dimensionnement plus faible que celui d'un transformateur, à puissance traversant égale. Il se distingue du transformateur par le fait qu'il existe un point commun aux enroulements primaires et secondaires. Etant donné qu'il n'y a plus d'isolation galvanique entre les enroulements primaires et secondaires, tout défaut se manifestant sur un réseau se propage immédiatement sur le second [15].

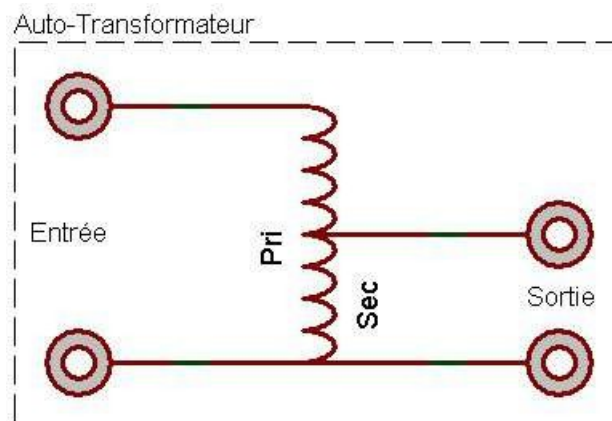


Figure (I.11) : Schéma d'un autotransformateur.

I.8. Protection des transformateurs de puissance

Le système de protection des transformateurs de puissance est nécessaire pour le déclenchement de transformateur lors d'un défaut détecté. Les défauts dans un transformateur sont en quatre types : les surcharges, les courts-circuits, les défauts à la masse et les sur fluxages [16].

→ La protection contre les surcharges : les techniques les plus utilisées sont : la protection à maximum de courant de phase temporisée ou la protection à image thermique.

→ La protection contre les défauts de court-circuit : la protection différentielle est importante ; elle s'effectue par l'intermédiaire d'un transformateur de courant. La différence entre les courants entrants dans le transformateur et ceux sortants donne un

ordre de déclenchement au relais associées. Les relais de Bouchholz sont utilisés dans le cas de transformateurs respirant. Et les détecteurs de gaz et de pression sont utilisés dans le cas des transformateurs hermétiques.

→ La protection contre les défauts à la masse : diverses techniques sont apparues. Parmi lesquelles on trouve : la technique de mesure du courant homopolaire et la technique dite protection terre restreinte. Cette dernière compare le courant dans la connexion au neutre et la somme des courants dans les phases.

→ La protection contre les sur fluxages : la mesure de la cinquième harmonique du courant est utilisée. Le flux magnétique est proportionnel au rapport tension sur fréquence, si le phénomène devient trop fort, la déconnexion du transformateur est nécessaire.

I.9. Couplages

Il existe plusieurs façons de connecter les enroulements, pour les transformateurs triphasés de puissance, on rencontre surtout les couplages « étoile-étoile » et « étoile-triangle » (figure I.12) et (figure I.13) [17].

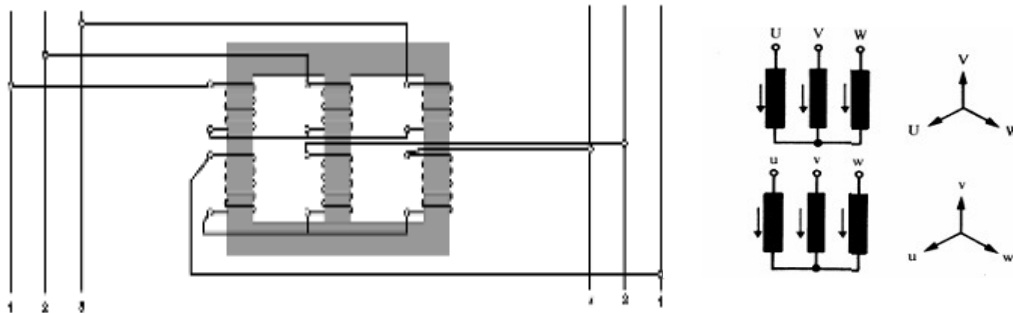


Figure (I.12) : Couplage étoile-étoile

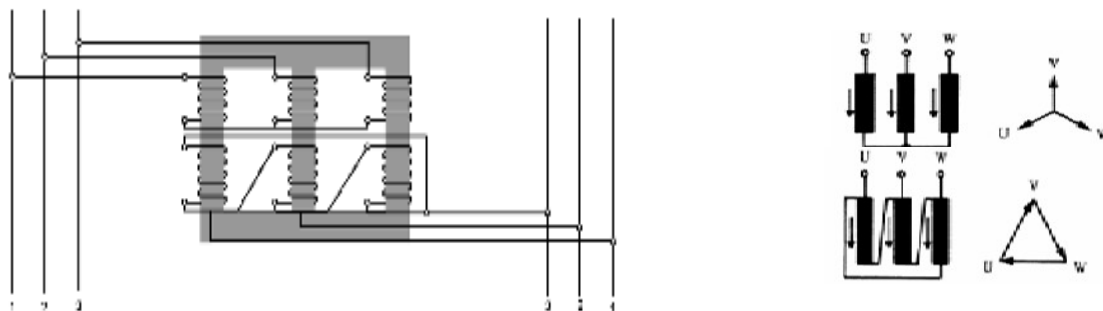


Figure (I.13) : Couplage étoile-triangle

Par ailleurs, pour certains transformateurs de distribution, les enroulements du secondaire sont connectés en « zigzag » (figure I.15). Dans ce cas, chaque bobinage est divisé en deux moitiés sur deux noyaux différents et mises en série en sens inverse

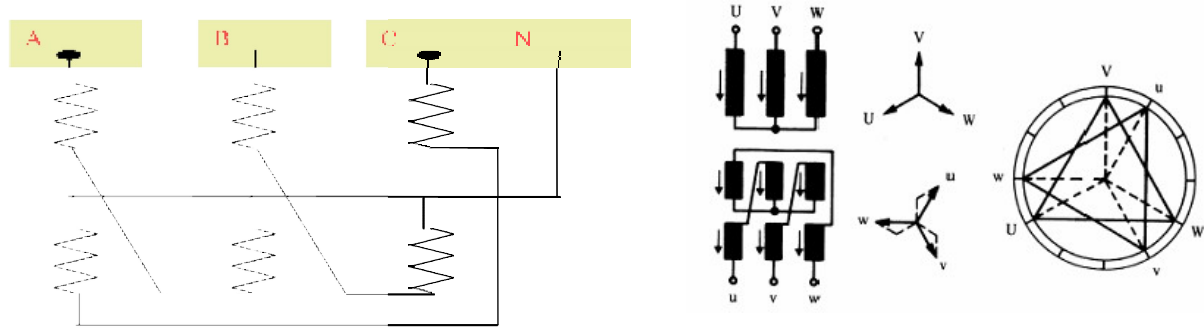


Figure (I.14) : couplage zigzag

I.10. Le système d'isolation dans les transformateurs de puissance

L'isolation des parties actives d'un transformateur de puissance est nécessaire, afin de réduire les différentes contraintes, qui influent négativement sur le bon fonctionnement et la durée de vie de ces machines. Généralement l'isolation dans un transformateur de puissance est prévue :

- Entre spires et couches d'un enroulement
- Entre les divers enroulements.
- Entre chaque enroulement et le circuit magnétique.

Le système d'isolation sert à isoler les parties actives du transformateur (bobinage, circuit magnétique, etc.) et à assurer la fonction de refroidissement. Il est constitué d'une partie solide et d'une partie liquide (huile). Comme suit :

I.11. Isolation liquide :

L'huile assure l'évacuation de la chaleur produite par les pertes au niveau des enroulements, du circuit magnétique et des isolants, vers les dispositifs de refroidissement (radiateurs externes). Il ralentit l'oxydation (la dégradation) de l'isolation solide. Aussi l'huile isole électriquement les éléments de la partie active. À ces trois principales fonctions, il faut ajouter la fonction de résistance à l'incendie. On utilise aussi le vernis pour assurer l'isolation des conducteurs. [18].

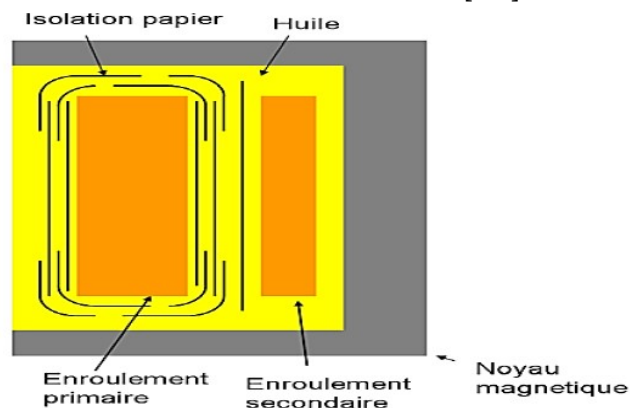


Figure (I.15) : représenté Isolation liquide entre les enroulements

Principaux types d'isolants liquides

Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois types : Les huiles végétales (produit naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse. Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques.

En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse ont été fabriquées par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications [19].

A. Les huiles minérale :

Les huiles minérales sont utilisées dans pratiquement tous les types de matériel électrique. La consommation annuelle dans le monde est estimée à 1 million de tonnes. Environ 90% sont utilisées dans les transformateurs, les huiles sont également employées dans les diviseurs capacitifs, les traversées, les changeurs de prise, les répartiteurs, les disjoncteurs et les câbles[20]. Lors de la fabrication de l'huile minérale, les fabricants rajoutent des additifs à très faible dose.

Ceux-ci sont principalement des antioxydants ayant pour effet de réagir directement avec les agents oxydants. Leur rôle est de casser la réaction d'oxydation, en évitant la formation d'acides et de composés polaires dont certains sont susceptibles de dégrader de manière irréversible l'huile minérale [21].

Les propriétés des huiles minérales isolantes sont décrites comme suit : [22]

- **La permittivité relative (ϵ_r)** : est une caractéristique intrinsèque d'un matériau. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule.

La permittivité relative des huiles minérales est 2,2 à 25 °C. Elle décroît légèrement avec la température et la fréquence du courant ;

- **La conductivité électrique (σ)** : elle est due à la présence d'impuretés ionisables en très faible concentration. La conductivité augmente et la viscosité d'un liquide devient faible lors des températures élevées. Le vieillissement du liquide isolant conduit à la formation de sous-produits qui contribuent à l'augmentation de la conductivité. Les huiles isolantes ont une conductivité de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-13} S.m⁻¹ ;

- **Le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$)** : ce facteur est sensible aux Contaminants et aux produits de vieillissement. Une huile minérale neuve possède une valeur de $\tan \delta$ à 90 °C de l'ordre de 10^{-3} alors qu'une huile altérée peut avoir une valeur de $\tan \delta$ à 90 °C supérieure à 0.5 ;

-**Rigidité diélectrique (E)** : mesurée en kV/cm, c'est la valeur maximale que peut atteindre un champ électrique dans un milieu diélectrique avant l'apparition d'étincelles. La fracturation d'un liquide provoque la décomposition de ses molécules en rompant les liaisons chimiques entre les atomes. C'est ce dont nous parlerons en détail dans le chapitre 2.

B. Huile ester synthétique :

Les esters synthétiques sont des produits fabriqués artificiellement. Ils ont une composition simple et bien définie. Ces esters sont obtenus par synthèse d'un acide et d'un alcool. Les polyesters et les esters complexes sont utilisés dans des conditions extrêmes (contraintes élevées) comme dans le cas des transformateurs de puissance. Un des principaux atouts de ce type d'huiles est la haute concentration d'eau qu'elles peuvent contenir comparées aux autres huiles isolantes. L'autre avantage réside dans le fait les huiles esters synthétiques ont une grande stabilité aux contraintes thermiques [23].

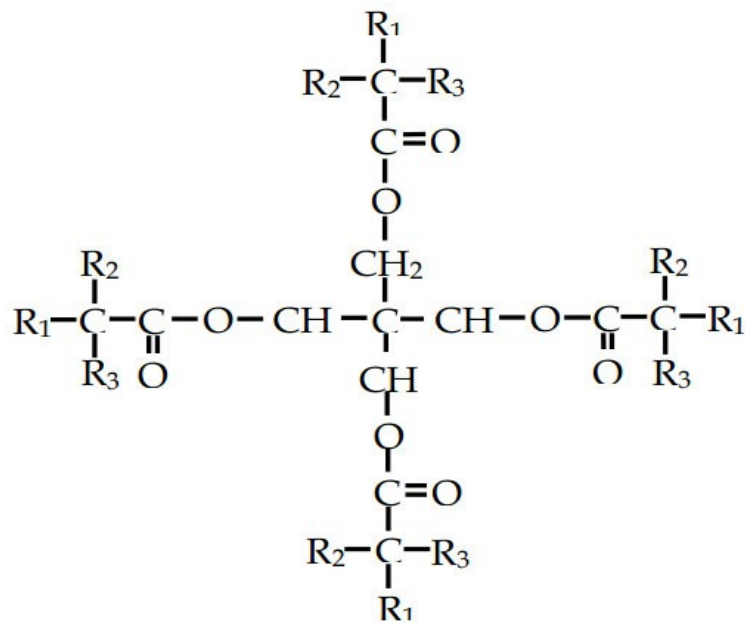


Figure (I.16) : Structure de l'ester synthétique

C. Huiles silicones

Les huiles silicones ont été développés pour remplacer les PCB ou (askarels) car ces derniers sont toxiques et ont des effets écologiques négatifs. Les silicones liquides présentent simultanément de bons comportements à basse température (point d'écoulement -60°C) et à haute température (température d'utilisation 150°C), ce qui est appréciable dans certains matériels soumis à des variations thermiques importantes. Ces huiles sont constituées d'une chaîne moléculaire linéaire dont les éléments sont formés d'atomes de silicium et d'oxygène alternés. Des groupements de méthyle (CH_3) saturent les valences libres de l'atome de silicium. [24]. La formule générale est la suivante :

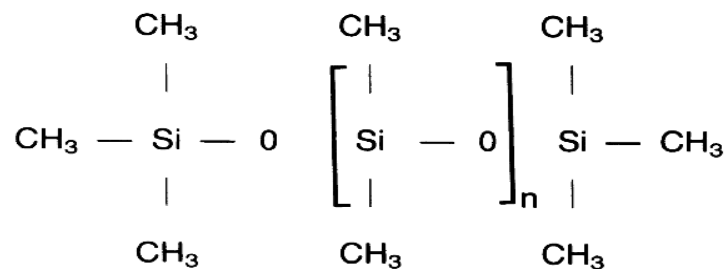


Figure (I.17) : Structure des huiles silicones

Choix d'une huile pour une application spécifique

Le Choix d'une huile se fait en prenant en compte le compromis « caractéristiques techniques et coût ». Comparativement aux huiles minérales, les huiles à point de feu élevé ou huiles alternatives (huiles synthétiques, huiles végétales) présentent des meilleures propriétés chimiques et thermiques, mais coûtent 4 à 5 fois plus chères. Toute fois le choix d'un liquide pour une application donnée doit assurer la fiabilité du fonctionnement des équipements ainsi que la sécurité des opérateurs. Le tableau1 présente les différents types d'huiles pour différents types de transformateurs [24].

	Huile minérale	Fluide silicone	Ester synthétique	Huiles végétales (Esters naturels)
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
A = Largement utilisé B = Utilisé moins fréquemment X = Couramment non utilisé				

Tableau 1: Choix de l'isolant liquide pour différents types de transformateurs

Vieillessement d'huile de transformateurs

Les principaux types de vieillissement de l'huile de transformateur sont le vieillissement Thermique, le vieillissement électrochimique et le vieillissement électrique.

Le vieillissement thermique : correspond à l'échauffement cyclique répété ou continu de longue durée, à des températures relativement élevées.

Le vieillissement électrochimique : est caractérisé surtout par les conséquences, sous l'effet du champ électrique, de l'action de longue durée de certains agents chimiques accidentellement introduits dans l'huile ou provenant de la propre dégradation de cette dernière.

Le vieillissement électrique : est surtout caractérisé par l'action de longue durée des décharges partielles ou tout phénomène d'ionisation dû au champ électrique [25].

1.12. Isolation solide :

Le système d'isolation des transformateurs est composé principalement du papier et d'une huile isolante, qui sont des matériaux isolants disponibles à des prix relativement bas, possédant des caractéristiques diélectriques excellentes. Ils sont constitués de fibre de cellulose (chaînes de glucose extraites de la pulpe de bois ou de fibres de coton) et 1 % de lignine, 5 % d'hémicellulose et des traces de cations métalliques. L'isolation solide utilisée dans les transformateurs est divisée en deux grandes familles, les papiers cellulosiques, tels que : le papier Kraft, le papier Kraft thermiquement amélioré (TUK), le papier Manille ou le coton ; et les papiers synthétiques (aramides) à base de polymères synthétiques destinés à remplacer les papiers cellulosiques[26]

I.12.1. Principaux types d'isolation solide

Il existe trois types d'isolation solide : isolation solide conventionnelle, isolation solide haute température et isolation solide hybride [27]. Ils sont cités ci-après :

Isolation solide conventionnelle :

Elle est constituée du papier et du carton qui sont constitués des fibres de cellulose. Les celluloses sont formées de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène, leur nombre par chaîne s'appelle le degré de polymérisation (DP). La présence de ces liaisons confère aux chaînes de cellulose une forme linéaire. Les cartons présents dans les transformateurs de puissance ont plusieurs fonctions, ils sont employés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement. La constante diélectrique du papier et du carton est deux fois plus élevée que celle de l'huile, ils seront donc utilisés dans les zones où règne un fort champ électrique pour renforcer l'isolation dans l'huile :

Isolation solide haute température :

Des mesures de température récentes au moyen de fibres optiques ont indiquées que la température au points chauds peut parfois être considérablement supérieure à celle prédite par les études de surveillance. Ceci a engendré des préoccupations en ce qui concerne le taux élevé de vieillissement. Dans ce cas, le papier aramide considéré comme un matériau de haute. Les polyamides aromatiques sont une classe de matériau résistant à la chaleur et présentant de bonnes propriétés mécaniques. On distingue deux types de polyamides : les para-amides et les méta-amides, seuls les méta-amides sont utilisés aux applications de l'isolation électrique. Le méta-aramide le plus utilisé est le Nomex de Dupont de Nemours, développé en 1961, c'est une marque de fibres synthétiques haute performance, il assure une grande isolation électrique même en haute température. Le Nomex ne se dégrade pas même à des températures au-dessus de 370 °C. Il est utilisé dans les conditions extrêmes. Les principales propriétés de ce matériau sont : la résistance à la chaleur et au feu, la haute résistance à l'ultraviolet (UV), la haute résistance chimique, la faible conductivité électrique et la faible contraction thermique ;

Isolation solide hybride :

Associe les caractéristiques diélectriques des papiers **cellulosiques** et aramides.

I.12.2. Propriété du papier isolant

Propriété diélectriques :

A. Permittivité relative (ϵ_r) : la permittivité relative ou la constante diélectrique d'un isolant est le rapport de la capacité C_x d'un condensateur dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement et exclusivement rempli de l'isolant en question, à la capacité C_0 de la même disposition d'électrodes dans le vide [28] :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$$

B. Le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) : la norme CEI 60247 montre en détails la mesure du facteur de dissipation diélectrique. Il existe un modèle de représentation de l'isolant sous forme d'un circuit équivalent composé d'une résistance R_p et d'une capacité C_p montées en parallèle. Le courant circulé dans le circuit n'est pas en quadrature avec la tension appliquée. L'écart se mesure à l'aide de l'angle de perte δ , caractérisé par le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$). Après une simple démonstration, on obtient:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

C. La rigidité diélectrique (E) : son unité en système international est (V/m). C'est la valeur maximale du champ électrique que le milieu isolant peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique. La rigidité diélectrique d'un milieu isolant est donnée dans l'équation (I.4), où (d) représente l'épaisseur de l'isolant placée entre les électrodes qui permettent d'appliquer la tension de claquage (U_c) :

$$E = \frac{U_c}{d}$$

Propriétés mécaniques et physiques

Les Propriétés mécaniques des cartons de transformateurs sont déterminées par le choix de la matière première, les traitements pendant la fabrication, et la préparation des plaques.

Propriétés chimiques

A. Dissolution de la cellulose : La cellulose possède un caractère polaire de par la présence de ses nombreux groupements hydroxyle. Elle n'a d'affinité qu'avec les liquides polaires mais la dissolution ne peut avoir lieu que si les zones cristallines de la cellulose sont pénétrées.

B. Degré de polymérisation : Le degré de polymérisation (DP) indique le nombre moyen d'unités d'anhydroglucose constituant la molécule. Le degré de polymérisation de la cellulose varie suivant l'origine des fibres et les procédés d'isolation. Il est de l'ordre de 3000 dans les pâtes cellulosiques de linters de coton, et d'environ 1500 pour les pâtes de bois obtenues avec le minimum de dégradation (pâte kraft).

C. Réactivité de la cellulose : Les groupements réactifs de la cellulose sont les trois groupements alcool des unités anhydroglucoses. Les fonctions -OH sont plus accessibles dans les zones amorphes. Les zones cristallines sont difficilement accessibles :

Elles réagissent peu ou pas du tout en milieu aqueux non alcalin

I.12.3. Vieillessement des isolants solides

Les propriétés diélectriques et mécaniques sont les principales propriétés que le papier doit préserver pendant la durée de vie des transformateurs de puissance. Cependant, le papier imprégné d'un fluide isolant vieillit et perd graduellement certaines de ses propriétés. Les propriétés diélectriques du papier restent presque intactes au cours du vieillissement de la cellulose et ne favorisent pas la défaillance du transformateur, la durée de vie des transformateurs est souvent associée à la dégradation des propriétés mécaniques du papier.

A. La pyrolyse ou la thermolyse : c'est la dégradation thermique de la cellulose, elle provoque la coupure des liaisons glucosidiques et l'ouverture des anneaux de glucose. Les produits majoritaires formés sont des molécules de sucre libres, du CO, du CO₂, du H₂O et de l'hydrogène. La pyrolyse n'affecte sensiblement les qualités mécaniques du papier qu'au-dessus de 150 °C.

B. L'oxydation : elle consiste en l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène. Elle provoque une dépolymérisation. Les produits formés sont des carbonyles, des aldéhydes et des acides, mais aussi des gaz tels que CO, CO₂, H₂ et de l'h₂O.

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

I.13. Isolation mixte Huile – Papier

Un système d'isolation utilisé dans les dispositifs électrotechniques contient un ou plusieurs matériaux solides pour isoler les parties conductrices et un matériau liquide pour à la fois l'isolation et le transfert de chaleur et le refroidissement. Ces matériaux isolants doivent résister aux contraintes électriques, mécaniques, chimiques et thermiques pour la durée de vie prévue du dispositif [28] .

L'isolation des parties actives des transformateurs de puissance est réalisée à l'aide de papier, de carton et d'huile (minérale ou synthétique). Le papier sert à l'isolation des enroulements et le carton sert d'isolation entre les enroulements, et entre ces derniers et le noyau. L'huile assure avec le papier un complexe isolant très efficace. Ce qui constitue une clé maîtresse dans l'isolation électrique dans un transformateur de puissance. Les caractéristiques électriques des complexes sont obtenues grâce à l'huile. La tenue mécanique du groupe est assurée par le papier.

I.13.1. Différentes configurations du système d'isolation des transformateurs

Nous présentons cinq configurations du système d'isolation des transformateurs de puissance. Chaque configuration comporte une partie solide et une partie liquide; la partie solide est soit conventionnelle et/ou à haute température et la partie liquide est soit conventionnelle ou à haute température.

Isolation conventionnelle

La partie solide est exclusivement de type conventionnel et la partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

Isolation haute température homogène

Les parties solide et liquide sont de type haute température. Mais l'isolation solide conventionnelle peut être utilisée à certains endroits où la température moyenne est maintenue en dessous de la température moyenne maximale conventionnelle du point le plus chaud des enroulements.

Isolation hybride

Pour l'isolation solide : le papier pour l'isolation des enroulements et les barrières en carton, en contact direct avec ceux-ci, sont à haute température et le reste est conventionnel. La partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

Isolation semi-hybride

Pour l'isolation solide : une partie ou tous les enroulements sont isolés par du papier à haute température et le reste est conventionnel. La partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

Isolation mixte ou mélangée

Pour l'isolation solide : le papier pour l'isolation et la protection des enroulements contre la surchauffe localisée, dans des zones spécifiques et les barrières en carton, en contact direct avec ceux-ci, sont à haute température et le reste est conventionnel. La partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

I.13.2. Vieillessement du complexe huile/papier

Les phénomènes de vieillissement thermique restent essentiellement les mêmes pour chaque composante du complexe. Cependant, il a été constaté que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement du papier soit par leur action propre, soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile.

Par exemple, la vitesse de dégradation du papier peut être dix (10) fois plus rapide dans l'huile que dans un diélectrique chloré qui ne s'oxyde pas.

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné quelques généralités sur les transformateurs de puissance. Ainsi que nous avons vu les différents éléments qui constituent cette machine. Par le comportement isolant des huiles et papier utilisées dans les transformateurs est une mesure de leur capacité à résister aux chocs électriques. Il doit avoir un comportement diélectrique élevé pour protéger le transformateur contre les défauts électriques doit être testé régulièrement pour s'assurer qu'il répond aux normes de performance requises, puis les résultats des tests sont comparés aux normes de l'industrie. Les facteurs incluent la teneur en eau, la température, l'humidité et la présence de contaminants. Les transformateurs de puissance sont des appareils complexes, qui doivent tenir de nombreuses et fortes contraintes, de natures diverses, durant leur cycle de vie. Bien que leur fiabilité soit plutôt bonne, les transformateurs restent des éléments critiques de tout réseau électrique. Il est donc très important d'être capable d'en assurer la maintenance, et le dépannage au mieux, afin d'optimiser l'exploitation du matériel lui-même, et surtout de garantir la transmission, importante, d'énergie électrique qui transite par lui.

CHAPITRE II : Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance.

II.1. Introduction:

De manière générale, le terme "surveillance" désigne la mesure de paramètres essentiels par déclenchement d'alertes à seuil dans le but de s'assurer rapidement qu'il n'y a pas d'anomalies. D'autre part, le terme "diagnostic" signifie l'ajout d'analyses sophistiquées, telles que des systèmes experts ou des systèmes intelligents qui peuvent fournir une évaluation de l'état des équipements et recommander des actions. Différents outils sont disponibles pour nos besoins, que nous pouvons regrouper en deux grandes catégories : Les méthodes traditionnelles largement utilisées depuis de nombreuses années pour déterminer les propriétés des matériaux isolants. Il existe des normes qui peuvent être utilisées pour évaluer ces caractéristiques. Ces méthodes sont essentielles pour évaluer l'état d'un système d'isolation à l'état neuf et après quelques années d'utilisation.

Ces méthodes reposent sur Un examen visuel;

- L'analyse des caractéristiques électriques;
- L'analyse des caractéristiques physiques et/ou mécaniques;
- L'analyse des caractéristiques chimiques

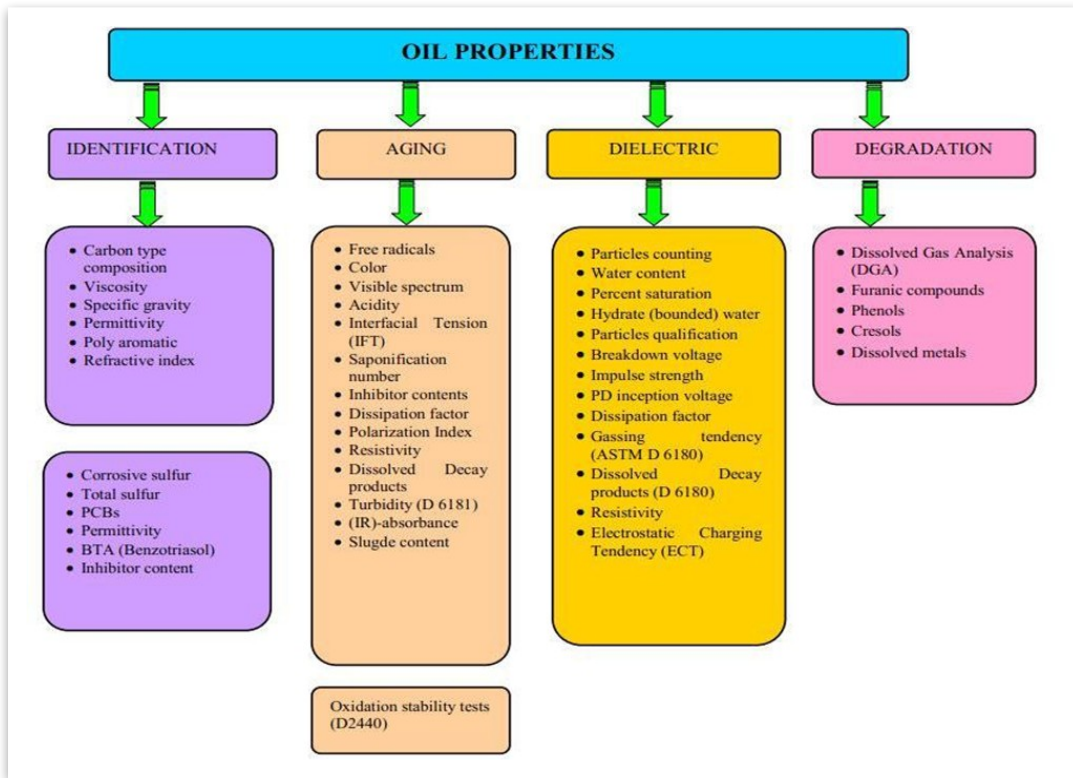
Et les techniques modernes qui commencent à être utilisés et sont encore au stade de la recherche

II.2. Généralité sur diagnostic:

Dans le transformateur, son état est diagnostiqué en examinant l'isolation huile-papier.

L'huile du transformateur contient environ 70 % des informations sur l'état du transformateur C'est en connaissant les variations des divers paramètres de l'huile et du papier que l'on est en mesure de savoir si le transformateur comporte une défaillance.

La Figure (II.1) présente de façon presque exhaustive l'ensemble des tests pour l'évaluation des propriétés de l'huile, la Figure (II.2) l'ensemble des tests pour l'évaluation des propriétés du papier [29].



Fig

ure (II.1): Évaluation de la qualité de l'huile

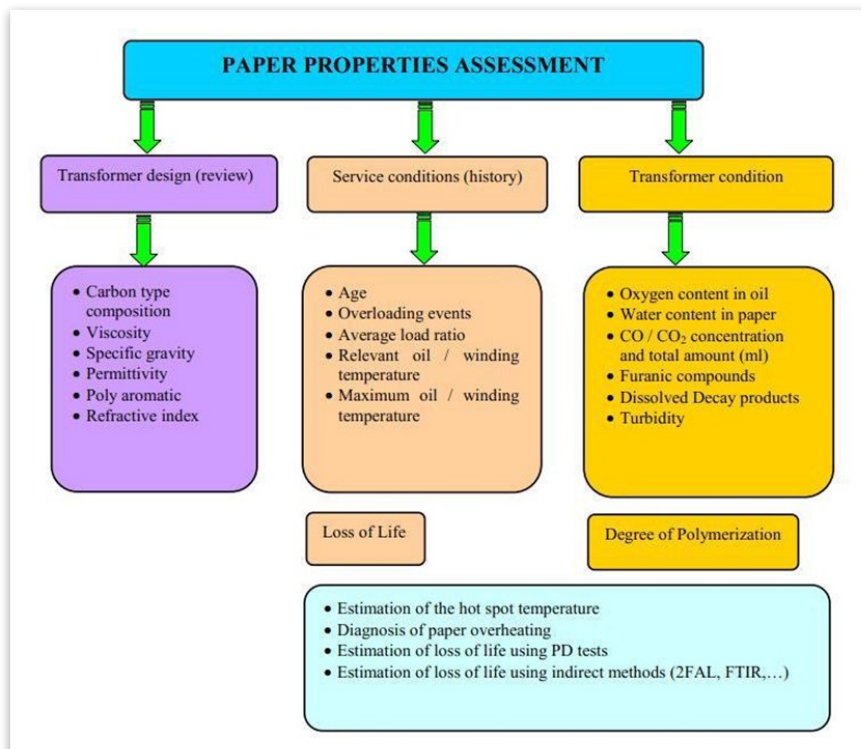


Figure (II.2): Évaluation des propriétés du papier

II.3. Les modes de défaillance :

II.3.1. Le mode de défaillance diélectrique:

Si les caractéristiques des isolants se dégradent trop, due à une humidité interne excessive par exemple, ou ses contraintes sont au-delà de leurs limites, alors il peut se développer plusieurs, tels :

Un amorçage des pièces sous tension :

- entre elles, comme entre enroulements ou entre spires Figure (II.3)
- avec la masse, comme l'amorçage d'une traversée ou d'un enroulement à la cuve ou au circuit magnétique.

2) Des décharges partielles : Ce sont des micros décharges locaux au sein d'un isolant, solide, qui tend à se propager dans le temps [30].

Dans le cas des transformateurs immergés ces effets temporels se traduisent par une modification des propriétés physico-chimiques de l'huile, d'eau, et la présence de la cellulose en suspension (dites composés furanés), issu des papiers imprégnés [31].



Figure (II.3): Amorçage franche entre spires

II.3.2. Le mode de défaillance thermique:

Ce mode de défaillance est dû à une élévation anormale de la température d'un élément du transformateur. Ces perturbations thermiques ont pour origines : un manque de réfrigération, ou une augmentation de l'effet Joule [31].

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

Des papiers isolants, et la dégradation de leurs propriétés diélectriques par voie de conséquence. Ceux-ci sont d'autant plus critiques qu'ils ne sont pas, sauf Reconstruction, remplaçables au long de la vie d'un transformateur. Par exemple dans le cas extrême de la Figure (II.4) toute la bobine est noircie de l'intérieur à cause d'un fonctionnement à des températures excessives.

De l'huile isolante. La température, l'humidité et l'oxygène accélèrent le vieillissement de l'huile, qui perd donc ses qualités d'origine, ce qui peut mener à un défaut [30].



Figure (II.3): Échauffement excessive d'un enroulement

II.3.3. Le mode de défaillance mécanique:

Ce mode de défaillance concerne les enroulements et le circuit magnétique, et se manifeste sous deux formes : électrodynamique et mécanique.

D'origine électrodynamique, elle résulte des efforts mécaniques importants appliqués sur le bobinage lors d'un court-circuit. La présence d'un champ magnétique et de courants [31].

Efforts électrodynamiques dus aux forces de Laplace dans les bobinages entraînant des contraintes mécaniques élevées. Ces efforts peuvent être particulièrement significatifs lors des efforts de court-circuit, jusqu'à quelques centaines de tonnes. Le livre (ABB Short-circuit Duty of Power Transformers, 2007) est particulièrement complet sur le sujet. Un exemple franc de déformation mécanique d'enroulement est visible sur la Figure (II.4). Pour s'en affranchir en partie, les enroulements en usine sont serrés jusqu'à plusieurs centaines de tonnes, pour les empêcher d'avoir un degré de liberté malgré les efforts développés. Échauffements élevés des enroulements, dégradant les isolants solides en particulier. Chute de tension au secondaire, perturbant la stabilité du réseau[30].



Figure (II.4): Effort électrodynamique franche

En cas Les principaux défauts liés aux contraintes mécaniques sont :

Des points chauds sur des régulateurs de prises si ceux-ci sont mécaniquement mal alignés. La diminution de distances diélectriques, dues au déplacement interne massif d'un circuit magnétique de plusieurs centimètres, suite à un choc mécanique comme lors de la chute d'un transformateur Figure (II.5) Des dégradations d'isolants internes dues à des vibrations anormales, elles-mêmes dues à un manque de serrage interne à la construction, ou suite à des chocs importants. Les fuites de joints mécaniquement trop serrés et/ou chauffés Figure (II.6) lors de leur installation puis leur exploitation [30].



Figure (II.5): Problème de transport

Figure (II.6): Joint de traversée écrasé

II.3.4. Le mode de défaillance chimiques :

Ce mode de défaillance est lié aux réactions chimiques agressant les éléments du transformateur. Elles sont activées par des sources de contamination extérieures, et ont pour effet principal de réduire la qualité des diélectriques :

Par la présence de particules d'eau dans les isolants solides tels que la cellulose (3% de la masse du transformateur). Elle va s'extraire par diffusion moléculaire à travers la matière, ou bien par hydrolyse (dépolymérisation).

Et une accélération du vieillissement de la cellulose (la présence de furanes issue de la décomposition de la cellulose) [31].

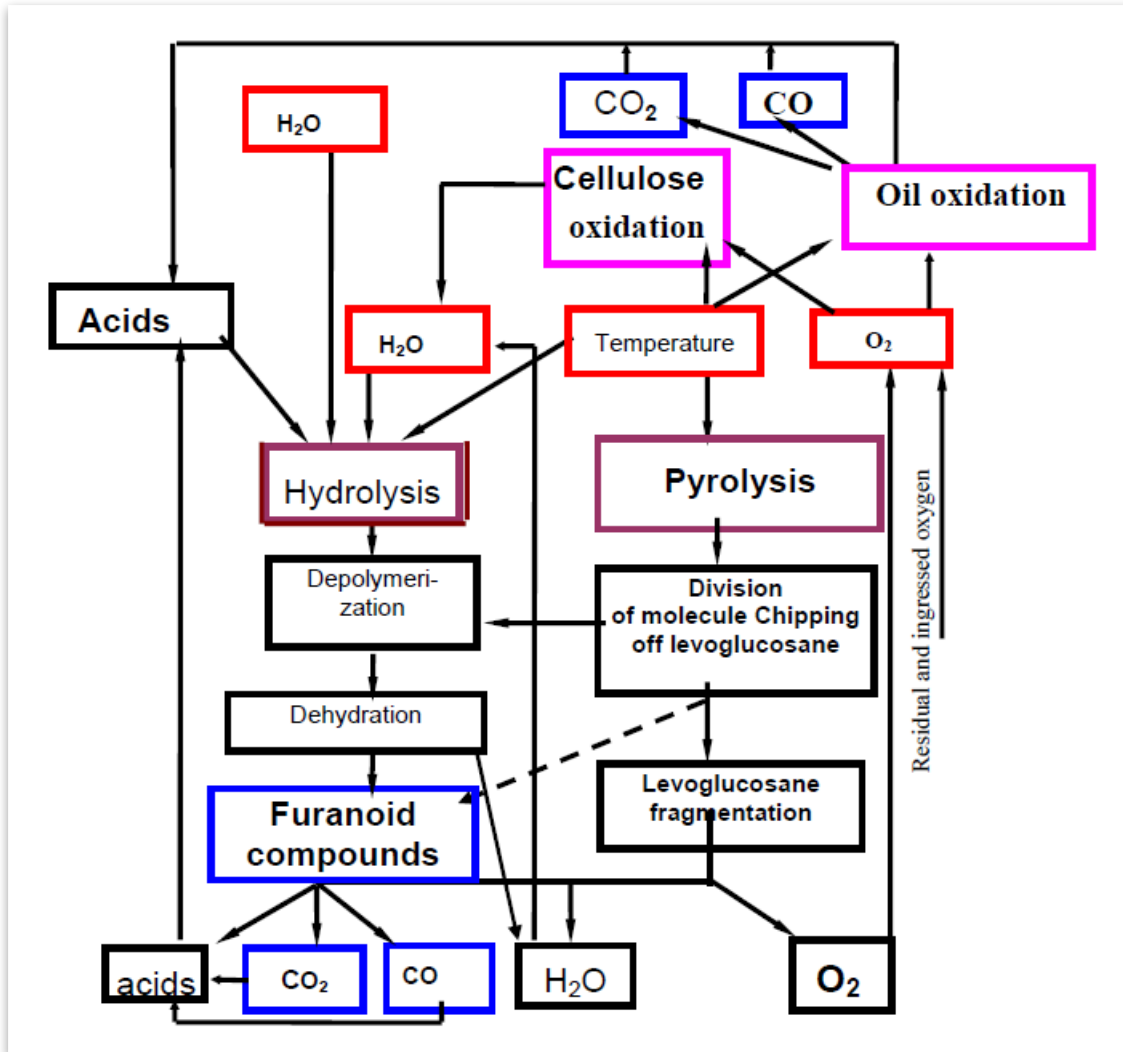


Figure (II.7): Dégradation de la cellulose des isolant

II.4. Méthodes de surveillance et de diagnostic des huiles

isolantes :

II.4.1. Méthodes de diagnostic non traditionnelles:

Il y a eu, ces dernières années, plusieurs développements nouveaux dans les techniques d'essais et de surveillance qui trouvent une utilisation croissante dans le diagnostic des transformateurs.

➤ **Essai en service des décharges partielles (Dp)**

Les deux méthodes les plus utilisées pour la détection de Dp sont : La détection des signaux acoustiques et la mesure des signaux électriques produits par les Dp.

Les impulsions des Dp produisent des ondes de contraintes mécaniques qui se propagent à travers l'huile environnante (dans la gamme de 100 à 300 kHz).

Pour détecter ces ondes, des détecteurs d'émission acoustique sont montés sur les parois du réservoir du transformateur ou dans l'huile à l'intérieur du même réservoir [32].

➤ **Mesure de la tension de rétablissement**

La méthode de mesure de la tension de rétablissement (en anglais Recovery Voltage Measurement - RVM) est employée pour détecter l'état de l'isolation huile-papier et la teneur en eau de l'isolation.

Cette méthode se fonde sur le principe de la polarisation inter-faciale des matériaux diélectriques. C'est l'accumulation des charges d'espace générées par les impuretés et l'humidité aux interfaces de l'isolation huile-papier.

➤ **Logiciels et systèmes intelligents et experts pour le diagnostic**

Les logiciels pour diagnostic, qui donnent des indications plus précises des problèmes des huiles de transformateur que l'analyse conventionnelle, font l'objet d'études de beaucoup de chercheurs et utilisateurs. L'avance actuelle des techniques d'intelligence artificielle (IA) a permis à des ingénieurs et à des chercheurs de développer des logiciels puissants et souples d'IA pour diagnostiquer des défauts de transformateurs. Cela offre la possibilité de réduire la main d'œuvre et les frais pour évaluer l'état du transformateur ; cependant, ce but n'a pas été encore totalement réalisé.

II.4.2. Méthodes de diagnostic traditionnelles

➤ Analyse d'huile:

C'est en connaissant les variations des divers paramètres de l'huile et du papier que l'on est en mesure de savoir si le transformateur comporte une défaillance HT est devenue une tâche importante. Cette analyse, en apparence si simple, requiert beaucoup de savoir-faire et un grand nombre d'opérations. S'il est constaté que l'huile est suffisamment dégradée pour mettre en danger le transformateur, des traitements doivent être effectués. Selon les besoins, l'huile est alors dégazée, filtrée et déshydratée [32].

➤ Analyses physico-chimiques:

Les analyses physico-chimiques ont pour but de déterminer la tenue diélectrique de l'huile et son état d'oxydation à travers les paramètres suivants :

➤ Couleur et apparence:

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, eau) et d'évaluer la couleur et la viscosité. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide huile nouvelle, jusqu'à un jaune rougeâtre ou rouge foncé pour une huile vieillie [33].

➤ Tension de claquage ou (rigidité diélectrique):

Il s'agit d'une procédure de test destinée à indiquer la présence de contaminants tels que l'eau et les matières solides en suspension. Ce test s'applique soit aux nouveaux liquides isolants, soit à la surveillance et à l'entretien de liquides déjà utilisés.

La norme **IEC 60156:2018** décrit la procédure de test pour tous les liquides d'isolation ayant une viscosité de 350 mm² à 40 °C, lorsque l'échantillon subit une série de préparations standardisées, puis des tests de rupture dans des cellules d'essai spéciales à une distance de 2,5 mm entre les électrodes, comme indiqué dans la figure (II.8).

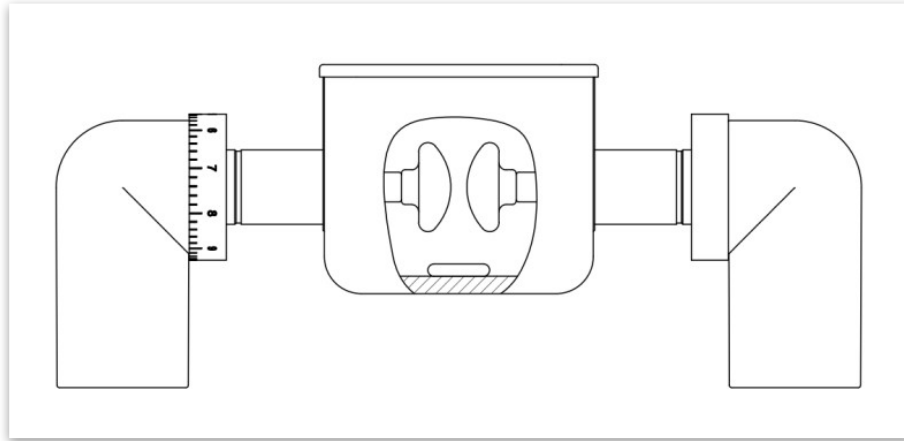


Figure (II.8): test cells with partially spherical electrodes

La tension de rupture est la tension maximale atteinte au moment où le circuit est ouvert, soit automatiquement (arc établi), soit manuellement (décharge visible ou audible détectée) [34].

➤ **Facteur de dissipation diélectrique et permittivité relative:**

Selon la norme **IEC 60247:2004**, la permittivité relative d'un matériau isolant est le rapport de la capacité C_x d'un condensateur dans lequel l'espace entre et autour des électrodes est entièrement et exclusivement rempli du matériau isolant en question, à la capacité C_0 de la même configuration d'électrodes dans le vide.

Le facteur de dissipation diélectrique, DDF ($\tan \delta$), d'un matériau isolant est la tangente de l'angle par lequel la différence de phase entre la tension appliquée et le courant résultant s'écarte de $\pi/2$ rad lorsque le diélectrique du condensateur est exclusivement constitué du matériau isolant.

Pour les liquides en service dans les équipements électriques, les tests sont plus simples pour des raisons de commodité. Dans une cellule d'essai, les tests de facteur de dissipation doivent être effectués avec une tension de contrainte dans la plage de 0,03 kV/mm à 1 kV/mm, et de 50 V/mm à 250 V/mm pour les mesures de résistivité [35].

➤ **La viscosité:**

La viscosité cinématique est déterminée en mesurant le temps d'écoulement d'un volume fixe de liquide à travers un viscosimètre calibré dans des conditions contrôlées. Elle est calculée en multipliant le temps d'écoulement par la constante de calibration du viscosimètre. Pour obtenir un résultat précis, deux déterminations sont effectuées et la moyenne des deux valeurs acceptables est considérée comme la viscosité cinématique finale [36]

➤ **L'acidité et indice de neutralisation:**

Les mesures d'acidité dans l'huile de transformateur permettent d'évaluer sa corrosivité et sa dégradation. Des titrations utilisant des indicateurs tels que l'Alkali Blue 6B et des concentrations connues de titrant comme l'hydroxyde de potassium alcoolique permettent de déterminer les niveaux d'acidité, généralement exprimés en mg de KOH/g d'huile [37]

➤ **Tension inter faciale :**

La tension interfaciale entre l'huile et l'eau, mesurée par la méthode de l'anneau, est obtenue en détachant un anneau en fil de platine de la phase liquide ayant la plus grande tension superficielle à l'interface eau-huile. La force mesurée est corrigée à l'aide de facteurs empiriques basés sur la force appliquée, les densités et les dimensions de l'anneau. Des conditions non-équilibrées standardisées garantissent que les mesures sont effectuées dans un délai d'une minute après la formation de l'interface, fournissant ainsi des informations précieuses sur les propriétés de surface du système liquide **fig(II.9)** [38].

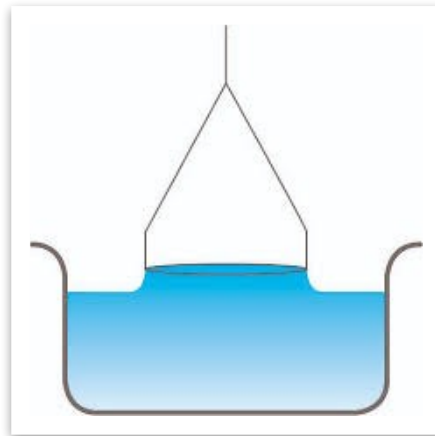


Figure (II.9) : La tension interfaciale entre l'huile et l'eau méthode de l'anneau

➤ **Teneur en eau :**

La détermination de l'eau par titrage coulométrique automatique de Karl Fischer est une méthode utilisée pour quantifier la teneur en eau dans un échantillon. Elle implique un processus automatisé dans lequel une titration coulométrique est réalisée en utilisant un réactif de Karl Fischer. La réaction de titration entre l'eau et le réactif génère un courant qui est directement proportionnel à la teneur en eau. Cette méthode offre des résultats précis et précis, ce qui en fait une technique largement utilisée dans diverses industries pour l'analyse de l'humidité et le contrôle de la qualité [39].

➤ **Analyse des gaz dissous (AGD) :** [40]

Type	Gaz	Symbole	Origine
Gaz combustibles	Acétylène	C ₂ H ₂	Il apparait par défaut électriques (décharges) de haute énergie.
	Ethylène	C ₂ H ₄	Ce gaz se génère par la décomposition thermique de l'huile ou de l'isolement solide.
	Ethane	C ₂ H ₆	Proviennent de la décomposition thermique de l'huile.
	Hydrogène	H ₂	Il se génère par défauts électriques (décharges) de baisse ou de haute énergie.
	Méthane	CH ₄	Généralement il apparait quand il existe des décharges partielles ou de décomposition thermique de l'huile.
	Monoxyde de Carbone	CO	Proviennent de la décomposition de la cellulose des matériaux qui composent le transformateur
Gaz non combustibles	Anhydride carbonique	CO ₂	Pour vérifier la prise d'échantillon.
	Azote	N ₂	
	Oxygène	O ₂	

Tableau II. 1: Les gaz pour le diagnostic

II.5. Analyse de l'état du papier cellulosique :

II.5.1. Mesure direct sur le papier :

Les méthodes typiques de mesures directes sur papier sont énumérées dans le tableau 1.5. Ces mesures sont beaucoup plus compliquées que dans l'analyse d'huile, car elles nécessitent l'ouverture du transformateur pour prendre un spécimen du papier.

Le test de degré de polymérisation de la cellulose est l'un des moyens les plus sûrs pour déterminer la détérioration du papier et pour estimer la durée de vie restante, il est même plus significatif que l'analyse des gaz dissous.

Technique	Mode de défaillance
Titration par test de Karl Fisher	Teneur en eau
Degré de polymérisation	Dégradation du papier

Tableau II. 2: Mesure directe sur papier cellulosique

II.5.2. Analyse furanique:

Les dérivées furaniques sont des produits de décomposition organiques du papier cellulosique qui se trouvent sous forme dissous dans l'huile du transformateur en service. L'intérêt de cette analyse réside dans le fait que les différents mécanismes de dégradation du papier conduisent à la rupture des chaînes et à la formation de sucres qui se transforment en dérivés furaniques et évaluer la dégradation de l'isolation solide[41].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons différentes méthodes et montages expérimentaux pour la mesure, le diagnostic et la surveillance Isolateurs de transformateur. Nous avons détaillé la méthode utilisée Comme on peut le voir dans ce chapitre, l'analyse d'huile est un outil indispensable pour vérifier l'état des transformateurs en service. La meilleure façon de prolonger sa durée de vie

Un appareil doit connaître son état à tout moment. Pour cela, il est nécessaire de collecter des informations sur la charge, le courant de défaut et la qualité du papier huilé.

Par conséquent, l'enregistrement continu de ces mesures fournit une image plus complète de l'état de l'isolation du transformateur, combinée à ces paramètres Nous pouvons aider à prévoir les urgences.

Le but principal du diagnostic et de la surveillance de cet équipement est de détecter les signes avant-coureurs d'un défaut naissant, la progression du vieillissement ou d'autres problèmes de fonctionnement.

CHAPITRE III :
Approche Neuro-
Floue ANFIS

III.1. Introduction :

Ce chapitre se divise en trois parties distinctes. Tout d'abord, nous aborderons la description des réseaux de neurones artificiels, notamment leur architecture, telle que le Présentation MultiCouches (PMC) et les Réseaux à Fonctions de base Radiales (RFR), leur principe de fonctionnement ainsi que les différents algorithmes d'apprentissage. La seconde partie du chapitre portera sur la présentation générale de la logique floue et des règles linguistiques. Enfin, la troisième partie de ce chapitre traitera de la combinaison et de l'hybridation neuro-floue, plus particulièrement l'approche ANFIS sera discutée en détail afin de profiter des avantages des réseaux de neurones et de la logique floue simultanément.

III.2. Réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones peuvent fournir une solution intéressante pour des problématiques de surveillance d'équipements industriels. En effet leur utilisation ne nécessite pas l'existence d'une modélisation formelle de cet équipement. Par ailleurs, leurs capacités de mémorisation, d'apprentissage et d'adaptation représentent des fonctions très utiles à tout système de surveillance autonome [42].

Les réseaux de neurones artificiels sont basés sur l'hypothèse que le comportement des neurones biologiques peut être modélisé. Les neurones artificiels sont des processeurs élémentaires qui reçoivent des entrées pondérées et produisent une sortie unique qui est ensuite transmise à d'autres neurones. La structure d'un neurone artificiel est montrée dans la figure (III.1).

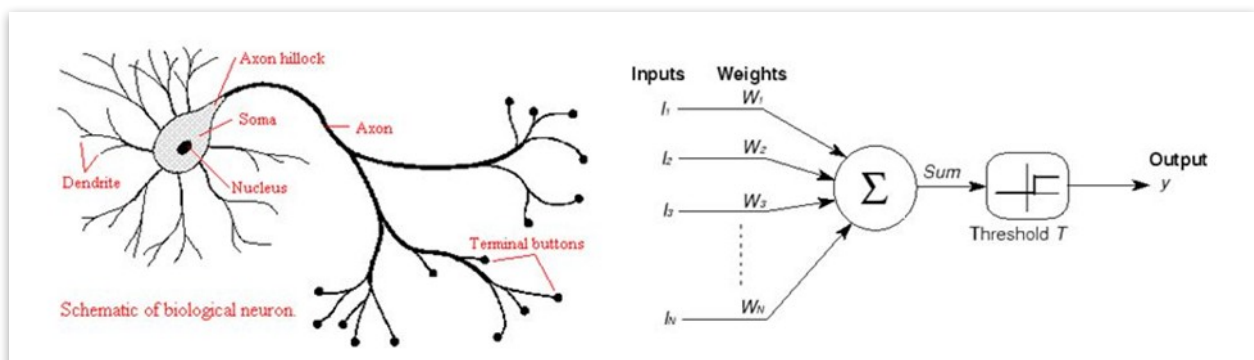


Fig.III.1 : Comparaison entre neurone biologique et neurone artificiel

III.2.1. Architecture des réseaux de neurones :

L'architecture des réseaux de neurones se compose de plusieurs couches de neurones interconnectées. Chaque couche peut être divisée en entrées, neurones cachés et sorties. Les entrées sont les données d'entrée du réseau, les neurones cachés traitent

ces données et les sorties fournissent les résultats finaux. Les connexions entre les neurones ont des poids qui sont ajustés pendant l'apprentissage pour améliorer les performances du réseau (figure III.2) [43].

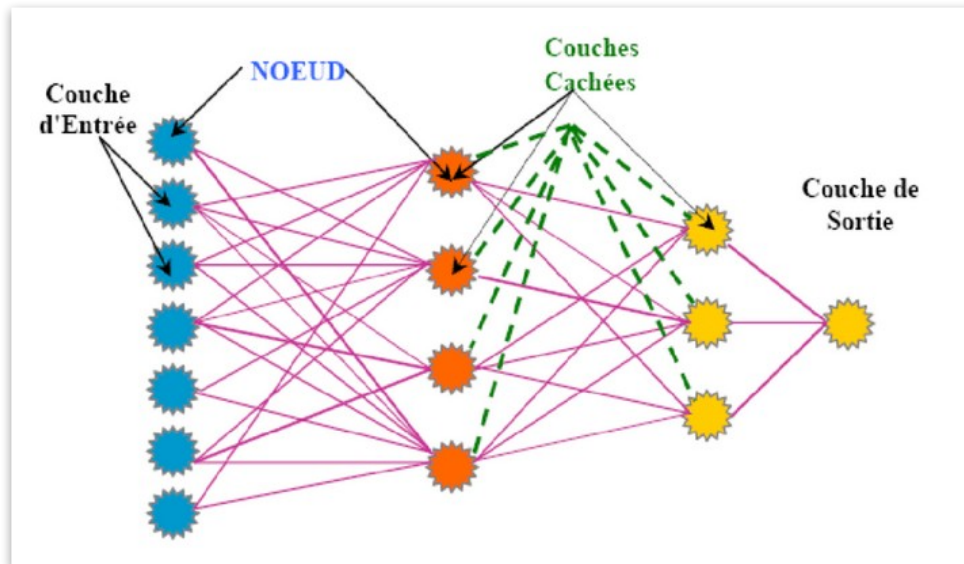


Figure (III.2) : Architecture d'un réseau de neurones

III.2.2. Apprentissage des réseaux de neurones :

L'apprentissage est une phase complexe du fonctionnement du cerveau humain au cours de laquelle les connexions entre les neurones sont modifiées pour adopter un comportement souhaité. De même, les réseaux de neurones artificiels passent également par une phase d'apprentissage pour déterminer ou modifier les paramètres du réseau en vue d'adopter un comportement désiré. Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage classés en deux catégories : supervisé et non supervisé. Dans l'apprentissage supervisé, le réseau de neurones est entraîné à minimiser l'erreur entre la sortie cible et la sortie réelle. Dans l'apprentissage non supervisé, le réseau de neurones détermine les paramètres selon un critère à définir.

Les deux types de réseaux de neurones les plus utilisés sont les PMC (Perceptron Multi-Couches) et les RBF (Réseaux à Fonctions de Base Radiales).

Le principal inconvénient des réseaux de neurones est leur incapacité à expliquer les résultats qu'ils fournissent. Cette limitation est due au fonctionnement intrinsèque des réseaux de neurones, qui utilisent des algorithmes d'apprentissage basés sur des données d'entrée pour ajuster les paramètres du réseau [44].

III.3. Logique floue :

Introduire en 1965 par le professeur Lotfi.A.Zedeh, le concept de la logique floue vient de la constatation que la variable booléenne, qui ne peut prendre que deux valeurs, 'vrai' ou 'faux', est mal adaptée à la représentation de la plupart des phénomènes courants. Alors que la logique classique considère qu'une proposition est soit vraie soit fausse, la logique floue distingue une infinité de valeurs de vérité entre 0 et 1. Elle permet de représenter l'imprécis, le vague et l'incertain. Ses valeurs de vérité qui ne sont plus uniquement (0 ou 1), sont représentées par des variables floues, dont chacun représente un certain degré de vérité.

La logique floue est une approche se basant essentiellement sur l'expertise de l'opérateur humains à savoir donc l'obtention de toutes les informations nécessaires sur les caractéristiques que doit avoir la commande et de la connaissance empirique de l'opérateur du système et des lois qui le régissent [45].

III.3.1. Variable floue ou linguistique :

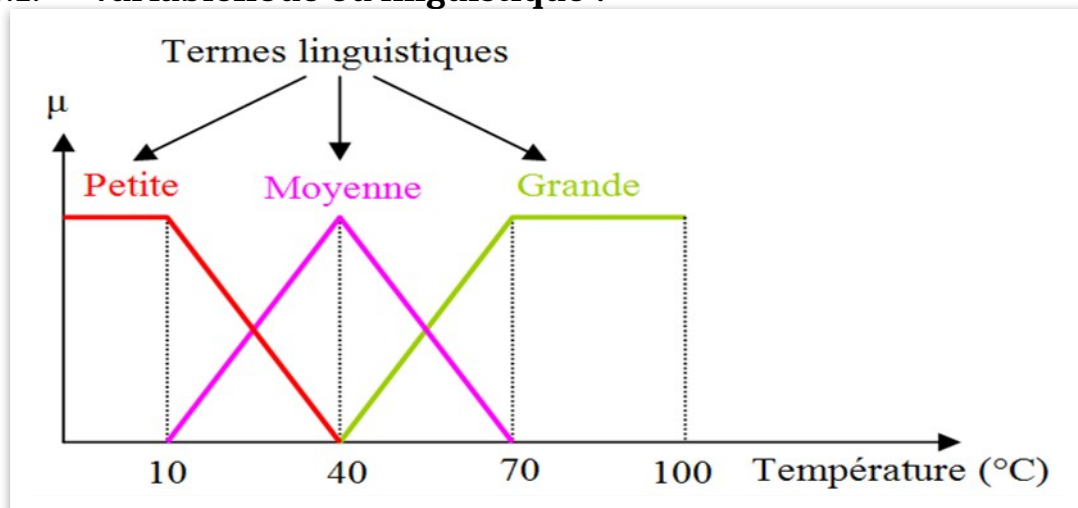


Figure (III.3) : Partition floue de l'univers de discours de la variable linguistique « Température ».

La logique floue permet de tenir compte de la nature imprécise, grâce à des termes flous ou linguistiques comme par exemple les termes (petit, moyen, grand). Chaque terme représente un sous-ensemble de valeurs numériques et caractérise ainsi la variable floue. Le domaine sur lequel ces termes et ces variables sont définis constitue

l'univers de discours, dans l'exemple présenté dans la figure III.3, Température (petite, moyenne, grande) est une variable linguistique.

III.3.2. Sous-ensemble flou :

Les sous-ensembles flous sont une classe d'objets ou la transition entre l'appartenance et la non appartenance à l'ensemble n'est pas abrupte mais graduelle [46].

Un sous-ensemble flou A est défini par :

- ✓ Un intervalle convexe A de R, auquel est associé un label linguistique.
- ✓ Une fonction réelle $\mu_A(x)$ à valeur dans l'intervalle [0,1], qui donne le degré d'appartenance d'une variable x au sous-ensemble flou A. $\mu_A(x)$ est la fonction d'appartenance qui modélise les situations où un même élément peut être classé dans des catégories avec des degrés divers.

III.3.3. Fonction d'appartenance :

On définit une fonction d'appartenance à un ensemble flou A comme une application qui accorde à tout élément x de l'univers U ($A \subseteq U$) un degré d'appartenance entre 0 et 1 pour lequel x appartient à cet ensemble. Cette application généralise le concept d'appartenance classique et est notée par : $\mu_A(x)$.

Les formes les plus connues et les plus utilisées de ces fonctions sont : triangulaires, trapézoïdales et gaussiennes [09]. (Figure III.4)

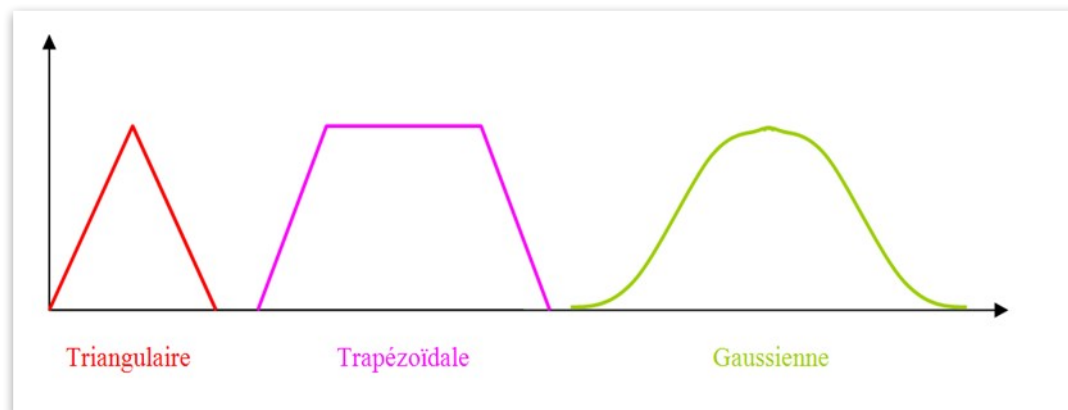


Fig.III.4 : Formes de quelques fonctions d'appartenance.

III.3.4. Base de règles floues :

Une base de règles est un ensemble de règles conditionnelles floues de type « Si <condition> Alors <conclusion> », composées de deux parties : prémisse et conclusion. Elles peuvent être classées en trois types selon leur partie conclusion [46] :

- Type 1 : (conclusion est constante)
Ri : Si X1 est A1 ET X2 est A2 ...ET Xn est An Alors Y est Wi
- Type 1 : (conclusion est une fonction linéaire de premier ordre)
Ri : Si X1 est A1 ET X2 est A2 ...ET Xn est An Alors Y est g (X1..., Xn)
- Type 1 : (conclusion est un ensemble flou)
Ri : Si X1 est A1 ET X2 est A2 ...ET Xn est An Alors Y est B k

Où : Xn et Yn sont respectivement les variables d'entrée et de sortie, An et B k sont des sous-ensembles flous et Wi une constante.

III.3.5. Systèmes d'inférence flous :

La configuration de base d'un système d'inférence flou comprend cinq blocs fonctionnels, comme illustré dans la Figure III.5.

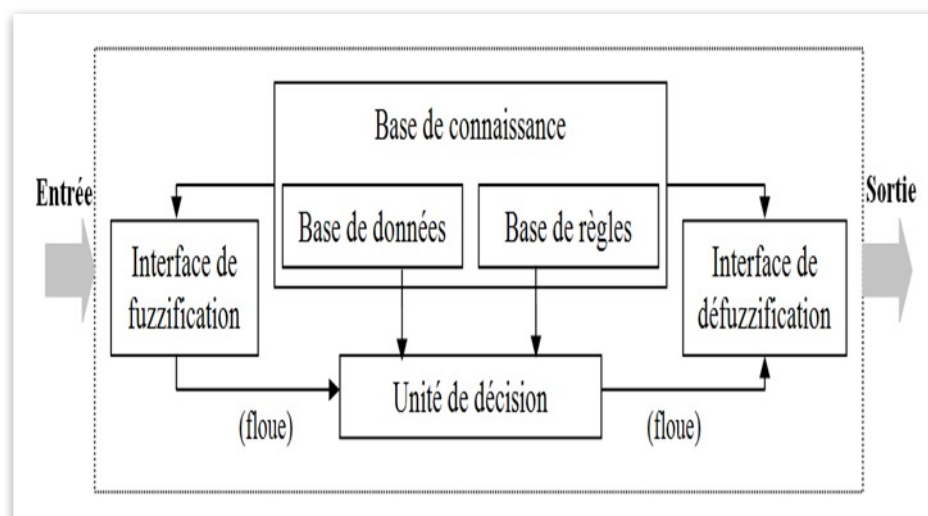


Fig.III.5 : Système d'inférence flou.

La logique floue présente également des inconvénients, tels que l'absence d'outils systématiques pour l'extraction des règles linguistiques, ce qui peut rendre la construction de la base de règles difficile pour les systèmes complexes [47].

III.4. Réseaux neuro-flous :

Les réseaux de neurones et la logique floue ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Cependant, ces deux approches peuvent être combinées pour créer des réseaux neuro-flous, dans lesquels la structure neuronale est utilisée pour implémenter le système flou. L'objectif initial de la fusion de ces deux approches était de réduire leurs inconvénients respectifs en combinant les caractéristiques sémantiques du flou avec les capacités d'apprentissage des systèmes neuronaux.

III.4.1. Choix de l'architecture d'un réseau neuro-flou :

Le choix de l'architecture d'un réseau neuro-flou dépend à la fois de la description des données et de l'application à traiter. En effet, différentes applications nécessitent différentes architectures, et il est essentiel de choisir une architecture qui convient le mieux aux données d'entrée et aux objectifs de l'application. Par conséquent, il est important de prendre en compte la complexité des données, le nombre de variables d'entrée, le nombre de règles nécessaires, la taille de la base de données et les performances requises pour sélectionner l'architecture la plus appropriée [48].

III.4.2. Structure neuro-flou :

Le réseau de neurones ordinaire est constitué de neurones de type Mc-culloch et Pitt qui calculent une somme pondérée des entrées et s'activent selon une fonction d'activation donnée (sigmoïde, tangentielle, ...). Par contre dans les réseaux neuro-flous de nouveaux types de neurones sont proposés. La structure élémentaire de tout neurone flou est représentée par la figure III.6.

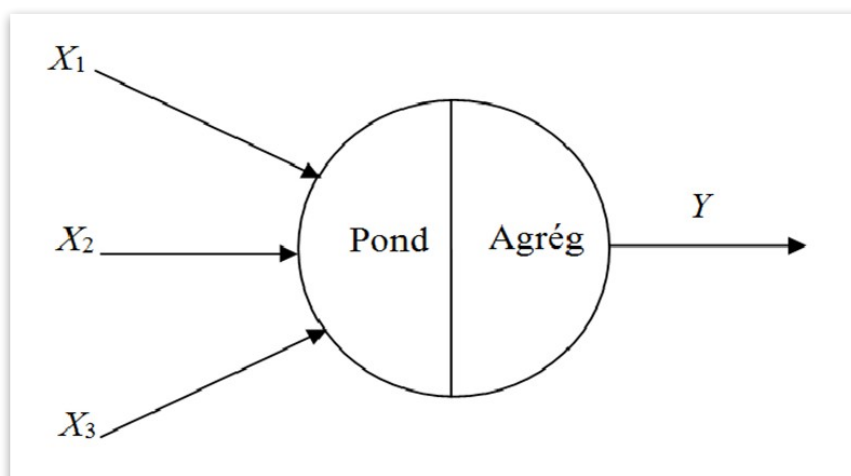


Fig.III.6 : Modèle général d'un neurone flou.

Les X_i sont les ensembles flous des termes linguistiques. Le neurone flou effectue une opération de pondération sur ses entrées, puis agrège les résultats obtenus en utilisant une fonction d'implication. Cette fonction prend en compte les différentes valeurs d'appartenance des entrées floues et leur associe un poids qui correspond à leur degré d'appartenance. Le résultat agrégé est ensuite transformé en une valeur crisp en utilisant une fonction de défuzzification, qui peut être une moyenne pondérée ou une méthode de maximum de vraisemblance, par exemple [48].

III.4.3. Différents modèles des réseaux neuro-flous :

Il existe plusieurs types de réseaux neuro-flous en raison de leurs modes d'apprentissage, de leurs structures et de leurs applications respectives :

- ✓ Réseau neuro-flou de Horicawa.
- ✓ Réseau neuro-flou de Glorennec.
- ✓ ANFIS : Adaptive Network Fuzzy Inference System.
- ✓ NNDFR : Neural Network Driven Fuzzy Reasoning.
- ✓ NEFCLASS : Neuro Fuzzy CLASSification.
- ✓ NEFPROX : Neuro Fuzzy Function PROXimation.
- ✓ FRN : Fuzzy Rule Net.
- ✓ ARIC : Approximation Reasoning-Based Intelligent Control.
- ✓ NEFCON : Neuro Fuzzy Controller.

Parmi ces modèles, le réseau ANFIS ou Système d'inférence flou basé sur les réseaux de neurones adaptatifs, est le plus utilisé pour la détection des défauts [48].

III.4.4. Système d'Inférence Neuro-Flou Adaptatif (ANFIS):

ANFIS est un système d'inférence flou implémenté suivant l'architecture d'un réseau multicouche de neurones adaptatifs servant comme base pour construire l'ensemble des règles « Takagi – Sugeno » (SI ALORS..), avec des fonctions d'apprentissage appropriées en partant d'un ensemble de paires de données (entrées/sorties)[49].

Le réseau neuro-flou adaptatif (ANFIS) est un réseau à cinq couches comportant des nœuds et des liens connectant ces nœuds. Chaque nœud modélise une fonction paramétrée. Cependant, une partie ou tous les nœuds (neurones) sont adaptatifs, signifie que leurs sorties dépendent des paramètres appartenant à ces nœuds, et la règle

d'apprentissage spécifie comment ces paramètres doivent changer pour minimiser une erreur mesurée prédéterminée. Le changement des valeurs de ses paramètres entraîne le changement de la fonction, de même que le comportement total du réseau.

L'ensemble des paramètres d'un réseau adaptatif est distribué sur l'ensemble des neurones le constituant. Cependant, chaque neurone possède un ensemble de paramètres locaux, si cet ensemble est vide alors le neurone associé est représenté par un cercle et sa fonction est fixe (neurone fixe), sinon il est représenté par un carré et la fonction associée dépend des valeurs de ces paramètres (neurones adaptatifs).

III.4.5. Architecture de l'ANFIS :

Considérons un système d'inférence flou comportant deux entrées x, y et une sortie z, et supposons que la base des règles contient deux règles de type Takagi-Sugeno [49] :

- Règle 1 : si x est A₁ et y est B alors f₁ = p₁x + q₁y + r₁.
- Règle 2 : si x est A₂ et y est B alors f₂ = p₂x + q₂y + r₂.

L'architecture anfis est schématisée par la figure (III.7).

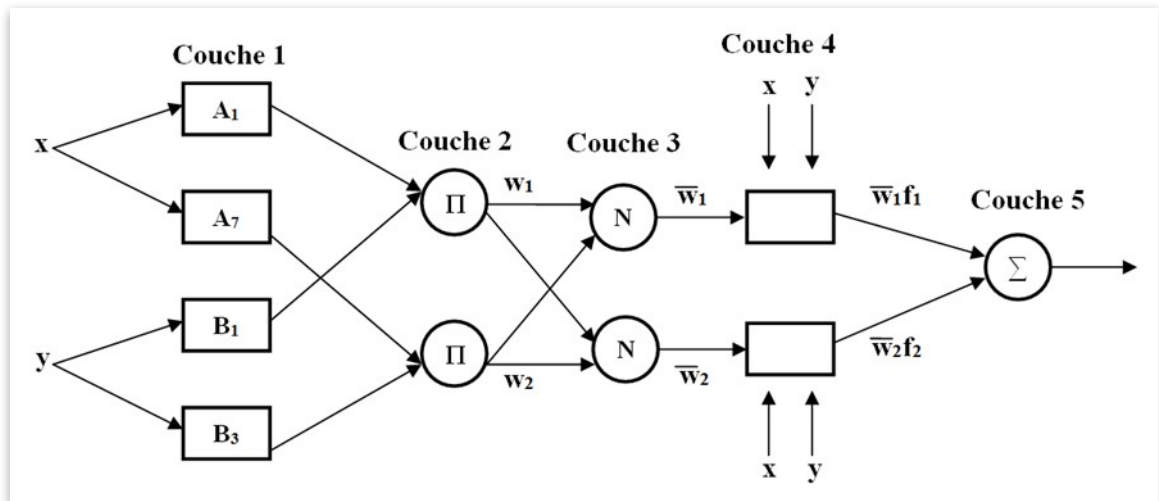


Fig.III.7 : Architecture du réseau ANFIS.

- **Couche 1** : chaque neurone i dans cette couche est un nœud carré avec une fonction de nœud :

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \tag{III.1}$$

Où : x est l'entrée du nœud i, et A_i est le nom linguistique associé à la fonction du nœud. En d'autres termes, est le degré d'appartenance de A_i.

Généralement, on choisit pour $\mu_{A_i}(x)$ la fonction Gaussienne représentée par la formule :

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (\text{III.2})$$

Où : c représente le centre de la forme de la fonction, et σ sa largeur.

- **Couche 2** : chaque nœud dans cette couche est un nœud en cercle dénoté par Π qui multiplie les signaux de son entrée :

$$\omega_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2. \quad (\text{III.3})$$

- **Couche 3** : chaque nœud dans cette couche est un nœud en cercle et dénoté par N . le $i^{\text{ème}}$ nœud calcule le rapport des poids des règles :

$$\bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2} \quad (\text{III.4})$$

Cette couche effectue la normalisation.

- **Couche 4** : chaque nœud dans cette couche est un nœud en carré qui effectue la fonction :

$$(\text{III.5})$$

Avec $\bar{\omega}_i$ est la sortie de la couche 3, et p_i, q_i et r_i l'ensemble des paramètres. Les paramètres dans cette couche sont dénommés paramètres de la conséquence.

- **Couche 5** : le seul nœud dans cette couche est dénoté par Σ qui calcule la sommation de toutes ces entrées :

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (\text{II.6})$$

$$O_i^5 = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i}$$

III.4.6. Algorithme d'apprentissage :

La partie principale de la règle d'apprentissage pour un réseau neuro-flou adaptatif est l'obtention du vecteur de gradient dans lequel chaque élément est défini comme étant la dérivée de l'erreur par rapport aux paramètres. Cela est fait par la rétro propagation (le gradient est calculé dans la direction opposée de la propagation de la sortie de chaque neurone).

La méthode du gradient appliquée à un réseau adaptatif est généralement lente et peut tomber dans des minimums locaux. J.S.R. Yang proposa une règle d'apprentissage hybride qui combine la méthode du gradient et la méthode d'estimation par moindres carrés (Least Squares Estimate) pour identifier les paramètres du réseau.

A partir de l'architecture proposée, il est observé que les paramètres de la prémisse des règles peuvent être exprimés comme une combinaison linéaire des paramètres de la conséquence.

Précisément, la sortie f peut être réécrite comme suit :

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2} f_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} f_2 \\ &= \overline{\omega_1} f_1 + \overline{\omega_2} f_2 \\ &= (\overline{\omega_1 x}) p_1 + (\overline{\omega_1 y}) q_1 + (\overline{\omega_1}) r_1 + (\overline{\omega_2 x}) p_2 + (\overline{\omega_2 y}) q_2 + (\overline{\omega_2}) r_2 \end{aligned}$$

f est linéaire et en fonction des paramètres de la conséquence.

Dans la passe directe de l'algorithme hybride, les signaux fonctionnels se propagent jusqu'à la couche 4 et les paramètres de la conséquence sont identifiés par la méthode LES. Dans la passe inverse, l'erreur se propage dans l'autre sens et les paramètres de la prémisse sont identifiés par la descente du gradient [50].

Le tableau suivant résume les activités de l'algorithme d'apprentissage.

	Passe directe	Passe inverse (rétro)
Paramètres de la prémisse	Fixes	Descente du gradient
Paramètres de la conséquence	Moindres carrés	Fixes
Signaux	Sortie des nœuds	Changement de l'erreur

Tab.III.2 : Les activités de l'algorithme d'apprentissage

III.4.7. Avantages de l'anfis

L'ANFIS présente plusieurs avantages, notamment par rapport aux autres techniques traditionnelles. Les principaux avantages sont les suivants:

Précision et filtrage du bruit : il peut capturer des relations complexes et éliminer le bruit ou les informations non pertinentes tout au long du processus d'apprentissage qui génère ses propres règles floues dans le processus.

Les réseaux ANFIS présentent une représentation structurée des connaissances : Les règles floues générées par l'ANFIS peuvent être facilement comprises et interprétées par des experts humains, ce qui facilite l'amélioration du système.

Les réseaux ANFIS permettent une meilleure intégration avec d'autres méthodes de conception de contrôle : L'ANFIS peut servir de composant au sein d'une architecture de contrôle plus large, en travaillant en conjonction avec d'autres techniques de contrôle telles que les méthodes de contrôle classiques ou le contrôle basé sur un modèle.

III.4.8. Les inconvénients de l'anfis

L'ANFIS présente certaines limitations qui restreignent son application à certains problèmes, en voici quelques exemples, sans toutefois s'y limiter :

- En raison de la complexité élevée de l'ANFIS et du grand nombre de paramètres nécessitant un réglage, le traitement de grands ensembles de données sera difficile et coûteux en termes de calcul [51].

- Le nombre d'entrées au même effet, il est considéré que 5 entrées est le maximum que l'ANFIS peut gérer. Si davantage d'entrées sont utilisées, cela entraînera la malédiction de la dimensionnalité, ce qui signifie que le nombre de règles floues augmente de manière exponentielle avec le nombre de variables d'entrée, ce qui entraînera des temps de traitement plus lents. De plus, seule une seule sortie est autorisée à un moment donné.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie des réseaux de neurones, la logique floue et les réseaux neuro-flous, qui combinent les propriétés de ces deux approches. Les réseaux neuro-flous sont caractérisés par leurs capacités d'apprentissage et leur structure parallèle, ainsi que par les avantages sémantiques de la logique floue. Bien que les réseaux de neurones puissent fournir une relation d'entrée-sortie correcte, ils présentent l'inconvénient d'être des "boîtes noires". Un modèle hybride neuro-flou comme l'ANFIS peut tirer parti des avantages des deux techniques tout en réduisant leurs inconvénients, offrant une grande exactitude et robustesse pour le diagnostic. Dans le chapitre suivant, nous explorerons l'application de cette technique pour diagnostiquer le comportement diélectrique d'un transformateur de puissance

CHAPTER IV :

Application de l'ANFIS dans la modélisation et la prédiction du comportement diélectrique de l'huile du transformateur de puissance

IV.1. Introduction:

Le transformateur de puissance est considéré comme un investissement important et coûteux dans l'infrastructure du réseau, avec une durée de service généralement comprise entre 25 et 40 ans, voire plus. Par conséquent, la maintenance et le suivi régulier du transformateur, de ses composants et de ses conditions de fonctionnement sont essentiels pour assurer la continuité du service et éviter les effets négatifs associés à une panne soudaine du transformateur.

L'huile de transformateur ou le fluide isolant liquide joue un rôle double en isolant les parties actives et en dissipant la chaleur des bobines et du circuit magnétique vers l'extérieur. Ainsi, il fonctionne à la fois comme isolant et comme élément de refroidissement, ce qui le rend sensible à des facteurs tels que l'humidité, la charge thermique et les polluants externes, par exemple.

La détérioration de l'huile entraîne la formation de composés corrosifs qui affectent l'état des isolants solides, ce qui finit par entraîner l'apparition de circuits courts et d'arcs électriques au niveau des bobines. Pour éviter cela avant qu'il ne se produise, des méthodes de diagnostic efficaces sont utilisées pour nous donner une image précise de l'état du transformateur, parmi lesquelles nous mentionnons :

Analyse de la qualité de l'huile : Ces analyses aident à obtenir une vue d'ensemble de la qualité de l'huile et nécessitent l'examen des niveaux d'humidité, d'acidité, ainsi que l'apparence, la couleur et le degré de présence des impuretés de l'huile.

Analyses de furane : Ce sont des analyses visant à trouver les concentrations de composés de furane, qui sont l'un des produits de la dégradation thermique des isolants solides. On peut déduire l'état des isolants et la durée de vie restante du transformateur à partir des concentrations de ces composés.

Analyse des gaz dissous : Elle concerne l'analyse des gaz dissous dans l'huile du transformateur, qui résultent de types spécifiques de défaillances. Ce processus contribue à l'identification de la nature de ces défaillances et de leur gravité.

Le degré de polymérisation est un indicateur clé qui nous renseigne sur l'état du papier isolant cellulosique. Il représente la longueur des chaînes de cellulose et, dans les meilleurs cas, il se situe autour de 1300, ce qui correspond à un papier neuf. Il diminue à environ 200 lorsque le papier perd presque toutes ses propriétés isolantes.

Ce chapitre porte sur l'application de la technique d'intelligence artificielle ANFIS pour diagnostiquer le système d'isolation composé de papier Kraft imprégné d'huile isolante luminol, Cela se fait en utilisant les concentrations des traces chimiques, température et temps de vieillissement en tant qu'entrée et le degré de polymérisation en tant que sortie.

Ce chapitre sera composé de 3 parties :

PARTIE 1 :

- Modélisation de la polymérisation en utilisant 3 variables : temps, température et concentration de méthanol pour le papier Kraft.
- Modélisation de la polymérisation en utilisant 4 variables : temps, température, concentration de méthanol et d'éthanol pour le papier Kraft.
- Modélisation de la polymérisation en utilisant 3 variables : temps, température et concentration de méthanol pour le papier TUK.
-

PARTIE 2 :

- Modélisation et prévision de TIDX.

PARTIE 3 :

- Diagnostic du papier et de l'huile isolante du transformateur.

IV.2. La base de données

Les données suivantes ont été obtenues à partir de plusieurs expériences en laboratoire sur le vieillissement accéléré [51]. Dans ces expériences, des cellules de vieillissement en acier inoxydable ont été utilisées. Elles sont sous la forme de tubes à double extrémité, avec un diamètre de 47 mm et une longueur de 163 mm. Elles sont soigneusement fermées avec des bouchons lorsqu'elles sont remplies de matériaux d'essai afin d'éviter toute contamination de l'environnement de test. Le papier et le support en cuivre sont traités et préparés dans une atmosphère caractérisée par de l'air sec avec une humidité de 0,9 % à l'intérieur d'une boîte à gants isolée à une température de 20,8 °C avant d'être introduits dans les cellules de vieillissement. L'humidité du papier est réduite à 0,5 % en le soumettant à une température de 40 °C pendant 48 heures sous vide. Tous les échantillons de papier sont traités jusqu'à atteindre une teneur en humidité finale d'au moins 0,9 % pendant au moins une semaine. Le contenu final en eau est mesuré à l'aide de titrage coulométrique de Karl Fischer avant de commencer le processus de vieillissement accéléré selon la norme ASTM D3277.

L'huile de Luminol est traitée en la mélangeant continuellement à l'aide d'un mélangeur magnétique dans des conditions atmosphériques à l'intérieur de la boîte à gants pendant 24 heures, jusqu'à atteindre l'équilibre spécifié entre le papier et l'huile. Ensuite, les cellules sont placées dans la boîte à gants et y sont ajoutées entre 260 et 270 millilitres d'huile, ainsi que des morceaux de papier et le support en cuivre. Un vide est maintenu à l'intérieur de la cellule pour anticiper l'expansion thermique de l'huile. Les cellules sont placées dans un four et exposées à des températures de 150, 170 et 190 degrés, puis elles sont sorties et maintenues à une température de 20 à 24 heures à des moments différents pour prélever des échantillons d'huile et de papier. Lorsque la cellule est retirée du four, elle n'est pas remise dans le four.

L'Analyse de la concentration de méthanol Est réalisée par un échantillonneur d'espace de tête couplé à un chromatographe en phase gazeuse équipé d'un détecteur de spectrométrie de masse (ET-CG-SM). Les paramètres détaillés de la méthode ETCG-SM.

Cette méthode nécessite des aliquotes d'huile de 10 ml et offre une grande précision (> 94 %), les limites de détection sont autour de 5 ppb.

- Les résultats des essais sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau (IV.2) : Résultats de l'essai à T=150 C

Température (c)	Temps (h)	méthanol (µg)/(g/m ²)	Ethanol (µg)/(g/m ²)	Degré de polymerisation (ppm)	Indice de traction (%)
150	0	0	0	1216.58	100
	242.238	2.39217	0	681.426	74.20
	403.474	4.55907	0.136378	503.043	59.15
	740.605	5.1658	0.14	454.392	59.07
	1077.74	6.89931	0.16644	339.074	43.51
	2660.78	7.59272	0.527178	171.501	14.93
	2822.02	8.45948	0.497117	191.321	40.49
	3730.81	7.93942	0.602332	149.879	14.41
	4624.94	8.28613	0.542209	148.077	9.36

Tableau (IV.2) : Résultats de l'essai à T=170 C

Température (c)	Temps (h)	méthanol (µg)/(g/m ³)	Ethanol (µg)/(g/m ²)	Degré de polymerisation (ppm)	Indice de traction (%)
170	0	5	0	1221.98	100
	22.3702	5.59918	0.8	566.107	77.89
	37.0281	6.81264	0.82001	465.204	66.96
	66.3438	7.33269	0.857856	375.111	50.86
	124.975	10.453	0.857856	277.811	34
	212.922	10.2797	0.692517	257.99	31.7
	315.527	10.6264	0.797732	191.321	26.59
	374.159	11.4931	0.887917	198.529	18.78
	564.711	11.6665	0.767671	169.699	13.68

	784.578	12.0132	0.94804	153.482	13.11
--	---------	---------	---------	---------	-------

Tableau (IV.3) : Résultats de l'essai à T=190 C

Température (c)	Temps (h)	méthanol (μg)/(g/m ³)	Ethanol (μg)/(g/m ²)	Degré de polymerisation (ppm)	Indice de traction (%)
190	0	0	0	1221.98	100
	51.6859	9.32624	1.23362	566.107	33.21
	66.3438	9.32624	1.29375	465.204	48.27
	81.0016	9.93297	1.60939	375.111	33.62
	110.317	10.713	1.33884	277.811	22.83
	124.975	11.7532	1.91001	257.99	23.50
	154.291	12.1865	1.92504	191.321	22.68
	212.922	13.0533	2.45112	198.529	19.57
	242.238	10.8864	2.28578	169.699	18.66
	286.212	12.2732	1.24866	153.482	16.13

IV.3. PARTIE 1 : Modélisation de la polymérisation

IV.3.1. Introduction

La polymérisation est un indicateur direct de l'état du papier isolant, qui varie entre 1000 et 1200 pour du papier neuf [52], puis diminue avec le vieillissement du papier. Elle est directement influencée par la concentration d'eau et d'acidité dans l'huile, et elle est accélérée par plusieurs facteurs, tels que la concentration d'oxygène et les températures élevées. Il existe une relation linéaire approximative entre la concentration de méthanol, qui est le résultat de la rupture des liaisons de cellulose, et le degré de polymérisation.

Nous cherchons à réaliser une modélisation du degré de polymérisation DP_v dans cette partie en utilisant ANFIS, à travers trois variables d'entrée : le temps, la température et la concentration de méthanol. Ensuite, nous ajouterons une quatrième variable d'entrée, qui est la concentration d'éthanol.

IV.3.2. Préparation des entrées/sorties :

La base des données est de 29 valeurs, dont nous avons sélectionné 22 pour l'entraînement du modèle et 7 pour les tests, selon un ratio de 75/25. Nous avons veillé à choisir des valeurs diverses pour l'entraînement et les tests.

Paramètres de l'ANFIS :

Nous avons utilisé un programme ANFIS personnalisé plutôt que l'outil ANFIS disponible dans MATLAB, ce qui nous a permis de contrôler un plus grand nombre de paramètres, nous utilisons `genfis1` :

Fismat = genfis1 (data, numMFs, inmftype, outmftype)

- Le type de fonction d'appartenance : (gaussmf).
- Le nombre fonction d'appartenance : numMF = 3.
- Le type de fonction d'appartenance pour la sortie : outmftype = 'constant'.
- Nombre d'itération : trnOpt (1) = 2500.
- Le taux de diminution de la taille de pas : trnOpt (4) = 1
- Taux d'augmentation de la taille du pas : trnOpt(5) = 1

IV.3.3. Résultats de simulation

Pour 3 variable : (Température, Temps, méthanol) papier kraft :

Phase d'apprentissage :

Tableau (IV.4) : Résultats de l'apprentissage

Temps (h)	Température (c)	méthanol ($\mu\text{g}/(\text{g}/\text{m}^3)$)	DPv expérimental	DPv simulation	Erreur relative absolues (%)
0	150	0	1216.58	1216.297	0.023241
242.238		2.39217	681.426	681.7257	0.043968
740.605		5.1658	454.392	454.333	0.012976
1077.74		6.89931	339.074	339.1493	0.022213
2660.78		7.59272	171.501	171.4644	0.021341
3730.81		7.93942	149.879	149.9106	0.021054
4624.94		8.28613	148.077	148.0592	0.012035
0		170	5	1221.98	1221.935
22.3702	5.59918		566.107	565.9624	0.025543
37.0281	6.81264		465.204	450.1594	3.342054
66.3438	7.33269		375.111	391.9239	4.289827
212.922	10.2797		257.99	261.6152	1.385695
315.527	10.6264		191.321	184.7625	3.549705
564.711	11.6665		169.699	171.0534	0.791784
0	190		0	1221.98	1221.979
51.6859		9.32624	320.154	289.6326	10.53797
66.3438		9.32624	247.179	283.2926	12.7478
110.317		10.713	214.746	206.7404	3.872316
124.975		11.7532	169.699	166.9374	1.65429
212.922		13.0533	113.842	125.2446	9.104238
242.238		10.8864	155.284	156.965	1.070962
286.212		12.2732	131.86	123.9535	6.378592

Phase de test :

Tableau (IV.5) : Résultats de test

Temps (h)	Température (c)	méthanol (μg)/(g/m ³)	DPv expérimental	DPv simulation	Erreur relative absolues (%)
403.474	150	4.55907	503.043	531.634	5.683
2822.02		8.45948	191.321	240.603	25.758
124.975	170	10.453	277.811	237.373	14.555
374.159		11.4931	198.529	181.269	8.693
784.578		12.0132	153.482	125.646	18.136
81.0016	190	9.93297	220.151	241.333	9.621
154.291		12.1865	149.879	153.583	2.471

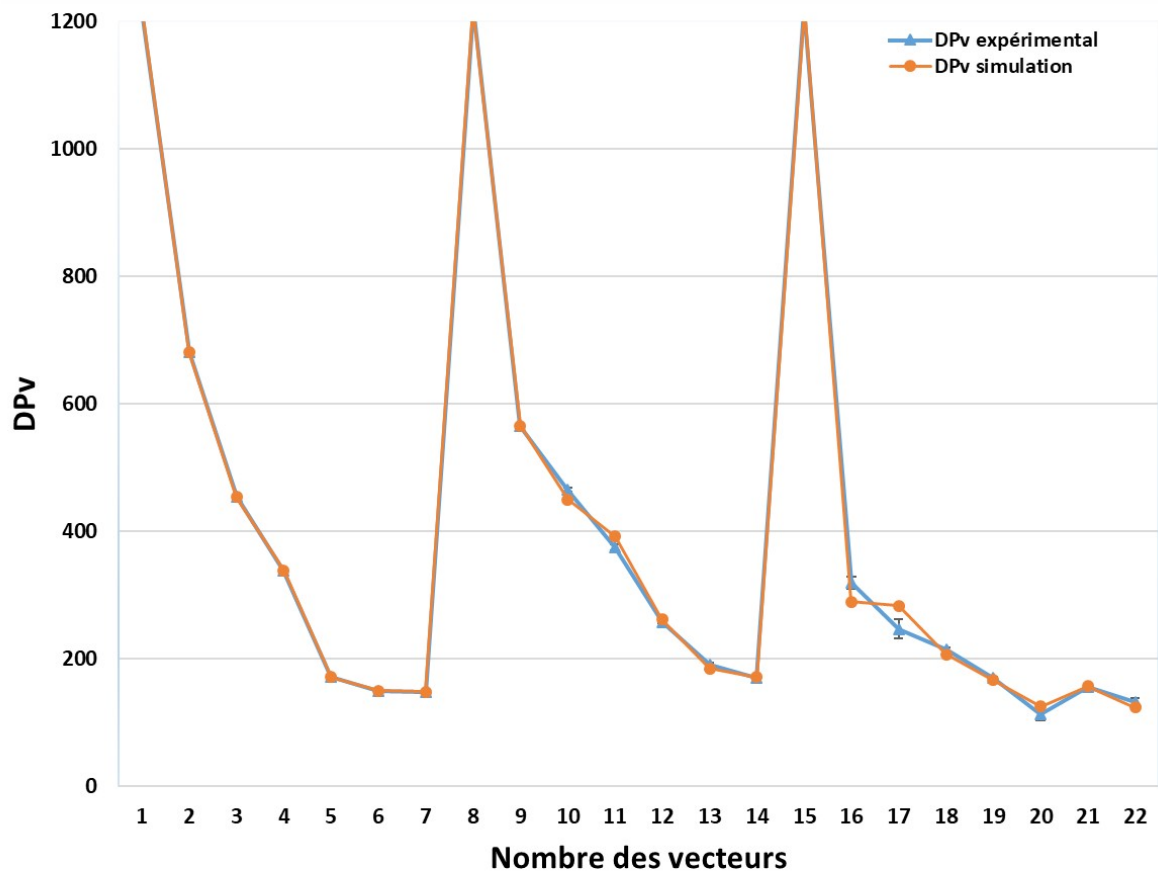


Figure (IV.1): Modélisation de DPv

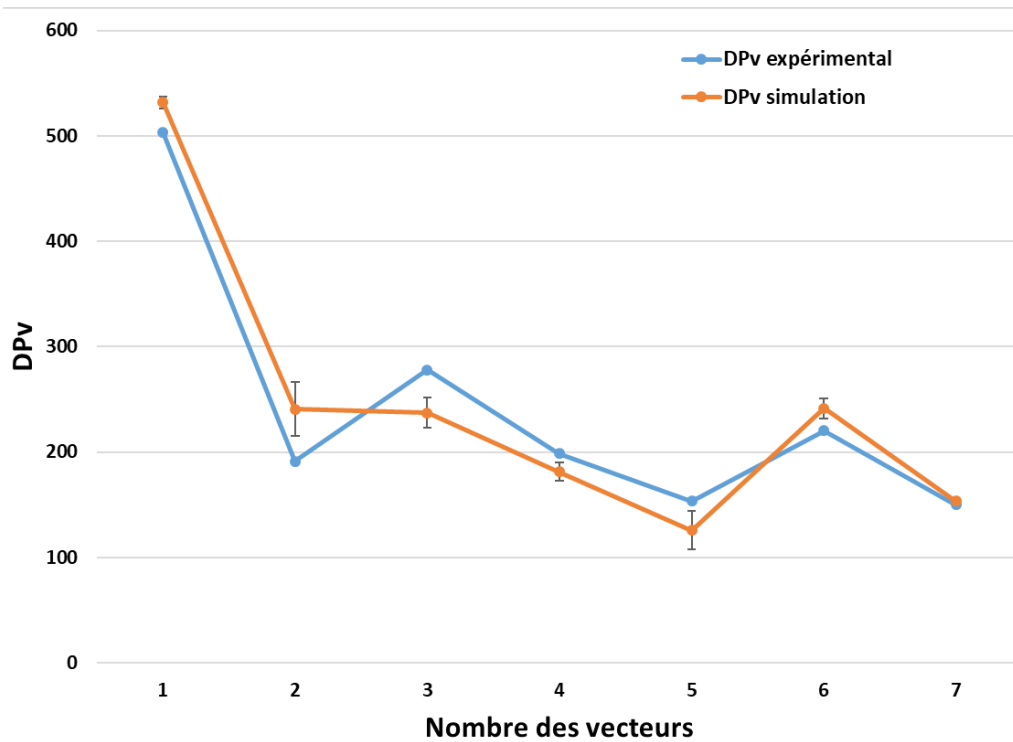


Figure (IV.2): Prédiction de DPv

Les performances de l'approche ANFIS avec 3 variable résumées dans le tableau :

Tableau (IV.6) : Les performances de l'approche ANFIS avec 3 variable

	Erreurs relatives absolues (%)			Coefficient de corrélation
	min	moy	max	
L'apprentissage	8.183E-05	2.733	14.610	0.9988
Le test	2.4718	12.1316	25.758	0.9721

Pour 4 variables : (Temps, Température, méthanol, Ethanol)

La phase d'apprentissage :

Tableau (IV.7) :: Résultats de l'apprentissage

Temps (h)	Température (c)	méthanol (μg)/(g/m ³)	Ethanol (μg)/(g/m ³)	DPv expérimental	DPv simulation	Erreur relative absolues (%)
0	150	0	0	1216.58	1216.52	0.00493
242.238		2.39217	0	681.426	681.50	0.01085
740.605		5.1658	0.14	454.392	454.78	0.08538
1077.74		6.89931	0.16644	339.074	335.66	1.00685
2660.78		7.59272	0.527178	171.501	180.45	5.21804
3730.81		7.93942	0.602332	149.879	138.53	7.57210
4624.94		8.28613	0.542209	148.077	153.13	3.41241
0		170	5	0	1221.98	1221.94
22.3702	5.59918		0.8	566.107	568.27	0.38208
37.0281	6.81264		0.82001	465.204	444.78	4.39033
66.3438	7.33269		0.857856	375.111	398.15	6.14191
212.922	10.2797		0.692517	257.99	235.89	8.56622
315.527	10.6264		0.797732	191.321	215.21	12.4863
564.711	11.6665		0.767671	169.699	163.67	3.55276
0	190		0	0	1221.98	1221.98
51.6859		9.32624	1.23362	320.154	285.69	10.7648
66.3438		9.32624	1.29375	247.179	281.84	14.0226
110.317		10.713	1.33884	214.746	206.58	3.80263
124.975		11.7532	1.91001	169.699	171.89	1.29110
212.922		13.0533	2.45112	113.842	124.11	9.01951
242.238		10.8864	2.28578	155.284	164.89	6.18608
286.212		12.2732	1.24866	131.86	117.51	10.8827

La phase de test :

Tableau (IV.8) : Résultats de test

Temps (h)	Température (c)	méthanol ($\mu\text{g}/(\text{g}/\text{m}^3)$)	Ethanol ($\mu\text{g}/(\text{g}/\text{m}^3)$)	DPv expérimental	DPv simulation	Erreur relative absolues (%)
403.474	150	4.55907	0.136378	503.043	541.396	7.624
2822.02		8.45948	0.497117	191.321	219.401	14.676
124.975	170	10.453	0.857856	277.811	240.261	13.516
374.159		11.4931	0.887917	198.529	190.69	3.948
784.578		12.0132	0.94804	153.482	125.96	17.931
81.0016	190	9.93297	1.60939	220.151	246.176	11.821
154.291		12.1865	1.92504	149.879	154.702	3.217

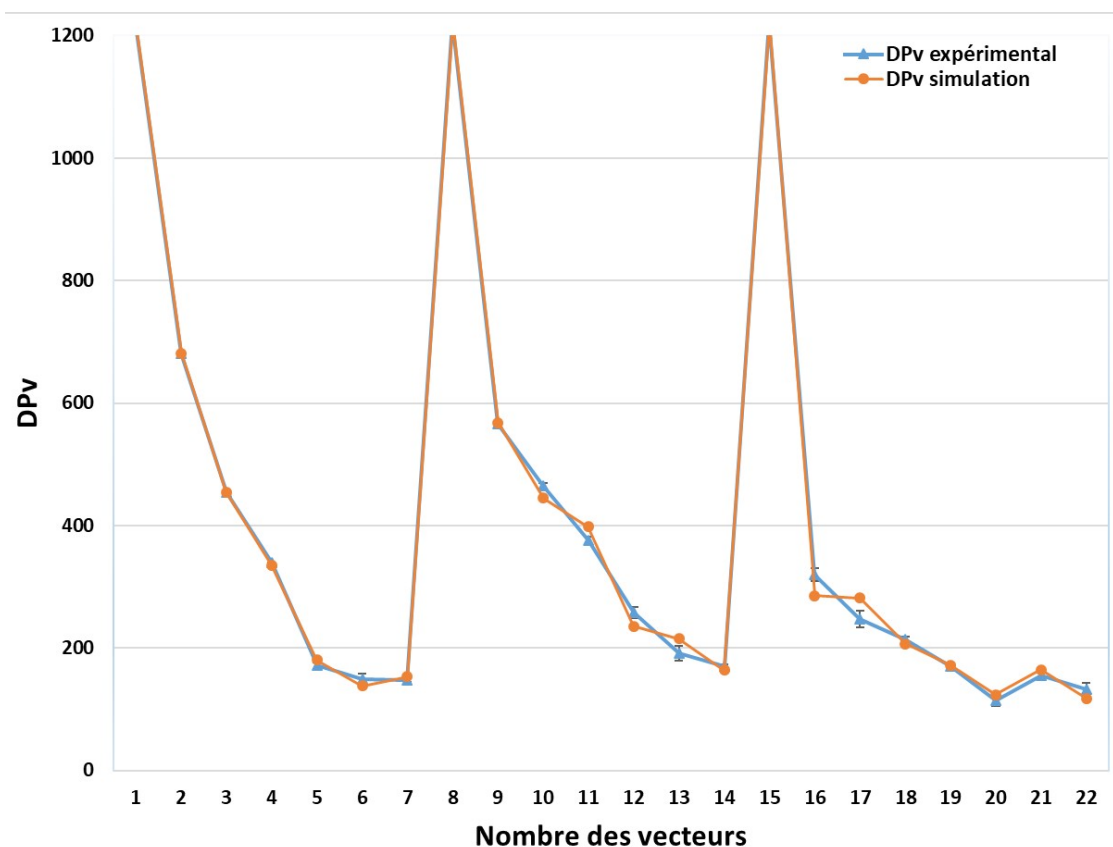


Figure (IV.3) : Modélisation de DP 4 variables

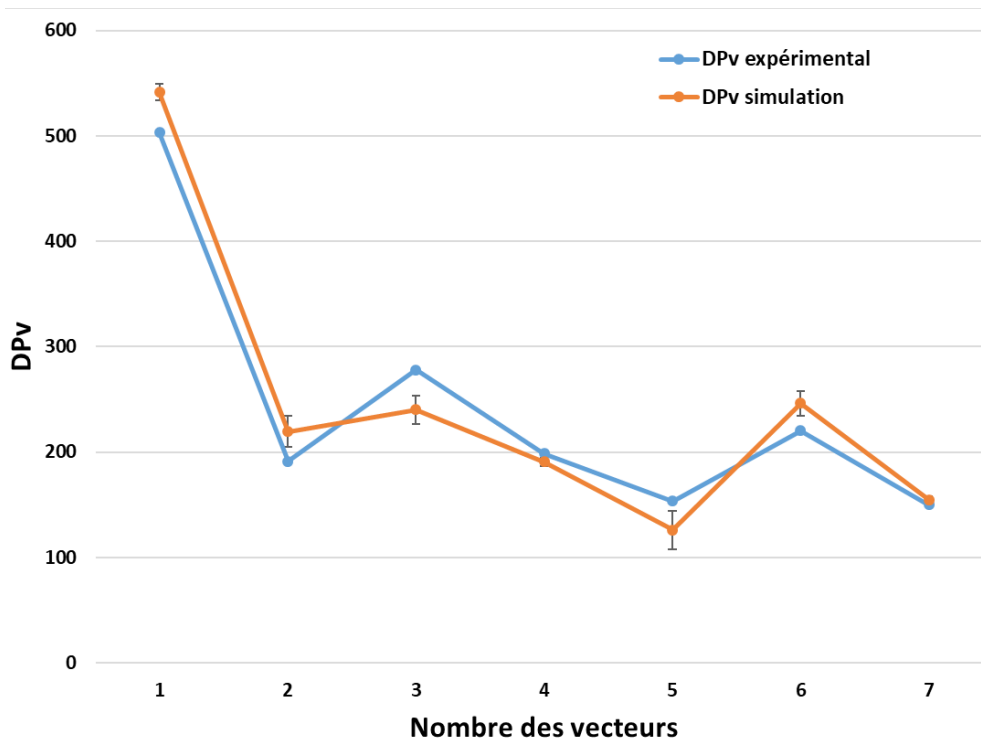


Figure (IV.4) : Prédiction de DPv 4 variables

Tableau (IV.9) : Les performances de l'approche ANFIS avec 4 variable

	<i>Erreurs relatives absolues (%)</i>			<i>Coefficient de corrélation</i>
	<i>min</i>	<i>Moy</i>	<i>max</i>	
<i>L'apprentissage</i>	0.00024	4.945	14.025	0.99906
<i>Le test</i>	3.21	10.391	17.931	0.981

Pour papier TUK (3 variable) :

L'indicateur de méthanol est considéré comme important dans le cas du papier de TUK en raison de son incapacité à libérer de composé 2-fal.

Paramètres de l'ANFIS :

Nous avons utilisé un programme ANFIS personnalisé plutôt que l'outil ANFIS disponible dans MATLAB, ce qui nous a permis de contrôler un plus grand nombre de paramètres, nous utilisons genfis1 :

Fismat = genfis1 (data, numMFs, inmftype, outmftype)

- Le type de fonction d'appartenance : (gaussmf).
- Le nombre fonction d'appartenance : numMF = 5.
- Le type de fonction d'appartenance pour la sortie : outmftype = 'constant'.
- Nombre d'itération : trnOpt (1) = 250.
- Le taux de diminution de la taille de pas : trnOpt (4) = 0.9.

- Taux d'augmentation de la taille du pas : $\text{trnOpt}(5) = 1.1$.

Résultats de simulation

Pour 3 variable : (Température, Temps, méthanol)

Phase d'apprentissage :

Tableau (IV.10) : Résultats de l'apprentissage TUK

Temps (h)	Température (c)	méthanol (μg)/(g/m³)	DPv expérimental	DPv simulation	Erreur relative absolues (%)
0	190	0	1048.4	1048.4016	0.0001526
40		7.35555	597.2	597.20376	0.0006296
64		9.96148	550.1	550.10016	2.9085E-0
88		9.26656	441.6	441.60030	6.793E-05
136		13.9572	260.4	260.39944	0.0002150
236		16.042	129.8	129.80041	0.0003158
312		16.3894	101.4	101.4	0.0493096
335		15.4339	76.7	76.700001	1.3037E-06
0	170	0	1048.4	1048.4151	0.00144029
47		5.72965	535.9	535.89994	1.1196E-05
98		9.75895	529.9	529.89850	0.00028307
102		10.0361	528.5	528.49876	0.00023462
159		12.646	460.9	460.89932	0.00014753
402		14.038	310	309.99916	0.00027096
904		15.169	157.9	157.89886	0.00072197
1288		13.951	125.7	125.69888	0.00089101
0	150	0	1048.36	1048.3614	0.00013354
232		2.46721	801.65	801.64348	0.00081332
737		7.42612	663.13	663.12967	4.9764E-05
1072		9.16609	587.76	587.76294	0.00050020
3740		10.8191	296.73	296.755081	0.008452465

La phase de test :

Tableau (IV.11) : Résultats de test TUK

Temps (h)	Température (c)	méthanol (μg)/(g/m ³)	DPv expérimental	DPv simulation	Erreur relative absolues (%)
112	190	13.2623	345.6	324.51539	6.10087089
303		14.9996	97.9	72.542462	25.9014688
51	170	8.07861	547.2	528.664126	3.38740388
568		14.908	241.6	206.91519	14.3562954
1119		13.864	126.2	119.236775	5.51761062
402	150	5.33816	700.74	613.217089	12.4900692
2805		11.776	374.09	216.236735	42.196601

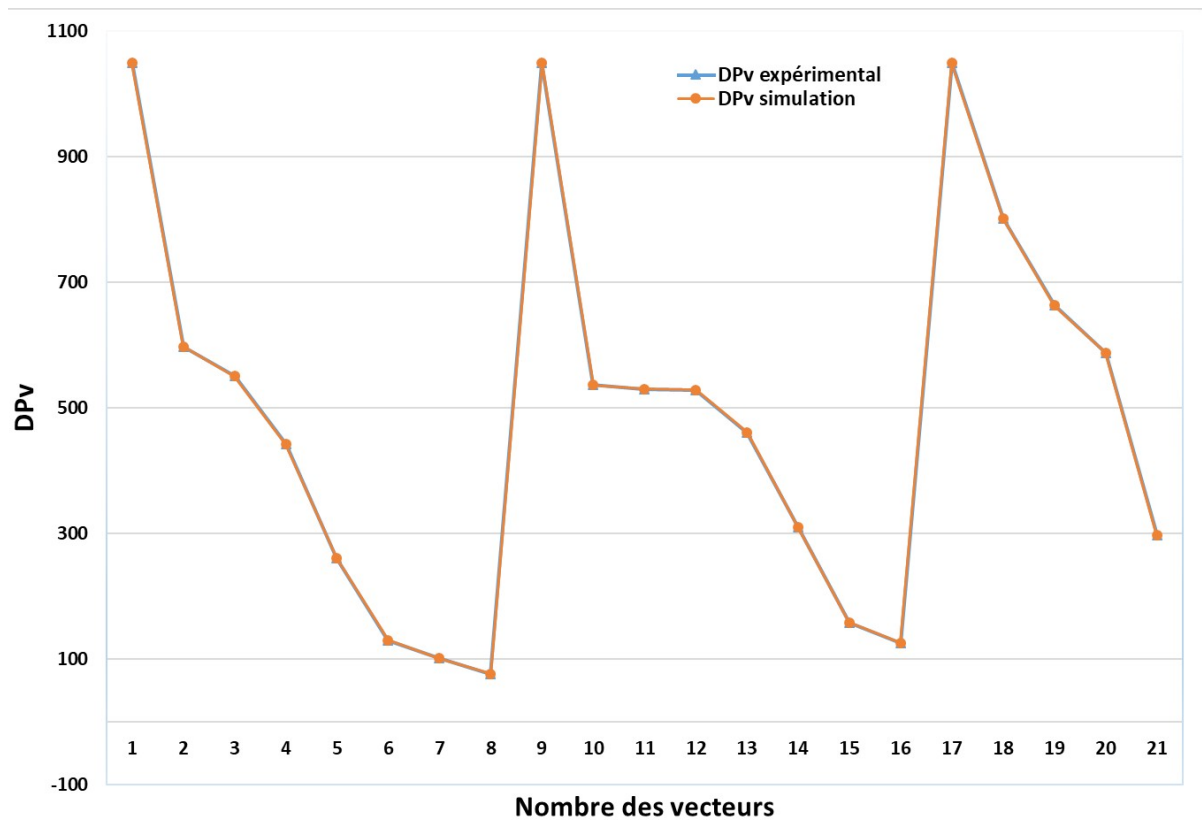


Figure (IV.5): Modélisation de DPv 3 variables TUK

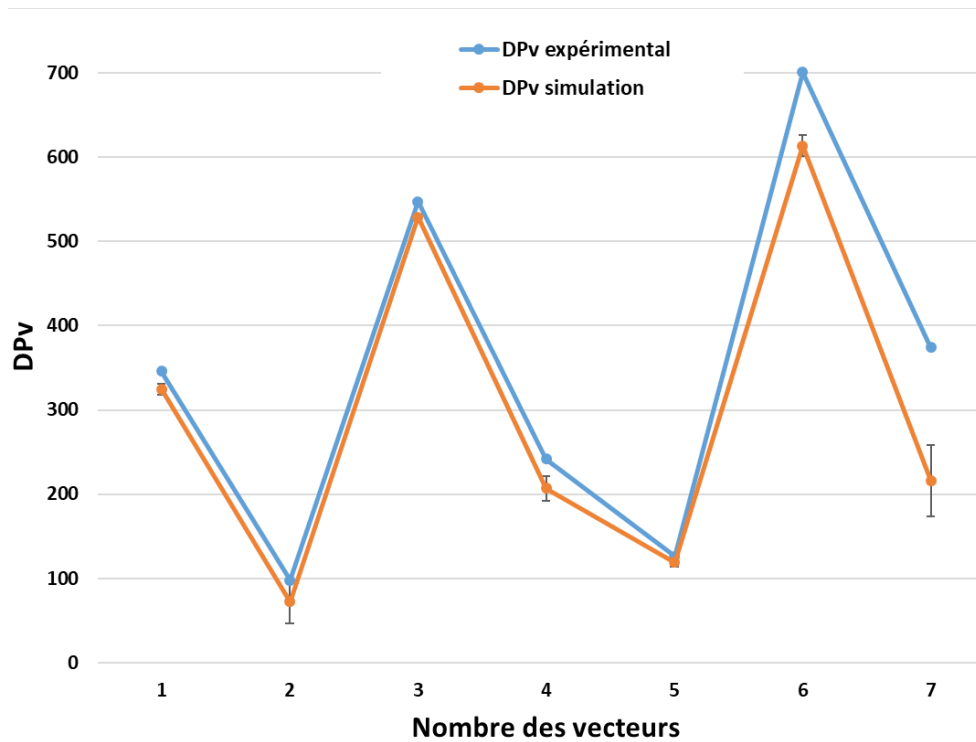


Figure (IV.6): Prédiction de DPv 3 variables TUK

Tableau (IV.12) : Les performances de l'approche ANFIS avec 3 variable TUK

	<i>Erreurs relatives absolues (%)</i>			<i>Coefficient de corrélation</i>
	<i>min</i>	<i>Moy</i>	<i>max</i>	
<i>L'apprentissage</i>	2.516E-06	0.00073	0.00081	0.9999
<i>Le test</i>	3.387	15.707	25.901	0.969

IV.3.4. Discussion :

Le système a obtenu d'excellents résultats, dépassant la précision des méthodes d'IA précédentes. Il a atteint une valeur moyenne relative absolue de 12.1316% et une valeur de corrélation de 0.9721, ce qui est élevé et indique une forte relation entre les valeurs souhaitées et estimées.

ANFIS est efficace pour ce type de tâches, et ses performances peuvent être encore améliorées en incorporant des entrées supplémentaires. Dans ce cas, l'inclusion de la concentration d'éthanol a conduit à une amélioration significative. La valeur d'erreur a été réduite à 10.391% et la corrélation s'est améliorée à 0.9813.

Pour la simulation du papier TUK, les données étaient probablement moins cohérentes par rapport aux données du papier Kraft, ce qui a entraîné une plus d'erreur 15.707 % de prédiction et une moindre corrélation 0.969.

IV.3.5. La comparaison :

Le tableau ci-dessous représente les résultats des méthodes précédentes : PSO [53] et ANN [54] qui ont utilisé uniquement la concentration de 2-fal en tant qu'entrée. :

Tableau (IV.13) : comparaison entre ANN.PSO.ANFIS.

	<i>Erreur min</i>	<i>Erreur Moy</i>	<i>Erreur max</i>	<i>Coefficient de corrélation</i>
<i>ANN</i>	0	23,66	78,19	0,91
<i>PSO</i>	0,12	12,91	51,77	0,94
<i>Anfis 3 entrée</i>	2.4718	12.1316	25.758	0.9721
<i>Anfis 4 entrée</i>	3.21	10.391	17.931	0.9813

Le modèle ANFIS s'est avéré meilleur dans la prédiction du Dpv par rapport au réseau neuronal artificiel et au PSO, ce qui suggère que l'ANFIS peut être un modèle plus efficace pour cette tâche particulière. Cela implique que l'ANFIS a pu capturer avec précision les schémas ou les relations sous-jacentes dans les données, conduisant à de meilleures prédictions du Dpv.

Cependant, il n'est pas clair si le choix du traceur (méthanol ou 2-FAL) a joué un rôle dans la performance supérieure du modèle ANFIS. L'efficacité d'un modèle ou d'un traceur peut dépendre du contexte et peut varier en fonction des caractéristiques spécifiques de l'ensemble de données et d'autres facteurs.

IV.4. Partie 2 : Modélisation et prédiction d'indice de traction

IV.4.1. Introduction :

L'indice de traction (Tidx) ou la résistance à la traction est La force nécessaire pour rompre une bande de papier d'une largeur et d'une longueur données. A une relation directe avec les propriétés mécaniques du papier.

Dans cette partie, nous utiliserons les résultats DPV précédents pour prédire la valeur TIDX, ce qui constituera un modèle ANFIS à 1 entrée et 1 sortie.

IV.4.2. La base des données :

Nous utilisons les mêmes résultats DPV pour le modèle (méthanol/éthanol) et les mêmes ratios qu'auparavant (75/25), c'est-à-dire 22 pour l'entraînement et 7 pour les tests.

Paramètres de l'ANFIS :

Nous avons utilisé un programme ANFIS personnalisé plutôt que l'outil ANFIS disponible dans MATLAB, ce qui nous a permis de contrôler un plus grand nombre de paramètres, nous utilisons genfis1 :

Fismat = genfis1 (data, numMFs, inmftype, outmftype)

- Le type de fonction d'appartenance : (gaussmf).
- Le nombre fonction d'appartenance : numMF = 5.
- Le type de fonction d'appartenance pour la sortie : outmftype = 'constant'.
- Nombre d'itération : trnOpt (1) = 250.
- Le taux de diminution de la taille de pas : trnOpt (4) = 0.9
- Taux d'augmentation de la taille du pas : trnOpt (5) = 1.1

IV.4.3. Résultats :

Les meilleurs résultats obtenus pour la modélisation et la prédiction de Tidx sont décrits dans le tableau suivant :

La phase d'apprentissage :

Tableau (IV.14) : Résultats de l'apprentissage

<i>DPv (ppm)</i>	<i>Tidx expérimental (%)</i>	<i>Tidx de simulation (%)</i>	<i>Erreurs relatives absolues (%)</i>
1216.52	100	98.76439616	1.235603836
681.50	74.2	74.45378142	0.342023477
454.78	59.07	63.76800722	7.953287991
335.66	43.51	47.78224637	9.818998774
180.45	14.93	19.29948669	29.26648823
138.53	14.41	15.16265026	5.223110742
153.13	9.36	16.13183044	72.34861582
1221.94	100	100.6100221	0.610022143
568.27	77.89	76.89569381	1.276551791
444.78	66.96	62.15867128	7.170443127
398.15	50.86	50.15742162	1.381396736
235.89	31.7	29.67056481	6.402003768
215.21	26.59	25.417085	4.411113219
163.67	13.68	17.14861056	25.35534039
1221.98	100	100.6229083	0.622908281
285.69	33.21	39.8181004	19.89792352
281.84	48.27	39.08698445	19.02427087
206.58	22.83	23.73866317	3.980127775
171.89	23.5	18.12370099	22.87786813
124.11	19.57	14.66962623	25.0402339
164.89	18.66	17.28341964	7.37717236
117.51	16.13	14.56687539	9.690791127

La phase de test :

Tableau (IV.15) : Résultats de test

<i>DPv (ppm)</i>	<i>Tidx expérimental (%)</i>	<i>Tidx de simulation (%)</i>	<i>Erreurs relatives absolues (%)</i>
541.396	59.15	75.057095	25.88294329
219.401	40.49	30.229871	35.14959446
240.261	34	34.733288	10.02869253
190.690	18.78	19.020897	11.29672517
125.960	13.11	15.848212	12.20623572
246.176	33.62	36.898144	5.305713649
154.702	22.68	16.045663	28.27811801

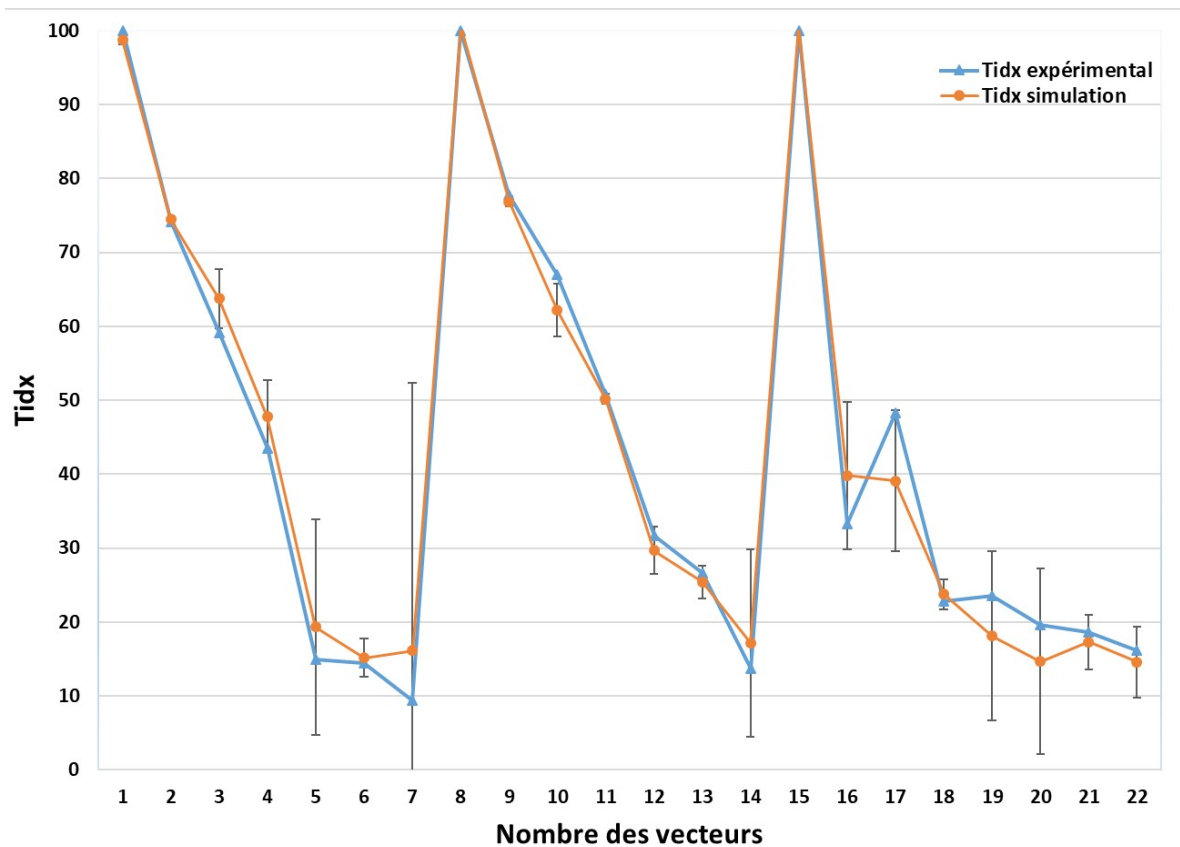


Figure (IV.7) : Modélisation de Tidx

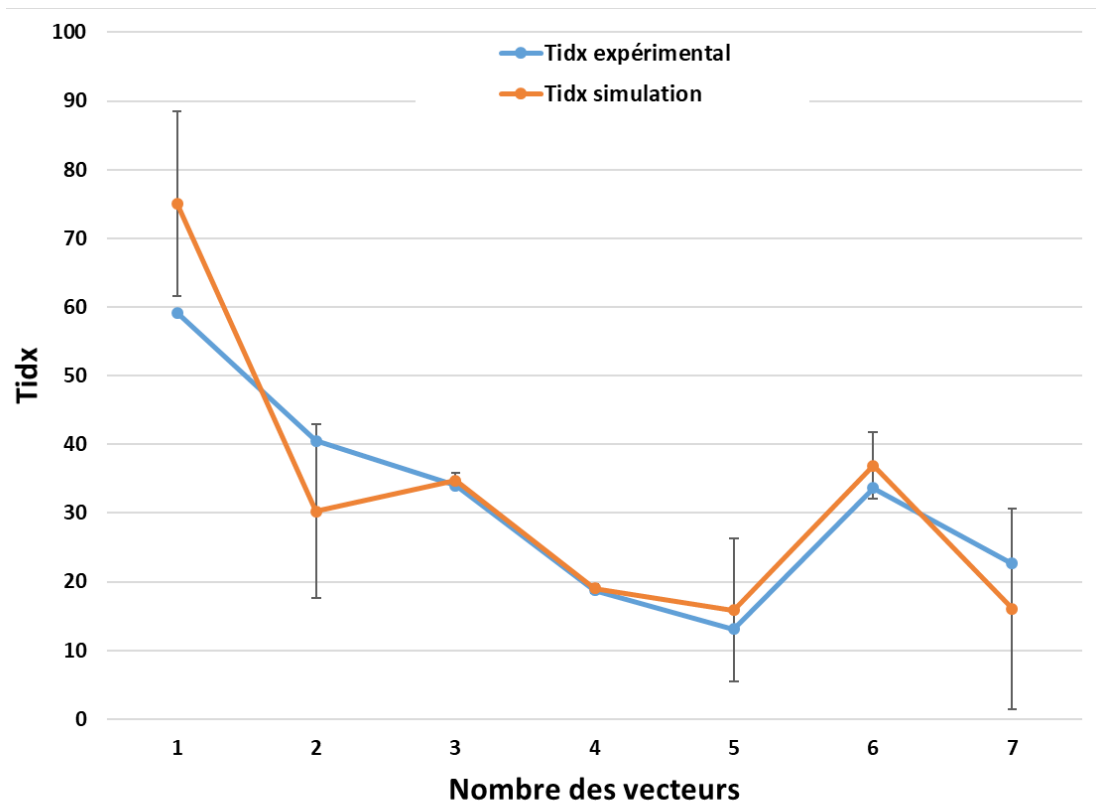


Figure (IV.8) : Prédiction de Tidx

Tableau (IV.16) : Les performances de l'approche ANFIS de Tidx

	<i>Erreurs relatives absolues (%)</i>			<i>Coefficient de corrélation</i>
	<i>min</i>	<i>Moy</i>	<i>max</i>	
<i>L'apprentissage</i>	0.342	12.786	72.348	0.991
<i>Le test</i>	1.282	16.508	29.25	0.934
<i>ANN test</i>	0	36,97	82	0,8585

IV.4.4. Discussion :

L'erreur relative moyenne absolue est 18.306 et la valeur de coefficient de corrélation est 0,908 C'est une amélioration par rapport à la méthode ANN. Cela indique la fiabilité du modèle et prouve que c'est une option viable pour travailler avec un petit nombre d'entrées et de vecteurs.

IV.5. PARTIE 3 : Diagnostic du papier et de l'huile isolante du transformateur

IV.5.1. Introduction :

Les transformateurs, tout comme les autres équipements importants, sont soumis à des normes strictes pour garantir la disponibilité de l'énergie électrique. L'entretien régulier est un processus nécessaire pour préserver l'état optimal du transformateur.

Tout au long de sa durée de service, le transformateur est soumis à de nombreux tests qui peuvent détecter les premiers signes de défaillance potentielle, permettant ainsi de prendre des mesures préventives. Dans cette section, nous appliquons les résultats et les connaissances que nous avons obtenus pour examiner diverses caractéristiques, notamment le DPV, et le méthanol.

IV.5.2. Diagnostic de degré de polymérisation :

Le degré de polymérisation est considéré comme un indicateur fort de la santé du papier isolant. Il se situe généralement entre 1000 et 1200 pour un nouveau papier et diminue au fil du temps. La fin de vie du papier est généralement atteinte lorsque le degré de polymérisation atteint 250 [55].

Les deux formules de Pradhan et al [5] exprimer la vie écoulée et restante en %:

$$DVe(\text{anne}) = 20.5 * \ln\left(\frac{1100}{DP}\right)$$

$$DVr(\%) = 100 * \left[\frac{(DP - 200)}{1200 - 200} \right]$$

Tableau (IV.17) : Estimation de la durée de vie écoulée et restante du transformateur étudié

Température (°C)	150	170	190
Valeur moyenne du DPv (ppm)	385.52	352.47	294.47
Durée d'opération du transformateur (années)		35	
Durée de vie écoulée (%)	81.44	84.75	90.55
Durée de vie écoulée (années)	21.49	23.33	27.01
Durée de vie restante (%)	18.55	15.24	9.44
Durée de vie restante (années)	13.50	11.66	7.98

IV.5.3. Diagnostic a concentration de méthanol :

Le méthanol en tant que marqueur chimique pour la détection de la dégradation du papier isolant dans l'huile isolante des transformateurs est une approche utilisée notamment dans certains cas où il y a des concentrations élevées, comme lors de l'utilisation de TUK en tant que papier isolant, ou à haute température de l'huile lorsque les composés de furane ne sont pas thermiquement stables [56].

Sur la base des travaux de Jalbert et al., le modèle d'interprétation suivant a été présenté pour calculer la valeur moyenne de DPv :

$$DP_t = \frac{DP_0}{1.55(1 - e^{-0.0054[meth]}) + 0.00101[meth] + 1}$$

[Meth] c'est la concentration de méthanol en ppb a 20 C. Avec ce modèle, une classification a été créée comme suit :

Tableau (IV.18) : Niveau seuil du méthanol et son état

Methanol (ppb)	DPv	La condition de papier
0-50	1000-700	Sain
51-200	700-450	Détérioration modérée
201-1440	450-250	Détérioration importante
>1440	<250	Critères de fin de vie

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé l'applicabilité de l'approche ANFIS (Adaptative Neuro-Fuzzy Inference System) comme outil de diagnostic pour l'évaluation de l'état et la durée de vie résiduelle des transformateurs approchant leur fin de vie

Nous avons modélisé et prédit le degré d'isolation de l'huile du transformateur, en particulier en ce qui concerne la dégradation et le diagnostic. Dans les deux premières étapes, nous avons modélisé le degré de polymérisation et l'indice de traction (TDix) en utilisant plusieurs entrées. Nous avons mis en évidence la puissance de l'outil ANFIS qui nous a donné des résultats très intéressants par rapport à ceux issus des approches neuronale et floue .

Dans la dernière partie, nous avons fait le diagnostic du papier Kraft et TUK en fonction du degré de polymérisation (DPv) et l'indice de traction (Tidx). Nous avons constaté que la perte des propriétés mécaniques dépend fortement à la dépolymérisation de la cellulose.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Les transformateurs électriques sont des composants essentiels du système électrique, permettant une transformation efficace de la tension et garantissant une alimentation en électricité fiable et stable. De bonnes pratiques de maintenance sont essentielles pour assurer leur performance optimale et assurer le bon fonctionnement continu et efficace du réseau électrique.

Le diagnostic et la maintenance de l'isolation solide d'un transformateur électrique sont plus difficiles que ceux de l'isolation liquide en raison de l'accessibilité limitée, du rôle crucial de l'isolation solide dans la fourniture d'une isolation électrique aux conducteurs, de la complexité des techniques de diagnostic et des options de maintenance limitées. La défaillance ou la dégradation de l'isolation solide peut entraîner des conséquences importantes, notamment des dommages au transformateur et des coupures de courant, ce qui rend son diagnostic et sa surveillance indispensables pour garantir la fiabilité et la longévité du transformateur.

L'objectif principal de la modélisation prédictive et le diagnostic diélectrique du papier Kraft imprégné dans l'huile de luminol utilisés dans l'isolation des transformateurs électriques à l'aide de l'ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System).

Dans la première approche, nous avons utilisé le temps, la température et la concentration de méthanol comme entrées dans la modélisation et la prédiction du degré de polymérisation (DPv). Les résultats obtenus grâce à cette approche ont permis d'obtenir un modèle précis, puis nous l'avons amélioré en ajoutant le méthanol comme une autre entrée, ce qui a considérablement amélioré les résultats, démontrant la forte corrélation entre la concentration d'alcool et la dégradation du papier isolant.

La deuxième approche était axée sur la prédiction de la résistance à la traction (Tidx), en utilisant le système ANFIS basé sur le DPv du modèle en tant que paramètre d'entrée. Les résultats obtenus grâce à cette approche ont également montré de bonnes améliorations par rapport aux méthodes précédentes. Cela indique les performances améliorées du modèle ANFIS dans la capture de la relation entre le DPv et le Tidx.

Les résultats de cette étude soulignent l'importance de l'utilisation de techniques de modélisation avancées telles que l'ANFIS pour une modélisation prédictive améliorée. L'inclusion de la concentration de méthanol en tant que principal marqueur s'est avérée avantageuse, conduisant à des résultats intéressants en terme de précision et de corrélation. Ces résultats ouvrent la voie à des études plus approfondies sur les relations et les mécanismes de dégradation, ainsi qu'à l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le diagnostic et la maintenance.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1].HOMEMADE.A et MERIGA.B, «Etude électro-statistique du comportement de l'huile de transformateur de puissance,Mémoire de master, Eloued : Université Echahid Hamma Lakhdar,2020.
- [2]. Abdellah KERROUCHE, «Méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance à partir de l'analyse des gaz dissous,Mémoire de masterEl Harrach, Alge: Ecole Nationale Polytechnique,2019.
- [3] transfo-lab Analyses de l'huile - Diagnostic du transformateur [en-ligne] Disponible sur : <https://transfo-lab.com/analyses-huile-transformateur-4>
- [4] ARROYO FERNÁNDEZ Oscar Henry. Étude des corrélations entre les propriétés mécaniques des papiers et les traceurs chimiques issus de son vieillissement pour surveiller l'état de l'isolation solide des transformateurs de puissance. Thèse de doctorat d'université. Québec : Université du Québec à Chicoutimi, 2017, p. 3.
- [5].YAHIOU Abdeghani, « contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : cas du courant d'appel », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Sétif, 2012, p-1
- [6].Jean Sanchez, « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance, Université de Grenoble, 2011. France.
- [7]. BESSAS Wafa et RAYANE Halima, « Diagnostic du comportement diélectrique d'un transformateur de puissance à base de modèles mathématiques optimisés par la technique PSO,Mémoire de master,Laghouat : Université Amar Telidji,2022.
- [8] .Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».
- [9]. LAKHDARI FARIDA et BEN KORTBI Med, «Diagnostic des défauts dans un transformateur de puissance par la méthode d'analyse de la repense en fréquence FRA, Mémoire de master,Université Yahia Farés de Médéa,2018
- [10]. BENYAMMI Belhadj, «Modélisation prédictive et diagnostic du diélectrique d'un transformateur de puissance,Mémoire de master, Laghouat : Université Amar Telidji,2021.
- [11]. Nouari Saber,« Protection et maintenance d'un transformateur industrielle, Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra,2020.
- [12]. Pauwels international service ,« formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».
- [13]. BESSAS Wafa et RAYANE Halima, « Diagnostic du comportement diélectrique d'un transformateur de puissance à base de modèles mathématiques optimisés par la technique PSO,Mémoire de master,Laghouat : Université Amar Telidji,2022.
- [14]. ILILTEN Amine et HASNIOU Zakaria, «Etudes des paramètres influant sur la tension de claquage de l'huile Borak 22utilisée dans les transformateurs de puissance, Mémoire de fin de cycle,Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2015
- [15]. LAKHDARI FARIDA et BEN KORTBI Med, «Diagnostic des défauts dans un transformateur de puissance par la méthode d'analyse de la repense en fréquence FRA,Mémoire de master,Université Yahia Farés de Médéa,2018
- [16] . IEC 60076-1. Transformateurs de puissance - Partie 1 : Généralités, 2000.
- [17] . Hadjam Mokhtar et Belazizia Hamza ,« Modélisation du transformateur de puissance »,Mémoire de master ,UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGUI,2012
- [18].Samuel Eke, « Stratégie d'évaluation de l'état des transformateurs : esquisse de solutions pour la gestion intégrée des transformateurs vieillissants », THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON,2018.

- [19].BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017,p-16
- [20].A. Schenk, "Surveillance continu des transformateurs de puissance par réseau de neurone", Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne 2001.
- [21].TALEB Yousra. Raffinage du pétrole. Les combustibles fossiles : formation et pyrolyse du kérogène. [En ligne]. Disponible sur : <https://slideplayer.fr/slide/11801521/>. (Page consultée le 22 jui 2023)
- [22].BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 ,p-21-24
- [23]. N. Berger ; « Liquides isolants en électrotechnique – Caractéristiques des produits », Techniques de l'Ingénieur, Traité de génie électrique, D2471, Novembre 2002.
- [24]. Koutoua Simon ; «Étude de l'isolation hybride en vue de son application dans les transformateurs de puissance», Techniques de l'Ingénieur , Décembre 2013
- [25]. A.Boubakeur «Essais de l'huile de transformateur», Cours de graduation, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2014.
- [26]. A.Boubakeur, «isolation des transformateurs de puissance», Cours de graduation, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2014.et ARROYO FERNÁNDEZ Oscar Henry. Étude des corrélations entre les propriétés mécaniques des papiers et les traceurs chimiques issus de son vieillissement pour surveiller l'état de l'isolation solide des transformateurs de puissance. Thèse de doctorat d'université. Québec : Université du Québec à Chicoutimi, 2017,
- [27] . BENYAMMI Belhadj. Modélisation prédictive et diagnostic du diélectrique d'un transformateur de puissance. Mémoire de master. Laghouat : Université Amar Telidji,2021.
- [28].BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 ,p-33-34
- [29].Koutoua Simon ; «Étude de l'isolation hybride en vue de son application dans les transformateurs de puissance», Techniques de l'Ingénieur , Décembre 2013.
- [30]. ILILTEN Amine et HASNIOU Zakaria, «Etudes des paramètres influant sur la tension de claquage de l'huile Borak 22utilisée dans les transformateurs de puissance, Mémoire de fin de cycle,Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2015 .
- [31]. NILLY Didier ; «Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance », Techniques de l'Ingénieur , le 12 janvier 2017 .
- [32] .BENACHAR Yacine et ELGHOUMBI Abdelaziz., « Étude de Corrélation des Caractéristiques de Vieillesse des Isolants Liquides dans les Transformateurs ,Mémoire de master,Université de Ghardaïa ,2019.
- [33]. HOMEMADE AZZEDINE et MERIGA MOHAMMED BACHIR et GUIDA LAIDj, « Etude électrostatistique du comportement de l'huile de transformateur de puissance ,Mémoire de master, Université à El Oued,2020 [33].A.BOUBAKER ; Cours 4ème Année, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger.
- [34].INSULATING LIQUIDS – DETERMINATION OF THE BREAKDOWN VOLTAGE AT POWER FREQUENCY – TEST METHOD.
- [35].Insulating liquids — Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan δ) and d.c. resistivity.
- [36]. ASTM D445.Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity) .

- [37]. Determination of acidity Colourimetric titration , IEC-62021-2-2007 Insulating liquids .
- [38]. ISO 6295-1983 Determination of interfacial tension of oil against water - Ring method.
- [39]. IEC 60814 Determination Of Water By Automatic Coulometric Karl Fischer Titration.
- [40].Nouari Saber,« Protection et maintenance d'un transformateur industrielle, Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra,2020.
- [41]. SENOUSSAOUI MOHAMMED EL-AMINE ; « Méthodes Innovantes de Diagnostic des Transformateurs en Utilisant L'Intelligence Artificielle», Techniques de l'Ingénieur , 2012
- [42]. Gérard Dreyfus ,1995, Introduction aux réseaux de neurones, Éditions Eyrolles.
- [43]. Simon Haykin, 1995, Réseaux de neurones : méthodes et applications, Éditions Dunod.
- [44]. "Apprentissage profond : méthodes et applications en intelligence artificielle" de Yoshua Bengio, Ian Goodfellow et Aaron Courville, Éditions Masson, 2018.
- [45]. "Introduction à la logique floue : concepts, méthodes et applications" de El Mostapha Raïssouli et Abdelkrim Haqiq, Éditions Universitaires Européennes, 2016.
- [46]. Lotfi A. Zadeh ,1993, Logique floue et ses applications, Éditions Hermès,
- [47]. Didier Dubois et Henri Prade, 2015, Logique floue : concepts, méthodes et applications Éditions Eyrolles,
- [48]. Jyh-Shing Roger Jang, Chin-Teng Lin ET Eiji Mizutani, 1997, ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, Éditions IEEE.
- [49]. Hamid Bouzahir ,2014, Introduction à la modélisation neuro-floue par les ANFIS, Éditions Universitaires Européennes.
- [50]. Mohamed Amine Boudiaf, "Conception et implémentation d'un système de contrôle de température par ANFIS" de Mémoire de Master, Université de Laghouat, 2021.
- [51] ARROYO FERNÁNDEZ Oscar Henry 2017. Étude des corrélations entre les propriétés mécaniques des papiers et les traceurs chimiques issus de son vieillissement pour surveiller l'état de l'isolation solide des transformateurs de puissance. Thèse de doctorat d'université. Québec : Université du Québec à Chicoutimi.
- [52] KANUMURI Deepak, SHRAMA Veena ET RAHI O. P. 2019, Analysing using various approaches for residual life estimation of power transformers., 11, 2, p. 396-397.
- [53] BENYAMMI Belhadj, « Modélisation prédictive et diagnostic du diélectrique d'untransformateur de puissance,Mémoire de master, Laghouat : Université Amar Telidji,2021.

[54] BESSAS Wafa et RAYANE Halima, « Diagnostic du comportement diélectrique d'un transformateur de puissance à base de modèles mathématiques optimisés par la technique PSO,Mémoire de master,Laghouat : Université Amar Telidji,2022.

[55] KANUMURI Deepak, SHRAMA Veena ET RAHI O. P. 2019, Analysing using various approaches for residual life estimation of power transformers. 11, 2, p. 396-397.

[56] Jalbert, Jocelyn & Rodriguez-Celis, Esperanza & Arroyo, Oscar & Duchesne, Steve & Morin,. (2019). Methanol Marker for the Detection of Insulating Paper Degradation in Transformer Insulating Oil. Energies. 12.