

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Mr. M<sup>ed</sup> ELamine KARALI

Mr. Abderrahmane TAGUERCIFI

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

---

Prédiction de l'Etats d'Huiles de Transformateur de Puissance  
Par la Technique d'Intelligence Artificielle

---

Soutenu le 10 /07/2021 devant le jury composé de:

Mr.Meziane	HAMEL	MCB	UMBB	Président
Mr. Hani	BENGUESMIA	MCA	UMBM	Examineur
Mme. Zina	LARABI	MAA	UMBB	Examineur
Mme.Nassima	M'ZIOU	Professeur	UMBB	Rapporteur
Mme.Leila	OMERT	Chef-unité	Sonelgaz-UTH	Co-Rapporteur

Année Universitaire : 2020/2021



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

# Remerciements

La présente étude n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de certaines personnes. Et je ne suis pas non plus capable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont pu jouer à mes côtés pour en arriver là. Cependant, je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à, Madame **M'ZIOU Nassima**, Professeur à l'UMBB, **Mme Oumert Leila**, chef de division d'unité opérationnelle de traitement des huiles à MEI (SONELGAZ, Blida) de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés ... par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et a accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches Nous remercions aussi, Monsieur **Meziane HAMEL**, MCB à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions vivement, Monsieur **BENGUESMIA Hani** MCA l'UMB à de M'sila . Mademoiselle **LARABI Zina**, MAA à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions de la même façon s'adresse à **Mme Rahal Dalel**, chef de poste de traitement des huiles des transformateurs (MEI) pour sa présence, son aide et ses judicieux conseils qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Nous remercions **Mr Benali Abd El Halim** qui nous a accompagné lors des expériences de vieillissement. Toutes nos gratitude vont à **Mme Sidi Yahia Samira** chef du laboratoire d'analyse d'huile (MEI) pour l'aide précieuse qu'elle nous a apporté et la patience dont elle a fait preuve.

C'est par un grand plaisir qu'un devoir, d'exprimer notre gratitude et reconnaissance à toutes les personnes ayant contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail :

## **A ma chère mère**

A celle qui a souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et mon affection pour tous ses sacrifices.

## **A mon cher père**

A l'homme que je dois tous, qu'il trouve ici toute ma reconnaissance et la récompense de tous ses sacrifices.

## **A mes chères sœurs**

A qui je souhaite toutes les réussites et le bonheur le long de leurs vies.

## **A mes amis**

A tous mes amis, tous ce que j'aime, tous ce qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

Je ferais une exception à mon amies AYADIA, GARNAOUT.O,  
AMERIOU.M, BELKHIRIA, GARNAOUT.O, CHEKIAN.A,  
GABOUSSA.BILAL, SAIDANIA, BOUFROUNE.F,  
Sans oublier mon binôme KARALIA.

***TAGUERCIFI  
ABDERRAHMANE***

# *Dédicaces*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie cette thème de projet de fin d'étude à :*

***A Ma tendre Mère :** A ma mère récemment décédée et qui est heureuse de savoir que son fils a enfin terminé les études qu'il a commencées, tu es pour moi une source de tendresse et un exemple de dévouement qui ne cesse de m'encourager. une mère peut faire pour s'assurer que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*Dieu te bénisse maman.*

***A Mon très cher Père :** Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

***A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études***

***A ma très chère sœur et mes très chers frères OUSSAMA et RIAD***

***A mon binôme***

***A mes très chère amis :, HASSIN.M, SAIDANIA AMERIOU.M, , DAHMANIA K.SARI,***

***CHEKIAN.A, GABOUSSA.BILAL, , BOUFROUNE.F, B.MOUNIR, BELKHIRIA***

***A tous les membres de ma promotion..***

***A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer***

***KARALI MOHAMED***

## ملخص :

الهدف من هذا العمل هو الكشف عن جودة الزيت العازل للمحولات بعد التقادم الحراري لمدة 628 ساعة عند 120 درجة مئوية. لقد درسنا الخصائص الكهربائية والفيزيائية الكيميائية لهذه الزيوت الجديدة. يتم إجراء الشيخوخة الحرارية بفضل معمل معالجة زيت (BLIDA\SADEG)UTH

**الكلمات الدالة:**

محولات القدرة، زيوت جديدة، شيخوخة حرارية، خواص كهربائية وفيزيائية كيميائية، منطق ضبابي.

## Résume :

Le but de ce travail était de détecter la qualité d'huile diélectrique de transformateurs après un vieillissement thermique de 628 heures à température 120C°. Nous avons étudié les propriétés électriques et physicochimiques de ces huiles neuves. Le vieillissement thermique est effectué ce faire du au laboratoire des traitements des huiles UTH SADEG/Blida.

## Les mots clés :

Les transformateurs de puissance, huiles neuves, vieillissement thermique, propriétés électriques et physicochimiques, logique floue

## Abstract :

The aim of this work was to detect the dielectric oil quality of transformers after thermal aging of 628 hours at 120C °. We have studied the electrical and physicochemical properties of these new oils. Thermal aging is carried out due to the UTH SADEG / Blida oil treatment laboratory.

## Kaywords :

Power transformers, new oils, thermal aging, electrical and physicochemical properties, fuzzy logic

# ***SOMMAIRE***

Liste des figures .....	I
Liste des tableaux .....	III
Liste des photos .....	IV
Liste des symboles.....	V
Introduction générale.....	1

## **Chapitre I Généralité sur les transformateurs**

I.1. Introduction .....	3
I.2. Définition sur les transformateurs .....	3
I.2.1. Transformateurs de base tension .....	3
I.2.2. Transformateurs de moyenne tension.....	4
I.2.3. Transformateurs de haute tension .....	4
I.3. Types des transformateurs .....	4
I.3.1. Transformateur immergé.....	4
I.3.2. Transformateurs secs .....	4
I.3.3. Autotransformateur .....	5
I.4. Utilisations de transformateur de puissance .....	5
I.5. Principaux éléments d'un transformateur .....	5
I.6. Défauts des transformateurs .....	9
I.6.1. Les contraintes .....	9
I.6.2. Différents types de défauts .....	10

I.6.3. Défaillances du transformateur et leurs causes.....	11
I.7. Surveillance d'un transformateur .....	12
I.8. Système de protection .....	12
I.9. Système de refroidissement .....	13
I.10. Système d'isolation des transformateurs .....	14
I.10.1. Isolation solide.....	14
I.10.2. Isolation liquide .....	15
I.11. Conclusion .....	15

### **Chapitre II Propriété et vieillissement des huiles isolant des transformateurs**

II.1. Introduction.....	16
II.2. Huiles diélectriques.....	16
II.2.1. Huiles végétales.....	16
II.2.2. Huiles synthèses .....	16
II.2.3. Huiles minérales.....	16
II.2.3.1. Origine et composition.....	17
II.2.3.2. Différentes tendances d'huile minérale.....	18
II.2.3.2.A. Tandance paraffiniques .....	18
II.2.3.2.B. Tandance naphténiques .....	18
II.2.3.2.C. Tandance aromatiques .....	18
II.2.3.3. Critère de choix d'une huile minérale.....	19

II.3. Propriété des huiles isolant .....	19
II.3.1. Propriété électrique .....	19
II.3.1.1. Permittivité.....	19
II.3.1.2. Conductivité et Résistivité.....	20
II.3.1.3. Rigidité Diélectrique .....	20
II.3.1.4. Facteur de dissipation .....	21
II.3.2. Propriétés Physique .....	21
II.3.2.1. Densité .....	21
II.3.2.2. Aspect .....	21
II.3.2.3. Viscosité .....	21
II.3.2.4. Point d'éclair .....	22
II.3.3. Propriétés chimiques .....	22
II.3.3.1. Indice de couleur .....	22
II.3.3.2. Indice d'acidité .....	22
II.3.3.3. Teneur en eau.....	22
II.3.3.4. Indice de réfraction.....	23
II.4. Définition du vieillissement.....	23
II.5. Vieillissement du papier - Mécanismes de dégradation.....	24
II.6. Vieillissement du complexe huile/papier.....	24
II.7. Différents type de vieillissement.....	25
II.7.1. Vieillissement électrique.....	25

II.7.2. Vieillissement thermique.....	26
II.8. Cause des vieillissements d' diélectrique.....	26
II.8.1. Oxydation .....	26
II.8.2. L' humidité.....	27
II.8.3. Décharges partiales.....	27
II.8.4. Température .....	27
II.9. Vieillissement des accessoires.....	27
II.10. Conclusion.....	28

### **Chapitre III Technique expérimental**

III.1. Introduction.....	29
III.2. Essais de vieillissement de l' huile .....	29
III.2.1. Préparation des échantillons .....	29
III.2.1.1. Présentation de l' huile.....	29
III.2.1.2. Procédés d' échantillonnage.....	29
III.2.2. Vieillissement thermique de l' huile isolant .....	31
III.3. Dispositifs pour les mesures des propriétés de l' huile .....	31
III.3.1. Mesure de l' indice de couleur .....	31
III.3.2. Mesure de la teneur en eau .....	32
III.3.3. Mesure du facteur de dissipation à 90°C.....	33
III.3.4. Mesure de l' indice d' acidité .....	35
III.3.5. Mesure de la viscosité .....	36

III.3.6. Mesure de la tension de claquage .....	37
III.3.7. Mesure de la densité .....	38
III.3.8. Mesure de la conductivité .....	39
III.3.9. Indice de réfraction .....	40
III.4. Conclusion .....	40

### **Chapitre IV Résultat et discussion**

IV.1. Introduction .....	41
IV.2. Vieillessement thermique .....	41
IV.2.2. Variation de la teneur en eau .....	44
IV.2.3. Variation de l'indice de couleur .....	44
IV.2.4. Variation de l'indice d'acidité .....	45
IV.2.5. Variation de facteur de dissipation .....	46
IV.2.6. Variation de la conductivité et la résistivité .....	47
IV.2.7. Variation de la permittivité .....	48
IV.4. Conclusion .....	48

### **Chapitre V Estimation de la qualité d'huile en utilisant la logique floue**

V.1. Introduction .....	49
V.2. Notions de base des ensembles flous .....	50
V.3. Raisonnement en logique floue .....	51
V.4. Élément de Base de la logique floue .....	52

V.4.1. Variable linguistique .....	52
V.4.2. Fonctions d'appartenance .....	52
V.4.3. Inférence floue.....	52
V.5. Fuzzification.....	52
V.5.1. Règles floues .....	53
V.5.2. Inférence floue.....	53
V.5.3. Inférence floue de Mamdani.....	53
V.5.3.1. Inférence floue de Takagi-Sugeno .....	54
V.6. Defuzzification .....	54
V.7. Base de connaissances floues .....	54
V.8. Schéma d'une commande floue .....	54
V.9. Prédiction de la qualité de l'huile par la logique floue.....	55
V.9.1. Fuzzification.....	57
V.9.1.a. Variables linguistiques et intervalles flous .....	57
V.9.1.b. Fonctions d'appartenances .....	59
V.9.2. Règles floues .....	61
V.9.2.1. Méthodes d'extraction naturelle .....	61
V.9.2.2. Méthode d'extraction automatique.....	61
V.9.2.3. Etablissement des règles floue .....	61
V.9.3.3. Mise en œuvre du système d'inférence floue.....	64
V.9.3.3.1. Implémentation du système d'infirance floue(SIF) sous MATLAB .....	64

V.9.3.3.2. Teste de validation.....	69
V.9.3.4. Résultats de prédiction des différentes étapes de contournement par la logique floue.....	70
V.10. Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73
Bibliographies .....	74
Annexe .....	78

# *LISTE DES FIGURES*

Figure.I.1. Transformateur dans les réseaux électriques.....	3
Figure I.2. Transformateur immergé.....	4
Figure.I.3. Transformateur sec.....	5
Figure.II.1. Processus de raffinage pour les huiles brutes.....	17
Figure.II.2. Schéma du mécanisme de la dégradation huile/papier. ....	25
Figure.III.1. Pont de shring.....	34
Figure.IV.1. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de vieillissement à une température 120°C .....	43
Figure.IV.2. Variation de l'indice de couleur en fonction du temps de vieillissement à une température 120°C .....	44
Figure.IV.3. Variation de l'indice d'acidité en fonction du temps de vieillissement à une température 120°C.....	45
Figure.IV.4. Variation de facteur de dissipation en fonction du temps de vieillissement température 120°C .....	46
Figure.IV.5. Variation de la conductivité en fonction du temps de vieillissement à une température 120°C .....	47
Figure.IV.6. Variation de la résistivité en fonction du temps de vieillissement à une température 120°C .....	47
Figure.IV.7. Variation de la permittivité en fonction du temps de vieillissement à Une température 120°C.....	48
Figure.V.1. Structure générale d'un système basé sur la logique floue(FL).....	55

Figure .V.2. Architecture d'un système d'inférence floue(SIF). .....	56
Figure.V.3. Fonction d'appartenance de l'indice Acidité (A). .....	59
Figure.V.4. Facteur de dissipation (F).....	59
Figure.V.5. Indice de teneur en eau T (ppm). .....	60
Figure.V.6. Indice de couleur (IC). .....	60
Figure.V.7. Fonction d'appartenance de la sortie qualité d'huile(Q) (%). .....	60
Figure.V.8. Fenêtre principale de l'éditeur du système d'inférence floue.....	65
Figure.V.9. Ensembles flous des entrées et de la sortie du SIF utilisé introduits par l'éditeur de fonctions d'appartenances du l'interface graphique (FIS) après ajustement .....	67
Figure.V.10 .Fenêtre de l'éditeur de base de règles floue.....	68
Figure.V.11. Fenêtre de visualisation des règles floues, exemple entrées après adaptation des fonctions d'appartenance des variables .....	69

# *LISTE DES TABLEAUX*

Tableau.I.1. Caractéristiques des principaux organes des transformateurs immergés. ....	8
Tableau I.2. Défauts associés aux contraintes, leurs causes et les éléments concernés. ....	10
Tableau I.3. Système de refroidissement et symbole .....	14
Tableau.II.1. Structure de l'huile minérale et ses produits après défaut.....	17
Tableau.III.1. Caractéristique de l'huile power oil. ....	29
Table. V.1. Principales fonctions d'appartenances.....	50
Tableau V.2. Variables d'entrées et sorties.....	57
Tableau V.3. Décomposition de la variable d'entrées et de sortie.....	58
Tableau.V.4. Table d'inférence.....	63
Tableau.V. 5. Comparaison entre les résultats expérimentaux et la prédiction de la logique floue de la logique floue (un élément). ....	70

# *LISTE DES PHOTOS*

Photo.I.1. Constitution générale d'un transformateur de puissance.....	7
Photo.III.1. Pièce en cuivre (3g).....	30
Photo.III.2. Pièce en fer (3g).....	30
Photo.III.3. L'échantillon du l'huiles. ....	31
Photo.III.4. Les échantillons dans une étuve à 120°C.....	31
Photo.III.5. Appareil colorimètre pour la mesure de la couleur.....	32
Photo.III.6. Titreur Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau.....	33
Photo.III.7. Appareil tangent delta de mesure du facteur de dissipation.....	34
Photo.III.8. Dispositif de titrage pour la mesure de l'indice d'acidité. ....	36
Photo.III.9. Appareil de mesure la viscosité cinématique.....	37
Photo.III.10. Appareil de mesure de la tension de claquage (spintermètre). ....	38
Photo.III.11. Appareillage de mesure de la densité.....	38
Photo.III.12. Conductimètre CEI61620. ....	39
Photo.III.13. Appareil utilisé pour déterminer l'indice de réfraction.....	40
Photos.IV.1.1. Comparaisent de la couleur et l'aspect d'huile après 672 heures.....	41
Photos.IV.1.1. Comparaisent de la couleur et l'aspect d'huile après 672 heures.....	42
Photo.IV.3. Formation des dépôt d'huile à fin de vieillissement.....	43

# *LISTE DES SYMBOLES ET ABBREVIATION*

## LISTE DES SYMBOLES & DES ABRÉVIATIONS

---

KVA : Kilovolt Ampère  
KV : Kilovolt  
MVA : Méga volt ampère  
CM : Circuit magnétique  
CP : Structure paraffinique  
CN : Structure naphénique  
CA : Structure aromatique  
Tan( $\delta$ ) : Facteur de dissipation électrique  
 $\rho$  : Résistivité  
 $\sigma$  : Conductivité  
 $\epsilon$  : Permittivité absolue de l'huile (F/m)  
 $\epsilon_0$  : Permittivité du vide  
 $\epsilon_r$  : Permittivité relative  
CP : Capacité d'un condensateur rempli d'huile  
C0 : Capacité d'un condensateur à vide rempli d'huile  
EC : Rigidité électrique  
UC : Tension de claquage  
e : Distance entre les deux électrodes en mm  
C : Condensateur  
R : Résistance  
KOH : Hydroxyde de potassium  
IC : Indice de couleur  
IA : Indice d'acidité  
T : Teneur en eau  
F : Facture des pertes(dissipation)  
Q : Qualité d'huile  
TF : Transformateur de puissance  
LF : Logique floue  
CEI : commission électrotechnique international

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

Les transformateurs de puissance sont des composants essentiels des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique, sa non fiabilité n'affecte pas uniquement la disponibilité en énergie électrique, mais aussi, elle conduit à des pénalités technico-économiques, très lourdes en conséquences (techniques, financières, commerciales, environnementales) ; d'où la nécessité de détecter et d'identifier dès les premiers stades les défauts latents pour une éventuelle action préventive. La plus part des transformateurs de puissance à travers le monde sont remplis avec des liquides isolants. Ces liquides permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique et le transfert de chaleur.

Durant la mise en service du transformateur électrique, le liquide isolant est soumis à différentes contraintes (électrique, thermique, mécanique,.....ect) qui peuvent affecter ses propriétés diélectriques.

Parmi les contraintes qui peuvent dégrader l'état de l'isolation de l'huile c'est la dégradation au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement. Cette dégradation est traduite par une chute des caractéristiques, augmentation du facteur de pertes diélectriques, de l'acidité, avec une diminution de la tension de claquage et de la résistivité. Le remplacement de l'huile vieillie est indispensable pour le bon fonctionnement du transformateur, mais ce remplacement est très couteux pour des quantités importantes de l'huile.

Notre travail s'inscrit dans ce contexte pour voir l'effet de ces contraintes sur les propriétés de l'huile diélectrique de transformateur. Pour cela, on se propose d'étudier la variation des propriétés électriques physiques chimiques de l'huile isolant du transformateur soumis à un vieillissement thermique à températures 120°C. Il s'agit de l'indice d'acidité, facteur des pertes, l'indice de couleur, la teneur en eau, la conductivité, la résistivité, la ainsi que la permittivité.

Le travail du mémoire est présenté aux cinq chapitres comme suit :

- Le premier chapitre on trouve des généralités sur les transformateurs de puissance tels que le principe de fonctionnement les différents éléments qui constituent cette machine, leur system des protections, refroidissement, ainsi que le system de l'isolation.

-Le deuxième chapitre une présente de l'origine et les catégories des huiles diélectriques et leur propriétés électriques, physico-chimique, et enfin étude du vieillissement thermique des liquides isolantes.

## Introduction générale

---

-Le troisième chapitre traite les matériels et les méthodes utilisés dans la partie expérimentale que nous avons réalisés dans laboratoire traitement des huiles diélectriques UTH SADEG/BLIDA.

-Le quatrième chapitre, on trouve et interpréter les résultats de vieillissement thermique de l'huile minéral sur des échantillons avec et sans catalyseur à 120°C.

-Le dernier chapitre, fait l'objet de l'application de l'intelligence artificielle pour la prédiction de l'état de qualité d'huile dans les transformateurs de puissance, on propose la technique floue comme outil de prédiction des défauts dans le transformateur en se basant sur traitement de vieillissement d'huile.

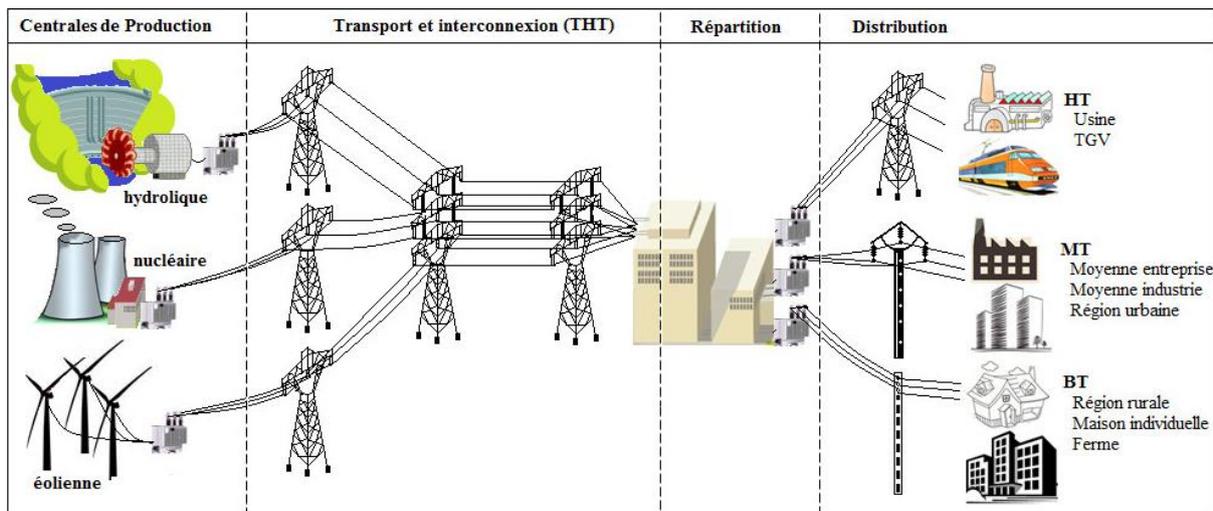
Finalement Notre étude est clôturée par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les transformateurs**

## I.1. Introduction

Les équipements transformateurs jouant un rôle essentiel dans le transport et la distribution d'électricité au réseau électrique. (figure.I.1). Leurs fonctions sont essentielles dans la transmission et la distribution de l'énergie, qui a augmenté ces dernières années en raison de l'augmentation de la consommation d'énergie. Ce chapitre présente une description générale et détaillée sur les différents constituants du transformateur ainsi son système d'isolation qui est le plus important dans le sujet de vieillissement.



**Figure.I.1.** Transformateur dans les réseaux électriques.

## I.2. Définition sur les transformateurs

Selon la commission Electrotechnique Internationale(CEI), un transformateur de puissance se définit comme 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 courant de valeurs généralement différentes, de même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique [CEI 60076-1][1]. Cette commission classe les transformateurs de puissance en trois catégories en fonction de la puissance apparente.

### I.2.1. Transformateurs de base tension

Ont pour mission de faire l'interface entre l'utilisateur et le réseau de distribution. Leur puissance nominale est de 2500 kVA en triphasé (ou 833 kVA par noyau monophasé) et la haute tension a une valeur nominale qui ne dépassant pas 33 kV.

### I.2.2. Transformateurs de moyenne tension

Assurent généralement l'interconnexion entre les réseaux de transport et de distribution d'énergie, leur puissance est au-delà de 2,5 MVA et ne dépasse pas 100MVA dans le cas de transformateurs triphasés.

### I.2.3. Transformateurs de haute tension

Sont des unités dont la puissance nominale dépasse 100 MVA en triphasé. Les installations de ce type sont utilisées pour élever la tension à la sortie des générateurs afin d'injecter le courant dans le réseau de transport d'énergie.

## I.3. Types des transformateurs

### I.3.1. Transformateur immergé

Le transformateur est disposé dans un bain d'huile qui assure l'isolement et le refroidissement. Ce transformateur est moins onéreux et a des pertes moindres que le transformateur sec [2].



**Figure I.2.** Transformateur immergé.

### I.3.2. Transformateurs secs

Les enroulements BT et les enroulements HT sont concentriques et enrobés dans une résine époxy. Le transformateur sec peut être disposé dans une enveloppe de protection qui permet de l'isoler du monde extérieur et d'assurer l'évacuation de la chaleur au travers de ses parois. Le transformateur sec présente les meilleures garanties de sécurité contre la pollution (pas de fuite de liquide, pas de vapeurs nocives en cas d'incendie) [2].



**Figure.I.3.** Transformateur sec.

### **I.3.3. 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 primaire et secondaire. Etant donné qu'il n'y a plus d'isolation galvanique entre les enroulements primaire et secondaire, tout défaut se manifestant sur un réseau se propage immédiatement sur le second [3].

### **I.4. Utilisations de transformateur de puissance**

Les transformateurs de puissance sont des appareils très employés dans les réseaux électriques et les applications industriels [4].

- La sortie des centrales électriques.
- Transport d'énergie électrique.
- Distribution d'énergie électrique.
- Les applications industrielles (transformateur de four et sous-station ferroviaires).

Un transformateur peut assurer deux fonctions :

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

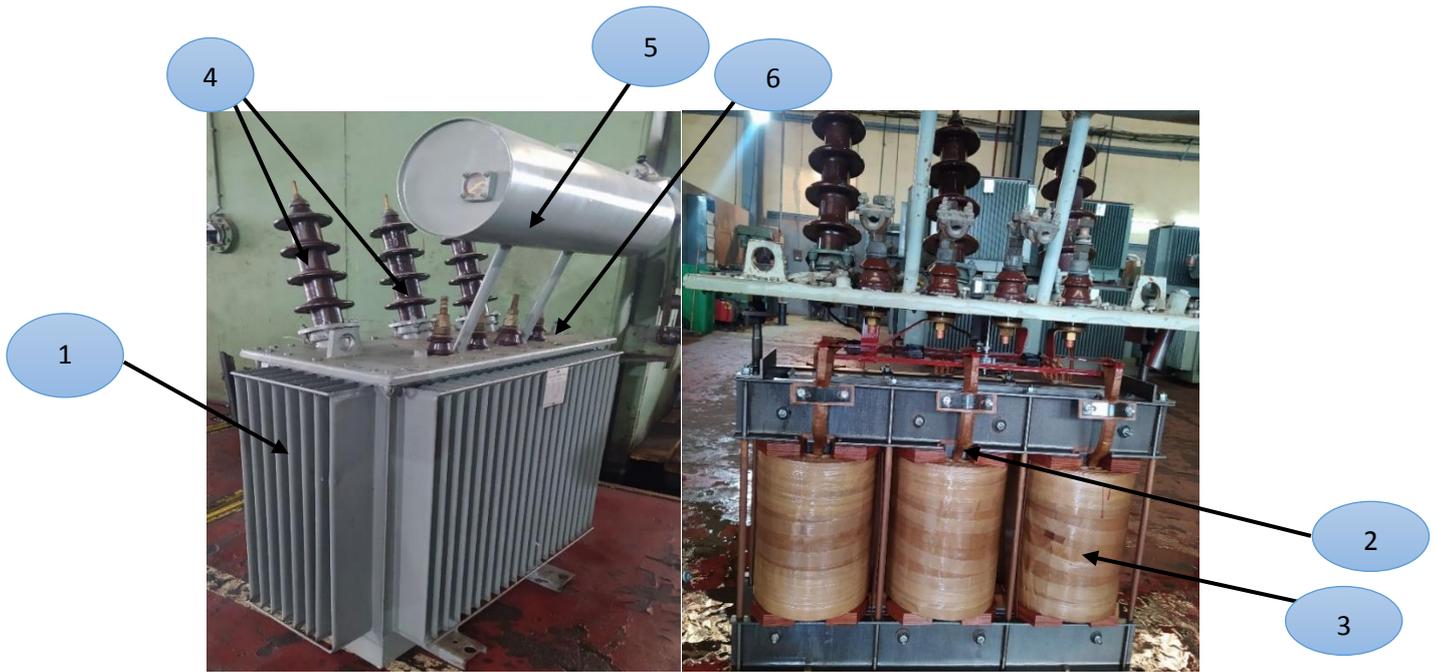
### **I.5. Principaux éléments d'un transformateur**

Les transformateurs de puissance rencontrés dans la pratique sont presque exclusivement triphasés. Ils peuvent être constitués soit d'une unité triphasée, soit de trois unités monophasées. Cette dernière possibilité est généralement utilisée pour les transformateurs de grandes puissances.

Un transformateur de puissance se compose généralement de quatre parties :

- Un circuit magnétique ferme constitué de colonnes et culasses, supérieures et inférieures.
- Un circuit électrique comprenant les enroulements primaires et secondaires et leurs isolations.
- Des organes mécaniques, de support, de manutention, de refroidissement.
- Des organes de sécurité contre les défauts internes et externes à l'appareil.

La construction des transformateurs est fortement influencée par leur système d'isolation. La Photo (I.1) présente la constitution des transformateurs de puissance dont les parties actives sont immergées dans de l'huile. Ce travail est uniquement basé sur ce type de transformateur dans lesquels, l'huile joue plusieurs rôles.



- |                     |                            |                              |
|---------------------|----------------------------|------------------------------|
| <b>1- Cuve</b>      | <b>2- Noyau magnétique</b> | <b>3- Bobinage</b>           |
| <b>4- Traversée</b> | <b>5- Conservateur</b>     | <b>6- Changeur de prises</b> |

**Photo.I.1.** Constitution générale d'un transformateur de puissance.

Les diélectriques (huile, papier, carton) constituant du système d'isolation, n'apparaissent pas dans la photo(I.1). Le tableau(I.1) présente les caractéristiques des principaux organes d'un transformateur de Puissance immergé dans de l'huile.

**Tableau.I.1.** Caractéristiques des principaux organes des transformateurs immergés.

N°	Organes	Caractéristique	Nature
	Cuve	Les surfaces des parois sont, selon les modelés, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectes par une vanne d'arrêt. Elle recueille la partie active du transformateur et le liquide isolant	Tôle d'acier
	Huile Diélectrique	Les parties actives sont noyées dans une huile diélectrique et caloporteur. Elle agit comme agent diélectrique et constitue avec les isolants solides (papier), le système d'isolation du transformateur. Comme agent caloporteur, l'huile assure le refroidissement des parties actives du transformateur. La surveillance des caractéristiques du fluide diélectrique permet d'apprécier l'état général du transformateur.	Huiles minérales, huiles silicone
	Isolants solides	Les isolants solides assurent la rigidité diélectrique et apportent, en plus du noyau, une résistance mécanique globale.	Papiers à base de cellulose, rubans, vernis, bois, résines époxydes, carton,
2	Noyau Magnétique	Constitue d'un matériau de haute qualité dont l'empilage et l'assemblage permet la réduction des masses et de meilleures performances électriques et acoustiques du transformateur.	Tôles d'acier au silicium a grains orientes.
3	Bobinages	Les formes de bobinage, les sections et les nombres de spires sont conditionnes par les contraintes a maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement pour assurer la circulation d'huile du fait des échanges thermiques.	Feuillard ou rond ou méplat de cuivre ou d'aluminium
4	Traversée	Les traversées assurent la liaison du transformateur avec les circuits extérieurs. A l'intérieur des traversées, se trouve un conducteur souple ou une tige. La puissance électrique transite par les traversées. Certaines sont immergées, notamment pour les très hautes tensions, d'autres sont sèches.	Porcelaine, cuivre, alliages de métaux, isolants
5	Conservateur	Il joue un rôle de vase d'expansion pour l'huile diélectrique du transformateur dont le volume varie avec la température.	En acier
6	Changeur de prises en charge ou hors charge	Il permet d'adapter le rapport de transformation du transformateur aux conditions de charge du réseau électrique afin de maintenir la tension a un niveau optimal, en rajoutant ou retranchant des spires à l'enroulement principal.	Ensemble mécanique constitue d'un sélecteur et d'un commutateur.

## I.6. Défauts des transformateurs

Les transformateurs sont dimensionnés pour résister aux contraintes de fonctionnement, conformément aux normes en vigueur. Certaines contraintes pourraient être à l'origine des dysfonctionnements qui impacteraient non seulement les performances, mais aussi la durée de vie des transformateurs. Avant de présenter les différentes contraintes auxquelles les transformateurs peuvent être soumis, les défauts et défaillances qui peuvent s'en suivre, donnons quelques définitions [5]-[6].

- **Contrainte** : Une contrainte est une obligation à respecter qui valide le bon fonctionnement d'un dispositif. Elle peut être évaluée par une valeur seuil à respecter.
- **Défaut** : Un défaut est une modification accidentelle affectant un fonctionnement normal d'un dispositif. Il peut s'observer par des symptômes qui sont des signes qui révèlent leur état (nature).
- **Défaillance** : Caractéristique d'un dispositif qui ne remplit plus avec l'efficacité prescrite, une partie ou la totalité de ses fonctions ou rôles. Elle se matérialise donc par une rupture de service, conséquence d'un ou plusieurs défauts.

### I.6.1. Les contraintes

En fonctionnement normal ou lors d'un défaut, les transformateurs sont soumis à des contraintes électriques, mécaniques, thermiques et environnementales.

- **Contraintes électriques** : Les transformateurs doivent résister aux tensions de fonctionnement mais aussi aux tensions de chocs comme celles de la foudre ou des surtensions de manœuvres. Toute sa partie interne notamment l'isolation diélectrique est donc soumise à des champs électriques qui peuvent induire des défauts.
- **Contraintes thermiques** : Pendant l'exploitation du transformateur, des pertes internes provoquées par des courants de charges, qui augmentent sa température, sont enregistrées. Les hautes températures provoquent l'accélération de la dégradation des matériaux isolants.
- **Contraintes mécaniques** : On peut citer le transport d'un site à un autre, les tremblements de terre ou les défauts de court-circuit qui mettent à l'épreuve la structure du transformateur.
- **Contraintes environnementales** : Les conditions atmosphériques, la foudre, la poussière sont autant de situations qui peuvent altérer le bon fonctionnement du transformateur.

Dans le mécanisme d'un défaut, le non tenu à une contrainte aboutit généralement à l'apparition des signes ou symptômes d'un défaut. Un défaut est le résultat d'une contrainte non contenue.

### I.6.2. Différents types de défauts

Un défaut se manifeste par l'apparition des signes ou symptômes observables par des informations mesurables. Le tableau ci-après présente les principaux défauts observés sur les transformateurs, les contraintes responsables et les causes probables. Le tableau (I.2) présente les principaux défauts observés sur les transformateurs, les contraintes responsables et les causes probables.

**Tableau I.2.** Défauts associés aux contraintes, leurs causes et les éléments concernés.

Causes	Contraintes	Défauts	Symptômes	Éléments Concernés
-Chocs de foudre; -Coupure brutale d'une ligne.	Diélectriques et Surtensions	- Amorçages de Pièces sous tension ; - Défauts d'isolements.	Dégradation visuelle de l'isolant entre spires	-Papier -Huile -Traversées -Enroulements
-Court-circuit; -Mise sous tension des transformateurs -Démarrage des moteurs.	Electrodynamiques et surintensités	-Déformation des enroulements -Dégradation des isolants solides.	-Echauffements des enroulements -Chute de tension aux secondaires	-Enroulement -Papier.
Surcharges	Electriques	-Connexion entre cuivre des enroulements et connexion internes -Connexion au niveau des changeurs de prises.	-Formation des points chauds -Echauffement	-Changeurs de prises ; -Enroulements; -Traversées.
Pertes Joules -Surcharges ; -Problèmes de refroidissement; -Contraintes électromagnétiques et courant de Foucault.	Thermiques	Vieillessement	-Point chaud -Echauffements des enroulements	-Papier ; -Huile.
-Transport des transformateurs; -Tremblements de terre ; -Vibrations.	Mécaniques	Dégradation des isolants internes -Fuites des joints.	-Mauvais alignements des régleurs de Prises -Ecoulements d'huile.	-Régleur de prises ; -Joints ; -Isolants internes.

De manière générale, sont distingués sur un transformateur, des défauts externes et des défauts internes.

**Défauts externes :** Surviennent sur les dispositifs en liaison directe avec le transformateur. Généralement, des protections sont prévues pour l'endommagement du transformateur. Les défauts externes sont :

- Les surtensions et des surexcitations causées par les manœuvres sur les lignes et les générateurs.
- Les court-circuités sur les lignes ou entre ligne et terre.
- Les surcharges, relatives à la sollicitation du transformateur.
- Les surtensions transitoires créent par des contions atmosphériques particulières.
- Les défauts du système externe de refroidissement.

**Défauts internes :** s'observent sur les composantes du transformateur, qui pour la plupart nécessite une analyse particulière afin d'être détectée. On peut citer :

- Les points chauds : échauffement anormal observe sur les dispositifs actifs du transformateur, ils se trouvent généralement sur les régleurs.
- Les court-circuités internes : entre spires, entre enroulements ou entre enroulements et noyau magnétique ou cuve. Dans cette rubrique, peuvent être ajoutés les défauts à la masse.
- Les fuites d'huile : Le transformateur possède de nombreux joints en caoutchouc, typiquement en bas de cuve, à la base des bornes, aux raccords de la réfrigération. Dans le temps, ces joints peuvent se dégrader, se durcir, et provoquer des fuites.

### **I.6.3. Défaillances du transformateur et leurs causes**

La défaillance d'un transformateur peut être considérée comme un évènement non désiré qui se produit, entraînant ainsi la rupture de service d'une ou de plusieurs fonctions du transformateur. C'est donc, d'après la référence [7], la fin de la capacité d'un transformateur à exécuter sa fonction spécifiée. Dans l'étude de la fiabilité du transformateur de puissance, il est souvent difficile de distinguer les défaillances majeures et mineures. Par conséquent, les termes suivants sont donnés : défaillance avec arrêt forcée, défaillance avec arrêt programme et défaut.

Il est utile de rappeler les définitions des termes utilisés, lorsqu'on parle des défaillances sur un transformateur de puissance, telle que le précise la norme IEEE C57 :

- Défaillance avec arrêt forcé : C'est la défaillance d'un transformateur qui nécessite un retrait immédiat du service. Ceci est réalisé soit automatiquement, soit des que les opérations de commutation peuvent être effectuées.

- Défaillance avec arrêt programmé : C'est la défaillance pour lequel un transformateur a été délibérément mis hors service à un moment choisi par l'action de l'opérateur.
- Analyse de la défaillance : C'est un examen logique et systématique d'un élément ou de son diagramme pour identifier et analyser la probabilité, les causes et les conséquences d'une défaillance potentielle et réelle.
- Cause de défaillance : Ce sont les circonstances pendant la conception, la fabrication ou l'utilisation qui ont entraîné une défaillance.
- Mode de défaillance : C'est la manière dont la défaillance se produit. Les modes de défaillance généralement classés comme électriques, mécaniques, thermiques ou par contamination.

### **I.7. Surveillance d'un transformateur**

Suite à l'important rôle qu'il joue au sein d'une installation électrique, le transformateur occupe une place primordiale et critique, c'est l'élément lourd de l'investissement et la moindre défaillance dans l'une de ses parties peut causer de lourdes conséquences sur tous les domaines : technique, financier, commercial, humaine et même environnemental. La surveillance en service des transformateurs doit être donc systématique.

En générale, la vie d'un transformateur est liée à la vie de l'isolation, et cela dépend nécessairement de la rigidité mécanique et électrique des isolations utilisées. La température d'un transformateur a aussi un impact sur la vie de l'isolation. L'évaluation de la durée de vie des transformateurs sert à :

- Surveiller l'état des transformateurs et fournir une détection précoce des défauts.
- Diagnostiquer les problèmes quand les transformateurs montent des signes de détresse, ou pour suivre l'opération de protection de l'équipement.
- Définir si un transformateur répond aux conditions convenables pour affronter les situations inhabituelles [8].

### **I.8. Système de protection**

Tout transformateur est équipé de capteurs et d'un appareillage permettant de détecter tout défaut grave et/ou de protéger contre les conséquences éventuelles qui peuvent survenir. Ces capteurs provoquent une signalisation ou commandent le disjoncteur amont.

Les organes de protection rencontrés sur un transformateur de puissance sont principalement :

- Le relais Buchholz.
- Capteur de défaut ventilation.

- Capteur de niveau d'huile bas.
- Soupape de surpression.
- Temps de passage trop long au niveau des gradins du changeur de prise.
- Détection du défaut de fonctionnement du moteur de commande.
- Les capteurs de température.

Tous ces organes participent à la maintenance du transformateur dans un état de fonctionnement pour qu'il joue pleinement son rôle dans le système de gestion de l'énergie électrique. Tout dysfonctionnement conduirait à l'apparition d'un défaut de fonctionnement et plus tard d'une défaillance du transformateur lui-même si aucune action n'est prise.

### **1.9. Système de refroidissement**

En fonctionnement, le transformateur est le siège de pertes thermiques dans son noyau (pertes fer) et dans ses enroulements (pertes Joule). Cette énergie se manifeste par une augmentation de la température. L'énergie thermique ainsi produite doit être évacuée à l'extérieur de la cuve. Un système de refroidissement est donc associé à la structure du transformateur pour réduire la température produite, très souvent incriminée dans l'accélération du vieillissement du transformateur. On retrouve le deuxième principal rôle de l'huile.

Le système de refroidissement consiste à faire circuler de l'huile dans la cuve. La chaleur produite est véhiculée par circulation naturelle ou forcée du diélectrique (huile), vers les dispositifs de refroidissement. D'importants documents techniques et autres travaux expliquent de manière exhaustive ce processus dont la défaillance impacterait sérieusement le fonctionnement du transformateur [9], [10]. Un transfert de chaleur bien organisé permet d'éviter la présence de zones dont la température locale est particulièrement élevée. Ce transfert se fait en deux étapes : à l'intérieur de la cuve, de la partie active (enroulements, noyau) à l'huile, puis de l'huile au réfrigérant à travers un échange de chaleur externe. Le mouvement du fluide peut donc être soit naturel par thermosiphon, soit forcé au moyen d'un équipement tel qu'une pompe ou un ventilateur. Les tableaux ci-après présentent la symbolisation utilisée pour désigner le mode de refroidissement et l'identification du transformateur selon le mode de refroidissement [10]. . Le tableau (I.2) présente l'identification du transformateur selon le mode de refroidissement.

**Tableau I.3.** Système de refroidissement et symbole.

Système de refroidissement	Symbole
Sec à refroidissement naturel dans l'air	AN
Sec à ventilation forcée	AF
Circulation naturelle d'huile et d'air	ONAN
Circulation naturelle d'huile et ventilation forcée d'air	ONAF
Circulation forcée d'huile et d'air	OFAF
Ventilation forcée d'air et circulation dirigée d'huile	ODAF
Circulation forcée d'huile et d'eau	OFWF

Exemple : Transformateur ONAN(Oil Natural Air Natural) : Transformateur refroidi avec circulation naturelle de l'huile pour les parties internes et de l'air pour les surfaces extérieures.

### I.10. Système d'isolation des transformateurs

Le transformateur permet de créer un isolement électrique en isolant la partie primaire et la partie secondaire du transformateur, donc il ya deux isolations importantes qui aident le transformateur pour la séparation et qui sont l'isolation solide et l'isolation liquide.

#### I.10.1. Isolation solide

Elle est constituée de papiers et de cartons. Le papier sert à l'isolation des enroulements et le carton sert à l'isolation entre les enroulements, et entre les enroulements et le noyau. Le papier et le carton sont imprégnés par le diélectrique liquide (huile) afin d'augmenter leur rigidité diélectrique, donc réduire le risque de décharges partielles. On distingue trois types d'isolation solide [11] :

- Isolation solide conventionnelle : papiers et cartons sont à base de fibres de cellulose.
- Isolation solide haute température : papiers et cartons sont à base de polymères synthétiques (aramide).
- Isolation solide hybride : association des papiers cellulose et aramide.

### I.10.2. Isolation liquide

L'isolation liquide des transformateurs constitués principalement par les huiles végétales, les huiles de synthèse et les huiles minérales, les huiles minérales couvre 90 à 95% du marché des liquides isolants, cela est dû à leur faible coût.

Les transformateurs remplis d'huile (immergés) ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée, dans les transformateurs de puissance contrairement aux transformateurs de distribution qui pouvant être (secs) aussi, différentes raisons expliquent cette préférence [12] :

- Par rapport aux solides, les liquides diélectrique assurent l'isolant et refroidissent à la fois de transformateur, ainsi, les transformateurs immergés sont plus compacts que les transformateurs secs de même puissance.
- Les solides permettent d'obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides mais à des coûts beaucoup plus élevés Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusion gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.
- Les analyses d'huiles permettent de diagnostiquer l'état du transformateur.
- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

### I.11. Conclusion

Le chapitre présent est consacré à la technologie des transformateurs de puissance, aux différents isolants du transformateur. Il ressort de ce chapitre que malgré les recherches sur l'isolation dans le transformateur pour prolonger la durée de vie du transformateur, le problème lié à l'isolation dans ces appareils reste parmi les problèmes qui soulèvent des inquiétudes au niveau des investissements électriques. Le prochain chapitre est consacré à l'étude des paramètres de l'huile et le vieillissement.

# **CHAPITRE II Propriété et vieillissement des huiles isolant des transformateurs**

## **II.1. Introduction**

Les isolants liquides, dans les conditions de leur utilisation, sont soumis à différentes contraintes (thermique, électrique, chimique) qui vont modifier leurs propriétés en fonction du temps. Malgré les avantages qu'elles présentent, les huiles isolant se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de de ces contraintes. Les mécanismes de vieillissement ainsi mis en jeu sont non seulement complexes mais, le plus souvent difficiles à prédire par le manque d'informations sur la composition chimique précise des liquides utilisés.

## **II.2. Huiles diélectriques**

### **II.2.1. Huiles végétales**

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique, la première des applications fût l'imprégnation des condensateurs avec l'huile de ricin. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est à dire un triester sachant que la formule d'un ester est R-COO-R.

### **II.2.2. Huiles synthèses**

Bien que les huiles minérales occupent une place très importante parmi les liquides pour les applications électrotechniques, les huiles de synthèse sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population (transformateurs de distribution et de traction).

### **II.2.3. Huiles minérales**

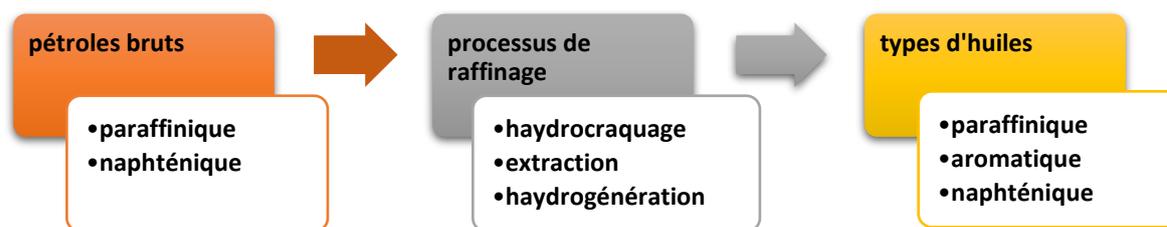
L'huile minérale constitue le liquide isolant le plus communément employé dans les transformateurs de puissance d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût et sa disponibilité [13].

Les huiles minérales sont utilisées pour l'isolation des équipements électriques depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle [13]. Ces huiles sont très sollicitées dans les installations électriques, et dans les transformateurs de puissances pour leurs bonnes propriétés diélectriques et transfert de chaleur, leur bonne compatibilité avec les isolants celluloseux et leur faible coût (ces transformateurs peuvent contenir entre 40000 et 80000 litres d'huile) [14]. Mis à part les transformateurs de distribution soumis à des contraintes de fonctionnement particulières, les transformateurs de puissance sont généralement remplis d'huile minérale. L'huile joue non seulement un rôle d'isolation électrique mais aussi de liquide de refroidissement.

### II.2.3.1. Origine et composition

Les huiles minérales sont obtenues suivant un procédé qui inclut habituellement une distillation suivie d'une opération de déparaffinage, d'une extraction par solvant des molécules indésirables et d'une hydrogénation catalytique.

Les huiles minérales sont obtenues à partir de la distillation de pétroles sélectionnés (distillats), substances naturelle d'origine diverses (gaz léger, sulfure d'oxygéné, eau) figure(II.1).



**Figure.II.1.** Processus de raffinage pour les huiles brutes.

La formule de structure de l'huile minérale et celles des gaz de défaut sont montrées dans le tableau(II.1).

**Tableau.II.1.** Structure de l'huile minérale et ses produits après défaut.

Huile minérale	$C_nH_{2n+2}$
Hydrogène	$H_2$
Methane	$CH_4$
Ethane	$C_2H_6$
Ethylène	$C_2H_4$
Acétylène	$C_2H_2$
Dioxyde de carbone	$CO_2$
Monoxyde de carbone	$CO$
Oxygène	$O_2$
Nitrogène (Azote)	$N_2$

### II.2.3.2. Différentes tendances d'huile minérale

Les huiles minérales de base en électrotechnique répondent à trois grandes classes de tendances chimiques [15]. Elles sont définies par leur teneur en carbone paraffinique Cp, en carbone naphhténique Cn et en carbone aromatique Ca.

#### II.2.3.2.A. Tendances paraffiniques

Dans ce type d'huile, la tendance paraffinique où la présence d'hydrocarbures paraffiniques prédomine. Ces hydrocarbures sont des molécules complexes à structure saturée et à chaîne droite ramifiée ou non, mais non cycliques.

Les caractères de cette famille d'huiles riches en hydrocarbures paraffiniques sont :

- Une faible densité pour une viscosité donnée.
- Une variation relativement faible de la viscosité en fonction de la température.
- Une faible volatilité pour une viscosité donnée.
- Un faible pouvoir solvant.

#### II.2.3.2.B. Tendances naphhténiques

Les huiles naphhténiques sont riches en hydrocarbures naphhténiques, c'est à dire, il y a présence d'hydrocarbures cycliques à liaisons saturées.

Les caractéristiques physiques et chimiques de ces hydrocarbures se traduisent en particulier par :

- Une densité relativement élevée pour une viscosité donnée.
- Des variations assez rapides de viscosité en fonction de la température.
- Une plus grande volatilité que les fonctions paraffiniques correspondantes de même Viscosité.
- Un pouvoir solvant relativement élevé.

Ce type d'hydrocarbures renferme les propriétés les plus recherchées pour les huiles de graissage.

#### II.2.3.2.C. Tendances aromatiques

Ce sont des huiles composées de fonctions à noyaux benzéniques. Ces molécules sont des composés cycliques

Ces huiles se caractérisent par :

- Une densité très élevée, un indice de viscosité très faible, une très faible résistance à l'oxydation.
- Un point d'anilines très basses (soit un pouvoir solvant très élevé) et une facilité d'émulsion avec l'eau.
- L'utilisation de ces hydrocarbures dans la fabrication des huiles est très limitée en raison

de leur altérabilité.

- Ils sont facilement oxydables et provoquent la formation des dépôts résineux asphaltiques accompagnés de dérivées corrosifs. La fabrication d'huiles finies lubrifiantes, isolantes ou autres, est orientée par les tendances des huiles de base.

### II.2.3.3. Critère de choix d'une huile minérale

- Une faible viscosité et un bas point d'écoulement pour assurer sa circulation.
- Un point d'éclair (ou point d'inflammabilité) élevé. Ces huiles possèdent un point éclair bas, entre 140 et 1500 C [16].
- Une bonne stabilité chimique essentiellement vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition.
- Une rigidité diélectrique élevée.

## II.3. Propriété des huiles isolant

Les huiles isolants pour transformateur, quel que soit leur type doivent toujours répondre à plusieurs critères électrique et physique pour assurer deux principale fonction qui sont l'isolation électrique et le Transfer la chaleur.

### II.3.1. Propriété électrique

La permittivité, la résistivité, le facteur de perte, la rigidité diélectrique, sont les caractéristiques électriques principales outre la structure du liquide et le conditionnement ces propriété dépendent de la tension applique de la fréquence et de la température dans l'industrie. Ces mesures sont souvent rapportées à la température moyenne de fonctionnement d'un transformateur soit 90° [17].

#### II.3.1.1. Permittivité

La permittivité est la constante macroscopique fondamentale qui caractérise un diélectrique. Elle est définie par la relation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (\text{I.1})$$

$$\varepsilon_r = C_p/C_0 \quad (\text{I.2})$$

#### II.3.1.2. Conductivité et Résistivité

La conductivité d'un liquide isolant est due à la présence de charges libres. Sous l'effet d'un champ électrique, ces charges se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction. Contrairement à la permittivité qui est exclusivement une caractéristique de constitution de l'huile (intrinsèque).

La résistivité est une propriété fortement dépendante du conditionnement. Ainsi, la résistivité d'une huile est influencée par la présence de substances étrangères considérées

comme impuretés (poussières, particules, gaz, humidité), qui même en quantité aussi faible que quelques ppm ont une influence sur les valeurs mesurées.

Plus la température est élevée, plus la viscosité du liquide est faible et plus la mobilité des ions est grande [18], et par conséquent plus la conductivité est élevée. Par ailleurs, la dissociation des impuretés dissociables en ions est d'autant plus forte que la température est élevée.

### II.3.1.3. Rigidité Diélectrique

La rigidité diélectrique (V/m) est le champ électrique minimal qui provoque le claquage d'un matériau. Le claquage d'un liquide conduit à la décomposition de ses molécules par rupture des liaisons chimiques entre les atomes. La présence d'eau n'affecte pas la rigidité d'un liquide tant que la concentration reste inférieure à 50 - 60 % de la saturation. Par contre, lorsque la teneur en eau dépasse cette valeur, on observe une chute drastique de la tension de claquage.

La rigidité diélectrique moyenne  $E_C$ , d'une huile est la valeur maximale du champ électrique qu'on peut lui appliquer sans décharge, entre deux électrodes. Elle est donnée par la relation suivante :

$$E_C = U_C / e \quad (I.3)$$

Dans l'industrie, on parle surtout de la tension de claquage d'un matériau pour définir sa tenue diélectrique. On désigne ainsi l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles conduisant à l'apparition soudaine d'un arc électrique qui traverse l'isolation. Les solides ont généralement une tension de claquage supérieure à celles des liquides, et les liquides une tension de claquage supérieure à celle des gaz. Pour cette raison, on évite la présence de gaz, et le liquide, comme dans le cas des transformateurs, est la partie faible des isolations imprégnées.

### II.3.1.4. Facteur de dissipation

Le facteur de dissipation ou facteur de pertes ( $\tan \delta$ ), qui est une valeur adimensionnelle, est directement lié à la résistivité et la permittivité en tension alternative. condensateur C et résistance en parallèle R. Elle est donnée par la relation suivante [19] :

$$\tan \delta = 1/R.C \quad (I.4)$$

En situation idéale, c'est à dire pour un isolant parfait ( $\sigma = 0$ ), la différence de phase  $\varphi$  entre la tension appliquée et le courant qui en résulte est :  $\varphi = \pi/2$ .

Le facteur de dissipation se définit comme la tangente de l'angle de perte, c'est à dire l'angle pour lequel la différence de phase entre la tension appliquée et le courant qui en

Le facteur de dissipation se définit comme la tangente de l'angle de perte, c'est à dire l'angle pour lequel la différence de phase entre la tension appliquée et le courant qui en résulte dévie de  $\pi/2$ . lorsque le diélectrique du condensateur se compose exclusivement du liquide isolant, considéré comme parfait. En effet, en situation réelle,  $\varphi + \delta = \pi/2$ , où  $\delta$  est appelé angle de perte ( $\delta$  est le complémentaire de l'angle de déphasage entre le courant et la tension). Plus ce dernier est élevé, plus les pertes diélectriques seront élevées.

### **II.3.2. Propriétés Physique**

Les propriétés physiques des huiles isolantes ont une importance dans le traitement et la surveillance des transformateurs de grande puissance, comme les autres propriétés.

#### **II.3.2.1. Densité**

Dans les climats froids, il est important de spécifier la densité de l'huile pour éviter la création de glace flottant dans l'huile a basse température. Ce phénomène peut se produire en présence de l'eau libre dans les transformateurs hors tension et peut provoquer des pannes lors de la mise en service.

#### **II.3.2.2. Aspect**

C'est un critère de qualité qui permet de détecter la présence de corps étrangers en suspension dans l'huile : poussières, humidité, fibres,....etc. ce n'est pas une propriété intrinsèque de l'huile mais un contrôle visuel effectuée sur l'huile pour évacuer son degré de pollution physique [20]. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide.

#### **II.3.2.3. Viscosité**

La viscosité d'une huile est un paramètre important pour le refroidissement. Il n'est jamais avantageux d'utiliser des huiles à viscosité élevée, parce que plus la viscosité est élevée, moins les capacités de refroidissement sont performantes. C'est les températures de fondement les plus élevées et les pertes importantes qui provoquent une détérioration plus rapide de l'huile et du papier. C'est pour quoi une huile naphthenique est préférable [21].

#### **II.3.2.4. Point d'éclair**

Le point d'éclair est la plus basse température de l'huile pour laquelle, les vapeurs émises par celle-ci, a l'approche d'une flamme, provoquent un flash sans que la combustion ne continue. Cette propriété renseigne sur la présence de certains hydrocarbures gazeux dissous dans l'huile suite à un défaut électrique ou thermique [16,17].

### **II.3.3. Propriétés chimiques**

L'étude des caractéristiques chimiques d'un liquide diélectrique, est très importante car d'une part, elle permet de connaître les composantes réelles qui constituent ce dernier et

d'autre part, elle nous renseigne sur l'état d'évolution de ce liquide et son aptitude à remplir ses fonctions principales, à savoir l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur.

### **II.3.3.1. Indice de couleur**

La couleur est une propriété intrinsèque d'huile neuve. Elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile. Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service. Elle renseigne également sur le vieillissement d'huile puisque celle-ci devient plus foncée avec l'Age [22].

### **II.3.3.2. Indice d'acidité**

L'acidité représente les dérives acides formes au cours du vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de l'huile, ainsi que de décider du moment où elle doit être mise hors service. Cette dernière est exprimée par la masse de l'indice d'acidité qui est le nombre de mg de KOH normale nécessaires pour neutraliser un gramme d'huile.

L'acidité d'une huile neuve est très faible en service. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg KOH /g d'huile en service selon la norme CEA 296 [23]. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante. Cette stabilité s'explique par les dépôts qui précipitent [24,25].

### **II.3.3.3. Teneur en eau**

La présence d'eau dans une huile est indésirable et considérée comme un polluant Potentiel qu'il faut éliminer et éviter. Ce paramètre permet de déterminer s'il y'a condensation ou infiltration d'eau à l'intérieur du transformateur, il est très important car la présence d'eau conduit à une perte de la capacité diélectrique de l'huile.

Les inconvénients de la présence de l'eau dans l'huile de transformateur sont multiples :

- Elle joue le rôle de catalyseur dans le processus d'oxydation de l'huile en Service
- Elle influe défavorablement sur certaines caractéristiques comme la rigidité, les pertes diélectriques et la résistivité.

La teneur en eau d'une huile isolante donne une idée de la teneur en eau des isolants Cellulosique. Une teneur en eau trop élevée de l'huile indique que le papier contient également de l'eau ce qui provoque son vieillissement, donc déclencher la décomposition des fibres, ce qui conduira à des dégâts irréversibles pouvant provoquer une panne électrique dans le transformateur [13,26].

#### II.3.3.4. Indice de réfraction

On appelle réfraction, le changement de direction que subit un rayon lumineux en passant d'un milieu optique à un autre. Ce changement est dû à une modification de la vitesse de propagation à partir du point, appelé point d'incidence, où le rayon lumineux incident frappe l'interface. La détermination de l'indice de réfraction peut permettre de [27] :

- Déterminer la composition d'un mélange (fraction molaire).
- D'identifier la nature de l'huile : naphthénique ou paraffinique.

#### II.4. Définition du vieillissement

On appelle vieillissement, tout phénomène se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau. Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie. Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis à cause de la complexité de la composition chimique du matériau [28-29]. Le degré de vieillissement d'un isolant et sa vitesse d'accélération dépendent des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et la durée de la contrainte appliquée, ainsi que du processus et des traitements au cours de sa fabrication [30-31]. Le processus de dégradation d'un isolant liquide met souvent en jeu des facteurs extrinsèques tels l'atmosphère et la température qui ont pour effet la présence des gouttelettes d'eau, des bulles gazeuses et des contaminants et impuretés [32-33].

#### II.5. Vieillissement du papier - Mécanismes de dégradation

La détérioration du papier résulte principalement de la détérioration de la cellulose. Cette détérioration est normalement associée à la pyrolyse, à l'oxydation et à l'hydrolyse qui se produisent dans les matériaux [34- 35]. Ces trois réactions entraînent la rupture des macromolécules de la cellulose et réduisent le degré de polymérisation moyen. Elles sont accélérées par toute augmentation de la température, de la concentration en oxygène et du taux d'humidité. Comme le confirme Green [36], les tendons d'Achille du papier sont la température et l'humidité, la cellulose peut se dégrader rapidement aux températures supérieures à 90 °C [34- 37] :

-La pyrolyse ou thermolyse : la dégradation thermique de la cellulose provoque la coupure des liaisons glucosidiques et l'ouverture des anneaux de glucose. Les produits majoritaires formés sont des molécules de sucre libre, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et H<sub>2</sub> ; La Pyrolyse n'affecte sensiblement les qualités mécaniques du papier qu'au-dessus de 150 °C [38].

-L'oxydation qui 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, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et H<sub>2</sub>.

-L'hydrolyse qui 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 oxydation contribue à augmenter l'hydrolyse.

Il faut noter qu'en dessous de 140 °C, il devient difficile de distinguer les trois mécanismes précédents. Dans ce cas, la dégradation du papier est due à l'action combinée de l'oxygène ou de l'eau, exaltée par la température.

## **II.6. Vieillissement du complexe huile/papier**

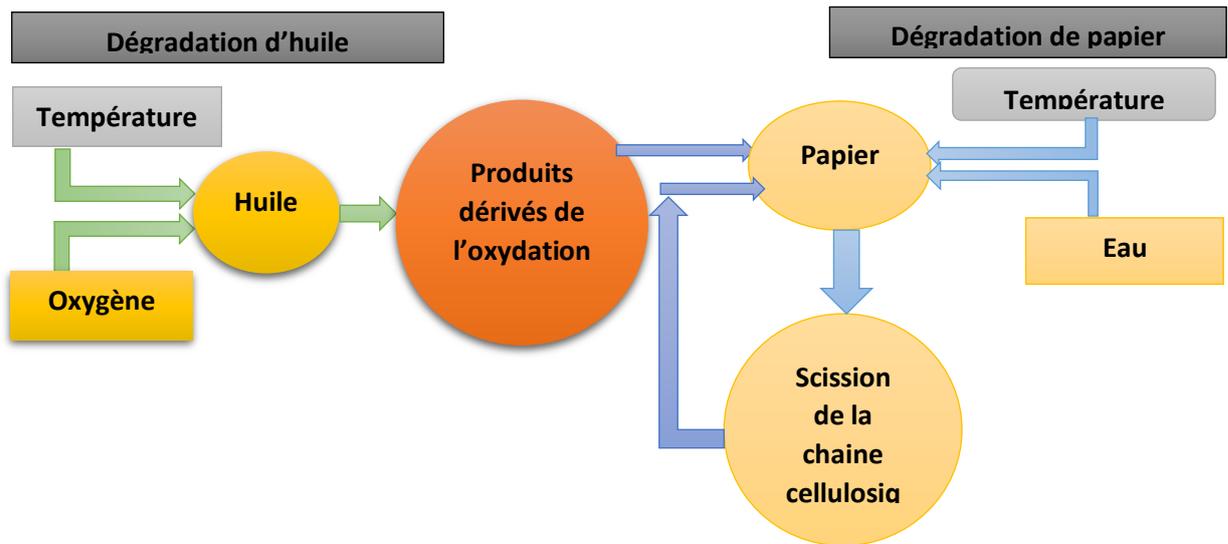
Pour chaque composante du complexe, les phénomènes de vieillissement thermique restent essentiellement les mêmes. Cependant, il a été constaté [34] que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement du papier soit par leur action propre, soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile ; par exemple, la vitesse de dégradation du papier peut être 10 fois plus rapide dans l'huile que dans un diélectrique.

L'eau accélère fortement le vieillissement, car elle se fixe principalement dans le papier. L'effet de l'air n'est pas toujours mis en évidence, car l'oxygène réagit surtout avec l'huile.

Dans les transformateurs de puissance, ce n'est pas toujours le comportement électrique qui est le plus difficile à maîtriser, mais c'est l'interaction de toutes les autres contraintes, conduisant pendant une durée limitée ou non, avec des répétitions possibles, à augmenter les contraintes sur les isolations. Les contraintes susceptibles d'affecter le bon fonctionnement des équipements électriques sont au nombre de quatre :

- Contraintes électriques (décharges partielles, courts-circuits, surtensions de Manoeuvres ou atmosphériques, etc).
- Contrainte mécanique (régimes transitoires, surcharges, vibrations, etc).
- Contraintes thermiques (effet joules, courant de Foucault, pertes magnétiques et diélectriques, etc.).
- Contraintes chimiques (humidité relative, eau, oxygène, etc).

La figure (II.2) ci-après illustre le mécanisme de dégradation interactive entre le papier et l'huile.



**Figure.II.2.** Schéma du mécanisme de la dégradation huile/papier.

## II.7. Différents type de vieillissement

### II.7.1. Vieillissement électrique

Si le matériau est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation de radicaux libres, ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il s'ensuit une dégradation généralisée ou très localisée (arborescences électrique) des isolants. En présence d'humidité, d'impuretés ioniques et sous l'influence de la température, des réactions électrochimique peuvent conduire à une dégradation des propriétés du matériau. [39]

### II.7.2. Vieillissement thermique

On appelle vieillissement thermique tout phénomène traduisant une évolution qui ne fait intervenir que le matériau, l'atmosphère et la température. Il peut faire intervenir des phénomènes physiques et des phénomènes chimiques, et il résulte d'une oxydation de chaînes carboniques qui entraîne une augmentation des pertes diélectriques et une chute des caractéristiques physico-chimiques.

L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant liquide tel que l'huile Pour transformateur a deux buts principaux :

- Le premier est d'évaluer la durée de vie de ces isolants sous l'effet des contraintes thermiques.
- le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le processus de vieillissement et les contraintes qui le provoquent.

## **II.8. Cause des vieillissements d' diélectrique**

Les principaux agents présents dans le transformateur, susceptibles de dégrader les huiles et le papier isolant, sont l'oxygène et l'humidité. L'oxygène est présent sous forme dissout dans l'huile et l'humidité est présente dans le papier même après le séchage des parties actives. Ces sources de vieillissement sont plus présentes dans les transformateurs respirant en contact avec l'atmosphère par l'intermédiaire d'un conservateur et d'un as sécheur.

L'oxygène et l'humidité amènent la dégradation de l'huile par oxydation et par hydrolyse. A ces deux facteurs de vieillissement naturel, s'ajoutent deux facteurs non négligeables qui sont la température (pyrolyse) et le champ électrique

### **II.8.1 Oxydation**

De nombreuses études ont été publiées sur l'oxydation des huiles minérales en fonction de leur origine (paraffinique, naphthénique, aromatique). L'oxydation des huiles minérales est un processus chimique progressif pendant lequel des molécules d'hydrocarbures sont attaquées par l'oxygène pour former divers produits oxygénés comme des hydro peroxydes, des alcools et des acides organiques.

L'oxydation est initiée par la formation d'hydro peroxydes et de peroxydes qui réagissent ensuite pour produire des alcools, des cétones, des aldéhydes puis des acides. La vitesse de réaction de ces processus oxydatifs est augmentée en présence de catalyseurs métalliques tels que le cuivre et le fer. Les produits d'oxydation sont polaires, ils accroissent ainsi la solubilité de l'eau ainsi que la conductivité et le facteur de dissipation diélectrique de l'huile. Au cours de l'oxydation, les molécules aromatiques présentes dans l'huile minérale (en proportion variable suivant leur origine) conduisent, par polymérisation radicalaire, à la formation de dépôts.

### **II.8.2. L'humidité**

Avant le remplissage du transformateur, l'huile est sèche pour atteindre une faible teneur en humidité (ou teneur en eau). A partir de ce moment, cette teneur en humidité va continuellement augmenter pour différentes raisons. Les deux principales sources d'augmentation de la teneur en eau de l'huile sont la pénétration de l'humidité provenant de l'atmosphère du fait que les transformateurs sont majoritairement respirant et de la dégradation de la cellulose qui apporte de l'eau bien que tous les isolants cellulose soient secs, il subsiste toujours des traces d'humidité (0,2%).

### II.8.3. Décharges partiales

Sous l'effet du champ électrique et des inhomogénéités locales (gaz, humidité, particules), il peut apparaitre des micro-décharges qui décomposent l'huile en générant des gaz . A long terme, ces décharges peuvent devenir nocives si elles tendent à se fixer sur les isolants solides imprégnés et parviennent à un niveau suffisant pour les détériorer.

### II.8.4. Température

Comme on l'a vu précédemment, la température agit comme un catalyseur d'oxydation, c'est aussi un facteur qui dégrade peu à peu les huiles isolantes. On parle souvent de stabilité chimique pour définir le comportement du produit à température élevée, en faisant abstraction de toute autre contrainte telle que l'oxydation, l'hydrolyse ou les décharges partielles. L'effet de la température sur le vieillissement d'une huile est souvent défini comme la pyrolyse. Dans les conditions normales d'utilisation des transformateurs, la stabilité des liquides isolants est largement suffisante. La température agit comme catalyseur et non comme déclencheur, cependant, il peut avoir des points chauds dans le transformateur qui dégradent l'huile.

### II.9. Vieillissement des accessoires

Le vieillissement étudié jusque-là concernait la partie principale du transformateur de puissance. L'état des accessoires tels que les changeurs de prise en charge ainsi que des bornes de traversées constituent également des paramètres importants pour évaluer la capacité de service d'un transformateur. Comparés à l'ensemble du transformateur, leurs coûts sont modérés, mais leurs défaillances peuvent entraîner la destruction de tout le système. Ces éléments n'interviennent donc pas de manière déterminante dans l'évaluation globale du vieillissement du transformateur, mais du fait de leur importance stratégique, ils nécessitent une maintenance régulière. Au niveau des changeurs de prises en charge, le vieillissement est essentiellement mécanique et diélectrique (qualité de l'huile). Pour les bornes de traversées, qu'elles soient sèches ou remplies d'huile, seule la dégradation de l'isolation est prédominante.[40]

**II.10. Conclusion**

Les transformateurs de puissance contiennent plusieurs isolants solides et liquides pour les aider à remplir leurs fonctions. Les isolants liquides auxquels appartiennent les huiles minérales, et du à leur composition et leurs propriétés chimiques et physiques sont considérés comme les liquides isolants les plus importants et qui jouent un rôle efficace dans les transformateurs. Ainsi Il existe une relation importante entre le vieillissement et les isolants liquides et solides, car nous en avons discuté plusieurs types (Contraintes électriques, physiques, mécaniques et chimiques) qui altèrent son système d'isolation.

# **Chapitre III Techniques expérimentales**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les essais effectués sur l'huile de transformateur. Des essais de vieillissement thermique à température 120°C. pour voir les variations des propriétés de l'huile. C'est essais réalisés au laboratoire des traitements des huiles UTH SADEG/Blida.

### III.2. Essais de vieillissement de l'huile

#### III.2.1. Préparation des échantillons

##### III.2.1.1. Présentation de l'huile

Nous avons effectué nos essais sur l'huile neuve utilisée par le laboratoire des traitements des huiles SADEG/Blida, cette huile est commercialement appelée power oil, ses caractéristiques principales sont données au tableau (III.1).

**Tableau.III.1.** Caractéristique de l'huile power oil.

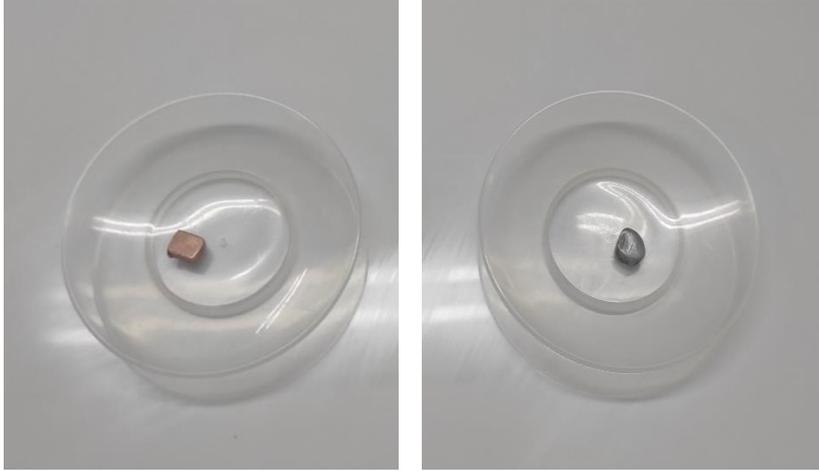
Propriété de l'huile	Unité	Valeur mesuré
Aspect	Limpide	/
Teneur en eau	Ppm	30.4
Indice d'acidité	mgKOH/g	0.023
Indice de couleur	/	<0.5
Facteur de dissipation	/	0.004
Résistivité	GΩ.m	135.85
Conductivité	/	35.4
Permittivité relative	/	3.40
Tension de claquage	KV	20.5
Densité	/	0.886
Viscosité	mm <sup>2</sup> /s	7.384

##### III.2.1.2. Procédés d'échantillonnage

Le prélèvement des échantillons d'huile a été effectué conformément aux recommandations de la norme (CEI 60475) [41].

Avant commencer l'essai de vieillissement de l'huile, on a préparé trois flacon en verre rempli de l'huile neuve en volume de 1 litre, Le 1<sup>er</sup> avec une pièce en cuivre de (3 g), photo(III.1) le 2<sup>eme</sup> avec une pièce en fer aussi de 3 g, photo (III.2), qui sert comme catalyseur

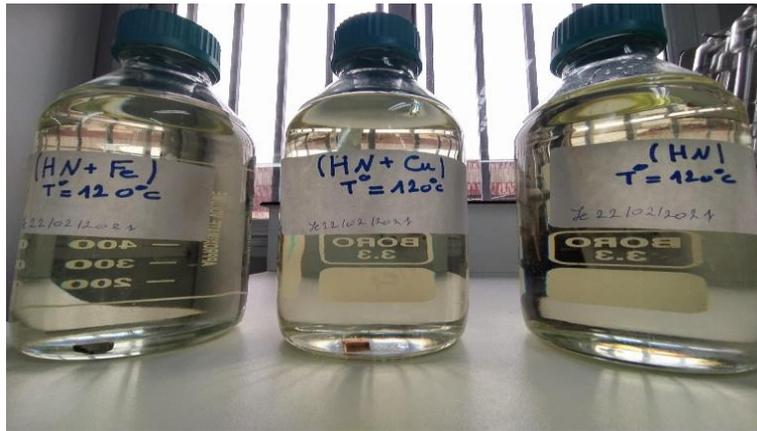
ou bien accélérateur de vieillissement et le 3<sup>ème</sup> flacon contient seulement d'huile neuve . Puis provoquer un vieillissement thermique à l'aide d'une étuve .afin pour l'étudier la dégradation de trois flaquant.



**Photo.III.1.** Pièce en cuivre (3g). **Photo.III.2.** Pièce en fer (3g).

Les étapes de la procédure citées ci-dessous ont été respectées pour différent échantillon :

- Décontamination et nettoyage des bouteilles.
- Laver les bouteilles de prélèvement avec un produit de nettoyage.
- Rincer avec de l'eau distillée plusieurs fois pour décontaminer des particules.
- Mettre les bouteilles de prélèvement dans une étuve pour séchage à 120°C.
- Garder les bouteilles de prélèvement fermées.
- Mélanger l'huile présente dans la bouteille de prélèvement doucement (pour éviter les bulles gazeuses) afin d'avoir une huile homogène.
- Trois échantillons ont été préparés pour chaque type d'huile avec catalyseur photo(III.3).



**Photo.III.3.** L'échantillon du l'huiles.

### III.2.2. Vieillessement thermique de l'huile isolant

Les trois flacons (d'huile neuve avec pièce en cuivre huile neuve avec pièce en fer et de l'huile neuve) ont été dans une étuve à 120°C pendant un temps aillent jusqu'à 672 heures en continue. Les prélèvements sont effectués chaque 48h et 120h pour mesurer les différentes caractéristiques : l'aspect, la teneur en eau, l'indice d'acidité, l'indice de couleur, le facteur de dissipation, la permittivité relative, la résistivité, la conductivité, ainsi voir la variation de ces caractéristiques en fonction de la température et le temps.



**Photo.III.4.** Les échantillons dans une étuve à 120°C.

### III.3. Dispositifs pour les mesures des propriétés de l'huile

#### III.3.1. Mesure de l'indice de couleur

La surveillance de couleur et de l'aspect visuel de l'huile isolante fournit une évaluation rapide de la qualité d'huile.

La coloration d'une huile neuve est une indication de son degré de raffinage est déterminée en lumière transmise, exprimée par un indice obtenu par comparaison avec une série de couleurs de verres étalon ou celui dont la couleur est juste supérieure est pris comme valeur de cet indice, L'indice de couleur est mesuré selon la norme ASTM D1500[42], L'appareil utilisé pour cette mesure est un colorimètre, de type PFX 195 Photo(III.5).

Les instruments LOVI bond PFX 195 sont des colorimètres spectrophotométriques de haute précision conçus pour la mesure objective des couleurs de liquide transparent ces instruments automatiques faciles à utiliser et éliminent toute subjectivité dans les méthodes de mesure visuelle sont conçus pour répondre aux spécifications d'analyses chromatiques d'échantillons luminescents.



**Photo.III.5.** Appareil colorimètre pour la mesure de la couleur.

Avant la mesure il faut rincer la cuve en verre avec l'huile à utiliser, après les mesures sont lancées avec une touche unique (READ) et s'effectuent en moins de 25 secondes, les mesures peuvent être également affichées sous forme de données spectrales et de valeurs CEI.

### III.3.2. Mesure de la teneur en eau

La présence de l'humidité est très néfaste pour les propriétés diélectriques de l'isolation, en particulier elle affecte la rigidité diélectrique de l'huile et celle du papier. Typiquement sa valeur doit être inférieure à 10 ppm pour l'huile minérale neuves avant la mise en service du

transformateur CEI60296 [43]. La teneur en eau est rapportée dans les unités des parties par million qu'on note (ppm).

Le titreur automatique Karl Fischer 756 Coulometer, commercialisé par la société Metrohm, est utilisé pour déterminer la teneur en eau de nos échantillons.

La photo(III.6), représente le dispositif expérimental que nous avons utilisé au laboratoire UTH Blida SADEG SONALGAZ .



**Photo.III.6.** Titreur Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau.

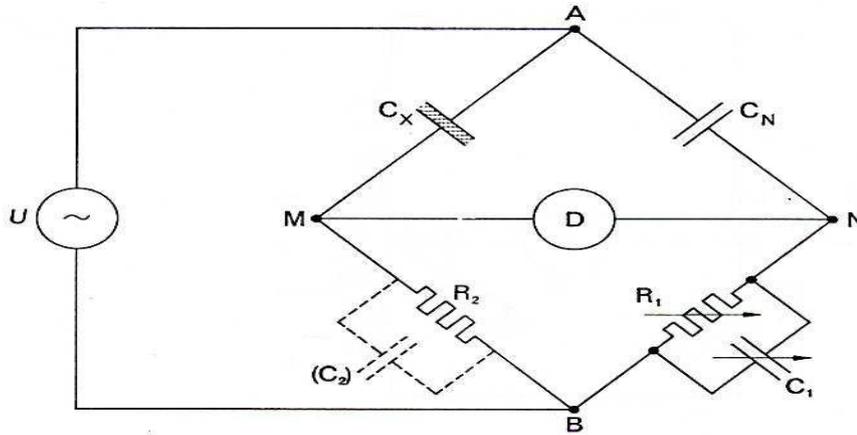
On commence par rincer la seringue avec l'huile à tester puis on prend un échantillon d'huile et on la pose sur la balance pour mémoriser la valeur indiquée à l'aide de la touche 'TARE', puis appuyer sur la touche START en même temps quand on injecte une quantité d'huile dans le vase de titrage. Peser une deuxième fois la seringue et introduire la différence de poids via le clavier de commande du colorimètre et valider avec la touche 'entré'.

### III.3.3. Mesure du facteur de dissipation à 90°C

Le facteur de dissipation des huiles isolantes est une propriété de grande importance, car elle constitue un moyen de détermination de la concentration des porteurs de charges qui détériorent la principale fonction diélectrique du liquide. Si la concentration des porteurs de charges excède une certaine limite (valeur critique) sous contrainte électrique, une panne latente peut survenir dans le transformateur. Une faible valeur du facteur de dissipation indique de faibles pertes diélectriques et un faible niveau de contaminants ioniques polaires solubles ou colloïdaux. Ces caractéristiques constituent un moyen de contrôle de qualité et un indicateur

des modifications de l'huile en service résultant d'une contamination ou de la détérioration de l'huile.

Le facteur de pertes diélectriques ( $\text{tg}\delta$ ) et la permittivité relative ( $\epsilon_r$ ), sont mesurés à l'aide d'un pont de Schering, dont le schéma de principe est sur la Figure(III.1) suivante :



**Figure.III.1.** pont de shring.

Le facteur de perte diélectrique ( $\text{Tan } \delta$ ) est mesuré selon la norme CEI 247 [44].

L'appareil utilise est un pont automatique de type DIELTEST-DTL, photo(III.7).



**Photo.III.7.** Appareil tangent delta de mesure du facteur de dissipation.

Dans un premier temps il faut procéder au rinçage de la cellule et pour cela remplir cette dernière avec de l'huile à tester puis appuyer sur le bouton d'évacuation Verser une deuxième fois l'huile dans la cellule fermer le capot régler l'appareil sur la norme CEI 247 et lancer la séquence de test. Cette séquence comprend un chauffage progressif de l'huile jusqu'à atteindre

une température de 90°C l'appareil effectue automatiquement les différentes mesures ensuite imprime et affiche les résultats.

#### III.3.4. Mesure de l'indice d'acidité

L'indice d'acidité ou Le nombre de neutralisation du fluide isolant augmente principalement tant que l'huile s'oxyde. La mesure du (IA) permet la surveillance du processus d'oxydation de l'huile. Plus la valeur du (IA) est élevée, plus l'ampleur de l'oxydation est grande et plus tôt les produits solubles et colloïdaux se formeront. Le nombre d'acidité total se traduit par la quantité de composés acides dissous dans l'huile et s'exprime en mgKOH/g. Pour une huile neuve, l'indice est inférieur à 0.03mgKOH/g selon la norme [CEI 60296][43]. La mesure de l'acidité est réalisée par un procédé chimique simple appelée la neutralisation. La valeur de L'acidité est exprimée en nombre de mg d'une solution de d'hydroxyde potassium (KOH) normalisée à 0,1 nécessaire pour neutraliser un gramme de l'huile.

Le calcul de l'indice d'acidité se fait selon l'équation suivante :

$$IA = 5.6(V_2 - V_1)/m \quad (III.1)$$

Mode opération :

- Solvant (Ethanol + toluène + eau distillé)
- KOH : Solution d'Hydroxyde de potassium (0.1N).
- Bleu alcalin.
- Solution de titrage : Mélanger le solvant avec l'huile.
- Solution indicatrice : bleu alcalin dissous dans 100 ml de solvant.

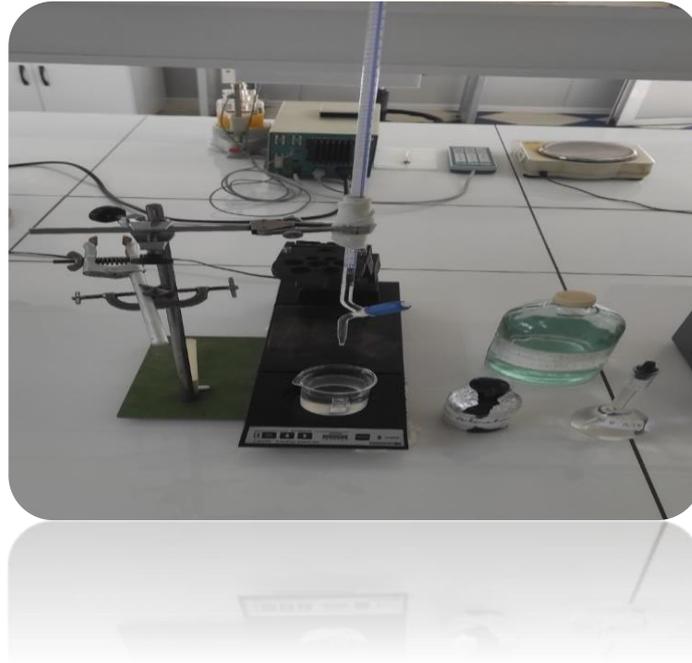
L'essai consiste à suivre les consiste à suivre les étapes suivant :

- Verser 50 ml de solution de titrage dans erlenmeyer.
- Neutraliser le (contenu dans la solution de titrage) avec KOH 0.1N.

Ajouter à la solution ainsi obtenue la prise d'essai .

Neutraliser avec KOH jusqu'au virage.

Noter le volume de KOH versé.



**Photo.III.8.** Dispositif de titrage pour la mesure de l'indice d'acidité.

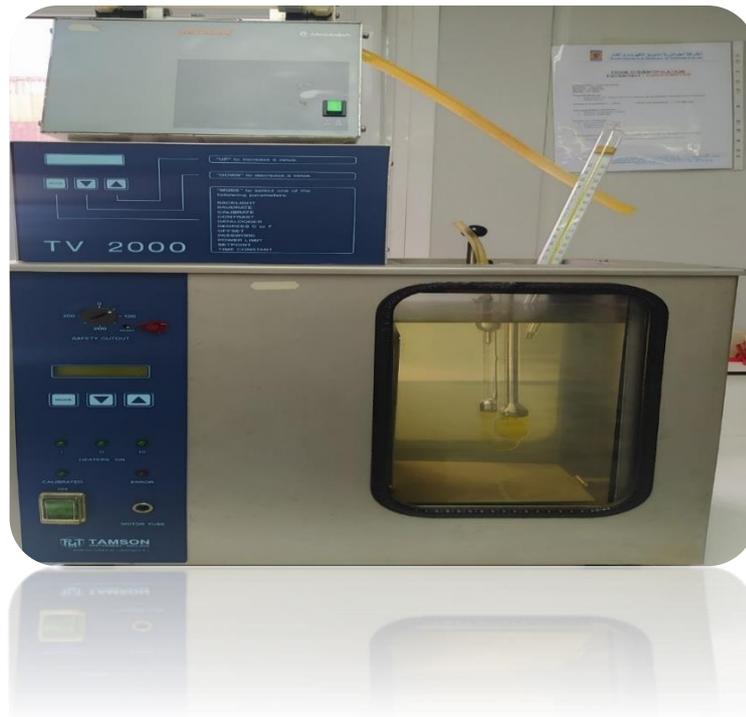
### III.3.5. Mesure de la viscosité

La fonction transfert de chaleur d'une huile dépend de la viscosité de cette dernière, de la viscosité est un paramètre essentiel qui rentre dans le dimensionnement et la conception des systèmes de refroidissement par convection naturelle dans les petits transformateurs auto refroidis ou par écoulement forcé dans les grandes unités (transformateurs de puissance) utilisant des pompes et des radiateurs.

La viscosité de l'huile est définie comme sa résistance à l'écoulement. C'est une caractéristique essentielle pour les liquides isolants. La viscosité cinématique est calculée à partir du temps nécessaire à l'écoulement du fluide entre les deux repère multiplie fois la constant formule exprimer par le formule suivante :

$$v = c \cdot t \quad (\text{III.2})$$

La viscosité est mesurée selon la norme ISO 03104 [45], au moyen d'un appareil appelé viscosimètre, photo(III.9), de type TAMSON (PMT). La mesure est réalisée à 40°C selon la norme [44].



**Photo.III.9.** Appareil de mesure la viscosité cinématique.

### III.3.6. Mesure de la tension de claquage

La tension de claquage est importante en tant que mesure de l'aptitude d'une huile à résister aux contraintes électriques.

Une huile sèche et propre est caractérisée par une tension de claquage élevée inhérente. L'eau libre et les particules solides, associées à des teneurs en eau dissoute élevées, ont tendance à migrer vers des régions à fortes contraintes électriques et à réduire sévèrement la tension de claquage.

Par conséquent, la mesure de la tension de claquage sert, en premier lieu, à indiquer la présence d'agents contaminants, tels que l'eau ou les particules conductrices, dont l'une des deux ou d'autres pouvant être présentes avant les essais, donnent de faibles valeurs de la tension de claquage. Cependant, une tension de claquage élevée ne constitue pas un indice formel de l'absence d'agents contaminants.

Pour mesurer la tension de claquage, nous utilisons un SPINTERMÈTRE de type OTS 80 AF/2, photo(III.10)

L'échantillon est versé dans la cuve puis soumis à une tension entre deux électrodes, entre chaque test, on élimine les produits de décomposition apparaissent entre les deux électrodes, pendant le test.



**Photo.III.10.** Appareil de mesure de la tension de claquage (spintermètre).

### III.3.7. Mesure de la densité

C'est une caractéristique qui dépend de la constitution chimique de l'huile. Pour les huiles isolantes elle se situe entre 0.8 et 0.9 à 20°C. La densité d'huile est déterminée au moyen d'un « densimètre ». On introduit soigneusement ce dernier dans une éprouvette remplie d'huile à analyser, ensuite la lecture de la valeur de la densité correspondante se fait selon la norme ISO 12185 [46].



**Photo.III.11.** appareillage de mesure de la densité.

### III.3.8. Mesure de la conductivité

Le conductimétrie pour un isolants liquides est conforme à la norme CEI 61620 [47]cet instrument est basée sur la méthode de l'onde rectangulaire alternatives à basse tension et a basse fréquence et permet la mesures précise de la conductivité volumique et de la permittivité relative sur une large étendue de mesures sans affectation de l'équipement thermodynamique de liquide examine.



**Photo.III.12.** Conductimètre CEI61620.

### III.3.9. indice de réfraction

L'appareil utilisé pour cette mesure est un refractomètre de type CONVEX, Photo(III.13) qui nous permet de déterminer la nature d'huile analysée : naphénique ou bien paraffinique, à l'aide de la réfraction de la lumière atmosphérique dans l'échantillon.



**Photo.III.13.** Appareil utilisé pour déterminer l'indice de réfraction.

#### III.4. Conclusion

L'analyse et le suivi de l'huile permettent de prévenir les risques de sa dégradation au niveau du transformateur et d'assurer son bon fonctionnement.

Dans ce chapitre on a cité les essais réalisés au laboratoire des traitements des huiles SADEG/Blida. Ce qui nous permet de connaître l'état de l'huile pour voir la variation de ces caractéristiques en fonction de la température et le temps.

## **Chapitre VI Résultats et discussions**

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux réalisés au laboratoire des traitements des huiles UTH SADEG/Blida. Ces résultats des propriétés électriques et physico-chimiques des huiles neuves après un vieillissement thermique de 672 heures avec deux catalyseur (cuivre, fer) à une température de 120°C.

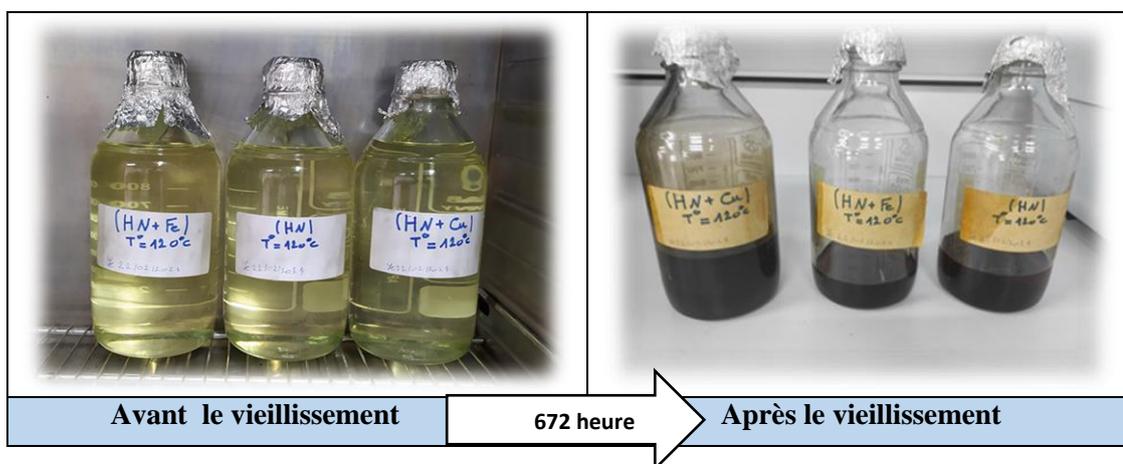
### IV.2. Vieillissement thermique

Les propriétés électrique et physico-chimiques ont été mesurées pour détecter les changements après un stress thermique. Pour cela les différents aspects et les variations du facteur de dissipation, l'indice d'acidité, la teneur en eau, l'indice de couleur et la conductivité, la résistivité, la permittivité vont être présentée.

#### IV.2.1. Différentes aspects

L'huile soumise à un vieillissement de 672 heures à 120°C. La photo (IV.1) et la photo (IV.2) et présentée les différents de l'aspect de l'huile à 120°C pour les trois échantillons.

la température et le temps accélèrent le processus de vieillissement et la dégradation de l'huile avec catalyseur ce qui implique l'élévation considérable de l'indice de couleur et l'aspect. Une augmentation et changement faible de l'indice de couleur et l'aspect est observé (photo.IV.2) pour les deux l'huile neuve et l'huile neuve avec fer mais nous observons une augmentation et changement plus rapide pour l'huile avec cuivre ce qui peut être attribué à la précipitation des dépôts.



**Photos.IV.1.** Comparaison de la couleur et l'aspect d'huile après 672 heures



Photos. IV.2. Comparaisent de la couleur et l'aspect d'huile pendent 504 heure à T=120°C

L'apparition d'huile neuve et d'huile neuve avec le catalyseur devient opaque par rapport à sa couleur initiale. Ce phénomène se produit à cause des réactions chimique et la formation des particules, on observe formation de dépôts à l'échantillonnage (figure.IV.3) elle décante au fond du béccher après certaine durée de vieillissement.

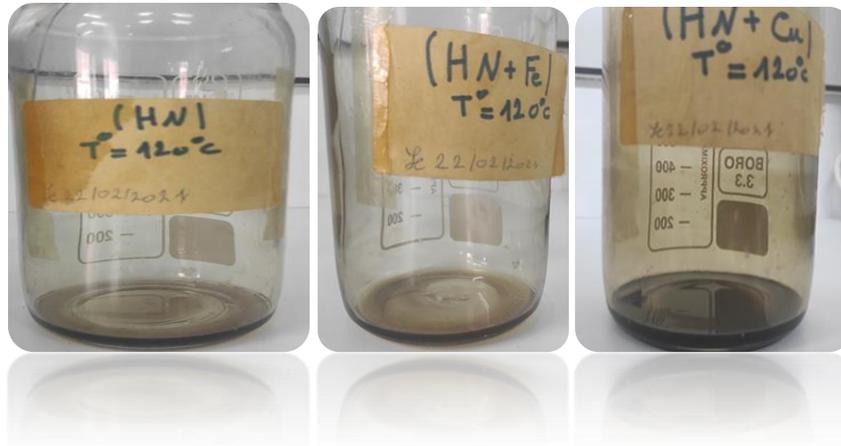


Photo.IV.3 formation des dépôts de l'huile à fin de vieillissement

IV.2.2. Variation de la teneur en eau

La figure(IV.1) représente les variations de la teneur en eau des trois échantillons à fin d'un vieillissement thermique à température de 120°C :

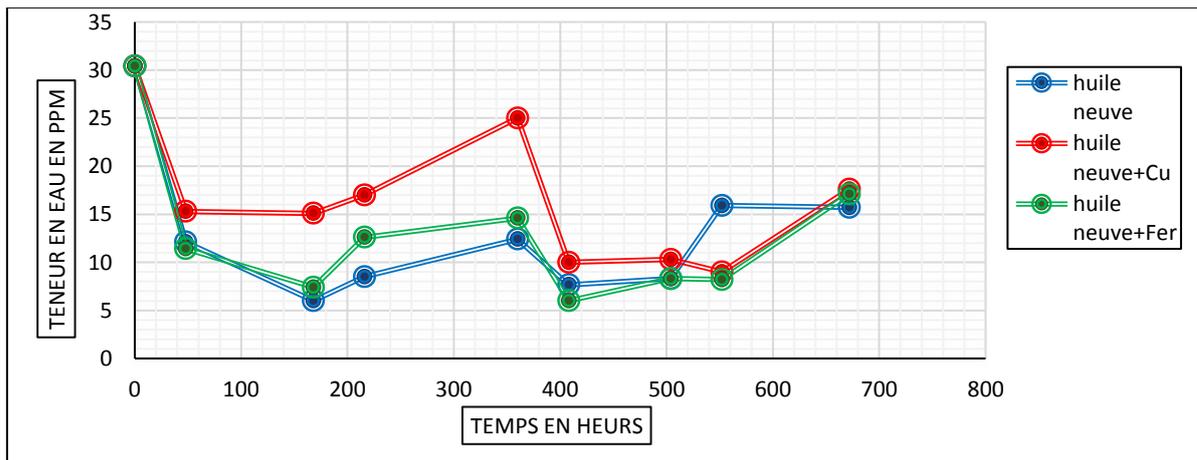
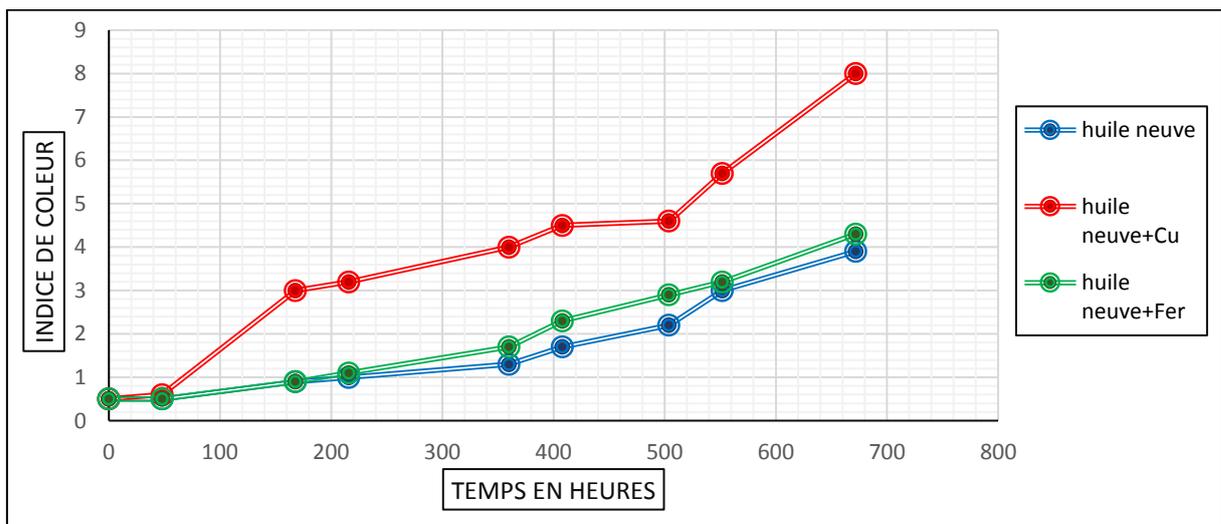


Figure.IV.1. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de vieillissement à une température de 120°C.

D'après la figure(IV.1), dans la période (0h à 168h), on observe la diminution de la teneur en eau, due à la chaleur appliqué sur l'huile. Dans la période (168h a 360h) nous remarquons l'augmentation de la quantité d'eau dans l'huile en raison du facteur d'oxydation que l'huile a subi, ce qui a contribué à la libération d'une quantité d'eau, après nous remarquons la poursuite du même processus jusqu'à la fin d'un temps de vieillissement. A la période (360h a 408h) la quantité d'eau est à nouveau réduite en raison de la chaleur jusqu'à la survenue de processus d'oxydation que se produise dans la période (408h a 672h) ce qui contribue à la libération d'une quantité d'eau.

### IV.2.3. Variation de l'indice de couleur

Nous présentons sur la figure(IV.2) les variations de l'indice de couleur à 120°C en fonction du temps pour les trois échantillons (huile neuve, huile neuve avec Fer, huile neuve avec Cu) :



**Figure.IV.2.** Variation de l'indice de couleur en fonction du temps de vieillissement à une température de 120°C.

La figure(IV.2) montre les résultats du l'indice de couleur de trois échantillon, on observe que l'indice de couleur augmente progressivement avec le temps, ou le degré d'incrément varie pour chaque échantillon :

La valeur de l'indice de couleur varie de (<0.5) à (3.9) pour huile neuve.

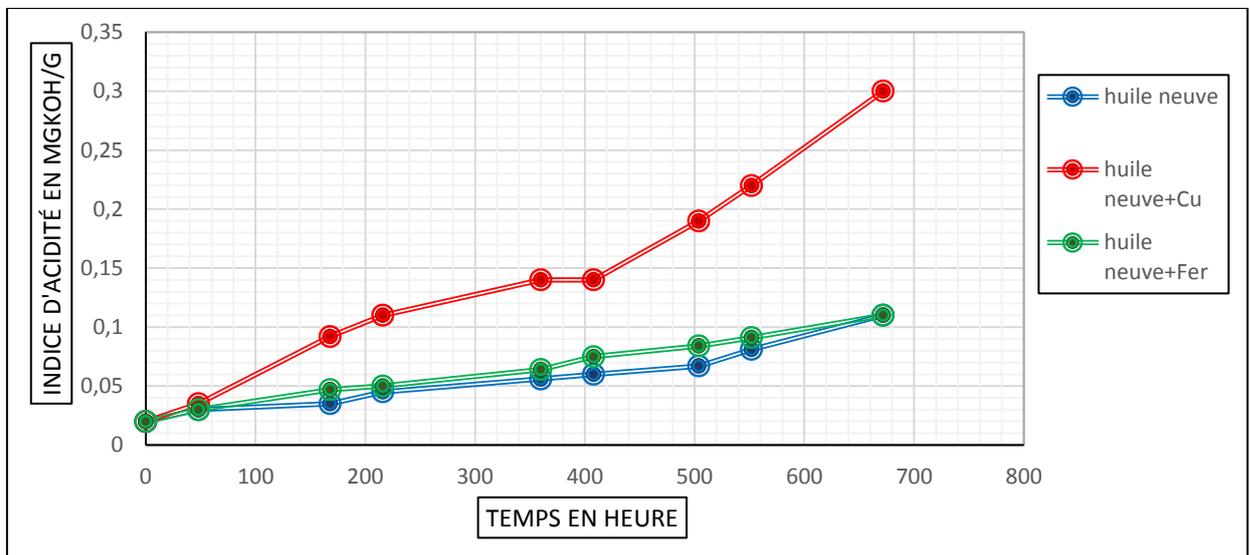
La valeur de l'indice de couleur varie de (<0.5) à (4.3) pour huile neuve avec Fer.

La valeur de l'indice de couleur varie de ( $<0.5$ ) à (8) pour huile neuve avec Cu.

On remarque que l'indice de couleur de l'huile neuve et l'huile neuve avec fer provoque une dégradation faible, mais dégradation de la couleur de huile neuve avec cuivre est provoqué une dégradation importante.

#### IV.2.4. Variation de l'indice d'acidité

Nous présentons sur la figure(IV.3) les variations de l'indice d'acidité à  $120^{\circ}\text{C}$  en fonction du temps pour les trois échantillons (huile neuve, huile neuve avec Fer, huile neuve avec Cu) :

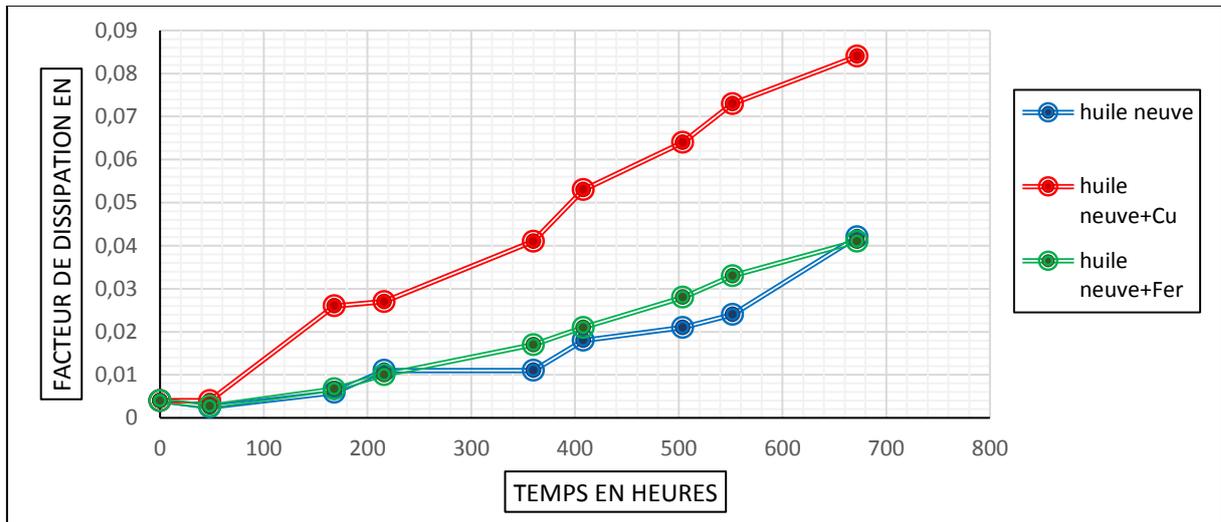


**Figure.IV.3.** Variation de l'indice d'acidité en fonction du temps de vieillissement à une température de  $120^{\circ}\text{C}$ .

On relève une augmentation de l'indice d'acidité avec le temps de vieillissement toutefois, cette augmentation est légère pour l'échantillon de l'huile neuve et l'huile neuve avec fer, que l'indice d'acidité atteints de valeur 0,11 (mg KOH/g), mais l'indice d'acidité pour huile neuve avec cuivre augmente sensiblement qui se atteints de valeur 0,3 (mg KOH/g) à la fin du temps de vieillissement, ceci est principalement présence d'ion de cuivre.

#### IV.2.5. Variation de facteur de dissipation

Nous présentons dans la figure les variations de facteur de dissipation à 120°C en fonction du temps pour les trois échantillons (huile neuve, huile neuve avec Fer, huile neuve avec Cu) :

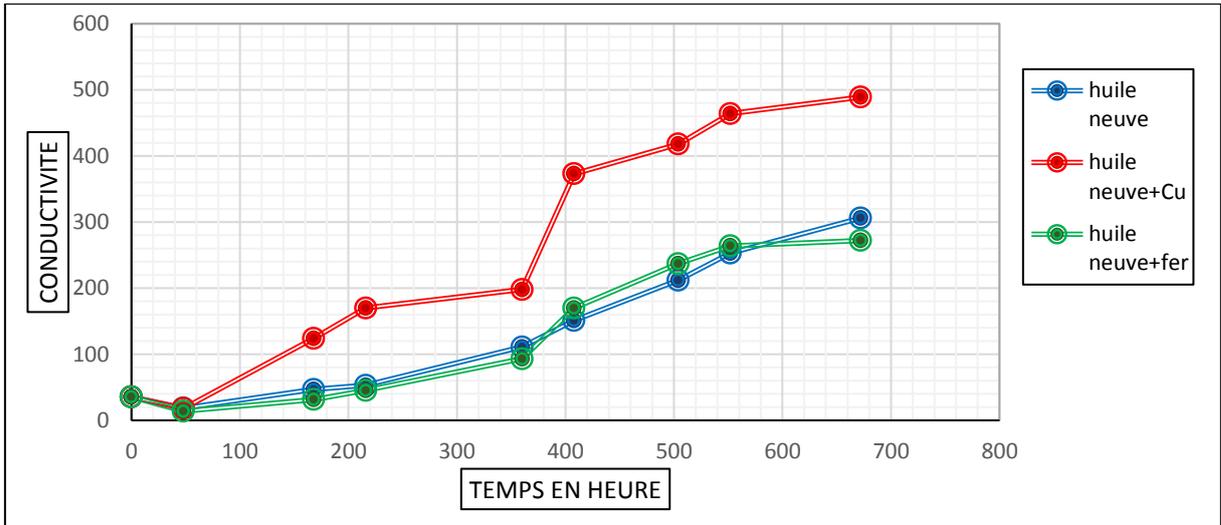


**Figure.IV.4.** Variation de facteur de dissipation en fonction du temps de vieillissement à une température de 120°C.

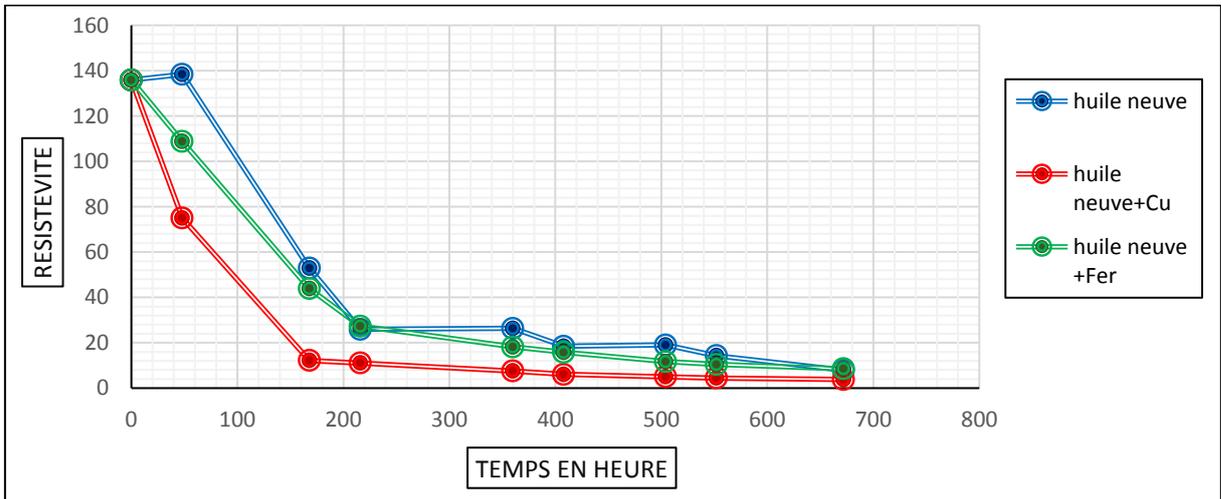
D'après la figure(IV.4), on observe que le facteur des pertes d'huile augmente progressivement avec le temps. L'augmentation est faible pour les deux échantillons (huile neuve, huile avec fer) atteint la valeur de 0.04 après 672 heures de vieillissement. Mais l'augmentation est importante pour l'huile neuve avec cuivre est atteint la valeur de 0.084 jusqu'à la fin des temps de vieillissement.

#### IV.2.6. Variation de la conductivité et la résistivité

Nous présentons sur la figure(IV.5) et la figure(IV.6) les variations de la conductivité et la résistivité à 120°C en fonction du temps pour les trois échantillons (huile neuve, huile neuve avec Fer, huile neuve avec Cu) :



**Figure.IV.5.** Variation de la conductivité en fonction du temps de vieillissement à une température de 120°C.



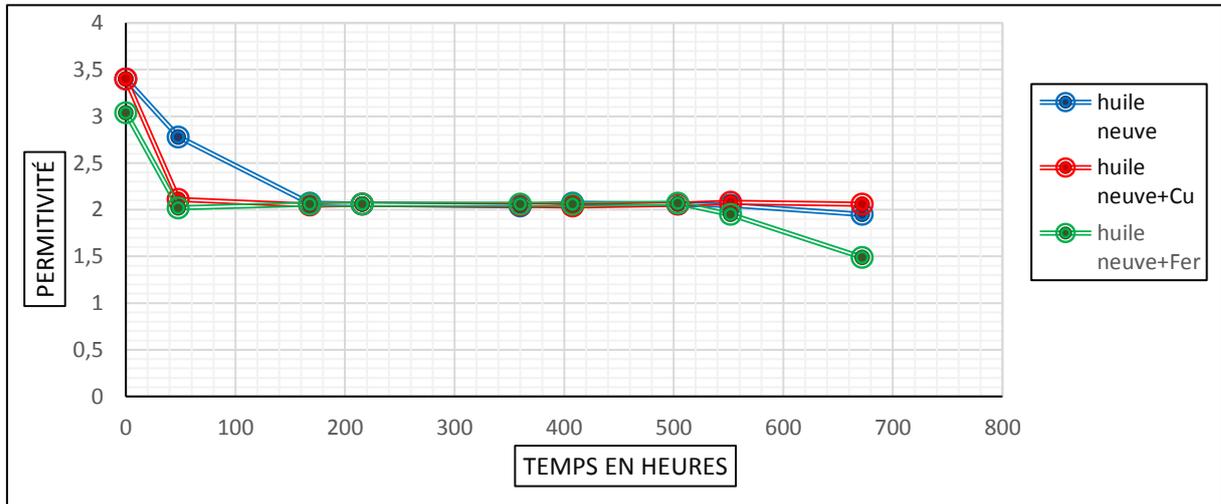
**Figure.IV.6.** Variation de la résistivité en fonction du temps de vieillissement à une température de 120°C.

La résistivité du liquide diminue, lorsque la durée du vieillissement pour les trois échantillons augmente (Figure.IV.5). La conductivité doit être la plus faible possible, donc la résistivité doit être la plus forte possible [ $1/\sigma$ ] (figure.IV.6).

La conductivité de l'huile avec cuivre est plus élevée par rapport à l'huile neuve et l'huile neuve avec fer, elle est liée à la présence d'impuretés inusables à la dégradation du cuivre.

### IV.2.7. Variation de la permittivité

Nous présentons dans la figure(IV.7) les variations de la permittivité à 120°C en fonction du temps pour les trois échantillons (huile neuve, huile neuve avec Fer, huile neuve avec Cu) :



**Figure.IV.7.** Variation de la permittivité en fonction du temps de vieillissement à une température de 120°C.

La permittivité reste presque constante après vieillissement sans et avec des catalyseurs. Ceci est expliqué par le fait que la structure interne de l'huile n'a pas été modifiée.

### IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que le vieillissement thermique des huiles de transformateur a un effet très important sur les caractéristiques électriques et physico-chimiques de l'huile. Cette influence est importante d'autant que la température de vieillissement est grande.

Le chapitre suivant fait une présentation de la logique floue pour prédire l'état de l'huile isolant.

# **Chapitre V Estimation de la qualité d'huile en utilisant la logique floue**

### V.1. Introduction

La logique floue a connu un intérêt important dans la communauté scientifique au cours des dernières années. Les notions générales et l'architecture algorithmique et structurelle d'une commande floue, où nous mettons le point sur [48] :

- La fuzzification.
- Les inférences floues.
- La défuzzification.

L'objectif de ce dernier chapitre est d'introduire la notion de régulation floue dans la qualité des huiles. En premier lieu, nous allons présenter le processus flou, on passera ensuite à la conception générale de la logique floue. On terminera par la présentation des résultats obtenus par cette technique de prédiction.

### V.2. Notions de base des ensembles flous

La notion d'ensemble est une des notions fondamentales des mathématiques mais elle ne permet cependant pas de rendre compte de situations simples et assez fréquentes car dans la théorie des ensembles classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble donné. Par exemple, il est aisé de définir parmi les personnes, l'ensemble des hommes. Par contre, il est impossible de définir l'ensemble des hommes vieux puisque les hommes ne deviennent pas vieux du jour au lendemain. Ils vieillissent graduellement. C'est pour tenir compte de ce genre de situations que Zadeh a introduit la notion d'ensemble floue. Elle repose sur la notion d'appartenance partielle.

#### V.2.1. Les fonctions d'appartenance

L'ensemble floue A peut être défini par un ensemble de paires 'degré d'appartenance élément' [49] :

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \quad (\text{V.1})$$

Tels que : espace de points avec comme élément générateur  $x$ , donc  $X = \{x\}$ . Un ensemble flou A dans X est un ensemble défini par sa fonction  $\mu_A(x)$  qui associe à chaque point dans X un nombre réel appartenant à l'intervalle [0 1]

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0 \ 1] \quad (\text{V.2})$$

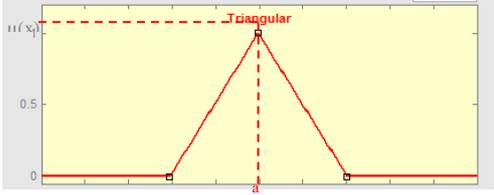
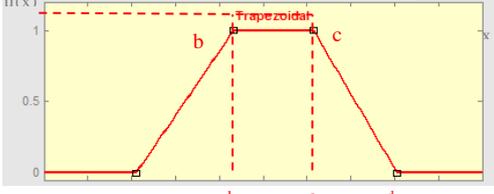
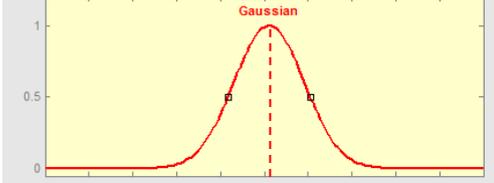
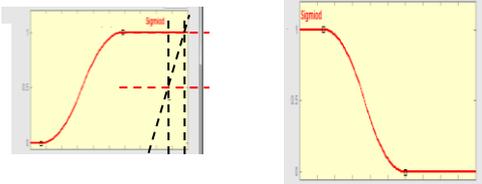
Ce nombre réel représente le degré d'appartenance de  $x$  dans  $A$  :

$$\mu_A(x) \begin{cases} = 1 & x \text{ est \u00e9l\u00e9ment complet de } A \\ \in ]0, 1[ & x \text{ est \u00e9l\u00e9ment partiel de } A \\ = 0 & x \text{ n'est pas un \u00e9l\u00e9ment de } A \end{cases} \quad (V.3)$$

Chaque sous-ensemble floue peut-\u00eatre repr\u00e9senter par sa fonction d'appartenance.

En peut r\u00e9sumer dans la table(V.1) les principaux fonctions d'appartenance.

**Table. V.1.** Principaux fonctions d'appartenances.

Name	Form
<b>Triangular</b>	
<b>Trapezoidal</b>	
<b>Gaussian</b>	
<b>sinusoidal</b>	

### V.3. Raisonnement en logique floue

Le raisonnement est la sous-partie la plus importante, c'est l'essence de la logique floue. En logique classique, les raisonnements sont de la forme:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } p \text{ alors } q \\ \text{si } p \text{ vrai alors } q \text{ vrai} \end{array} \right\}$$

En logique floue, le raisonnement flou et appelé raisonnement approximatif, se base sur des règles floues qui sont exprimées en langage naturel en utilisant les variables linguistiques de la forme :

Si [prémisses] alors [conclusion].

Le résultat de l'application d'une règle floue dépend de deux facteurs :

- La définition de la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de la proposition située en conclusion de la règle floue.
- Le degré de validité des propositions situées en prémisses.

### V.4. Élément de Base de la logique floue

#### V.4.1. Variable linguistique

La description d'une certaine situation, d'un phénomène  
Ou d'un procédé contient en général des qualificatifs flous tels que [50].

- Peu, beaucoup, énormément,
- rarement, fréquemment, souvent,
- froid, tiède, chaud,
- Petit, moyen, grand.

#### V.4.2. Fonctions d'appartenance

Au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un ensemble flou matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée  $\mu$  et appelée « facteur d'appartenance ».

### V.4.3. Inférence floue

Plusieurs valeurs de variables linguistiques sont liées entre elle par des règles permettent de tirer des conclusions [50]. Les règles peuvent alors être exprimées sous forme générale :

Si condition 1 alors action 1 ou.

Si condition 2 alors action 2 ou.

Si condition n alors action n.

Les conditions peuvent dépendre de plusieurs variables liées entre elle par des opérateurs OU ou ET.

### V.5. Fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert. Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur appartenant à un univers du discours relativement simple.

L'univers du discours est ensuite représenté par une variable linguistique, qui comporte un nombre assez restreint de termes (en général trois, cinq ou sept) de façon à limiter le nombre de règles. Enfin, les valeurs normalisées déduites de chacune des entrées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant les variables linguistiques correspondantes. Durant l'étape de la fuzzification, chaque variable d'entrée et de sortie est associée à des sous-ensembles flous.

#### V.5.1. Règles floues

Les règles floues permettent de déduire des connaissances concernant l'état du système en fonction des qualifications linguistiques fournies par l'étape de fuzzification. Ces connaissances sont également des qualifications linguistiques. Habituellement, les règles floues sont déduites des expériences acquises par les opérateurs ou les experts. Ces connaissances sont traduites en règles simples pouvant être utilisées dans un processus

d'inférence floue. Par exemple, si un expert exprime la règle «si la température de l'eau est chaude, il faut ajouter de l'eau froide», le système utilisera une règle du genre «si p alors q». Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue.

### V.5.2. Inférence floue

Un Système d'Inférence Floue (SIF) a comme but de transformer les données d'entrée en données de sortie à partir de l'évaluation d'un ensemble des règles. Les entrées sont issues du processus de fuzzification et l'ensemble de règles normalement sont définies par le savoir faire de l'expert [51].

Un SIF est constitué de quatre étapes:

- Fuzzification.
- Inférence.
- Défuzzification.
- Base de connaissances floues.

L'inférence floue est une relation floue définie entre deux sous-ensembles. La définition de la relation peut théoriquement faire intervenir n'importe quel opérateur de combinaison. Pourtant, on utilise souvent les inférences floues définies par Mamdani et Takagi-Sugeno.

### V.5.3. Inférence floue de Mamdani

Supposons que la base de connaissances est constituée de n règles d'inférence contenant chacune m prémisses et une conclusion. Le processus d'inférence peut être décrit par le schéma suivant :

Règle 1: Si ( $x_1$  est  $A_{11}$ ) et...et ( $x_m$  est  $A_{1m}$ ); alors ( $Y$  est  $B_1$ ).

Règle 2: Si ( $x_1$  est  $A_{21}$ ) et...et ( $x_m$  est  $A_{2m}$ ); alors ( $Y$  est  $B_2$ ).

Règle n: Si ( $x_1$  est  $A_{n1}$ ) et...et ( $x_m$  est  $A_{nm}$ ); alors ( $Y$  est  $B_n$ ).

Dans lequel  $x_1, \dots, x_m$  sont des éléments des univers du discours  $X_1, \dots, X_m$  et  $A_{ij}, (j = 1, \dots, m)$ , sont des quantités floues sur l'univers du discours  $X_i$ , et  $B_j, (j = 1, \dots, m)$ , sont également des quantités floues sur l'univers du discours  $Y$ . Afin de définir une seule prémisse pour une règle  $i$ , les propositions « $x_j$  est  $A_{ij}$ », ( $j = 1, \dots, m$ ), sont combinées par

l'opérateur minimum. La fonction d'appartenance de cette prémisse unique est donc donnée par :

$$\mu_{R_{Ai}}(x_1, \dots, x_m) = \mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{im}}(x_m) \quad (\text{V.4})$$

### V.5.3.1. Inférence floue de Takagi-Sugeno

Takagi-Sugeno a proposé une méthode d'inférence floue qui garantit la continuité de la sortie. Cette méthode d'inférence s'avère très efficace dans des applications faisant intervenir à la fois des techniques linéaires, d'optimisation et adaptatives. Dans l'inférence de Sugeno, les règles floues sont exprimées de la façon suivante:

Règle i: Si ( $x_1$  est  $A_{i1}$ ) et...et ( $x_m$  est  $A_{im}$ ) ; alors  $y = f_i(x_1, \dots, x_m)$ .

Dans laquelle  $x_1, \dots, x_m$  et  $y$  sont des éléments des univers du discours  $X_1, \dots, X_m$  et  $A_{i1}, \dots, A_{im}$  sont des termes linguistiques sur ces mêmes univers du discours.  $y$  est une fonction de  $x_1, \dots, x_m$ . Par rapport à l'inférence de Sugeno, celle de Mamdani est plus intuitive, plus générale et elle s'adapte particulièrement bien à l'utilisation de connaissances issues d'une expertise humaine.

## V.6. Defuzzification

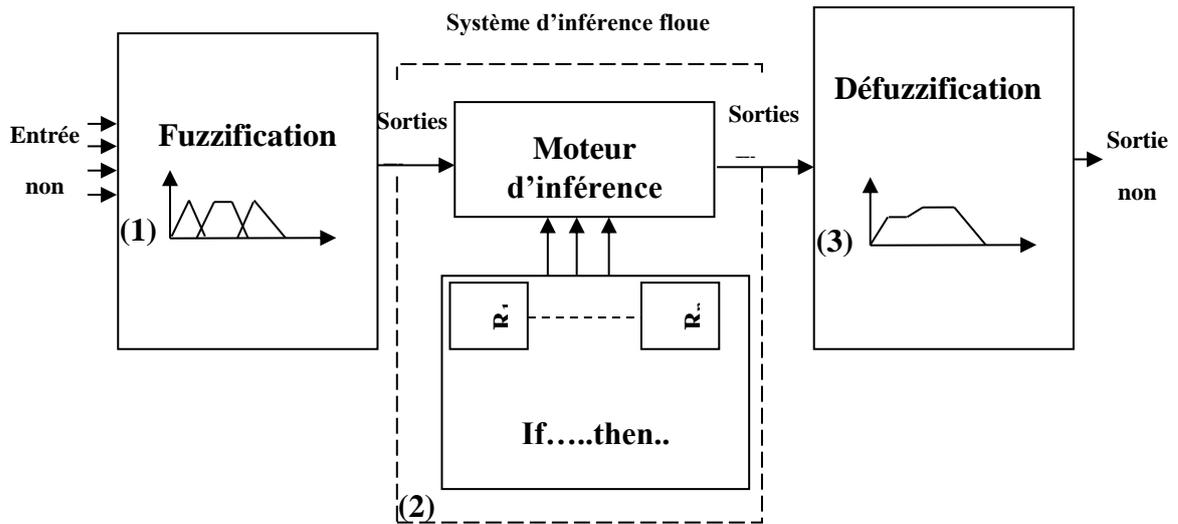
Consiste à caractériser les variables linguistiques utilisées dans le système. Il s'agit donc d'une transformation des entrées réelles en une partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Cet espace de représentation est normalement un sous-ensemble flou. Durant l'étape de la fuzzification, chaque variable d'entrée et de sortie est associée à des sous-ensembles flous.

## V.7. Base de connaissances floues

Contient l'ensemble des règles floues décrivant le comportement d'un système.

## V.8. Schéma d'une commande floue

Figure(V.1) représente une structure générale d'un système basé sur la logique floue (FL) La mise en œuvre d'une commande floue fait apparaître trois grands modules



**Figure.V.1.** Structure générale d'un système basé sur la logique floue (FL).

- **Le premier module (1)**

Traite les entrées du système (valeurs réglant). On définit tout d'abord un univers de discours, un partitionnement de cet univers en classes pour chaque entrée, et des fonctions d'appartenance pour chacune de ces entrées (par exemple pression grande, petite, faible et changement d'écart mesure consigne de débit de matériaux sortant d'une trémie très élevée, élevé, moyen, négatif, très négatif). La première étape, appelée fuzzification, consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps  $t$ , sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un sous ensemble flou.

- **Le deuxième module (2)**

Constitue de l'ensemble de règles et du choix des opérateurs flous. Il transforme la partie floue issue de la phase de fuzzification en une nouvelle partie floue conformément aux règles floues, et à associer à chaque règle une valeur de sortie. Ce module est constitué d'une base de règles et d'un moteur d'inférence qui permet le calcul

- **Le troisième module (3)**

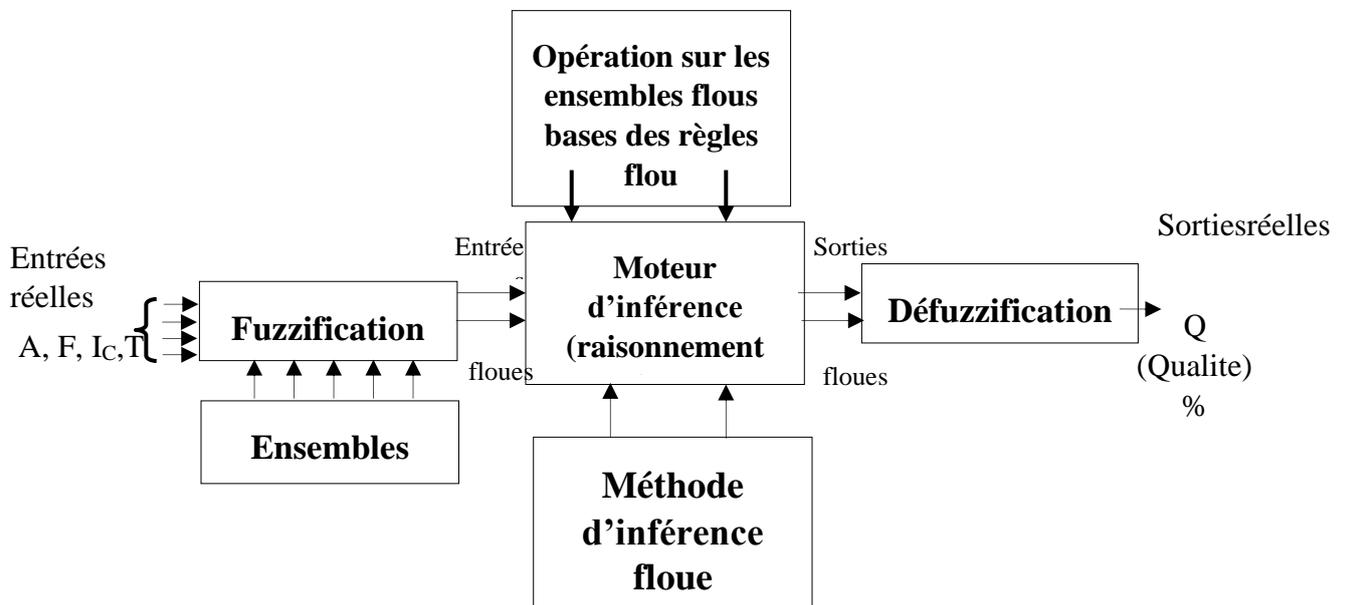
Le dernier module décrit l'étape de défuzzification qui est la transformation inverse de la première. Il permet de passer d'un degré d'appartenance d'une commande à la détermination de la valeur à donner à cette commande.

### V.9. Prédiction de la qualité de l'huile par la logique floue

Dans cette partie, nous utiliserons la logique floue pour déterminer l'état de santé de l'huile à partir des quatre paramètres (A (mgKOH/g), F(tgδ), T (ppm), I<sub>c</sub>).

Sachant que "A (mgKOH/g)" Acidité, "F(tgδ)", Facteur de dissipation (tgδ), "T (ppm)", Teneur en eau(ppm), et "I<sub>c</sub>" Indice de couleur(IC)). La logique floue a pour objectif de formuler et de mettre en œuvre le raisonnement humain. L'avantage de l'utilisation de la logique floue pour voir la qualité ou l'état de santé de l'huile de transformateur. Le concept flou proposé, est formé par un système d'inférence flou (SIF) illustré sur la figure (V.2).

Un système à logique floue prend comme entrée les données imprécises et les expressions vagues (comme bon, acceptable, mauvais) et fournit des décisions sur des variables de sorties elles-mêmes floues [50].



**Figure .V.2.** Architecture d'un système d'inférence floue(SIF).

Pour appliquer ce concept à l'évaluation de la prédiction de l'état de santé d'huile, des entrées (acidité, facteur de dissipation, indice de couleur et teneur en eau) et une sortie

(qualité d'huile) seront d'abord définies sous forme de variables linguistiques comme indiqué sur le tableau (V.3).

La formulation de notre problème en logique floue nécessite la définition de :

- Les entrées et sorties du SIF : Les entrées et sorties choisis pour notre étude sont données dans le tableau (V.2).
- Les caractéristiques floues (valeurs de vérité : "excellent, acceptable ..") : Ils sont mentionnés dans le tableau (V.3).
- Les univers de discours (intervalles de ces valeurs de vérité) des variables d'entrées et sortie : Ils sont définis dans le tableau (V.3).
- Les fonctions d'appartenances des variables d'entrées et sortie : Elles sont montrées dans les figures (V.3-V.7).
- Les règles d'inférences floues : Elles sont organisées dans la table (V.4).

**Tableau V.2.** Variables d'entrées et sorties

Entrée		Sortie	
Symbole	Désignation	Symbole	Désignation
A (mgKOH/g)	Acidité	Q(%)	Qualité d' huile
F(tgδ)	Facteur de dissipation		
T (ppm)	Teneur en eau		
I <sub>c</sub>	Indice de couleur		

### V.9.1. Fuzzification

#### V.9.1.a. Variables linguistiques et intervalles flous

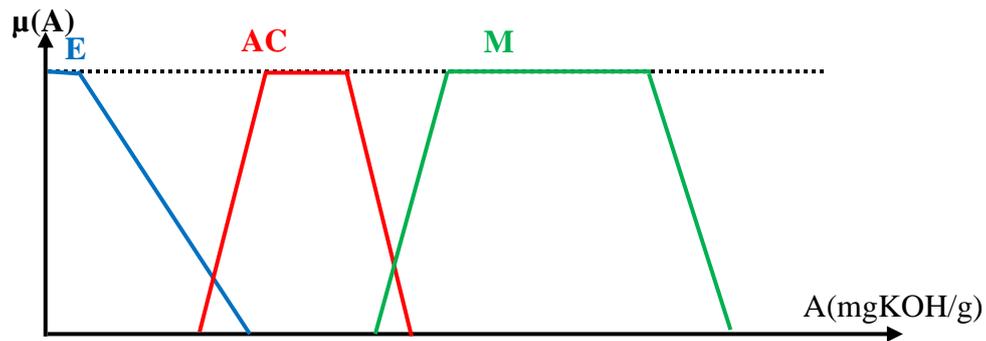
Le fuzzification intervalle de chaque variable langage on le tableau suivant est choisis pour inclure toutes les valeurs qui peuvent indiquer l'une des étapes de vieillissement.

Tableau V.3. Décomposition de la variable d'entrées et de sortie

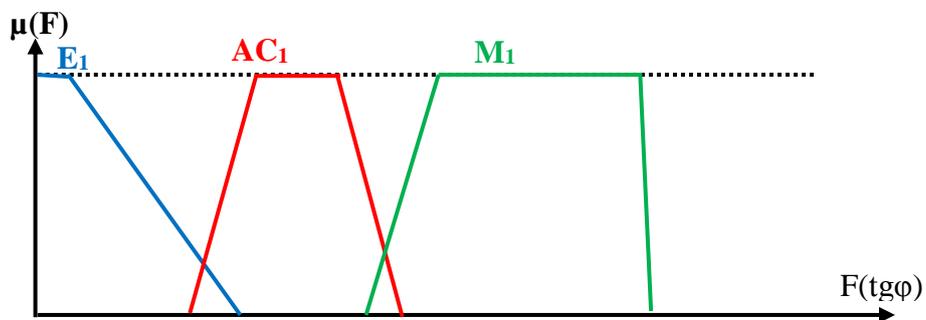
Entrées						Sorties			
Variables linguistiques des entrées et sorties et leurs univers de discours									
Acidité A (mgKOH/g) [0.023-0.3]		Facteur de dissipation F(tgφ) [0.004-0.084]		Indice de Couleur I <sub>c</sub> [0.4-8]		Teneur en eau T(ppm) [0-270]		Qualité d'huile Q (%) (0-100)	
TL	s	TL	S	TL	S	TL	s	TL	S
E	Excellent [0-0.06]	E <sub>1</sub>	Excellent [0-0.011]	E <sub>2</sub>	Excellent [0-2.24]	E <sub>3</sub>	Excellent [0-6.35]	G	Garde [0-55]
AC	Acceptable [0.03-0.15]	AC <sub>1</sub>	Acceptable [0.008-0.04]	AC <sub>2</sub>	Acceptable [1.8-4.2]	AC <sub>3</sub>	Acceptable [4.5-15.6]	GS	Garde surveiller [50-80]
M	Mauvais [0.12-0.41]	M <sub>1</sub>	Mauvais [0.03-0.10]	M <sub>2</sub>	Mauvais [0.03-0.10]	M <sub>3</sub>	Mauvais [14.4-39.6]	R	régénérer [70-100]
TL : Terme linguistique									
S : signification et intervalle floue									

**V.9.1.b. Fonctions d'appartenances**

Les figures (V.3-V.7) montrent les formes des fonctions d'appartenances des entrées et sortie du SIF(système inférence floue) que nous utiliserons pour voir qualité d'huile comme sera bien détaillé dans ce qui suit :



**Figure.V.3.** Fonction d'appartenance de l'indice Acidité(A).



**Figure.V.4.** Facteur de dissipation (F).

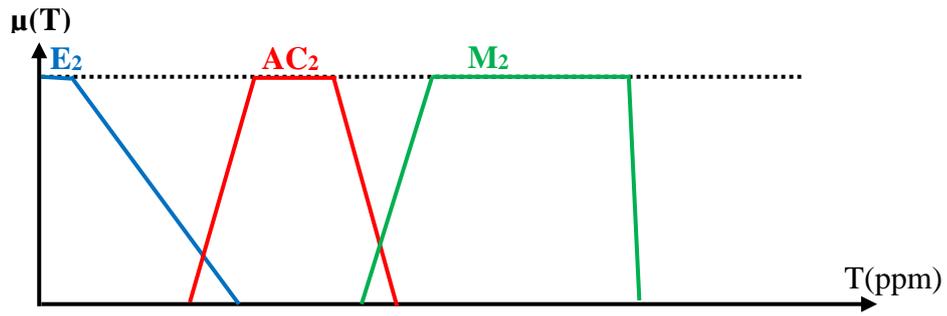


Figure.V.5. Indice de teneur en eau T (ppm).

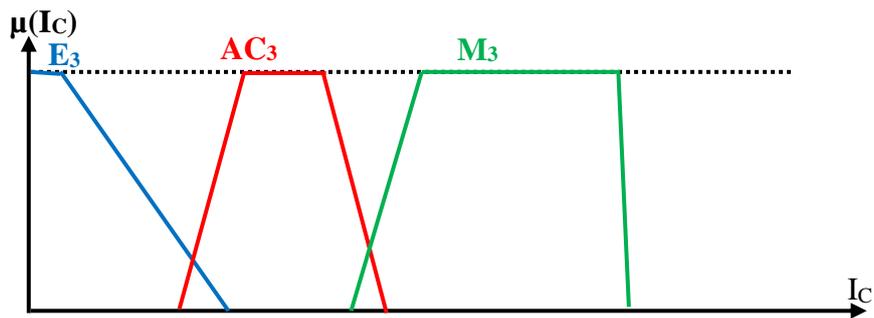


Figure.V.6. Indice de couleur (IC).

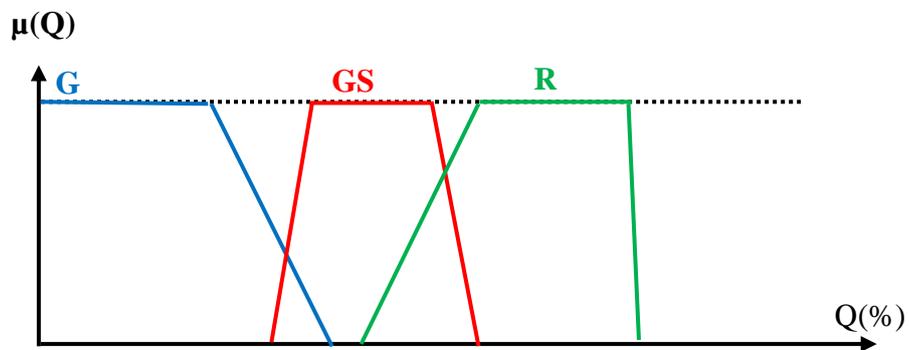


Figure.V.7. Fonction d'appartenance de la sortie qualité d'huile(Q) (%).

## V.9.2. Règles floues

Le choix des règles floues semble facile, par contre il est un des problèmes posés dans l'implémentation des algorithmes flous, de nombreuses méthodes d'extraction des règles ont été proposées pour résoudre ce problème. Ces méthodes sont groupées selon leur principe en deux catégories [51].

### V.9.2.1. Méthodes d'extraction naturelle

Parmi les méthodes utilisées, nous citons :

- Méthodes basées sur un savoir-faire d'un expert : Avec cette méthode, les règles sont établies par un expert ou un opérateur qualifié.
- Méthodes basées sur la modélisation des actions d'un opérateur : En utilisant cette stratégie, les règles floues sont érigées en observant l'opérateur en train de manipuler un système d'étude.

### V.9.2.2. Méthode d'extraction automatique

Plusieurs méthodes auto-adaptatives ont été proposées récemment pour automatiser la détermination des règles floues. Ces méthodes sont très utiles dans le cas où aucun expert n'est disponible et où l'on dispose de grandes quantités de données concernant le problème à traiter.

### V.9.2.3. Etablissement des règles floue

En effet, comme il n'existe aucune méthode pour établir les règles du comportement d'un système flou, la mise en œuvre d'un système à logique floue n'en est que plus difficile. Par contre, le savoir-faire ou l'expertise doit absolument exister pour rendre possible l'utilisation d'un système flou. L'élaboration des règles floues est d'autant plus facile lorsque ce savoir-faire existe [52].

Dans notre étude, nous avons réalisé des expériences pratiques dans un laboratoire spécialisé pour bien élaborer l'ensemble des règles floues de notre Système Inférence Flou (SIF) utilisé pour collecter une base de données utilisée durant ce chapitre que ce soit pour l'établissement des règles floue ou pour la validation de notre système de prédiction à base de logique floue.

Pour tenir compte de tous les cas et des états intermédiaires, une matrice (table) d'inférence (tableau (V.4)) sera utilisée. Cette matrice permet d'illustrer 81 ( $3*3*3*3$ ) règles pour calculer la sortie "Q" pour les différentes entrées (A, F, T, IC).

En effet, nous avons proposé un premier jeu de règles établi, ensuite nous avons ajusté ces règles ainsi que les fonctions d'appartenance pour améliorer les résultats selon les données expérimentales collectées. La table d'inférence (V.4) contient les meilleures règles floues qui ont donné les meilleures sorties. La méthode de collection de ces règles rentre dans le cadre des méthodes d'extraction naturelle des règles floues en se référant à un savoir-faire d'un expert.

L'ajustement des fonctions d'appartenance sera détaillé durant cette session de travail.

Quelques-unes des règles proposées sont:

- Si (Acidité (mgKOH/g) est E) ET (F(tg $\phi$ ) est E<sub>1</sub>) ET (T(ppm) est E<sub>2</sub>) ET (IC est E<sub>3</sub>) ALORS (Indice de qualité (%) est G).
- Si (Acidité (mgKOH/g) est E) ET (F(tg $\phi$ ) est M1) ET (T(ppm) est E2) ET (IC est E3) ALORS (Indice de qualité (%) est GS).
- Si (Acidité (mgKOH/g) est M) ET (F(tg $\phi$ ) est M1) ET (T(ppm) est E2) ET (IC est E3) ALORS (Indice de qualité (%) est R).

....etc.

Les variables d'entrée sont liées par l'opérateur ET, tandis que la variable de sortie des différentes règles sont combinées par l'opérateur OU, afin d'obtenir la variable de sortie de l'inférence.

Tableau.V.4. Table d'inférence.

		E			AC			M		
		E <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	AC <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>
E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	G	G	GS	G	G	G	R	R	R
	AC <sub>3</sub>	G	G	GS	G	G	GS	R	R	R
	M <sub>3</sub>	G	G	R	G	GS	R	R	R	R
AC <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	G	G	GS	GS	G	GS	R	R	R
	AC <sub>3</sub>	G	G	GS	GS	GS	GS	R	R	R
	M <sub>3</sub>	G	G	R	GS	GS	R	R	R	R
M <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	G	GS	GS	GS	G	R	R	R	R
	AC <sub>3</sub>	G	GS	R	R	GS	R	R	R	R
	M <sub>3</sub>	GS	GS	R	R	R	R	R	R	R

Par contre si l'on choisi des valeurs numériques quelconques pour les entrées (A, F, T, I<sub>c</sub>), le système d'inférence flou procède à l'agrégation des règles pour avoir la "surface réponse". La sortie du modèle correspond au centre de gravité de cette surface (Defuzzification). A noter que nous avons choisi la méthode de raisonnement de type Min max (raisonnement Mamdani) pour déterminer la sortie de chaque règle activée et la méthode du centre de gravité de la "surface réponse" pour calculer l'état de qualité d'huile de transformateur de la sortie "Q" correspondant aux entrées (A, F, T, I<sub>c</sub>). Selon l'appartenance de la sortie de "Q" calculée à l'un des intervalles flou de l'ensemble flou "Q", nous pouvons prédire l'état de santé d'huile de transformateur pour les entrées (A, F, T, I<sub>c</sub>) comme indiquée dans le tableau (V.4).

### V.9.3.3. Mise en œuvre du système d'inférence floue

L'interface graphique Fuzzy logic toolbox disponible sous Matlab sera exploitée dans cette partie de ce chapitre pour la mise en œuvre du système d'inférence flou (SIF) pour la prédiction la tension de contournement. Une description détaillée de l'implémentation de notre système d'inférence flou (SIF) sera présentée dans ce qui suit :

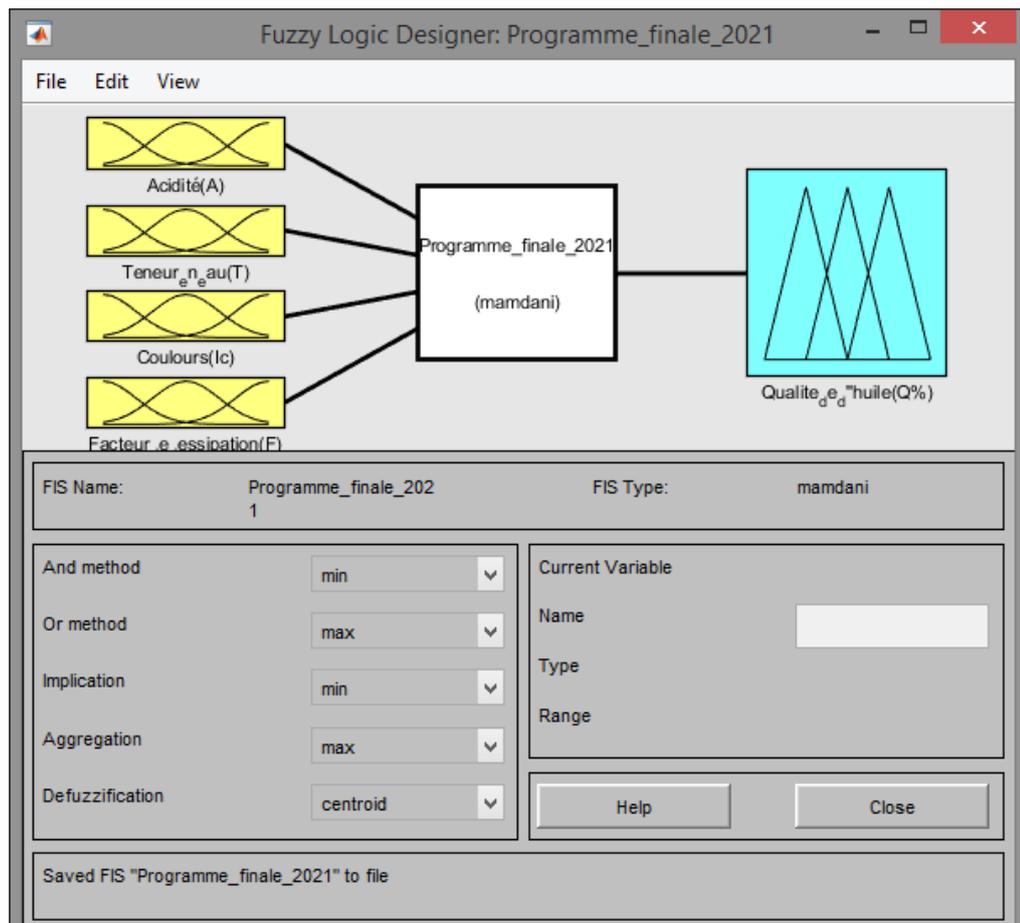
#### V.9.3.3.1. Implémentation du système d'inférence floue (SIF) sous MATLAB

Le système d'inférence floue FIS (Fuzzy Inference System) sous MATLAB se compose de cinq parties [51]:

- Une base de règles pouvant contenir un certain nombre de règles floues (SI-ALORS).
- Une base de données qui définira les fonctions d'appartenance des entrées introduites.
- Une unité de prise de décision qui effectue l'opération d'inférence par les règles floues.
- Une interface de Fuzzification qui définit pour chaque entrée réelle son degré d'appartenance de sa fonction d'appartenance.
- Une interface de Défuzzification qui transforme les résultats flous en une sortie nette.

L'interface graphique d'inférence (Fuzzy Inférence System, ou FIS en abrégé) sous MATLAB permet d'implémenter notre "SIF" utilisé pour prédire l'état de santé d'huile en introduisant les entrées (A, F, T, Ic).

La figure(V.8) montre le schéma bloc de notre SIF créé en utilisant l'interface graphique (FIS) sous MATLAB qui se compose de la base de données représentée par les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de la sortie ainsi que la base de règles (Tableau V.4) qui sont souvent regroupées pour former la base de connaissances.



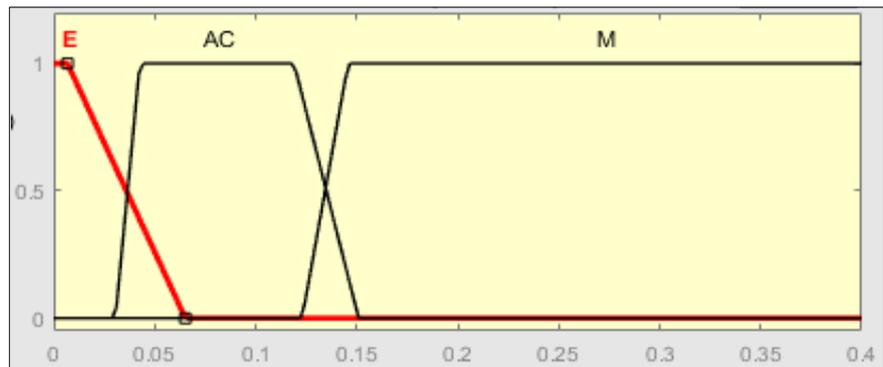
**Figure.V.8.** Fenêtre principale de l'éditeur du système d'inférence floue.

À partir de l'éditeur de l'interface graphique (FIS), il est possible de choisir le type de l'agrégation. Nous avons choisi l'opérateur Min pour ET, Max pour OU et l'opérateur Max pour l'agrégation). Pour l'implication nous avons choisi l'opérateur min et pour la Défuzzification nous avons choisi la méthode de centre de gravité.

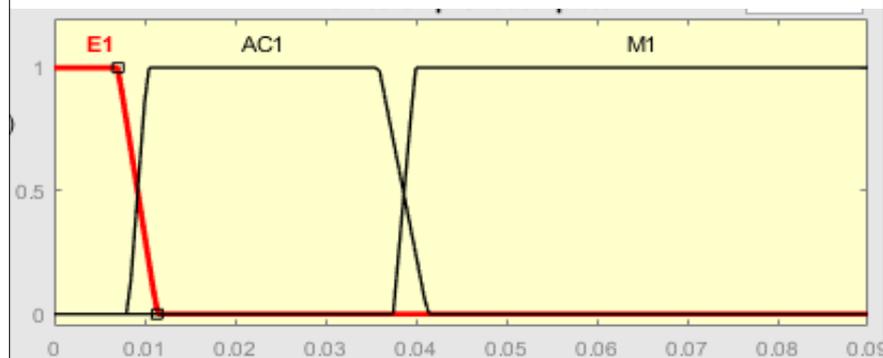
#### a. Fuzzification des variables d'entrées et de sortie

Les intervalles de variations de chaque variable floue sont donnés par le tableau(V.3). Ce tableau donne aussi les domaines de variation de chaque fonction d'appartenance des variables linguistiques choisies et le nombre des intervalles flous ainsi que le nombre des variables linguistiques des variables d'entrées (A, F, T, Ic) et celle de la sortie "Q". Pour améliorer ces premiers résultats, nous avons effectué des ajustements des formes des fonctions d'appartenance comme suit: A chaque fois que nous avons changé la forme (allure) des fonctions d'appartenances de chaque variable floue. Nous avons gardé les formes des fonctions d'appartenance qui donnent des résultats acceptable des prédictions correctes selon

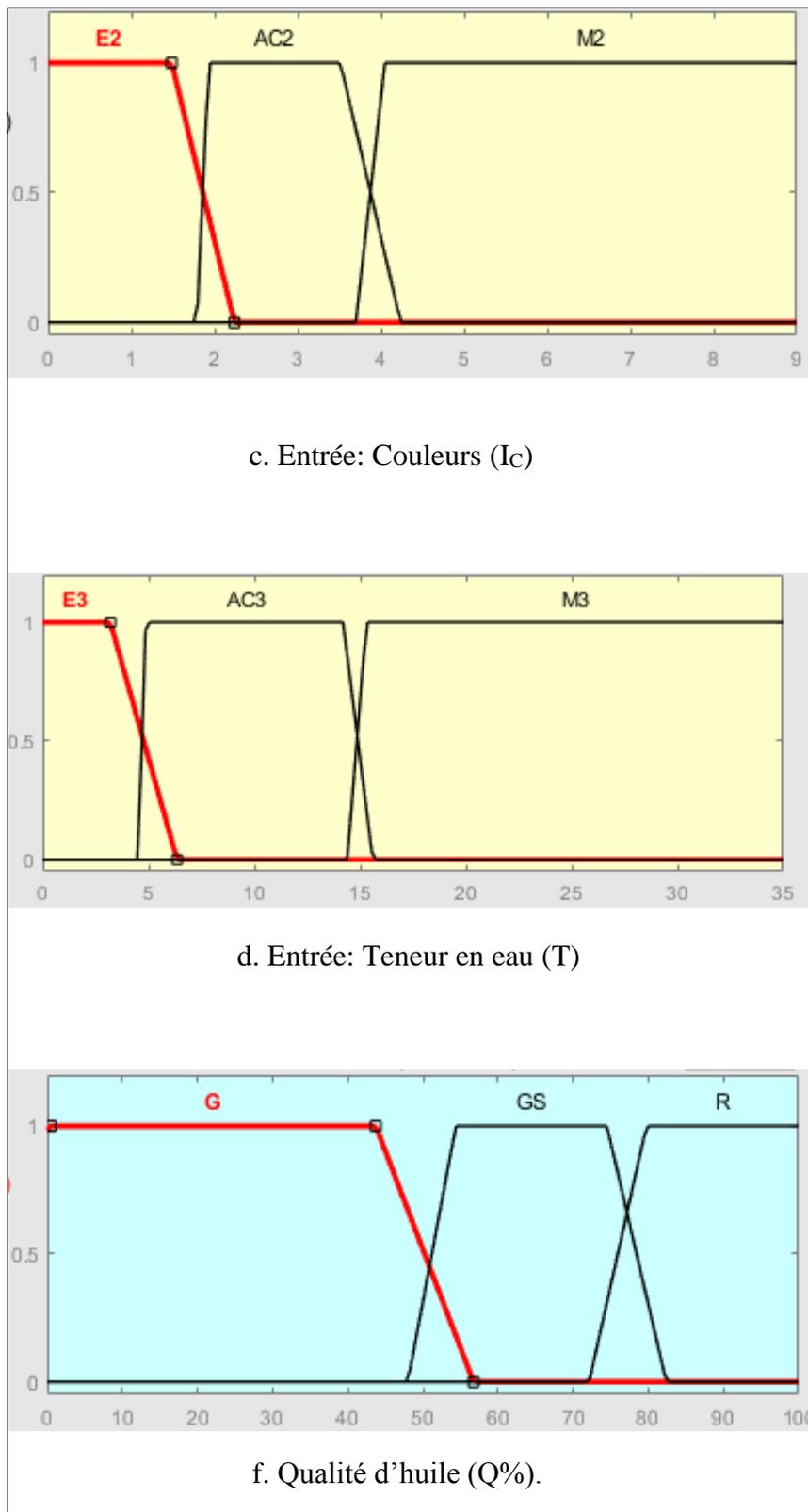
nos expériences dans le laboratoire. Ces ajustements des formes des fonctions d'appartenance sont fait d'une façon à ne pas avoir de chevauchements important de ces fonctions et de garder leurs formes trapézoïdales déjà choisie. La figure (V.9) illustre les formes des fonctions d'appartenance des entrées et sortie du SIF implanté en utilisant Fuzzy logic toolbox sous Matlab avant et après ajustement.



a. Entrée: Acidité (mgKOH/g)



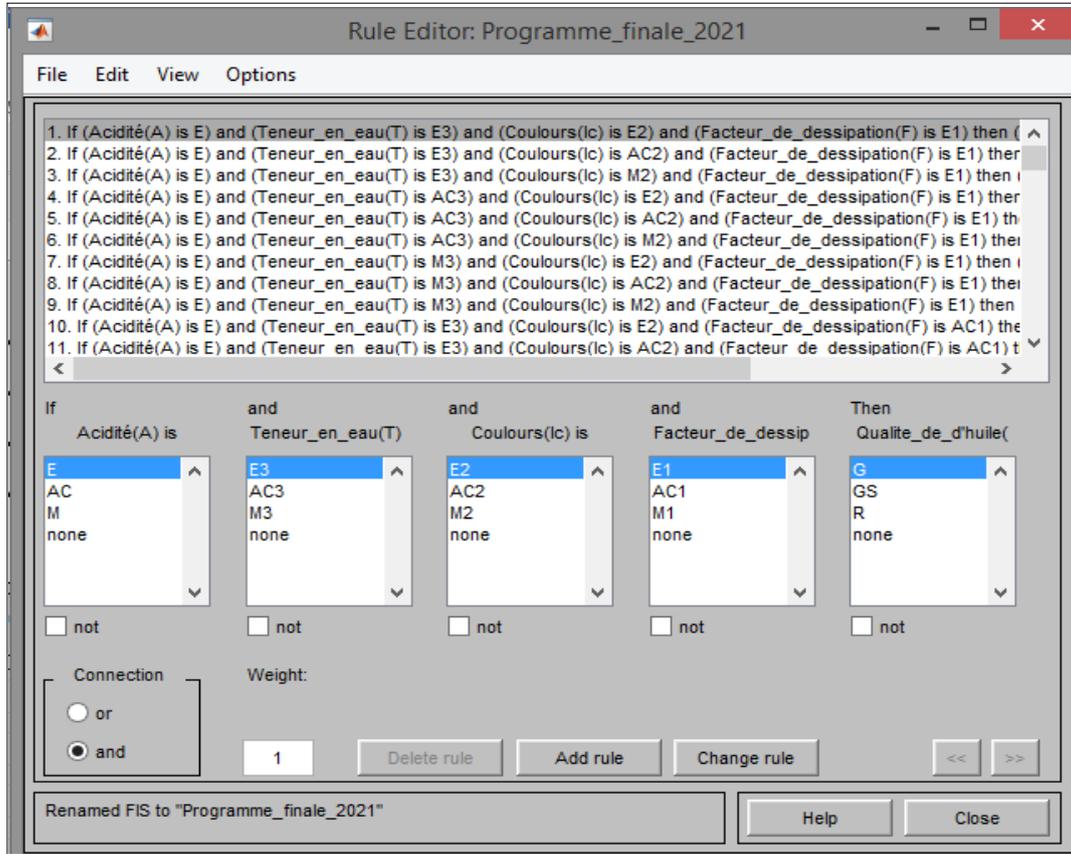
b. Entrée: Facteur de dissipation  $\text{tg}(\delta)$  (F)



**Figure.V.9.** Ensembles flous des entrées et de la sortie du SIF utilisés par l'éditeur de fonctions d'appartenance de l'interface graphique (FIS) après ajustement.

## b-Règles d'inférence

La figure (V.10) montre la fenêtre utilisée pour introduire les règles floues utilisées dans notre SIF.



**Figure.V.10.** Fenêtre de l'éditeur de base de règles floues.

La fuzzification des 4 variables d'entrée a donné 3 fonctions d'apparence pour les entrées illustré dans la figure (V.10), ce qui résulte au maximum 81 règles d'inférences ( $3*3*3*3=81$ ) qui peuvent être générées.

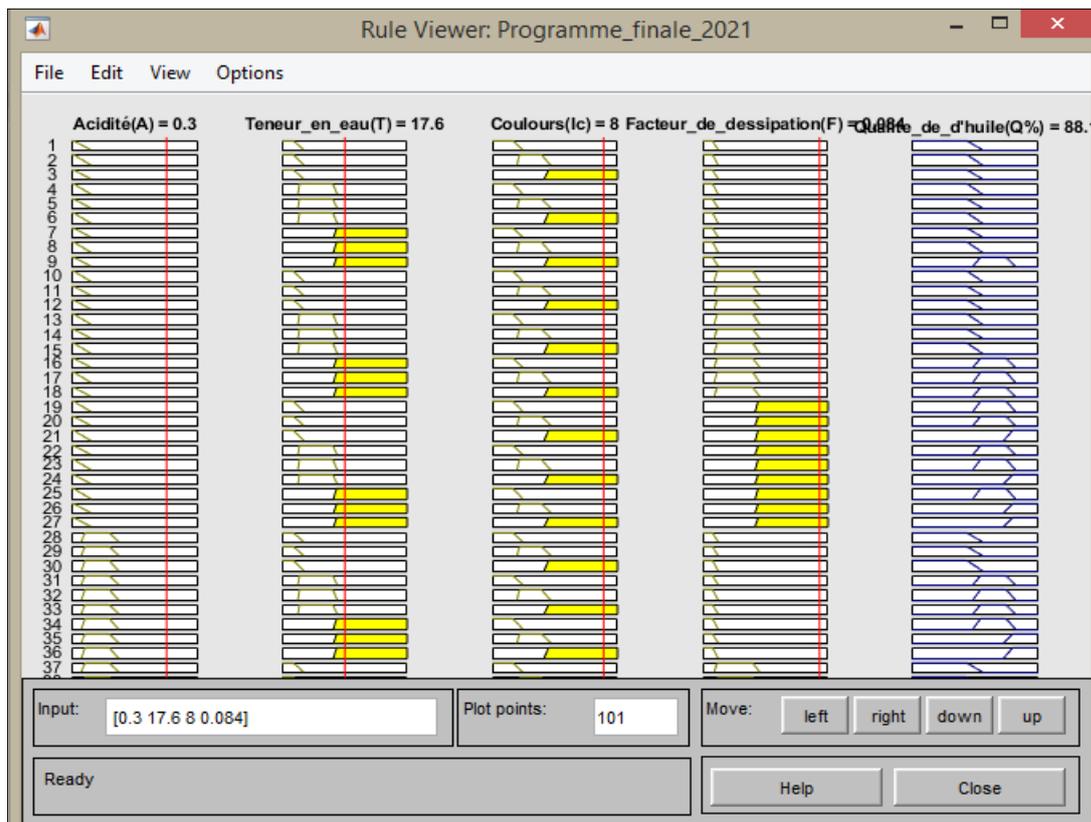
La définition des règles s'effectue de façon aisée en sélectionnant les fonctions d'appartenance associées aux entrées par leurs termes linguistiques, en définissant la sortie affectée par cette règle également définie par son terme linguistique associé. L'ensemble de règles utilisées est regroupé dans le tableau (V.2).

### c- Défuzzification

L'évaluation des règles est une étape très importante du système d'inférence. Elle permet de calculer la valeur de la variable de sortie finale floue à partir des entrées floues issues de la fuzzification et de l'ensemble de la base des règles en utilisant une méthode d'inférence. La méthode d'inférence choisie est celle de Mamdani. Par conséquent, l'opérateur ET est réalisé par le calcul du minimum, tandis que l'opérateur OU est réalisé par le calcul du maximum. Le calcul de la solution précise, d'une solution floue sera effectué par la méthode de défuzzification qui se fait à l'aide de la méthode de calcul du centre de gravité.

#### V.9.3.3.2. Tests et validation

La figure (V.11) montre le résultat obtenu pour les entrées (0.3, 17.6, 8, 0.084), où:  $A=0.3$ ,  $T=17.6$ ,  $I_C=8$ , et  $F=0.084$ .



**Figure.V.11.** Fenêtre de visualisation des règles floues, exemple entrées après adaptation des fonctions d'appartenance des variables.

La fenêtre de visualisation des règles d'inférence donnée par la figure (V.12) montre les étapes de l'évaluation des règles activées lors de l'application du vecteur d'entrées (0.3, 17.6, 8, 0.084) selon la méthode max-min. Cette figure illustre aussi la variable de sortie floue

obtenue pour les entrées citées précédemment. La sortie réelle est calculée par la méthode de défuzzification de centre de gravité.

Cette sortie donne l'indice de qualité d'huile (Q%) en utilisant les formes des fonctions d'appartenance proposées après ajustement.

#### V.9.3.4. Résultats de prédiction des différentes étapes de contournement par la logique floue

Le Tableau (V.5) représente les résultats de la prédiction de la qualité d'huile d'un transformateur. Les résultats de la prédiction sont comparés par les résultats expérimentaux obtenus au Laboratoire de traitement d'huile d'UTH SADEG-Blida. Les tests sont faits pour voir le vieillissement (dégradation) d'huile d'un transformateur.

**Tableau.V. 5.** Comparaison entre les résultats expérimentaux et la prédiction de la logique floue (un élément).

N° test	Les entrées				Les Sorties	
	Acidité (A)	Couleurs (Ic)	Facture (F)	Teneur (T)	Expérimental	Prediction (Evaluation) LF
1	0,023	0,4	0,004	15,3	<b>G</b>	✓
2	0,035	0,6	0,004	15,1	<b>G</b>	✓
3	0,092	3	0,026	6	<b>G</b>	✓
4	0,11	3,2	0,027	17	<b>GS</b>	✓
5	0,14	4	0,041	25	<b>GS</b>	✓
6	0,14	4,5	0,03	10	<b>GS</b>	x
7	0,19	4,6	0,064	10,3	<b>R</b>	✓
8	0,22	5,7	0,073	9	<b>R</b>	✓
9	0,3	8	0,084	17,6	<b>R</b>	✓

Les résultats de prédiction obtenus par le SIF pour différentes valeurs d'entrées [A, F, T et Ic] seront montrés dans le tableau (V.5) Ces résultats seront comparés avec des résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation.

- Les résultats de prédiction obtenus par le système (FIS) sous MATLAB ont été obtenus pour une forme trapézoïdale des fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie.
- Selon le tableau précédente, on trouve que l'erreur moyenne est de l'ordre de 11%.
- Ces résultats nous ont permis de juger que le système flou est valable, efficace et fiable pour prédire l'état de santé d'huile d'un transformateur. Cela nous a conduits à proposer d'utiliser le système flou pour la prédiction d'autres résultats pour d'autres valeurs d'entrées non-disponibles au laboratoire.
- Les résultats obtenus montrent que la logique floue à une grande puissance dans l'étude du vieillissement d'huile du transformateur.
- Le bon choix des paramètres du système d'inférence floue utilisé (variables d'entrée et de sortie, nombre et type et formes des fonctions d'appartenance, règles d'inférence, méthode de défuzzification), conduit à des meilleurs résultats.
- Toute modification dans les paramètres du SIF peut modifier les résultats. Dans notre étude, nous avons modifié les allures des différentes fonctions d'appartenances des entrées et celle de la sortie en gardant leurs formes trapézoïdales, ce qui nous a permis d'améliorer les résultats.
- Selon le tableau (V.5), et après de calculer l'erreur moyenne nos résultats sont corrects par plus de 88% .

### V.10. Conclusion

Parmi les avantages cités de la logique floue, le modèle mathématique non requis ainsi une interprétation et implémentation simple.

Le présent chapitre décrit une approche d'intelligence artificielle à base de logique (Fuzzy Logic) de type MAMDANI, développée pour l'estimation de l'état de santé d'huile d'un transformateur.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases nécessaires à la compréhension de la méthode ainsi nous avons présenté l'utilisation ainsi les concepts de la LF.

Nous a permis de dire que la LF nécessite l'aide d'un expert qui devient très précieux lors de la conception d'un système flou avec un bon choix des différents paramètres du système est la phase la plus importante de l'application de la logique floue, et puis l'implémenter en suivant les différentes étapes nécessaires.

Les résultats obtenus en utilisant la logique floue a démontré leur efficacité en termes de pourcentage élevé de bonnes prédictions et du temps de calcul très très court.

La difficulté que nous avons rencontrée dans l'utilisation de la logique floue réside dans le choix de leurs paramètres, nous avons rencontré des difficultés dans, la fuzzification des variables d'entrées et de la sortie (forme de la fonction d'appartenance, nombre d'ensembles flous associés pour chaque variable) et la création des règles floues qui relient les entrées à la sortie. Nous pouvons dire ici, qu'il n'y a pas de règles pour choisir les paramètres du système d'inférence floue.

L'implémentation du système d'inférence flou (SIF) sous l'environnement MATLAB à l'aide d'interface graphique «**FIS**» se caractérise par sa simplicité. Ce chapitre montre l'efficacité de notre modèle proposé pour estimer l'état de santé d'huile ou la qualité d'huile d'un transformateur.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

L'objectif de notre travail était en premier lieu d'analyser l'état de l'huile utilisée dans les transformateurs avec différents catalyseurs. Lorsqu'elle est soumise à un vieillissement thermique de 672 heures à une température de 120°C et en second lieu de voir l'effet du vieillissement thermique sur les propriétés physico-chimiques et électriques.

En service, l'huile isolante subit un processus de dégradation, causé par l'effet de température, la présence d'eau, la présence des particules en suspension et d'autres facteurs.

L'ensemble des expériences réalisées ont conduit à mettre en évidence la dégradation des propriétés physico-chimiques de l'huile soumise à la contrainte thermique à un temps de vieillissement de 672 heures. Ceci est traduit par l'augmentation de l'indice d'acidité, de la teneur en eau, de l'indice de couleur et du facteur de dissipation.

Dans ce travail nous avons appliqué la technique floue pour prédire l'état de santé d'huile ou la qualité d'huile.

Les résultats obtenus par la technique floue sont basés sur l'expert humain et sont fortement fiables et utiles. La technique utilisée a donné un excellent accord avec les résultats expérimentaux obtenus par UTRH -Groupe SONELGAZ. D'après les résultats obtenus nous constatons une meilleure prédiction de la qualité d'huile que les méthodes traditionnelles proposées dans ce mémoire, ce qui veut dire une meilleure décision par rapport au diagnostic et à la prévention. Ce diagnostic a donné de bons résultats à 88% ce qui justifie que l'utilisation de l'intelligence artificielle permet d'estimer l'état de santé d'huile ou la qualité d'huile d'un transformateur. Pour faire fonctionner un transformateur contenant de l'huile comme isolant et refroidissant dans les meilleures conditions et pour une durée de vie optimale, il est primordial d'éviter son utilisation en surcharge et de le faire fonctionner dans sa fourchette nominale donnée par le constructeur. Ceci pour éviter l'augmentation de la température et par conséquent donner une plus longue utilisation du transformateur.

# *BEBLIOGRAFIES*

## *Bibliographie*

---

- [1] Transformateur de puissance-Partie I, Généralités CEI 60076-1 2011.
- [2] Les transformateurs de puissance, Ecole technique de Blida. Document SONELGAZ.
- [3] Jean Sanchez « Aide au diagnostic des défauts des transformateurs de puissance » Université Grenoble alpes, 2011.
- [4] Transformateur, Document réf. version du 26 janv 2010.
- [5] Lopez-Fernandez X. M., Ertan H. B., Turowski J. (ed). Transformers: analysis, design.
- [6] Alain SCHENK, Surveillance continue des transformateurs de puissance par réseaux de neurones auto-organisés. Thèse de Doctorat , Ecole polytechnique de Lausanne (EPL) 2001.
- [7] Analysis, and Reporting for Power Transformers and Shunt Reactors IEEE Standards. IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation, IEEE Std C57.125-2015 (Revision of IEEE Std C57.125-1991). December 2015. p. 184.
- [8] I. Fofana and J. Sabau, Application of petroleum-based oil in power transformer, Chap 6: Natural Gas Research Progress – IB, © 2008 Nova Science Publishers, Inc Editors: Nathan David and Theo Michel, ISBN: 978-1-60456-700-7. 2008.
- [9] Kulkarni S., V., Khaparde S. A. Transformer engineering: design, technology, and diagnostics. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2013. 730 p. ISBN : 978-1-4398-5377-1.
- [10] Alain SCHENK, Surveillance continue des transformateurs de puissance par réseaux de neurones auto-organisés, Thèse de doctorat, EPLF 2001.
- [11] Koutoua Simon KASSI, Étude de l'isolation hybride en vue de son application dans les transformateurs de puissance, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 2013.
- [12] AISSANI S, BENYAMINA A, Détection des gaz dans les huiles minérales isolantes après un vieillissement thermique,mémoire de mastér Université yahia fares de médea, 2019.
- [13] E. Aubert, Diagnostic Optique Du Vieillissement Electrique Des Résines Epoxyde Sous Faible Champ Electrique, Départ. Génie Electrique, L'université Toulouse Iii – Paul Sabatier, 2008.

## *Bibliographie*

---

- [14] L. Paul, Etude du phénomène d'électrisation par écoulement : impact d'un champ électrique externe sur la double couche électrique," Science Et Ingénierie En Matériaux, Mécanique, Energétique Et Aéronautique, Université de Poitiers 1er Décembre 2015.
- [15] Transformer oil handbook copyright Nynas Naphtenics AB Sweden 2004.
- [16] Benammar, influence du vieillissement électrique sur les propriétés de l'huile de transformateur, Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale polytechnique. Alger 2012.
- [17] Christophe Perrier, Etude des huiles et des mélanges à bas des huiles minéral pour transformateur de puissance -Recherche d'une mélange optimal, Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole centrale de Lyon 2005.
- [18] R. TOBAZEON, Conduction électrique dans les liquides, Techniques de l'ingénieur, Traité D 2430, Novembre 1996, p 4.
- [19] P. J. VUARCHEX, Huiles et liquides isolants, Techniques de l'ingénieur, Volume DAB, Traité D230, Juin 1995.
- [20] AZZEDIN N., Caractérisation des matériaux diélectrique application à l'huile minérales isolantes. Thèse de doctorat, USTHB , 2009.
- [21] ZMIRLI M, DOUSSAS F, Etude de propriétés des mélanges d'huile pour transformateur de puissance. Mémoire Ingénieur d'état en électrochimie, USTHB, Alger 2009.
- [22] LEBID M, les huiles minérales isolantes. Société des travaux de maintenance industrielle, 2000.
- [23] Norme CEI 269. Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolant en service dans le matériel électrique, 2004.
- [24] M. DUVAL, J. P. CRINE, « Diélectrique behavior and stabilisation of insolation oil in EHV curent Transformers », IEEE Trans. Elec. Insul., Vol EI-20, n° 2, April 1985, pp. 437-441.

## *Bibliographie*

---

- [25] A. SIEROTA, J. RUNGIS, « Electrical insulating oils – Part 1 : characterization and Pre- treatment of new transformer oils », IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, n° 1, 1995, pp. 8-20.
- [26] ZMIRLI M, DOUSSAS F., Etude de propriété des mélanges d'huile pour transformateur de puissance. Mémoire d'ingénieur d'état en électrochimie, USTHB, Alger. 2009.
- [27] AZZIZI M, DAHMANI F, Etude de la régénération des huiles de transformateur. Mémoire d'ingénieur en électrochimie, Université de Médéa, 2011.
- [28] Norme CEI 60247 ; Liquides isolants – Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique ( $\tan \delta$ ) et de la résistivité en courant continu», Avril 2004.
- [29] T.O. Rouse, Mineral insulation oil in transformers, IEEE Electrical Insulating Magazine, Vol. 14, n°3, pp. 6-16, May/June 1998.
- [30] M.R. Meshkatoddini , A practical méthode for life time estimation of the used mineral oils, IEEE Proceedings of International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 305-308, Graz (Austria), 7-12 July 2002.
- [31] T.K.Saha and P. Purkait ; « Investigations of temperature effects on the dielectric response Measurement of transformer oil-paper insulation system », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, n°1, pp. 252-260, January 2008.
- [32] S. Abdi, A. Boubakeur and A. Haddad ; Influence of thermal ageing on transformer oil properties, IEEE Proceedings of International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 409-412, Poitiers (France), 30 June-04 July 2008.
- [33] I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi and E. Gokenbakh ; « Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. Part 1: Investigation of mixed liquids, IEEE Electrical Insulating Magazine, Vol. 18, n°3, pp. 18-31, May/June 2002.
- [34] B. Richardson, “Transformer Life Management, Bushings and Tap Changers”. Colloquium on Transformer Life Management, pages 8/1-8/4- October 1998.
- [35] R. Fournié, Les isolants en électrotechnique : Essais, Mécanismes de dégradation, Applications Industrielles, Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, Eyrolles, Paris, 1990.

## *Bibliographie*

---

- [36] Working Group 09 of CIGRE Study Committee 12. Lifetime Evaluation of Transformers. *Electra* 150:38-52, October 1993.
- [37] G. Breen, on the behalf of Study Committee 12, “Essential requirements to maintain transformers in service”, paper 12-103, *CIGRE session*, Aug. 30–Sept 5, 1992.
- [38] J. Unsworth, F. Mitchell, Degradation of Electrical Insulating Paper Monitored With High Performance Liquid Chromatography, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, n°4 Volume 25, August 1990.
- [39] W. Lampe, E. Spicar, Rapport CIGRE n°12-05-1976.
- [40] I. Fofana, Y. Zié and M. Farzaneh, Dielectric Response methods for diagnostics of Power equipment, In *Recent Advances in Dielectric Materials*, Editor: Ai Huang, Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-1-60692-266.
- [41] Norme CEI 60475, Méthode d'échantillonnage des diélectriques liquide 1974 .
- [42] Norme ASTM D 1500 , Équivalent à NFT 60 – 104 et NFT ISO 2049 produits pétroliers: détermination de la couleur,1998.
- [43] Norme CEI 60296, Détermination de la teneur en eau ;1997.
- [44] Norme CEI 247, Mesure du facteur de dissipation ,1978.
- [45] Norme ISO 03104, Mesure de la viscosité,1998.
- [46] Norme ISO 12185, Mesure de la densité, 1996.
- [47] Norme CEI 61620, Mesure de la conductivité,1998.
- [48] W. Wu, Synthèse d'un contrôleur flou par algorithme génétique, application au réglage dynamique des paramètres d'un système, Thèse de doctorat université de Lille, 1998 .
- [50] D. Mokeddem, Contrôle flou des processus génétiques biotechnologie à base d'algorithme génétique, Thèse de doctorat université de Sétif 2014.
- [51] C-C lee, fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller . *IEEE transaction on systems man and cybernetics*. 20(1990)404-418.
- [49] L. zadeh “AFuzzy sets, *Information and control*. 8(1965)338-353.
- [52] N. Mataj, M. Mokhtari, Contrôle par la logique floue, *Matlab R2009 Simulink et state flow pour ingénieur chercheurs et étudiant*. Springer 2010 pp 747-805.

*ANNEXE*

# ANNEXE

. Tableau A.1. Prélèvements d'huile neuve avec fer

HUILE NEUV+fer	22/02 - 0he	24/02 - 48	01/03 - 168	03/03-216	09/03 - 36	11/03-4	t6-5	t7	t8
Teneur en eau(ppm)	30,4	11,4	7,4	16,65	14,6	6	8,3	8,2	17,1
Indice de couleur(IC <0,5		0,5	0,9	1,1	1,7	2,3	2,9	3,2	4,3
Indice d'acidité(mgK	0,023	0,03	0,047	0,05	0,064	0,075	0,084	0,091	0,11
facteur de désipatio	0,004	0,0027	0,0067	0,01	0,017	0,021	0,028	0,033	0,041
Viscosité	7,384								
Densité	0,886								
Indice de réfraction	1,474								
perméivité	3,4	2,02	2,06	2,06	2,06	2,06	2,07	1,95	1,49
Tension de claquag	20,5								
Résistivité×E <sup>3</sup> (GΩ,m	135,85	108,76	43,85	27,31	18,14	15,76	11,69	10,45	8,53
condictivité(ψ/m)		14	31,5	45,4	93,1	170	237	264	272

# ANNEXE

**Tableau A.2. Prélèvements d'huile neuve .**

HUILE NEUV	22/02 =0heur	24/02 =48he	01/03 = 168he	03/03=216h	09/03 =360he	11/09=408he	t6=504	t7=552huer	t8
Teneur en eau(ppm)	30,4	12,1	6	8,5	12,4	7,65	8,3	15,9	15,7
Indice de couleur(IC)	<0,5	0,5	0,9	1	1,3	1,7	2,2	3	3,9
Indice d'acidité(mgKOH/g)	0,023	0,03	0,035	0,045	0,056	0,061	0,067	0,081	0,11
facteur de désipation(tgδ)	0,004	0,0025	0,005	0,011	0,011	0,018	0,021	0,024	0,042
Viscosité (mm <sup>2</sup> /s)	7,384								
Densité	0,886								
Indice de réfraction	1,474								
permétabilité(!)	3,4	2,78	2,07	2,06	2,04	2,07	2,06	2,05	1,95
Tension de claquage(KV)	20,5								
Résistivité xE <sup>3</sup> (GΩ,m)	135,85	138,37	52,88	25,88	26,3	18,44	19	14,23	7,92
conductivité(ps/m)		18,5	46,9	53,1	111	151	212	253	306

# ANNEXE

**Tableau A.3. Prélèvements d'huile neuve avec cuivre .**

HUILE NEUV+cuivre	22/02 =0he	24/02 =48	01/03 = 168	03/03=216	09/03 =36	11/03	t6=504	t7	t8
Teneur en eau(ppm)	15,3	15,1	6	17	25	10	10,3	9	17,6
Indice de couleur(IC)	<0,5	0,6	3	3,2	4	4,5	4,6	5,7	8
Indice d'acidité(mgKOH/g)	0,023	0,035	0,092	0,11	0,14	0,14	0,19	0,22	0,3
facteur de désipation(tgδ)	0,004	0,004	0,026	0,027	0,041	0,03	0,064	0,073	0,084
Viscosité	7,384								
Densité	0,886								
Indice de réfraction	1,474								
permétabilité	3,4	2,78	2,07	2,06	2,04	2,04	2,06	2,08	2,07
Tension de claquage(KV)	20,5								
Résistivité×E <sup>3</sup> (GΩ.m)	135,85	138,37	52,88	25,88	26,3	6,04	4,98	4,42	3,81
condéctivité(ps/m)		18,2	124	170	198	373	418	464	489