



*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Amar Theledji -Laghouat*



**FACULTE : Technologie**

**DEPARTEMENT : Electrotechnique**

**MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : Brahimi Baghdad**

**DOMAINE : Sciences techniques**

**FILIERE : Electrotechnique**

**OPTION : Electrotechnique Industrielle**

**Thème**

Détermination de degré de polymérisation du papier isolant de transformateur par la spectroscopie infrarouge

**Jury de soutenance**

Nom et prénom	Grade	Qualité
Yousfi Aissa	MCA	Président
Boudraa Saliha	MCA	Encadreur
Seghier Tahar	PR	Examineur

**Promotion : 2024**

# *Dédicace*

*Louange à Dieu seul,*

*Ce travail est dédié spécialement*

*À ma chère maman, ma raison de vivre, en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience, son amour et ses sacrifices.*

*À mon cher papa pour son amour et son dévouement*

*À vous, mes parents, je dis merci d'avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes considérations et ma grande admiration pour vous.*

*À ma chère sœur, et mes chers frères, qui je le sais, ma réussite est très importante à leurs yeux. Que Dieu vous garde pour moi.*

*À mes amis, mes enseignants et pour ceux qui m'ont donné de l'aide un jour, que Dieu vous paye pour tous vos bienfaits.*

*Pour finir, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédié ce mémoire*

*Baghdad Brahimi*

## **Remerciements**

*Louange à Dieu seul.*

*Tout d'abord, je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadreur, Dr. BOUDRAA SALIHA, pour le suivi et l'orientation de mon travail. Ses conseils, sa rigueur scientifique et sa perspicacité m'ont beaucoup appris. Merci beaucoup, Madame BOUDRAA SALIHA.*

*J'adresse mes remerciements aux membres du comité d'évaluation qui m'ont fait l'honneur de participer au Jury de soutenance.*

*Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille, et en particulier à mes parents. Je voudrais adresser mes remerciements à ma sœur et mes frères ainsi qu'à leurs familles pour le soutien moral et les encouragements tout au long de mes études.*

# Table des matières

<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	V
<i>Liste des figures</i> .....	VI
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLS</b> .....	VII
<i>Introduction générale</i> .....	VIII
<i>Organisation du travail</i> .....	IX
<i>Originalité du travail</i> .....	X
<i>Problématique</i> .....	XI
<b>CHAPITRE I</b> .....	1
<b>LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE</b> .....	1
<b>I.1. Introduction</b> .....	2
<b>I.2. Définition</b> .....	2
<b>I.3 Le rôle de transformateur</b> .....	2
<b>I.4 Les différents types de transformateur</b> .....	3
<b>I.5. Constitution générale de transformateur</b> .....	3
<b>I.6 le système d’isolation dans les transformateurs de puissance</b> .....	4
<b>I.6.1 isolation solide</b> .....	4
Principaux types d’isolation solide.....	4
A) Isolation solide conventionnelle.....	5
<b>I.6.2 isolation liquide</b> .....	6
<b>I.7. Phénomène de vieillissement associé au système isolant</b> .....	7
<b>1.7.1. Dégradation du papier isolant</b> .....	8
<b>1.7.2. Dégradation de l’huile minérale isolante</b> .....	9
<b>1.7.3. Vieillissement du complexe papier-huile minérale</b> .....	9
<b>1.8. Conclusion</b> .....	10
<b>CHAPITRE II</b> .....	11
<b>SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS PAR ANALYSE DE SON ISOLATION</b> .....	11
<b>II.1. Introduction</b> .....	12
<b>II.2. Idée générale sur les techniques de diagnostic des isolants dans les transformateurs de puissance :</b> .....	12
<b>II.3. Les techniques d’analyses de l’isolation de transformateur</b> .....	14
<b>II.3.1 Méthodes de surveillance et de diagnostic de l’isolation liquide</b> .....	14
<b>II.3.2 Méthodes de surveillance et de diagnostic de l’isolation solide</b> .....	20
.....	22

<b>II.4. Conclusion</b> .....	22
<b>CHAPITRE III</b> .....	23
<b>Apport des techniques spectroscopiques infrarouge (FTIR) et spectrophotométrie UV sur le diagnostic des transformateurs de puissance</b> .....	23
<b>III.1. Introduction</b> .....	24
<b>III.2 Les techniques de l'analyse spectroscopiques (IFTR et UV)</b> .....	25
<b>III.2.1 La spectroscopie Infra Rouge à transformée de Fourier IRTF</b> .....	25
<b>III.2.2 Mesure des produits dissous par Spectrophotométrie UV/Visible</b> .....	30
<b>III.3. Conclusion</b> .....	31
<b>Chapitre IV</b> .....	33
<b>Résultats Expérimentaux et discussion</b> .....	33
<b>IV.1. Introduction</b> .....	34
<b>IV.2 Préparation des échantillons</b> .....	34
<b>A) L'huile Minérale Borak 22</b> .....	34
<b>B) L'huile Minérale Nynas</b> .....	35
<b>IV.3 Méthodes et procédures expérimentales</b> .....	37
<b>IV.3.1. Mesure de la viscosité</b> .....	37
<b>IV.3.2. Mesure de produits de décomposition dissous DDP</b> .....	39
<b>IV.3.3. L'analyse par La spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier (FTIR)</b> .....	41
<b>IV.4 Analyse de corrélation</b> .....	43
<b>IV.5. Conclusion</b> .....	45
<i>Conclusion Générale</i> .....	47
<i>Références bibliographiques</i> .....	49
<i>Résumé</i> .....	53

## ***LISTE DES TABLEAUX***

<b>Tableau IV.1</b> : Caractéristiques de l'huile Borak 22 .....	35
<b>Tableau IV. 2</b> : Caractéristiques de l'huile Nynas .....	36
<b>Tab. IV.3</b> caractéristiques des transformateurs étudiés.....	37
<b>Tableau IV.4</b> : résultats de mesure la viscosité.....	38
<b>Tableau IV.5</b> Coefficients de corrélation entre les différentes méthodes .....	44

## *Liste des figures*

<b>Fig.I.1</b> : le noyau du transformateur .....	3
<b>Fig. I.2.</b> Différent type de papier d'isolation .....	5
<b>Fig. I.3</b> : Structure chimique du Glucose et de la cellulose .....	5
<b>Fig. I.4</b> : vieillissement de système d'isolation dans les transformateurs de puissance [3].....	8
<b>Fig. II.1</b> : Évaluation de l'état de l'huile isolante [3,14].....	13
<b>Fig. II.2</b> : Évaluation de l'état du papier isolant .....	14
<b>Fig. II.3:</b> Titreur Coulométrique Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau de liquide isolant .....	15
<b>Fig. II.4</b> : Tensiomètre pour la mesure de la tension interfaciale .....	16
<b>Fig. II.5</b> : Viscosimètre .....	18
<b>Fig. II.6</b> : Schéma de la cellule de mesure de la tension de claquage .....	19
<b>Fig. II.7</b> : Dieltest DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation.....	19
Diélectrique et la permittivité relative [24], .....	19
<b>Fig. II.8</b> Chromatographe en phase liquide HPLC (FTIR-ATR).....	21
(Laboratoire de chimie université de Laghouat).....	21
<b>Fig. II.9.</b> Structure chimique de cellulose .....	21
<b>Fig. III.1.</b> Principe général de la technique FTIR .....	26
<b>Fig. III.2.</b> Schéma de principe d'un spectromètre FTIR .....	26
<b>Fig. III.3.</b> Domaines d'absorption correspondant à différents types de liaisons chimiques .....	27
<b>Fig. III.4</b> : photographie du dispositif FTIR (Laboratoire de chimie Laghouat).....	28
<b>Fig. III.5</b> : Exemple d'absorbance mesurée par la spectroscopie infrarouge dans la gamme allant de 1600 à 1820 cm <sup>-1</sup> et de 1400 à 1550 cm <sup>-1</sup> .....	29
<b>Fig. III.6</b> : Exemple d'absorbance mesurée par la spectroscopie infrarouge dans la gamme allant de 3200 to 3600 cm <sup>-1</sup> . (Détection d'eau) .....	29
<b>Fig. III.7:</b> Spectrophotomètre T60 UV/Visible .....	30
<b>Fig. III.6:</b> Exemple d'affichage de spectres d'absorbance mesurés .....	31
<b>Fig. IV.1</b> : viscosimètre rotatif .....	38
<b>Fig. IV.2</b> : Résultats de mesure de la viscosité .....	39
<b>Fig.IV.3</b> :Spectrophotomètre UV/visible utilisé.....	40
<b>Fig. IV.4:</b> structure de base d'un spectrophotomètre .....	40
<b>Fig. IV.5</b> : Courbe de l'absorbance illustrant les produits de décomposition dissous des échantillons .....	41
<b>Fig. IV.6.</b> Spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier (FT/IR-4200) de JASCO (université de Laghouat- laboratoire de recherche) .....	42
<b>Fig. IV.7</b> Résultats de spectroscopie IFTR, de chaque échantillon dans la gamme 500 à 4000 cm <sup>-1</sup> . .....	43
<b>Fig.IV.8</b> : Effet de la durée de vieillissement thermique sur la transmittance mesurée par la spectroscopie infrarouge dans la gamme allant de 500 à 3000 cm <sup>-1</sup> .....	43
<b>Fig. IV.9</b> : Corrélation entre la viscosité et FTIR .....	44
<b>Fig.IV.10</b> : Corrélation entre DDP et FTIR.....	45

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
H <sub>2</sub> O	Formule brute de l'eau
H <sub>2</sub>	Hydrogène
CEI	Commission électrotechnique internationale (International Electrotechnical Commission)
DDP	Produits de décomposition dissouts (Dissolved Decay Products).
DP <sub>v</sub>	Degré de polymérisation moyenne
HPLC	Chromatographie en phase
DGA	Analyse des gaz dissous
IRTF	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (Fourier Transformed InfraRed Spectroscopy)
AN	Nombre d'acidité (acid Number) (mg KOH/g)
UV	Ultraviolet
VIS	Visible

## *Introduction générale*

Les transformateurs de puissance sont des équipements importants et coûteux dans les réseaux d'énergie électrique. En termes d'investissement, ces équipements représentent près de 60% du prix d'un poste de transformation. N'importe quelle panne ou mise hors service imprévisible de cet élément peut entraîner des dommages dans les réseaux électriques et peut conduire à d'immenses pertes financières. Un programme de maintenance approprié s'avère nécessaire pour augmenter autant que possible leur durée de vie.

Les pannes des transformateurs de puissance sont étroitement liées aux défauts dans leurs systèmes d'isolation. Dans de bonnes conditions de fonctionnement, la durée de vie des transformateurs se situe entre 30 et 40 ans. Cependant, en réalité, ce n'est généralement pas toujours le cas, car dans des applications pratiques, les systèmes d'isolation sont soumis à plusieurs sortes de contraintes, les plus importantes étant d'origines électrique, thermique mécanique et chimiques. Ces contraintes donnent naissance à des défauts internes qui se développent lentement entraînant la détérioration progressive de l'isolation. Ces défauts, s'ils ne sont pas détectés, peuvent mener à des pannes catastrophiques et engendrer par conséquent, d'énormes coûts de réparation. L'analyse du complexe isolant constitué d'huile et de papier cellulose fournit des informations permet de détecter les signes de défaillances.

Plusieurs outils et méthodes pour la surveillance et le diagnostic des transformateurs de puissance sont actuellement disponibles, mais une approche globale de la réalité du comportement du système est à ce jour, en quelque sorte, omise.

Le présent travail, entreprise dans le cadre des travaux de recherches de laboratoire de l'université de Laghouat<sup>1</sup>, sur l'étude et l'exploration de nouvelles méthodes de diagnostic de l'état de l'isolation dans les transformateurs de puissance.

---

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Etude et Développement des Matériaux Semiconducteurs et Diélectriques LEDMASD.*

## *Organisation du travail*

Ce travail comporte quatre chapitres.

- Le premier chapitre présente de manière générale les éléments constituant les transformateurs de puissance, nous avons mis l'accent sur l'isolation liquide et solide, en présentant de la façon générale les causes de vieillissement de papier isolant
- Le deuxième chapitre, traite les différentes méthodes de diagnostic conventionnelles et modernes, en exposant les dispositifs expérimentaux utilisés pour les mesures, la surveillance et le diagnostic de l'isolation solide et liquide du transformateur. Nous avons mis l'accent sur les méthodes d'analyse de l'isolation solide.
- Le troisième chapitre, présente une étude récapitulative de l'apport de techniques d'analyse spectrale (spectroscopie IFTR et la spectrophotométrie UV) sur la surveillance et le diagnostic de l'isolation de transformateurs.
- Dans le quatrième chapitre nous étudions par divers scénarios expérimentaux ; la possibilité d'évaluer l'état de l'isolation solide à travers les réponses spectroscopiques de liquide isolant dans les transformateurs en services. Les résultats expérimentaux obtenus ont été utilisés dans l'étude de corrélation, qui nous aidera dans le contrôle de propriétés de papier isolant.

Pour clôturer ce travail, une conclusion générale sera donnée pour avancer quelques remarques et présenter les éventuelles perspectives quant à la continuation de ce travail.

## *Originalité du travail*

Plusieurs raisons expliquent le développement d'outils de diagnostic efficaces des transformateurs. La première est le coût initial élevé de ces équipements et de leur maintenance. Le second aspect vient du besoin des exploitants de prolonger la vie de fonctionnement de ces équipements aussi longtemps que possible. La troisième c'est le besoin impérieux de trouver une méthode fiable et indirecte pour suivre en ligne l'état de l'isolation de transformateur.

La durée de vie des équipements à isolations imprégnées de liquide tels que les transformateurs est directement reliée à l'isolation solide. Il est alors important de pouvoir estimer l'état de l'isolation solide, le besoin d'une méthode permettant de surveiller indirectement la dégradation du papier isolant et suivre sans état en ligne est actuellement une priorité supérieure.

Dans ce travail, une nouvelle méthode de surveillance de l'état de l'isolation solide dans les transformateurs a été proposée, cette étude porte sur l'analyse approfondie de réponse spectroscopique FTIR et UV. Ces deux méthodes, ne sont pas encore utilisées, sont en grande partie liées au fait qu'au meilleur de nos connaissances, il n'existe à ce jour pas d'interprétation quantitative aux résultats fournis. Et jusqu'à présent, aucune étude n'a encore été effectuée pour utiliser ces deux méthodes pour la surveillance de produits de dégradation de papier dans l'huile minérale isolante.

Notre contribution dans ce travail est considérée la première, et présente un intérêt considérable pour les laboratoires d'analyse d'huile (le temps et le coût d'investissement), tout en réduisant le nombre d'équipements et de consommables (produit chimiques) et augmenter la fiabilité de diagnostic.

# *Problématique*

Depuis près d'un siècle, l'isolation solide constitue la partie la plus importante dans les équipements électriques. Cependant, les produits celluloseux qui représentent la partie solide de l'isolation des transformateurs de puissance possèdent de nombreuses faiblesses. En effet le vieillissement de l'isolation solide est accéléré par l'humidité, l'oxygène, les catalyseurs métalliques, la température, le champ électrique, etc. Ce qui a pour conséquence l'augmentation du taux de dégradation de l'isolation de l'appareil. Les recherches sur les propriétés des matériaux isolants sont devenues une priorité car ils peuvent aider à proposer de nouvelles investigations et méthodes de diagnostic plus fiables.

Ces dernières années, un certain nombre d'études sur les paramètres de dégradation de l'isolation solide, ont été réalisées pour prédire la vie restante des équipements. Cependant, les résultats sont loin d'être satisfaisants, puisqu'ils ne simulent pas les conditions de vie réelle des équipements électriques. Une compréhension plus approfondie des phénomènes de vieillissement est indispensable pour développer des systèmes de surveillance et de diagnostic de l'isolation plus efficaces. Un gain économique énorme sera donc réalisé.

De ce fait, la compréhension et l'interprétation de la spectres infrarouges et ceux ultraviolet (FTIR et UV) résultants de l'isolation solide, et l'analyse de corrélation entre les propriétés physiques et chimiques et ces réponse spectrales, peut donner une image plus claire sur la dégradation du papier isolant dans le transformateur, et fournir un outil de diagnostic très efficace et moins onéreux.

Répondant aux points ci-dessus, nos objectifs ont été tracés comme suit :

- Étude de la fiabilité d'analyse spectroscopique IRFT<sup>1</sup> et UV<sup>2</sup> pour la surveillance en ligne de l'état de l'isolation de transformateurs de puissance

---

<sup>1</sup> Spectroscopie IRFT : spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier ; ou IRFT

<sup>2</sup> Spectrophotométrie UV : spectrophotométrie Ultra-Violet

- Percevoir la dégradation de papier isolant dans les réponses spectroscopique des huiles isolante de transformateurs, et ce par analyse de corrélation entre les réponses spectroscopiques IFTR et UV et les mesures de qualité d'huile isolante.

**CHAPITRE I**

**LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE**

## **I.1. Introduction**

Au-delà d'une certaine distance et/ou d'une certaine puissance, le transport d'énergie électrique doit se faire sous une tension suffisamment élevée. En effet, la puissance est le produit de la tension par le courant ; pour une puissance donnée, plus la tension est élevée, plus le courant est faible. Il en résulte donc des pertes par effet Joule et des sections de conducteurs plus faibles.

Le transformateur est le composant permettant d'élever l'amplitude de la tension alternative disponible à la sortie de l'alternateur pour l'amener aux niveaux requis pour le transport. A l'autre bout de la chaîne, du côté des consommateurs, les transformateurs sont utilisés pour abaisser la tension et la ramener aux valeurs utilisées dans les réseaux de distribution.

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur les transformateurs, à savoir : leur constitution, rôles, les différentes catégories, et nous allons mettre l'accent sur les différents types de leur isolation.

A la fin du chapitre nous allons donner une idée sur les principales causes des défaillances de systèmes isolants huiles-papier dans les transformateurs de puissance.

## **I.2. Définition**

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation [1] Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence, nombre de phases) de l'énergie électrique à courant alternatif.

## **I.3 Le rôle de transformateur**

Le rôle principal du transformateur est d'adapter le niveau de tension aux nœuds de connexion (niveaux souhaitables).

Un autre rôle important des transformateurs insérés dans les réseaux d'énergie est leur contribution au réglage du niveau de tension en fonction des conditions de charge du réseau. Ceci est réalisé par modification de leur rapport de transformation au moyen de changeurs de prises [2].

#### I.4 Les différents types de transformateur

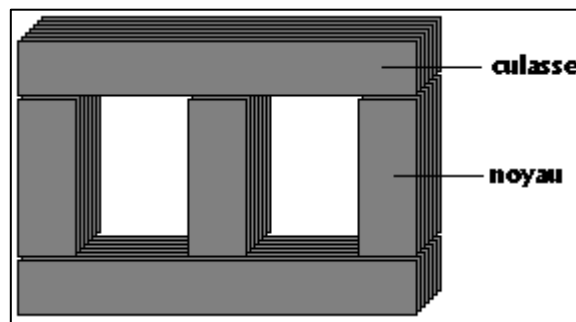
Il y a trois types de transformateur de puissance [3]

- **Les transformateurs de distribution :** 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.
- **Les transformateurs de moyenne puissance :** 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.
- **Transformateur de grande puissance :** 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.5. Constitution générale de transformateur

Nous avons situé on bref les composants de transformateur en générale. [4]

- Le noyau (entrefer) c'est la chaîne de canalisation de champ magnétique, composé par des tôles en matériaux ferromagnétique.



**Fig.I.1 :** le noyau du transformateur

- Les enroulements (les bobines), la matière utilisée le cuivre ou bien aluminium mais généralement en cuivre, les enroulements ce sont les organes qui produisent le champ magnétique, couvrez par un papier isolant.
- Le système de refroidissement, le système change à un transformateur a autre ça dépend fabriquent et l'utilisation.
- Le système isolant (huile, papier)

## **I.6 le système d'isolation dans les transformateurs de puissance**

En générale, les transformateurs de puissance sont remplis par huile isolante. En plus il y a l'isolation des enroulements par isolation cellulosique (isolation solide). Les stations de production utilisent beaucoup plus les transformateurs remplis d'huile minérale à cause de sa grande rigidité diélectrique, et ses caractéristiques performantes. [5]

### **I.6.1 isolation solide**

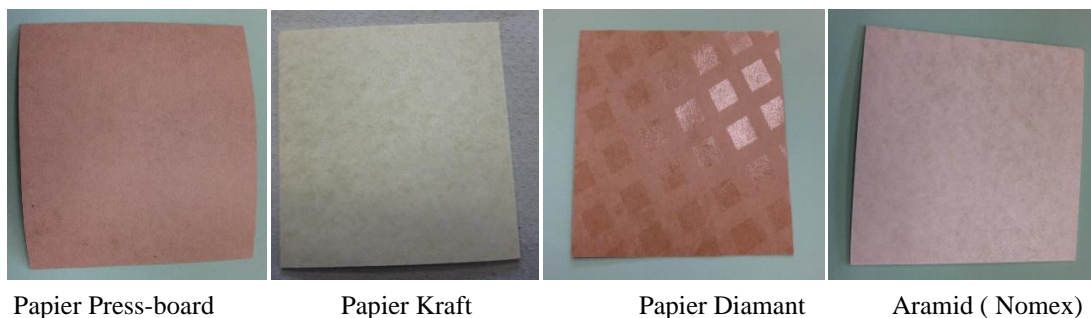
Les cylindres isolants compressés et le carton constituant les matériaux celluloses isolants dans les transformateurs représentent le meilleur compromis technique et économique pour l'isolation des systèmes imprégnés dans les transformateurs de puissance [6].

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. Papiers et cartons sont imprégnés par le diélectrique liquide (huile) afin d'augmenter leur rigidité diélectrique et réduire le risque de décharges partielles.

#### **Principaux types d'isolation solide**

On distingue trois types d'isolation solide :

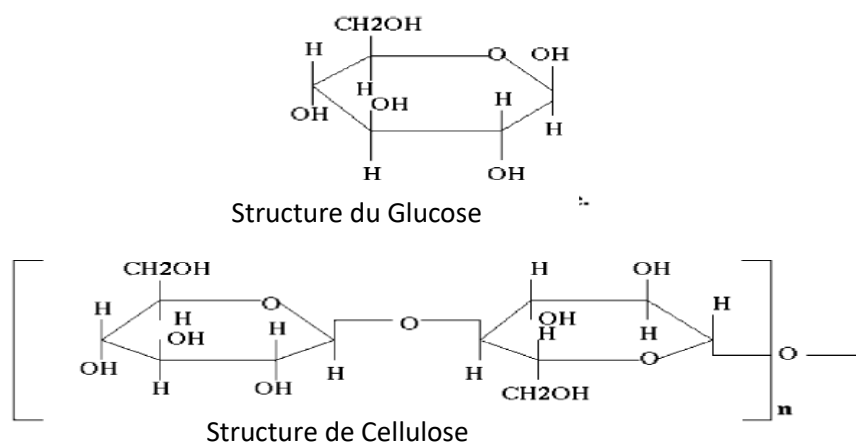
- *Isolation solide conventionnelle* : papiers et cartons sont à base de fibres de cellulose.
- *Isolation solide haute température* : papiers et cartons sont à base de polymères synthétiques (aramide).
- *Isolation solide hybride* : association des papiers cellulose et aramide.



**Fig. I.2.** Différent type de papier d'isolation

**A) Isolation solide conventionnelle**

Elle est constituée du papier et du carton qui sont constitués de fibres de celluloses (chaînes de glucose extraites de la pulpe de bois ou de fibres de coton). Les celluloses sont formées de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène. La figure I.3 présente le motif élémentaire d'une cellulose.



**Fig. I.3 :** Structure chimique du Glucose et de la cellulose

Les papiers et les cartons sont des matériaux isolants possédant des caractéristiques diélectriques excellentes. L'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement l'huile minérale leur confère une rigidité diélectrique remarquable. Les cartons présents dans les transformateurs de puissance ont plusieurs fonctions. Ils sont employés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement. De par leur nature diélectrique, les cartons isolent électriquement les bobinages entre eux. En plus, leur porosité leur permet d'être

imprégnés par le liquide isolant et caloporteur qui circule dans le transformateur. Ils contribuent donc à l'évacuation de la chaleur dégagée dans les différentes parties du dispositif.

Les cartons pour transformateurs sont conçus à partir de pâte cellulosique chimique de type. Le papier Kraft est l'un des papiers les plus utilisés dans l'industrie électrique.

La cellulose est constituée de chaînes linéaires d'anneaux de glucose, Leur nombre par chaîne s'appelle le degré de polymérisation (DP). La présence de ces liaisons confère aux chaînes de cellulose une forme linéaire qui leur permet de former une structure compacte et ordonnée à chaîne plane. L'association de plusieurs dizaines voire centaines de chaînes de cellulose liées entre elles par des liaisons hydrogène constitue les micros fibrilles, la majeure partie de la force mécanique du papier est due à la solidité de ces fibrilles et fibres.

Pour que la rigidité diélectrique du système d'isolation soit la plus élevée que possible, le papier est soumis à un processus appelé processus d'imprégnation d'huile, qui consiste à faire sécher le papier sous vide, puis introduire l'huile isolante pour remplacer l'air dans les pores du papier ; cette huile étant auparavant séchée et dégazéifiée en utilisant d'autres techniques. À la fin du processus d'imprégnation, le système d'isolation acquiert en général de très bonnes propriétés diélectriques, et mécaniques.

Le constant diélectrique du papier est deux fois plus élevé que celle de l'huile. Le papier et le carton seront donc utilisés dans les zones où règne un fort champ électrique pour renforcer l'isolation dans l'huile.

### **I.6.2 isolation liquide**

Les huiles isolantes dans les transformateurs est généralement l'huile minérale, fabriquée à partir d'un mélange d'alcane, de naphènes et d'aromatiques dérivés du pétrole brut. Les processus de raffinage peuvent comprendre un traitement à l'acide, une extraction par solvant, un hydrotraitement ou une combinaison de ces méthodes.

Les huiles isolantes dans les transformateurs, sont en générale, des liquides visqueux, non polaires contiennent carbone et hydrogène et inflammable a certaine température [7].

Lorsque le raffinage est terminé, les propriétés de l'huile minérale peuvent être restaurées aux spécifications. Le rôle fondamental de l'huile est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement des transformateurs. Les huiles modernes sont plus stables à la dégradation, ne contiennent pas de soufre corrosif, et doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- Haute rigidité diélectrique

- Point bas de congélation
- Un bas point d'écoulement et une faible teneur en soufre.
- Une bonne viscosité
- Une grande valeur de point d'inflammation

Le rôle d'une huile dans les transformateurs de puissance, est d'assurer les tâches suivantes :

- L'isolation (rigidité diélectrique fort 80 kV/mm).
- Assurer Le refroidissement (véhiculer la chaleur par circulation naturelle ou forcée de l'huile vers les radiateurs extérieurs).
- Diminuer la vitesse de phénomène d'oxydation

### **I.7. Phénomène de vieillissement associé au système isolant**

L'utilisation des différents matériaux dans les transformateurs dans les plusieurs buts. Ces matériaux à travers le temps et sous l'effet de plusieurs facteurs (électrique, thermique et mécanique) déclinent son état et ses caractéristiques souhaités. Ce phénomène qui touche le système d'isolation appelé le vieillissement. [2]

Les processus de vieillissement des matériaux isolants électriques impliquent une dégradation par cheminement, une érosion, une perte d'hydrophobie et une détérioration due à des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales [6]. Il y a deux types essentiels de vieillissement : vieillissement physique et vieillissement chimique [7].

Pour le vieillissement physique peut se produire avec ou sans transfert de masse. Et pour le vieillissement chimique les isolations peuvent être soumises à différents types de vieillissement chimique parmi eux : vieillissement thermique en présence d'oxygène, vieillissement par hydrolyse, vieillissement climatique et vieillissement électrique [7].

La figure I.4 illustre l'interaction entre ces contraintes et le système d'isolation du transformateur de puissance conduisant ainsi à son vieillissement. [3]

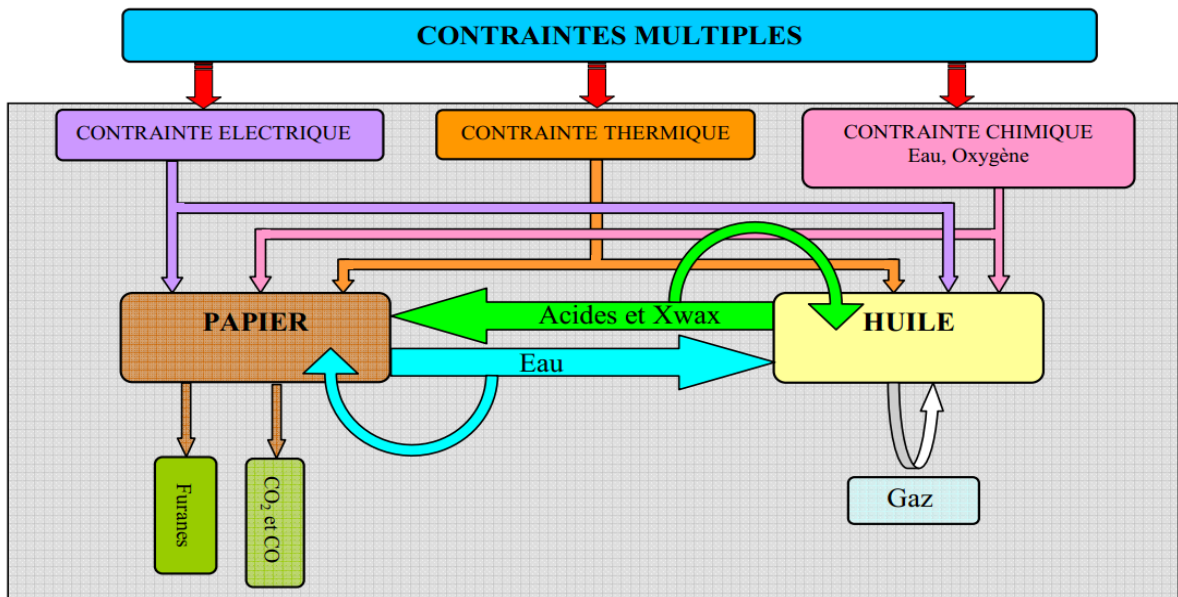


Fig. I.4 : vieillissement de système d'isolation dans les transformateurs de puissance [3]

### 1.7.1. Dégradation du papier isolant

Le papier isolant est utilisé pour faire l'isolation entre les enroulements, et entre les enroulements et le noyau dans le transformateur.

Ce papier est composé en majorité de cellulose, cette dernière est formée de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts oxygène.

Tout d'abord, selon la température atteinte, il peut se produire [7] :

- La pyrolyse qui entraîne la décomposition de la cellulose avec production de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, et H<sub>2</sub> Principalement. Ce phénomène n'affecte sensiblement les qualités mécaniques qu'au-dessous de 150<sup>0</sup>C.
- L'oxydation : c'est l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène, il provoque une dépolymérisation et résulte les aldéhydes, les acides et les gaz comme CO et H<sub>2</sub>O ...etc.
- L'hydrolyse qui est la réaction de l'eau avec les ponts oxygène et qui provoque la rupture de chaînes sans formation des produits libres. L'eau formée par pyrolyse et oxydation contribue à augmenter l'hydrolyse.

On peut calculer le nombre moyen de scissions par chaîne à partir du degré de polymérisation (DPv), qui est une grandeur liée au nombre moyen d'anneaux de glucose. Le degré de polymérisation se détermine par une mesure de viscosité d'une solution de papier dans le cupri-

éthylène-diamine. Si  $DP_0$  est le degré de polymérisation à l'origine et  $DP$  le degré de polymérisation après dégradation, le nombre moyen  $n$  de scissions par chaîne est  $n = (DP_0/DP) - 1$ . La valeur initiale  $DP_0$  est de l'ordre de 1100 à 1300 [7].

Le degré de polymérisation peut décroître au cours d'un vieillissement jusqu'à des valeurs très basses, 200 à 100 par exemple [7].

Le degré de polymérisation ( $DP_v$ ) du papier isolant électrique est un outil précieux pour évaluer son état et est utilisé dans les tests en laboratoire pour évaluer la durée de vie de l'isolation du transformateur [8]. De plus le degré de polymérisation permet de découvrir la durée de vie de transformateur restante. La mesure du degré de polymérisation ( $DP$ ) dans les transformateurs de puissance permet d'identifier l'état du papier isolant et sa relation avec la durée de vie restante du transformateur [9]. Alors, le degré de polymérisation du papier isolant est à grande importance dans les transformateurs pour connaître plusieurs paramètres de ce dernier.

### **1.7.2. Dégradation de l'huile minérale isolante**

Pendant le fonctionnement de transformateur, l'huile minérale isolante subit plusieurs changements dans ses propriétés chimiques et physiques. La décomposition purement thermique de l'huile minérale en l'absence d'oxygène et d'eau est appréciable seulement vers  $300^{\circ}\text{C}$  [7]. En présence d'oxygène, il se produit une oxydation qui comporte un certain nombre d'étapes (initiation, propagation, terminaison). Les produits finaux résultant de l'oxydation sont des alcools, des aldéhydes, des cétones, des esters, des acides,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  et des hydrocarbures légers [7].

Donc, ce phénomène de l'oxydation provoque un vieillissement de l'huile minérale, Dans l'huile minérale, il a été montré que le vieillissement constaté dans les appareils est essentiellement produit par un mécanisme d'oxydation accéléré par la présence de métaux (cuivre, fer) [3], et aussi par autre paramètres tels que l'humidité le champ électrique et la lumière peuvent aussi influencer l'oxydation de l'huile isolante [4]. En plus Les produits de décomposition issus de l'oxydation de l'huile provoquent des changements de couleur et d'odeur [4].

### **1.7.3. Vieillessement du complexe papier-huile minérale**

Le système d'isolation dans le transformateur subi a plusieurs contraintes, électriques, environnementales... etc. Ces contraintes dégradent progressivement les propriétés diélectriques

complexe isolant. Le processus de vieillissement thermique de chaque composant reste essentiellement le même, mais on constate en particulier que les produits d'oxydation de l'huile contribuent largement au vieillissement prématuré du papier. La vitesse de dégradation du papier peut être 10 fois plus rapide dans l'huile oxydée que dans un diélectrique chloré qui ne s'oxyde pas [7].

La dégradation de système isolant a un effet alternatif entre le papier et l'huile, le papier influence sur l'huile et vice versa. Comme l'huile est influencée par l'oxydation, l'eau fixée dans le papier lui accélère considérablement le processus de vieillissement. L'effet de l'air n'est pas toujours mis en évidence, car l'oxygène réagit principalement avec l'huile [7].

En plus, la température a une influence très importante, car elle provoque de vieillissement thermique associé à des réactions chimiques (hydrolyse, pyrolyse) [4]. La dégradation de l'huile et du papier dans les transformateurs entraîne des modifications des caractéristiques électriques, mécaniques et chimiques, entraînant une diminution de la résistance à la traction et du degré de polymérisation de l'isolation en papier [11].

## **1.8. Conclusion**

Les transformateurs de puissance sont des machines essentielles dans le réseau électrique. Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents éléments constitutifs et les principales propriétés des huiles et isolants solides utilisés dans les transformateurs de puissance. L'isolation solide dans cet appareil, est utilisée sous forme imprégnée, cette forme est appelée l'isolation mixte, le type conventionnel est constitué de papier cellulosique imprégné dans l'huile minérale.

A la fin du chapitre, nous avons présenté quelques notions sur le mécanisme et le processus de dégradation de l'huile isolante, du papier isolant, ainsi que le complexe constitué de deux matières.

**CHAPITRE II**

**SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES**

**TRANSFORMATEURS PAR ANALYSE DE**

**SON ISOLATION**

## **II.1. Introduction**

Les transformateurs de puissance sont des organes très importants dans le réseau électrique. Ils représentent un lien entre la production et le transport, alors ce sont responsables au service fourni pour toutes les abonnées du réseau.

En termes d'investissement, ces équipements sont très coûteux, n'importe quelle panne ou mise hors service imprévisible de ces éléments peut entraîner non seulement de gros dommages, mais aussi une interruption de l'alimentation électrique jusqu'à ce que des arrangements alternatifs ou des réparations fastidieuses soient entrepris ce qui peut conduire à d'immenses pertes financières. [3,12]

La durée de vie moyenne des transformateurs se situe entre 30 et 40 ans dans les bonnes conditions de fonctionnement, mais avec le fonctionnement le système d'isolation soumis à plusieurs contraintes (électriques, chimiques, mécaniques, thermiques...) [13], cette durée de vie peut être réduite. Les recherches sur les propriétés des matériaux isolants sont devenues alors, une priorité et peuvent aider à comprendre les mécanismes de détérioration de ces derniers, ce qui aboutit à découvrir des méthodes permettant d'améliorer les performances des appareils électriques, et amener à proposer de nouvelles investigations et méthodes de surveillance et de diagnostic pour détecter les signes de défaillances et procéder à une maintenance préventive avant toute défaillance et conséquences graves.

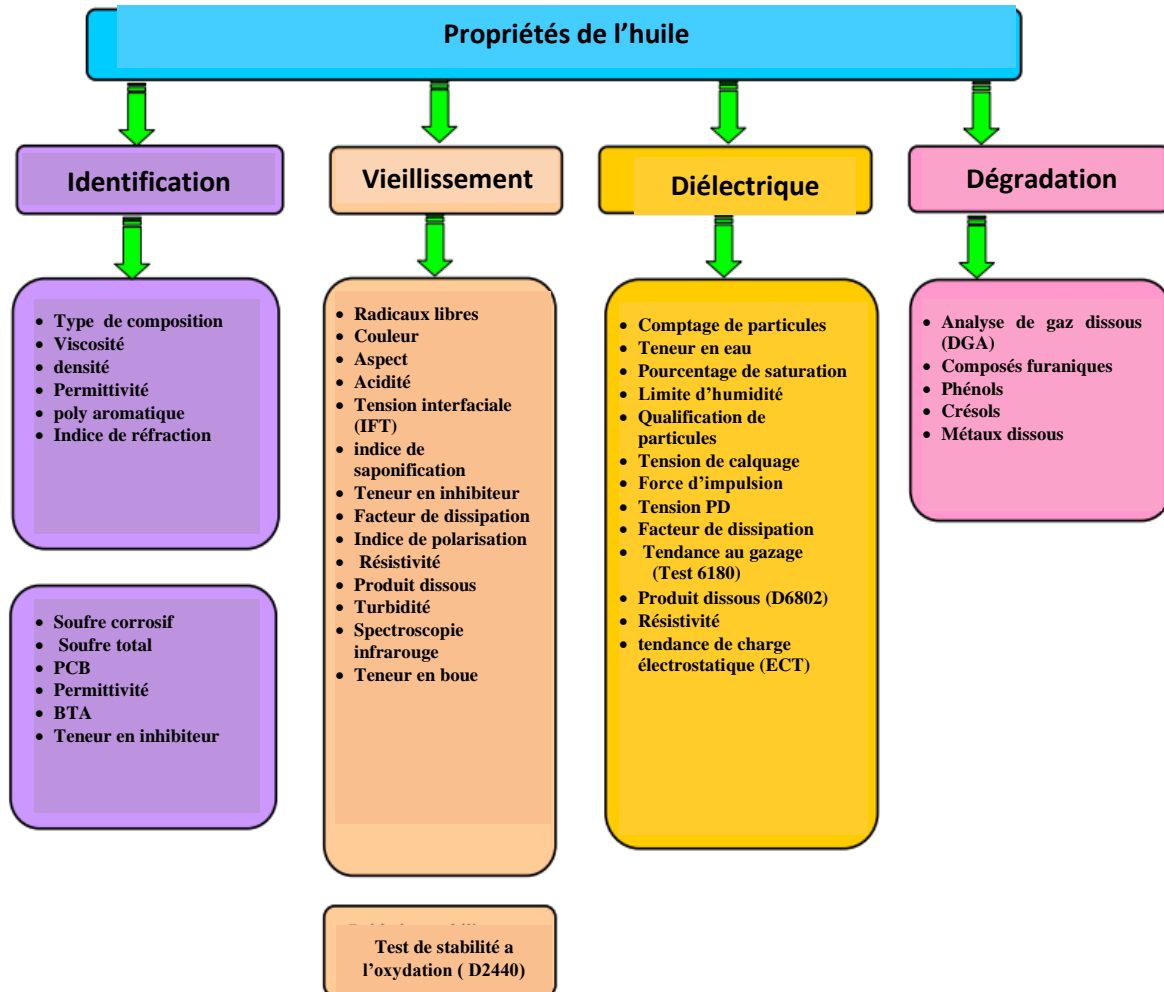
Plusieurs techniques de diagnostic de l'état des transformateurs sont élaborées Ces techniques de plusieurs types, électriques et physico- chimique. Chaque technique détermine un paramètre.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes méthodes d'évaluation, de surveillance et de diagnostic des isolants de transformateurs. Nous allons mettre l'accent sur les méthodes d'analyse physico-chimique effectuées sur les huiles et le papier pour évaluer leur taux de dégradation. Le matériel et les normes utilisés sont aussi présentés.

## **II.2. Idée générale sur les techniques de diagnostic des isolants dans les transformateurs de puissance :**

Les techniques de mesure et d'analyse de système d'isolation huile et papier ont pour but d'évaluer les variations des caractéristiques des matériaux isolants, afin de connaître l'état de transformateur de puissance.

Chaque technique mesure une grandeur spécifique, et s'effectue au moyen d'essais conventionnels (normes) ou plus perfectionnés. Les variations observées dans les différentes caractéristiques de l'huile peuvent être utilisées pour identifier les défauts naissants dans le transformateur. La figure II.1 présente de façon presque exhaustive l'ensemble des tests pour l'évaluation des propriétés de l'huile et la figure II.2, l'ensemble des tests pour l'évaluation des propriétés du papier.



**Fig. II.1** : Évaluation de l'état de l'huile isolante [3,14]

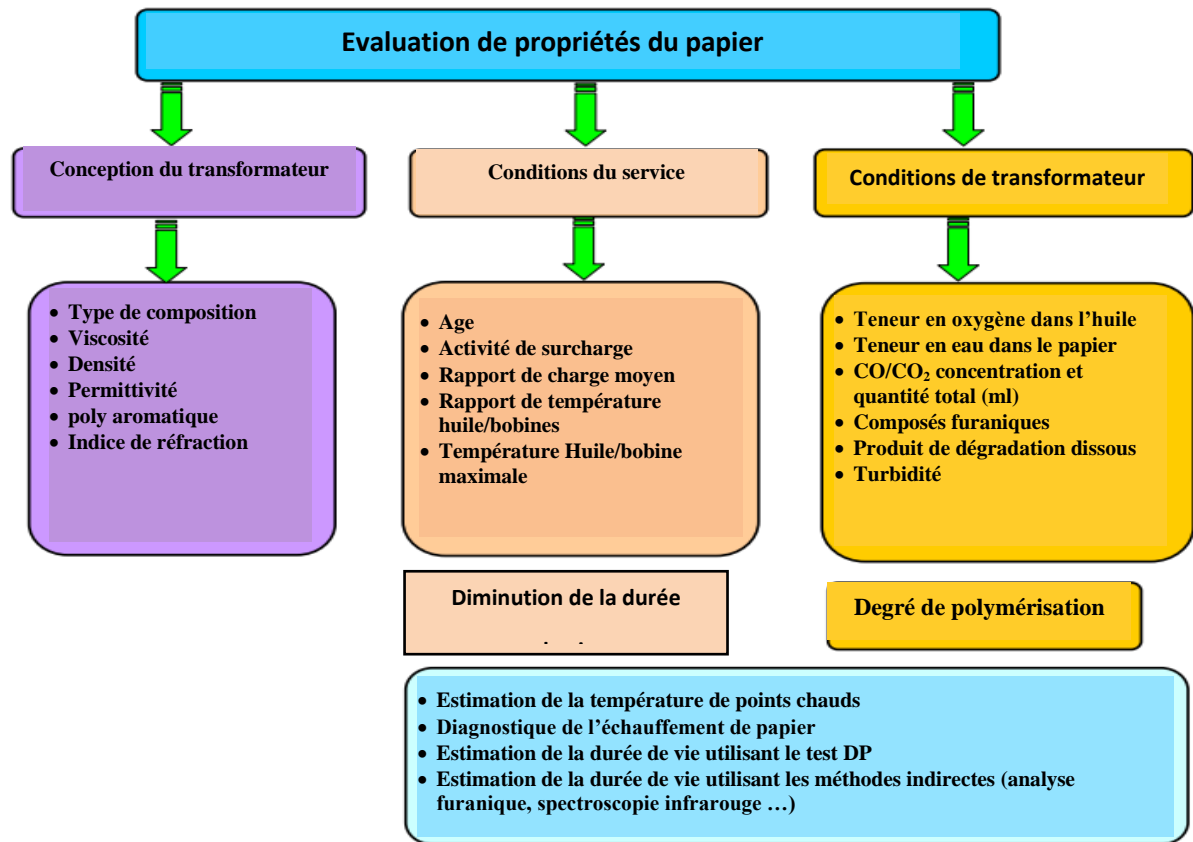


Fig. II.2 : Évaluation de l'état du papier isolant [3, 14]

### II.3. Les techniques d'analyses de l'isolation de transformateur

Actuellement, les techniques utilisées pour l'évaluation et le diagnostics de l'isolation des transformateurs sont nombreux. Nous allons citer dans ce qui suit les mesures les plus utilisées par les différents laboratoires industriels ou les laboratoires de recherches sur les isolations liquides et mixtes [4].

#### II.3.1 Méthodes de surveillance et de diagnostic de l'isolation liquide

##### A) Mesure la teneur d'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 [13]. L'eau peut être trouvée dans le transformateur à cause des plusieurs sources : l'eau résiduelle après séchage, l'eau provenant de la cellulose et du vieillissement de l'huile (oxydation) et l'eau issue des fuites au niveau des joints ou infiltrée durant des réparations et l'eau due à la respiration. L'eau peut trouver dans l'huile sous les états physicochimiques suivants [1] :

- Il se propage sous forme de vapeur dans le volume d'huile ;

- Liée aux sous-produits par des liaisons de Van Der Waals, et des liaisons d'hydrogène ;
- Il est absorbé par les impuretés telles que les fibres de cellulose ;
- Sous forme de petites gouttes lorsque le niveau de saturation est dépassé.

La mesure la teneur en eau s'effectue à l'aide de titreur automatique Karl Fischer 831KF Coulometer (figure II.3).



**Fig. II.3:** Titreur Coulométrique Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau de liquide isolant. [15]

### **B). Détermination de l'indice d'acidité**

Le nombre de neutralisation (AN) ou l'acidité du fluide isolant augmente principalement tant que l'huile s'oxyde. Un indice d'acidité accru indique une tendance à la détérioration de l'huile, en plus, l'acidité mené à la corrosion les pièces métalliques de transformateur d'un côté [4] et en revanche, l'acidité a des effets sur papier isolant de transformateur elle accélère la dégradation du papier et provoque une diminution du degré de polymérisation (DP) [16].

La mesure du AN permet la surveillance du processus d'oxydation de l'huile. Plus la valeur du AN est élevée, plus l'ampleur de l'oxydation est grande et plus tôt les produits solubles (composés acides) et colloïdaux se formeront. Pour une huile neuve, l'indice est inférieur à 0.01mgKOH/g. Au cours du processus de vieillissement, il peut augmenter jusqu'à 0.05 mgKOH/g et plus. La mesure de l'acidité est réalisée par un procédé chimique simple appelé la neutralisation. La valeur de l'acidité est exprimée en nombre de mg d'une solution de potasse alcoolique (KOH) normalisée à 0,1 nécessaire pour neutraliser un gramme de l'huile. Cette méthode est basée sur la neutralisation d'acide en présence d'indicateur coloré [4].

### C) Mesure de la tension interfaciale

La tension interfaciale donne une indication sur la teneur en composés polaires solubles dans l'huile qui affectent l'énergie de cohésion de l'interface eau-huile. La mesure de cette grandeur peut être utilisée comme paramètre important pour juger et évaluer l'état de fonctionnement du transformateur de puissance [17].

Classiquement, la tension interfaciale de l'huile de transformateur est mesurée à l'aide de la norme ASTM D971 [18]. (Figure II.4). L'unité de mesure de la tension superficielle est le dyne par centimètre (équivalent à mN/m). Ainsi, plus l'huile se détériore, plus cette valeur tend à être faible [4].



Fig. II.4 : Tensiomètre pour la mesure de la tension interfaciale [4].

### D) Analyse des gaz dissous (AGD)

À partir de l'analyse des gaz dissous dans l'huile, il est possible de distinguer les différents défauts qui se développent dans le transformateur. La tendance des données de gaz dissous permet de savoir le taux de génération de gaz et de déterminer la sévérité du problème [13].

L'ASTM D 3612-96, indique que les gaz qui peuvent être identifiés et déterminés incluent : Hydrogène-H<sub>2</sub>, Oxygène-O<sub>2</sub>, Azote-N<sub>2</sub> Monoxide de carbone-CO, Dioxide de carbone -CO<sub>2</sub>,

Méthane-CH<sub>4</sub>, Éthane-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, Éthylène-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, Acétylène-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, Propane-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> et Propylène-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>  
[3]

- **Les décharges partielles** sont un défaut électrique de faible énergie. Typiquement, ce défaut est identifié par l'augmentation des niveaux d'hydrogène.
- **Décharge électrique de faible énergie** est une étincelle de rupture à haute tension intermittente sans fort courant. L'étincellement est caractérisé par une augmentation des niveaux de méthane, d'éthane et d'acétylène.
- **La surchauffe** de l'huile peut être provoquée par le noyau du transformateur ou la surchauffe de conducteurs. La surchauffe est caractérisée par la présence de l'hydrogène ainsi que de méthane, d'éthane et d'éthylène.
- **Décharge électrique de haute énergie**, est le processus de défaut le plus grave, impliquant de hautes températures et courants élevés. La décharge d'arc est caractérisée par la présence de l'acétylène. En plus de l'acétylène, les autres gaz d'hydrocarbure et l'hydrogène seront produits dû au gradient de température entourant l'arc. Les défauts impliquant des matériaux d'isolation de cellulose ont comme conséquence la formation du monoxyde de carbone et/ou du dioxyde de carbonique.

La détermination de la concentration des gaz de défauts dans un transformateur s'effectue par chromatographie en phase gazeuse, suivant la norme D-3612 d'ASTM. [19]

### **E). Indice de Myers**

Cet indice est une relation entre la tension interfaciale et le nombre d'acide total, indice de Myers donne une estimation plus fiable pour la durée de vie restante de l'huile [13]. Indice inférieur à 100 ça veut dire que l'huile est oxydée et il faut le remplacer au plus vite.

### **F) Turbidité**

Physiquement, la turbidité est causée par la diffusion ou l'absorption de la lumière par des particules de différentes tailles. Pour les huiles des transformateurs, les huiles commencent à oxyder tant que le transformateur mise sous tension. Les résultats de l'oxydation comme les acides et les composés polaires se forment et deviennent à leur tour des boues. Ces boues vont ensuite recouvrir les surfaces d'échange thermique des différentes parties du transformateur et diminuer la

capacité de transfert de chaleur du système, ce mène à l'augmentation de température alors la dégradation de l'huile [4].

La mesure de turbidité fait par un turbidimètre, La turbidité néphélométrie est exprimée en unité NTU (Nephelemetric Turbidity Unit) [4].

### **G) Mesure de la viscosité**

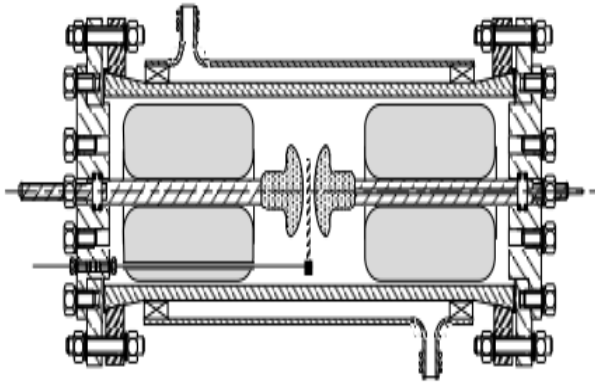
La fonction transfert de chaleur d'une huile dépend de la viscosité de cette dernière. La viscosité de l'huile est définie comme sa résistance à l'écoulement. C'est une caractéristique essentielle pour les liquides isolants. Les viscosités élevées sont moins désirables plus particulièrement dans les climats froids. La viscosité cinématique est mesurée en chronométrant le temps d'écoulement de l'huile dans un tube capillaire calibré [20, 21]. La figure II.6 montre une photographie d'un viscosimètre. [15]



**Fig. II.5 : Viscosimètre**

### **H) Mesure de la tension de claquage**

La tension de claquage diélectrique représente la tension à laquelle un fluide isolant devient conducteur. Elle est rapportée en kilovolts [22, 23].

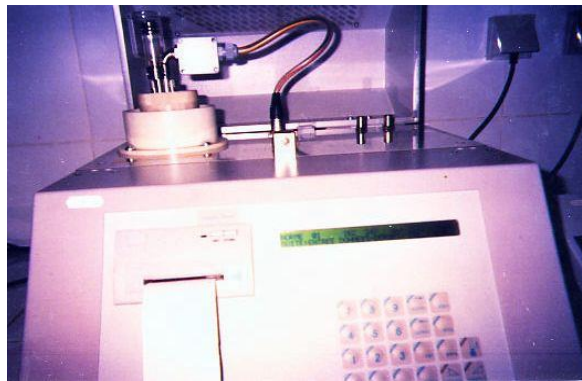


**Fig. II.6** : Schéma de la cellule de mesure de la tension de claquage [3, 24]

### I) Mesure du facteur de dissipation diélectrique

Le facteur de dissipation des huiles isolantes électriques 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.

Le facteur de pertes diélectrique ( $\text{tg}\delta$ ) peut être mesuré à l'aide d'un pont de Schering de type Dieltest DLT (Figure II.7), selon la norme CEI 247 [25,26].



**Fig. II.7** : Dieltest DLT utilisé dans la mesure du facteur de dissipation

Diélectrique et la permittivité relative [24],

### II.3.2 Méthodes de surveillance et de diagnostic de l'isolation solide

#### A) Analyse des dérivés furaniques par Chromatographie en phase liquide (HPLC)

La dégradation des isolants cellulose, à base de cellulose, se traduit par l'apparition de composés spécifiques dissous dans l'huile appelés les dérivés furaniques. Donc on peut évaluer la dégradation de la cellulose par l'analyse des teneurs en dérivés furanique dans l'huile en service.

Les cinq principaux dérivés furaniques que l'on peut trouver dans une huile sont [27] :

- L'hydroxyméthylfurfuraldéhyde (5HMF) ;
- Le furfuraldéhyde (2FAL) ;
- Le méthylfurfuraldéhyde (5MEF) ;
- L'alcool furfurylique (2FOL) ;
- L'acétylfurane (2ACF).

Quand les furannes deviennent supérieurs à 250 parties par milliard (ppb), l'huile doit être absolument nettoyée. Pour un transformateur sain, les furannes ne dépassent pas les 100 ppb. Dans le cas d'une importante détérioration du papier par effet thermique, le taux des furannes est au moins 1000 ppb, et peut atteindre les 70000 ppb [13].

*Parmi les composés furaniques, le 2-furaldéhyde est le plus abondant. Sa concentration dans l'huile est liée au degré de polymérisation (DP) et par conséquent à la résistance physique de l'isolant solide. Pour tester les furanes, un échantillon de l'huile est obtenu et certaines techniques chimiques sont utilisées pour extraire les furanes de l'huile. L'extrait est ensuite analysé à l'aide d'un processus appelé chromatographie liquide à haute performance (HPLC) [28]. La procédure de test par la chromatographie en phase liquide (HPLC), est décrite dans la CEI-1198 [29].*

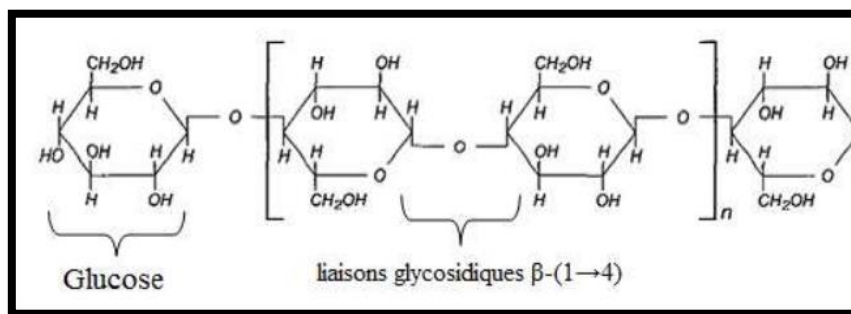


**Fig. II.8** Chromatographe en phase liquide HPLC (FTIR-ATR)

(Laboratoire de chimie université de Laghouat)

### B) Mesure de Degré de polymérisation (DP<sub>v</sub>)

Le papier isolant de transformateur est composé en majorité de cellulose. La cellulose est formée de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts oxygène. Les glucoses sont nommés monomères, ces derniers sont liés par des liaisons glycosidiques  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), conduisant à des polymères linéaires [4].



**Fig. II.9.** Structure chimique de cellulose [4]

Le nombre moyen d'anneaux de glucose est le degré de polymérisation (DP<sub>v</sub>). Les longues chaînes d'anneaux de glucose donnent la solidité du papier, cela signifie que la rupture de ces chaînes se conduira à la dégradation du papier principalement. Donc, l'état du papier a une relation directe avec le degré de polymérisation. La mesure de degré de polymérisation est une mesure essentielle pour connaître l'état du papier. Longtemps, la mesure de degré de polymérisation a été faite par une

méthode viscosimétrique après dissolution de la cellulose dans la cupréthylènediamine [7]. Le principe de la méthode est décrit dans la norme D4243 d'ASTM [30].

Les étapes de mesure en bref comme suit [4] :

- Préparation du papier imprégné ;
- Le papier imprégné d'huile est préalablement dégraissé à l'hexane au Soxhlet, puis conservé au dessiccateur à température ambiante;
- Dissolution du papier;

## **II.4. Conclusion**

La meilleure façon de prolonger la vie d'un transformateur est de connaître son état à tout instant. Pour ce faire, il faut rassembler les informations relatives à la qualité de l'huile et du papier. L'enregistrement continu de ces mesures fournit ainsi une image plus complète de l'état de l'isolation du transformateur et en combinant ces paramètres nous pourrions aider à anticiper une situation critique.

Le but principal du diagnostic et de la surveillance l'état de l'équipement est de détecter le signe avant-coureur d'un défaut naissant, la progression du vieillissement ou d'autres problèmes de fonctionnement, et de surveiller leurs évolutions pour permettre à l'ingénieur de prendre les mesures appropriées afin d'éviter les pannes.

L'application des techniques physico-chimiques sont plus pertinentes mais restent, la plupart du temps, destructives et/ou locales. La corrélation entre les groupes de techniques de diagnostic fait le moyen le plus intelligent qui donnera la vue d'ensemble la plus exacte sur l'état de l'isolation.

Dans ce chapitre, nous avons présenté, les différentes méthodes conventionnelles, ainsi que les dispositifs expérimentaux utilisés pour les mesures, le diagnostic, et la surveillance des isolants solides et liquides des transformateurs. Nous avons donné avec plus de détails, les méthodes les plus utilisées dans les laboratoires de recherches ou les laboratoires industriels.

## **CHAPITRE III**

### **Apport des techniques spectroscopiques infrarouge (FTIR) et spectrophotométrie UV sur le diagnostic des transformateurs de puissance**

### III.1. Introduction

La durée de vie restante des transformateurs est évaluée à partir de surveillance de dégradation de papier isolant.

Nous avons vu dans le chapitre précédent, les techniques de surveillance et de diagnostic de papier isolant dans les transformateurs de puissance, et nous avons mentionné que la mesure de degré de polymérisation (DP) et la mesure des produits furaniques dissous dans l'huile minérale ainsi que l'analyse des gaz dissous (CO et CO<sub>2</sub>) dans l'huile [4 13], sont des techniques très importantes pour évaluer l'état de l'isolation solide d transformateurs de puissance.

Les inconvénients de ces méthodes résident dans ce qui suit :

- La mesure de degré de polymérisation nécessite le prélèvement d'échantillons de papier ce qui provoque l'arrêt du transformateur suivi par des conséquences lourdes au point de vue économique surtout.
- Pour l'analyse de gaz dissous CO et CO<sub>2</sub>, et jusqu'au ce jour, il n'y a pas une interprétation sûre qui donnent une exactitude élevée de diagnostic de papier isolant.
- Le traitement de l'huile par utilisation de la terre à foulon élimine les furannes et les gaz dissous dans l'huile. Ainsi donc, un échantillon de l'huile doit être prélevé pour l'analyse de furannes les gaz dissous bien avant le traitement de l'huile du transformateur ce qui n'est pas facile tous le temps vue le nombre de révisions et de traitements que les transformateurs subits durant leurs services.
- L'analyse par chromatographie en phase liquide HPLC est une méthode couteuse et lente.

Afin de palier à ces problèmes ainsi que d'autres problèmes; des nombreuses études ont été développer pour évaluer l'état du papier isolant par des techniques indirectes. [12, 31]

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'apport de technique de spectroscopie infrarouge et UV sur l'évaluation de dégradation du papier interprétée par la détérioration de leur chaines cellulosiques (diminution de degré de polymérisation DP)

## **III.2 Les techniques de l'analyse spectroscopiques (IFTR et UV)**

Nous avons vu dans le chapitre I, que dans les conditions d'exploitation, l'isolation de transformateur se dégrade sous l'effet de diverses contraintes, électriques, chimiques et thermiques. Il en résulte des produits dissous qui sont le résultat du vieillissement de l'isolant en service. La teneur des produits de décomposition dissous dans l'huile isolante se compose d'une variété de composés, tels que les peroxydes, les aldéhydes, les cétones, et les acides organiques. Par conséquent, l'évaluation relative et la surveillance de la formation de ces produits peut être utilisée comme indicateur de vieillissement de l'isolation du complexe huile/papier. [3, 32,14].

### **III.2.1 La spectroscopie Infra Rouge à transformée de Fourier IRTF**

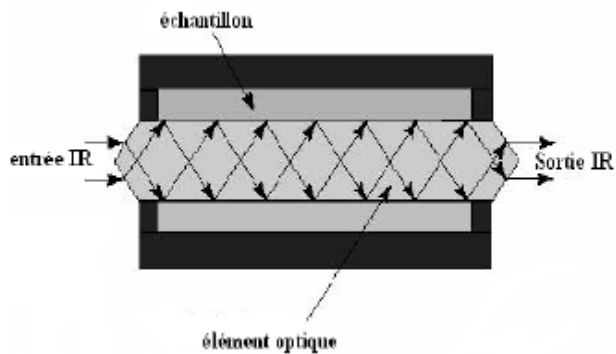
#### **A) Principe**

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) permet de déterminer la nature des liaisons chimiques présentes dans le matériau à partir de l'absorption d'un rayonnement infrarouge. L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde auxquelles le matériau absorbe et les intensités de l'absorption.

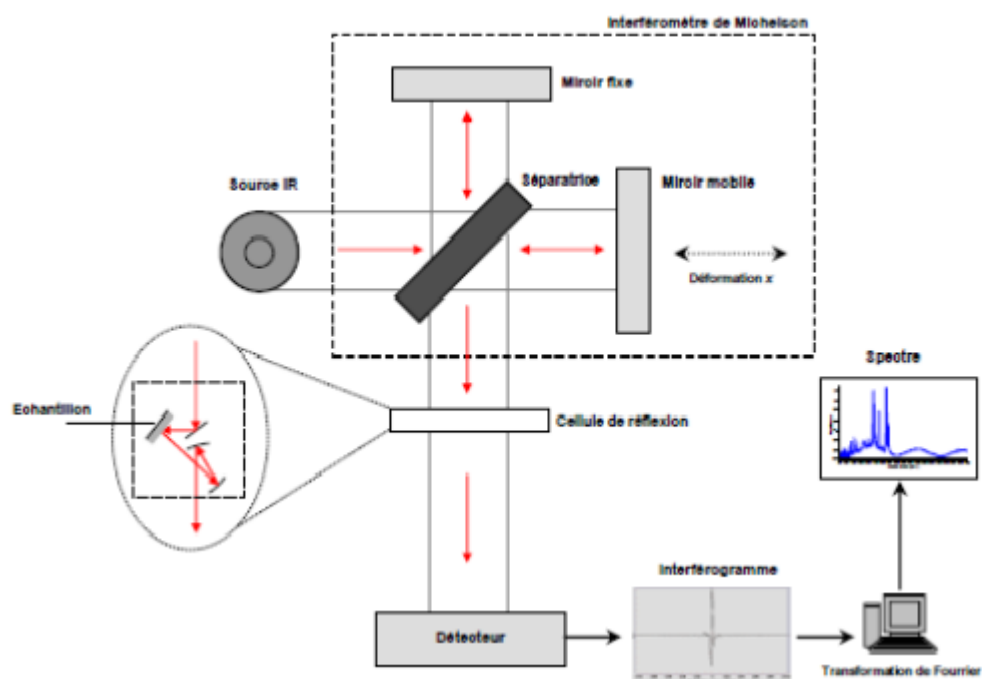
En chimie, les composés interatomiques ont des liaisons chimiques qui sont toujours en mouvement en raison des charges échangées entre les atomes dans les liaisons. Ce mouvement résulte une vibration à une fréquence spécifique. Quand applique le spectre infrarouge (figure III.1), Le spectre absorbera en fonction de la force de la vibration alors on peut connaître le type de la liaison du composé et donc le groupe fonctionnel.

À l'aide d'un ordinateur qui lié avec la FTIR pour afficher les résultats simplifier, ces résultats sous forme d'une graphe pour comprendre les résultats.

Les figures III.1, III.2 donnent une idée sur le principe de la technique FTIR. [12, 3]

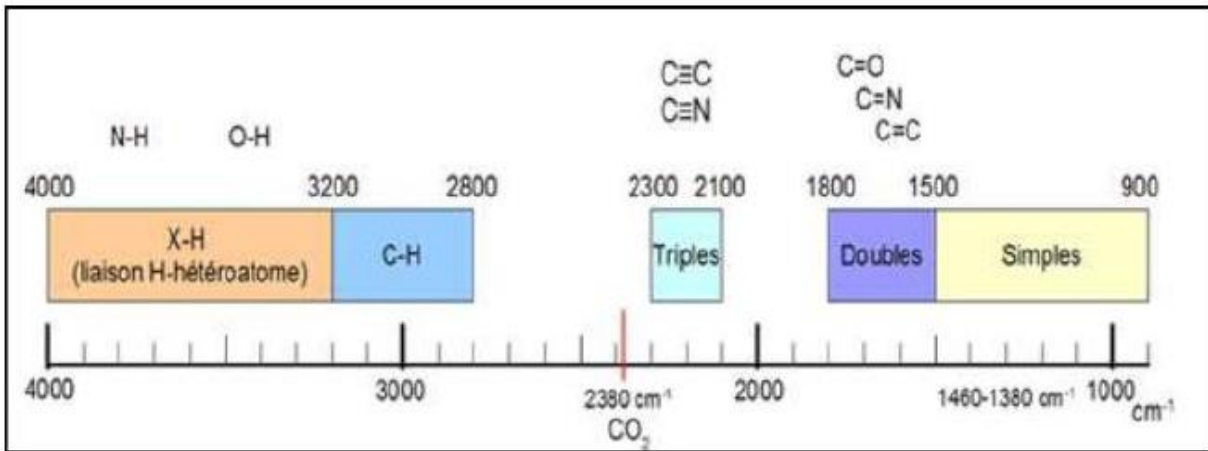


**Fig. III.1.** Principe général de la technique FTIR



**Fig. III.2.** Schéma de principe d'un spectromètre FTIR

La Figure III.3 donne les Domaines d'absorption correspondant à différents types de liaisons chimiques.



**Fig. III.3.** Domaines d'absorption correspondant à différents types de liaisons chimiques

### B) L'utilisation de la spectroscopie infrarouge

La technique de la spectroscopie infrarouge FTIR est un outil très puissant pour la surveillance et le contrôle des lubrifiants et des huiles des machines, puisqu'elle identifie les composés et la constitution des échantillons [13].

L'analyse l'huile des transformateurs par FTIR implique une détection des contaminants comme les produits d'oxydation et l'humidité [4]. Plusieurs expériences ont réalisé par la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier pour déterminer les paramètres de l'huile, YAZID HADJADJ [4], un de ceux qui l'ont utilisé la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier pour déterminer la teneur en eau et l'acidité dans l'huile. L'analyse des gaz dissous dans l'huile minérale est une technique traditionnelle qui est basé sur l'analyse de l'huile pour savoir les gaz dissous dans l'huile, analyse des furanes et la tension interfaciale, aussi ces techniques ont été réalisé par la FTIR [12].

### C) Évaluation l'état du papier isolant par la FTIR

Plusieurs techniques trouvées pour évaluer l'état de l'isolation des transformateurs. La mesure de degré de polymérisation est essentielle pour connaître l'état du papier isolant. La mesure connue c'est la mesure par un viscosimétrie (chapitre 2), l'inconvénient de cette technique c'est qu'elle nécessite l'arrêt du transformateur et prend du temps, et ça va toucher la qualité du réseau électrique

et le service fourni. La meilleure méthode pour évaluer l'état du papier c'est l'évaluation à travers l'huile, c'est ne nécessite pas l'arrêt du transformateur et suffit de prendre un échantillon d'huile.

Comme nous mentionné que l'huile minérale du transformateur contient des produits donne des informations de transformateur, donc aussi les produits de décomposition du papier été dissous dans l'huile. Si on faire une étude précise on peut évaluer l'état du papier. Pour faire analyse des produits dissous dans l'huile il y a la technique (DGA), ce technique analyse des gaz dissous dans l'huile mais peut la remplacer par l'analyse par la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier [33].

Plusieurs travaux ont rapporté que cela combinait a montré la possibilité d'utiliser la technique de spectroscopie pour déterminer le degré de polymérisation (DP) et teneur en eau du papier transformateur [33]. Pour les mesures de performances des liquides isolants, la combinaison de techniques de spectroscopie et un réseau neuronal artificiel est utilisé pour obtenir la corrélation entre la réponse spectrale et les propriétés chimiques et physiques du pétrole. Cette méthode combinée a été utilisée pour étudier un composé 2-FAL dans l'huile de transformateur et d'autre paramètres tel que la tension interfaciale et divers gaz [33].

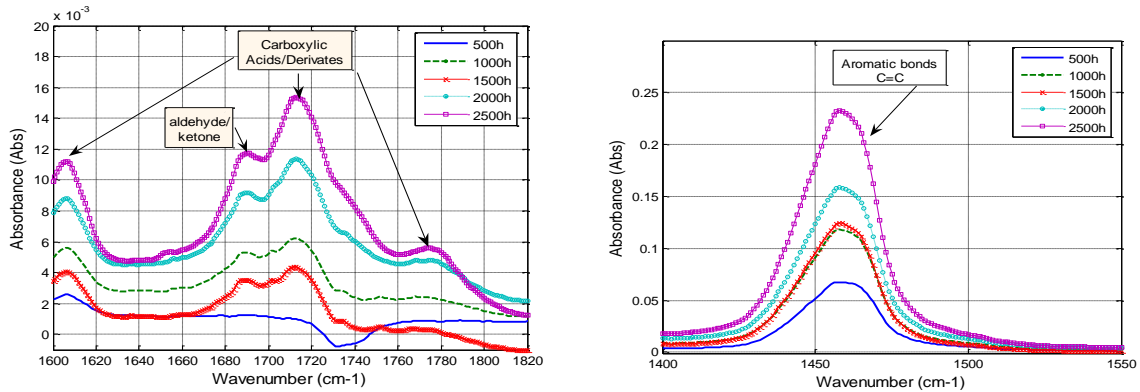


**Fig. III.4** : photographie du dispositif FTIR (Laboratoire de chimie Laghouat)

Comme chaque liaison se caractérise par ses propres nombres d'onde, elle peut facilement être identifiée. Cette sensibilité aux constituants de l'huile peut être utilisée pour détecter tous les produits de dégradation. Comme pour l'huile des machines, FTIR peut être utilisée pour identifier l'eau, les acides et d'autres produits de détérioration dans les huiles des transformateurs. Cette méthode a un énorme potentiel pour améliorer l'analyse des données recueillies par les méthodes traditionnelles.

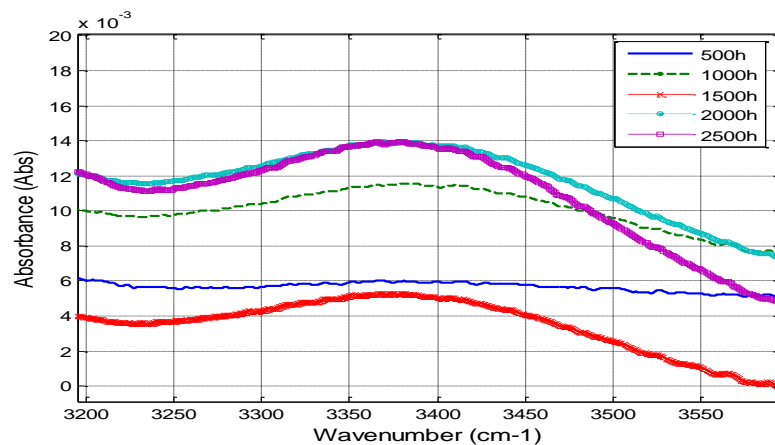
Au cours de processus de vieillissement de l'isolation dans les transformateurs de puissance ; les concentrations des composés dans l'huile augmentent. Les pics sont reliés à la formation des aldéhydes, des cétones, des acides carboxyliques...etc.

La figure III.5 présente un exemple de spectroscopie infrarouge effectuée sur un échantillon d'huile vieillie.



**Fig. III.5 :** Exemple d'absorbance mesurée par la spectroscopie infrarouge dans la gamme allant de 1600 à 1820  $\text{cm}^{-1}$  et de 1400 à 1550  $\text{cm}^{-1}$ . [Boua 2008]

Certaines études quantitatives ont pu examiner les teneurs en eau à 3400  $\text{cm}^{-1}$ , dans les huiles de lubrification des moteurs hydrauliques par FTIR [34], cependant, cette méthode a besoin de plus d'investigation. La figure III.6 montre une absorbance très faible pour différents temps de vieillissement.



**Fig. III.6 :** Exemple d'absorbance mesurée par la spectroscopie infrarouge dans la gamme allant de 3200 to 3600  $\text{cm}^{-1}$ . (Détection d'eau) [34]

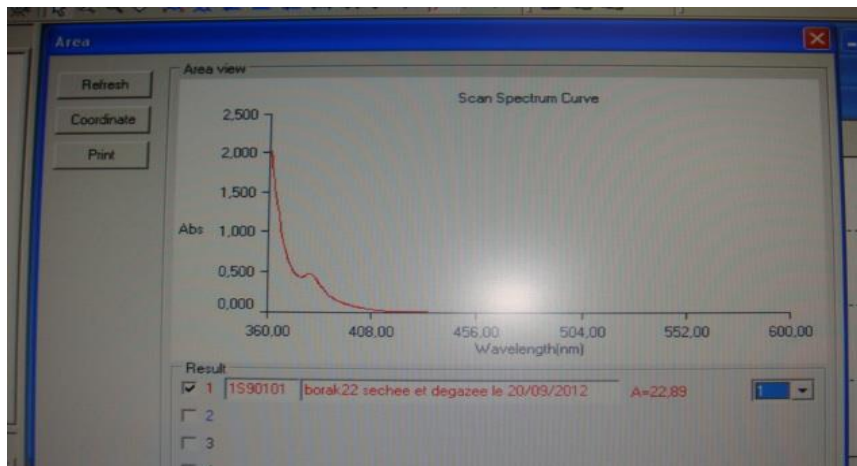
### III.2.2 Mesure des produits dissous par Spectrophotométrie UV/Visible

La norme ASTM Désignation 6802 est utilisée pour la mesure des produits de décomposition dissous. La figure III. 5 représente spectrophotomètre Thuramed T60 UV/Visible commercialisé par Thuramed. C'est un appareil à double faisceaux dont l'un traverse l'échantillon et l'autre sert de parcours de référence. Les spectrophotomètres à doubles faisceaux permettent de faire des mesures différentielles entre l'échantillon et le blanc analytique.



Fig. III.7: Spectrophotomètre T60 UV/Visible [24]

Sur le trajet optique du spectrophotomètre, un emplacement libre est réservé pour y placer notre cellule ou un autre dispositif adapté à l'état physique de l'échantillon étudié (gaz, liquide ou solide) et au domaine spectral concerné. Dans notre cas, le spectre est obtenu sur une plage de longueur d'onde allant de 360 à 600 nm en ordonnées et en abscisses l'absorbance varie de 0 à 2,5 comme le montre la figure III.16. Les produits de décomposition dissous représentent l'intégrale de la zone en dessous de la courbe d'absorbance. Ils sont déterminés automatiquement par le logiciel commercial UV Win 5 software v5.2.0 associé au spectrophotomètre.



**Fig. III.6:** Exemple d’affichage de spectres d'absorbance mesurés. [3]

### III.3. Conclusion

Les inconvénients de méthodes de diagnostic traditionnelles de l’isolation solide résident dans ce qui suit :

- La mesure de degré de polymérisation nécessite le prélèvement d’échantillons de papier ce qui provoque l’arrêt du transformateur suivi par des conséquences lourdes au point de vue économique surtout.
- Pour l’analyse de gaz dissous CO et CO<sub>2</sub>, et jusqu’au ce jour, il n’y a pas une interprétation sûre qui donnent une exactitude élevée de diagnostic de papier isolant.
- Le traitement de l’huile par utilisation de la terre à foulon élimine les furannes et les gaz dissous dans l'huile. Ainsi donc, un échantillon de l'huile doit être prélevé pour l'analyse de furannes les gaz dissous bien avant le traitement de l'huile du transformateur ce qui n’est pas facile tous le temps vue le nombre de révisions et de traitements que les transformateurs subits durant leurs services.
- L’analyse par chromatographie en phase liquide HPLC est une méthode couteuse et lente.

De nombreux chercheurs ont développé des techniques non destructives pour mesurer l’état de l’huile et du papier dans un transformateur de puissance. Les techniques de spectroscopie IFTR et UV sont utilisés comme outil pour évaluer l’état de l’isolation du transformateur, et donne plusieurs avantages par rapport les techniques traditionnelles.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'apport de technique de spectroscopie infrarouge et UV sur l'évaluation de dégradation du papier interprétée par la détérioration de leur chaînes cellulosiques (diminution de degré de polymérisation DP)

# **Chapitre IV**

## **Résultats Expérimentaux et discussion**

## **IV.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de différents tests effectués aux laboratoires de l'université de Laghouat (laboratoire de recherche en génie de procédée<sup>1</sup> et le laboratoire de physique<sup>2</sup>) sur les différents échantillons d'huile de transformateurs.

Il est important de souligner que cette étude présente non seulement les résultats concernant la mesure de viscosité et voir es réponses spectral UV et IFTR des différentes huiles isolantes, mais également l'étude de l'apport de ces techniques modernes sur l'évaluation de degré de dégradation de papier isolante, et ce par analyse de corrélation entre les résultats obtenus des différentes techniques.

Il s'agit d'effectuer des tests expérimentaux sur des échantillons des huiles isolantes, et présenter l'utilisation des techniques modernes et de nouvelles procédures pour la surveillance et le diagnostic des papier isolants en particulier et des transformateurs en général.

Avant tout propos, présentons d'abord le type des échantillons utilisés, et les techniques suivies pour leur préparation des échantillons.

## **IV.2 Préparation des échantillons**

Les échantillons de l'huile utilisées dans ce travail, sont collectées de différents transformateurs de 60 KV, ces transformateurs situés à SONELGAZ Hassi Rmel<sup>3</sup>. Il s'agit de deux types d'huile utilisée par les compagnies d'électricité en Algérie.

### **A) L'huile Minérale Borak 22**

C'est une huile de transformateur largement utilisée en Algérie, commercialement appelée BORAK 22. Ses caractéristiques principales sont données au tableau suivant

---

<sup>1</sup> *Laboratoire de recherche de génie de procédés, Université de Laghouat UATL), Laghouat, Algérie*

<sup>2</sup> *Département de sciences de la matière/ labo de physique, Université de Laghouat UATL), Laghouat, Algérie*

<sup>3</sup> *La compagnie d'électricité et de gaz, SONELGAZ Hassi Rmel Laghouat, Algérie*

**Tableau IV.1 : Caractéristiques de l'huile Borak 22 [3]**

<i>Propriétés électriques</i>	<i>Unité de mesure</i>	<i>Exigence de la norme huile neuve</i>	<i>Norme</i>	<i>Valeur mesurée</i>
Tension de claquage après repos	kV	> 70	CEI 156	38,8 - 72
Facteur de dissipation diélectrique à 90°C tgδ		≤ 5,00 E-03	CEI 247	0,87 E-03
<b><i>Propriétés physiques</i></b>				
Aspect		Limpide et exempte de matière solide	CEI 296	Limpide
Viscosité cinématique à 40°C	mm <sup>2</sup> /s	< 11	ISO 3104	6,940
Point d'éclair	°C	> 130	ISO 2719	137
Densité		< 8,95 E-01	ISO 12185	8,57 E-01
<b><i>Propriétés chimiques</i></b>				
Indice d'acidité	mg KOH/g	< 3,00 E-2	CEI 296	(2,00 – 5,8) E-02
Teneur en Eau	ppm	< 30	CEI 814	
Indice de couleur	ppm	< 02	ASTM D 1500	< 0,5
Indice de réfraction				1,474

## **B) L'huile Minérale Nynas**

Les Huiles naphthéniques de Nynas pour transformateur, sont reconnus mondialement pour leur très haute qualité Ces huiles ont des propriétés exceptionnelles grâce à leur basse viscosité à température élevées et à leur excellent pouvoir solvant aux températures très basses. Les huiles Nynas sont utilisées comme fluides fonctionnels, par exemple huiles pour câbles, huiles de transfert, caloporteurs, isolants, réfrigérants, fluides hydrauliques en installations industrielles, y compris la maintenance et les transferts de matière associés.

Tableau IV. 2: Caractéristiques de l'huile Nynas [3]

Propriétés	Unité	Méthode d'essai	Limites		Valeurs typiques
			Min.	Max.	
<b>1- Fonction</b>					
Viscosité 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104		8.0	7.6
Viscosité -30°C	Mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104		800	730
point d'écoulement	°C	ISO 3016		-45	-63
Teneur en eau	mg/kg	CEI 60814		30	<20
Tension de claquage					
- Avant traitement	KV	CEI 60156	30		40-60
- Après traitement	KV	CEI 60296	70		
Densité à 20°C	Kg/dm <sup>3</sup>	ISO 12185		0.895	>70
DDF à 90°C		CEI 60247		0.005	<0.001
<b>2- Stabilité</b>					
Couleur			Jaune pale		
Apparence		CEI 60296	Clair, sans matière en suspension et sans sédiments		
Acidité	mgKOH/g	CEI 62021		0.01	<0.01
Tension interfacial	mN/m	EN 14210	10		49
Teneur total en sulfure	%	ISO 14596		0.05	<0.01
Soufre corrosif		DIN 51353	Non corrosive		Non corrosive
Antioxydants	wt%	CEI 60666		0.40	0.30
Furane	mg/Kg	CEI 61198		0.05	<0.05
Composées aromatiques	%	CEI 60590			6
<b>3 Performances</b>					
Stabilité à l'oxydation à 120°C et 500h		CEI 61125 C			
Acidité totale	mgKOH/g		0.30		0.05
Boue	Wt%		0.05		<0.02
DDF à 90°C			0.050		0.014
<b>3- Informations importantes relatives à la santé, à la sécurité et à l'environnement</b>					
Point d'ébullition	°C		>250		
Point de fusion/point d'écoulement	°C		-45		
Point flash	°C	ISO 2719	140		144
Pression de vapeur			160 pa		
Solubilité			Insoluble dans l'eau, soluble dans la plupart des solvants organiques		< 3
Temperature d'auto inflammation	°C	IP 346	270		>270
PCA	Wt%	IP 346			
PCB		CEI 61619	Non détectable		Non détectable

L'échantillonnage, ainsi que les phases ultérieures de transport et de stockage de l'échantillon, est essentiel pour obtenir un résultat d'analyse valable et, par la suite, un diagnostic vraiment fiable, les échantillons sont collectés selon la norme *CEI 60475* qui décrit les méthodes, les conditions d'échantillonnage et de traitement des huiles isolantes. [35]

Le tableau IV.3 présente les caractéristiques de chaque transformateur étudié

**Tab. IV.3** caractéristiques des transformateurs étudiés

	<b>Puissance (KVA)</b>	<b>Voltage (KV)</b>	<b>Année</b>	<b>État</b>
Échantillon 1(C1)	160	30/0.4	2003	
Échantillon 2(F10)	250	30/0,4	2005	Chauffé
Échantillon 3(F13)	400	30/0,4	2022	Neuve
Echantillon4(C2)	200	60/30		
Échantillon 5(C3)	250	60/30		

### **IV.3 Méthodes et procédures expérimentales**

Notre étude a été effectuée sur cinq échantillons d'huiles.

#### **IV.3.1. Mesure de la viscosité**

La viscosité est un paramètre physicochimique représentant la résistance à l'écoulement de l'huile sous certaines conditions spécifiques (ASTM D445). [21].

La mesure de viscosité est effectuée au laboratoire de physique<sup>1</sup>, ou nous avons utilisé le viscosimètre rotatif de la marque FUNGILAB (figure IV.1).

<sup>1</sup> Département de sciences de la matière/ labo de physique, Université de Laghouat UATL, Laghouat, Algérie

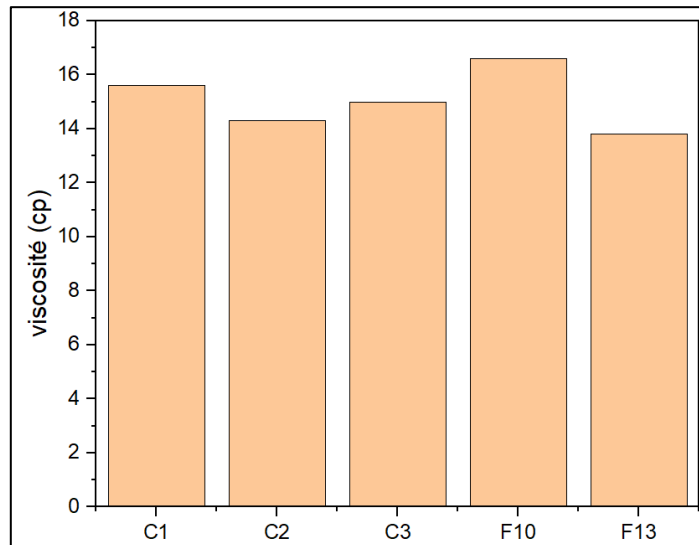


**Fig. IV.1** : viscosimètre rotatif (laboratoire de physique)

Dans cette expérience, et pour chaque test de viscosité nous utiliserons un volume de 30 ml d'huile dans une cuve spéciale à l'appareil. La mesure est effectuée à température ambiante de 30<sup>0</sup>C.

**Tableau IV.4** : résultats de mesure la viscosité

	La viscosité en CP
Échantillon 1 (C1)	15,6
Échantillon 2 (F10)	16,6
Échantillon 3 (F13)	13,8
Échantillon 4 (C2)	14,3
Échantillon 5 (C3)	15



**Fig. IV.2** : Résultats de mesure de la viscosité

- D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les valeurs de la viscosité sont élevées dans tous les échantillons, ce qui interprète l'état avancé de dégradation de l'isolation de transformateur.

#### **IV.3.2. Mesure de produits de décomposition dissous DDP**

La spectrophotométrie est un appareil utilisé pour faire une analyse quantitative dans divers domaines. Nous avons utilisé un spectrophotomètre UV/visible line 9400 de SECOMAM (figureIV.3)

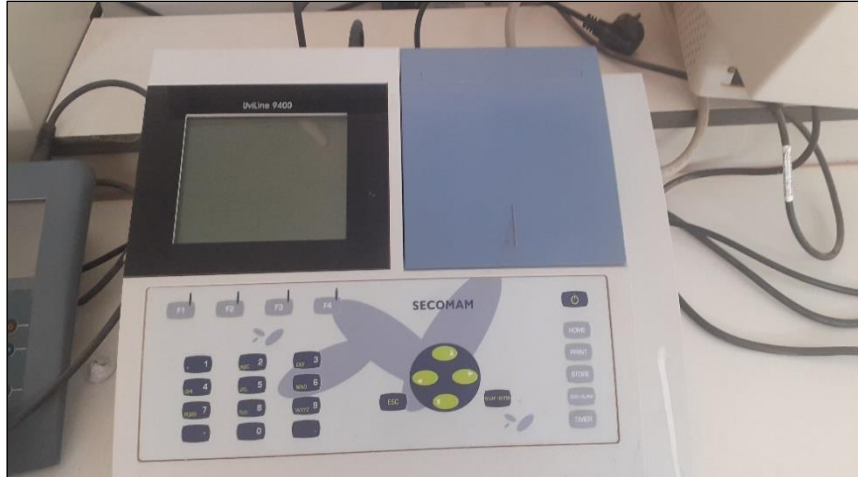


Fig.IV.3 :Spectrophotomètre UV/visible utilisé<sup>1</sup>

Le principe s'oppose sur l'application des rayonnements électromagnétiques sur l'échantillon, ces rayonnements à de gamme d'ultraviolet (185-400 nm) et la gamme visible (400-700 nm). (Figure IV.4)

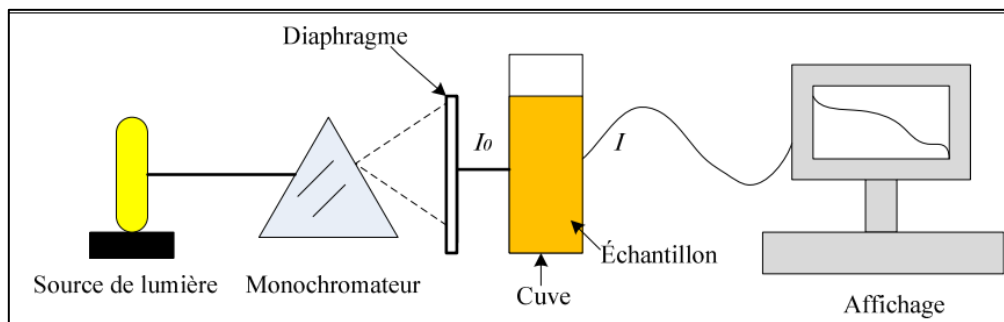
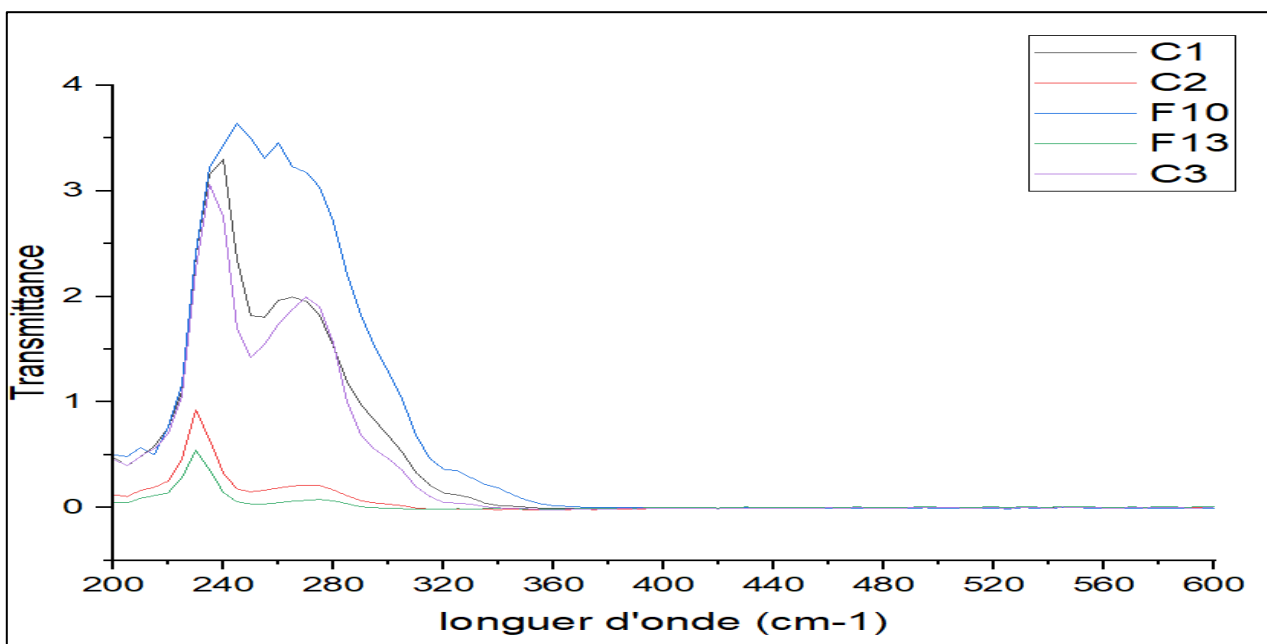


Fig. IV.4: structure de base d'un spectrophotomètre

Selon la norme ASTM D6802 [36], les produits de décomposition dissous peuvent être évalués par la spectrophotométrie en mesurant l'intégrale de la surface en dessous de la courbe d'absorbance sur une longueur d'onde comprise entre 240 et 400 nm (aire sous la courbe).

<sup>1</sup> Laboratoire de recherche de Génie de Procédés, Université de Laghouat UATL, Laghouat, Algérie



**Fig. IV.5 :** Courbe de l'absorbance illustrant les produits de décomposition dissous des échantillons

- D'après la figure IV.5, nous remarquons qu'à quantité de produits de décomposition solubles est plus élevée dans les échantillons C1, F10 et C3, cette augmentation est due à l'effet de diverses contraintes et réactions chimiques menant à la rupture des liaisons des molécules. L'échantillon F10 (Borak22) marque l'augmentation la plus importante, et nous constatons que les autres échantillons génèrent moins de produits de dégradation.

### IV.3.3. L'analyse par La spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier (FTIR)

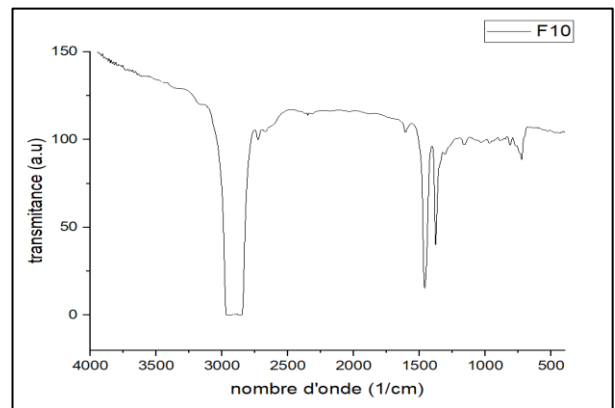
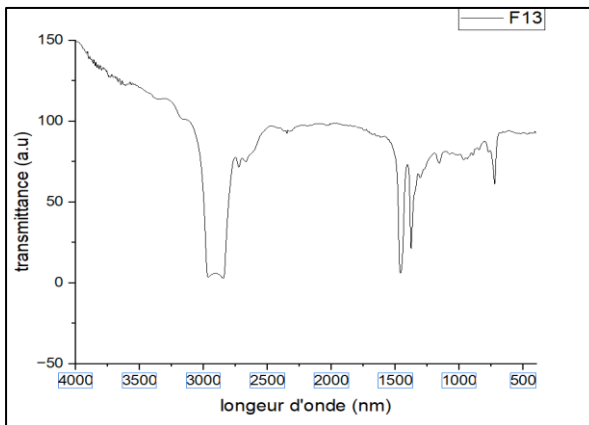
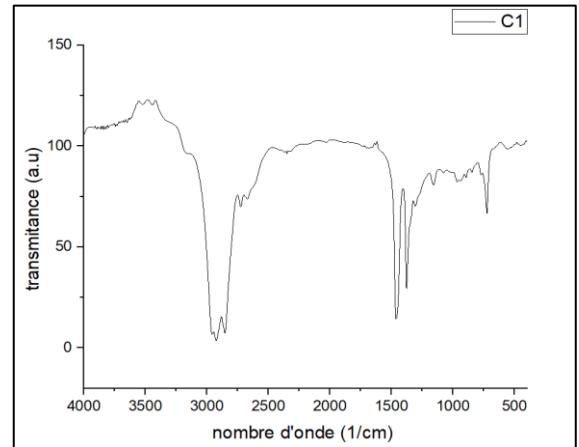
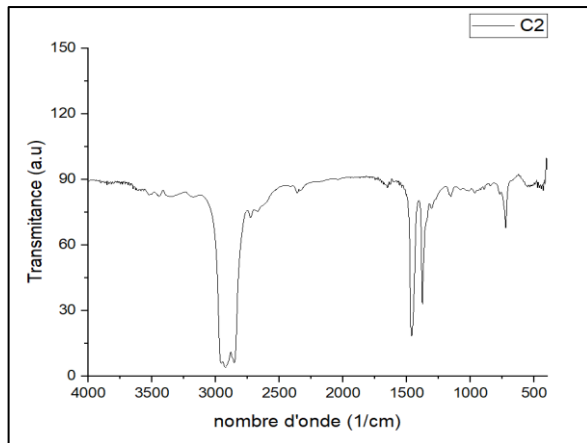
La spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier est une technique utilisée pour identifier les molécules et les groupes fonctionnels d'un matériau. L'analyse moléculaire de l'huile par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) fournit des informations directes sur les espèces moléculaires présentes dans l'huile. Cette sensibilité aux compositions moléculaires peut être utilisée pour évaluer la dégradation de papier isolant dans les transformateurs de puissance

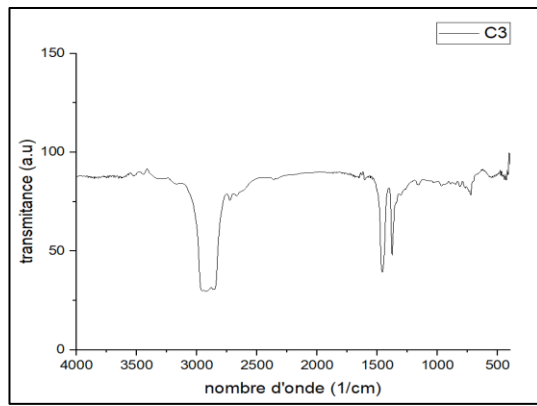
L'appareil utilisé dans cette expérience la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier FT/IR- 4200 de JASCO représenté dans la figure IV.6



**Fig. IV.6.** Spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier (FT/IR-4200) de JASCO (université de Laghouat- laboratoire de recherche)

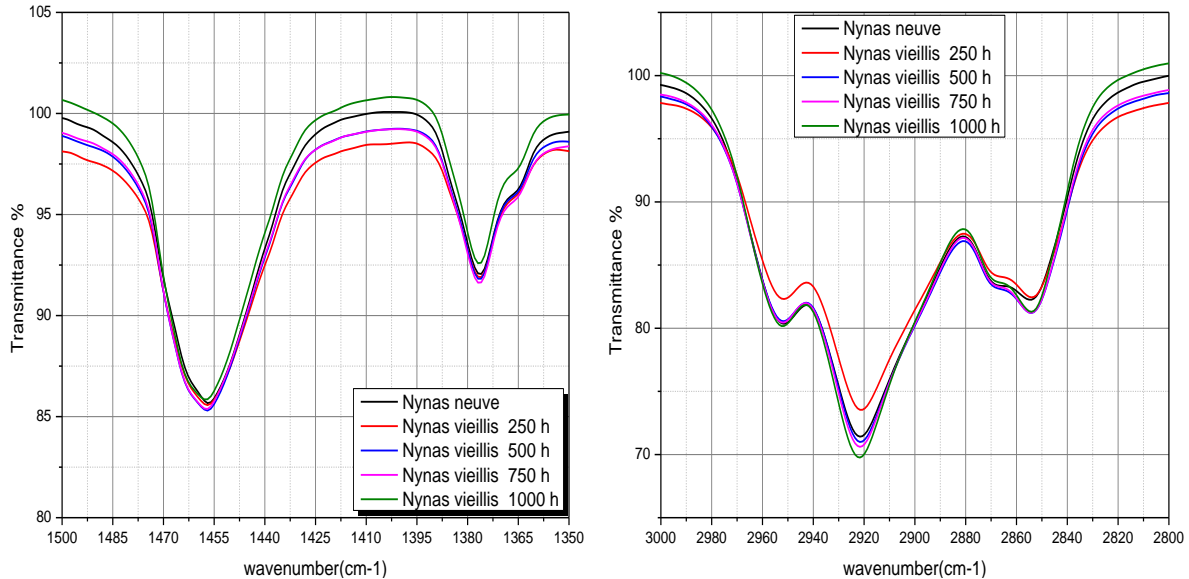
Les figures suivantes représentent les résultats des tests effectués par spectroscopie infrarouge avec transformée de Fourier (FTIR), sur les différents échantillons des huiles.





**Fig. IV.7** Résultats de spectroscopie IFTR, de chaque échantillon dans la gamme 500 à 4000 cm<sup>-1</sup>.

Comparativement avec des résultats de travaux de recherches précédents (Figure IV.8) [3], nous avons pu constater que les pics de groupes fonctionnels résultats dans les gammes d'absorbance trouvés sont probablement dus à la dégradation du papier isolant et à la rupture de chaîne cellulosique.



**Fig.IV.8** : Effet de la durée de vieillissement thermique sur la transmittance mesurée par la spectroscopie infrarouge dans la gamme allant de 500 à 3000 cm<sup>-1</sup>. [3]

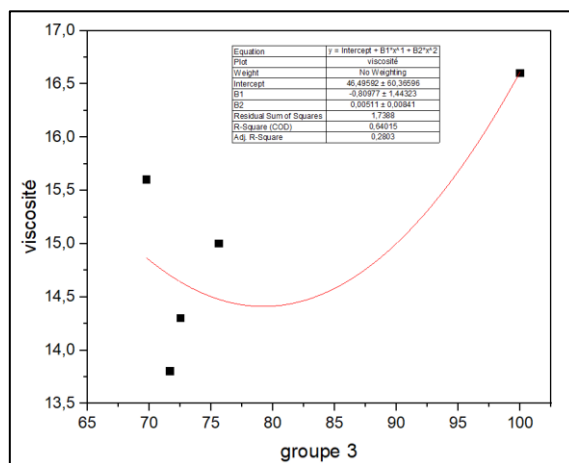
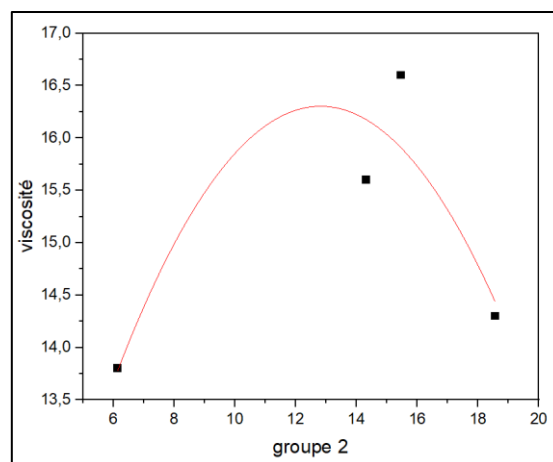
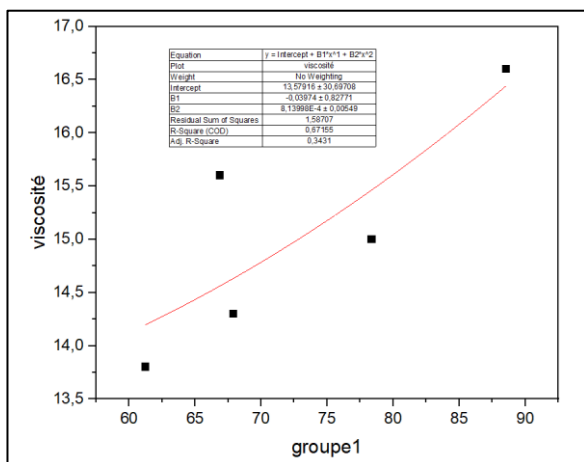
#### IV.4 Analyse de corrélation

La corrélation entre les caractéristiques traduisant le vieillissement de l'isolation de transformateur (DDP, Viscosité, FTIR, .....etc.) est étudiée afin de trouver une image claire sur la dégradation de l'isolation solide dans les transformateurs, à partir des informations obtenues par analyse de leurs huile isolante.

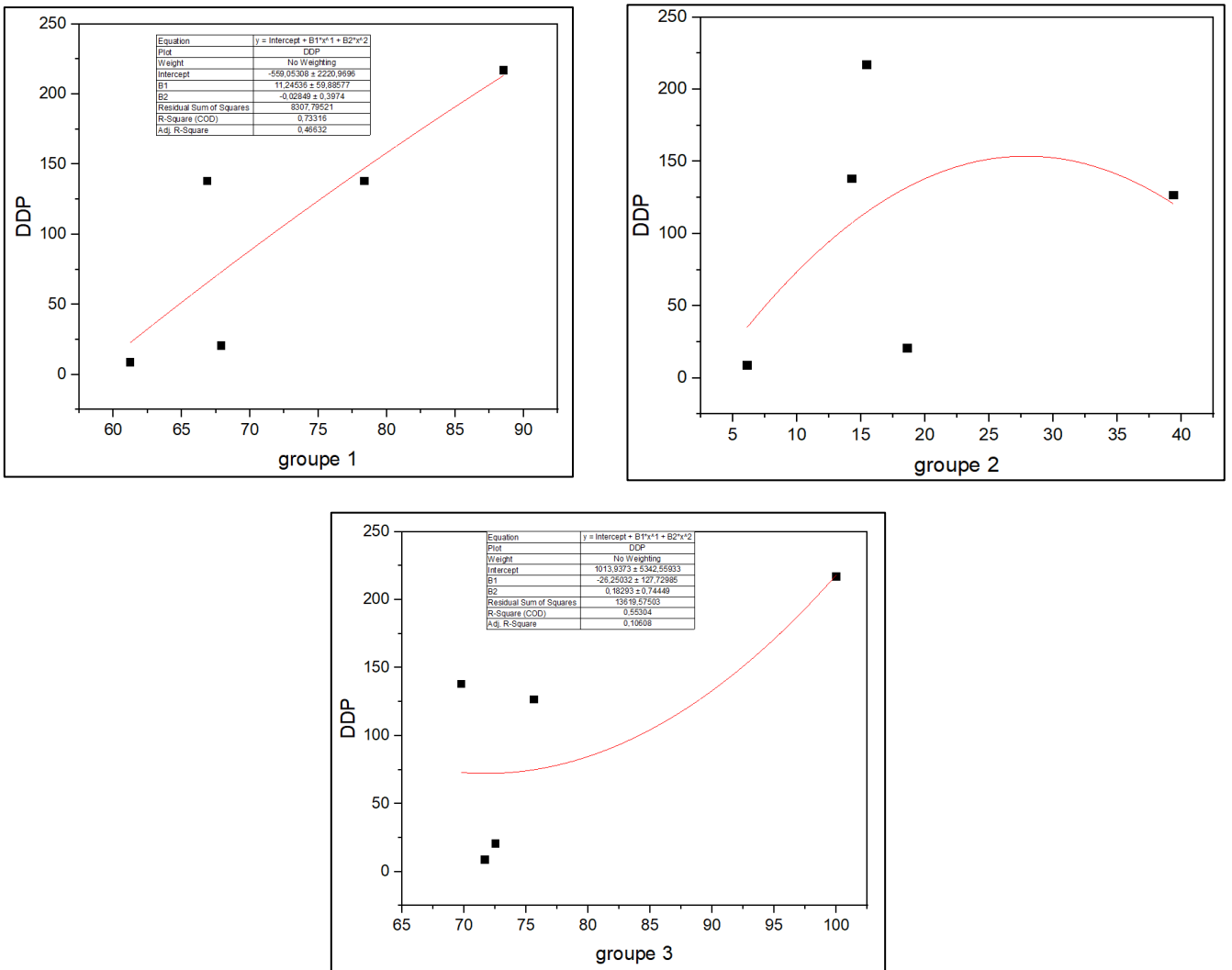
Le tableau IV.5, présente les coefficients de corrélation entre les résultats obtenus.

**Tableau IV.5** Coefficients de corrélation entre les différentes méthodes

IFTR	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
DDP	$R^2 = 0,73$	$R^2 = 0,19$	$R^2 = 0,55$
Viscosité	$R^2 = 0,67$	$R^2 = 0,82$	$R^2 = 0,64$



**Fig. IV.9** : Corrélation entre la viscosité et FTIR



**Fig.IV.10** : Corrélation entre DDP et FTIR

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse physique et analyse spectroscopiques ont été effectués, sur des huiles minérales de transformateur de puissance en service, il s'agit de : la mesure de la viscosité, mesure de produits de décomposition dissous DDP et l'analyse par la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier IRTF.

- La mesure de viscosité montre que la viscosité des échantillons est élevée par rapport la valeur standard de la viscosité ;
- La valeur de DDP pour les échantillons plus visqueux est le plus élevé ;
- Les pics de l'analyse de la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier donne des idées sur les groupes fonctionnels de défaut dans l'huile minérale isolante ;

- Le coefficient de corrélation entre la viscosité et la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier est 0.65, qui montre qu'il y a une certaine corrélation entre la viscosité et le spectre de FTIR (groupe 1) ;
- Aussi par apport le coefficient de corrélation entre DDP et FTIR, on peut dire qu'il y a une corrélation entre les produits de décomposition dissous et le première groupe fonctionnel du spectre de FTIR

De ce qui précède, on peut Le test FTIR a donné une image plus claire sur la dégradation de papier isolant.

# *Conclusion Générale*

# *Conclusion Générale*

Le présent travail est porté sur le développement des applications de l'analyse Physico-chimique des isolants solides Ils visent à développer des couplages entre ces techniques et d'établir des liens entre les propriétés chimiques et diélectriques et électriques de ces matériaux.

Nous avons choisi la spectroscopie infrarouge, comme références de corrélation vu la richesse en informations qu'elle peut fournir sur l'état de l'isolant solide.

Pour cette étude, nous avons choisi cinq échantillons de l'huile isolante provenant de différents transformateurs de puissance en service. Le papier utilisé dans ces transformateurs est le Kraft à base de cellulose.

Nous avons étudié les spectres infrarouge et UV de ces différents échantillons, nous avons identifié les groupes fonctionnels qui changent à cause de dégradation, et nous avons élaboré des corrélation entre la viscosité, la quantité des produits dissous (DDP), dans l'huile isolante et le changement dans les groupes fonctionnels.

Nous avons abouti à des résultats préliminaires, en ce qui concerne la corrélation entre la viscosité, le DDP et les groupes fonctionnel donnés par l'analyse spectroscopique infrarouge.

Comme perspective, nous voulons continuer ce travail, par d'autres tests plus approfondis pour mieux comprendre les groupes fonctionnels responsables aux changements des caractéristiques diélectriques de ce matériau. En distinguant les différentes fonctions chimiques dans les liquides isolants, et leur rapport avec les propriétés de dégradation de solide.

Nous voulons élargir ce travail pour faire une modélisation de dégradation du papier isolants en fonction de l'état de l'huile isolante traduits dans les spectres (IRTF),

## *Références bibliographiques*

- [1] : Mahroug erras Belkacem, Bekkar Said; Détection de la panne de transformateur (cas d'un transformateur utilisé par Sonekgaz-SPE-Hassi R'mel; Mémoire Master; Université de Laghouat, 2019
- [2] : Bouamra khalifa, Lakehal Abbas, Lassoued Aissa; Étude et maintenance de transformateur de puissance pour un poste de distribution, Mémoire Master Académique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2020
- [3] : Boudraa Saliha, « Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Applications de l'IA- », Thèse De Doctorat En Sciences En électrotechnique à l'université de Laghouat à l'Algérie, 2016
- [4] : Yazid Hadjadj, « Exploration De Techniques Physicochimiques Et Conception D'un Capteur En Ligne Pour Le Diagnostic Des Transformateurs De Puissance », Thèse Présentée À L'université Du Québec À Chicoutimi Comme Exigence Partielle Du Doctorat En Ingénierie
- [5] : Belmerdja Baya, Bendehiba Hind; Étude et maintenance des transformateurs de puissance; Mémoire Master; Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem; 2023
- [6]: Mayoux, C. (2000). Degradation of insulating materials under electrical stress. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 7, 590-601. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2000.879355>.
- [7]: Robert Fournié, « les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanismes de dégradation, applications industrielle » préface par Christian Dubanton. Edition Eyrolles, 61, Bd saint-germain paris 5<sup>e</sup>. 1990
- [8]: (Heywood, R., Emsley, A., & Ali, M. (2000). Degradation of cellulosic insulation in power transformers. I. Factors affecting the measurement of the average viscometric degree of

polymerisation of new and aged electrical papers., 147, 86-90. <https://doi.org/10.1049/IP-SMT:20000076>.)

[9]: Ghoneim, S. (2021). The Degree of Polymerization in a Prediction Model of Insulating Paper and the Remaining Life of Power Transformers. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/EN14030670>.

[10]: (Badicu, L., Gorgan, B., Dumitran, L., & Notingher, P. (2012). Assessment of transformer mineral oil condition based on dc and ac conductivity. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6311499>.)

[11]: Kim, J., & Han, S. (2007). Analysis of Produced By-products Due to Oil/Paper Degradation on Power Transformers. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 56, 1561-1565.

[12]: Benabed Fadila, « Contribution à l'amélioration des techniques de diagnostic des isolants solides utilisés dans les équipements de puissance » THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES à l'université du Laghouat à l'Algérie, 2019

[13]: A. Bouaicha, « Application De Techniques Modernes Au Diagnostic Des Transformateurs De Puissance », Thèse présentée À L'université Du Québec À Chicoutimi Comme Exigence Partielle Du Doctorat En Ingénierie 2014

[14]: Koutoua Simon KASSI, « Étude de l'isolation hybride en vue de son application dans les transformateurs de puissance », mémoire de la maîtrise en ingénierie présenté à l'université du Québec à Chicoutimi, Décembre 2013.

[15]: Saliha Boudraa, « Stage CD Octobre 2012- rapport visé- », Chaire de recherche sur les isolations liquide et Mixte, Isolime, Université du Québec à Chicoutimi, Canada

[16]: : Kouassi, K., Fofana, I., Cissé, L., Hadjadj, Y., Yapi, K., & Diby, K. (2018). Impact of Low Molecular Weight Acids on Oil Impregnated Paper Insulation Degradation. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/EN11061465>

[17]: Yang, Z., Zhou, Q., Wu, X., & Zhao, Z. (2019). A Novel Measuring Method of Interfacial Tension of Transformer Oil Combined PSO Optimized SVM and Multi Frequency Ultrasonic Technology. *IEEE Access*, 7, 182624-182631. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2954899>.

[18]: ASTM, D971-12, "Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method", 2012.

[19]: D-3612, "Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography"

[20]: International Organization for Standardization (ISO), « Produits pétroliers – Liquides opaques et transparent – Détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique », Designation 3104, Octobre 1994

[21]: The American Society for Testing and Materials, «Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity) », Designation 445-09, Annual Book of Standards, Vol. 05.01, 2009

- [22]: The American Society for Testing and Materials, « Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes», Designation D877-02, Annual Book of Standards, Vol. 2002
- [23]: Comité d'Electrotechnique Internationale, « Liquides isolants – Mesure de la tension de claquage à fréquence industrielle - Méthode d'essai », Norme CEI, Désignation 60156, Août 1995
- [24] : Boudraa saliha, « Rapport de stage- rapport visé », Laboratoire des Analyses des Huiles Diélectriques de l'Entreprise de Réparation des Transformateurs Électriques SKMK (ex. transfo centre) -SONELGAZ de Blida, 2005.
- [25] : Comité d'Électrotechnique Internationale, « Liquides isolants - Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique ( $\tan\delta$ ) et de la résistivité en courant continu », Norme Internationale CEI 247, troisième édition, 2004
- [26]: The American Society for Testing and Materials, « Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids», Designation 924, Annual Book of Standards, Vol. 10.03.2008.
- [27]: Christophe Perrier. Etude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance – Recherche d'un mélange optimal. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2005. Français
- [28]: Janvier Sylvestre N'Cho, F. K. Konan, Betie Amidou, « Diagnostic de l'état de dix transformateurs du réseau électrique de Côte d'Ivoire » Afrique Science Revue Internationale des Sciences et Technologie. January 2019
- [29]: IEC-1198, Mineral Insulating Oils - Methods for the Determination of 2-Furfural and Related Compounds
- [30]: ASTM Designation D4243, "Standard Test Method for Measurement of Average Viscometric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers and Boards," Annual Book of ASTM Standards, Vol: 10.02, 99 (renouvé 2009).
- [31]: I. Fofana, I. M. Imani, M. Farahani, E. Gockenbach and H. Borsi, «Influence of transformer oil aging byproducts on the dissolved gas analysis», proceeding of the 18th International Symposium on High Voltage Eng., ISH, Seoul, Korea, August 2013
- [32]: Janvier Sylvestre N'CHO, « Développement de nouvelles méthodes de Diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance », Thèse doctorat, École générale de Lyon, Mars 2011.
- [33]: Abi MUNAJAD, CAHYO SUBROTO and SUWARNO, «Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Analysis of Transformer Paper in Mineral Oil-Paper Composite Insulation under Accelerated Thermal» Aging School of Electrical Engineering and Informatics, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia, 4 February 2018
- [34] : A. Bouaicha, « Contribution À L'application De Techniques Traditionnelles Et Modernes Au Diagnostic Des Transformateurs De Puissance », Maitrise en ingénierie, séminaire 2, Université de Québec/Chicoutimi, 2008

[35]: CEI 60475, Mineral Insulating Oils - Method of sampling insulating liquids

[36]: ASTM Designation D6802, "Test Method for Determination of the Relative Content Of Dissolved Decay Products in Mineral Insulating Oils by Spectrophotometry," Annual Book of ASTM Standards

## Résumé

Les isolants solides sont utilisés dans les transformateurs de puissance sous forme de papier cellulosique imprégné d'huile minérale, ils assurent plusieurs fonctions, la plus importante c'est l'isolation électrique. Les causes des défaillances de cet appareil électrique sont étroitement liées aux problèmes survenus au niveau de l'isolation électrique, ce qui nécessite des recherches sur les mécanismes de dégradation et de vieillissement des matériaux isolants.

Le présent travail, vise la recherche de moyens rapides et moins coûteux mais à la fois fiable pour le diagnostic des isolants solides. Des échantillons de l'huile minérale collectés des différents transformateurs en service ont été choisis. Nous avons réalisé les tests de viscosité et la spectrophotométrie UV sur ces échantillons, et par la suite, nous avons mis les mêmes échantillons sous analyse spectroscopique par transformé de Fourier aux infrarouges (IRTF) et nous avons interprété les différents spectres obtenus. Les résultats de l'analyse de corrélation entre les produits de dégradation dans l'huile, la viscosité, et les réponses de groupes fonctionnels des échantillons liquides aux spectroscopies IRTF, délivrent une image plus ou moins clair sur les traces de dégradation de papier isolants dans les transformateurs, ce qui peut servir avec d'autres améliorations ou développement à surveiller indirectement et en ligne l'état du papier isolant dans les transformateurs en service.

**Mots clefs :** transformateurs de puissance, papier isolant, vieillissement, spectrophotométrie UV, spectroscopie infrarouge, viscosité.

## Abstract

Solid insulators are used in power transformers in the form of cellulose paper impregnated with mineral oil; they provide several functions, the most important of which is electrical insulation. The causes of failures of this electrical machine are closely linked to problems occurring with electrical insulation, which requires research into the mechanisms of degradation and aging of insulating materials. The present work aims to research rapid and less expensive, and reliable means for the diagnosis of solid insulators. Mineral oil samples collected from different transformers in service were chosen. We carried out viscosity tests and UV spectrophotometry on these samples, and subsequently, we put the same samples under spectroscopic analysis by Fourier transform of infrared spectra (IRTF) and we interpreted the different spectra obtained. The results of the correlation analysis between the degradation products in the oil, the viscosity, and the responses of functional groups of the liquid samples to FTIR spectroscopies, deliver picture so closely to the degradation traces of insulating paper in transformers, which can be used with other improvements or developments to, indirectly and online monitoring the condition of the insulating paper in the transformers in service.

**Key words:** power transformers, insulating paper, aging, UV spectrophotometry, infrared spectroscopy, viscosity.

## ملخص

تستخدم العوازل الصلبة في محولات الطاقة على شكل ورق السليلوز المشرب بالزيوت المعدنية، فهي تؤدي عدة وظائف أهمها العزل الكهربائي. ترتبط أسباب أعطال هذا الجهاز الكهربائي ارتباطًا وثيقًا بالمشاكل التي تحدث في العزل الكهربائي، الأمر الذي يتطلب البحث في آليات تدهور وتقدم المواد العازلة.

يهدف العمل الحالي إلى البحث عن وسائل سريعة وأقل تكلفة ولكن في نفس الوقت موثوقة لتشخيص العوازل الصلبة. تم اختيار عينات الزيوت المعدنية التي تم جمعها من المحولات المختلفة في الخدمة. أجرينا اختبارات اللزوجة والقياس الطيفي للأشعة فوق البنفسجية على هذه العينات، وبعد ذلك، وضعنا نفس العينات تحت التحليل الطيفي بتحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR) وقمنا بتفسير الأطياف المختلفة التي تم الحصول عليها. إن نتائج تحليل الارتباط بين نواتج التحلل في الزيت واللزوجة واستجابات المجموعات الوظيفية للعينات السائلة لطيف FTIR، تقدم صورة واضحة إلى حد ما عن آثار تحلل الورق العازل في المحولات، والتي يمكن استخدامها مع تحسينات أو تطويرات أخرى لمراقبة بشكل غير مباشر حالة الورق العازل في المحولات الكهربائية النشطة.

**الكلمات المفتاحية:** محولات الطاقة، الورق العازل، التقدم، قياس الطيف الضوئي للأشعة فوق البنفسجية، التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء، اللزوجة

